

21

629.2015.  
035

A465

**В. Л. АЛЕКСАНДРОВ**  
Заслуженный деятель науки и техники,  
доктор технических наук, профессор

# ВОЗДУШНЫЕ ВИНТЫ

*Допущено*  
**Министерством высшего образования СССР**  
*в качестве учебного пособия*  
*для авиационных вузов*

ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
ИЗДАТЕЛЬСТВО ОБОРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
Москва 1951

W. 83

~~11837~~  
11415  
www.vokb

---

В книге освещены вопросы подбора, конструирования, расчета, производства, испытаний и эксплуатации воздушных винтов и дана классификация их по основным конструктивным признакам и по особым свойствам, с показом схем действия и конструктивного оформления основных узлов.

В разделе аэродинамики в строгой, но доступной форме дано законченное изложение основных теорий воздушного винта, включая новейшие достижения.

В разделе динамики значительно полнее, чем в других работах по воздушным винтам, дана физическая картина и произведен анализ всего комплекса сил и моментов, действующих при работе винта.

В книге также дан подробный анализ современных условий и правил эксплуатации винтов.

Производство винтов изложено кратко, с учетом специфических черт технологии. Особо выделен вопрос уравнивания (балансировки) винтов в процессе производства и эксплуатации. Дан последовательный анализ причин статической, динамической и аэродинамической неуравновешенности, показаны аналитические и экспериментальные способы определения величин неуравновешенности каждого вида, описаны применяемые способы их устранения.

Книга является учебным пособием для студентов авиационных вузов, но может служить также в качестве практического пособия для инженеров, занимающихся расчетом и конструированием винтов.

---

*Памяти незабвенного учителя  
Николая Егоровича Жуковского—  
создателя первой рациональной  
теории воздушного винта посвя-  
щает свой труд автор.*



Н. Е. Жуковский



## ПРЕДИСЛОВИЕ

В основу настоящей книги легли лекции, которые автор читал по курсу винтов в течение ряда лет в Московском Авиационном Институте им. Серго Орджоникидзе.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для студентов, специализирующихся по конструированию самолетов и авиадвигателей.

Кроме своего прямого назначения, книга может оказать существенную помощь конструкторам винтов, а также инженерно-техническим работникам конструкторских бюро самолетостроительных и моторостроительных заводов.

Обычно до сих пор книги по винтам носили по большей части односторонний характер — рассматривалась преимущественно аэродинамическая сторона работы винта и лишь побочно рассматривались вопросы прочности и конструкции. Такое положение на винт сложилось исторически, так как при зарождении авиации винты были деревянные, по конструкции, производству и эксплуатации не сложные, и самая большая трудность при проектировании винта состояла в аэродинамическом расчете и подборе его к самолету и двигателю. Поэтому проблемой аэродинамики винта и заинтересовались такие наши ученые-аэродинамики, как Н. Е. Жуковский, В. П. Ветчинкин, Б. Н. Юрьев. С развитием винтов их стали делать из металла, что потребовало при их изготовлении применения тяжелого сложного оборудования; затем они превратились в механизмы (винты изменяемого шага), которые все усложнялись в связи с ростом требований к винтам, и в настоящее время винт представляет собой уже самый сложный механизм. Задача проектирования современного винта охватывает конструкторскую, аэродинамическую, динамическую, производственную и эксплуатационную задачи. Все эти задачи почти равноправны. Поэтому автор в настоящей книге и рассматривает винт с этих пяти точек зрения. Особенно возросло за последнее время значение динамической задачи. Действительно, всякий авиационный работник хорошо знает, что в эксплуатации самолетов много забот причиняет тряска самолета, источником которой может служить как двигатель, так и неуравновешенный винт; поэтому вопросу уравнивания винтов необходимо уделять должное внимание. Между тем в литературе имеется ничтожное число статей, касающихся такого важного

вопроса, как уравнивание винтов. В силу этого в настоящей книге этому вопросу уделено особое внимание.

Для того чтобы не увеличивать чрезмерно объема книги, в каждой из указанных частей автору пришлось останавливаться лишь на наиболее важных, узловых вопросах.

Так как производство винтов есть большая область техники, то естественно автор не мог останавливаться подробно на нем, а ограничился лишь описанием специфических процессов, характерных для производства винтов, — изготовления лопастей и уравнивания винтов.

В части эксплуатационной основное внимание уделено испытанию опытных винтов.

Автор с гордостью может заявить, что проблема воздушного винта разрешена полностью русскими и советскими учеными и инженерами. Поэтому настоящая книга и написана на основе только отечественных работ. Основоположителем теории винта является Н. Е. Жуковский, а развитие теории винта было сделано школой Жуковского — его учениками и учениками его учеников. Поэтому вопросы воздушного винта всегда тесно связывались с именем Жуковского.

В вводной части автор дает краткий исторический очерк по развитию винтов, не претендующий на полноту изложения, а лишь отмечающий основные этапы развития воздушного винта.

Для того чтобы сразу ввести читателя в курс дела, в первой главе даются основные сведения по воздушным винтам, их назначению, принципам работы и главные характеристики; лишь после этого дается исторический очерк по винтам.

Что касается применяемой в книге терминологии, то, так как к сожалению терминология по винтам пока еще не разработана, автор применял наиболее ходовую в авиационном мире терминологию, а также терминологию, применявшуюся Н. Е. Жуковским. Основные буквенные обозначения, принятые в книге, приведены в приложении 8.

В заключение автор считает своим приятным долгом принести благодарность всем рецензентам и лицам, просмотревшим рукопись и сделавшим весьма ценные указания, которые автор принял во внимание при окончательном просмотре рукописи.

*В. Л. Александров*

*Москва, июнь 1951 г.*

---

ЧАСТЬ I

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВИНТАХ

---

Глава I

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

#### § 1. Назначение и применение воздушного винта

Для того чтобы самолет мог держаться в воздухе и лететь в нужном направлении, необходимо затрачивать мощность. Планеры—бесмоторные самолеты — поддерживаются в воздухе энергией восходящих токов воздуха, которые являются сравнительно случайными, и поэтому планер не может получить широкого распространения как самостоятельное транспортное средство. Для того чтобы не зависеть от случайных явлений природы, пользуются запасом энергии, находящимся на самом самолете, и используют эту энергию при помощи двигателя. Для создания подъемной силы самолета необходимо движение, а чтобы получить это движение, необходимо иметь силу тяги. В воздухе силу тяги можно получить в виде силы реакции отброшенной винтом струи воздуха или в виде силы реакции быстро вытекающих газов — продуктов сгорания.

Таким образом воздушный винт, создавая силу тяги, преобразует энергию двигателя в работу, совершаемую при поступательном движении самолета.

Воздушный винт применяется в тех случаях, когда нет других способов получения тяговой силы в воздухе,— так было в авиации до появления реактивных двигателей, или когда применение винта выгодно по сравнению с другими способами создания тяги. Поэтому наибольшее применение воздушный винт имеет в авиации (фиг. 1), и все его развитие и усовершенствование связано с развитием самолетов. Воздушный винт применяется на дирижаблях и в вертолетах (геликоптерах), являясь в последних основным агрегатом, создающим подъемную силу. Кроме того, успешно применяется воздушный винт на аэросанях (фиг. 2), на глиссерах (фиг. 3) и, наконец, в отдельных случаях может применяться на так называемых аэромобилях — автомобилях, приводимых в движение воздушным винтом.



Самолетный воздушный винт состоит из следующих частей:

1. Нескольких лопастей.
2. Втулки, которая служит для передачи крутящего момента вала двигателя лопастям и в которой крепятся лопасти.
3. Механизма поворота лопастей.
4. Различных деталей оборудования, обслуживающего винт.

Как увидим далее, винт должен иметь механизм поворота лопастей относительно их осей для совершения возможно большей работы. Поворот лопастей осуществляется автоматически посредством регулятора винта. Для того чтобы втулка винта создавала меньшее сопротивление полету, на нее надевается обтекатель, так называемый кок винта, который вращается вместе с винтом



Фиг 1 Воздушные винты на самолете

Для того чтобы лопасти винта не покрывались льдом в полете, на винте применяется специальное устройство — противообледенитель.

Вследствие этого воздушный винт представляет собой весьма сложный механизм, и изучение воздушного винта связано с целым рядом вопросов, основными из которых являются следующие

1. **Аэродинамика винта.** Винт предназначен для создания тяги с наилучшим использованием мощности двигателя, а это связано с разработкой аэродинамически наилучших форм лопастей винта.

2. **Динамика винта.** Как увидим далее, на винт действуют различные силы, которые вызывают его движение и деформацию его частей. Наличие деформаций связано с прочностью винта. Прочность винта должна быть максимально гарантирована, так как поломки основных его частей в большинстве случаев ведут к авариям и катастрофам.

Следовательно, от прочности винта зависит жизнь людей. В практике советского самолетостроения и, в частности, винтостроения вопросы безопасности полета играют доминирующую роль, и поэтому при конструировании и изготовлении винтов на динамику винта необходимо обращать особое внимание и добиваться полнейшей гарантии прочности всеми возможными пу-

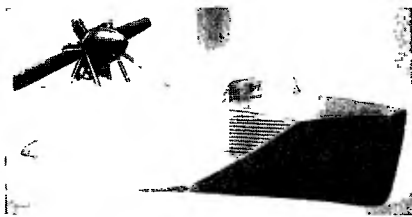
тями — расчетом, экспериментальными работами, испытаниями и т. д.

Неравномерное по времени действие сил порождает неравномерность хода винта. Эта неравномерность может быть вызвана также силами, получающимися от неуравновешенности винта, и вызывает при этом тряску самолета.



Фиг. 2. Воздушный винт на аэросанях.

Наконец, с динамикой винта связан шум, производимый им. Обычно шум винта преобладает перед другими шумами на самолете. Оказывая вредное воздействие на экипаж, шум самолета в военной обстановке также помогает врагу обнаружить его; поэтому борьба с шумом на самолете и особенно с шумом винта крайне необходима, и при конструировании винта следует всегда стремиться к возможному снижению шума.



Фиг. 3. Воздушный винт на глоссере

3. Конструкция винта. Винт представляет собой сложный механизм, который требует тщательного и продуманного конструирования, с тем чтобы его можно было наиболее легко изготовить и чтобы он был прост в эксплуатации и прочен.

4. Производство винтов. Всякий конструктор винтов должен хорошо знать технологию их производства, так как иногда ценность остроумной конструкции снижается из-за сложности ее изготовления.

5. Эксплуатация винтов. Под понятием «эксплуатация винтов» следует подразумевать сумму всех вопросов, которые связаны с применением воздушных винтов на практике. Первый этап эксплуатации винтов новой конструкции (*опытных винтов*) называется *испытанием винтов*. Во время испытаний выявляются положительные и отрицательные стороны данной конструкции.

Могут производиться испытания и серийных, уже бывших в эксплуатации, винтов, если необходимо выявить или уточнить какие-либо свойства или определить качество отдельных узлов.

В настоящем курсе мы подробно остановимся только на четырех областях изучения винтов — конструкции, аэродинамике, динамике и эксплуатации винтов. На производстве винтов, имеющем более самостоятельное значение и связанном с обширным рядом вопросов, мы остановимся менее подробно, тем более что производство винтов в основном близко к производству деталей моторостроительной промышленности. Из большого числа вопросов производства винтов мы остановимся подробно лишь на чисто винтовом вопросе уравнивания винтов. Эта часть производства винтов мало освещена в литературе, а между тем она имеет весьма большое значение для винтостроения.

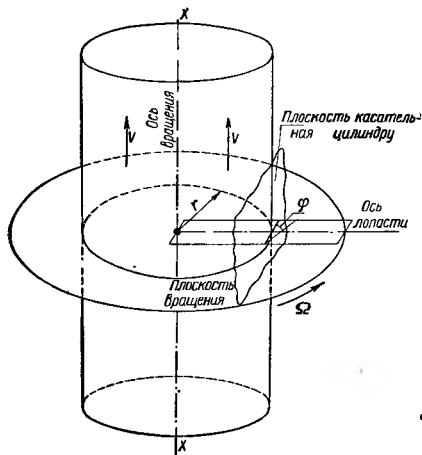
Попутно с уравниванием винтов мы вкратце коснемся описания технологического процесса производства лопастей.

## § 2. Принцип работы воздушного винта

Винт создает тягу в воздухе, действуя на него подобно крылу. Только крыло самолета обычно движется поступательно, тогда как лопасть винта движется и поступательно и вращательно. Предположим, что лопасть винта представляет собой по форме вытянутый прямоугольник, один размер которого мал по сравнению с другим, вращающийся с угловой скоростью  $\Omega$  около оси  $x$  —  $x$  (фиг. 4), проходящей у одного края этого прямоугольника. Плоскость прямоугольника составляет некоторый угол  $\varphi$  с плоскостью вращения, т. е. плоскостью, перпендикулярной оси вращения, и прямоугольник движется также поступательно в направлении оси вращения со скоростью  $V$ . Разсечем нашу лопасть цилиндром радиуса  $r$ , ось которого совпадает с осью  $x$ ; получим в сечении вытянутый прямоугольник. Так как обычно ширина лопасти невелика по сравнению с ее длиной, то сечение цилиндром заменяется близким им, но удобным для вычерчивания сечением плоскостью, касательной к цилиндру и перпендикулярной оси лопасти (фиг. 4). Посмотрим, как будет ориентировано данное сечение по отношению к направлению скорости движения лопасти, или, что одно и то же, как будет набегать на это сечение поток воздуха. Так как лопасть совершает сложное движение — поступательное и вращательное, то нужно сложить эти два движения. Скорость вращения равна  $\Omega r$ , скорость поступательная (скорость полета) равна  $V$ , причем обе эти скорости перпенди-

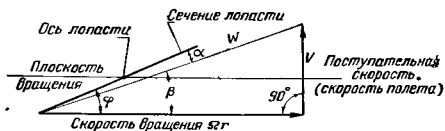
куляры друг другу (фиг. 5). Геометрическая сумма этих скоростей будет  $W$ . Угол  $\alpha$ , под которым лопасть встречает поток, обычно меньше угла  $\varphi$ .

Если взять другое сечение плоскостью, касающейся цилиндра меньшего или большего радиуса, то составляющая скорость  $V$



Фиг. 4. Образование сечения лопасти.

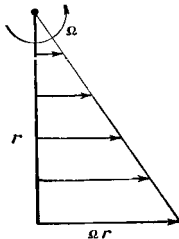
остается той же, а окружная скорость  $\Omega r$  будет меньше или больше; последняя изменяется по линейному закону, становясь на оси винта равной нулю (фиг. 6). Так как лопасть мы взяли плоской, то угол  $\varphi$  на всех радиусах будет одним и тем же, а



Фиг. 5. Треугольник скоростей у сечения лопасти.

угол  $\beta$  подхода струи к сечению будет неодинаковым на разных радиусах из-за изменения по радиусу  $\Omega r$ . Следовательно, с уменьшением радиуса  $r$  угол  $\beta$  увеличивается, а угол  $\alpha = \varphi - \beta$  уменьшается и может стать равным нулю или даже отрицатель-

ным. Между тем, из аэродинамики крыла известно, что крыло дает положительную подъемную силу тем большую, чем больше угол атаки  $\alpha$  и наиболее выгодно работает на углах, близких к углам наибольшего качества  $C_{y}/C_x$ . Поэтому, для того чтобы заставить лопасть давать наибольшую тягу при наименьшей затрате энергии, следует сечения ставить под наимыгоднейшими углами атаки, и, следовательно, угол  $\alpha$  должен быть переменным по радиусу — меньшим на конце лопасти и большим вблизи оси вращения — лопасть должна быть скручена.



Фиг. 6. Линейное убывание окружной скорости вдоль лопасти винта.

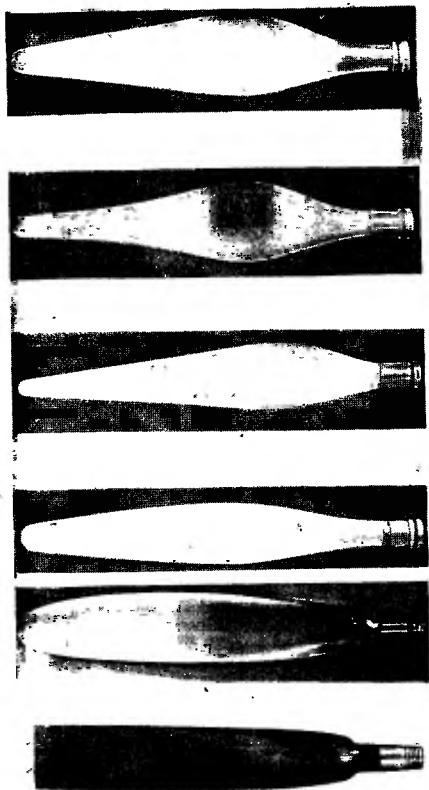
Из условия наимыгоднейшей работы лопасти форму ее делают не только прямоугольной, но и суживающей к концу и к оси вращения винта (фиг. 7). Для удовлетворения аэродинамическим требованиям сечению лопасти придают форму сечения крыла самолета.

Винты могут быть однолопастными, двухлопастными, трехлопастными, четырехлопастными и с большим количеством лопастей. Однолопастные винты практически не применяются, во-первых, потому, что они требуют уравнивающего груза, который при вращении винта создает излишнее лобовое сопротивление, и, во-вторых, потому, что они не аэродинамически, ни конструктивно не дают никаких преимуществ перед двухлопастными. О том, когда какое число лопастей следует применять, указано в § 5, гл. XIII.

Как было указано, воздушный винт служит для преобразования энергии. Вообще говоря, могут быть три вида такого преобразования.

1. Преобразование энергии двигателя в работу поступательного движения самолета.
2. Преобразование энергии двигателя в кинетическую энергию движущейся струи воздуха.
3. Преобразование энергии движения воздуха в механическую работу.

В первом случае мощность на валу какого-либо двигателя, выражаемая величиной  $M\Omega$  — произведением вращающего момента на угловую скорость, превращается в мощность поступательного движения самолета, выражаемую величиной  $PV$  — произведением получаемой на винте тяги  $P$  на скорость движения винта  $V$ . В этом случае воздушный винт является «создателем тяги», а эта последняя при соответствующих условиях производит движение. Мы назовем винт при такой его работе «гребным воздушным винтом», или просто «воздушным винтом». При преобразованиях получаются потери, ко-



Фиг 7 Различные формы лопастей винга.

торые оцениваются некоторым коэффициентом, обычно называемым *коэффициентом полезного действия*  $\eta$ , который представляет собой отношение мощности, переданной на винт, к мощности, получаемой от него.

В нашем случае воздушного винта как создателя тяги коэффициент полезного действия будет

$$\eta = \frac{PV}{M\Omega}. \quad (1)$$

Движение винта будет установившимся только в том случае, когда сумма его силы тяги и других сил,двигающих данное тело, равна сопротивлению, которое получается у тела при данной скорости.

Во втором случае мощность на валу двигателя превращается в мощность, имеющуюся в струе воздуха. Винт в этом случае является «создателем потока воздуха» и его называют «вентилятором». Если в первом случае от винта как создателя тяги важно было получить возможно большую тягу, то во втором случае от вентилятора как создателя потока важно получить возможно большую скорость потока, т. е. возможно больший расход воздуха, который определяется как произведение площади диска вентилятора на скорость потока:

$$Q = F \cdot V.$$

Мощность двигателя, вращающего вентилятор, равна  $M\Omega$ , а преобразованная мощность за вентилятором равна  $Qp$ , где  $p$  — перепад давлений до и после диска вентилятора в его струе; отношение мощностей и будет коэффициентом полезного действия вентилятора

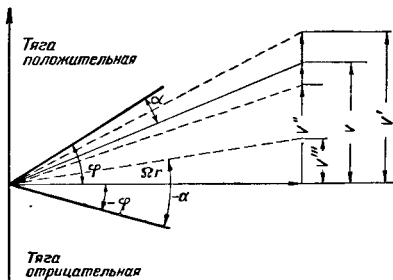
$$\eta_{\text{вент}} = \frac{Qp}{M\Omega}. \quad (2)$$

В третьем случае винт является сам «машиной—двигателем» и его называют «ветряным двигателем» или «ветряком».

В настоящем курсе мы будем рассматривать лишь гребной винт, т. е. винт, создающий тягу — положительную или отрицательную, и с этой точки зрения будем изучать его конструкцию. Остальные разновидности винта — вентиляторы и ветряные двигатели — имеют специфические особенности и изучаются в специальных курсах.

Рассмотрим одно сечение лопасти (фиг. 8), установленное под углом  $\varphi$  к плоскости вращения винта и находящееся на расстоянии  $r$  от оси винта. Пусть винт вращается с угловой скоростью  $\Omega$  и движется поступательно со скоростью  $V$ . Тогда на данном режиме гребного винта получим треугольник скоростей у сечения лопасти, изображенный на фиг. 8. Предположим далее, что угол атаки  $\alpha$  является близким к наиболее выгодному.

При увеличении только поступательной скорости до величины  $V'$  треугольник скоростей изменится, угол атаки  $\alpha$  уменьшится, сопротивление лопасти вращению также уменьшится, и винт, как говорят, «облегчится» — станет «легким», а поэтому при неизменной мощности двигателя число оборотов винта должно увеличиться — винт начнет «разгоняться» до тех пор, пока вновь не наступит равенство между поглощаемой и передаваемой двигателем винту мощностями.



Фиг. 8. Изменение скоростного треугольника у сечения лопасти при изменении режима работы винта.

Наоборот, при уменьшении скорости до величины  $V''$  угол атаки увеличится — винт станет «тяжелым» и обороты винта при неизменной мощности уменьшатся. Следовательно, для того чтобы при изменении скорости поддерживать одно и то же число оборотов винта, надо, чтобы угол атаки оставался неизменным, а для этого следует изменять угол установки лопасти  $\varphi$ . Такое изменение углов установки лопасти производится в полете у так называемых винтов *изменяемого шага*. Более подробно о них будет сказано в части II.

При отсутствии поступательной скорости  $V$ , т. е. при работе винта на месте, угол  $\varphi$  равен углу атаки  $\alpha$ . Если при этом угол установки  $\varphi$  остался таким же, каким он был в полете, то, следовательно, угол атаки увеличился и двигатель уменьшит число оборотов. Для того чтобы двигатель при работе на месте развивал то же число оборотов, что и в полете, необходимо уменьшить угол установки. Отсюда можно заключить, что наименьший потребный угол установки лопасти в диапазоне скоростей самолета от нуля до наибольшей будет при работе винта «на месте», т. е. при нулевой скорости.

Предположим, что двигатель выключен, т. е. он не передает винту никакой мощности, а винт движется все же со скоростью  $V$ . Если в начальный момент угол  $\varphi$  настолько велик,



что винт дает положительную тягу, то вследствие отсутствия мощности, передаваемой на винт, силы сопротивления, развивающиеся на лопастях, будут их тормозить, отчего обороты винта будут уменьшаться и одна сторона скоростного треугольника может уменьшиться настолько, что угол атаки  $\alpha$  станет отрицательным. Лопасты будут создавать сопротивление и энергия потока будет передаваться винту. Предположим далее, что винт на валу полностью заторможен (остановлен) и движется со скоростью  $V$ ; сопротивление его будет меньше, чем при вращении. Если же при остановленном винте увеличивать угол  $\varphi$ , то сопротивление будет уменьшаться и достигнет наименьшей величины при угле  $\varphi$ , близком к  $90^\circ$ . Это положение лопастей винта называется флюгерным положением. Если при работающем двигателе и поступательной скорости  $V$  угол установки лопастей  $\varphi$  (положительный или отрицательный) таков, что угол атаки лопасти отрицателен, то тяга будет отрицательной — винт будет тормозить.

На практике могут встретиться все указанные режимы работы винта: *режим гребного винта* — нормальный режим работы винта, когда он выполняет свою основную функцию — создателя тяги для движения самолета; *режим ветрянки* — при планировании самолета с выключенным двигателем; *флюгерное положение* лопастей — при необходимости иметь возможно малое сопротивление остановленного винта; *тормозной режим* — при применении винта в качестве тормоза самолета, главным образом при посадке для уменьшения пробега.

В современных конструкциях винтов соответствующей устройкой лопастей в полете имеется возможность задать винту тот или иной из перечисленных режимов работы.

### § 3. Основные характеристики винтов

Характеристиками винтов называются некоторые величины, определяющие те или иные свойства винтов. Разделяются они в основном на три следующих типа:

1. Геометрические характеристики.
2. Аэродинамические характеристики.
3. Динамические характеристики.

Характеристики последних двух типов нами будут рассмотрены в соответствующих местах. В настоящем параграфе мы коснемся геометрических характеристик и характеристик, тесно с ними связанных.

Полные геометрические размеры лопастей определяются чертежом. К основным геометрическим характеристикам винта относятся: 1) диаметр винта, 2) ширина лопасти, 3) толщина лопасти, 4) крутка лопасти, 5) покрытие лопастей.

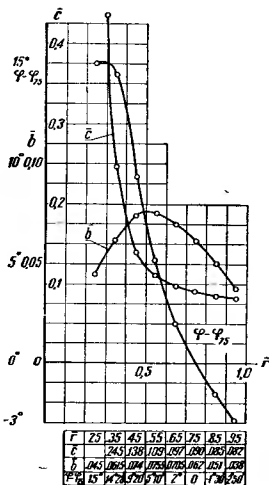
*Диаметром винта*  $D$  называется диаметр окружности, которую описывают концы лопастей во время вращения винта. Дна-

метр является главнейшей характеристикой винта, так как он преимущественно определяет величину винта. Выбор диаметра производится из аэродинамических соображений и из соображения допустимых габаритов винта. Последнее для самолета играет очень большую роль. Действительно, если самолет одномоторный, то диаметр винта предопределяет высоту шасси, которое в свою очередь тесно связано с размерами крыла, так как шасси должно убираться в крыло. Если самолет многомоторный, то, кроме высоты шасси, на выбор диаметра винта влияет также расположение двигателей, предопределяющее расстояние концов лопастей от фюзеляжа, и расстояние концов лопастей от границы струн соседнего винта. Правильный выбор диаметра винта имеет большое значение (см. § 5 гл. XIII).

*Шириной лопасти* называется размер хорды сечения лопасти. Обозначается она буквой  $b$ . На разных радиусах ширина лопасти, вообще говоря, разная. Обычно она имеет максимум примерно на половине радиуса винта. У прямоугольных лопастей ширина вдоль лопасти постоянна. В теоретических расчетах вместо абсолютной ширины применяется так называемая относительная ширина, отнесенная к диаметру винта и обозначаемая  $\bar{b}$ :

$$b = \frac{b}{D}. \quad (3)$$

Наибольшая ширина  $b_{\max}$  или  $\bar{b}_{\max}$  является одной из главнейших геометрических характеристик, которой определяется тип лопасти. Типичная диаграмма ширины лопасти показана на фиг. 9. По оси абсцисс обычно откладывается так называемый относительный радиус — отношение радиуса сечения к радиусу винта  $R$ , который обозначается  $\bar{r}$



Фиг. 9 Геометрическая характеристика лопасти — типичная диаграмма распределения толщины, ширины и крутки лопасти по радиусу.

$$\bar{r} = \frac{r}{R}. \quad (4)$$

Часто ширина лопасти  $\bar{b}$  выражается в % от диаметра; тогда

$$\bar{b}\% = \frac{b}{D} 100\%. \quad (5)$$

Обычно лопасть с наибольшей шириной в 6—7% считается узкой, с шириной в 8% — средней ширины и с шириной в 9—10% и более — широкой.

Законом изменения ширины по радиусу определяется так называемая форма лопасти в плане. Если на каждом радиусе на плоскости нанести действительные ширины, то получим лопасть, развернутую в плане.

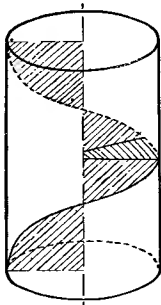
*Толщиной лопасти*  $c$  на каком-либо радиусе называется наибольшая толщина сечения лопасти на этом радиусе. Толщина изменяется вдоль радиуса лопасти, уменьшаясь от центра винта к концу. Относительной толщиной  $\bar{c}$  называется отношение толщины  $c$  к ширине  $b$  на том же радиусе  $r$ , т. е.

$$\bar{c} = \frac{c}{b}. \quad (6)$$

Часто относительная толщина выражается в % к ширине, т. е.

$$\bar{c}\% = \frac{c}{b} 100\%. \quad (7)$$

Так как, как увидим далее, наибольшее значение для аэродинамики лопасти имеет толщина на конце лопасти, то характерной толщиной для всей лопасти является толщина на конце, а именно на относительном радиусе 0,9. Часто толщиной на конце вообще характеризуется толщина лопасти винта. Металлические винты имеют на конце толщину от 4 до 7%, а деревянные около 7—8%.



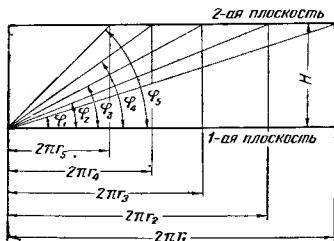
Фиг. 10. Образование лопасти геометрического винта.

*Углом установки сечения лопасти* называется угол  $\varphi$  хорды данного сечения с плоскостью вращения винта. Эта последняя есть плоскость, перпендикулярная оси вращения винта. Угол установки сечения меняется по радиусу лопасти. У так называемых геометрических винтов, лопасть которых представляет собой вырезку из винтовой поверхности (фиг. 10), угол установки изменяется по вполне определенному аналитически выражаемому закону. Рассмотрим один виток винтовой линии (фиг. 10); это значит, что мы будем рассматривать отрезок винтовой линии, заключенный между двумя параллельными плоскостями, перпендикулярными оси винтовой линии.

Расстояние между этими плоскостями называется шагом винтовой линии; обозначим его через  $H$ . Один виток винтовой линии мы получим, если будем навивать на цилиндр радиуса  $r$  прямоугольник с диагональю, у которого одна сторона равна  $2\pi r$ , другая  $H$ , а диагональ наклонена к первой стороне под углом  $\varphi$  (фиг. 11). Винтовые линии, соответствующие сечениям соосными цилиндрами с радиусами  $r_1, r_2, r_3, \dots$ , могут быть образованы навиванием на соответствующие цилиндры прямоугольников, у которых одна сторона равна  $H$ , другая равна соответственно  $2\pi r_1, 2\pi r_2, 2\pi r_3, \dots$ , а диагонали наклонены к последней стороне под углами  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$ . Эти углы в геометрическом винте и будут углами установки сечений; шаг же геометрического винта будет, как мы видели, вдоль лопасти постоянным и равным

$$H = 2\pi r_1 \operatorname{tg} \varphi_1 = 2\pi r_2 \operatorname{tg} \varphi_2 = 2\pi r_3 \operatorname{tg} \varphi_3 = \dots \quad (8)$$

Шагом какого-либо сечения лопасти винта называется расстояние, которое пройдет это сечение в осевом направлении при



Фиг. 11. Шаг винта.

повороте винта на один оборот вокруг своей оси, ввинчиваясь в воздух как в твердую гайку; иными словами — шагом какого-либо сечения лопасти винта называется шаг соответствующей винтовой линии, которой касается хорда данного сечения лопасти.

Вообще говоря, шаг винта может быть и постоянным и переменным вдоль лопасти в зависимости от его конструкции.

Из формулы (8) видно, что шаг сечения можно определить через угол установки сечения и наоборот. Если шаг постоянный, то закон изменения угла установки сечения по радиусу выразится следующим образом:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{H}{2\pi r}. \quad (9)$$

Если шаг переменный, т. е. является функцией радиуса  $r$ , то  $\varphi$  будет какой-то отличной от (9) функцией  $r$ . Лопасти винта

в полете могут переставляться, и тогда закон изменения углов установки сечения по радиусу будет изменяться.

Для того чтобы определить это изменение и положение лопасти, вводится понятие об *угле установки винта* (или лопасти) на одном каком-либо радиусе. За такой радиус принимается относительный радиус, равный 0,75. В производстве и в эксплуатации винтов, где более удобно иметь дело не с относительными а с абсолютными величинами, за такое исходное сечение принимается в зависимости от величины винта расстояние от центра в 1000 или 1600 мм.

Вследствие удобства оперирования с относительными величинами шаг иногда относят к диаметру, и это отношение называется относительным шагом:

$$h = \frac{H}{D}. \quad (10)$$

Надо заметить, что понятие шага теперь имеет больше историческое значение; в металлических винтах этим понятием не пользуются. Шагом или относительным шагом маркируют лишь деревянные моноблочные винты.

*Круткой лопасти* называется изменение по радиусу углов между хордой сечения на данном радиусе и хордой на каком-либо радиусе, выбранном за основной. Таким основным радиусом принимается относительный радиус 0,75. Следовательно, крутка лопасти будет равна  $\varphi - \varphi_{75}$ , где  $\varphi$  — угол установки сечения на радиусе  $\bar{r}$ , а  $\varphi_{75}$  — угол установки сечения на радиусе  $\bar{r} = 0,75$ .

Таким образом, основными геометрическими характеристиками лопасти винта являются — ширина, толщина и крутка на различных радиусах. Типовая диаграмма геометрических характеристик лопасти представлена на фиг. 9, где по оси абсцисс отложен относительный радиус  $\bar{r} = \frac{r}{R}$ .

В некоторых расчетах бывает удобно ввести еще некоторые геометрические характеристики; к ним относятся — развернутая площадь лопасти и покрытие лопасти.

Элемент площади лопасти равен  $bdr$ , вся же развернутая площадь лопасти  $S$  выразится интегралом, взятым от какого-то радиуса  $r_0$  до конца лопасти:

$$S = \int_{r_0}^R bdr$$

или в относительных величинах

$$S = \frac{D^2}{2} \int_{r_0}^1 \bar{b} \bar{d} \bar{r}. \quad (11)$$

В большинстве случаев бывает достаточно радиус  $\bar{r}_0$  взять равным 0,25. Величина

$$\frac{S}{D^2} = \bar{S} = \frac{1}{2} \int_{r_0}^1 \bar{b} dr \quad (12)$$

для данного типа лопасти (т. е. для определенного закона распределения  $b$  вдоль лопасти) есть величина постоянная. Ее можно назвать коэффициентом развернутой площади. Отношение развернутой площади лопастей к площади, ометаемой лопастями винта в принятых пределах радиусов, называется *покрытием винта*. Таким образом покрытие винта  $L$  будет

$$L = \frac{S\kappa}{\pi(R^2 - r_0^2)}, \quad (13)$$

где  $\kappa$  — число лопастей

Для подобных по форме в плане винтов можно принять, что

$$L = \frac{b_{\max} \kappa}{2\pi r_{b \max}}, \quad (14)$$

где  $r_{b \max}$  — радиус, соответствующий  $b_{\max}$ . Часто покрытие винта характеризуют величиной, ей пропорциональной:

$$\sigma = \frac{\kappa b_{\max}}{2R} = \kappa \bar{b}_{\max} \quad (15)$$

Таким образом покрытие характеризует собой ширину лопастей данного винта. Однако ширина лопасти на разных радиусах имеет различную эффективность вследствие разной скорости сечений, поэтому для того, чтобы правильнее оценить ширину лопасти, вводится понятие о *факторе эффективности*, который выражается следующим образом:

$$\bar{\Phi} = 6250 \int_{r_0}^1 \bar{b} r^3 dr. \quad (16)$$

Вывод этой формулы дан в § 1 гл. XII. Чем больше ширина лопасти, тем больше фактор эффективности. Лопасти малой ширины имеют фактор эффективности 60—70, средней — 70—90 и большой — свыше 100.

При расчете винтов играют роль еще также и некоторые кинематические характеристики винта; к ним относятся поступь винта и его скольжение.

Воздушный винт вращается вокруг своей оси с угловой ско-

ростью  $\Omega$ ; скорость вращения можно также характеризовать числом оборотов в единицу времени, причем

$$\Omega \text{ 1/сек} = 2\pi n_s \text{ 1/сек} \quad (17)$$

и

$$n_s = \frac{n}{60}.$$

Если винт, вращаясь с числом оборотов в секунду  $n_s$ , движется со скоростью  $V$  м/сек, то за один оборот он пройдет путь  $\frac{V}{n_s}$ . Эта величина и называется *поступью винта*, а отношение ее к диаметру винта называется *относительной поступью*:

$$\lambda = \frac{V}{n_s D}. \quad (18)$$

Эта величина играет большую роль в подборе и расчете винтов.

Мы знаем уже, что путь, проходимый винтом за один оборот если он ввинчивается в воздух как в твердую гайку, называется шагом винта; разность между шагом и поступью можно назвать *скольжением винта*, а отношение скольжения к диаметру — *относительным скольжением*.

Таким образом скольжение  $s$  будет

$$s = H - \frac{V}{n_s}, \quad (19)$$

а относительное скольжение  $\bar{s}$

$$\bar{s} = h - \lambda. \quad (20)$$

При проектировании современных воздушных винтов понятием скольжения не пользуются.

#### § 4. Винтовые дужки

Следуя терминологии Н. Е. Жуковского, мы сечение лопасти винта плоскостью, параллельной оси винта и перпендикулярной оси лопасти, будем называть «винтовой дужкой» или просто «дужкой».

Так как лопасть винта во многих отношениях подобна крылу самолета, то в сечениях ее устанавливаются дужки, по форме близкие к дужкам крыла самолета. Однако винтовые дужки, кроме свойственных им особенностей, которые будут указаны в части II, отличаются от крыльевых еще следующим. Диапазон изменения толщины крыла самолета обычно невелик — на конце устанавливается дужка толщиной не менее 9—10%, а у фиюзеляжа — самое большее 16%. У лопасти винта на конце толщина бывает от 4,5 до 6%, а около втулки — свыше 20%. Для удобства конструирования лопастей обычно составляются серии вин-

товых дужек; в данной серии форма каждой дужки зависит определенным образом от толщины ее.

Часто конструкторы устанавливают на лопасть дужки, взятые из разных серий. Так, например, на конце лопасти, который обычно работает с большой скоростью, устанавливаются дужки, выгодные при больших скоростях, тогда как ближе к втулке устанавливаются дужки, выгодные при меньших скоростях, — более несущие дужки, т. е. дужки с большей кривизной (большей толщиной).

Форма дужки определяется координатами ее контура, отнесенными к осям координат, построенным на хорде, и на перпендикуляре, восстановленном от хорды так, чтобы он коснулся носка дужки. Контур дужки делится хордой на две части — верхнюю и нижнюю; верхняя часть определяется ординатами верхней части  $y_v$ , а нижняя — ординатами нижней части  $y_n$ ; последняя может быть как положительная, так и отрицательная — в зависимости от ориентировки хорды по отношению к контуру дужки.

Координаты дужек обычно выражают в относительных величинах; абсциссу, направленную по хорде (положительное направление от носка к хвосту дужки), относят к величине хорды  $b$  и часто выражают в ‰, так что  $x = \frac{x}{b} 100\%$ . Ординаты относят к наибольшей толщине  $c$ , так что

$$\bar{y}_v = \frac{y_v}{c}; \quad \bar{y}_n = \frac{y_n}{c}.$$

Координаты дужки представляются в виде таблиц, причем абсциссы  $x$  берутся всегда следующие в ‰: 0; 2,5; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100 (см. фиг. 12).

Для некоторых расчетов винта необходимо иметь координаты центра тяжести дужки, площадь дужки и моменты инерции ее относительно малой и большой осей инерции. Координаты центра тяжести  $x_0$ ,  $y_0$  для каждой дужки находятся вычислением и для серии подобных дужек выражаются так:

$$x_0 = k_1 b, \quad y_0 = k_2 c, \quad (21)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — некоторые числовые коэффициенты, характерные для данной дужки. Площадь дужки  $F$

$$F = k_3 bc, \quad (22)$$

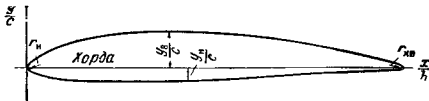
где  $k_3$  — числовой коэффициент, характерный для данной дужки.

Момент инерции (наибольший и наименьший) относят обычно для простоты не к главным осям инерции, а к осям, параллельным указанным координатным осям и проходящим через ц. т. дужки. Эти моменты инерции практически совпадают с момен-



тами инерции, отнесенными к главным осям инерции. Они выражаются так:

$$J_{\text{наиб}} = a_1 b^3 c, \quad (23)$$



$$\bar{c} = (\bar{y}_n + \bar{y}_k)_{\text{max}}$$

$\frac{x}{c} \%$	0	2,5	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
$\frac{y_n}{c} \%$	0	18,9	30,4	46,2	65,2	72,6	73,7	70,6	63,3	52,8	40,0	24,2	15,4	0
$\frac{y_k}{c} \%$	0	-12,1	-16,7	-21,9	-25,9	-25,9	-23,5	-20,8	-18,1	-15,4	-12,7	-10,0	-8,6	0

$$r_n = 0,08 c$$

$$x_0 = 0,448 b$$

$$J_{\text{max}} = 0,0410 b^3 c$$

$$r_{\text{кв}} = 0,08 c$$

$$y_0 = 0,195 c$$

$$J_{\text{min}} = 0,0423 b c^2$$

$$f = 0,705 b c$$

Фиг. 12. Типичная винтовая дужка.

$$J_{\text{наим}} = a_2 b c^3, \quad (24)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  — некоторые числовые коэффициенты, характерные для данной дужки.

Современные винтовые дужки имеют нижнюю (рабочую) часть или плоской или выпуклой. Для производства и в эксплуатации удобнее иметь плоские дужки, так как это облегчает проверку угла установки лопасти простым угломером. Поэтому всегда желательно, если это возможно, чтобы дужки на радиусе 1000 мм или 1600 мм (в зависимости от диаметра винта) имели нижнюю часть контура дужки плоской. На фиг. 12 представлена типичная винтовая дужка с выпуклой нижней частью контура.

Как объяснено в части III, при расчете винта следует применять аэродинамические характеристики дужек, пересчитанных на бесконечный размах. К аэродинамическим характеристикам винтовых дужек относятся кривые  $c_y = f(\alpha, \bar{c})$  — коэффициента подъемной силы по углу атаки для разных толщин и кривые  $c_l/c_x = \frac{1}{\nu} = f_1(\alpha, \bar{c})$  — качества по углу атаки для разных толщин. Таким образом аэродинамические характеристики винтовых дужек представляют собой два семейства кривых (фиг. 13, 14).

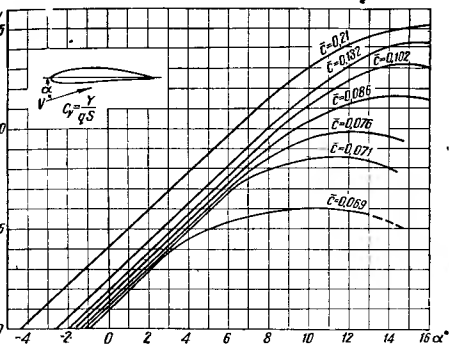


Рис. 13 Коэффициент подъемной силы семейства винтовых дужек для бесконечного размаха.

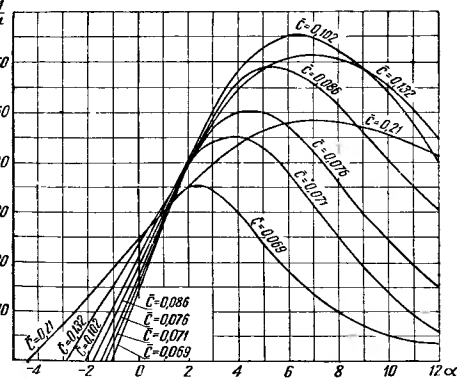


Рис. 14 Качество семейства винтовых дужек для бесконечного размаха.

## Глава II

## ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ВИНТАМ

## § 1. Очерк истории развития воздушного винта

Мы видели, что по принципу действия воздушный винт до известной степени подобен шурупу, продвигающемуся в дереве, или винту, ввинчивающемуся в гайку. Поэтому ясно, что исторически воздушный винт, а еще раньше родственный ему водяной винт развились постепенно из простого винта.

Первое практическое применение винта для целей полета было осуществлено гениальным русским ученым М. В. Ломоносовым, который 4 февраля 1754 г. сделал сообщение на заседании Академии наук об изобретенной им машине для подъема на высоту метеорологических приборов. В протоколах Академии сохранилось следующее сообщение:

«Господин советник и профессор Ломоносов собранию представил о машинке маленюкой, которая бы вверх подымала термометры и другие малые инструменты метеорологические, и предложил оной же машины рисунок; того ради господи заседающие оное его представление опробовали и положили канцелярию Академии Наук рапортом просить, чтобы соблаговолено было приказать реченую машину по приложенном при сем рисунку для опыта сего изобретения сделать под его господина автора смотрением».

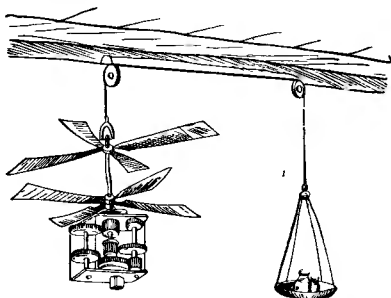
К июлю 1754 г. эта машина была построена и испытана М. В. Ломоносовым. Об этом свидетельствует следующая запись в протоколах Академии:

«Высокопочтенный советник Ломоносов показал изобретенную им машину, называемую аэродромической (воздухобезной), которая должна употребляться для того, чтобы с помощью крыльев, движимых горизонтально в различных направлениях силой пружины, какой обычно снабжаются часы, нажимать воздух (обрасывать его вниз), отчего машина будет подниматься в верхние слои воздуха с той целью, чтобы можно было обследовать условия (состояние) верхнего воздуха посредством метеорологических машин (приборов), присоединенных к этой аэродромической машине. Машина подвешивалась на шиуре, протянутом по двум блокам, и удерживалась в равновесии грузиками, подвешенными с противоположного конца (фиг. 15). Как только пружина заводилась, машина поднималась в высоту и потому обещала достижение желаемого действия. Но это действие, по суждению изобретателя, еще более увеличится, если будет увеличена сила пружины и если увеличить расстояние между той и другой парой крыльев, а коробка, в которой заложена пружина, будет сделана для уменьшения веса из дерева. Об этом он (изобретатель) обещал позаботиться».

В декабре 1754 г. М. В. Ломоносов писал: «Делал опыт машины, которая бы поднималась кверху сама, могла поднять с собой маленький термометр, дабы узнать градус теплоты на вышине, которая хотя с лишком на два золотника облегчалась, однако к желаемому концу не приведена».

Повидимому, другие занятия не позволили Ломоносову продолжить работу с аэродромической машинкой.

В 1848 г. в России был построен первый винтовой корабль-фрегат «Архимед». Одним из первых винтовых судов в России был также клипер «Всадник», за постройкой которого наблюдал, а потом с 1861 г. командовал изобретатель первого самолета Александр Федорович Можайский.



Фиг. 15. Аэродинамическая машинка М. В. Ломоносова

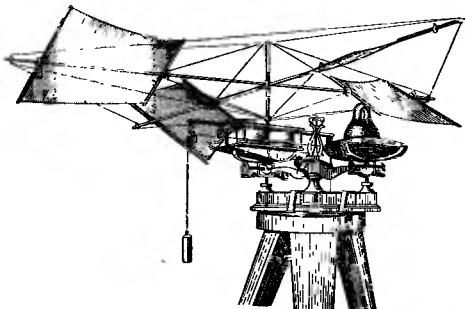
Усовершенствование паровой машины, позволившее широко ее применять на железных дорогах и на пароходах, вполне естественно создало условия для применения ее на аппарате легче воздуха. Одним из первых, который предложил устройство дирижабля с паровым двигателем и винтами, был русский изобретатель Н. Архангельский. В 1851 г. им был разработан проект дирижабля, причем паровая машина должна была приводить во вращение шесть винтов, составленных из полного витка винтовой поверхности.

В 1869 г. А. Н. Лодыгин предложил проект летательной машины, в которой подъемная сила создавалась винтом, приводимым во вращение электромотором.

С развитием капитализма во второй половине 19 века техника достигла такого совершенства, что уже близилась возможность разрешения проблемы полета самолета. Так как полет самолета, был невозможен без винта, то естественно, что усилия изобретателей и ученых были направлены к изучению и усовершен-

ствованию винта, ибо водяной винт хотя и широко уже применялся во флоте, но все же ясного понимания о его работе не было.

Первыми опытами по исследованию винтов были опыты, поставленные в 1870 г. М. А. Рыкачевым<sup>1</sup>, создавшим специальный прибор, в котором модель винта вращалась часовым пружинным механизмом; подъемная сила измерялась весами, на одной чашке которых находился прибор с винтом, а на другой устанавливались гири (фиг. 16). Эти опыты были предприняты М. А. Рыкачевым для того, чтобы выяснить возможность постройки вертолета (геликоптера).



Фиг. 16 Прибор М. А. Рыкачева для исследования винтов.

Великий русский изобретатель А. Ф. Можайский был первым в мире конструктором, построившим самолет, который поднялся в воздух. Можайский вполне ясно сознавал, что для успешного полета самолета следует правильно сделать винт, от которого в значительной степени зависит успех полета. Поэтому он предпринял специальные опыты как с моделями, так и с полноразмерными винтами. 14 февраля 1877 г. он представил Главному инженерному управлению программу опытов, в которой, между прочим, было указано:

«Исследовать и прискать наилучшую форму винта двигателя аппарата в отношении числа перьев или лопастей его, изгиба их, или угла с валом. Отыскать наиболее выгодную величину площади винта в отношении двигающей его силы, диаметр его. Так как нижняя площадь перьев винта не дает полезной работы, то по-немногу вырезая ее, определить наивыгоднейшую величину выреза покрывки винта около вала.

<sup>1</sup> М. А. Рыкачев, Первые опыты над подъемной силой винта, вращающегося в воздухе. Морской сборник № 6, 1871.

По заключению, выведенному над маленькими винтами, т. е. по присканию наилучшей формы, сделать винт большого размера и подвергнуть его пробе паровою машиною, причем выяснится, достаточна ли крепость материала, введенная в его постройку, толщина вала и сила по индикатору».

В 1894 г. К. Э. Циолковский в статье «Аэроплан или птицеподобная (авиационная) летательная машина» дал описание самолета с соосными винтами. В дальнейшем А. Г. Уфимцев — известный изобретатель ветродвигателей — построил биротативный двигатель и установил на нем соосные винты. Это было первое применение соосных винтов. Особенность биротативного двигателя заключается в том, что он имеет два противоположно вращающихся соосных вала — один основной вал вращается в одну сторону, а другой, связанный с вращающимися цилиндрами, — в другую сторону. Биротативный двигатель Уфимцева с соосными винтами был в 1909 г. установлен на самолете Уфимцева, который назывался «Сфероплан», и в 1910 г. демонстрировался на автомобильной выставке в Москве.

В конце 19 века стали появляться научные работы по винтам, причем выявились сначала два достаточно изолированных направления исследований — теоретическое и опытное; эти два направления постепенно смыкались.

Как уже было указано, первыми опытными работами по винтам следует считать опыты М. А. Рыкачева (1871 г.), а затем А. Ф. Можайского.

В 1882—1886 гг. Н. Е. Жуковский в своих двух статьях «О реакции вытекающей и втекающей жидкости» показал, что реакция втекающей жидкости весьма мала, тогда как реакция вытекающей в виде струи жидкости и составляет реактивную силу. Этими статьями он положил начало теории так называемого идеального пропеллера. Эта теория относится к применению общих теорем механики к струе, создаваемой пропеллером в идеальной жидкости. Поэтому она разъясняет лишь структуру струи при определенных принятых предположениях. Теория идеального пропеллера была развита работами Н. Е. Жуковского, В. П. Ветчинкина, Б. Н. Юрьева и Г. Х. Сабинаина и послужила хорошей основой для понимания действия винта.

В 1897 г. Д. П. Рузский опубликовал статью «Некоторые данные для теории гребных винтов», а в 1900 г. как развитие этой статьи вышла его диссертация «Теория гребных винтов», в которой он, применяя теорию удара, разрешает следующую практическую задачу о судовом винте: какой можно получить наибольший коэффициент полезного действия гребного винта, когда даны скорости судна и его сопротивление, а машину можно ставить какую угодно.

В 1902 г. при механическом кабинете Московского Университета была организована по инициативе Н. Е. Жуковского аэродинамическая лаборатория, построена аэродинамическая

труба и прибор для испытания винтов на месте. Организацией аэродинамической лаборатории Московского Университета Н. Е. Жуковский положил начало организации ряда других русских лабораторий. Так, при его же близком участии в 1904 г. был основан Кучинский аэродинамический институт, а в 1909 г. организован аэродинамический кружок при Московском Высшем Техническом Училище, который построил на свои средства аэродинамические трубы и приборы для испытания винтов.

В 1911 г. была организована аэродинамическая лаборатория при Политехническом институте в Петербурге.

Первыми в мире систематическими исследованиями воздушных винтов были исследования, проведенные в 1906—1908 гг. в Кучинском институте при ближайшем участии Н. Е. Жуковского. Результаты опытов, проведенных в Московском университете и в Московском Высшем Техническом Училище, были описаны Н. Е. Жуковским в его знаменитой книге «Теоретические основы воздухоплавания», вышедшей в 1911 г., в которой дан также обстоятельный обзор теорий винта и намечены перспективы в развитии этих теорий. Можно сказать, что ко времени выхода в свет «Теоретических основ воздухоплавания» сложилась русская школа по теории воздушных винтов. Эта русская школа, которая по праву может быть названа школой Жуковского, шла совершенно самостоятельно и значительно опередила заграничных ученых, работающих по теории винта; передовую роль в разработке теорий и расчета воздушных винтов русская школа сохранила и до сих пор.

В 1910 г. вышла книга С. К. Джебеецкого «Теория воздушных винтов», в которой была сделана попытка приложить элементарную теорию крыла к воздушному винту; однако физической сущности работы винта эта теория не раскрыла, так как в ней не определялись вызванные винтом скорости.

В 1910 г. ученики Н. Е. Жуковского студенты Б. Н. Юрьев и Г. Х. Сабинин создали под его руководством новую оригинальную теорию винта. В этой теории, в отличие от теории Джебеецкого, учитывались вызванные винтом скорости.

В 1912 г. Н. Е. Жуковским была опубликована «Вихревая теория гребного винта»<sup>1</sup>, которая создала эпоху в теории гребных винтов. В вихревой теории Н. Е. Жуковского поток, вызванный винтом, характеризуется полем скоростей, вызванных вихревой системой, порожденной винтом, причем в основу исследова-

<sup>1</sup> Впервые эта теория была опубликована в трудах Отделения Физических Наук Общества любителей Естествознания. Первая статья в томе XVI, вып. 1, сообщенная в Московском математическом обществе 18 сентября 1912 г. Статья вторая опубликована в тех же трудах т. XVII, вып. 1, 1914 г., сообщенная в Московском математическом обществе 26 февраля 1913 г. Статья третья опубликована в тех же трудах в томе XVII, вып. 2, 1915 г. Статья четвертая опубликована в «Трудах Авиационного научно-испытательного бюро», вып. 3, 1918 г. Все указанные статьи вошли в VI том полного собрания сочинении Жуковского издания 1937 г.





ния вихревого поля положено понятие о циркуляции, которая характеризует собой согласно теореме Жуковского подъемную силу лопасти. Таким образом вихревая теория Жуковского соединяет в себе теорию изолированного элемента лопасти (т. е. теорию крыла) и учение о вихревом поле.

Почти сейчас же после выхода в свет работы Н. Е. Жуковского по вихревой теории винта В. П. Ветчинкин в 1913 г. выпустил свою работу «Расчет гребного винта»<sup>1</sup>, в которой на основе вихревой теории Н. Е. Жуковского дается практический метод расчета винтов. Можно вполне определенно сказать, что указанными тремя работами (Жуковского, Ветчинкина и Сабина-Юрьева) было положено прочное основание в создании школы Жуковского по теории и расчету винта. Методы расчета, созданные В. П. Ветчинкиным, получили у нас повсеместное распространение и по ним строились многочисленные воздушные и водяные винты на самолеты, броненосцы и подводные лодки.

В дальнейших трех статьях Н. Е. Жуковского по вихревой теории винта эта теория была углублена и расширена. По теории решеток, еще ранее развитой С. А. Чаплыгиным<sup>2</sup>, были исследованы многолопастные винты и, кроме того, была намечена программа дальнейших работ по теории винтов.

Вопросами водяных винтов много занимался Ф. А. Брикс, который в 1913 г. дал интересное графическое построение коэффициентов полезного действия винта, принимая линейную зависимость тяги и мощности от поступи винта. В этом случае коэффициент полезного действия по поступи будет представлять собой гиперболу<sup>3</sup>. В дальнейшем Ф. А. Брикс разработал свою так называемую «паральную теорию гребного винта»<sup>4</sup>.

За время первой мировой войны, а затем гражданской войны экспериментальные исследования винтов сильно задержались. Первоначальные установки устарели, а новых до советской власти сделать было нельзя, так как те мизерные средства, которые отпускались немногочисленным аэродинамическим лабораториям, были совершенно недостаточны для решения поставленных авиацией аэродинамических задач. Между тем создание вихревой теории требовало проверки ее опытным путем. Небольшое экспериментальное исследование многолопастных винтов удалось выполнить в 1915 г. в аэродинамической трубе Московского Университета и построить по идее Н. Е. Жуковского несложный прибор для испытания винтов. Эта работа, проведенная студентами В. Л. Александровым, И. Н. Веселов-

<sup>1</sup> Эта работа напечатана в «Бюллетенях» Политехнического общества № 5, 1913 г. и сообщена в Политехническом обществе 1 февраля 1913 г.

<sup>2</sup> С. А. Чаплыгин, Теория решетчатого крыла. Математический сборник, том XXIX, 1914.

<sup>3</sup> Ф. А. Брикс, Полезное действие гребных винтов. Известия Николаевской морской академии, вып. 3, Петербург, 1913.

<sup>4</sup> Ф. А. Брикс, Паральная теория гребного винта. Главная Военно-Морская научная редакция, Гос изд., Петроград, 1922.

ским, М. И. Данилевским и П. С. Всесвятским под руководством Н. Е. Жуковского, послужила экспериментальным подтверждением теории Жуковского по многолопастным винтам<sup>1</sup>.

Великая Октябрьская революция коренным образом изменила условия для развития гениальных идей Н. Е. Жуковского по винтам. В 1918 г. по призыву В. И. Ленина развертывать в советской республике научно-исследовательскую работу Н. Е. Жуковским был организован Центральный Аэрогидродинамический институт — ЦАГИ (в дальнейшем имени Н. Е. Жуковского), в задачи которого входило также и исследование воздушных винтов.

Развитие и усовершенствование теории винта в ЦАГИ были сделаны В. П. Ветчинкиным, который создал теорию так называемого вариационного, т. е. наивыгоднейшего винта. Эти работы вылились в создание большой монографии «Теория и расчет воздушного гребного винта»<sup>2</sup>, которая является единственной в мировой литературе по винтам по полноте и оригинальности изложения. Большая работа была проделана в ЦАГИ в 1930 г. Г. И. Кузьминым<sup>3</sup>; результаты расчетов винтов по вихревой теории были сравнены с опытными данными серии испытанных винтов. Эти расчеты подтвердили правильность практических методов расчета винтов по вихревой теории Н. Е. Жуковского.

Д. В. Халезовым и Г. И. Майкапаром в ЦАГИ была развита так называемая лопастная теория винта, в которой в отличие от вихревой теории Н. Е. Жуковского вихревое поле рассматривается не в абсолютном, а в относительном движении и находится поле скоростей, вызываемое отдельными вихрями, сходящими с лопастей. Эта теория явилась прямым продолжением теории Жуковского.

Одновременно с развитием аэродинамических теорий весьма расширилось и опытное исследование винтов. Были созданы оригинальные методы построения аэродинамических характеристик винтов и методика подбора винтов по этим характеристикам. Эта методика применяется до сих пор.

Винт, установленный на самолете, влияет на самолет и, наоборот, самолет влияет на работу винта. Исследование этого взаимного влияния было у нас проведено сначала Г. И. Кузьминым и В. Л. Александровым, а затем усовершенствовано И. В. Остославским и Д. В. Халезовым. Этой последней методикой учета взаимного влияния пользуются до сих пор.

При работе винта на больших окружных и поступательных скоростях часть лопасти винта работает на больших числах  $M$ ,

<sup>1</sup> В. Л. Александров. Приложение теории решеток к винту. Труды ЦАГИ, вып. 6, 1924.

<sup>2</sup> В. П. Ветчинкин и Н. Н. Поляхов, Теория и расчет воздушного гребного винта, Оборонгиз, 1940.

<sup>3</sup> Г. И. Кузьмин, Исследование работы воздушных винтов. Труды ЦАГИ, вып. 45, 1930.

между тем опытные исследования относятся почти всегда к винтам, испытанным при малых окружных и поступательных скоростях. Метод расчета поправки на работу винта на больших скоростях разработан Д. В. Халезовым.

Весь комплекс теоретических и опытных исследований по винту касается не только аэродинамики; большую роль в работе винта играет динамика винта и его прочность. Основоположителем разработки расчета прочности винта является В. П. Ветчинкин, который первый связал аэродинамику винта с прочностью. Дальнейшие работы его и других ученых охватывают весь комплекс вопросов по прочности винта и дополняют этот комплекс теорией регулирования и динамикой.

Все сказанное до сих пор относится главным образом к развitiю теоретических работ по винтам. Но мало винт рассчитать, его надо сконструировать и построить.

Первые винты были весьма просты по конструкции и изготовлению, они делались целиком из одного блока дерева, склеенного из досок, и все искусство конструирования винтов ограничивалось главным образом правильным подбором винта к двигателю, т. е. соблюдению требования, чтобы с данным винтом двигатель на месте и в воздухе давал необходимое число оборотов. Этот подбор делался часто без всякого расчета, а просто интуитивно. Так, в конце первой мировой войны и в начале установления советской власти этим отличался винтовой мастер А. Л. Кузнецов, который очень хорошо подбирал винты к двигателю. Однако с увеличением мощности двигателей и увеличением скоростей полета требовалось не только подобрать винт к двигателю, но также и сделать его наилучшим, особенно это стало необходимо с появлением металлических винтов, производство которых стоило значительно дороже и изготовление нескольких опытных винтов, как то часто делалось с деревянными винтами, стало более затруднительным.

С увеличением мощностей двигателей требовался переход на более прочные металлические винты. Стали производиться опыты по изготовлению винтов со стальными полыми и сплошными лопастями. Наша авиация перешла сначала на двухлопастные, затем на трехлопастные и наконец четырехлопастные винты со сплошными дуралюминовыми лопастями.

Увеличившийся диапазон скоростей самолетов потребовал применения винтов изменяемого шага, и на всех наших самолетах стали устанавливаться винты изменяемого шага.

## § 2. Дальнейшие перспективы развития воздушных винтов

С применением реактивных двигателей воздушный винт перестал быть единственным типом движителя для самолета. Наряду с винтом стал применяться реактивный двигатель непосредственного действия, выходящая струя которого оказывает реактивное действие и создает тягу. Многочисленные теоретиче-

ские исследования показывают, что реактивный двигатель становится выгодным на больших скоростях, причем в нем заложены почти неограниченные возможности получения больших мощностей, между тем как в поршневых двигателях увеличение мощности связано с увеличением числа цилиндров, что весьма усложняет его конструкцию и увеличивает вес. В связи с развитием реактивных двигателей в настоящее время появился еще новый двигатель — газовая турбина, вращающая винт, — это так называемый «турбовинтовой двигатель» (ТВД). Так же как и в области силовых паровых установок, где в настоящее время мощные паросиловые установки делаются турбинными, а не с поршневой паровой машиной, авиационные газовые турбины становятся более выгодными, чем поршневые двигатели, главным образом благодаря уменьшению веса.

Однако и поршневые авиационные двигатели совершенствуются главным образом в части уменьшения расхода топлива, т. е. повышения экономичности. Повышение экономичности достигается использованием энергии выхлопных газов двигателя в турбинах, которые передают мощность на вал поршневого двигателя. Это так называемые «комбинированные поршневые двигатели».

Таким образом можно думать, что воздушные винты в дальнейшем будут устанавливаться, во-первых, на всех малых самолетах с маломощными поршневыми двигателями, во-вторых, на транспортных самолетах средней величины, от которых не требуется большая скорость, а главным образом экономичность перевозок, и, наконец, на больших мощных дальних транспортных самолетах.

# КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ И ДЕТАЛЕЙ ИХ ОБОРУДОВАНИЯ

## Глава III

### КОНСТРУКЦИИ ВИНТОВ

#### § 1. Основные конструктивные типы винтов

При сравнительно малых мощностях на каждый двигатель бывает достаточно установить один винт, который удовлетворяет габаритам самолета, при больших же мощностях двигателей выгоднее с точки зрения габаритов и коэффициента полезного действия устанавливать на каждом двигателе два винта, посаженных на два соосных вала и вращающихся в разные стороны. Это так называемые *соосные винты*. Иногда двигатели на самолете располагают по два в gondole таким образом, что один вращает тянущий — передний винт, а другой — толкающий — задний винт. Такое расположение винтов носит название винтов «тандем» — по существу это те же соосные винты, только раздвинутые на большое расстояние друг от друга. Так как каждый из винтов тандем приводится во вращение отдельным двигателем, то они не являются между собой каким-либо образом конструктивно связанными, их связь лишь аэродинамическая — задний винт работает в струе переднего. Соосные винты, находящиеся друг от друга на сравнительно небольшом расстоянии, — их плоскости вращения отстоят друг от друга примерно на 500 мм — могут быть между собой связаны кинематически и могут быть свободными. В первом случае оба соосных вала являются лишь конечной цепью передачи от основного вала, и посаженные на носки конечных валов винты будем называть «соосными связанными», во втором же случае оба соосных вала являются самостоятельными и свободными, и винты, посаженные на соосных валах, будем называть «соосными свободными».

При свободных соосных винтах и винтах тандем каждый винт пары является самостоятельным винтом и, следовательно, конструктивное его выполнение такое же, как и одиночного винта; при связанных же соосных винтах каждый составляющий пару винт тесно связан с другим винтом пары, и, следовательно, такая

пара конструктивно отличается от одиночного винта. Пара соосного винта является органическим целым.

Наиболее простым типом винтов, которые издавна применялись в авиации, являются винты фиксированного шага и, в частности, такие, у которых и лопасти и ступица являются органическим целым — это так называемые моноблочные винты. Теперь такие винты делаются только деревянные, причем так как дерево непосредственно скрепить с валом нельзя, то ступица укрепляется болтами в металлической втулке, которая устанавливается на вал винта на шлицах.

Неудобство подбора моноблочных винтов к самолету и мотору заставило перейти к винтам с переставными лопастями. Их угол установки можно изменять лишь на земле при неработающем винте. У винтов этого типа обычно и лопасти и втулки — металлические (лопасти дуралюминовые, втулка стальная).

Винты, у которых угол установки лопастей можно изменять в полете, называются *винтами изменяемого шага* (ВИШ). Лопасти таких винтов особым механизмом могут переставляться принудительным путем по воле летчика или автоматически. Далее в § 4 гл. XII показано, что условием для автоматического изменения шага винта в полете принимается постоянное число его оборотов независимо от скорости самолета и других параметров, характеризующих режим полета самолета и работу двигателя. Это достигается применением центробежного регулятора, который и управляет углом установки лопасти, делая его таким, чтобы число оборотов оставалось всегда постоянным, заранее заданным летчиком. Этот способ регулирования шага (угла установки) винта является наиболее распространенным, однако могут быть и другие способы. Так, например, можно поддерживать число оборотов винта (двигателя) постоянным и зависящим только от скорости полета или только от положения дросселя управления двигателем, или от температуры газов в газовой турбине и т. д.

Разновидностью винта изменяемого шага могут быть винты *флюгерные*, т. е. такие, лопасти которых могут по воле летчика устанавливаться в положение наименьшего сопротивления при остановленном винте (см. § 5, гл. XII). Поскольку в винте изменяемого шага угол установки меняется в каком-то необходимом диапазоне, чтобы удовлетворить условию постоянства оборотов при разных скоростях полета и разных мощностях двигателя, то для прибавления винту изменяемого шага флюгерных или тормозных свойств (создание обратной тяги) требуется лишь такое конструктивное его изменение, которое расширило бы диапазон изменения шага, — в первом случае до угла установки, близкого к  $90^\circ$ , а во втором случае — до отрицательных углов.

Таким образом винт изменяемого шага может быть или простым или флюгерным, или флюгерным и тормозным. Сказанное относится как к одиночным винтам, так и к соосным.

Винты изменяемого шага, как простые, так и флюгерные и тормозные, конструктивно могут быть выполнены в виде трех основных типов: *механические, гидравлические и электрические*. В первом типе механизм перестановки лопастей на другой угол установки имеет кинематическую связь с источником силы, переставляющим лопасти, в виде простой механической передачи. Поскольку элементы механической передачи имеются также в любой электрической и гидравлической системе, то механическими винтами будем называть только такие винты, у которых совершенно отсутствуют какие-либо гидравлические или электрические устройства. Таким образом источником силы для перестановки лопастей механического винта является сам двигатель, на котором он установлен, или мускульная энергия летчика, или давление набегающего на винт воздуха, или, наконец, центробежные силы, развивающиеся в винте во время его работы. В двух последних случаях механические винты являются *автономными*.

Во втором типе — гидравлических винтов — механизмом передачи энергии будет служить гидравлическая передача, причем источником энергии будет служить или сам двигатель, вращающий насос, или какой-либо другой источник энергии, передающий ее винту при помощи жидкости.

В третьем типе — электрических винтов — источником энергии служит электродвигатель, который через систему механических передач поворачивает лопасти.

В механических винтах передача силы для поворота вращающейся лопасти может быть произведена или посредством муфты сцепления или с помощью дифференциального механизма.

В гидравлических винтах передача силы для поворота вращающейся лопасти осуществляется давлением жидкости, причем этой жидкостью может служить масло двигателя. Это масло должно поступать в специальный насос для увеличения давления и затем через вал двигателя или через специальное приспособление на шестерни гидромотора или на поршень, которые и поворачивают лопасти. Так как масло в двигателе циркулирует уже под давлением, созданным масляным насосом системы смазки, то иногда бывает достаточно использовать в винте это давление без добавочного маслососа. В описанных случаях работа механизма винта зависит от масляной системы двигателя, и, следовательно, надо в двигателе иметь специальное надежно работающее приспособление, передающее масло в винт. Такая передача масла от двигателя к винту связана с большими конструктивными трудностями и не всегда обеспечивает потребное давление масла в винте вследствие утечек его в картер и наружу. В отдельных же случаях утечки наружу могут оказаться настолько велики, что могут истощить масляную систему двигателя и лишить его работоспособности. Поэтому конструкторская мысль идет по пути применения автономной системы, совершенно

независимой от двигателя. Это удобно еще и в том отношении, что в автономной системе можно применять ту жидкость, которая более пригодна для работы в гидравлической системе винта, в частности, незамерзающую.

Таким образом гидравлическая система винта может быть *зависимой от двигателя* или *автономной*.

При использовании в гидравлической системе поршня, для того чтобы осуществить прямое и обратное движения лопасти, необходимо давление жидкости подавать попеременно то на одну, то на другую сторону поршня. Такая гидравлическая система винта называется *двухсторонней схемой*; она требует двойной подводки масла к винту от двигателя. Но можно осуществить и одностороннюю схему, при которой масло на поршень подается только на одну его сторону, и, следовательно, давлением масла лопасти винта будут поворачиваться только на большой или только на малый шаг. Для поворота в обратную сторону можно использовать центробежные силы самой вращающейся лопасти или специальных грузов, укрепленных на ней. Если лопасти от давления масла передвигаются на малый шаг, то такая схема называется *прямой*, если на большой шаг — *обратной*. Ввиду того что, как мы увидим далее, лопасти сами по себе, под влиянием действующих на них центробежных сил, стремятся повернуться на малый шаг, в прямой схеме необходимо иметь на лопастях соответствующим образом расположенные грузы для поворота лопастей на большой шаг, тогда как в обратной схеме таких грузов не требуется.

В электрических винтах поворот лопастей производится электродвигателем. Так как электродвигатель имеет обычно большое число оборотов, а поворот лопасти приходится делать сравнительно медленно, то между электродвигателем и лопастями устанавливается передача, уменьшающая число оборотов, с передаточным числом порядка  $\pm 5000$ . Электродвигатель можно поместить на вращающемся винте, и тогда на нем будет находиться обыкновенная или планетарная уменьшающая передача. Если же электродвигатель помещен вне вращающегося винта, то передача от него к лопастям должна дополнительно иметь дифференциальную ступень для нейтрализации скорости вращения винта. Таким образом электрические винты различаются по схеме в зависимости от того, находится ли электродвигатель на вращающемся винте, или вне его — на неподвижной части самолета.

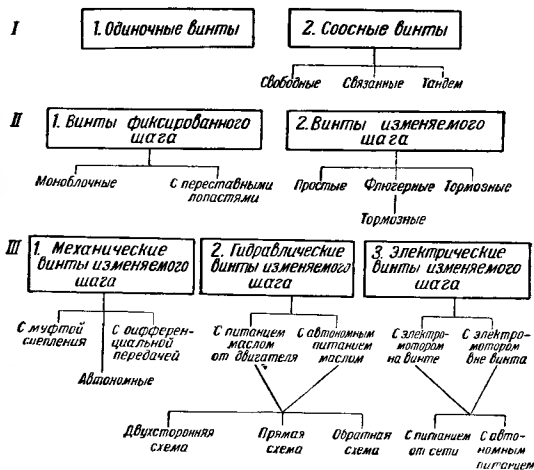
Питание электродвигателя током может быть осуществлено двояким образом: во-первых, от общей самолетной сети, во-вторых, от особого генератора, встроенного в винт, и таким образом вся электрическая система винта, в этом последнем случае, будет автономной.

Как было указано в § 1 гл. I и как видно из разобранных различных схем, современный винт состоит из четырех основных



частей: 1) лопастей; 2) втулки, в которой крепятся лопасти; 3) механизма поворота лопастей и 4) деталей оборудования. Последние находятся как на самом винте и являются дополнением к его основным свойствам, так и вне его и обслуживают механизмы винта.

Детали оборудования винта следует разделить на две части: 1) детали, обслуживающие механизм винта и управление им, и 2) детали, связанные с его установкой. К первым относятся



Фиг. 18. Основные конструктивные типы винтов.

регуляторы и оборудование, обслуживающее флюгерные и тормозные свойства винта, например, насосы, агрегаты электро-системы. Ко вторым относятся кол винта, который закрывает втулку и уменьшает ее лобовое сопротивление, а также способствует лучшему охлаждению двигателя, и противообледенительное устройство, служащее для предупреждения обледенения винта.

На фиг. 18 дана классификация винтов, проведенная по трем признакам: 1) по количеству аэродинамически связанных между собою винтов; 2) по принципу крепления лопасти во втулке винта; 3) по конструктивному выполнению механизма винта.

Соосные винты выгодно применять при больших мощностях двигателя (свыше 3000—4000 л. с.). При меньших мощностях они особых преимуществ перед одиночными винтами не имеют.

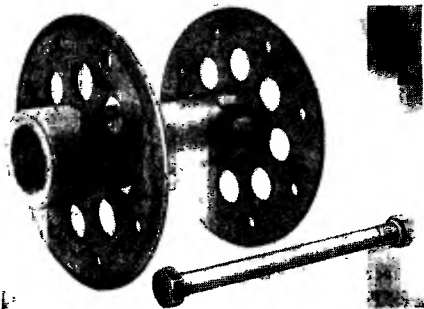
Винты фиксированного шага применяются только на маломощных самолетах, аэросанях и глиссерах, при небольших диапазонах скоростей; во всех остальных случаях применяются винты изменяемого шага в соединении с флюгерными свойствами. Начинают получать распространение тормозные винты.

Из конструктивных типов наибольшее распространение получили гидравлические винты, затем электрические; механические применяются лишь на маломощных самолетах. Распространение гидравлических винтов объясняется сравнительной простотой их конструкции и достаточной надежностью действия. В начале появления гидравлических винтов применялись односторонние схемы, в настоящее же время получила распространение двухсторонняя схема.

Электрические винты получают все большее распространение, и весьма возможно, что в недалеком будущем их электрическая схема будет изменена, сделана более простой и надежной, что создаст для применения этих винтов большие преимущества по сравнению с другими типами винтов.

## § 2. Винты фиксированного шага

**Моноблочные винты.** Конструкция деревянного моноблочного винта очень проста. Он представляет собой одну деталь, склеенную из планок и обработанную так, чтобы от ступицы исходили лопасти. Ступица имеет сквозное цилиндрическое отверстие и зажимается с помощью шести или восьми болтов в стальной втулке (фиг. 19). Втулка состоит из фланца с высту-



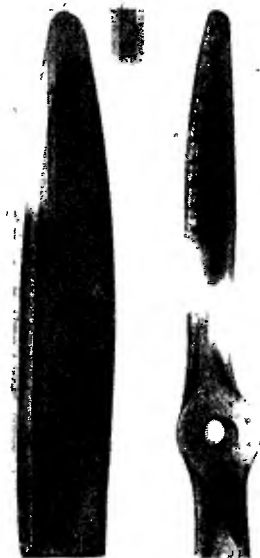
Фиг. 19 Стальная втулка для деревянного винта.

пающей вперед цилиндрической частью, которая входит в отверстие ступицы винта и на шлицы которой устанавливается второй фланец. По внутреннему диаметру цилиндрическая часть втулки имеет шлицы, которые входят в пазы вала двигателя при установке винта. Спереди и сзади цилиндрическая часть имеет конусные расточки, для посадки и затяжки на конус зажимной гайкой. Размеры шлиц, конуса и зажимной

гайки с ее контровкой делаются стандартными. Болты втулки зажимают деревянную ступицу винта между двух фланцев. Болты имеют диаметр 12—16 мм; при большой затяжке гаек можно создать очень большое давление фланцев на ступицу и во избежание смятия ступица всегда делается из твердого дерева — дуба, ясеня, бука, ореха.

Так как дерево является материалом мало стойким на истирание и гигроскопичным, то моноблочные винты обклеиваются материей и покрываются слоем целлулоида.

Передняя кромка лопасти наиболее подвержена истиранию, ибо находящиеся в воздухе твердые частицы — пыль, капли воды, песок — ударяются прежде всего об нее. Поэтому переднюю кромку всегда обивают металлическим листом — это называется *оковкой винта*. Оковку лучше делать разрезной (из частей), так как иначе при деформации винта во время работы она может коробиться и давать трещины (фиг. 20). Деревянные винты, применяемые на малых гидросамолетах,



Фиг. 20 Оковка деревянного винта

должны иметь более надежную оковку, чем у сухопутных самолетов, так как вода разрушает концевую кромку винта.

Моноблочные деревянные винты могут делаться двух- или четырехлопастными. В случае четырех лопастей они обычно делаются просто в виде двух двухлопастных блоков, которые зажимаются в одну втулку (фиг. 21). Трехлопастные винты сделать трудно, так как в этом случае каждая лопасть будет крепиться

ко втулке только болтами работающими на скалывание древесины, что не прочно и не конструктивно.

Деревянные винты всегда склеиваются из нескольких частей — планок. При изготовлении чертежа деревянного винта раскрой планок наносится на чертеж. Обычно толщина планок 10—15 мм; планки делаются различными по длине и ширине. При достаточно больших диаметрах винтов плавки по длине склеиваются на-ус, но таким образом, чтобы места склейки не приходились одно вблизи другого у разных планок.



Фиг. 21 Четырехлопастный деревянный винт с втулкой (лопасти спилены).

Размеры ступицы (ее диаметр зависит от диаметра винта и мощности двигателя) даны в таблице.

Размеры ступицы деревянных винтов

Диаметр винта в м	Мощность двигателя в л. с.	Внешний диаметр ступицы в мм
2,5	100 — 150	210
3,0	500 — 750	300
3,3	1000 — 1200	350
4,4	1200 и более	400 — 420

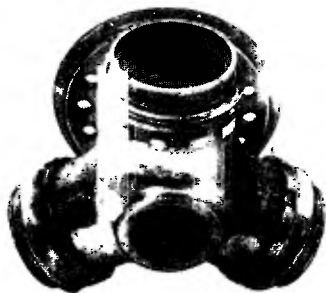
Под указанные чертежом размеры должен производиться и раскрой планок с припуском на обработку 5—10 мм с каждой стороны.

Так как в деревянных винтах центробежные силы, действующие на лопасть, сравнительно невелики из-за малого удельного веса дерева, то изгибающие силы компенсируются слабо и соз-



Фиг. 22 Втулка двухлопастного винта с переставными лопастями, разъемная

дают около ступицы большие напряжения на сдвиг. Поэтому конструкция переходной части от лопасти к ступице должна быть сделана достаточно массивной. Для того чтобы избежать тре-

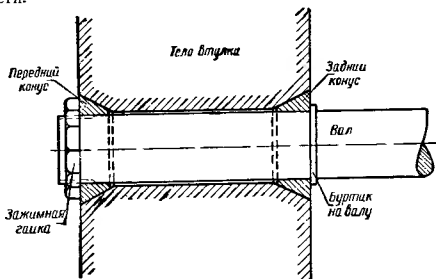


Фиг. 23 Втулка трехлопастного винта с переставными лопастями, неразъемная

щин, необходимо делать эту часть с плавным переходом, чтобы ступица постепенно, а не резко переходила в профилированную лопасть.

Металлические моноблочные винты теперь не применяются, так как, не обладая простой и дешевой изготовлением деревянных моноблочных винтов, они имеют все недостатки моноблочных винтов — трудность подбора к заданной мощности и оборотам данного двигателя. Металлические винты фиксированного шага делаются только с переставными лопастями.

Винты с переставными лопастями. У этих винтов лопасти являются отдельными деталями и закрепляются во втулке так, что могут поворачиваться вокруг своей оси, что позволяет, отпуская соответствующие болты, переставлять и устанавливать их на любой угол. Втулки таких винтов изготавливаются из стали, а лопасти из любого материала, отвечающего условиям прочности.



Фиг 24 Схема посадки втулки винта на носок вала двигателя на двух конусах

Втулка состоит из шлицевой части, надеваемой на носок вала двигателя, и рукавов, в которые вставляются лопасти и в них закрепляются. Шлицевое соединение делается стандартным и размер его назначается в зависимости от того двигателя, к которому предназначается винт.

Втулка может быть сделана разрезной (фиг. 22) или целой (фиг. 23). В первом случае две половинки соединяются между собой на шпильках для фиксации определенного взаимного положения. Для укрепления лопастей в рукавах на тех и других сделаны заплечики, которые и воспринимают центробежную силу лопасти. Изгибающие моменты воспринимаются рукавом втулки, который обнимает комлевую часть лопасти. Обжим рукава достигается хомутом, который затягивается болтом (фиг. 22). Лопасть удерживается в рукаве втулки от проворачивания лишь трением, поэтому затяжка хомута должна быть достаточно сильной.

Втулка устанавливается на носок вала двигателя на двух конусах — переднем и заднем (фиг. 24). Передним называется

конус, находящийся на конце носка вала, а задним — конус, находящийся на противоположной стороне носка вала — на стороне, примыкающей к двигателю. Назначение конусов заключается в центровке втулки винта на носке вала. Задний конус делается бронзовым с углом, составляющим  $15^\circ$  между поверхностью соприкосновения и осью носка вала. Для того чтобы этот конус возможно плотно прилегал к носку вала и к поверхности конусной расточки во втулке, он делается с одним прорезом (фиг 25)



Фиг 25 Задний конус



Фиг 26 Передний конус с затяжной гайкой.

Передний конус делается стальным из двух половинок с углом конусности в  $30^\circ$  (фиг. 26). Затяжная гайка, навинчиваемая на носок вала, нажимает на передний конус, который, в свою очередь вклиниваясь в переднюю конусную выемку во втулке, плотно прилегает к этой выемке и прижимает втулку к заднему конусу. Затяжная гайка затягивается на носке вала с большой силой, — момент приложенный к ней порядка 100 кгм, поэтому трение между конусами и конусными поверхностями во втулке достигает большой величины, так что крутящий момент, передаваемый с носка вала на винт, воспринимается в основном конусами. При малой затяжке конусов сила трения может быть недостаточной для восприятия крутящего момента, и тогда может произойти так называемое «припекание» конусов из-за того, что винт колеблется на носке вала (в пределах зазоров в шлицах). В этом случае конусные выемки во втулке имеют некоторое движение по отношению к конусам, и от трения между ними конусы нагреваются, что влечет за собой расплавление некоторых участков и приваривание к конусной выемке.

Вследствие большого натяга между конусами и конусными выемками во втулке, для того чтобы снять винт с носка вала или, как говорят, «стянуть» его с носка, требуется большое

усилие. Для стягивания винта используется та же затяжная гайка. У затяжной гайки имеются круговые заплечики, которые входят в круговые выемки у переднего конуса. При отвинчивании затяжная гайка тянет за собой передний конус и вытягивает его из конусной выемки втулки. При дальнейшем отвинчивании затяжной гайки она упирается в специальное съемное кольцо, находящееся на втулке, и стягивает винт с заднего конуса. Для того чтобы можно было заплечики затяжной гайки завести в выемки переднего конуса, последний делается из двух половинок.

В целой втулке лопасти в рукавах укрепляются или на нарезке (фиг. 23) или на заплечиках. В последнем случае в рукав ввинчивается гайка, которая и зажимает комель лопасти.

Винты с переставными лопастями делаются двух- и трехлопастными. Более трех лопастей не делается, так как винты фиксированного шага вообще на мощных двигателях не применяются.

Из рассмотренных типов втулок винтов фиксированного шага с переставными лопастями наиболее распространенными являются разрезные втулки.

Кроме посадки втулки на носок вала на шлицах, может применяться еще посадка на фланце. В этом случае носок двигателя оканчивается фланцем, такой же фланец имеется на задней части втулки (фиг. 23). Оба фланца между собой скрепляются болтами. Для центровки служат сделанные на том и другом фланце круговые закраины, кроме того, для восприятия крутящего момента служат сделанные на поверхностях обоих фланцев радиальные гребенки.

### § 3. Винты изменяемого шага

В винтах изменяемого шага должен существовать механизм, при помощи которого лопасти можно было бы поворачивать около их осей, которые обычно перпендикулярны оси вращения винта. При этом должна быть обеспечена синхронность поворота всех лопастей винта.

Скорость перестановки лопастей должна быть такой, чтобы винт мог быстро реагировать на изменение режима полета. Для обычного винта изменяемого шага бывает достаточно скорость перестановки лопастей в  $3^\circ$  в секунду. У винта изменяемого шага (см § 3 гл XXIII) должен быть хотя бы один ограничивающий упор установки лопастей, а именно упор *малого шага*, т. е. шага, соответствующего наименьшему углу установки лопастей. Этот упор должен быть регулируемым.

Винты изменяемого шага могут быть управляемыми от руки летчика, т. е. летчик по своему желанию может изменять угол установки лопастей, или быть *автоматическими*, т. е. автоматически управляемыми. Этот автоматизм может быть различным: а) винт может управляться регулятором, поддерживающим



какой-либо параметр постоянным, б) винт может управляться без регулятора, — его механизм можно устроить так, чтобы он изменял угол установки лопастей в зависимости от какого-либо режима полета (см. § 1 настоящей главы).

Винты изменяемого шага разделены на три типа: механические, гидравлические и электрические. Посмотрим теперь, каким образом конструктивно могут быть осуществлены эти три типа винтов.

**Механические винты изменяемого шага.** В этих винтах сила, переводящая лопасти с одного угла установки на другой, находится вне винта. Этой силой может служить мускульная сила летчика или сила от авиационного двигателя, вращающего винт. Схема действия простейшего механи-



Фиг. 27. Простейшая схема механического винта изменяемого шага.

ческого винта представлена на фиг. 27. Такая схема непригодна для мощных винтов, так как она не дает возможности создать больших потребных моментов для поворота лопастей. Поэтому такие схемы и не получили распространения. Каковы бы ни были схемы механической передачи, все равно для изменения шага мощных винтов мускульной силы летчика недостаточно. Поэтому необходимо иметь какой-либо сервомотор (вспомогательный двигатель). Если сервомотором будет гидравлический двигатель, то мы получим гидравлический винт, если электродвигатель — электрический винт. В механических винтах энергия для перестановки лопастей берется непосредственно от самого авиационного двигателя. Механические винты могут получать от авиационного двигателя силу, поворачивающую лопасти на другой угол установки через муфту, установленную между вращающимся винтом и носком картера двигателя или через дифференциальный механизм.

Муфта может работать на трение или быть кулачковой (или подобной ей). Муфта трения мало пригодна в данном случае, ибо регулирование винта происходит непрерывно, и поэтому пришлось бы непрерывно включать и выключать муфту, отчего выделялось бы много тепла, и муфта стала бы чрезмерно нагреваться. Кулачковая муфта не имеет недостатков, свойственных муфте трения, но имеет свои, к которым относится быстрый износ кулачков вследствие ударного их включения. Такие муфты применялись в механических винтах изменяемого шага, но рас-

пространения не получили. Принцип работы дифференциальной передачи заключается в том, что одна из цепей этой передачи притормаживается, т. е. необходимо иметь какой-то тормоз, а это также связано с нагревом деталей.

У автономных механических винтов передвижение лопастей на тот или иной угол производится теми силами, которые возникают в винте при его работе и изменяются при перемене режима работы винта. Конструктивно можно заставить при перемене режима работы винта так видоизменять эти силы, чтобы они поворачивали лопасти в нужном направлении и на нужный угол, поддерживая постоянным или изменяющимся по определенному закону какой-либо параметр режима работы винта.

В других типах автономных механических винтов передвижение лопастей производится ветрянкой или просто пластинкой, поставленной нормально к потоку. С изменением скорости полета число оборотов ветрянки или сопротивление пластинки будут изменяться и соответствующим механизмом лопасти будут переставляться.

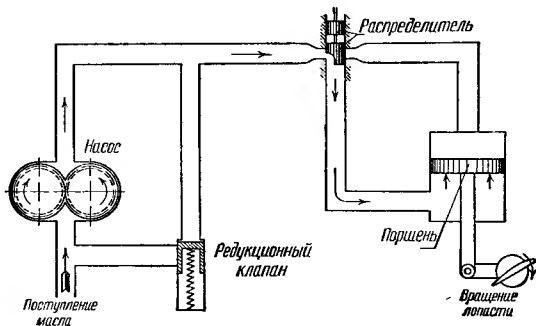
Из автономных механических винтов распространение получил лишь винт для маломощных самолетов, управляемый силами, получающимися при перемене режима работы винта. Описание такого аэромеханического винта см. в гл. V, § 5.

Как видим, решение задачи о механическом винте нелегко, поэтому механический винт и не получил широкого распространения в авиации.

Гидравлические винты изменяемого шага. В этом случае сервомотором служит гидравлический двигатель. По схеме гидравлических винтов мощность, необходимая для поворота лопастей, получается от авиационного двигателя, но передача усилий на винт производится посредством гидравлического привода. В гидравлической передаче всегда имеется насос и гидравлический двигатель. В системе гидравлического винта применяется шестеренный насос, приводимый в движение авиационным двигателем. Насос нагнетает масло в винт, в котором установлен гидравлический двигатель, поворачивающий лопасть (фиг. 28). Эта общая принципиальная схема может иметь множество конструктивных вариаций как в мелочах, так и в расположении отдельных частей.

В § 1 настоящей главы мы уже разделили гидравлические винты на два класса — неавтономные и автономные, т. е. работающие на масле от двигателя или на специальном масле, не входящем в систему смазки двигателя. И те и другие могут иметь в качестве конечного гидравлического двигателя или шестеренчатый гидравлический двигатель, или поршневой двигатель. Шестеренчатых двигателей может быть один на винт или по одному на каждую лопасть. И в том и в другом случаях вращательное движение гидравлического двигателя с помощью механической передачи производит поворот лопастей.

Поршневой гидравлический двигатель может быть двух типов: а) неподвижным, связанным со втулкой, может быть цилиндр, а движущийся поршень посредством той или иной механической передачи поворачивает лопасть; б) неподвижным может быть поршень, а движущийся цилиндр, связанный с лопастями, поворачивает их. В гидравлических винтах применяются тот и другой типы поршневого двигателя. Таких поршневых двигателей может быть на винте один, который передвигает все лопасти, но может быть и несколько, так что каждый двигатель поворачивает только одну лопасть.

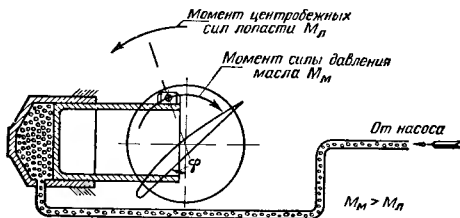


Фиг. 28 Схема гидравлической передачи.

Механизм, превращающий поступательное движение поршня во вращательное движение лопасти, может быть двух типов. Наиболее простым механизмом для такого превращения является шток с кривошипом. Шток присоединяется к поступательно движущемуся поршню, а кривошипом обычно служит палец, эксцентрично посаженный относительно оси поворота лопасти. Вместо штоков иногда применяется обойма, имеющая ушки, в которые и входят пальцы лопастей. Второй тип механизма превращения поступательного движения поршня во вращательное движение лопасти — это механизм, применяемый в так называемых винтовых дрелях. Поршень, двигаясь поступательно, передвигает поступательно же палец, укрепленный непосредственно на поршне или на штоке. Этот палец передвигается в вырезах специальной обоймы, сделанных по винтовой линии. При движении пальца поступательно обойма вращается около оси, совпадающей с осью поршня, и через коническую шестерню вращает лопасти около их осей. Могут быть различные видоизменения этого механизма.

Обыкновенно цилиндр с поршнем являются передней частью винта и ось поршня совпадает с осью винта. Для винтов военных самолетов иногда требуется, чтобы через ось винта проходил ствол пушки, тогда поршень приходится делать кольцевым. Такие винты называются пушечными.

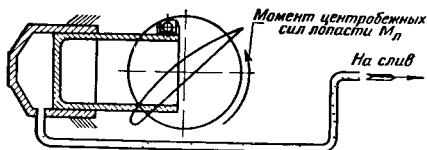
Всякий поршневой двигатель выходит конструктивно значительно проще, если он одностороннего действия; это относится и к механизму винта изменяемого шага. Гидравлический винг выходит конструктивно весьма простым, если поршень у него одностороннего действия. Если бы найти в самом винте такую постоянно действующую силу, которая бы стремилась поворачивать лопасти в одну сторону, то в другую можно было бы



Фиг. 29 Схема винта одностороннего действия обратной схемы. Увеличение шага моментом силы давления масла.

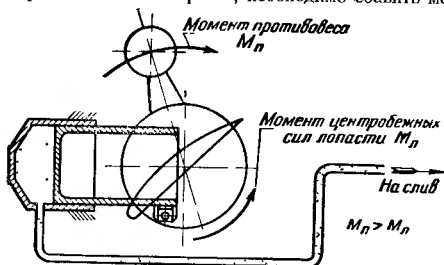
поворачивать их давлением масла на поршень. Такой постоянно действующей силой может быть сила сжатия пружины или естественный момент центробежных сил самих лопастей, всегда стремящийся повернуть их на уменьшение шага (см § 1 гл. XV). При такой схеме действия для поворота лопастей в одну сторону необходимо подавать масло в цилиндр под давлением, создающим силу на поршень большую, чем постоянно действующая сила (фиг. 29), а для поворота в другую — прекращать подачу масла, и тогда постоянно действующая сила поворачивает лопасти в противоположную сторону и, действуя на поршень, вытесняет масло из поршня в двигатель (фиг. 30). Гидравлические винты, у которых лопасти моментом центробежных сил представляются на малый шаг, а давлением масла на большой шаг, называются винтами обратной схемы. Если в таком винте по какой-либо причине давление масла прекратилось или уменьшилось до такой величины, что момент от центробежных сил превалирует над моментом от давления масла, то лопасти у этого винта сами устанавливаются на самый малый шаг, определенный установкой угла малого шага. Это является большим недостатком винтов обратной схемы, ибо при неисправности масляной системы винта может произойти так называемая раскрутка винта, т. е. превы-

шенне максимально допустимого числа оборотов авиадвигателя. Действительно, угол установки «малого шага» таков, что винт, который в этом случае работает как винт фиксированного шага, будет для всех режимов полета самолета слишком «легок», т. е. для допустимого числа оборотов двигателя мощность, снимаемая



Фиг 30 Схема винта одностороннего действия обратной схемы Уменьшение шага моментом центробежной силы лопасти

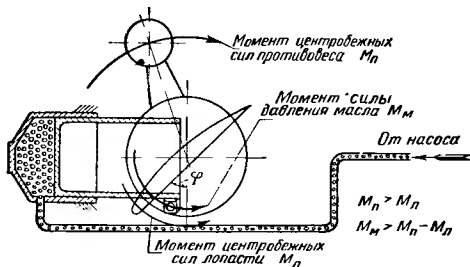
винтом, будет меньше, чем мощность, передаваемая на винт двигателем. Равенство потребляемой винтом мощности и мощности двигателя может наступить в этом случае только на больших числах оборотов. Поэтому, для того чтобы получить на этом винте допустимое число оборотов, необходимо сбавить мощность



Фиг 31 Схема винта одностороннего действия прямой схемы Увеличение шага моментом центробежной силы противовесов.

двигателя, или, иными словами, прикрыть его дроссель. Так как автомата, регулирующего положение дросселя по числу оборотов, двигатель обычно не имеет, а эту функцию должен выполнять сам летчик, то при быстром отказе масляной системы летчик не успеет прикрыть дроссель и произойдет раскрутка двигателя, которая может окончиться аварией, особенно если летчик не достаточно опытен или растерялся. Винты обратной схемы можно при менять только в двух случаях: а) если есть полная уверенность в исправной работе масляной системы винта и б) если имеется в

винте автомат, не позволяющий ему уменьшить настолько шаг, чтобы произошла его раскрутка. С указанной точки зрения было бы лучше, если бы винт сам переходил при неисправности масляной системы не на малый, а на большой шаг. Тогда мощность,



Фиг 32 Схема винта одностороннего действия прямой схемы. Уменьшение шага давлением масла

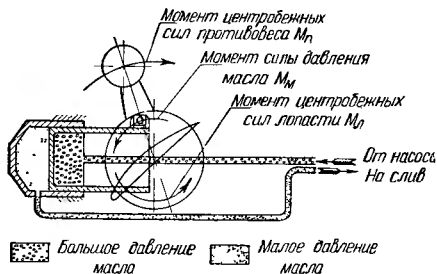
потребная для вращения винта на заданном числе оборотов, превышала бы мощность, даваемую двигателем, число оборотов снизилось бы и никакой раскрутки произойти не могло. Под большим шагом в данном случае мы подразумеваем ту наибольшую величину угла установки лопастей, которая обусловлена регулируемым упором большого шага, если такой упор существует, или просто упором, до которого может дойти поршень, управляющий движением лопастей в их рабочем диапазоне. Такой самостоятельный переход винта на большой шаг можно осуществить, если к лопастям прикрепить соответствующим образом расположенные грузы или особым образом расположить сами лопасти. Тогда расположение масс в лопастях будет таково, что сами лопасти всегда будут стремиться повернуться на большой шаг (фиг. 31). В этом случае сила давления масла, действующая на поршень, должна переставлять лопасти на малый шаг (фиг. 32). Такие гидравлические винты называются *винтами прямой схемы*.

Недостатком этих винтов является их большой вес из-за достаточно тяжелых добавочных грузов, так называемых *противовесов*. Очень часто эти противовесы совмещаются с хомутами, закрепляющими лопасть в рукаве втулки (фиг 33).



Фиг 33 Противовес лопасти как одно целое с хомутом

Конструкторы стараются обойти недостатки винтов обратной схемы тем, что устанавливают специальные запорные замки, которые фиксируют угол установки винта в тот момент, когда в системе падает давление масла. Ввиду того что в полете винт всегда стоит на угле установки большем, чем минимальный угол, при падении давления в полете замок зафиксировывает винт на угле большем, чем минимальный, и, следовательно, большой раскрутки получить не может. Замки эти делаются обычно гидравлическими, принцип их действия основан на том, что когда давление масла достаточно, то замок прижат этим давлением, если же давление падает, то пружина отжимает его и замок автоматически запирается.



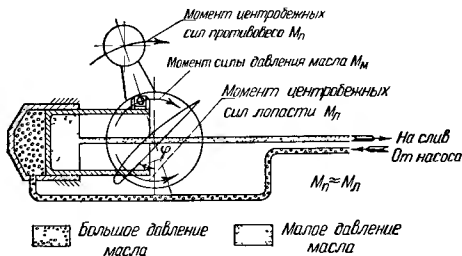
Фиг. 34. Схема винта двухстороннего действия с разгруженными лопастями. Уменьшение шага давлением масла.

Как уже было указано, несходным движением в обеих схемах — прямой и обратной — служит шестеренчатый насос. Управление этим насосом производится специальным регулятором, который управляет золотником, перепускающим масло от насоса в масляную систему винта. Такие винты называются автоматическими. В винтах одностороннего действия масло из насоса через золотник подается под поршень винта, а при обратном ходе поршня масло выталкивается опять через золотник, но уже в слив, т. е. в добавочный резервуар у автономных винтов или в картер двигателя у неавтономных винтов. Таким образом во время регулирования винта, т. е. во время его работы, насос гонит все новые и новые порции масла, а избыток масла сливается в картер двигателя.

В двухсторонней схеме гидравлического винта масло подается от насоса на поршень двухстороннего действия, ход которого в одну сторону переставляет лопасти на малый шаг (фиг. 34), в другую сторону — на большой шаг (фиг. 35). Вполне

естественно, что подача масла в ту или иную сторону поршня должна производиться через два канала

Источник воздействия масла на поршень может быть различным: можно масло от насоса с помощью золотника перераспределять то в один канал и, следовательно, на одну сторону поршня, то в другой канал и, следовательно, на другую сторону поршня; но можно на одну сторону поршня все время действовать постоянным давлением масла от какого-нибудь иного источника, а на другую сторону — от сервомотора с перепуском через золотник. В этом случае мы будем иметь некоторую аналогию с односторонней схемой, только роль постоянного момента в этом случае будет играть постоянный момент от давления масла на одну сторону поршня.



Фиг. 35 Схема винта двухстороннего действия с разгружающими противовесами. Увеличение шага давлением масла

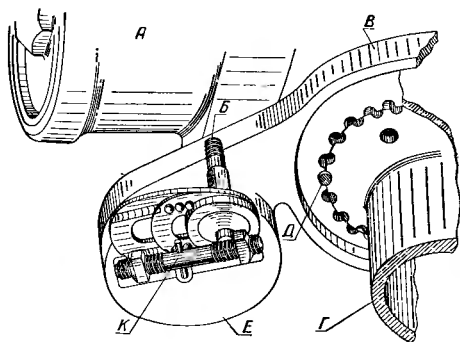
Постоянное давление можно получить, включив, например, один канал в систему смазки авиационного двигателя, в которой обычно поддерживается давление около 6—8 атм. В этом случае это постоянное давление можно включить только для перестановки лопастей на малый шаг, так как для перестановки на большой шаг при конструктивно приемлемых размерах поршня его нехватит бы даже для нейтрализации момента от центробежных сил, в особенности при широких лопастях.

Прв двухсторонней схеме с воздействием на поршень давления масла только от насоса результирующий момент для перестановки лопасти на малый или на большой шаг при обычных формах лопастей будет неодинаков и поэтому иногда применяют разгрузку лопастей. Разгрузка может быть сделана или приданием лопасти определенной формы или присоединением указанных выше противовесов. Разгрузку можно сделать полную или неполную, последняя более выгодна. Особенно удобно разгрузку сделать противовесами (фиг. 34, 35). В этом случае лопасть



можно разгрузить так, чтобы она устанавливалась без воздействия масла на любой большой угол установки, причем этот угол можно регулировать весом или расположением противовесов. Такая схема обладает всеми преимуществами двухсторонней и прямой схем.

В гидравлических винтах, которые согласно их схеме действия имеют неподвижный поршень и подвижный цилиндр, весь механизм перестановки лопастей вместе с движущимся цилиндром может быть расположен как внутри втулки винта, так и снаружи ее. Схема с наружным подвижным цилиндром применялась на первых винтах изменяемого шага, получивших боль-



Фиг. 36 Схема двухшагового винта

шое распространение в авиации (фиг. 36). Эти винты были двухшаговыми, т. е. лопасти имели только два положения: одно — малый шаг для разбега и взлета и второе — большой шаг для полета и наибольшей скорости. Эти винты были прямой схемы — с противовесами на лопастях, причем давление масла бралось от масляной системы двигателя. На двигателе имелся кран, открывавая или закрывая который можно было впускать масло под давлением из двигателя и устанавливать его на малый шаг или соединять полость цилиндра винта с картером двигателя, вследствие чего лопасти под влиянием центробежных моментов противовесов переставлялись на большой шаг, выжимая масло из цилиндра в картер двигателя.

Цилиндр А движется на неподвижно укрепленном поршне (фиг. 36). Втулка Г, скрепляемая с лопастью, соединяется с кронштейном В посредством цилиндрического штифта Д, вставляемого в отверстие. Число полуотверстий на кронштейне В и

на втулке  $\Gamma$  неодинаково, а отличается на одно полуотверстие. Эти полуотверстия расположены так, что каждое следующее их совпадение для возможности вставления шпильки соответствует повороту кронштейна  $B$  по отношению к лопасти на  $1^\circ$ . Это приспособление дает возможность иметь любой угол установки винта. В противовесе  $E$  помещается несложный механизм установки диапазона углов между малым и большим шагом. Для этой цели служит винт  $K$  с двумя гайками по концам, подбором расстояния между которыми и устанавливается необходимый диапазон углов. В нх упирается штифт  $B$ , служащий для передачи усилия от цилиндра к кронштейну и далее на лопасть. Этот штифт ввинчивается в тело цилиндра, а другим концом он насаживается на круговую обойму продольного шарикового подшипника; другой обоймой подшипника служит продолговатая пластина с канавками для катания шариков, которые заключены в плоский сепаратор.

Если движущийся цилиндр находится внутри втулки, кольцеобразно обнимая носок вала, то конструктивная схема винта получается достаточно простой, в особенности при одностороннем действии (см. § 2 главы V).

В винтах с шестеренными двигателями в качестве конечного двигателя передаточное число между валом шестеренного двигателя и лопастью должно быть большим, так как эти двигатели быстроходные. В силу этого передача может быть сделана самотормозящей, кроме того, этот двигатель может работать как реверсивный. Тогда, имея два канала подвода масла и пуская давление масла то в один канал, то в другой, можно поворачивать лопасти в ту или иную сторону. Вследствие наличия многоступенчатой передачи винты с шестеренными двигателями значительно сложнее, чем с поршнем.

Гидравлические винты получили весьма большое распространение вследствие простоты их как по конструкции, так и в управлении.

Электрические винты. В § 1 настоящей главы была дана классификация электрических винтов. Во всех упомянутых винтах поворот лопастей производится электродвигателем. Электродвигатель имеет удельный вес (вес на единицу мощности) тем меньший, чем больше его число оборотов. Это приводит к применению очень большого передаточного отношения от двигателя к лопасти. Поэтому вопрос о конструкции электрического винта связан в основном с конструкцией передачи. Для винтов с электродвигателем, помещенным на самом винте, может быть применена передача одного из трех следующих типов: простая многоступенчатая зубчатая, червячная и планетарная передача. Кроме этих трех основных, могут применяться и другие передачи — следует так распределить и применить передачи, чтобы получить компактную, простую в производственном и эксплуатационном отношениях конструкцию. Следовательно, можно также

применять и комбинацию из указанных передач. Конструктору необходимо помнить, что винт подвергается непрерывным вибрациям, исходящим из самого авиационного двигателя; поэтому конструкция передачи должна противостоять этим вибрациям.

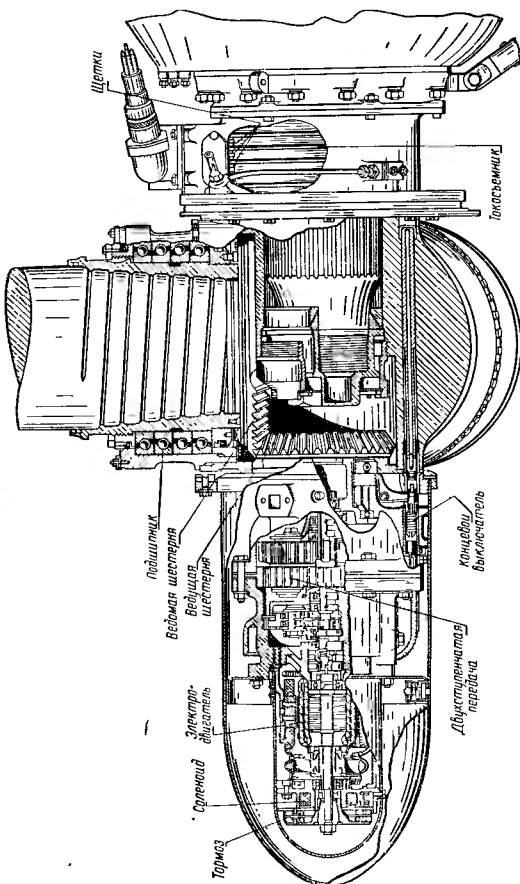
На одном винте может быть установлен один электродвигатель или несколько — по числу лопастей; в последнем случае необходимо лопасти соединить между собой механически, чтобы имела синхронность в их передвижении. Обычно электродвигатель устанавливается спереди винта. Передача помещается между электродвигателем и втулкой (фиг. 37).

Передачное отношение зависит от мощности, которая имеется в распоряжении конструктора для поворота лопастей. Часто конструктор бывает очень стеснен в мощности, так как на небольших самолетах мощность электроустановки, имеющейся на борту самолета, сравнительно невелика, на больших же самолетах мощность, потребляемая для разных вспомогательных устройств, все возрастает. Исходя, с одной стороны, из мощности, которая может быть использована на самолете для винта, а с другой, — из мощности электродвигателя, который бы не выходил из габаритов втулки винта и не был очень тяжел, и выбирается передача. Передачное отношение получается всегда очень большое — от 5000 до 12 000. Такие передачи являются самотормозящими во всех случаях.

Для правильной работы электрического винта в его конструкции следует всегда предусматривать комплект приспособлений.

Во-первых, у электродвигателя должен быть специальный тормоз или выключающая муфта. Дело в том, что электродвигатель делает всегда очень большое число оборотов. Вследствие этого при регулировании винта, всякий раз, когда электродвигатель приходится останавливать или изменять направление его вращения, у него получается большой выбег, отчего может иметь место колебание всего механизма винта. Для уменьшения выбега, а следовательно, для уменьшения колебаний и делают тормоз или выключающую муфту. Тормоз прекращает вращение якоря электродвигателя при выключении тока и освобождаст его при включении. Втулка расцепляет электродвигатель с механизмом изменения шага винта в моменты прекращения тока и, наоборот, сцепляет электродвигатель в момент появления тока.

Во-вторых, у винта должны быть концевые выключатели, которые автоматически выключали бы двигатель, когда лопасти дойдут до малого или большого шага. Особенно необходим концевой выключатель малого шага. Эти выключатели должны регулироваться и при определенной установке достаточно точно соответствовать определенному положению угла установки лопастей винта. Потребность в этих концевых выключателях вызывается необходимостью ограничивать ход лопастей в каком-то определенном диапазоне углов установки, с тем чтобы при каком-либо аварийном положении концевые контакты выключили



Фиг. 37. Электрический винт

электродвигатель и этим не допустили винт перейти на такие углы установки лопастей, при которых совсем невозможна его работа. Кроме того, определенный малый угол установки лопастей должен фиксироваться для того, чтобы проверить работу двигателя на месте (см. § 3 гл. XXIII).

Концевые контакты могут быть выполнены так, что один из них — подвижный — связан с поворачивающейся лопастью, а положение другого может регулироваться (при неработающем винте и с частичной разборкой его). Для этих же целей могут быть использованы стандартные выключатели с очень малым ходом, имеющие небольшие размеры.

В-третьих, для того, чтобы передать ток с неподвижного самолета на подвижный винт, в конструкции должны быть предусмотрены токоприемные кольца, расположенные на тыловой стороне втулки.

Так как лопасть должна поворачиваться в обе стороны, то электродвигатель должен быть реверсивным и, следовательно, от него должны идти два провода.

Питание электродвигателя электрического винта по большей части производится от общей сети самолета. Электрические автономные винты до сего времени не делались, ибо это усложняет винт, — на винте приходится иметь еще дополнительные вращающиеся с ним части.

Другим типом электрических винтов являются винты, у которых электродвигатель находится на авиационном двигателе и движение передается на лопасти винта посредством дифференциальной передачи. Следовательно, этот тип электрического винта отличается от предыдущего только тем, что у него дифференциальная передача. Поэтому у него должны быть те же приспособления, уничтожающие выбег электродвигателя, и те же концевые контакты.

В некоторых случаях на самолетах в целях обеспечения работы винта в аварийных случаях делают двойную схему работы винта изменяемого шага — электрогидравлическую, — винт может работать и как электрический и как гидравлический. В том случае если почему-либо электрическая сеть нарушена, винт переходит на работу по гидравлической схеме. Это значительно утяжеляет винт, но зато делает самолет более живучим

#### § 4. Флюгерные винты изменяемого шага

Как мы уже видели в § 2, гл. I, при флюгерном положении лопасти винта в полете от невращающегося винта получается наименьшее сопротивление винта. Вследствие закрученности лопастей и того, что условный угол установки лопастей принимается на  $0,75 R$ , или на  $1000 \text{ мм}$ , или на  $1600 \text{ мм}$ , в зависимости от размеров лопасти, угол установки во флюгерном положении всегда меньше  $90^\circ$  и обычно равен  $83-85^\circ$ . Ввиду того что точно определить теоретически угол флюгерного положения бывает

довольно трудно, всегда делают так, чтобы его можно было подбросить при испытании самолета, следовательно, его надо делать регулируемым. Для некоторых авиационных двигателей особенно опасен преувеличенный предварительно установленный угол флюгерного положения, так как при этом может оказаться, что винт начнет вращаться в обратную сторону, отчего могут произойти поломки в механизме двигателя.

Если в обыкновенных винтах изменяемого шага диапазон перестановки углов лопастей составляет 20—35° в зависимости от диапазона скоростей самолета, то у флюгерного винта этот диапазон расширяется и достигает 60—70°.

Флюгерные винты повышают безопасность полета вследствие того, что, во-первых, часто авария с двигателем вызывает сильную тряску моторной установки, когда винт работает как ветрянка, и, во-вторых, винт, установленный во флюгерное положение, имеет наименьшее сопротивление, которое можно получить от винта, когда двигатель не передает ему никакой мощности. Ввиду того, что на некоторых двухмоторных самолетах при аварии с одним двигателем из-за большого сопротивления вращающегося винта продолжать полет без снижения нельзя, еще до изобретения флюгерного винта применялись тормоза на винты. Заторможенный винт дает меньшее сопротивление и исключает тряску моторной установки. Однако тормоза на винты широкого распространения не получили и были затем заменены флюгерным положением винта.

Так как флюгерное положение лопасти чаще всего применяется в аварийных случаях, то к конструкции флюгерного винта следует предъявить требование быстрой перестановки лопастей во флюгерное положение. Особенно это важно в том случае, когда авария с двигателем случается при взлете; быстрая установка во флюгерное положение может предотвратить во многих случаях катастрофу.

Эту скорость перестановки лучше всего характеризовать угловой скоростью вращения лопасти около своей оси. Иногда ее характеризуют еще временем, через которое винт перейдет во флюгерное положение с минимального угла установки. Но так как угол установки у одного и того же типа винта, но предназначенного для разных самолетов или двигателей, может быть разный, то, следовательно, характеризовать эту скорость временем перестановки не совсем удобно. Современные флюгерные винты имеют скорость перестановки во флюгерное положение в среднем около 4° в секунду.

Наиболее просто решается вопрос об установке во флюгерное положение в электрическом винте. В винте этого типа вращение электродвигателя передается лопасти. Кратковременное увеличение скорости перестановки лопастей в электрических винтах достигается применением так называемого усилителя напряжения, при включении которого увеличивается скорость вра-

щения электродвигателя. Для флюгерного положения нужно иметь концевой упор или выключатель, который должен быть регулируемым по причинам, указанным выше.

Если винт самопроизвольно войдет во флюгерное положение, то для самолета может создаться аварийное положение, так как двигатель сразу будет чрезмерно нагружен, отчего обороты его сильно уменьшатся и, следовательно, мощность упадет. Поэтому конструкцию флюгерного винта всегда следует делать такой, чтобы исключить возможность самопроизвольного входа во флюгерное положение. В электрических винтах самопроизвольный вход во флюгерное положение достаточно надежно исключается применением концевых контактов (выключателю), и винт при неработающем электродвигателе всегда будет находиться в фиксированном положении лопастей.

Несколько сложнее обстоит дело в случае гидравлического винта с поршневым сервомотором. В этом случае поршень должен быть обязательно двойного действия. Подводка масла может быть как одноканальной, так и двухканальной. Во втором случае конструкция винта получается значительно проще, поэтому желательно, чтобы двигатели обеспечивали двухканальный подвод масла. В случае одного канала приходится для вывода из флюгерного положения делать специальное приспособление для внешнего (вне двигателя) подвода или отвода масла или применять специальные распределительные клапаны.

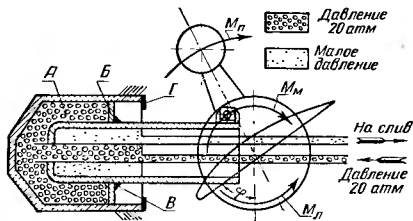
Так как при необходимости ввести винт во флюгерное положение двигатель может оказаться выбывшим из строя (например, заклинивание двигателя), то ввод во флюгерное положение и вывод из него должен производиться от отдельной масляной системы. Энергия для этих целей берется или от бортовой электрической сети или от сжатого воздуха из специально установленных баллонов, или от баллонов сжатого воздуха, предназначенных на самолете для других целей и используемых также для введения во флюгерное положение.

Наибольшее распространение получила система с использованием электроэнергии с применением отдельно электродвигателя.

Поскольку ввод во флюгерное положение и вывод из него производятся от отдельной масляной системы (см. § 1 гл. IV), для ограждения винта от самопроизвольного ввода во флюгерное положение его конструкция делается такой, чтобы ввод во флюгерное положение производился при повышенном давлении по сравнению с давлением, при котором лопасти поворачиваются в рабочем диапазоне углов. Конструктивно это может быть достигнуто или изменением кинематики передачи от поршня к цилиндру для углов установки лопастей от наибольшего до флюгерного, или различной площадью поршней для рабочего диапазона и флюгерного диапазона (от большого шага до угла флюгерного положения). В этом последнем случае поршень делается

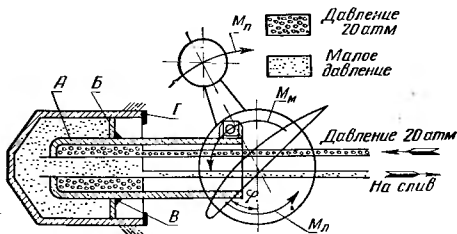
двойным: в рабочем диапазоне действуют оба поршня, а для перевода во флюгерное положение используется только один.

Наиболее удобна и проста двухканальная схема подвода масла, причем каждый канал связан только с определенной полостью цилиндрической группы, т. е. по одному каналу масло подается в полость перестановки лопастей на большой шаг, а по другому — в полость перестановки на малый шаг.



Фиг. 38. Схема винта двухстороннего действия, флюгерного. Увеличение шага в рабочем диапазоне.

На фиг. 38—41 представлена схема флюгерного винта с разгружающими противовесами на лопастях, с двухканальной под-

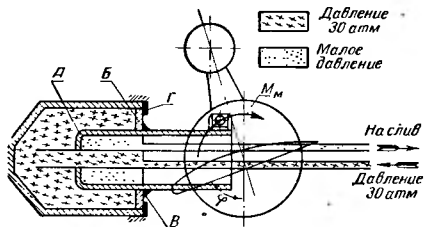


Фиг. 39. Схема винта двухстороннего действия, флюгерного. Уменьшение шага в рабочем диапазоне.

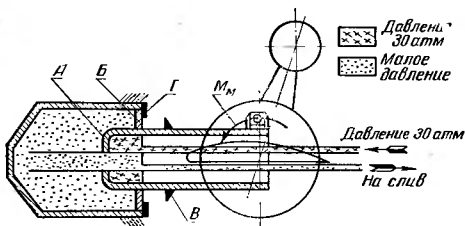
водкой масла и двумя поршнями — внутренним А и внешним В. Внешний поршень В может передвигаться по отношению к поршню А, однако в известных пределах. Давление масла все время прижимает поршень В к стопору В, находящемуся на поршне А. На цилиндре находится другой стопор Г, и когда оба поршня доходят до этого стопора, дальнейшее движение может совершать только поршень А. В рабочем диапазоне винта при



увеличении шага (фиг. 38) давление масла действует на оба поршня; при уменьшении шага (фиг. 39) масло действует только на поршень *А* с обратной его стороны. При вводе во флюгерное положение (фиг. 40), если начало ввода пришлось на такое положение лопастей, когда поршень *Б* еще не уперся в стопор *Г*



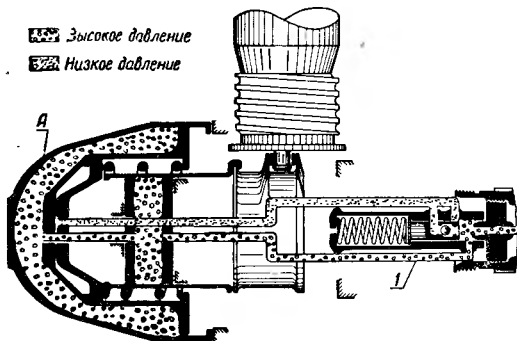
Фиг. 40. Схема винта двухстороннего действия, флюгерного. Ввод во флюгерное положение.



Фиг. 41. Схема винта двухстороннего действия, флюгерного. Вывод из флюгерного положения.

цилиндра, масло сначала действует на оба поршня. Когда же поршень *Б* уперся в стопор, то масло действует только на поршень *А*, который и переставляет лопасти винта во флюгерное положение. При выводе из флюгерного положения масло подается с обратной стороны поршня *А* (фиг. 41). Применяются схемы, когда один канал связан с постоянным давлением, а другой — или с малым давлением для рабочего диапазона углов, или с повышенным давлением для установки во флюгерное положение и вывода из него. По существу это схема одноканальная, так как второй канал в работе флюгера не участвует.

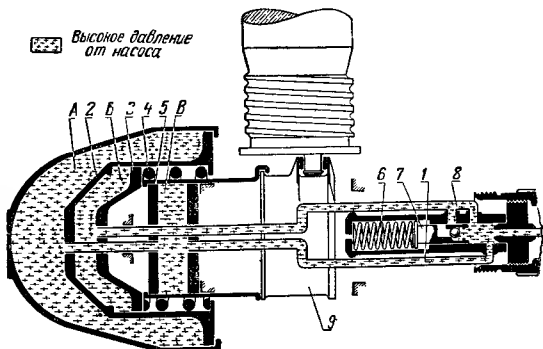
Одноканальные схемы флюгерных винтов применяются лишь для винтов переходного типа в том случае, когда у двигателя имеется только один канал, а на этот двигатель требуется поставить флюгерный винт. Когда все авиационные двигатели будут иметь два канала, то надобность во флюгерных одноканальных винтах отпадет, так как одноканальный винт по конструктивной схеме значительно сложнее, чем винт двухканальный.



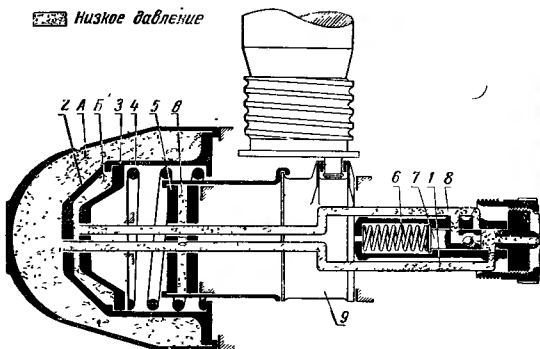
Фиг. 42. Схема флюгерного винта с одноканальной подводкой масла. Установка на большой шаг в рабочем диапазоне.

Идея конструктивной схемы одноканального флюгерного винта заключается в том, что в рабочем диапазоне перестановки лопастей винт работает по обычной прямой или обратной схеме, а перевод лопастей во флюгерное положение или вывод из него производится повышенным давлением масла, причем под влиянием этого повышенного давления передвигается специальный золотник, который и перепускает масло в нужную полость цилиндра винта. Может быть большое количество самых разнообразных конструктивных схем такого рода; мы приведем одну из таких схем винта обратной схемы, которая зарекомендовала себя в эксплуатации.

На фиг. 42, 43, 44 и 45 эта схема показана при различных рабочих положениях. Положение, показанное на фиг. 42, соответствует рабочему диапазону винта. Под влиянием давления масла, подаваемого в канал I и далее в полость A, между поршнем и цилиндром, лопасти винта поворачиваются на большой шаг. Если канал соединен со сливом масла, то лопасти винта под влиянием центробежной силы будут переставляться на ма-



Фиг. 43 Схема флюгерного винта с одноканальной подводкой масла  
Ввод лопастей во флюгерное положение.



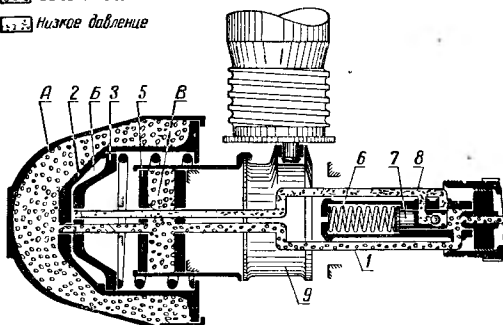
Фиг. 44 Схема флюгерного винта с одноканальной подводкой масла  
Винт подготовлен к выводу лопастей из флюгерного положения.

лый шаг, и масло поршнем будет вытесняться из полости *A* через канал *1* на слив.

Для ввода винта во флюгерное положение в канал подается повышенное давление масла (фиг. 43), которое сначала двигает поршень *2* до его упора, после чего давление в полости *A* начинает повышаться. При определенном повышенном давлении золотник *7* сжимает пружину *6* и передвигается влево, открывая канал *8*, соединенный с полостью *B*, находящейся между поршнем *2* и поршнем *3*. Под давлением масла поршень *3* передвигается вправо и через траверсу *9*, действующую на пальцы лопастей, устанавливает последние во флюгерное положение

 Высокое давление

 Низкое давление



Фиг. 45. Схема флюгерного винта с одноканальной подводкой масла. Вывод лопастей из флюгерного положения.

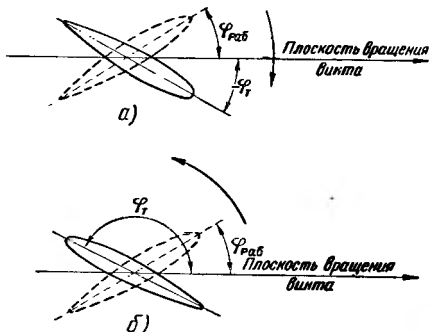
Когда давление через канал перестало передаваться, т. е. во всей системе давление упало, то пружина *6* передвигает золотник *7* в исходное положение. Пружина *4* выдвигает поршень *3* налево. Поршень выжимает масло через канал *8* и клапан на слив. В этом положении винт подготовлен к выводу из флюгерного положения (фиг. 44). Так как при вводе винта во флюгерное положение масло из полости *B* было выжато через канал *1* вследствие того, что сила, действующая на поршень *3*, больше (из-за разности площадей), чем сила, действующая на поршень *5*, то при подаче давления в канал *1* поршень *5* станет передвигаться влево и потянет за собой траверсу *9*, лопасти из флюгерного положения станут переходить в положение рабочего шага, и, следовательно, винт будет находиться в диапазоне рабочих углов установки лопастей (фиг. 45).

### § 5. Тормозные винты изменяемого шага

В *тормозных винтах* диапазон изменения углов лопастей еще больше, чем у флюгерных.

В зависимости от назначения самолета винты изменяемого шага могут быть или только тормозными, или флюгерно-тормозными. Первые могут иметь применение для одномоторных самолетов, а вторые — для многомоторных.

В § 2 гл. I мы видели, что торможение винтом производится путем отбрасывания им струи воздуха против движения самолета.



Фиг 46 Способы перевода лопастей винтов на тормозной режим.

*a* — через нулевое положение лопасти, *б* — через флюгерное положение лопасти.

Такое отбрасывание струи достигается тем, что при том же направлении вращения винта лопасти его устанавливаются под отрицательным углом к плоскости вращения винта. Иными словами, угол установки лопастей  $\varphi$  становится отрицательным.

Перевод винта из обычного рабочего положения, когда угол установки лопасти  $\varphi$  положителен, в тормозное положение, когда угол установки отрицателен, можно производить несколькими способами. Первый способ — лопасти поворачиваются от большого угла установки на малый и через нулевое положение из отрицательный (фиг 46, *a*). Второй способ — перевод через флюгерное положение, когда лопасть поворачивается с рабочего положения на большие углы установки, переходит через флюгерное положение, и угол установки делается большим  $90^\circ$ ; в этом случае задняя кромка лопасти становится передней (фиг 46, *б*).

Третий способ — переводу в тормозное положение подвергается только часть лопастей.

Каждый из указанных способов перевода винта в тормозное положение имеет свои преимущества и недостатки.

При первом способе лопасти винта приходится переводить через такое положение, при котором сопротивление лопастей вращению почти равно нулю (угол установки  $\varphi$  близок к нулю), а это приводит к тому, что двигатель работает почти без нагрузки, его число оборотов должно сильно увеличиться, из-за чего может последовать поломка двигателя. Поэтому в случае применения первого способа перевода лопастей в тормозное положение приходится скорость перевода винта делать очень большой или в момент перевода сбавлять мощность двигателя.

При втором способе во время перевода через флюгерное положение момент на лопасти сначала увеличивается до наибольшего (при флюгерном положении, когда угол установки  $\varphi$  близок к  $90^\circ$ ), а затем начинает уменьшаться. В этом случае, наоборот, двигатель при переводе винта в тормозное положение нагружается и разбега оборотов не будет. Однако диапазон углов установки, который приходится пройти лопасти, значительно больше, чем в первом случае, и поэтому конструктивное выполнение такого винта может вызвать затруднения.

При третьем способе, т. е. при переводе в тормозное положение не всех лопастей, хотя разгона двигателя при прохождении лопастей через нулевой угол и не будет, но конструктивное выполнение такого винта достаточно сложно и, кроме того, поскольку в торможении участвует только часть лопастей, отрицательная тяга такого винта будет невелика.

Такой частичный перевод винта в тормозное положение может быть использован для получения нулевой тяги от газотурбинного двигателя под нагрузкой.

Газовая турбина турбовинтового двигателя, имеющая большое число оборотов колеса, сравнительно медленно реагирует на изменение числа оборотов и мощности, т. е. она обладает малой приемистостью. Между тем в некоторых случаях авиационной практики приемистость двигателя имеет большое значение. Предположим, например, что летчик на самолете идет на посадку; для этого ему надо уменьшить скорость полета, а следовательно, уменьшить тягу винтов. Для уменьшения тяги летчик уменьшает мощность двигателя, передаваемую на винг. Уменьшение мощности газовой турбины достигается уменьшением числа оборотов колеса турбины (уменьшением подачи топлива). Предположим далее, что вследствие плохого расчета посадки или по другим причинам приходится идти на другой круг. Для этого необходимо быстро увеличить мощность двигателя для быстрого увеличения тяги винтов, что дало бы возможность самолету подняться. Такое быстрое увеличение мощности трудно получить на газотурбинном двигателе. «Частичное торможение»

может разрешить этот вопрос. Действительно, вводя в тормозное положение только часть лопастей, оставив остальные в рабочем положении, мы создаем условия, при которых часть лопастей дает положительную тягу, а часть — отрицательную, т. е. торможение, и сумма их может быть равной нулю и посадка может производиться с малой скоростью. Между тем на вращение всех лопастей будет затрачиваться мощность, и двигатель даже при нулевой тяге будет находиться под нагрузкой. В случае необходимости быстро иметь положительную тягу надо быстро перевести все лопасти в нормальное рабочее положение. Быстрота перевода лопастей в то или иное положение будет зависеть от мощности механизма перевода. Таким образом в описанном случае приемистость двигателя переносится на «приемистость» винта.

Весьма важным конструктивным фактором в тормозных винтах является скорость перехода в тормозное положение. Наиболее удобным в эксплуатационном отношении будет такой винт, лопасти которого могут переходить в тормозное положение без сбавления газа двигателя. Опыты показали, что перевод лопастей винта в тормозное положение можно производить при почти полном открытии дросселя, если наибольшая скорость поворота лопастей составляет около  $45^\circ$  в секунду. При этом наблюдается очень кратковременное увеличение числа оборотов двигателя. не превышающее 10%.

Такие большие скорости поворота вполне естественно требуют и сравнительно больших мощностей. Так, для четырехлопастного винта под современный двигатель в зависимости от типа лопасти и конструкции механизма винта при скорости поворота лопастей  $45^\circ$  в секунду требуется от 10 до 20 л. с.

Конструктивно наиболее просто решается вопрос о переводе винтов в положение торможения в электрических винтах (мегоды этого перевода были указаны в § 1 настоящей главы).

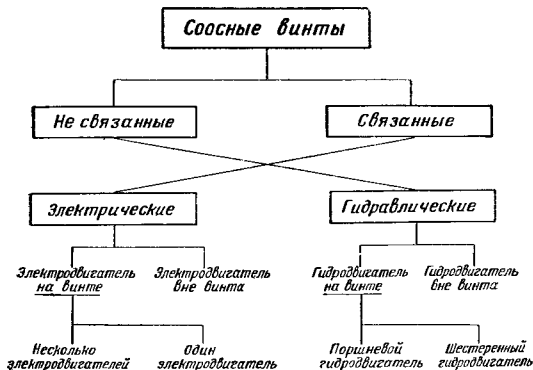
При тормозном положении лопасти должны находиться под углом установки примерно  $-20^\circ$  и, следовательно, полный диапазон изменения углов лопастей для флюгерно-тормозных винтов будет  $20+90=110^\circ$ .

Для таких винтов необходимо, следовательно, иметь четыре стопора. два — для рабочего диапазона (или по крайней мере один — для малого шага) и по одному — для крайних положений — флюгерного, с одной стороны, и тормозного, с другой. Эти стопоры должны быть контактного типа для электрических винтов и механические или гидравлические для гидравлических.

## § 6. Соосные винты

Установившихся конструкций соосных винтов в настоящее время нет, распространения они еще не получили, поэтому об их конструкции можно говорить лишь в самых общих чертах.

Конструктивно соосные винты разделяются на те же типы, как и обычные винты изменяемого шага. Так как соосные винты будут устанавливаться преимущественно на больших самолетах с мощными двигателями — поршневыми и газотурбинными, то естественно от них требовать всех новейших усовершенствований, которые за последнее время появились, иными словами, эти винты должны быть и флюгерными и тормозными



Фиг. 47. Классификация соосных винтов

Соосные винты могут быть механическими, электрическими и гидравлическими.

На фиг. 47 приведена примерная классификация соосных винтов

## § 7. Конструкции лопастей винтов

Усилия авиационных конструкторов направлены всегда к тому, чтобы по возможности уменьшить вес данной конструкции. Это относится и к лопастям винтов. За время существования авиации было предложено и изучено большое количество различных типов лопастей винтов. Однако при конструировании лопастей винтов приходится принимать во внимание в первую очередь достижение возможно лучшего коэффициента полезного действия винта, а также удобство эксплуатации, продолжительность службы и прочность конструкции. До тридцатых годов текущего столетия этим требованиям в достаточной мере удовлетворяли деревянные моноблочные винты, которые и применялись повсеместно в то время. С распространением все более мощных



двигателей деревянные моноблочные винты все менее стали удовлетворять поставленным требованиям и им на смену пришли винты со сплошными дуралюминовыми лопастями, которые и до сих пор занимают первенствующее место.

Для сплошных лопастей могут быть применены самые разнообразные материалы, дуралюмин, сталь, электрон, дерево, пластики. Однако вполне естественно, что конструкторская мысль должна идти по пути изыскания таких конструкций, которые давали бы более легкие лопасти. Это приводит к конструкции полых лопастей. С другой стороны, упрочнение дерева и пластиков приводит к различного рода композиционным конструкциям, т. е. составленным из различных материалов, каким-либо образом между собой соединенных (простейший пример этого — железобетон в строительном деле). С этой точки зрения мы рассмотрим следующие типы лопастей: 1) дуралюминовые, 2) стальные, 3) электронные, 4) деревянные, 5) композиционные.

Разбирая конструкцию указанных лопастей остановимся на трех следующих ее частях: а) перо лопасти, б) узле крепления лопасти во втулке — комлевой части и в) переходной части от пера к комлевой части.

**Дуралюминовые лопасти** Как мы знаем из § 3 гл. I, форма пера лопасти определяется геометрическими характеристиками согласно фиг. 9, на которой в зависимости от радиуса отложены ширина, толщина и кривизна лопасти. Если величина кривизны не оказывает особенного влияния на конструкцию лопасти, то ширина и толщина сильно связаны как с конструкцией самой лопасти, так и с конструкцией всего винта. Действительно, с аэродинамической точки зрения лопасти желательно делать возможно меньшей, особенно на конце, чтобы избежать больших потерь, вызванных большими скоростями конца и связанным с ними эффектом сжимаемости воздуха (см. § 2 гл. XIII). Но, с другой стороны, тонкие лопасти более подвержены вибрациям. Практика и расчет выработали некоторые примерные границы уменьшения толщины современных сплошных дуралюминовых лопастей. Примерная толщина лопасти, применяемой в настоящее время, представлена на фиг. 72. Не следует, однако, думать, что указанная на фиг. 72 толщина является предельной; по видимому, лопасти могут быть еще тоньше.

Вторым фактором, определяющим конструкцию лопасти, является ее ширина. Ширина лопасти определяется исходя из условий работы лопасти, по аэродинамическому расчету винта (см. § 4 гл. XII, § 2 гл. XIV).

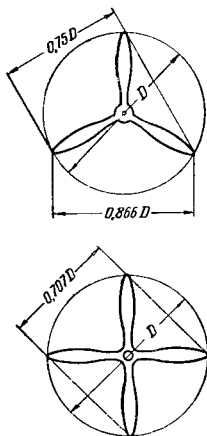
Комлевая часть лопасти делается различной в зависимости от конструкции всего узла крепления лопасти во втулке. Как уже было указано, лопасти могут крепиться во втулке на запящых или на резьбе.

В винтах изменяемого шага лопасть должна свободно поворачиваться во втулке вокруг своей оси на подшипниках. Эти

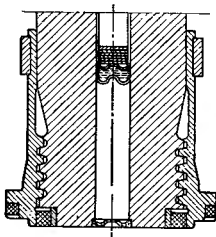
подшипники могут непосредственно надеваться на лопасть или соприкасаться с ней через какой-либо стакан, обойму

Размеры собранного винта всегда относительно велики, тогда как отдельные его части имеют небольшой размер; поэтому с эксплуатационной точки зрения удобнее делать конструкции винтов такими, чтобы их можно было просто и быстро собирать и разбирать, тогда транспортировка их будет гораздо проще. На фиг. 48

указаны габариты трех- и четырехлопастных винтов. Если винты запаковывать в ящики в собранном виде, то в крытые вагоны железной дороги войдут винты только небольшого диаметра. Поэтому если винтовой завод находится сравнительно далеко от потребителя — самолетного завода, то винты придется отправлять в разобранном виде. Чем



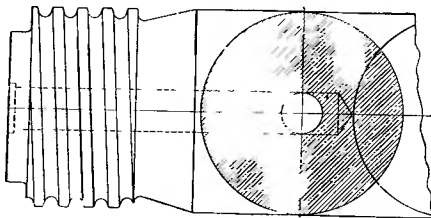
Фиг. 48 Габариты трех- и четырехлопастных винтов



Фиг. 49 Лопасть, ввинчиваемая в переходный стальной стакан

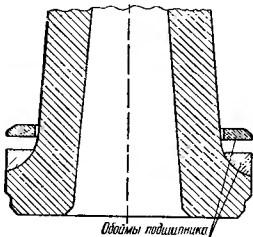
при этом проще будет сборка винта на самолетном заводе, тем лучше. С этой точки зрения наиболее удобен такой узел крепления лопасти во втулке, когда лопасть ввинчивается в переходный стакан и зажимается в нем (фиг. 49). В этом случае приходится выполнять нарезку так, чтобы не делать резких переходов и этим не создавать концентрации напряжений, места которых могут послужить очагами начала усталости металла (фиг. 50) Для типа с непосредственным креплением подшипника на заплечике лопасти остроумной конструкцией комлевой части является показанная на фиг. 51. Применение такого крепления тесно связано с технологией лопасти (см. § 4 гл. XXI). Заплечик указанной формы хорош тем, что напряжения в нем распределяются сравнительно равномерно.

Прикомлевая часть лопасти в некоторых случаях имеет большое значение и поэтому на ее конструкцию приходится обращать особое внимание. Комлевая часть обычно делается круглой, ибо на ней сидит подшипник, сечение же пера лопасти представляет



Фиг. 50 Комлевая часть лопасти с нарезкой

собой дужку вытянутой формы. Если эффективная часть пера лопасти заканчивается на сравнительно большом расстоянии от комлевой части, то прикомлевая часть служит для того, чтобы создать плавный переход от пера к комлю лопасти. Однако величину этой переходной — прикомлевой — части желательно сократить до возможно малых размеров, с тем чтобы перо лопасти, назначение которого состоит в создании тяги, имело возможно большую эффективную величину.



Фиг. 51 Комлевая часть лопасти с заплечиком и роликовым подшипником.

Кроме того, в случае двигателей воздушного охлаждения назначенные части пера лопасти, примыкающей к прикомлевой части, состоит еще в том, чтобы обдувать двигатель при работе его на месте. Тогда переход от пера лопасти к комлевой части получается достаточно резким.

Таким образом с точки зрения получения возможно большей эффективности от лопасти винта следует делать переход от пера к комлю возможно более резким, а для того, чтобы не получить концентраций напряжений и, следовательно, снижения прочности, переход надо делать плавным. Применение съемных обтекателей на переходной части нежелательно, так как они осложняют эксплуатацию, поэтому всегда стараются сделать такой переход, чтобы удовлетворить обоим требованиям.

В случае необходимости применения обтекателей на прикомлевых частях лопастей конструктивно они могут быть выполнены трех видов: деревянные, резиновые и металлические. В первом случае на переходную дуралюминовую часть лопасти наклеиваются деревянные бобышки (фиг 52), которые, кроме того,



Фиг 52 Обтекатель на переходной части лопасти.



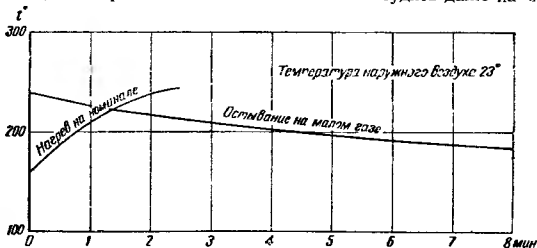
Фиг 53 Форма прикомлевой части с резким переходом от пера лопасти к комлевой части

для прочности склейки притягиваются стальными лентами. Во втором случае резина навулкаизируется на переходную часть в форме дужки, и, наконец, в третьем случае обтекатели делаются из листового металла в виде манжет, надеваемых на переходную часть

Однако всякие обтекатели всегда бывают неудобны и являются излишним придатком к лопасти и поэтому следует всегда стремиться, если это и конструктивно и технологически для данного типа лопасти возможно, обойтись без обтекателей, а придать

переходной части лопасти нужную с точки зрения аэродинамики форму (фиг. 53). Для того чтобы показать на примере чрезвычайную необходимость в некоторых случаях придать прикомлевой части лопасти форму дужки, обратимся к вопросу об охлаждении двигателей воздушного охлаждения. На фиг. 54 показано время разогрева головок цилиндров двигателя при работе его на месте с винтом, у которого был сделан резкий переход от круглого сечения к перу лопасти (фиг. 53).

При плавной переходной части лопасти самолет эксплуатировать было нельзя, ибо при рулежке двигатели настолько нагревались, что перед взлетом их нельзя было остудить даже на ма-



Фиг. 54 Время разогрева и остывания головок цилиндров двигателя при работе с винтом с переходной частью лопастей, указанной на фиг. 53.

лых числах оборотов. С резкой же переходной частью лопасти самолет эксплуатируется нормально.

Наибольшее распространение во всем мире получили сплошные дуралюминовые лопасти.

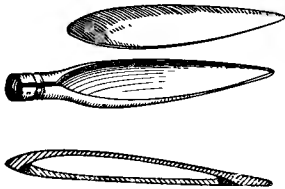
Удачных конструкций полых дуралюминовых лопастей до сих пор времени не существует. В некоторых конструкциях сплошных лопастей в комлевой части производится высверливание и удаление материала на некоторое расстояние (фиг. 51).

**Стальные лопасти.** В противоположность дуралюминовым стальными лопасти получили распространение только в виде полых конструкций. Сплошные стальные лопасти делались лишь в виде опытных экземпляров и распространения не получили вследствие большого веса, тонкие же стальные лопасти склонны к вибрациям. Применение стали для изготовления лопастей является весьма заманчивым, ибо по всем физико-механическим показателям, кроме веса, сталь превосходит все остальные конструкционные материалы.

Однако конструкция полых стальных лопастей значительно сложнее сплошных дуралюминовых и труднее в выполнении. Она

тесно связана с технологией лопасти, и поэтому вопрос о рациональной конструкции стальных полых лопастей есть вопрос о технологии их изготовления.

Полые стальные лопасти могут быть сделаны со швом, т. е. из двух или нескольких частей, соединенных между собой сваркой, или пайкой, или бесшовные. Трудность изготовления последних заключается в том, что форма лопасти весьма сложна, ее ширина и толщина изменяются не по линейному закону, к тому же она закручена. Поэтому вполне естественно, что большинство попыток изготовления полых лопастей заключается в том, что лопасть изготавливают из нескольких частей, которые сваркой или пайкой соединяют между собой.



Фиг. 55 Стальная сварная полая лопасть



Фиг. 56 Стальная спаянная полая лопасть

Конструктивно полая лопасть первого типа — сварная, состоит из двух отштампованных частей, соединенных между собой *сваркой* по кромкам (фиг. 55). Комлевая часть может укрепляться во втулке на нарезке или на заплечиках. Толщина стенки лопасти обычно уменьшается к концу.

Если требуется иметь резкий переход от комля к перу, то приходится применять обтекатели.

При другом варианте технологии изготовления полая лопасть составляется из отдельных частей, спаянных между собой. Удобство спайки заключается в том, что нагрев при этом требуется меньший, чем при сварке, а следовательно, и меньше поводка металла; кроме того, при сварке может произойти перегрев металла и, следовательно, появление трещин и других дефектов.

В случае соединения пайкой две части лопасти изготавливаются частично штамповкой, а частично фрезерованием, получается коробчатая конструкция с внутренними подкреплениями лопасти (фиг. 56). Обе части спаиваются между собой медью

Комлевая и переходные части делаются такими же, как и в первом варианте.

Штампованные бесшовные полые лопасти делаются из трубы с уменьшающейся толщиной стенки к концу. Штамповать такую полую лопасть трудно и поэтому приходится прибегать к различным иногда довольно сложным технологическим ухищрениям. Часто конец лопасти приходится разрезать и затем заваривать или запаивать, так что часть лопасти получается бесшовной, а часть (конец) со швом. Комлевая часть делается нарезке; форма переходной части получается плавной и поэтому приходится применять обтекатели.

Безусловно, стальные винты имеют большую будущность и применение их должно способствовать развитию винтостроения вообще.

Что касается формы стальных полых лопастей, то толщина их может быть и не больше сплошных дуралюминовых, особенно лопастей, спаянных из двух частей. Ширина лопасти обуславливается чисто аэродинамическими требованиями и с конструктивной стороны никаких препятствий нет к выполнению любой ширины. Конструктивно наиболее удобно выполняется лопасть постоянной ширины, поэтому стальные полые лопасти по большей части делаются по форме прямоугольными.

**Электронные лопасти.** Под этим названием подразумеваются лопасти, сделанные из сплавов магния. Удельный вес этих сплавов  $1,8 \text{ г/см}^3$ . Временное сопротивление электрона достигает  $35 \text{ кг/мм}^2$  и поэтому он является прекрасным материалом для лопастей винтов. Однако электронные лопасти не получают большого распространения, повидимому, потому, что электрон штамуется плохо и приходится применять прессовку его на дорогостоящем прессовом оборудовании. Кроме того, электрон подвержен коррозии. Конструктивно электронные лопасти не отличаются от дуралюминовых. Они должны делаться только сплошными.

Так как электрон в большей степени чувствителен к концентрации напряжений, чем дуралюмин, то при конструировании электронных лопастей это приходится принимать во внимание.

Электрон больше подвержен истиранию, чем дуралюмин, поэтому передняя кромка лопасти из него будет скорее истираться при неблагоприятных условиях, например, при действии песка, пыли или дождя.

**Деревянные лопасти.** Под деревянными лопастями подразумеваются лопасти, сделанные из дерева или его композиции. Эти лопасти вставляются в стальную втулку, а так как непосредственное сопряжение дерева и металла осуществить трудно, то обыкновенно на комель лопасти надевается стальной стакан, который и сопрягается со стальной втулкой подобно обычным металлическим лопастям. Таким образом перо лопасти может быть сделано или из обычной мягкой древесины (сосна, ель),

или из композиционной древесины, которую иногда называют прессованной. Эта последняя в зависимости от изготовления ее может быть достаточно твердой. И в том и другом случаях лопасти склеиваются из отдельных досок. Иногда мягкая древесина обклеивается какой-либо твердой фанерой (например, березовой). Кроме того, иногда поверх всего лопасть обтягивается металлической сеткой и покрывается слоем целлулоида, а также материи (фиг. 57). Комлевая часть делается всегда из твердого дерева, чаще из прессованной древесины, которая скрепляется с пером склейкой на-ус. Стакан укрепляется на этой твердой комлевой части на нарезке и на специальном цементе. Переходная часть может быть сделана любой с соблюдением лишь элементарных правил прочности.

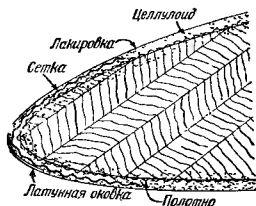
Передняя кромка такой лопасти должна быть окована, так как поверхность лопасти, даже покрытая целлулоидом, все же сильно подвержена истиранию и требует предохранения.

Наименьшая толщина такой лопасти из легкого дерева диктуется технологическими соображениями. Поэтому деревянные лопасти такого типа могут быть сделаны широкими с достаточно малой относительной толщиной. Ввиду же легкости дерева получающиеся моменты на механизмы у таких широких лопастей получаются сравнительно небольшими.

Другой тип деревянных лопастей — это лопасти, сделанные прессованием пакета, составленного из тонкого шпона, пропитанного особым составом. Лопасти получаются однородными. Некоторая трудность заключается в предохранении передней кромки от истирания, так как прессованная древесина все же подвержена довольно сильному истиранию при работе винта.

Деревянные лопасти имеют распространение в авиации только на маломощных самолетах.

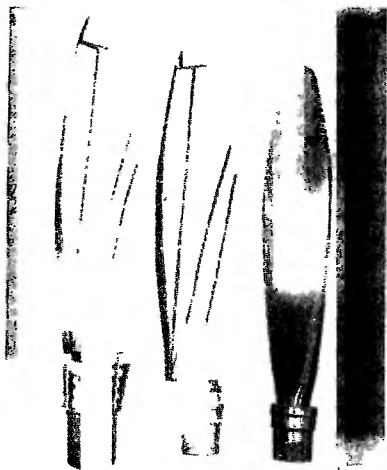
Композиционные лопасти. Под этими лопастями подразумеваются конструкции, сделанные из неоднородных материалов. Стремление к ним обусловливается тем, чтобы наилучшим образом использовать данный материал в соответствующих условиях. Конструкций композиционных лопастей было предложено очень много, однако ни одна из них не получила распространения. Объясняется это главным образом тем, что создание высококачественных лопастей такого типа очень сложно как в конструктивном, так и в технологическом отношении, особенно в массовом количестве.



Фиг. 57. Схема деревянной лопасти с жестким покрытием



Обычно композиционные конструкции создаются исходя из следующих соображений. Сталь работает очень хорошо на растяжение, следовательно, необходимо иметь в лопасти стальные стержни, работающие на растяжение, а между ними какой-нибудь легкий наполнитель, например дуралюмин или какой-нибудь еще более легкий материал. Так, например, были попытки делать лопасти из дерева с вклеенными в него в комлевой части стальными полосами (фиг. 58).



Фиг. 58 Композиционная лопасть Три стадии ее изготовления

Были также попытки делать полые дуралюминовые лопасти с усилением их стальными стержнями

Наконец к композиционным лопастям можно отнести также и текстолитовые; однако хорошие результаты могут получиться лишь при применении очень хороших сортов текстиля, именно тонкого батиста и шелка. Эти материалы очень дорогие, и, кроме того, процесс производства таких лопастей требует тщательной укладки материи при прессовке, что естественно удорожает производство

Мало основания думать, чтобы композиционные лопасти получили в будущем какое-либо распространение, ибо авиация теперь основывается на массовом производстве, а эти лопасти менее удобны для такого производства, чем остальные, рассмотренные выше.

Мы рассмотрели конструкции пяти различных типов лопастей, отличающихся между собой материалом. Встает вопрос, какой же материал более выгоден для лопастей? Для авиации вообще наиболее выгодным с точки зрения конструкции будет тот материал, который имеет наибольшее временное сопротивление при наименьшем весе. Для винтов вес имеет еще большее значение, так как от веса, вернее удельного веса, зависит центробежная сила, которая главным образом и нагружает лопасть винта. Поэтому критерием формальной выгоды материала — мы говорим формальной, так как не одной только прочностной и весовой выгодностью определяется рациональность конструкции винта, а также простотой производства, удобством эксплуатации и т. п. — можно принять величину отношения временного сопротивления на растяжение к удельному весу. В винтах, установленных на поршневых двигателях, при работе которых имеется много неравномерно действующих сил, которые могут явиться возбудителями колебаний винта, за критерий следует брать не временное сопротивление, а предел усталости.

Временное сопротивление дуралюмина можно принять  $40 \text{ кг/мм}^2$ , электрона —  $35 \text{ кг/мм}^2$ . Для стали можно получить очень большие значения временного сопротивления, которые, однако, не могут быть использованы в лопастях, так как при этом получаются слишком малые удлинения, а следовательно, большая хрупкость материала. Приемлемой величиной для стали в настоящее время можно принять  $120 \text{ кг/мм}^2$ . Обыкновенная древесина имеет сравнительно небольшое значение временного сопротивления — около  $10 \text{ кг/мм}^2$ , однако прессованная древесина дает значительно большее значение, причем оно зависит от удельного веса. Мы примем удельный вес прессованной древесины за  $1 \text{ г/см}^3$  и временное сопротивление  $20 \text{ кг/мм}^2$ . Тогда критерии четырех основных материалов будут следующими:

$$\text{Дуралюмин} \quad \frac{40}{2,85 \cdot 10^{-6}} = 14 \cdot 10^6.$$

$$\text{Сталь} \quad \frac{120}{7,8 \cdot 10^{-6}} = 15,4 \cdot 10^6.$$

$$\text{Электрон} \quad \frac{35}{1,8 \cdot 10^{-6}} = 19,4 \cdot 10^6.$$

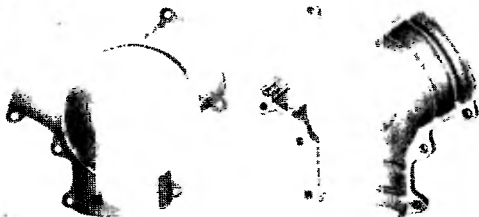
$$\text{Дерево} \quad \frac{20}{1,0 \cdot 10^{-6}} = 20 \cdot 10^6.$$

Таким образом при принятых величинах временного сопротивления наиболее выгодным является дерево, а затем электрон и лишь на последнем месте — дуралюмин. Как было указано, в

настоящее время наибольшим распространением пользуются дуралюминовые и стальные лопасти. По указанным выше формальным критериям сталь более выгодна, чем дуралюмин, в одинаковых условиях применения. Если же принять во внимание разные условия применения стали и дуралюмина в винтах — сталь применяется в полых лопастях, где распределение материала более выгодно, чем в сплошных, то станет ясным, что полые стальные лопасти в весовом отношении имеют преимущество перед дуралюминовыми.

### § 8. Конструкция втулок винтов

По классификации, указанной в § 1 настоящей главы, конструктивно воздушный винт делится на четыре основные части: лопасти, втулку, механизм поворота лопастей и детали оборудования. Втулкой является деталь, сопрягающая лопасти между собой и передающая вращающий момент от вала авиационного двигателя к лопастям.



Фиг. 59 Разъемный корпус втулки

Втулку винта можно разбить на два отдельных узла: корпус втулки и узел крепления лопасти.

Корпус втулки. В настоящее время корпус втулки делается для двух-, трех-, четырех- и пятилопастных винтов с осями всех лопастей, находящимися в одной плоскости. Для увеличения эффективной длины лопасти, а также для уменьшения лобового вредного сопротивления винта рукава корпуса делают по возможности короткими, однако длина их определяется конструкцией узла крепления лопасти в корпусе.

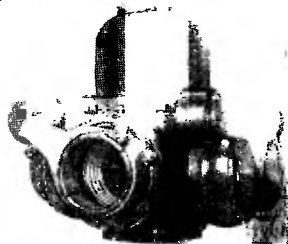
Конструкция корпуса втулки в значительной мере предопределяется производственными требованиями, так как втулка является технологически одной из наиболее трудоемких деталей. С этой точки зрения корпус втулки делается двух по существу

различных типов: разъемный и целый. Второй труднее для изготовления, но зато он выходит легче по весу и изящнее по конструктивному оформлению, тогда как первый удобнее для изготовления, но тяжелее по весу и неуклюж по внешнему виду.

Разъемный корпус делается из двух половинок, которые соединяются вместе болтами (фиг. 59). У одной половинки — задней (примыкающей к двигателю) — имеется цилиндр с шлицами по внутреннему диаметру (на фиг. 59 справа) для посадки на носок вала двигателя, причем одна шлица пропущена, т. е. одна впадина шире других. Это делается для того, чтобы при наличии на валу между шлицами завернутого заподлицо с ним винта втулка всегда попадала при установке ее на вал только в одно вполне определенное и всегда одинаково ориентированное положение.

Для восприятия усилий от лопасти служит заплечик. Узел лопасти вставляется в одну половинку, а затем обе половинки скрепляются болтами. Второй заплечик служит для упора лопасти, т. е. для того, чтобы не было продольного люфта лопасти. Этот люфт регулируется прокладочными кольцами.

Так как внутри втулки находится смазка для подшипников, которая может выбиваться центробежной силой через зазоры между лопастью и рукавом втулки,



Фиг. 60 Неразъемный корпус втулки.

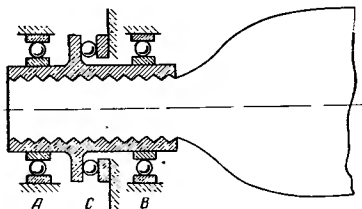
то часто на конце рукавов, как показано на фиг. 59, имеется еще один заплечик, служащий для помещения сальника.

Целый корпус втулки изготавливается из одного куска стали. Восприятие усилий от лопасти не может в этом случае осуществляться заплечиком, составляющим одно целое со втулкой, как в разъемной втулке, ибо тогда винт невозможно было бы собрать. Упором для восприятия нагрузки от лопасти служит гайка 1, которая заворачивается с торца рукава корпуса втулки (фиг. 60, см. также фиг. 23). К передней части корпуса присоединяется механизм поворота лопастей, состоящий из цилиндрической группы в гидравлических винтах и электромотора с передачей в электрических винтах.

Посадка корпуса на валу осуществляется так же, как было описано в § 2 настоящей главы.

Узел крепления лопасти. В винтах изменяемого шага узлы крепления лопастей, во втулке должны быть сделаны так, чтобы они не только воспринимали центробежные силы и

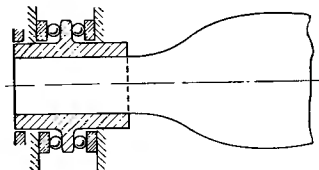
крутящий момент винта, но также давали возможность лопастям поворачиваться около своих осей, для того чтобы можно было изменять угол установки лопастей. В гл. XV будут рассмотрены все силы, действующие на винт, теперь же мы примем, что на лопасти винта должен действовать, во-первых, крутящий момент, передаваемый от двигателя, во-вторых, изгибающий момент от



Фиг. 61. Схема крепления лопасти во втулке на трех подшипниках.

силы тяги и гироскопических сил (в случае поворота самолета в воздухе) и, в-третьих, центробежные силы.

Схема расположения подшипников для восприятия указанных сил в узле крепления лопасти дана на фиг. 61. Опорные шариковые подшипники *A* и *B* воспринимают изгибающий и крутящий моменты при трогании винта с места, а упорный под-



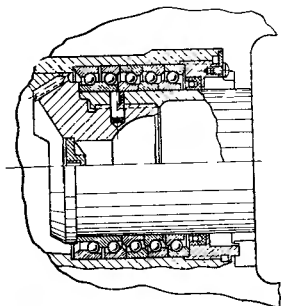
Фиг. 62. Схема крепления лопасти во втулке на одном шариковом (роликовом) подшипнике.

шипник *C* воспринимает центробежные силы лопасти. При большом числе оборотов, когда преобладающими нагрузками являются центробежные силы, надобность в подшипниках *A* и *B* почти отпадает, и поэтому схему крепления лопасти можно упростить, как показано на фиг. 62. Для центровки лопасти может служить дополнительный подшипник скольжения или ша-

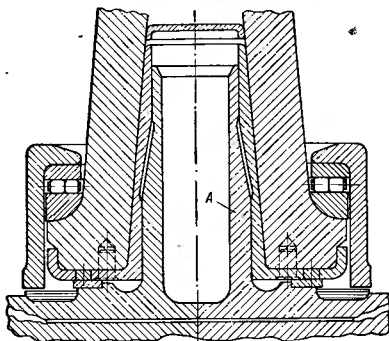
риковый подшипник. Обычно подшипники *A* и *B* делают шариковыми, а подшипник *C*, как более нагруженный, — роликовым. Применяются также схемы, в которых узел крепления состоит из набора опорно-упорных подшипников (фиг. 63).

Так как подшипники *A* и *B* нагружены не очень сильно и, кроме того, в основном только при трогании, их можно делать и не шариковыми, а подшипниками скольжения. Так, иногда их заменяют подшипниками скольжения из текстолита или лопасть насаживают на рога крестовины, на которых она и скользит при повороте (фиг. 64).

В тех случаях, когда внутри винта поддерживается давление масла, на всех сопрягающихся и движущихся деталях приходится делать уплотнительные кольца обычно из маслостойкой резины.



Фиг. 63. Схема крепления лопасти во втулке набором подшипников.



Фиг. 64. Крепление лопасти во втулке на одном роликовом подшипнике и на рогах крестовины *A*, служащих валом подшипника скольжения.

### § 9. Механизм поворота лопастей винта

К механизму поворота лопастей винта относятся механизм поворота лопастей в рабочем диапазоне работы винта и механизм перевода лопастей во флюгерное и тормозное положение. В гидравлических винтах этот механизм представляет собой гидравлический двигатель с передачей от него к лопастям винта. Как уже было указано в § 3, конечным гидравлическим двигателем в винтах может быть или поршневой двигатель, или шестеренный двигатель. Мы подробнее остановимся на поршневом двигателе, как получившем наибольшее распространение в гидравлических винтах. Он представляет собой так называемую цилиндрическую группу, т. е. узел винта, конструктивно обособленный, состоящий из поршня и цилиндра и других приспособлений, необходимых для работы поршневого двигателя. В электрических винтах механизм поворота лопастей состоит из электродвигателя и передачи от электродвигателя к лопастям.

Цилиндрическая группа. Как мы видели выше, цилиндрическую группу гидравлических винтов можно разделить на два типа: на цилиндрическую группу, в которой поршень или цилиндр двигают лопасть через кривошип, и на цилиндрическую группу, в которой поршень или цилиндр двигают лопасть через какую-либо другую кинематическую передачу. Цилиндр с поршнем может быть одинарного или двойного действия.

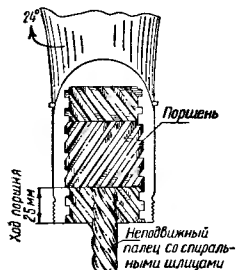
Там, где цилиндрическая группа устанавливается перед втулкой, она представляет собой отдельный узел и в некоторых конструкциях при монтаже или демонтаже винта должна сниматься для того, чтобы освободить место для завинчивания или отвинчивания гайки, зажимающей втулку на носке вала.

Для достижения герметичности между движущимися поверхностями применяются резиновые манжеты. Как цилиндр, так и поршень делаются всегда дуралюминовыми.

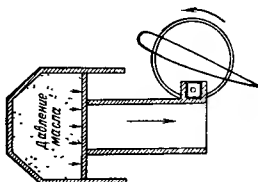
При помещении цилиндрической группы внутри втулки она не мешает снятию винта и в этом случае она представляет конструкцию, составляющую одно целое с втулкой. В этом случае и цилиндр и поршень должны быть кольцевыми, охватывающими носок вала. Такое помещение цилиндрической группы хотя вcompactно, но зато удлиняет рукава втулки и, следовательно, увеличивает габариты втулки винта. Между тем место перед втулкой всегда бывает свободно и закрывается коком винта, и по этому помещению цилиндрической группы спереди втулки в общем целесообразно. Что касается того, делать ли поршень или цилиндр неподвижными, то при помещении цилиндрической группы спереди, конечно, лучше делать неподвижным цилиндр, ибо в этом случае проще достигается уплотнение движущихся поверхностей от просачивания масла.

У нас в СССР в гидравлических винтах цилиндрическую группу помещают и спереди и внутри втулки.

Особняком стоит конструкция винта, имеющего для каждой лопасти отдельную цилиндрическую группу, в которой ось цилиндра и поршня совпадает с осью лопасти (фиг. 65). Такая конструкция применялась только на винте американской фирмы Аэропроп



Фиг 65 Цилиндрическая группа у каждой лопасти



Фиг 66 Схема передачи движения от цилиндра к лопасти

Передача движения от поступательно движущегося поршня или цилиндра на вращающуюся лопасть может быть осуществлена двумя путями. На лопасти имеется кривошип, ось цилиндра расположена перпендикулярно оси лопасти (фиг. 66). Поршень или цилиндр соединяются с кривошипом, который представляет собой палец, посаженный на стальном стакане лопасти эксцентрично ее оси (фиг. 67), или непосредственно через шатуны или через траверсу (см фиг. 42 и 68), которая с одной стороны зацепляется за указанные пальцы, а с другой связана с поршнем или цилиндром. Необходимо заметить, что в винтах одинарного действия связь между траверсой и поршнем или цилиндром может быть освобождающей, т. е. поршень или цилиндр может траверсу только толкать. В винтах же двойного действия эта связь будет неосвобождающей, т. е. траверса должна быть связана с поршнем или цилиндром так, чтобы они ее могли и толкать и тянуть.

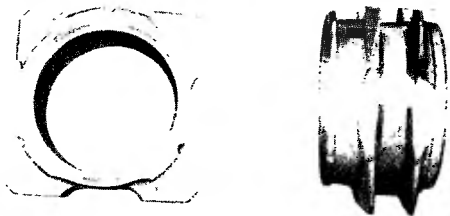
Другой способ превращения поступательного движения во вращательное состоит в том, чтобы палец поступательно дви-



Фиг 67 Эксцентрично посаженный на стакане лопасти палец

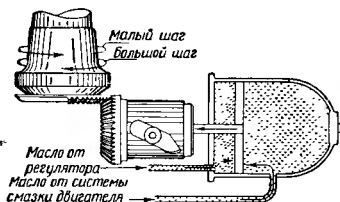


жущегося поршня или цилиндра скользил по винтовому прорезу обоймы, которая и будет при этом вращаться, передачу же от обоймы к лопасти можно сделать в виде конических зубчаток (фиг. 69). Вращательное движение обоймы можно ускорить,



Фиг. 68. Траверса.

если заставить поршень или цилиндр еще вращаться в ту же сторону, что и обойма. Для этого надо, чтобы палец поршня или цилиндра одновременно еще скользил бы по другому винтовому прорезу, только направленному в другую сторону. Тот



Фиг. 69. Схема передачи движения от поршня к лопастям посредством обойм и конических зубчаток.

же принцип можно применять и к поршням и цилиндрам, помещаемым на каждой лопасти (фиг. 65).

Узел электродвигателя. В обычных электрических винтах, у которых электродвигатель помещается на винте спереди его втулки, электродвигатель вместе с передачей представляет собой отдельный конструктивный узел, который сни-

мается при монтаже или демонтаже винта на авиационном двигателе. Главную механическую часть этого узла составляет передача от электродвигателя к лопастям винта. Конструкция этой передачи может быть самая разнообразная. Чаще всего применяется планетарная передача или обычная многоступенчатая передача, состоящая из цилиндрических шестерен. Конечная шестерня этой передачи делается конической и от нее движение передается на конические же шестерни, установленные на коньях лопастей (фиг. 37). Весь узел закрывается колоколообразной крышкой, предохраняющей механизмы от загрязнения.

В том случае, когда винт установлен на полый вал, предназначенный для стрельбы из пушки, электродвигатель делается кольцевым и передача помещается по кольцу, охватывая полый вал.

### § 10. Веса и моменты инерции лопастей и винтов

Как и во всякой авиационной конструкции, вес винта имеет большое значение. Это значение возросло за последнее время, когда винт стал сложным механизмом. Под общим весом винта обычно подразумевается: 1) чистый вес винта, т. е. вес лопастей, втулки, механизма перестановки лопастей, конусов и гаек, которыми укрепляется винт на носке вала; 2) вес приборов оборудования, обслуживающего винт, — электро- или гидромотор, независимо от места их установки, регулятор и т. п.; 3) кок винта и противообледенительное устройство, укрепленное на винте. Все оборудование по противообледенительному устройству винта, которое находится вне винта, в его вес не входит. В данном параграфе мы рассмотрим лишь чистый вес винта, веса же всех остальных устройств будут рассмотрены в § 6 гл. IV.

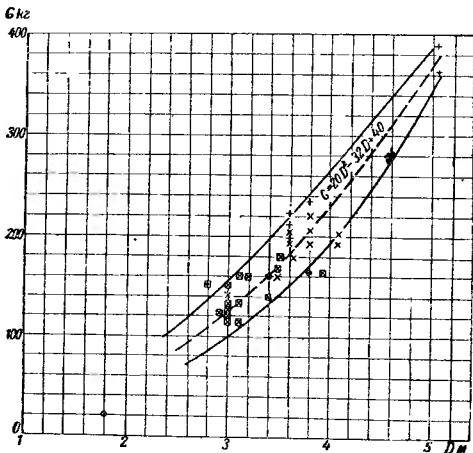
Вес винтов с дуралюминовыми лопастями. Вес винта зависит от его геометрических размеров, причем для современных винтов на мощные двигатели (от 1000 до 2000 л.с.) веса втулки и лопастей примерно одинаковы. Вес пера лопасти можно выразить следующим образом:

$$G_n = \gamma \int_{r_0}^R F dr = \gamma \int_{r_0}^R k_3 b c dr = \frac{k_3}{2} \gamma D^3 \int_{r_0}^1 \bar{b}^2 \bar{c} d\bar{r}, \quad (25)$$

где  $F = k_3 bc$  — площадь сечения лопасти;  
 $\gamma$  — удельный вес материала лопасти;  
 $r_0$  — радиус начала пера,

откуда видно, что для подобной лопасти вес ее будет пропорционален третьей степени диаметра. Если же лопасти будут не подобны, а с различными ширинами или толщинами, то пропорциональность третьей степени диаметра в большей или меньшей степени будет иррешаться. Однако на каждом этапе состояния

авиации применяются более или менее одинаковые типы винтов. Так, например, до второй мировой войны обычно ширина лопасти винтов была порядка 7% диаметра, а толщина на 0,9 радиуса примерно 6% хорды, причем лопастей было две или три. После же войны ширина лопастей стала доходить до 8,5% и более, толщина на 0,9 радиуса 4% и число лопастей — три и четыре. Поэтому на определенном этапе развития авиации, для



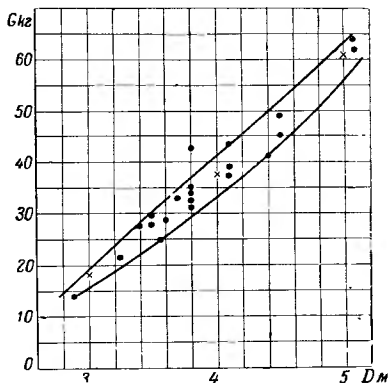
Фиг. 70. Статистические данные по весу винтов в зависимости от их диаметра.

приблизительной оценки веса винтов можно пользоваться статистикой. Однако в силу указанных условий зависимость веса винта от его диаметра, который и характеризует величину винта, будет представляться не в виде кривой, а в виде некоторой полосы, в пределах которой и будут находиться веса винтов различной ширины и толщины. На фиг. 70 представлены статистические данные веса винтов изменяемого шага трех- и четырехлопастных как флюгерных, так и простых, в зависимости от диаметра винта. Все нанесенные точки можно заключить в полосу, ширина которой достигает величины, соответствующей 50 кг, а это значит, что разница в весах между винтами одного диаметра может достигать 25%; если же принять среднюю величину в полосе, то ошибка может достигать 12%. На фиг. 70

(пунктиром) нанесена кривая, представляющая собой квадратную параболу

$$G = 20 D^2 - 32 D + 40, \quad (26)$$

коэффициенты которой подобраны так, чтобы она проходила посредине полосы. Как видим, средний вес винтов пропорционален второй степени диаметра. По этой кривой можно приблизительно определять веса винтов, памятуя, что ошибка может достигать 12—15%.

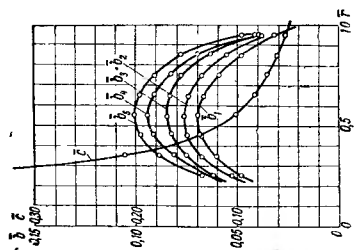


Фиг. 71 Статистические данные по весу лопастей в зависимости от диаметра винта.

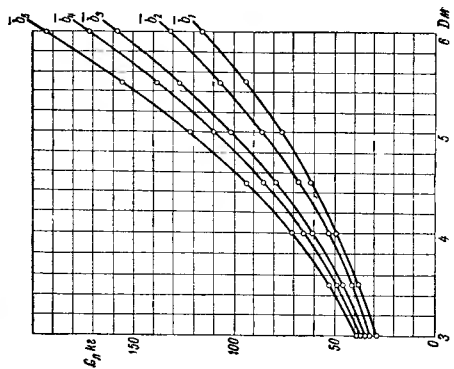
На фиг. 71 отражена такая же статистика для лопастей. Однако можно и более точно определить вес винта, принимая во внимание и влияние ширины лопасти. На фиг. 72 даны типичные распределения ширины и толщины лопасти, причем исходными приняты несколько относительных ширин, обозначенных  $\bar{b}_1$ ,  $\bar{b}_2$ ,  $\bar{b}_3$ ,  $\bar{b}_4$ ,  $\bar{b}_5$ . Эти значения дают наибольшую величину ширины лопасти, за которую, как указано в главе I, принимается характеристическая ширина лопасти. Для этих ширин и толщин были вычислены веса лопастей. Таким образом вес лопасти  $G_x$  складывается из веса пера  $G_n$  и веса концевой части  $G_k$ :

$$G_x = G_n + G_k. \quad (27)$$

$G_n$  находят по формуле (25).



Фиг. 72 Типичное распределение ширины и толщины лопасти по радиусу.



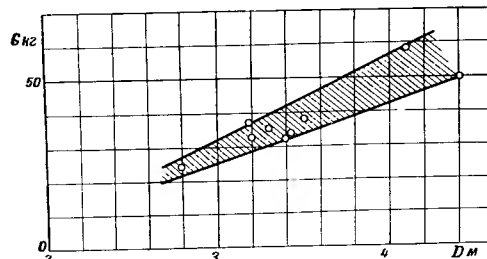
Фиг. 73 Вес лопастей, имеющих геометрические характеристики, указанные на фиг. 72

На фиг. 73 даны кривые весов для указанных лопастей. По этим кривым можно значительно точнее определить вес лопасти, зная хотя бы примерно ее относительную ширину. Конечно, при значительно отступающем распределении ширины вдоль лопасти против того, что указано на фиг. 73, может получиться и неверный вес. Если желательно более точно определить вес лопасти при значительно отступающем распределении ширины, чем указано на фиг. 72, то следует вычислить вес по формулам (25) и (27).

Для того чтобы определить вес всего винта, надо к весу лопасти прибавить вес втулки с механизмом перестановки лопастей. Примерно можно считать, что веса втулок с механизмом будут следующими:

$$\begin{aligned} \text{Для диаметров} \quad D < 3,1 \text{ м} \quad G_{\text{вт}} &= 70 \text{ кг} \\ \cdot \quad 3,1 < D < 4,1 \text{ м} \quad G_{\text{вт}} &= 90 \\ \cdot \quad 4,1 < D < 5,1 \text{ м} \quad G_{\text{вт}} &= 110 \end{aligned}$$

У современных нефлюгерных трехлопастных винтов прямой схемы веса между лопастями и втулкой распределяются так: лопасти 45%, втулка 55%.



Фиг. 74 Статистические данные весов деревянных винтов

Вес деревянных винтов. На фиг. 74 представлены веса двухлопастных деревянных моноблочных винтов без металлических втулок, составленных по статистическим данным. Точки легли в некоторой полосе, ограниченной двумя прямыми. При определении веса деревянных моноблочных винтов можно пользоваться диаграммой фиг. 74, имея в виду, что верхняя прямая относится к более широким и толстым лопастям, а нижняя — к более узким и тонким. Для того чтобы получить полный вес винта с втулкой, необходимо приложить вес втулки.

Вес деревянных лопастей. По большей части деревянные лопасти вставляются во втулки для металлических

винтов, так что для исчисления веса винта с деревянными лопастями следует к весу лопастей прибавить вес втулки согласно данным, указанным в п. «винты с дуралюминовыми лопастями». Более точно вес пера лопастей можно подсчитать по формуле (25), а комлевую часть подсчитать как цилиндрическую и к этому прибавить вес стальной облоймы.

Вес электронных лопастей. Так как обычно электронные лопасти по геометрическим размерам делаются такими же, как и дуралюминовые, то вес электронных лопастей можно определить, подставив лишь в формулу (25)  $\gamma = 1850 \text{ кг/м}^3$ . По фиг. 71 вес электронных лопастей получится, если вес, найденный из этой фигуры, помножить на коэффициент  $\frac{1,85}{2,85} = 0,65$ .

Вес стальных лопастей. Статистических данных по стальным полым лопастям почти нет. Втулки для стальных лопастей применяются примерно того же типа, что и для дуралюминовых. Вес лопастей следует подсчитывать.

Моменты инерции винтов. Статистических данных по моментам инерции винтов очень мало, так как экспериментальным путем определять момент инерции — процесс довольно длительный и требующий определенного оборудования. Поэтому моменты инерции винтов определяются по большей части расчетом, тем более что точность, которая дает расчет, совершенно достаточна для практических целей.

Момент инерции винта составляется из момента инерции лопастей и момента инерции втулки:

$$J = J_n + J_{вт}$$

Момент инерции к лопастей винта определяется следующим образом:

$$J_n = \kappa \rho \int_{r_0}^R Fr^2 dr = \kappa k_s \rho \int_{r_0}^R bcr^2 dr = \kappa \frac{k_s}{8} \rho D^5 \int_{\frac{r_0}{D}}^1 \bar{b}^2 \bar{c} \bar{r}^2 d\bar{r}. \quad (28)$$

Момент инерции пропорционален пятой степени диаметра.

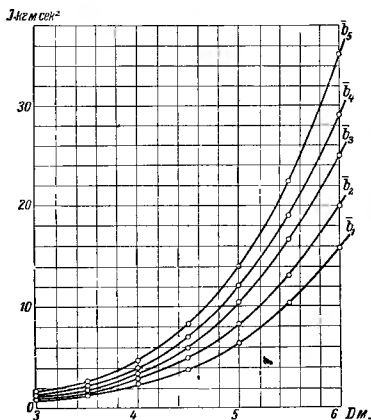
На фиг. 75 представлены кривые зависимости моментов инерции лопастей от диаметра винта, вычисленные для относительных геометрических размеров лопастей, данных на фиг. 72. По фиг. 75 можно определять момент инерции лопастей винта, исходя из примерных геометрических размеров его лопастей.

Момент инерции винта можно приближенно еще определить исходя из следующих предположений. Момент инерции лопастей и втулки может быть представлен так:

$$J_n = \frac{\kappa G_n}{g} i_n^2; \quad J_{вт} = \frac{G_{вт}}{g} i_v^2,$$

где  $G_n$  и  $G_{вт}$  — веса лопасти и втулки, а  $i_n$  и  $i_{вт}$  — радиусы инерции лопасти и втулки. Так как радиус инерции сплошного диска находится примерно на 70% радиуса, то для втулки, внутри которой имеются пустоты, можно предположить, что ее радиус инерции равен примерно 80% ее габаритного радиуса, т. е.

$$i_{вт} = 0,8 \cdot r_{вт}.$$



Фиг. 75. Моменты инерции лопастей относительно оси винта, вычисленные для геометрических характеристик, данных на фиг. 72, в зависимости от диаметра винта.

С другой стороны, расчеты показывают, что радиус инерции лопасти примерно равен 40% радиуса лопасти, т. е.

$$i_n = 0,4 \cdot r_n \approx 0,2 D.$$

Габаритный радиус втулки можно принять приблизительно равным

$$r_{вт} \approx 0,07 D.$$

Отсюда

$$i_{вт} = 0,056 D.$$

Таким образом момент инерции винта будет

$$J = \frac{G_{\text{вт}}}{g} (0,050D)^2 + \frac{\kappa G_{\text{л}}}{g} (0,2D)^2,$$

или

$$J = 0,00408D^2 (0,079G_{\text{вт}} + \kappa G_{\text{л}}).$$

Как уже было указано, примерно  $\kappa G_{\text{л}} \approx G_{\text{вт}}$ , следовательно,

$$J = 0,00408 \cdot \kappa G_{\text{л}} \cdot D^2 \cdot 1,079$$

или

$$J = 0,0044 \cdot \kappa G_{\text{л}} \cdot D^2. \quad (29)$$

Из предыдущего выражения видно, что при принятых предположениях втулка увеличивает момент инерции винта только на 8%, а главную роль в этом играют лопасти. Поэтому при приближенных расчетах можно за момент инерции всего винта принимать только момент инерции лопастей из фиг. 75.

Веса и моменты инерции перспективных винтов. Для того чтобы яснее представить себе веса винтов в перспективе их развития, рассмотрим некоторые относительные показатели современных винтов. Такими показателями могут служить вес винта на единицу мощности двигателя (удельный вес винта) и процент веса винта в общем полетном весе самолета. Удельный вес современных винтов колеблется от 110 до 180 г/л. с., т. е. доходит почти до 50% сухого веса поршневого двигателя. Процентный вес винтов обычно на самолетах с мощными двигателями составляет примерно 2—3% полетного веса самолета.

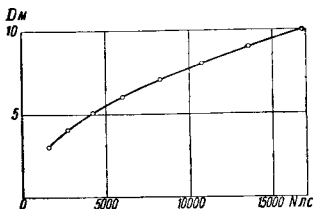
Выше мы видели, что для подобных винтов вес пропорционален третьей степени диаметра, тогда как по статистической кривой фиг. 70 закон изменения веса в зависимости от диаметра получается квадратичный. Поэтому при решении вопроса о весе перспективных винтов во всяком случае не следует принимать закон кубов. Конструкторская мысль в области винтостроения направлена к тому, чтобы по возможности уменьшить вес винта. К этому, например, приходят, применяя полые лопасти.

Надо думать, что при больших мощностях, т. е. при больших диаметрах винтов, веса их будут изменяться по крайней мере по квадратичному закону (т. е. во всяком случае не по кубическому закону).

Нагруженность винта можно характеризовать числом лошадиных сил снимаемой винтом мощности, приходящихся на единицу площади лопастей. Эта величина до некоторой степени аналогична нагрузке на единицу площади крыльев самолета, с помощью которой характеризуется нагруженность крыла самолета. Для винта фактическая нагрузка на единицу площади лопастей является величиной не характерной, так как эта нагрузка меняется в зависимости от режима полета (при работе на месте



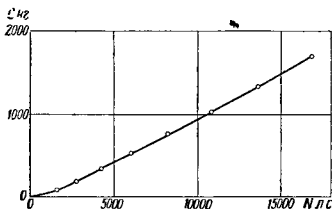
она наибольшая, а с увеличением скорости уменьшается вследствие уменьшения тяги). Мощность же, снимаемая винтом при установившемся режиме двигателя, остается постоянной. Сове-



Фиг. 76 Зависимость диаметра от мощности для четырехлопастного винта с лопастями шириной  $\bar{b}_3$  (фиг. 72) и нагрузкой 1500 л. с/м<sup>2</sup>.

менные винты имеют нагруженность лопастей примерно 1100—1500 л. с/м<sup>2</sup>. Примем нагруженность 1500 л. с/м<sup>2</sup>. Развернутая площадь лопасти может быть выражена по формуле (12):

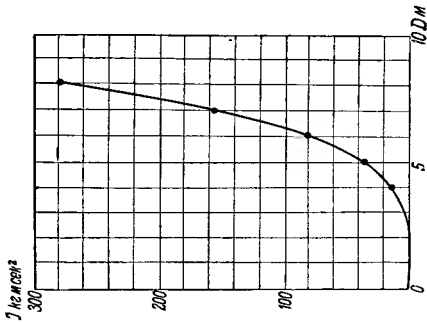
$$S = \bar{S} D^2,$$



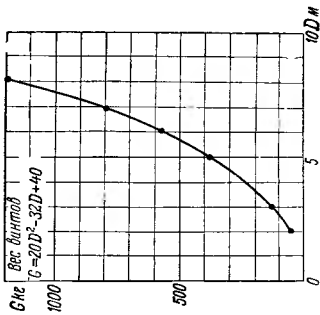
Фиг. 77. Зависимость веса винтов от мощности

где  $\bar{S}$  — коэффициент, зависящий от формы и ширины лопасти. Для наших типичных ширин лопастей, указанных на фиг. 72, будет

- |                 |                   |
|-----------------|-------------------|
| для $\bar{b}_1$ | $\bar{S} = 0,022$ |
| • $\bar{b}_2$   | $\bar{S} = 0,025$ |
| • $\bar{b}_3$   | $\bar{S} = 0,028$ |
| • $\bar{b}_4$   | $\bar{S} = 0,030$ |
| • $\bar{b}_5$   | $\bar{S} = 0,033$ |



Фиг. 79. Зависимость момента инерции винтов от диаметра.



Фиг. 78 Зависимость веса винтов от диаметра

Для  $k$  лопастного винта с развернутой площадью лопасти  $S$  и нагруженностью в 1500 л. с/м<sup>2</sup> будем иметь

$$S_k 1500 = N = S \cdot k \cdot D^2 \cdot 1500.$$

По этой формуле можно вычислить для различных типичных ширин и различных чисел лопастей  $k$  зависимость диаметра винта от мощности. На фиг. 76 приведены результаты этих вычислений до мощности 15 000 л. с. для ширины  $b_3$ . На фиг. 77 построена кривая весов винтов по мощности согласно данным фиг. 76 и с использованием формулы (26) (зависимость веса от диаметра).

На фиг. 78 приведена кривая веса винтов, построенная по формуле (26); по этой кривой можно определять веса винтов большого диаметра.

Что касается моментов инерции винтов большого диаметра, то их можно приближенно определять по формуле (29), вставляя в нее половину веса винта по формуле (26) вместо выражения  $kG_L$ :

$$J = 0,0088(5D^4 - 8D^3 + 10D^2). \quad (30)$$

Кривая моментов инерции дана на фиг. 79.

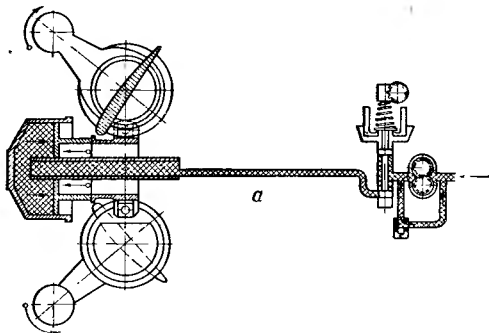
## Глава IV

### КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ВИНТОВ

#### § 1. Управление винтом изменяемого шага

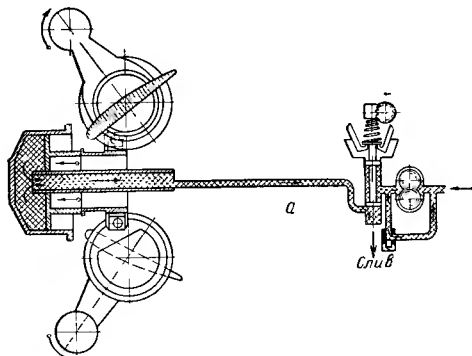
Винт изменяемого шага — управляемый, т. е. его лопасти переставляются сообразно с режимом полета. Для того чтобы лопасти переставить на другой угол, надо затратить какую-то энергию, так как при перестановке обычно преодолеваются силы сопротивления лопастей. Силы, которые приходится преодолевать при перестановке лопастей винта во время его работы, разобраны в главе XV. Энергия для перестановки лопастей у механических винтов берется непосредственно от авиационного двигателя или развивается силами, которые получаются при вращении винта. У гидравлических винтов энергия получается от шестеренного насоса, опять-таки вращаемого авиационным двигателем. Наконец, у электрических винтов эта энергия берется от бортовой сети. Задача агрегатов управления винтом заключается в использовании в нужный момент соответствующей энергии. Этот «нужный момент» может быть выбран летчиком или автоматом; следовательно, управление винтом изменяемого шага может производиться летчиком или автоматически. Управление винтом изменяемого шага летчиком теперь не применяется, а производится автоматически с помощью специального регулятора, устанавливаемого по большей части на авиационном двигателе. Регулятор состоит из собственно центробеж-

ного регулятора, который определяет положение перепускного золотника в случае гидравлического винта и с соответствующим положением контактов в случае электрического винта. Обычно в одном агрегате с собственно регулятором совмещается гидравлический насос, наличие которого обязательно для гидравлических винтов и который также иногда применяется на регуляторах электрических винтов в качестве промежуточного звена. Центробежный регулятор и насос сидят на одном валике, который приводится во вращение от привода вала авиационного двигателя. Обычно передаточное число от вала двигателя к валу регулятора близко к 1, однако у разных конструкций двигателей она может быть разная.

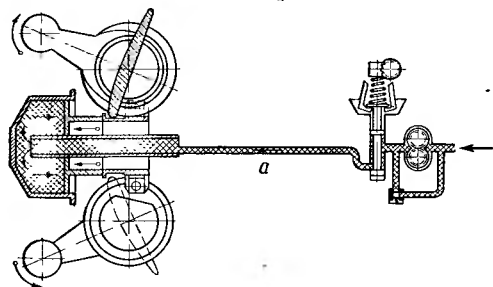


Фиг. 80. Схема работы регулятора в винте односторонней прямой схемы. Равновесные числа оборотов

Управление гидравлическими винтами. На фиг. 80—82 показана схема работы регулятора с винтом односторонней прямой схемы. При вращении центробежного регулятора грузики под влиянием центробежной силы отклоняются в радиальном направлении, а для уравнивания этой силы служит пружина. Грузики имеют L-образную форму и своим нижним плечом заведены под тарелку, соединенную с золотником. Если во время работы винта грузики расположены вертикально, то золотник перекрывает проход к винту, и поэтому масло не может ни выйти из винта ни войти в него. Такое положение называется равновесным (фиг. 80). Если сила сжатия пружины больше центробежной силы грузиков, то верхние концы грузиков сойдутся, и для того, чтобы получить равновесное положение, надо увеличить число оборотов двигателя; если же сила пружи-



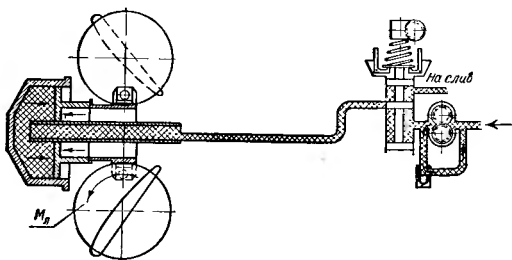
Фиг. 81. Схема работы регулятора в винте односторонней прямой схемы. Число оборотов увеличилось — лопасти переходят на больший шаг.



Фиг. 82. Схема работы регулятора в винте односторонней прямой схемы. Число оборотов уменьшилось — лопасти переходят на меньший шаг.

ны окажется меньше силы грузиков, то для равновесного положения надо число оборотов уменьшить. Таким образом большим или меньшим сжатием пружины получаются большие или меньшие равновесные числа оборотов.

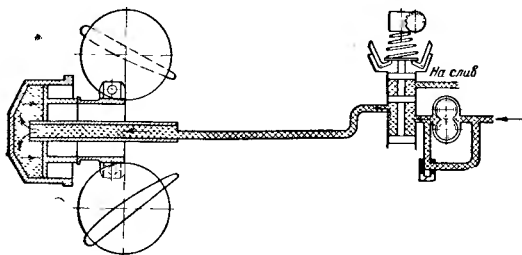
Предположим, что число оборотов двигателя или, что то же, винта, увеличилось, что могло произойти вследствие увеличения газа двигателя или увеличения скорости полета, причем угол установки лопастей еще не изменился. Вследствие увеличения числа оборотов грузики разойдутся (фиг. 81), сжав пружину, и поднимут золотник вверх, открыв выход масла из канала *a*, а так как винт прямой схемы, то лопасти под влиянием центробежных сил противовесов будут переставляться на больший



Фиг. 83. Схема работы регулятора в винте односторонней обратной схемы. Равновесные числа оборотов.

шаг, и масло из цилиндра будет выжиматься через этот канал в картер двигателя. Число оборотов упадет и после нескольких колебаний установится, если не будет за это время нового изменения режима работы винта, причем грузики опять примут положение, соответствующее равновесным оборотам. Предположим, что число оборотов уменьшилось вследствие уменьшения газа или уменьшения скорости полета. В результате уменьшения числа оборотов грузики регулятора сойдутся и пружина опустит золотник; проход к винту соединится с насосом регулятора (фиг. 82). В цилиндр будет поступать масло под давлением 15—20 *атм*, отчего поршень передвинется и переставит лопасти на меньший угол установки. В результате уменьшения угла установки числа оборотов увеличатся и после нескольких колебаний равновесные обороты вновь восстановятся. В первом случае—при увеличении числа оборотов—равновесные числа оборотов будут достигнуты увеличением угла установки, а во втором—при уменьшении числа оборотов—уменьшением угла установки. В рассмотренном случае односторонней прямой схемы винта

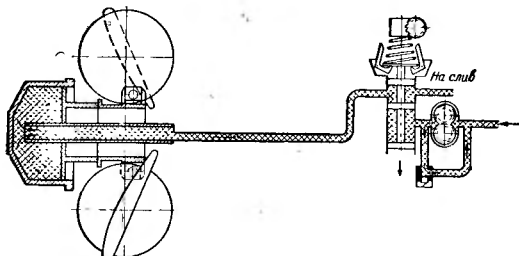
давление масла от насоса регулятора используется только во время уменьшения шага винта, при работе же на равновесных числах оборотов и во время увеличения шага масло от насоса



Фиг. 84. Схема работы регулятора в винте односторонней обратной схемы. Число оборотов увеличилось — лопасти переходят на больший шаг.

перепускается редукционным клапаном и циркулирует внутри системы.

При обратной односторонней схеме происходят такие же действия, только, как видно на фиг. 83—85, конструкция регу-



Фиг. 85. Схема работы регулятора в винте односторонней обратной схемы. Число оборотов уменьшилось — лопасти переходят на меньший шаг.

лятора должна быть несколько иной, ибо если в прямой схеме давление масла уменьшает шаг, то в обратной — увеличивает. Следовательно, для винтов обратной и прямой схем надо иметь неодинаковые регуляторы. Когда у нас в СССР стали эксплуатироваться винты как прямой, так и обратной схем, то встал во-

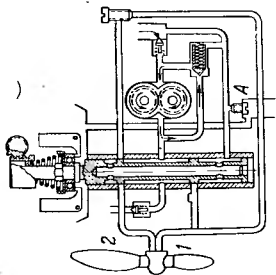
прос об унифицировании регуляторов и создании такой конструкции, которая годилась бы для винтов обеих схем. Был создан универсальный регулятор, в котором для применения его к той или иной схеме следует только надлежащим образом установить специальные две пробки.

Для винтов с двухканальной подводкой схема работы регулятора показана на фиг. 86—88.

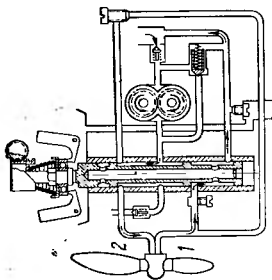
Из рассмотренных схем видно, что регулятор «управляет» винтом на принципе поддержания при всех режимах полета и работы двигателя постоянного числа оборотов, которое мы назвали «равновесным числом оборотов». Как было указано, это равновесное число оборотов зависит от натяжения пружины, поддерживающей грузики,— чем сильнее сжать пружину, тем большее равновесное число оборотов будет поддерживать регулятор. Следовательно, если сделать проводку от летчика, при помощи которой можно было бы зажимать или освобождать пружину, то будет обеспечена возможность «управлять» постоянными оборотами винта. Такое управление и делается у всех регуляторов. Воздействие на пружину может быть осуществлено четырьмя способами: тросом, жесткими тягами, жесткими валами и электрическим дистанционным управлением. Последнее большей частью применяется на многомоторных самолетах, где приходится делать очень длинную проводку, или на самолетах с герметической кабиной, где при других способах проводки большие затруднения представляет герметизирование вводов, которое при электрическом дистанционном управлении получается весьма простым.

При тросовой передаче управление регулятором осуществляется движением рычага или штурвальчика. При конструировании управления регулятором необходимо всегда иметь в виду следующее. Обычно поворот ролика на регуляторе, который через зубчатую рейку сжимает или освобождает пружину, соответствует примерно  $90^\circ$ . Если, например, максимальное число оборотов двигателя 2700 об/мин, а минимальное число оборотов, с которым производится экономический полет, 1400 об/мин, то диапазон изменения чисел оборотов двигателя, а следовательно, и диапазон установки равновесных чисел оборотов регулятора равен около 1300 об/мин, что дает изменение в 15 об/мин на  $1^\circ$  поворота ролика регулятора. Если принять длину рычага управления у летчика равной 200 мм, то  $1^\circ$  поворота будет соответствовать передвижению конца рычага на 3,5 мм. Это значит, что в зависимости от диаметра ролика регулятора, для того чтобы летчику установить число оборотов двигателя с точностью до 15 об/мин, необходимо устанавливать рычаг управления с точностью 1—2 мм. Это не так просто, но возможно. Однако необходимо иметь в виду, что при длинной проводке, как, например, у больших самолетов, тросы, вытягиваясь, будут, с одной стороны, давать летчику ощущение слишком «упругого управле-

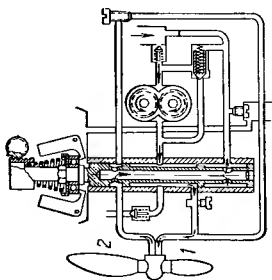




Фиг. 86. Схема работы регулятора в винте двухсторонней схемы. Равные весные числа оборотов.



Фиг. 87. Схема работы регулятора в винте двухсторонней схемы. Число оборотов увеличилось — лопасти переходят на больший шаг. Подает масло канал 2.



Фиг. 88. Схема работы регулятора в винте двухсторонней схемы. Число оборотов уменьшилось — лопасти переходят на меньший шаг. Подает масло канал 1.

ния», а с другой, — затруднять точную установку числа оборотов. Кроме того, вибрация тросов может дать тоже большое затруднение в точной установке. Ролик на регуляторе имеет диаметр обычно около 100 мм, так что поворот ролика на 1° будет соответствовать линейному передвижению троса менее чем на 1 мм. Поэтому на больших размерах самолетах удобнее делать проводку управления жесткими тягами.

Все сказанное необходимо иметь в виду и при конструировании тяг тщательно уничтожать все люфты в сочленениях и подшипниках. Тяги не должны быть очень длинными во избежание вибрации.

Для того чтобы выбирались все оставшиеся люфты, следует к ролику у регулятора сделать натяжную пружину, а у летчика рычаг или штурвальчик должен иметь зажимной стопор.

В § 3 гл. III указано, что у винта изменяемого шага должен быть по крайней мере один стопор — малого шага. У регулятора тоже желателен по крайней мере один стопор — максимальных чисел оборотов. Этот стопор должен находиться на самой головке регулятора и не допускать сжатия пружины большее того, которое соответствует равновесным числам оборотов, являющимся максимально допустимыми для данного двигателя на достаточно длительный промежуток. Таким обычно является взлетное число оборотов, т. е. число оборотов двигателя, на котором производится взлет самолета (см. § 4, гл. XIII). На это максимальное число оборотов и устанавливается стопор регулятора.

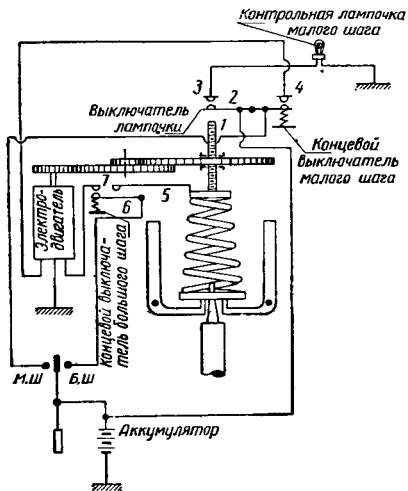
Стопор должен быть регулируемым, так как для разных двигателей максимальные числа оборотов разные (об установке стопора см. § 3 гл. XXIII).

Передача управления валом почти идентична передаче жесткой тягой.

Электродистанционное управление основано на применении электродвигателя, который вращает через передачу валик управления регулятора. Электродвигатель такого управления может быть непосредственно соединен с регулятором и вращать с нужной скоростью его валик или специально встроен в регулятор, так что электродвигатель с вспомогательными агрегатами управления и регулятор представляют собой одно целое.

Схема электродистанционного управления представлена на фиг. 89. Ввиду специфических свойств этого управления оно должно иметь некоторые специальные устройства. У него должны быть концевые выключатели как большого, так и малого шага и обязательно сигнальная лампочка хотя бы только малого шага, но лучше, если будет лампочка и большого шага. Конструкция концевых выключателей может быть самой разнообразной. Управление производится нажимным двухполюсным выключателем, — при нажмиме вперед число оборотов увеличивается, при нажмиме назад — уменьшается. Ввиду того что при электродистанционном управлении летчик не может видеть, в каком

положении находится пружина регулятора — сжата она или отпущена (при ручном управлении положение рычага указывает соответствующее равновесное состояние регулятора), необходимы сигнальные лампочки, указывающие крайние положения.

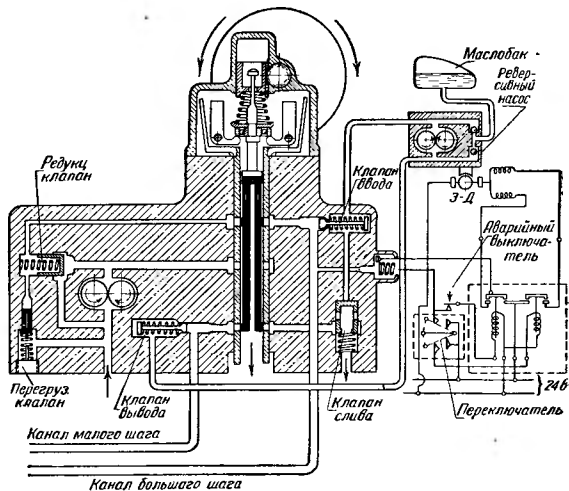


Фиг 89 Схема электростанционного управления регулятором

При упоре червяка 1 в выключатель 2 размыкается контакт 4 и соединяется контакт 3 при упоре рычага 6 в выключатель 6 размыкается контакт 7.

В § 4 главы III мы видели, что для перевода лопастей винта во флюгерное положение нужно создать в магистрали повышенное давление, которое передвинет лопасть на еще больший шаг — флюгерное положение, при выводе же из флюгерного положения повышенное давление должно действовать с противоположной стороны поршня. В случае двух каналов для этих целей можно воспользоваться масляной проводкой к винту от регулятора, имея специальные флюгерные клапаны, встроенные в регулятор, которые при подаче в ту или иную магистраль давления от специального флюгерного насоса отключали бы регулятор от магистрали, а приключали магистраль к флюгерному насосу. Схема указанного флюгерного устройства показана на

фиг. 90. Действует она следующим образом. При нажмие переключателя на ввод во флюгерное положение соответствующий соленоид реле оказывается под током, в результате чего включается в определенном направлении электродвигатель насоса. К насосу присоединяется распределительное устройство, состоящее из двух клапанов, из которых один открывает доступ масла из маслобака в насос, а другой перекрывает соответствующую магистраль, идущую от насоса к регулятору. В зависимости от



Фиг. 90 Схема регулятора с флюгерным устройством. Реле давления показано справа заштрихованной части.

направления вращения шестеренного насоса последний гонит масло по соответствующей магистрали, соединенной с флюгерным клапаном ввода или вывода. Предположим, что насос имеет такое направление вращения, что он гонит масло во флюгерный клапан ввода; под давлением масла этот клапан отжимается (налево по схеме фиг. 90), отсоединяет канал «большого шага» от регулятора и соединяет этот канал с магистралью флюгерного насоса. Одновременно под влиянием большого давления в магистрали флюгерного насоса отжимается так называемый клапан слива, который дает возможность маслу, выдавливаемому противоположной стороной поршня винта, выйти на слив в том слу-

чае, если золотник регулятора опустился. Под давлением масла флюгерного насоса лопасти переходят во флюгерное положение. Когда лопасти дойдут до упора флюгерного положения, то давление во всем канале от флюгерного насоса до поршня винта будет непрерывно повышаться. Это давление будет действовать также и на реле давления, соединенное с каналом «большого шага», и при заданном давлении реле разомкнет цепь соленоида, вследствие чего выключится электродвигатель флюгерного насоса, насос остановится и перестанет создавать давление.

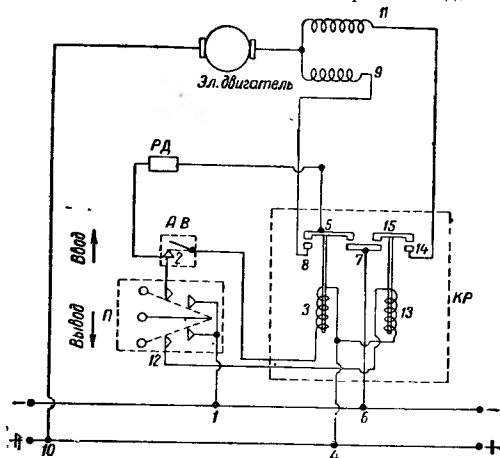
Для вывода из флюгерного положения переключатель устанавливается в положение «Вывод». Вследствие этого становится под ток другой соленоид и электродвигатель включается на противоположное вращение. Насос в этом случае гонит масло под давлением по другой магистрали к «флюгерному клапану вывода», отжимает его и этим отсоединяет канал «малого шага» от регулятора и соединяет канал «малого шага» с магистралью флюгерного насоса. Под влиянием давления масла, действующего на сторону поршня, соответствующую малому шагу, лопасти будут выходить из флюгерного положения. Противоположная сторона поршня будет выжимать масло через канал «большого шага», а так как винт при флюгерном положении не вращается или вращается очень медленно, то грузики регулятора не нагружают пружину, которая отжимает вниз золотник регулятора, и, следовательно, канал большого шага оказывается соединенным со сливом (через полый золотник), через который масло из-под поршня и попадает в картер двигателя. Как только переключатель устанавливается в нейтральное положение, ток в соленоиде прерывается, и электродвигатель флюгерного насоса останавливается. Рассмотрим теперь подробнее электросхему включения флюгерного насоса (фиг. 91).

Поскольку флюгерное положение есть положение аварийное, то управление им должно быть максимально упрощено,— от летчика нужно потребовать приложения минимальной умственной и мускульной энергии. Поэтому ввод во флюгерное положение производится кратковременным нажатием специальной кнопки или двухполюсного переключателя; вывод же из флюгерного положения может производиться длительным нажатием той же кнопки или двухполюсного переключателя, причем двухполюсный переключатель при выводе надо нажимать в сторону, обратную вводу.

При установке переключателя *П* на «ввод» включается цепь 1—2—3—4 и соленоид притягивает включатель 5. Тогда нет необходимости держать включенным переключатель *П*, так как цепь соленоида будет включена через 4—3—2—5—8—9—10, причем включателем 5 коробки реле *КР* включается и электродвигатель. Когда давление в магистрали поднимется до такой величины, что реле давления *РД* разомкнет цепь, то цепь соленоида 3 сразу

прерывается, выключатель 5 отскакивает и электродвигатель останавливается.

При установке переключателя *П* в сторону «вывод» включается цепь 1—12—13—4 и соленоид притягивает выключатель 15 реле, который включает цепь электродвигателя 10—11—14—15—7—6, но уже другую обмотку, так что электродвигатель вращается в другую сторону. Вращение его происходит до тех пор,



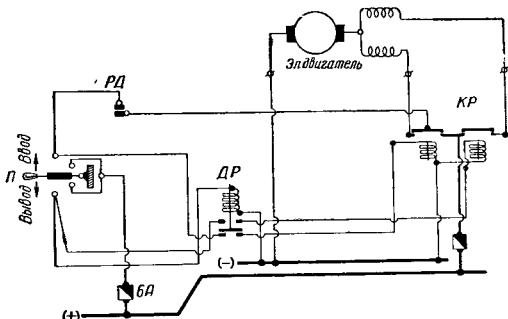
Фиг. 91. Электросхема включения флюгерного насоса.

пока включен переключатель; как только переключатель становится в нейтральное положение, цепь соленоида 13 размыкается и выключатель реле 15 размыкает цепь электродвигателя.

Разобранная электрическая схема соответствует поставленным выше требованиям к способу включения при вводе во флюгерное положение и выводе из него.

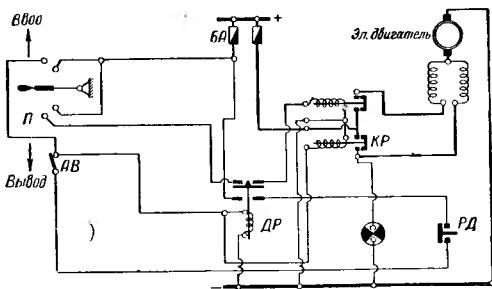
Однако эта схема имеет тот недостаток, что если надо по каким-либо причинам прекратить ввод во флюгерное положение, то следует включить цепь аварийным выключателем АВ. Схема, представленная на фиг. 92, не имеет указанного недостатка. В ней прекращение ввода во флюгерное положение производится тем же переключателем *П*, т. е. перестановкой его в положение «Вывод», однако для этого необходимо ввести еще добавочное реле ДР. Работа схемы ясна из фигуры. Если все же требуется аварийный выключатель, то применяется схема фиг. 93.

Одноканальная схема, описанная в § 4 гл. III, действует следующим образом. При нажиме переключателя «На ввод» реле



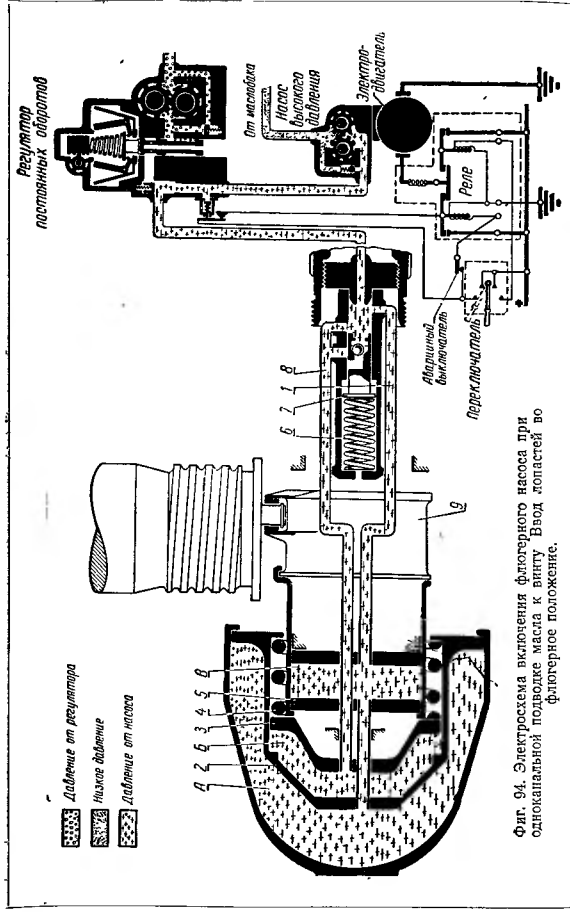
Фиг. 92. Электросхема включения флюгерного насоса с добавочным реле.

замыкает цепь электродвигателя и насос подает масло в канал винта (фиг. 94). Золотник 7 передвигается влево и открывает канал 8, через который давление масла передается в полость Б

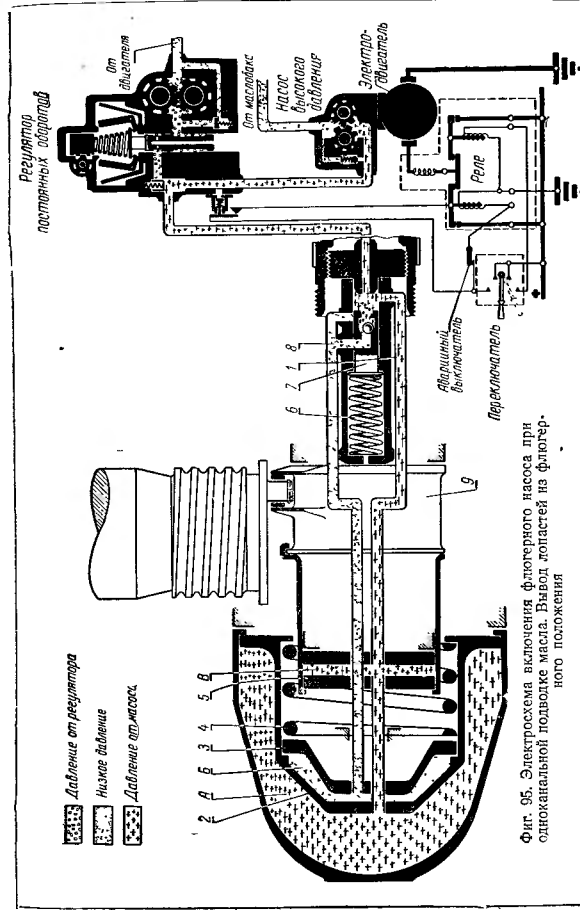


Фиг. 93. Электросхема включения флюгерного насоса с аварийным выключателем

и действует на поршень 3, передвигающий посредством траверсы 9 лопасти во флюгерное положение; при этом сжимается пружина 4. После того как траверса 9 дошла до упора, давление в системе начинает быстро повышаться и, достигнув опреде-



Фиг. 94. Электросхема питания флотерного насоса при одноканальной подводе масла к винту. Ввод лопастей в флотерное положение.



Фиг. 95. Электросхема включения флотерного насоса при одноканальной подводе масла. Ввод лопастей в флотерное положение.

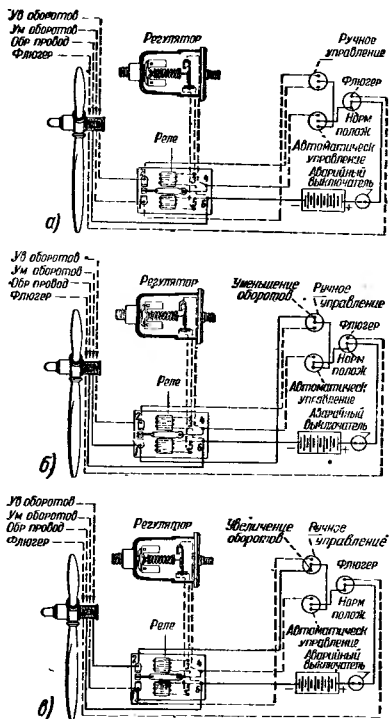


ленного значения, действует на мембрану реле давления, которое выключает цепь электродвигателя. Масляный флюгерный насос останавливается, давление в сети падает и флюгерный клапан под влиянием своей пружины встает в исходное положение. При этом канал винта соединяется через регулятор со сливом масла. Под влиянием пружины золотник 7 передвигается в исходное положение, а под влиянием пружины 4 поршень 3 передвигается влево (фиг. 95). Для вывода лопастей из флюгерного положения следует нажать переключатель в сторону «Вывод». Тогда под током оказывается правый соленоид, реле замыкает включатель электродвигателя и давлением, развиваемым флюгерным насосом, отжимается флюгерный клапан, через который масло поступает в канал винта 1 и, действуя на поршень 5 в полости В, передвигает его влево, причем поршень тянет за собой траверсу 9 и этим поворачивает лопасти в сторону уменьшения угла установки, т. е. в рабочее положение. Электродвигатель работает до тех пор, пока переключатель не прервет ток, поданный на соленоид.

Таким образом, как и в случае двухканальной схемы, при одноканальной схеме включение тока для перевода во флюгерное положение производится кратковременным нажатием переключателя, тогда как при выводе из флюгерного положения переключатель все время приходится держать нажатым. При выводе из флюгерного положения, как только создан достаточный угол между плоскостью лопасти и встречным потоком, винт начинает вращаться от давления воздуха на лопасти. Когда число оборотов двигателя достигнет такой величины, что регулятор сможет управлять винтом (это бывает обычно при числе оборотов двигателя около 1000—1200 об/мин), то переключатель следует поставить в нейтральное положение.

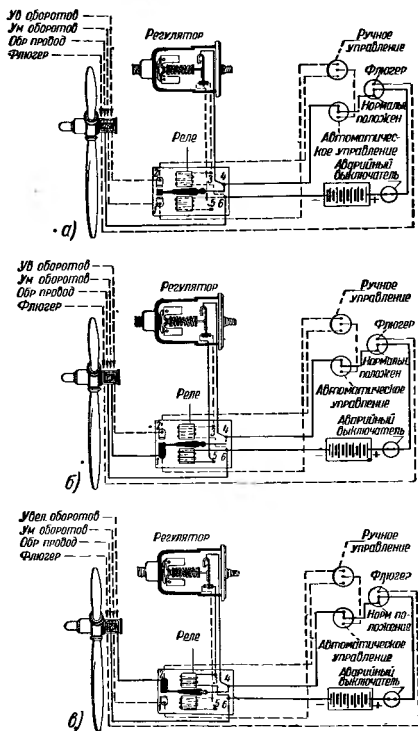
Управление электрическими винтами. На фиг. 96—97 показана одна из схем работы электрического винта и его управления. Характерной особенностью этой схемы является то, что все управление винтом осуществляется через реле. Кроме того, винт может управляться как через регулятор, так и от ручного управления.

Переключатель, расположенный на панели управления, имеет четыре положения: 1) автомат, 2) выключено; 3) увеличение числа оборотов, 4) уменьшение числа оборотов. Этот переключатель переставляет на желаемый тип управления — автоматический или ручной, а также на винт фиксированного шага. При установке его в положение «Автомат» винт работает от регулятора, причем установка на то или иное постоянное число оборотов производится таким же рычагом, как и в случае гидравлического регулятора. При установке в положение «Выключено» винт работает как фиксированный и при этом можно пользоваться ручным управлением, т. е. без регулятора. Для уменьшения числа оборотов (увеличения шага) переключатель устанавли-



Фиг. 96. Схема управления электрическим винтом. Положения фиксированного шага с ручным управлением. Провода под током показаны сплошной линией.

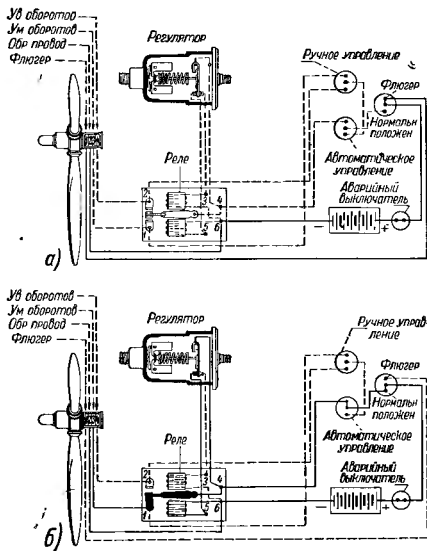
а—фиксированный шаг; б—уменьшение числа оборотов; в—увеличение числа оборотов.



Фиг. 97. Схема управления электрическим винтом. Положения при автоматическом управлении. Провода под ток показаны сплошной линией.

а—равновесное число оборотов; б—уменьшение числа оборотов; в—увеличение числа оборотов.

вается в положение «Уменьшение оборотов», а для увеличения числа оборотов (уменьшения шага) — в положение «Увеличение оборотов». На фиг. 96,а показана схема управления при положении переключателя на «Выключено» — винт фиксированного шага; на фиг. 96,б — уменьшение числа оборотов ручным управ-



Фиг. 98.

а — перевод во флюгерное положение лопастей электрического винта;  
б — вывод из него.

лением; на фиг. 96,б — увеличение числа оборотов ручным управлением. На фиг. 97 показана схема при автоматическом управлении — регулятором, а на фиг. 98,а — перевод винта во флюгерное положение. Для вывода винта из флюгерного положения (фиг. 98,б) переключатель устанавливается на «Автомат», т. е. входит в действие регулятор.

Обычный контактный регулятор работает недостаточно устойчиво и поэтому для электрических винтов по большей части применяется так называемый пропорциональный регулятор с гидравлическим управлением контактами. Кроме того, как было

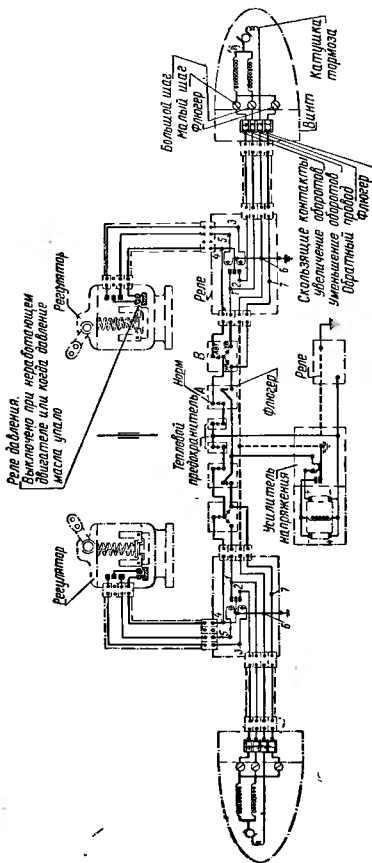
уже указано, для ускорения перевода во флюгерное положение применяется «усилитель напряжения», который в четыре раза повышает напряжение и в четыре раза увеличивает скорость перевода лопастей во флюгерное положение. На фиг. 99 показана такая схема управления электрическим винтом. Ввод во флюгерное положение производится двухполюсным выключателем, находящимся на панели управления, который при включении флюгера отключает сеть винта и, наоборот, при выключении флюгера включает сеть винта. Для исключения случайного ввода во флюгерное положение на выключателе имеется предохранительная крышка. В сеть включается также термический выключатель, который выполняет двойную роль — служит в качестве предохранителя при перегрузках в сети, а также аварийного выключателя. Если предохранитель выключился из-за перегрузки, то его можно снова включить, поставив в положение «Включено».

*Управление тормозными винтами* в настоящее время еще не вполне разработано, и поэтому можно говорить лишь о тех требованиях, которые следует предъявлять к этому управлению в связи со специфическими особенностями тормозных винтов. Если тормозные винты предназначены к применению только при посадке самолета, то управление ввода в тормозное положение лопастей блокируется с выпуском шасси; если шасси не выпущено, то лопасти винта не могут перейти в тормозное положение. Если производится торможение самолета винтом, то для более интенсивного торможения следует увеличивать число оборотов двигателя, а для менее интенсивного торможения — убавлять, т. е. в первом случае рычаг управления двигателем следует передвигать вперед, а во втором — назад. Между тем летчики привыкли, что при передвижении рычага управления вперед самолет летит быстрее, а при движении назад — медленнее. Поэтому требуется так сделать управление двигателем, чтобы при включении винта на тормозной режим движения управления двигателем поменялись назначением, т. е. чтобы при движении рычага вперед число оборотов двигателя уменьшалось, а при движении рычага назад — увеличивалось.

В гидравлических винтах перевод лопастей в тормозное положение и обратно может производиться от специального насоса, подобно тому как осуществляется перевод лопастей во флюгерное положение, однако в этом случае может подключаться еще и насос регулятора.

## § 2. Регуляторы

Назначение регулятора заключается в том, чтобы поддерживать постоянным число оборотов двигателя путем соответствующего изменения шага винта при изменении режима работы двигателя или полета самолета. В зависимости от типа винта — механического, гидравлического или электрического — меняется и

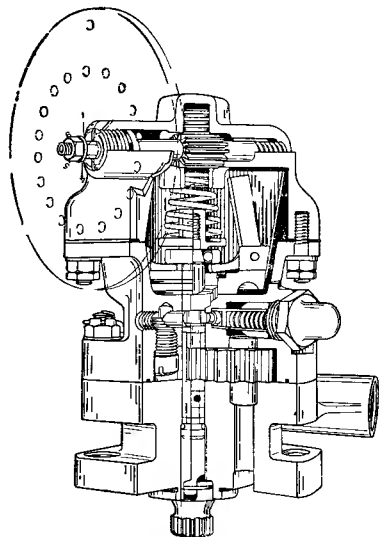


Фиг. 99. Схема управления электрическим винтом на двухскорном самолете.

А—управление флюгером; В—ручное и автоматическое управление. При положении "Уменьшение" уменьшается число оборотов при ручном управлении; при положении "Авт."—выключается реле давления; при положении "Увеличение" увеличивается число оборотов при ручном управлении; при положении "Авт."—выключается реле давления. Позднее соответствую таким на схеме фиг. 96—98.

конструкция регулятора. Ввиду того, что в настоящее время распространены только гидравлические и электрические винты, существуют регуляторы лишь для этих винтов

Регуляторы гидравлических винтов управляют винтом, открывая или перекрывая доступ масла под давлением в ту или иную полость винта таким образом, чтобы поддерживать все время заданное число оборотов двигателя. Из § 2 главы I известно,



Фиг 100 Регулятор гидравлического винта

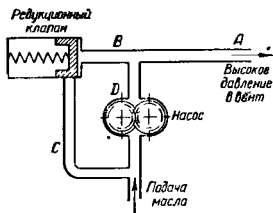
что при постоянной мощности двигателя винт фиксированного шага увеличивает число оборотов при увеличении скорости полета и уменьшает — при уменьшении скорости полета; следовательно, для того чтобы поддерживать постоянное число оборотов при постоянной мощности двигателя, т. е. при постоянном положении рычага управления двигателем (дресселя), и при увеличении скорости полета следует увеличивать угол установки лопастей винта так, чтобы мощность, даваемая двигателем, и мощность, потребляемая винтом, были все время одинаковы. Если угол установки сделать слишком большим, то мощность,

потребляемая винтом, увеличится и двигатель начнет сбавлять число оборотов. При уменьшении скорости полета следует уменьшать угол установки лопастей винта так, чтобы мощность, даваемая двигателем, и мощность, потребляемая винтом, были все время равными; если угол установки лопастей сделать слишком малым, мощность, потребляемая винтом, уменьшится и двигатель начнет увеличивать число оборотов. Для изменения углов установки гидравлических винтов служит специальный шестеренный насос, вращаемый от авиационного двигателя, а перепуск масла производится золотником, связанным с центробежным регулятором. Практически регулятором принято называть совокупность этих элементов управления винтом, собранных в одном агрегате (фиг. 100). Конструктивно регулятор состоит из следующих узлов:

- головки управления,
- центробежного регулятора,
- перепускного золотника и
- шестеренного насоса.

В настоящем параграфе мы разберем лишь чисто конструктивные свойства отдельных частей регулятора; об его динамических свойствах будет сказано в части IV, гл. XIX.

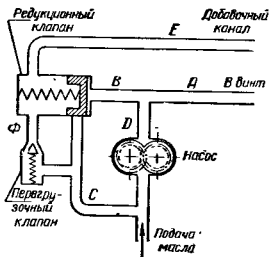
В шестеренный насос поступает масло из масляной сети двигателя под давлением примерно 6 атм. Этот насос увеличивает давление до 15—25 атм в зависимости от конструкции винта. Для регулирования давления, а также для перепуска масла, когда насос работает вхолостую при равновесном положении золотника регулятора, служит редукционный клапан. При схеме работы насоса, показанной на фиг. 101, редукционный клапан полностью закрыт только в том случае, когда расход в сеть равен при данном давлении расходу насоса, если же расход меньше, то редукционный клапан перепускает масло и часть его циркулирует по направлению *DBC* (фиг. 101). Если расхода совсем нет (что бывает при равновесных оборотах винта), то все масло циркулирует по сети *DBC*, причем насос потребляет относительно большое количество энергии. Правда, абсолютно энергия эта небольшая, но главный недостаток такой циркуляции масла под большим давлением заключается в том, что детали насоса работают под большой нагрузкой, быстро изнашиваются, и, следовательно, понижается их срок службы. Так как при работе винта большую часть времени он проводит при равновесных числах оборотов и фактический расход масла через винт невелик, то насос регулятора при указанной схеме работает в очень невыгодных в смысле износа условиях.



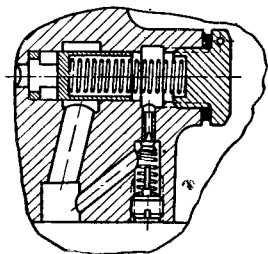
Фиг. 101. Схема работы насоса с редукционным клапаном



Для облегчения работы насоса в современных регуляторах применяется схема, показанная на фиг. 102. Пружина редукционного клапана делается более слабой, рассчитанной не на полное давление, которое должен давать насос. При отсутствии расхода в сети, т. е. когда канал *A* закрыт золотником, добавочный канал *E* тоже закрыт золотником и редукционный клапан открывается под давлением, создаваемым насосом. Если при этом в начальный момент давление за редукционным клапаном повысилось, то откроется «перегрузочный клапан» и спустит давле-



Фиг. 102. Схема работы насоса с разгруженным редукционным клапаном.



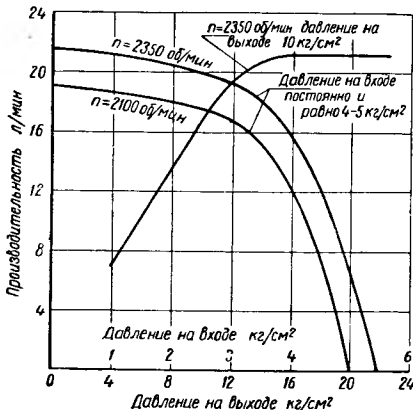
Фиг. 103. Редукционный клапан с перегрузочным клапаном.

ние. Масло будет циркулировать по направлению *DBC*, т. е. так же, как и в первом случае. Если же канал *A* приоткроется, то одновременно приоткроется и канал *E* и за редукционным клапаном установится то же давление, что и перед ним; следовательно, на обратную сторону редукционного клапана будет действовать повышенное давление в канале *E* и плюс сила пружины. Такой редукционный клапан с перегрузочным клапаном показан на фиг. 103.

Производительность насоса находится в определенной зависимости от давления как на входе, так и на выходе из него. На фиг. 104 представлена типовая диаграмма этой зависимости при постоянных числах оборотов и при постоянном давлении как на входе, так и на выходе; как видим, с увеличением давления на выходе производительность падает. С другой стороны, при увеличении давления на входе в насос и при постоянном давлении на выходе производительность сначала увеличивается, а затем становится постоянной.

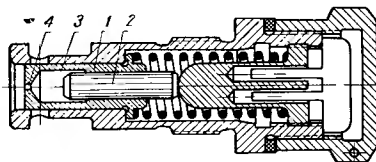
Важным элементом системы насоса является редукционный клапан. Ввиду того что разные винты требуют разного давления при своей работе, обычно в современных регуляторах редукционные клапаны делаются регулируемыми, чтобы можно было, натягивая пружину, задавать желаемое давление в сети.

В маслосистему проникает воздух, и такое эмульсированное воздухом масло — сжимаемо, а вся система с редукционным клапаном склонна к самоколебаниям. Эти колебания редукционного клапана могут повести к поломке его пружины, что может



Фиг. 104. Характеристика шестеренного насоса при постоянных числах оборотов и постоянном давлении на входе.

вызвать отказ в работе регулятора и создать аварийное положение самолета. Для уничтожения самоколебаний клапана его следует демпфировать.



Фиг. 105 Редукционный клапан с демпфированием.

На фиг. 105 показан такой редукционный клапан. Золотник клапана, открывающий отверстие при повышении давления (слева на фиг. 105), состоит из тела золотника 1 и входящего в него поршня 2. В теле 1 имеется небольшое отверстие 4, через ко-

торое в полость 3 поступает масло, которое и прижимает поршень к упору. При быстром повышении давления в магистрали, с которой соединен редукционный клапан, золотник будет передвигаться (вправо на фиг. 105) сравнительно медленно — по мере выжимания масла через отверстие 4 из полости 3. Подбирая величину отверстия, можно осуществить большее или меньшее демпфирование золотника редукционного клапана.

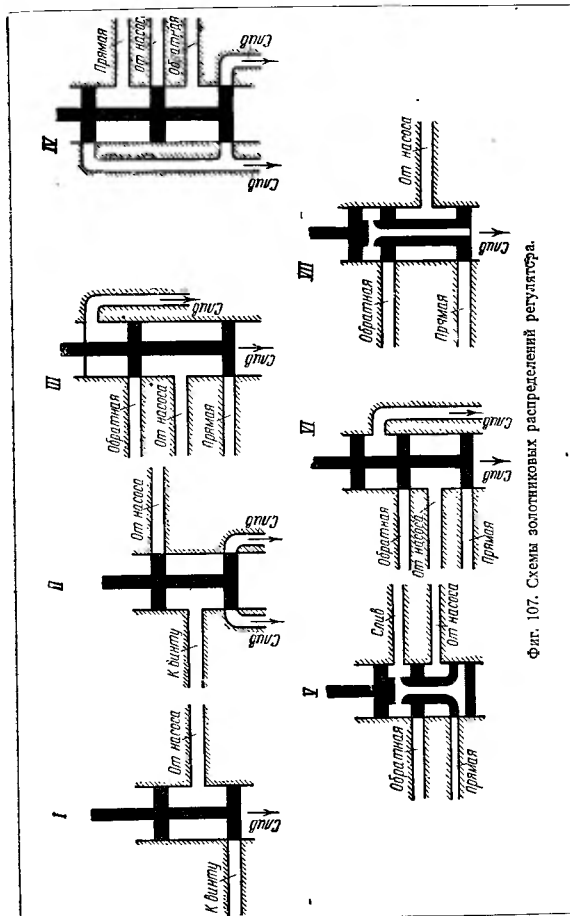
Центробежный регулятор (фиг. 106) состоит из двух грузиков 1 L-образной формы, которые под влиянием центробежной силы, развиваемой на них при их вращении, стремятся раздвинуться один относительно другого. Этому препятствует коническая пружина 3, сжатие которой регулируется через ролик 4. Пружина одним концом упирается в движущийся при помощи рейки и зубчатого валика поршень 2, а другим концом в тарелку, посаженную на золотник 7. На последнем насажен шариковый подшипник, который внешней своей обоймой упирается в концы рычагов центробежных грузиков 1. Верхний квадратный конец валика 6 регулятора посажен в отверстие дна чашки 5, боковая поверхность которой служит маслоотражателем.

Фиг. 106. Схема регулятора.

Золотник 7 входит внутрь валика 6, в котором сделаны окна для пропуска масла; на валике же насажена ведущая шестерня насоса. Конец валика имеет шлицы, которыми он соединяется с валом привода от двигателя.

В последних конструкциях регуляторов к концу валика присоединяется переходник, который своими шлицами соединяется с валом привода от двигателя (см. фиг. 100). Переходник сделан для того, чтобы устранять влияние перекосов посадки регулятора на двигатель. Он удерживается на валике при снятии регулятора контрольным кольцом.

В зависимости от конструкции регулятора золотник может иметь два или три пояска и быть сплошным или полым. Схемы золотникового распределения могут быть самые разнообразные (фиг. 107). Первые две схемы относятся только к винтам одностороннего действия, причем схема I применима только к винтам прямого действия, а схема II только к винтам обратного действия. Остальные схемы применимы и к прямым и обратным винтам,



Фиг. 107. Схемы золотникового распределения регулятора.

а также к винтам двухстороннего действия. Показанные на схемах обозначения «прямая», «обратная» значит, что соответствующий канал должен быть соединен с действующей полостью цилиндра в случае прямой или обратной схемы, причем при одноканальной подводке выпадающий канал должен был заглушен, при двухканальной же подводке «обратный» и «прямой» каналы должны быть соединены с действующими полостями цилиндра.

Не все указанные схемы равноценны. Достоинство золотниковой схемы заключается в том, чтобы реактивное действие пропускаемой золотником струи отсутствовало или было по возможности меньшим, чтобы не нарушать устойчивости работы регулятора. Во всех схемах предполагается, что при увеличении числа оборотов двигателя золотник идет вверх, а при уменьшении — вниз. Напомним, что в винтах прямой схемы с одноканальной проводкой впуск масла в винт производится при уменьшении числа оборотов, а в винтах обратной схемы — при увеличении. Наоборот, выпуск масла в первом случае производится при увеличении числа оборотов, а во втором — при уменьшении.

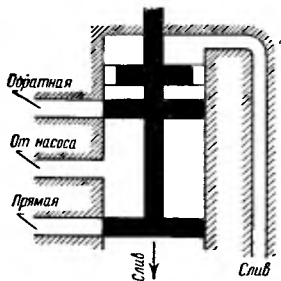
Сравним приведенные схемы. Для случая винта прямого действия схемы *I*, *III*, *IV*, *VI* и *VII* равноценны, так как при сливе у всех у них получается реакция вытекающего масла, направленная вверх, т. е. в том же направлении, как и первоначальное движение золотника; такое положение не способствует стабилизации работы золотника. При пуске же масла в полость винта у всех перечисленных схем реакция вытекающего масла отсутствует, так как она равномерно распределяется между двумя бортиками золотника и взаимно уничтожается. В схеме *V* этот недостаток для прямой схемы устранен тем, что при сливе из винта реакция вытекающего масла направлена в противоположную сторону первоначального движения золотника и поэтому оказывает стабилизирующее действие на работу регулятора, как бы демпфируя движение золотника. Для случая обратной схемы винта равноценны схемы *II*, *IV*, *V* и *VI*, причем при впуске масла и при выпуске его реакция вытекающего масла отсутствует, так как в обоих случаях масло поступает между двумя поясками золотника. В схемах *III* и *VII* при поступлении масла в винт обратной схемы реакции вытекающей струи на золотник нет, так как масло из насоса поступает через золотник между двумя поясками. При сливе же масла у обеих схем имеется реакция вытекающего масла на золотник, причем в схеме *III* эта реакция неблагоприятная, так как она действует на золотник дестабилизирующе вследствие того, что она направлена в сторону первоначального движения золотника. В схеме *VII* эта реакция будет оказывать стабилизирующее действие, так как она действует в сторону, обратную первоначальному движению золотника. Кроме того, реакция на схеме *VII* невелика, так как она действует только на площадь, равную произведению диаметра

штока золотника на диаметр отверстия, перпендикулярного оси золотника.

Таким образом из рассмотренных схем золотников для прямой схемы винта наиболее удачна схема V, тогда как у схем I, III, IV, VI и VII имеется дестабилизирующая сила реакции вытекающего масла. Для обратной схемы винта схемы II, IV, V и VI не имеют воздействия вытекающего масла на золотник, схема III имеет неблагоприятную реакцию, а схема VII — благоприятное воздействие реакции на золотник. Следовательно, для винта обратного действия все схемы, кроме III, являются благоприятными. Работа регулятора, в котором первоначально применялась схема III, была неустойчива.

Неустойчивость была частично устранена введением третьего пояска с лыской, который демпфировал движение золотника (фиг. 108). Особенно большое влияние оказывает дестабилизация золотника при сливе в случае винтов обратной схемы, так как в этом случае винт идет на уменьшение шага и дестабилизация золотника препятствует своевременному прекращению поворота лопастей, отчего может произойти так называемая «раскрутка винта», т. е. повышение числа оборотов против нормального. При прямой схеме винта дестабилизирующее действие золотника менее заметно. Поэтому регуляторы, работающие по схемам I, III, IV, VI и VII, если и имели неуравновешенность золотника в случае прямой схемы винта, то только при сливе, т. е. на увеличении шага (уменьшении числа оборотов), и если эта дестабилизация и оказывала некоторое влияние, то для летчика она была незаметна, так как винт лишь несколько медленнее реагировал на восстановление числа оборотов с меньших на равновесные.

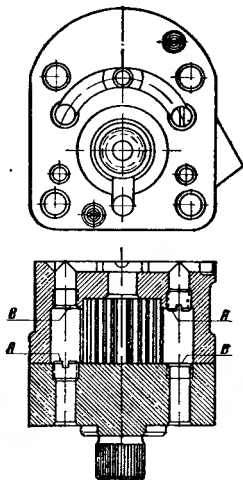
Ввиду того что силы, действующие на золотник, невелики, желательно для безукоризненности работы золотника иметь возможно меньшее трение между ним и обоймой, в которой он движется. В регуляторе это достигается весьма простыми средствами. Золотник помещается во вращающийся валик регулятора; так как золотник по отношению к корпусу регулятора передвигается только поступательно, а вращательного движения не имеет, то по отношению к валу он вращается. Из механики известно, что если золотнику придать по отношению к обойме вращательное движение, то на поступательное движение в



Фиг. 108 Схема золотника регулятора с тремя поясками.

обойме трение никакого влияния оказывать не будет. Этим свойством часто пользуются в технике для уничтожения трения при движении.

У различных авиационных двигателей, на которые устанавливаются регуляторы винта, из конструктивных соображений делают иногда разные направления вращения валиков привода регулятора. Если обратный регулятор на моторе, то вращение привода считается правым, если валик вращается по часовой стрелке, и считается левым, если валик вращается против часовой стрелки. На всех регуляторах делается приспособление, чтобы данный регулятор можно было применять как при правом, так и при левом вращении привода. Для этих целей в корпусе регулятора имеются два комплекта каналов, сменой которых можно приспособлять регулятор к любому вращению привода. Обычно переключение каналов делается перестановкой пробки. Начало каждого канала со стороны масляного насоса имеет нарезку под пробку и помечено буквами А и В (фиг. 109).



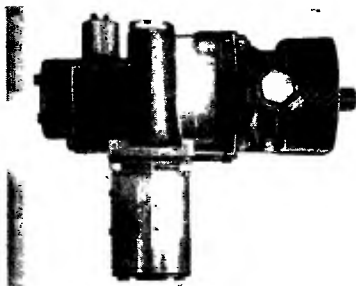
Фиг. 109 Схема изменения направления вращения регулятора.

Если вращение привода правое, то пробки надо вставить в отверстия В, если же левое, — то в отверстия А.

В универсальных регуляторах, или регуляторах двойного действия, имеются также приспособления для переключения данного регулятора с прямой схемы на обратную и наоборот. Для этого служат специальные пробки, которые переставляются местами и таким образом переключают соответствующие каналы. Так, например, для винта прямого действия черная пробка должна быть поставлена вверх (в корпус насоса), а белая вниз (в корпус передачи); для винта обратного действия пробки должны быть поставлены наоборот, т. е. черная пробка внизу, а белая наверху.

На фиг. 110—112 показаны общие виды различных регуляторов.

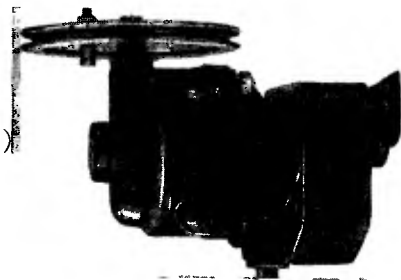
Для установления тех или иных равновесных чисел оборотов при ручном управлении регулятором имеется ролик, который вращает валик, перемещающий рейку, которая сжимает или освобождает пружину. Диапазон поворота ролика, соответ-



Фиг 112 Регулятор с электростанционными управлением



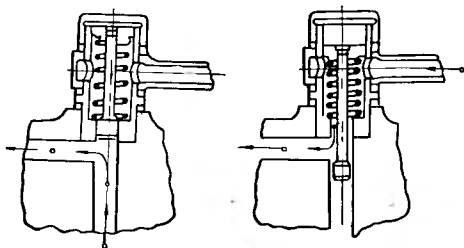
Фиг 111 Универсальный регулятор



Фиг 110 Регулятор винтов прямой схемы.

ствующий полному диапазону изменения шага винта, обычно ограничивается упорами. На современных винтах диапазон поворота ролика колеблется от  $90^\circ$  до  $140^\circ$ , что зависит от требуемой точности установки равновесных чисел оборотов и от конструктивных особенностей винта и регулятора.

Так как передвижение лопастей винта производится давлением масла, создаваемым масляным насосом регулятора, а шестеренный насос создает давление и производительность, зависящие от числа оборотов, то очевидно, что не при всех числах оборотов двигателя регулятор будет работать удовлетворительно. При слишком малых числах оборотов насос не будет в состоянии создать необходимое давление, а при слишком боль-



Фиг. 113. Схема действия флюгерного клапана.

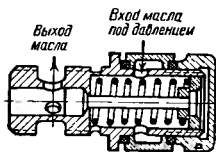
ших — шестеренный насос работает весьма неустойчиво. Следовательно, у каждой конструкции регулятора имеются свои пределы оборотов, при которых регулятор работает удовлетворительно. Чаще всего такими пределами являются 1400—2700 об/мин валика регулятора. Во флюгерных винтах регулятор выполняет также некоторые функции, связанные с вводом винта во флюгерное положение или выводом из него; для этого к нему добавляются некоторые приспособления, к которым относятся *флюгерный клапан и реле давления*.

Функцией флюгерного клапана является отключение масляной сети регулятора от винта и включение в сеть винта масляной сети флюгерного оборудования (флюгерного электронасоса). Флюгерный клапан входит в конструкцию регулятора и обычно смонтирован в его корпус. По существу флюгерный клапан — это трехходовой кран, который переключается под действием давления в сети в определенное положение. Когда электронасос начинает действовать, в сети поднимается давление, которое и передвигает флюгерный клапан так, чтобы присоединить сеть электронасоса к сети винта, отключив сеть регулятора. На фиг. 113 показано действие флюгерного клапана, а на фиг. 114

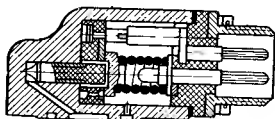


дан его чертеж. При двухканальном подводе масла обычно ставятся два флюгерных клапана (фиг. 90) — один для ввода, а другой для вывода.

Реле давления служит для автоматического выключения флюгерного электронасоса, после того как винт вошел во флюгерное положение (фиг. 115). Оно укрепляется на корпусе регулятора и полость его соединяется с проходным каналом регулятора, соединяющим флюгерный электронасос с каналом винта большого шага. Поршеньек, натягиваемый пружиной, замыкает контакты электрического провода; при определенном давлении, на которое настроено данное реле, поршеньек сжимает пружину и размыкает контакты. Работа реле давления показана на схеме фиг. 90. Давление, при котором размыкаются контакты, зависит от типа винта, обычно оно равно примерно  $35 \text{ кг/см}^2$ . Точность



Фиг. 114 Флюгерный клапан регулятора.



Фиг. 115. Реле давления регулятора.

отсечки обычно равна  $4-2 \text{ кг/см}^2$ . Контакты делаются посеребренными, а так как они работают в масле, то исключается пригорание их. При постановке реле давления на регулятор или смене его (регулятор всегда поставляется с реле давления) в корпус реле следует предварительно залить масло. Регулировка реле производится на заводе, его изготовляющем, причем ее можно производить подбором подвижных контактов, имеющих разную толщину. Этим достигается различная предварительная натяжка пружины реле.

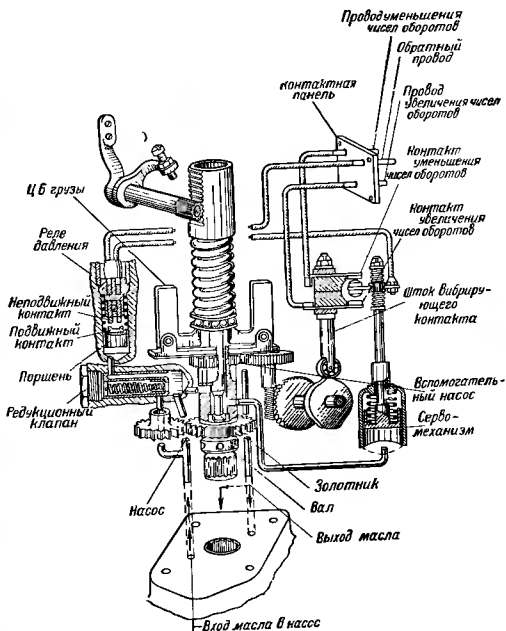
Регулятор винта имеет сравнительно небольшие размеры, высота современных регуляторов колеблется между 100 и 200 мм, в зависимости от конструкции как самого регулятора, так и от способа управления им. При электрическом дистанционном управлении высота регулятора обычно получается больше.

Регулятор устанавливается на звездообразных двигателях обычно спереди на картере редуктора, на рядных же двигателях — в зависимости от удобства расположения привода к регулятору.

До сих пор мы рассматривали регулятор как отдельный агрегат, органически не связанный с винтом и устанавливаемый вне винта на двигателе. Существуют винты, в которых регулятор

органически связан с винтом и входит в его конструкцию. Большого распространения такие конструкции не получили.

Обычный регулятор электрического винта состоит из центробежных грузиков, которые замыкают контакты большого или



Фиг. 116 Схема пропорционального регулятора электрического винта.

малого шага при том или другом отклонении грузов от положения равновесия при изменении режима работы двигателя. Однако такой регулятор подвержен «раскачке», т. е. неустойчивой работе. Более устойчив так называемый пропорциональный регулятор, сущность конструкции которого заключается в следующем. Центробежные грузики управляют золотником, который перепускает масло, подаваемое насосом (фиг. 116) в серво-

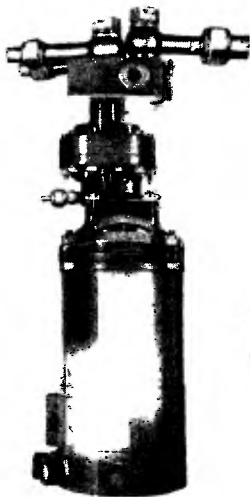
механизм, передвигающий средний контакт, находящийся между двумя контактами большого и малого шага. Эти последние контакты при помощи кулачка находятся в колеблющемся состоянии, причем при равновесном положении регулятора центральный контакт находится посередине между колеблющимися контактами и соединения между ними не происходит. Если изменился режим работы двигателя, то грузики перемещаются, передвигают золотник, перепускающий масло из системы насоса в сервомеханизм. Последний передвигает средний контакт, сближая его с тем или другим крайним контактом, отчего происходит прерывистое включение тока электродвигателя винта, который и поворачивает лопасти. Так как крайние контакты колеблются, то соединение между контактами получается прерывистое и ток в электродвигатель подается импульсами. Это дает более устойчивую работу регулятора. В регуляторе имеется реле давления, которое включает ток только когда имеется давление масла в системе. Добавочный насос откачивает масло, попадающее в регулятор.

### § 3. Флюгерное оборудование

Флюгерное оборудование гидравлических винтов состоит из электронасоса, масло- и электропроводки и управления флюгером. Последнее описано в § 1.

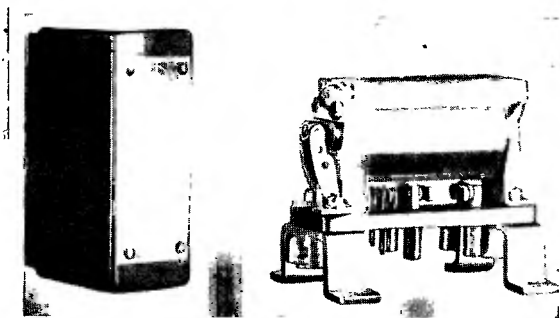
Электронасос состоит из электродвигателя и шестеренного насоса, посаженного на валу электродвигателя (фиг. 117). Масло в электронасос поступает из общего масляного бака, питающего авиационный двигатель. Мощность электродвигателя для таких насосов бывает достаточной в 3,5 л. с. Ввиду кратковременного действия таких насосов (30—40 сек) нагруженность электродвигателя делается обычно большой.

Питание электромотора производится от бортовой сети самолета.



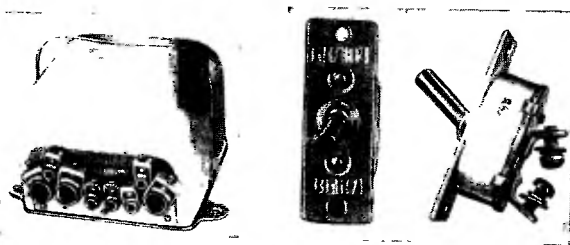
Фиг. 117 Флюгерный электронасос

В зависимости от схемы работы винта электронасосы делаются одностороннего действия и реверсивные. При одноканальной схеме работы винта и наличии вследствие этого особого



Фиг. 120. Добавочное реле ДР.

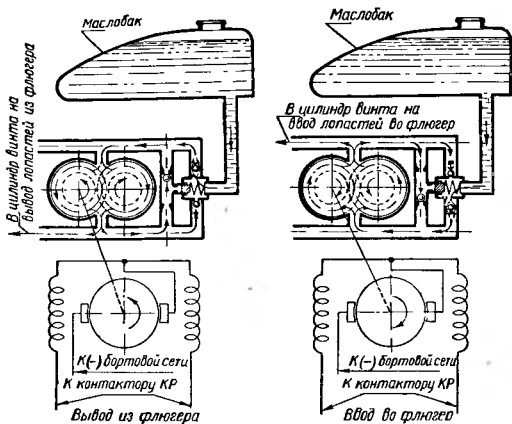
маслораспределителя, который перераспределяет масло для вывода из флюгерного положения при повышенном давлении, ввод во флюгерное положение производится при меньшем давлении, чем вывод (в этом случае давление электронасоса дости-



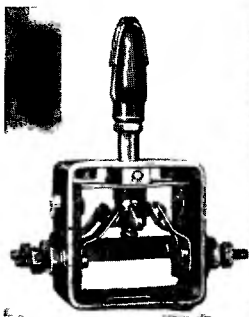
Фиг. 121. Коробка реле КР

Фиг. 122. Аварийный выключатель АВ.

гает 40—50 атм). При двухканальной же схеме работы винта как вывод, так и ввод производится примерно при одинаковых давлениях, причем ввод производится при действии масла по одному каналу, а вывод — по другому. В этом случае для ре-



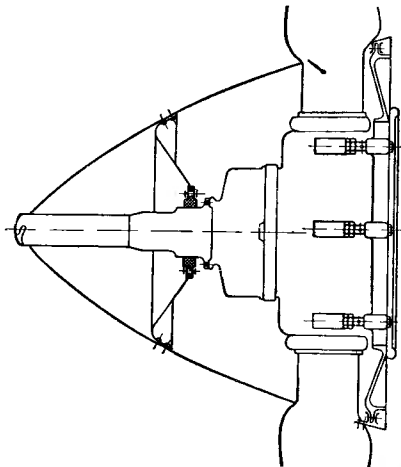
Фиг. 118. Схема распределителя электронасоса



Фиг. 119. Переключатель П



ду, что кок работает в весьма тяжелых условиях на него действуют как большие центробежные силы, обусловленные вращением его вместе с винтом, так и вибрационные нагрузки, вызванные двигателем. Особенно неблагоприятно действуют последние и, в частности, вибрации высокой частоты, вызывающие большие напряжения в деталях кока. Для того чтобы предохранить кок от действия вибрационных нагрузок, которые вызывают усталостные явления в материале кока и быстро приводят его к разрушению, следует всегда устанавливать кок на втулке винта на резиновых амортизаторах.



Фиг. 125 Схема кока винта.

Устанавливается кок на втулке винта обычно на двух опорах: одной опорой служит диск, укрепляемый сзади на втулке винта, а другой опорой — храповик или небольшая трубка, укрепляемая на передней части втулки (фиг. 125).

Задний диск делается штампованным из дуралюминового листа или из электрона (литого, штампованного) (фиг. 126). Этот диск укрепляется на винте через резиновые амортизаторы.

Оболочка кока представляет собой давленный или штампованный кожух (лучше из материала ДЗ и не рекомендуется де-

лать из материала АМц, который хотя и хорошо давится на станке, но слишком мягок и в эксплуатации часто мнется). Чаще всего он делается из двух частей — передней и задней, причем последняя — обичайка — имеет вырезы для лопастей и приклепывается или приваривается точечной сваркой к передней.

Вырезы для лопастей должны быть заделаны прочной окантовкой, состоящей из закатанной по краям стальной проволоки и приклепанной дуралюминовой полосы.

Для того чтобы придать кожуху достаточную жесткость, к его внутренней стороне приклепываются закрытые желоба. Эти же желоба служат также и своего рода вентиляционным приспособлением, для того чтобы создать внутри кожуха движение воздуха около цилиндрической группы винта. Оба конца



Фиг. 126 Литой электронный диск кока винта.

каждого такого жолоба открыты, причем передний соединяется с внутренностью кожуха, а задний — с отверстием в кожухе; через это последнее отверстие воздух и выбрасывается наружу.

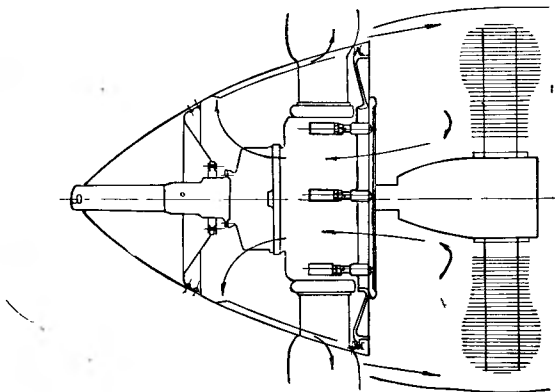
Ввиду того что концы жолоба находятся в разных радиусах и поэтому на находящийся в них воздух действует различная центробежная сила, жолоб служит как бы центробежным насосом. Засасываться может воздух только из передней части двигателя — от картера редуктора, который всегда достаточно сильно нагрет. Циркулирующий воздух немного обогревает винт и не дает застыть маслу (фиг. 127).

Кок винта должен быть легко съемным. Для этой цели делаются замки, скрепляющие кожух с диском. На кожухе имеет-



ся большое количество (около 25) штифтов с головками, которые входят в основной диск, при этом замок поворачивается от руки и все штифты захватываются одновременно за головки. От самооткрывания замок предохранен защелкой, прижимаемой центробежной силой, развиваемой при вращении винта.

На переднюю опору кожух опирается через диафрагму, в середине которой имеется текстолитовая муфта с отверстием, в которое входит передняя опора. Муфта эта должна быть обязательно текстолитовой, так как от вибрации двигателя происходит колебание кожуха около опоры и сильное трение муфты, текстолит же хорошо противостоит истиранию.



Фиг. 127. Схема обогрева винта.

### § 5. Противообледенительное устройство

Задачей противообледенительного устройства на винте является как предотвращение образования льда на лопастях, так и уничтожение его. Образование льда на лопастях весьма опасно, так как оно, кроме ухудшения аэродинамических свойств винта, вызывает неуравновешенность винта, что вызывает тряску всей моторной установки. Так В. П. Чкалов во время своего большого Арктического перелета на самолете АНТ-25 в 1936 г. вынужден был спуститься на о. Удд из-за сильной тряски моторной установки, вызванной обледенением винта.

Обледенение лопастей может произойти при некоторых определенных метеорологических условиях, обыкновенно при температуре воздуха от  $-5$  до  $-15^{\circ}$ . Переохлажденные капельки, попадая на лопасть, мгновенно замерзают. Больше всего капелек попадает на переднюю кромку и от нее начинается обледенение лопастей. От льда форма кромки меняется, изменяется обтекание профиля, и поэтому лед начинает отлагаться все на большей зоне вблизи передней кромки.

Противообледенительные устройства на винты можно разделить на четыре следующих типа:

1. Пасты и лаки, которыми можно покрыть лопасти и этим понизить точку замерзания или уменьшить силу сцепления льда с поверхностью лопасти, вследствие чего, как только на лопасти образуется ледяная корка, она сбросится центробежной силой.

2. Химический противообледенитель. Спирто-глицериновая смесь разбрызгивается на лопасти, вследствие чего образуется пленка, предохраняющая от образования льда.

Эта смесь размягчает лед, который и отскакивает от лопасти под действием центробежной силы.

3. Электротермический противообледенитель, при котором дуралюминовая лопасть по передней кромке покрывается специальным токопроводящим материалом, нагреваемым электрическим током. При стальных лопастях нагревательные элементы вделываются внутрь полых лопастей. Энергия берется от бортовой сети или от специального генератора, встроенного в винт.

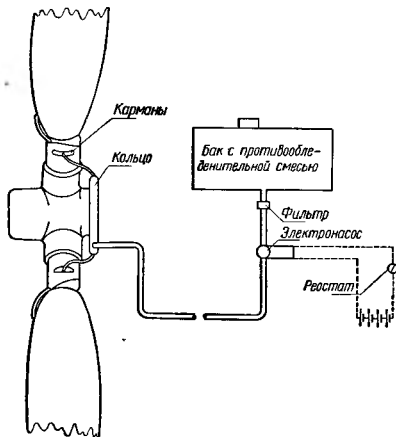
4. Термические противообледенители, использующие тепло выхлопных газов двигателя, могут применяться только в случае полых стальных лопастей.

Из всех указанных в настоящее время широко используется второй тип и начинает получать распространение третий.

Схема химического противообледенителя состоит в следующем (фиг. 128). Противообледенительная жидкость (смесь из 85% спирта и 15% глицерина, или этиленгликоль), находящаяся в специальном бачке, с помощью электронасоса через фильтр подается в определенном количестве, регулируемом реостатом, на желобковое кольцо, укрепленное на задней стороне втулки винта. Для того чтобы не выбрасывалась жидкость из кольца, ее следует подводить через тонкую трубку ( $3 \times 4$  мм), повернутую плавно под прямым углом так, чтобы жидкость подходила к кольцу по касательной. Еще лучше, если эта трубка расположена не внизу кольца, а на  $40^{\circ}$  выше, против вращения кольца. Из желобкового кольца по трубкам жидкость под влиянием центробежной силы поступает в специальные карманы, укрепленные на лопастях, и из этих карманов — тоже под влиянием центробежной силы — по трубкам же распределяется по передним краям лопастей. Вся трудность химического противообледенения заключается в правильном распределении жидкости по лопасти—

по передней кромке. Так как за последнее время на винтах стали применяться остроносые дужки и, кроме того, прикомлевая часть делается тоже несущей, и, следовательно, также с остроносыми дужками, для таких лопастей трудность распределения жидкости по передней кромке еще увеличивается. Вместо того чтобы растекаться по передней кромке, жидкость уносится в стороны и передняя кромка остается не смоченной. В этом случае приходится применять специальные желобки.

Недостатком химического противообледенителя является неравномерное смачивание и пожарная опасность применяемой жидкости.



Фиг 128. Схема химического противообледенительного устройства на винте

За самое последнее время начал получать распространение электротермический противообледенитель, который не обладает недостатками, присущими химическому противообледенителю, но потребляет достаточное количество электроэнергии. Некоторое снижение потребления энергии получается, если включение противообледенителя делать циклически — через определенные промежутки времени.

Пасты и лаки не получили распространения как ненадежный способ защиты.

Что касается термического противообледенителя, использующего тепло выхлопных газов, то конструктивное оформление его возможно только в стальных полых лопастях.

### § 6. Веса деталей оборудования винтов

В вес винта при исчислении весового баланса самолета входят веса всех деталей оборудования, имеющих отношение к винту. В зависимости от конструкции этих деталей веса их меняются, ниже даются средние веса наиболее ходовых деталей оборудования винта

1. Регулятор — около 3 кг.
2. Управление к нему — 7 кг.
3. Флюгерное оборудование (электронасос, электро- и масляная проводка, управление и т. п.) — 10 кг.
4. Кок винта — от 15 до 30 кг в зависимости от размеров винта.
5. Противообледенительное устройство на винте — 1 кг.

Устройство подачи противообледенительной жидкости — вес как для одномоторного, так и для двухмоторного самолета одинаков.

Вес устройства подачи (включая и трубопроводы) — 5 кг.

Вес жидкости (уд. вес около  $0,80 \text{ г/см}^3$ ) определяется исходя из расхода 6 л на один трехлопастный винт в час.

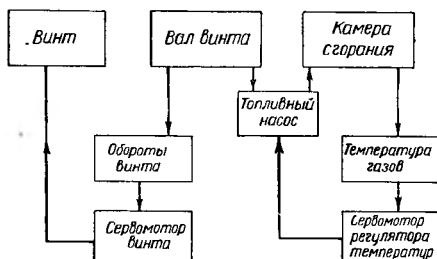
### § 7. Оборудование винтов для турбовинтовых двигателей

Конструкции лопастей, втулок и механизма поворота лопастей у винтов, предназначенных к установке на турбовинтовые двигатели, принципиально не отличаются от винтов для поршневых двигателей. Однако оборудование для винтов к турбовинтовым двигателям может отличаться от оборудования для винтов к поршневым двигателям. Относится это главным образом к вопросам регулирования винта.

Особенности турбовинтовых двигателей требуют и особых способов регулирования их, иногда значительно отличающихся от регулирования поршневых двигателей. Малый опыт эксплуатации турбовинтовых двигателей пока еще не дает возможности создания регулирующих систем, удовлетворяющих всем требованиям эксплуатации, но общие соображения дают возможность установить простейшие схемы регулирования.

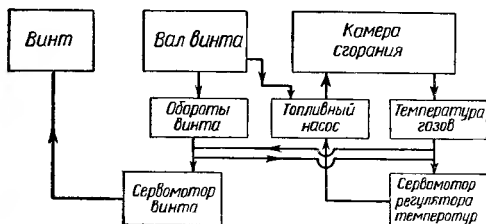
В турбовинтовых двигателях регулируемыми величинами являются число оборотов и температура газов в турбине, а регулирующими величинами — шаг винта и подача топлива в камеру сгорания. Система регулирования турбовинтовых двигате-

лей может быть связанной и несвязанной. Это значит, что регулирование винта может быть как самостоятельным, как то имеет место в поршневом двигателе, так и связанным с регулированием температуры. Схемы этих разновидностей показаны на фиг. 129 и 130.



Фиг. 129. Схема несвязанного регулирования турбовинтового двигателя.

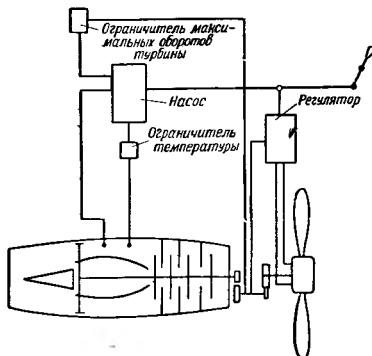
В случае несвязанной схемы регулятор для винтов с турбовинтовым двигателем принципиально аналогичен таковому для поршневого двигателя. Однако необходимость поддержания



Фиг. 130. Схема связанного регулирования турбовинтового двигателя.

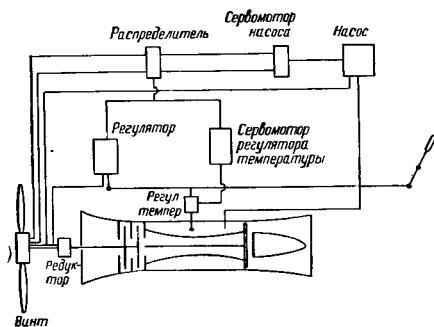
с большей точностью регулируемых величин (отклонение числа оборотов не должно превышать 1—2%) вызывает дополнительные требования к регуляторам для винтов к турбовинтовым двигателям. В частности, особые свойства турбинного двигателя

требуют увеличения чувствительности регулятора, что обычно влечет за собой склонность последнего к колебаниям (см. § 2 гл. XIX).

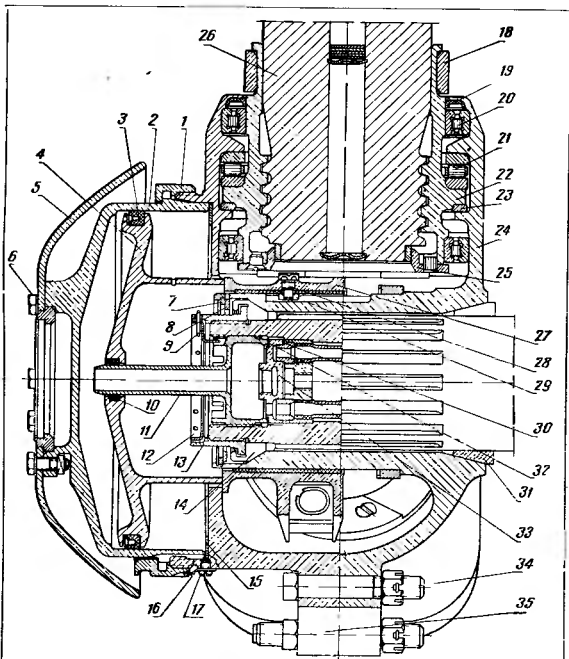


Фиг. 131. Принципиальная схема несвязанного регулирования турбовинтового двигателя

На фиг. 131 показана схема несвязанного регулирования а на фиг. 132 — связанного регулирования турбовинтового двигателя.



Фиг. 132. Принципиальная схема связанного регулирования турбовинтового двигателя.



Фиг. 133 Общий вид винта обратной схемы с наружным цилиндром.

1—гайка крепления цилиндрической группы; 2—цилиндр; 3—резиновая манжета поршня; 4—поршень; 5—бронированный колпак на поршень; 6—болт крепления колпака или храповика на цилиндре; 7—контровка кольца; 8—для стягивания винта с носка; 9—упорное кольцо; 10—шплинт для контровки загляжной гайки; 11—малая резиновая манжета поршня; 12—штуцер для подачи масла в цилиндр; 13—звездочка для контровки загляжной гайки на носке вала; 14—затяжная гайка; 15—передний конус; 16—прокладка между цилиндром и корпусом втулки; 17—винт, зажимающий контровку; 18—хомут лопасти; 19—резиновая манжета; 20—радиальный роликовый подшипник; 21—упорный роликовый подшипник; 22—стальной стакан лопасти; 23—прокладка для регулирования натяга подшипника; 24—задняя половина корпуса втулки; 25—подводная шайба лопасти; 26—лопасть; 27—траверса; 28—штифт, направляющий траверсу по прорези; 29—текстолитовая обойма в траверсе; 30—прокладка между переходником и носком вала; 31—задний конус; 32—прокладка между переходником и штуцером; 33—переходник, служащий для заглушения одного канала и соединения другого канала со штуцером при двухканальном двигателе; 34—болт крепления двух половин корпуса; 35—передняя половина корпуса

У поршневого двигателя управление винтом и двигателем делается раздельным; были попытки соединить эти управления воедино, однако они не увенчались успехом. Между тем у поршневого двигателя имеются все предпосылки для такого соединения. Действительно, у современных мощных поршневых двигателей изменение мощности при постоянных числах оборотов, вообще говоря, не рекомендуется производить, чтобы не нарушать его теплового баланса; обычно если уменьшается мощность, то уменьшается и число оборотов, ибо каждой мощности соответствуют определенные числа оборотов, на которых двигатель работает наиболее экономично.

В турбовинтовых двигателях эта связанность мощности с числом оборотов еще более резко выражена. Поэтому целесообразно в турбовинтовых двигателях применять связанное управление винтом и двигателем. Это представляет и большие удобства летчику, так как уменьшает количество манипуляций, которые ему приходится производить в полете.

## Глава V

### ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ НЕКОТОРЫХ ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ

#### § 1. Трехлопастные винты с наружным цилиндром

Эти винты делаются как обратной, так и прямой схемы для двигателей с одноканальным подводом масла и, следовательно, являются винтами одностороннего действия. Они имеют три лопасти. Схема работы винта прямой схемы представлена на фиг. 80—82, а общий вид винта обратной схемы — на фиг. 133. В собранном виде винт состоит из двух основных частей — втулки с лопастями и цилиндрической группы. При установке винта на двигатель цилиндрическая группа снимается с втулки, а после затяжки затяжной гайки и контрочки ее вновь присоединяется к ней.

Корпус винта разъемный, состоит из двух половинок, которые стягиваются между собой девятью болтами. Задняя половина корпуса сделана как одно целое со ступицей, которая имеет продольные шлицы и по концам внутренние конусные поверхности. Ступица при надевании винта на носок вала входит своими шлицами в зацепление со шлицами



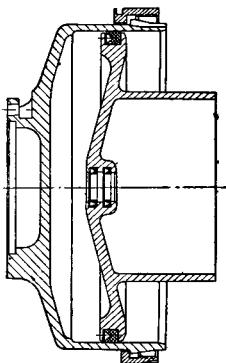
Фиг. 134 Узел лопасти винта с наружным цилиндром.



носка и центрируется, опираясь на передний и задний конусы. Передней затяжной гайкой ступица прижимается к конусам и плотно к ним прилегает.

Узел лопасти состоит из стального стакана, в который ввинчивается дуралюминовая лопасть на нарезке и закрепляется хомутом (фиг. 134). В случае прямой схемы хомут составляет одно целое с противовесом (фиг. 33). Стакан вставляется в рукава корпуса на роликовых и шариковых подшипниках.

Для восприятия радиальных усилий служит радиальный роликовый подшипник, а для восприятия изгибающих моментов два шариковых подшипника.



Фиг. 135. Наружная цилиндровая группа.

на пальцах, закрепленных на торцах лопастей концентрично осям последних. Через эту систему поршень поворачивает лопасти в обратной схеме на увеличение шага, а в прямой — на уменьшение.

Подача масла из носка вала производится специальным штуцером *11*, который ввинчивается в носок вала и проходит сквозь поршень винта. Герметичность между штуцером и поршнем достигается применением малых резиновых манжет, которые вставляются в канавки поршня.

Если винт устанавливается на двигателе, у которого в носке вала два канала, то для использования только одного канала, необходимого этому винту, устанавливается специальный переходник *33* (фиг. 133), перепускающий в штуцер масло только из одного канала, другой же канал заглушается.

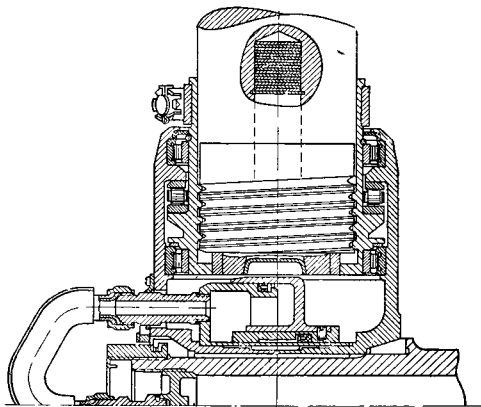
Цилиндровая группа состоит из дуралюминовых цилиндра и поршня (фиг. 135). На переднем фланце цилиндра *2* крепится храповик или броневой колпак *5* (см. фиг. 133).

Колпак *5* предназначен для защиты от прострела наиболее уязвимой и наиболее жизненной части винта — цилиндра (пробой цилиндра вызывает утечку масла из масляной системы двигателя, что влечет за собой аварию). Гайка *1* служит для присоединения цилиндровой группы к корпусу втулки винта. Для герметизации полости перед поршнем *4* служат резиновые уплотняющие манжеты *3*. Поршень упирается в цилиндрическую траверсу *27*, которая имеет три боковых вилкообразных выступа. Вилки охватывают медные сухари, свободно сидящие

Для того чтобы можно было через цилиндр передать от хrapовика на корпус момент для запуска двигателя, цилиндр вставляется в корпус на шпонках (см. фиг. 135).

## § 2. Трехлопастные винты с внутренним цилиндром

Эти трехлопастные винты работают по прямой схеме с одноканальным подводом масла. Цилиндровая группа винта заключена внутри втулки — между комлями лопастей и состоит из двух кольцевых цилиндров, входящих один в другой, причем один — передний, неподвижный, другой — задний, через поворотный механизм соединен с кривошипом лопасти (фиг. 136) и при своем движении поворачивает лопасть около ее оси.

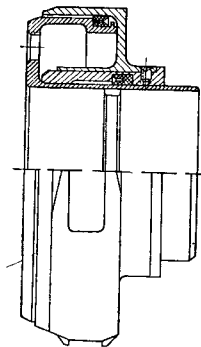


Фиг. 136. Трехлопастный винт с внутренней цилиндрической группой.

Корпус винта разъемный, — стягивается девятью болтами. Стальные стаканы лопастей, в которые ввертываются дуралюминовые лопасти на трапецевидной резьбе, вставляются в рукава втулки на роликовых подшипниках. Для восприятия радиальных усилий служит один радиальный роликовый подшипник, для восприятия изгибающих моментов — два осевых роликовых подшипника.

Цилиндровая группа состоит из двух кольцевых цилиндров (фиг. 137), охватывающих ступицу корпуса. Масло из центральной трубки в носке вала мотора подводится по изогнутой наруж-

ной трубке через переднюю часть втулки (фиг. 136) в полость между цилиндрами и давлением на задний цилиндр, служащий своего рода поршнем, передвигает его назад. В три ушка на подвижном цилиндре входят сухари, сидящие на кривошипных стаканах лопастей; при движении цилиндра назад эти ушки, надавливая на кривошип стакана, поворачивают лопасть около ее оси так, что передвигают ее на уменьшение угла установки.



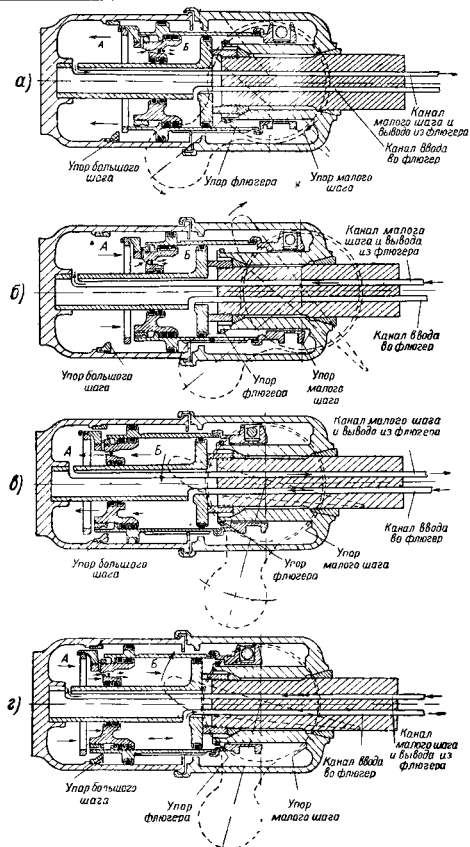
Фиг. 137 Внутренняя цилиндрическая группа винта

### § 3. Флюгерные винты с наружным цилиндром

Эти винты предназначены для постановки на двигатели с двухканальным подводом масла. Схема работы винта показана на фиг. 138, а общий вид его — на фиг. 139.

В отличие от винтов предыдущих типов корпус этого винта неразъемный (фиг. 60). Стаканы лопастей с подшипниками закрепляются с помощью накладных гаек 4 (см. фиг. 139), которые ввинчиваются в рукава корпуса. Для облегчения технологического процесса изготовления неразъемных корпусов ступица изготавливается отдельно и затем крепится к корпусу на восьми болтах. Ступица с

внутренней стороны имеет канавки для шлиц, а по бокам — конусные гнезда, которыми она опирается на передний и задний конусы. По наружной поверхности ступицы, вдоль нее, может передвигаться траверса 20, от поворачивания которой предохраняет штифт 18, входящий в продольную выточку в ступице. У траверсы имеется четыре ушка, в которые входят сухари, сидящие на пальцах стаканов лопастей. По внутреннему диаметру траверсы впрессована текстолитовая втулка, уменьшающая трение между траверсой и ступицей. Продольное движение траверсы поворачивает лопасти около их осей. Передний и задний торцы траверсы, упираясь при передвижении соответственно в тело ступицы и в специальное упорное кольцо 9, насаженное с другой стороны ступицы, ограничивают ход траверсы соответственно от малого шага до флюгерного положения. Как и у трехлопастного винта, лопасти укрепляются во втулке через стальные стаканы. Для восприятия осевых усилий от лопастей служат роликовые подшипники, а для восприятия изгибающих моментов — текстолитовые подшипники. Для предупреждения выбрасывания из втулки масла, предназначенного для смазки подшипников лопастей, в текстолитовых подшипниках 2 сделаны

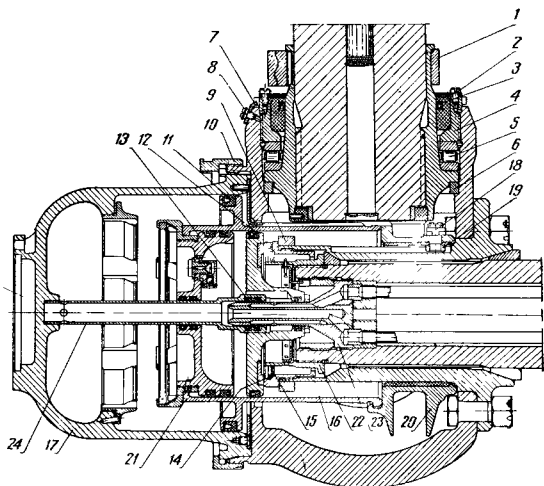


Фиг. 138. Схема работы флюгерного винта.

а) Увеличение шага, б) Уменьшение шага, в) Ввод во флюгерное положение, г) Вывод из флюгерного положения

кольцевые выточки, в которые вставляются резиновые уплотнительные манжеты 3.

Узел цилиндра состоит из цилиндра, расположенного впереди, и двух подвижных поршней соответственно для двух диапазонов работы — рабочего диапазона и ввода во флюгерное положение.

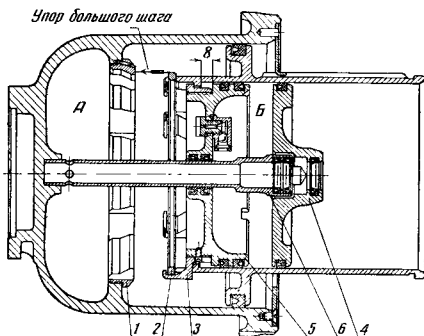


Фиг. 139. Флюгерный винт с наружным цилиндром.

1—хомут лопасти; 2—текстолитовый подшипник; 3—резиновая манжета в текстолитовом подшипнике; 4—накидная гайка для крепления лопасти во втулке; 5—ролик упорный подшипник; 6—прокладка для регулирования натяга роликового подшипника; 7—контровка накидной гайки; 8—винты, крепящие контровку; 9—упорное кольцо флюгерного положения; 10—гайка крепления цилиндра на втулке; 11—манжета поршня; 12—резиновая манжета; 13—малые резиновые манжеты; 14—контровка звездочки; 15—контражная звездочка; 16—съемник; 17—цилиндр; 18—штифт для направления движения траверсы; 19—текстолитовая манжета на траверсе; 20—траверса; 21—поршень; 22—затяжная гайка; 23—штуцер; 24—трубка, подающая масло в переднюю полость.

Для изоляции полости второго поршня имеется еще неподвижный поршень 4 (фиг. 140). В случае работы винта по прямой схеме передняя полость А служит для передвижения маслом винта на малый шаг, вторая же полость Б — между вторым поршнем и неподвижным — служит для ввода во флюгерное положение. Второй поршень имеет лишь небольшое движение относительно первого и это движение служит лишь для откры-

тия замка, дающего возможность передвинуть поршень во флюгерное положение. Поршень 5 при переводе винта во флюгерное положение испытывает давление масла на заднюю стенку. Когда винт перешел на большой шаг, то кольцо 2 упирается в кольцевой упор 1. При повышенном давлении за поршнем 5 последний давит на конусный съемник замка, который сжимает кольцо 3 так, что оно сможет вместе с поршнем пройти сквозь упор 1. Штуцер 6 служит для подвода масла в переднюю полость. Для уплотнения движущихся частей всюду поставлены резиновые манжеты.



Фиг. 140. Цилиндрическая группа флюгерного винта.

Лопастей винта, так же как и у других винтов, ввинчиваются на трапецевидной нарезке в стальные стаканы, которые на подшипниках вставляются в рукава корпуса.

Кроме обычного регулятора, который управляет винтом в рабочем диапазоне, имеется еще флюгерная аппаратура, служащая для перевода лопастей винта во флюгерное положение и состоящая из электронасоса и аппаратуры для включения. Так как подача масла в винт для перевода его во флюгерное положение производится через регулятор, то последний должен иметь соответствующее приспособление для пропуска масла, а также реле давления для отключения электронасоса при установке лопастей во флюгерное положение.

Схема работы регулятора и флюгерной аппаратуры показана на фиг. 90.

#### § 4. Флюгерные винты переходного типа

Трехлопастные флюгерные винты (фиг. 141 и 142) предназначены для установки на двигатели с одноканальной и двухканальной подводкой масла.

Удачно разработанная цилиндровая группа винтов разрешила проблему создания флюгерных винтов для двигателей, имеющих один канал подвода масла.

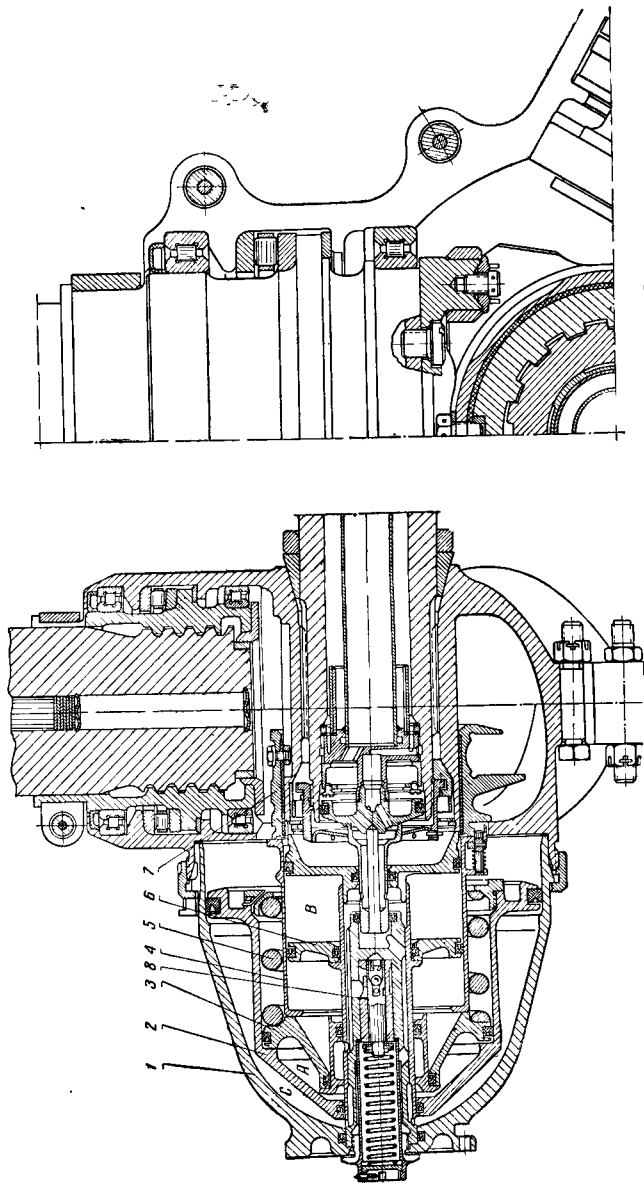
Несмотря на некоторое усложнение конструкции, одноканальные винты надежны в работе и хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации.

*Цилиндровая группа винта 1-го варианта* (фиг. 141), предназначенного для одноканальных двигателей, состоит из цилиндра 1, поршня рабочего диапазона 2, поршня флюгера 3, малого цилиндра 4, поршня вывода 6, пружины вытеснения 5 и золотникового механизма 8. Схема работы винта подобна изображенной на фиг. 42—45.

Размещение поршней в цилиндре образует три полости: С, А и В. В полость С поступает масло из регулятора при переходе лопастей с малого на большой шаг, при этом поршень 2 может перемещаться вправо до упора в стенку корпуса винта. Вместе с поршнем 2 перемещаются вправо поршни 3, 6, малый цилиндр 4 и траверса 7, которая через поводковые пальцы стаканов переводит лопасти на малый шаг. Так как этот винт обратной схемы, то переключение лопастей с большого на малый шаг производится под действием моментов от поперечных центробежных сил самих лопастей, при этом полость С цилиндра винта соединяется со сливом.

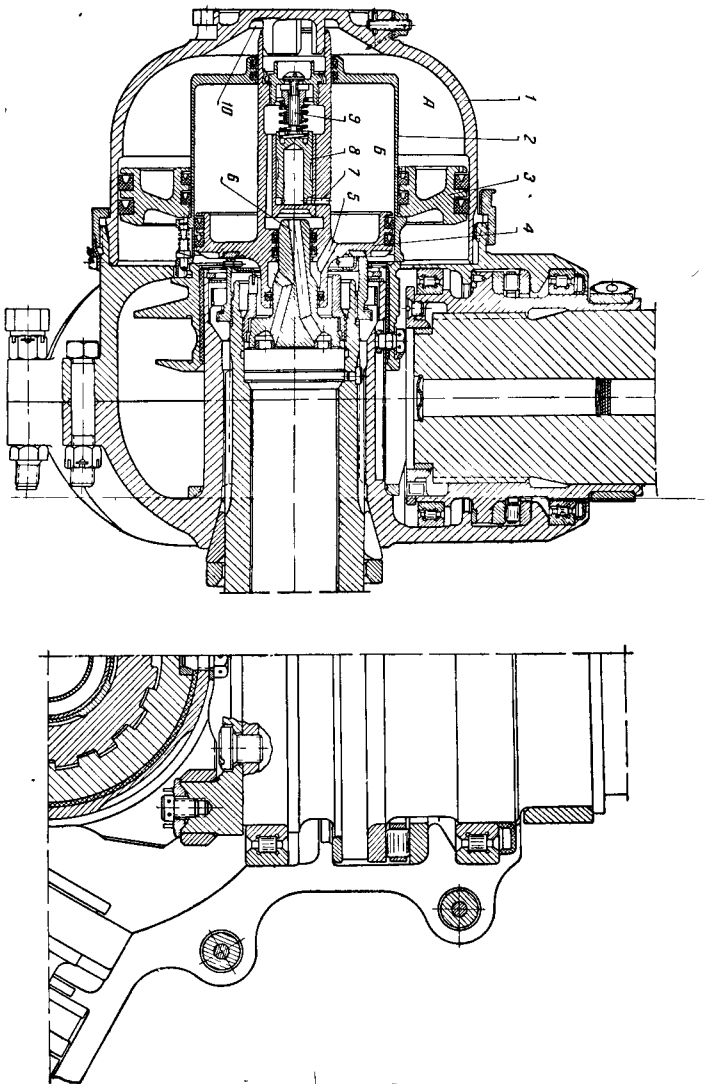
В полость А поступает масло повышенного давления из флюгерного маслососа для перевода лопастей винта во флюгерное положение. При работе винта в рабочем диапазоне эта полость закрыта золотником 8, вследствие чего масло из магистрали регулятора в нее не попадает.

При вводе лопастей во флюгерное положение под действием повышенного давления золотник перемещается и пропускает масло в полость А. Под действием давления масла поршень 3, сжимая пружину 5, перемещается вправо. Вместе с поршнем 3 перемещается вправо поршень 6, малый цилиндр 4 и траверса 7, которая через пальцы поводков переводит лопасти во флюгерное положение. Как только траверса доходит до упора в заднюю стенку корпуса, что соответствует флюгерному положению, регулятор давления выключает флюгерный маслосос, давление в полости А падает и под действием разжимающейся пружины 5 поршень 3 перемещается влево, вытесняя масло из полости А в картер двигателя. Таким образом благодаря перемещению поршня 3 в первоначальное положение создается возможность вывода лопастей из флюгерного положения, так как при подаче масла в полость В поршень вывода 6 свободно сможет перемещаться влево и выводить лопасти из флюгерного положения.



Фиг. 141. Трехлопастный флюгерный винт перекладного типа с одноканальной подволочкой.





Фиг. 142 Трехлопастный флюгерный нитя переходного типа с двухканальной подводкой.

*Цилиндровая группа винта 2-го варианта* (фиг. 142), предназначенного для двухканальных двигателей, конструктивно проще и имеет меньше деталей по сравнению с цилиндровой группой винта 1-го варианта. Это объясняется тем, что при наличии в двигателе двух каналов для подвода масла от регулятора к винту проще решается вопрос об обеспечении флюгерных свойств винта. При наличии двух каналов подача масла в цилиндр винта для перевода лопастей во флюгерное положение и для вывода лопастей из флюгерного положения производится по отдельным каналам за счет использования реверсивных свойств флюгерного насоса.

Цилиндровая группа винта 2-го варианта состоит из цилиндра 1, поршня рабочего диапазона 3, поршня флюгера 2 и неподвижного поршня 4. При таком размещении поршней в полость А поступает масло из регулятора постоянных чисел оборотов при переключении лопастей винта на большой шаг. В эту же полость поступает масло из флюгерного масляного насоса при переключении лопастей винта во флюгерное положение.

В полость Б поступает масло из регулятора постоянных чисел оборотов при переключении лопастей винта на малый шаг. В эту же полость поступает масло из флюгерного масляного насоса при выводе лопастей винта из флюгерного положения.

В этом винте имеется так называемый фиксатор шага, назначение которого заключается в том, чтобы при падении по каким-либо причинам давления в магистралях винта запереть эти магистрали и сделать винт фиксированным. Делается это для того, чтобы избежать раскрутки винта, если давление в винте упало из-за неисправности регулятора. Действительно, если давление в магистрали упадет, то лопасти винта под влиянием центробежных сил будут устанавливаться на малый шаг, отчего мощность, потребляемая винтом, уменьшится и двигатель будет развивать большее число оборотов, соответствующее забираемой винтом мощности.

Фиксатор шага представляет собой клапан 9, который прижимается к седлу пружинной. Этот клапан будет открыт только в том случае, если на его хвостовик действует давление масла, при падении давления масла клапан закрывается. Два канала 5 и 6 соединены соответственно с полостями Б и А, причем канал 6 соединен с полостью А через клапан фиксатора шага. Если в данный момент давление в винт подает канал 5, то давление масла через отверстие 7 передается на поршень 8, который и толкает клапан 9 на открытие, соединяя таким образом полость А через отверстие 10 с каналом 6, через который будет осуществляться слив масла. Если в данный момент давление в винт подает канал 6, то давление в нем масла передается непосредственно на клапан 10, открывает его и масло попадает в полость А.

Следовательно, если давление в обоих каналах упало ниже определенного предела, до которого отрегулирована пружина клапана, то проход масла из полости *A* на слив в канал *б* будет закрыт, лопасти винта будут зафиксированы и под влиянием центробежных сил они не смогут передвинуться на малый шаг.

### § 5. Аэромеханический винт

Этот винт предназначен для установки на самолетах с мало-мощными двигателями. Он является полностью автономным и автоматическим, не имеет никаких специальных деталей оборудования вроде регуляторов, но в то же время может поддерживать во время полета постоянное число оборотов двигателя.

В главе XV разобраны силы, действующие на вращающийся в полете винт, а в § 3 гл. XVI даны формулы, по которым можно подсчитать силы и моменты, действующие на лопасть при ее работе. Мы уже знаем, что в винтах прямой схемы имеются противовесы, которые при вращении винта и при соответствующем их расположении по отношению к лопастям стремятся установить лопасти на большой шаг, причем, так как на них действуют только центробежные силы, то момент, поворачивающий лопасти на большой шаг, не будет зависеть от скорости полета. С другой стороны, на лопасти винта действуют аэродинамические силы — тяга и силы сопротивления вращению, которые зависят от скорости вращения и скорости полета.

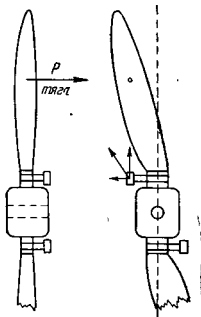
В обычных нормальных винтах, конструкцию которых мы рассматривали в данной части курса, ось вращения лопасти обычно совпадает с осью лопасти и поэтому момент относительно оси вращения лопасти, возникающий на лопастях от аэродинамических сил, как увидим в § 3 гл. XVI, обычно бывает невелик по сравнению с другими моментами, действующими на лопасть. Если же ось лопасти сместить относительно оси вращения лопасти так, чтобы относительно оси вращения лопасти возникал сравнительно большой момент от аэродинамических сил, то используя указанные свойства упомянутых моментов, можно сделать винт, который будет поддерживать постоянное число оборотов двигателя при постоянной мощности двигателя и разных скоростях полета. Для того чтобы винт правильно работал, следует так сместить лопасти по отношению к оси их поворота, чтобы при увеличении скорости полета углы установки лопасти увеличивались. В третьей части настоящего курса мы увидим, что при увеличении скорости аэродинамические силы на лопасти при одном и том же угле установки уменьшаются, следовательно, для того чтобы получить на лопастях момент от аэродинамических сил, увеличивающий угол установки лопастей при увеличении скорости полета, необходимо лопасти откидывать назад по их движению по отношению к оси их поворота. На фиг. 143 дана схема сил, переставляющих лопасти на тот или иной угол установки лопасти аэромеханического винта.

При установившемся движении винта сумма всех моментов относительно оси поворота лопасти должна быть равна нулю. При увеличении скорости полета момент от аэродинамических сил уменьшается, получается избыток момента противовеса (который зависит только от числа оборотов) и лопасти переставляются на больший шаг. Наоборот, при уменьшении скорости полета момент от аэродинамических сил увеличивается, получается избыток аэродинамического момента, который и переставляет лопасти на меньший шаг. Постоянные числа оборотов аэромеханического винта соответствуют определенной мощности двигателя и регулировке винта. При заданной установке число оборотов будет меняться с изменением мощности двигателя, т. е. с изменением положения дроссельной заслонки двигателя.

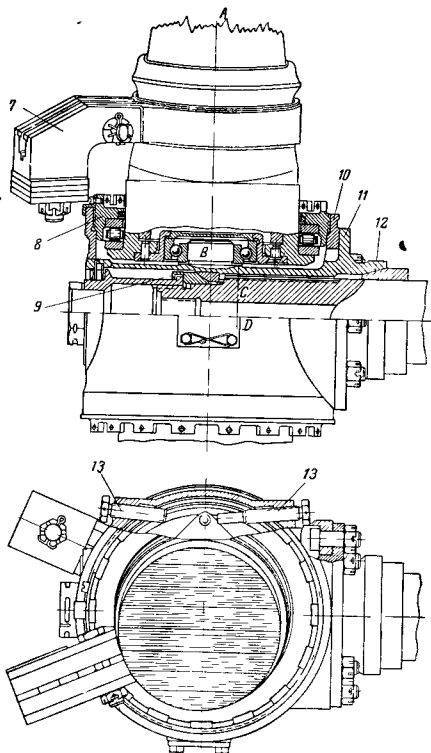
Механизм аэромеханического винта состоит из свободно вращающихся на подшипниках лопастей, оси которых скошены по отношению к оси поворота лопастей на угол в  $6^\circ$  (фиг. 144). Лопасти связаны между собой синхронизирующим устройством, на лопастях имеются противовесы.

Втулка винта состоит из корпуса втулки, ступицы, узлов переходного стакана, синхронизатора, подшипников, противовесов и мелких крепежных деталей. Ступица соединяется с корпусом шестью болтами, она имеет два штыря для установки радиально-упорного подшипника. Эти штыри через подшипник передают на лопасти крутящий момент двигателя. Лопасти винта деревянные, изготовленные из прессованной древесины. Комлевая часть лопасти имеет специальную коническую резьбу, с помощью которой она крепится с переходным стальным стаканом. Специальный цемент заполняет все зазоры между комлем и переходным стаканом. Переходный стакан имеет форму колена, ось которого наклонена к оси вращения стакана под углом  $6^\circ$ . Упорный роликовый подшипник воспринимает центробежную силу лопастей и изгибающий их момент. Лопасть со стаканом и подшипником закрепляется в корпусе втулки с помощью гайки.

Синхронизатор лопастей состоит из двуплечего рычага, качающегося на втулке. Стороны рычага связаны через поводковые шайбы с каждой лопастью, этим создается одновременный и одинаковый поворот обеих лопастей.

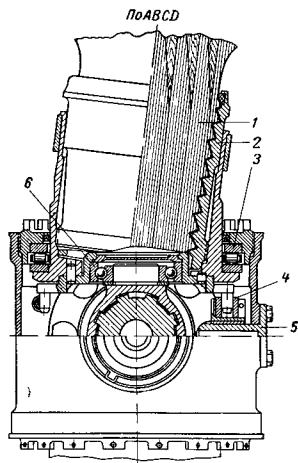


Фиг. 143. Схема действия аэромеханического винта.



Фиг 144 Аэромеха

1—лопасть 2—стакан лопасти 3—упорный роликовый подшипник, 4—синхрониза  
 воев, 8—гайка корпуса, 9—передний конус, 10—корпус; 11—шту



нический винт.

тор, 5—направляющая синхронизатора 6—радиально упорный подшипник; 7—противо-  
лиц, 12—задний конус, 13—упоры малого и большого шага

Упорами большого и малого шага служат два болта, расположенные на корпусе втулки и препятствующие повороту поводковой шайбы сверх установленных пределов.

Аэромеханический винт очень удобен для тренировочных самолетов — он прост по конструкции и удобен в управлении, так как в нем автоматически осуществляется соединение управления винтом и двигателем. О преимуществе такого управления сказано в § 7 гл. IV.

---

---

ЧАСТЬ III

**АЭРОДИНАМИКА ВИНТА**

---

*Глава VI*

**КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЗОР АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ  
ТЕОРИЙ ВИНТА**

Современные аэродинамические теории винта можно разделить на следующие пять групп.

1. *Теории винта, опирающиеся на общие теоремы механики.* Общие теоремы механики — о количестве движения и о моменте количества движения — могут быть приложены к струе, отбрасываемой винтом. Наиболее плодотворно их приложение для идеальной жидкости. К таким теориям относятся теории идеального пропеллера и идеального винта. Как увидим ниже, эти теории связывают лишь мощность и тягу с вызванными скоростями в струе винта и не могут связать геометрические размеры лопастей с вызванными ими скоростями в струе. Поэтому они не могут иметь конструктивного значения, т. е. по ним нельзя спроектировать винт. Однако и в таком виде имеется много практических приложений этих теорий, которые и будут указаны в главе VII.

2. *Теории, рассматривающие лопасть винта как крыло.* Эти теории объединяются под общим названием теории изолированного элемента лопасти. Как увидим в главе VIII, эти теории тоже не могут быть использованы при конструировании винтов и лишь дают некоторые общие предпосылки.

3. *Теории, соединяющие первые две.* К ним относится теория Сабинина—Юрьева, в которой вызванный винтом поток определяется, с одной стороны, по теории идеального винта, а с другой — по общему закону сопротивления крыла. Этим устанавливается связь потока с размерами и формой лопасти.

4. *Вихревые теории винта.* К ним в первую очередь относится вихревая теория Н. Е. Жуковского. В этой теории, так же как и в теории Сабинина—Юрьева, устанавливается связь потока с лопастью, но в противоположность этой последней теории поток определяется из основной теоремы аэродинамики — теоремы Жуковского о подъемной силе.



Обобщением вихревой теории Н. Е. Жуковского являются относительные вихревые теории, или, как их еще называют, лопастные теории. В последних вихревое поле около винта рассматривается вызванным отдельными лопастями в относительном движении, в противоположность теории Н. Е. Жуковского, в которой вихревое поле и соответственно скоростное поле вокруг винта рассматривается в абсолютном движении. Однако в большинстве случаев приближение Н. Е. Жуковского дает на практике достаточную точность, почему эта теория и получила такое большое распространение.

5. *Теории подобия в приложении к винтам.* Задача ставится так: если при испытании на малых скоростях потока малой модели винта получены аэродинамические характеристики данного типа винта, то как получить аэродинамические характеристики подобного ему по геометрическим размерам большего винта, увеличенного (по масштабу) в несколько раз при скорости потока большей, чем та, при которой производилось испытание модели. Сюда же относится задача об определении аэродинамической характеристики винта, у которого увеличены число или ширина лопастей.

Из сказанного следует, что первые две группы теорий винта могут служить лишь для некоторых общих исследований его и иметь практическое приложение для некоторых частных задач. Две следующие группы служат для проектирования новых винтов и проведения более глубоких исследований его работы. Наконец последняя группа, основанная на данных модельных испытаний уже построенных винтов, может служить как для проверки аэродинамических характеристик винтов, построенных на основании двух предыдущих групп теорий, так и для подбора винтов под различные задания.

## Глава VII

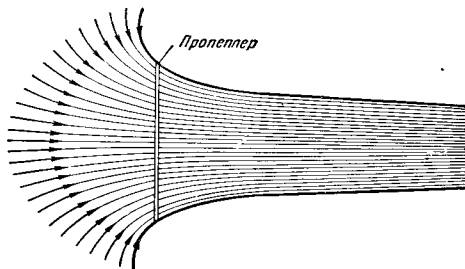
### ТЕОРИИ ИДЕАЛЬНОГО ПРОПЕЛЛЕРА И ВИНТА

#### § 1. Теория идеального пропеллера

Под словом «пропеллер» мы будем подразумевать какой-то аппарат, конструкция которого не предопределяется, но который обладает свойством прогонять воздух сквозь свой диск, называемый плоскостью пропеллера. Идеальным пропеллером мы будем называть пропеллер, действующий в идеальной, т. е. невязкой, жидкости, сквозь диск которого в осевом направлении проходит воздух с одинаковой скоростью по всей площади диска. Таким образом в идеальном пропеллере потери от трения будут отсутствовать.

Предположим, что идеальный пропеллер работает на месте; тогда за своим диском, считая по направлению движения воздуха, он должен создавать струю, которая будет обладать опре-

деленным запасом кинетической энергии, сохраняя ее до бесконечности вследствие отсутствия потерь на трение. Спереди к диску пропеллера частицы воздуха должны подходить не только по направлению, совпадающему с направлением отходящей струи, но и по другим направлениям, т. е. должны также двигаться по изогнутым траекториям (фиг. 145). Вследствие этого элементарные струйки будут подходить к диску пропеллера, обладая некоторой центробежной силой, которая и будет поджимать струю пропеллера не только в плоскости диска, но и на некотором расстоянии в струе за диском пропеллера.

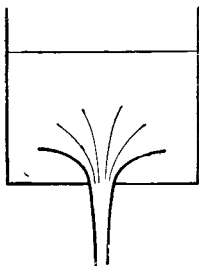


Фиг. 145 Струя идеального пропеллера при работе его на месте.

Возьмем теперь другой крайний случай, когда пропеллер движется в воздухе с такой же скоростью, с какой он прогоняет его сквозь свой диск. Очевидно, что струя, проходящая через диск пропеллера, будет и перед и за пропеллером одинаково цилиндрической с диаметром, равным диаметру диска пропеллера. Следовательно, при рассмотрении движения струи в промежуточных условиях между рассмотренными крайними — когда пропеллер отбрасывает струю со скоростью своего движения и при работе его «на месте» — мы получим, что вперед от пропеллера струя будет расширяться, а за пропеллером сжиматься. Физически струя идеального пропеллера, работающего «на месте», до известной степени аналогична струе идеальной тяжелой жидкости, вытекающей из отверстия внизу сосуда (фиг. 146).

Рассмотрим движение воздуха в струе пропеллера. Перед пропеллером воздух движется по направлению к нему, следовательно, по мере приближения к пропеллеру давление в струе должно уменьшаться; а так как далеко впереди давление равно окружающему — атмосферному, то перед пропеллером должно быть давление, пониженное против атмосферного. При проходе через диск пропеллера давление в струе должно сразу возрасти,

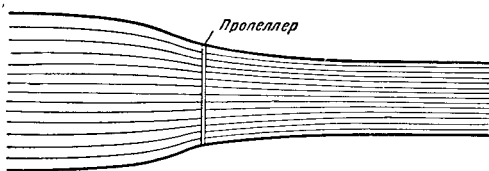
так как разность давлений перед и за пропеллером, отнесенная к его диску, дает тягу, направленную против движения воздуха в струе. Давление за пропеллером, возросшее по сравнению с окружающим, должно постепенно сравняться с окружающим.



Фиг. 146. Струя идеального пропеллера, работающего на месте, подобна струе жидкости, вытекающей из отверстия в сосуде.

При работе пропеллера пониженное давление в струе перед ним и повышенное за ним должны быть уравновешены какими-то силами, так как вне струи давление атмосферное; этими силами являются центробежные силы, которые и определяют диаметр струи перед и за пропеллером. Перед пропеллером центробежные силы направлены от струи, а за ним, наоборот, внутрь струи. Таким образом, исходя из указанных соображений, струя идеального пропеллера при работе его «на скорости» и на месте представляется так, как это показано на фиг. 145 и 147. Далеко перед пропеллером струя не «возмущена» и ее скорость равна скорости движения пропеллера по отношению к неподвижному воздуху. С приближением к пропеллеру скорость в струе увеличивается

и при проходе через диск пропеллера достигает максимального значения за пропеллером в том месте, где получается наибольшее сжатие, оставаясь такой во всей струе за пропеллером. Обозначим скорость в струе далеко перед пропеллером через  $V_0$ , а скорость в струе далеко за пропеллером через  $V_2$ . Соответ-



Фиг. 147. Струя идеального пропеллера при его движении

ственно обозначим площади струн через  $F_0$  и  $F_2$ . Скорость  $V_2$ , вообще говоря, отлична от  $V_0$ , следовательно, приращение скорости в струе  $v_2 = V_2 - V_0$  вызвал пропеллер, поэтому она называется *вызванной пропеллером скоростью*. Мы можем применить к потоку около идеального пропеллера общие теоремы механики о живых силах и о количестве движения. Ввиду того что в струе пропеллера скорость за ним получилась больше, чем перед ним,

кинетическая энергия струи увеличилась, и, следовательно, эту энергию передал струе пропеллер, так как других источников энергии в струе нет. Поэтому следует говорить о мощности пропеллера, которую он передает струе. С другой стороны, создание в струе количества движения предопределяет наличие силы пропеллера, которую можно назвать силой тяги пропеллера. Между выходящими пропеллером скоростями в струе и между мощностью его и силой тяги должна существовать определенная зависимость. Эту зависимость мы сейчас и найдем. Мы нашли, что

$$V_2 = V_0 + v_2. \quad (30)$$

Приложим к массе воздуха, ограниченной поверхностью струн и этими двумя плоскостями, теорему Эйлера о количестве движения. Теорема Эйлера читается так<sup>1</sup>: «изменение за единицу времени проекций количества движения жидкости, входящей и выходящей через данную поверхность, охватывающую некоторый объем жидкости, равняется силе воздействия жидкости на то тело, которое находится в данном объеме».

Так как мы предполагаем, что через боковую поверхность струи жидкость не протекает, то следует проекцию количества движения взять только в осевом направлении; с другой стороны, мы предположили, что на боковой поверхности струи все силы уравновешиваются и не дают проекций, следовательно, сила воздействия на тело, в данном случае на пропеллер, будет только осевой силой; эта сила и будет силой тяги. Таким образом сила тяги идеального пропеллера

$$P = mV_2 - mV_0 = mv_2, \quad (31)$$

где  $m$  — секундная масса воздуха, протекающая через сечение струи.

Применим теперь к той же струе теорему о живых силах: секундное изменение живой силы равно мощности, затраченной на создание приращения скорости. Обозначим мощность идеального пропеллера через  $T$ , тогда

$$T = \frac{m}{2} (V_2^2 - V_0^2). \quad (32)$$

Подставляя вместо  $V_2$  его выражение по (30), получим

$$T = \frac{m}{2} (2V_0v_2 + v_2^2), \quad (33)$$

или

$$T = mv_2V_0 + m \frac{v_2^2}{2}. \quad (34)$$

<sup>1</sup> См. В. Л. Александров. Техническая гидромеханика. М., 1946. Издание 3-е, стр. 121.

Пользуясь выражением (31), получим

$$T = PV_0 + \frac{1}{2} m v_2^2 \quad (35)$$

Первый член — произведение тяги на скорость движения пропеллера — можно назвать полезной мощностью, ибо сила тяги  $P$  в этом случае производит полезную работу — она двигает с определенной скоростью  $V_0$  пропеллер.

Второй член представляет собой некоторую живую силу, соответствующую увеличению скорости в струе за пропеллером. Эта мощность является потерянной и ее нельзя превратить в полезную. Действительно, если  $v_2 = 0$ , то по формуле (31) и  $P = 0$ , а отсюда по формуле (35) и  $T = 0$ , т. е. мы не будем иметь никакой полезной мощности. Из уравнений (31) и (34) видно, что  $v_2$  входит в выражение тяги и в выражение мощности. В выражении тяги она является полезной величиной, ибо она увеличивает тягу, а в выражении мощности она является вредной величиной, так как увеличивает затрачиваемую мощность. Насколько выгодно используется затраченная мощность, показывает отношение полезной мощности к затраченной, т. е. то, что называется коэффициентом полезного действия (будем его сокращенно называть к. п. д.) данного аппарата. Найдем к. п. д. идеального пропеллера. Полезная мощность равна

$$PV_0 = m v_2 V_0,$$

а затраченная мощность

$$T = m v_2 V_0 + \frac{m v_2^2}{2}.$$

Их отношение (к. п. д.) будет

$$\eta = \frac{PV_0}{T} = \frac{V_0}{V_0 + \frac{v_2}{2}} \quad (36)$$

Как видим, к. п. д. никогда не может быть равен единице, ибо в этом случае  $v_2$  должно равняться нулю, а тогда по формуле (31) сила тяги  $P$  обращается в нуль и пропеллер не может служить аппаратом, создающим тягу, т. е. он теряет свой смысл. С другой стороны, к. п. д. равен нулю, когда скорость движения пропеллера равна нулю, т. е. при работе его «на месте». В этом случае он не производит никакой полезной для самолета работы, в том смысле, как мы эту полезную работу определили. Вообще же говоря, пропеллер с другой точки зрения и «на месте» может производить полезную работу, например, гнать воздух и работать как вентилятор, но это уже другое применение пропеллера.

Таким образом и в идеальном пропеллере есть потери, обусловленные самой сущностью его работы. Физическая сущность этих необходимых потерь заключается в том, что в пропеллере мы получаем тягу созданием количества движения в ограниченной струе, причем для того, чтобы непрерывно получать эту тягу, надо непрерывно создавать количество движения, т. е. чтобы все новые количества воздуха проходили в струе. Для того чтобы это делать, нужно, чтобы пришедшим новым массам воздуха уступали место прошедшие, а это и обуславливает необходимость обязательной скорости воздуха в отходящей струе. Следовательно, потери в отходящей струе  $m \frac{v_2^2}{2}$  являются необходимыми при работе пропеллера, а потому и у идеального пропеллера к. п. д. всегда будет меньше единицы. Если же существуют еще другие потери, то к. п. д. будет еще меньше.

Таким образом *мощность, потребляемая идеальным пропеллером, складывается из полезной мощности и потерянной мощности в отходящей струе.*

В плоскости идеального пропеллера только одна центральная элементарная струйка перпендикулярна плоскости пропеллера, остальные струйки, как мы видели, имеют направление внутрь — к центру. Направление скоростей в этих струйках мы можем разложить на осевое и радиальное направления; последнее и дает сжатие струн пропеллера. Мы предположили, что осевые скорости одинаковы по всему диску пропеллера. Обозначим осевую составляющую в плоскости пропеллера через  $V_1$ . Тяга пропеллера приложена к его диску, следовательно, мощность, затрачиваемая на работу пропеллера, т. е. на полезную работу и создание скорости в отходящей струе, может быть выражена не только по теореме живых сил, но еще и произведением силы тяги на скорость воздуха в плоскости пропеллера, т. е.

$$T = PV_1. \quad (37)$$

Сравнивая теперь это выражение мощности с выражением (35) и обозначая  $V_1 - V_0 = v_1$ , причем  $v_1$  — вызванная в плоскости пропеллера скорость, получим

$$PV_1 = PV_0 + \frac{mv_2^2}{2}; \quad Pv_1 = \frac{Pv_2}{2},$$

откуда

$$v_1 = \frac{v_2}{2}, \quad (38)$$

что дает возможность сформулировать следующую теорему: *вызванная идеальным пропеллером скорость в его плоскости вдвое меньше полной вызванной скорости далеко за пропеллером.*

К. п. д. идеального пропеллера получит вид

$$\eta = \frac{PV_0}{T} = \frac{PV_0}{PV_1} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{V_0}{V_1}, \quad (39)$$

т. е. к. п. д. идеального пропеллера равен отношению скорости потока далеко перед пропеллером к скорости потока в плоскости пропеллера.

Так как

$$V_1 = V_0 + v_1 = V_0 + \frac{v_2}{2} = \frac{V_0 + V_0 + v_2}{2},$$

то

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2}. \quad (40)$$

и, следовательно, скорость в плоскости идеального пропеллера выражается как полусумма скоростей потока далеко перед и далеко за пропеллером.

Найдем теперь связь между скоростями потока струи в плоскости пропеллера и далеко за пропеллером, с одной стороны, и тягой пропеллера — с другой. Секундная масса воздуха, проходящая через сечение струи пропеллера, может быть выражена так:

$$m = FV_1 \rho,$$

где  $F$  — площадь диска пропеллера,  $\rho$  — плотность воздуха. Тогда по формуле (31)

$$\begin{aligned} P &= F\rho V_1 v_2 = \left(V_0 + \frac{v_2}{2}\right) v_2 F\rho = \left(V_0 + \frac{V_2 - V_0}{2}\right) (V_2 - V_0) F\rho = \\ &= \frac{1}{2} (V_0 + V_2) (V_2 - V_0) F\rho \end{aligned}$$

или

$$P = \frac{1}{2} (V_2^2 - V_0^2) F\rho. \quad (41)$$

Отсюда скорость далеко за пропеллером будет

$$V_2 = \sqrt{\frac{2P}{F\rho} + V_0^2} = V_0 \sqrt{\frac{P}{F\rho \frac{V_0^2}{2}} + 1}.$$

Проф. В. П. Ветчинкин ввел обозначение

$$B = \frac{P}{F\rho \frac{V_0^2}{2}} \quad (42)$$

и этот коэффициент  $B$  назвал коэффициентом нагрузки на оме-таемую пропеллером площадь. В функции этого коэффициента можно выразить все скорости потока и к. п. д. Действительно, получим

$$V_2 = V_0 \sqrt{1+B}. \quad (43)$$

Подставляя это значение  $V_2$  в формулу (40), получим

$$V_1 = \frac{V_0}{2} (1 + \sqrt{1+B}). \quad (44)$$

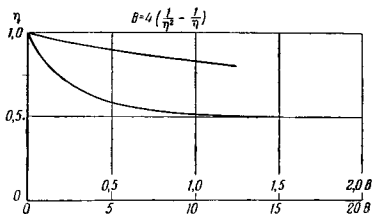
Вставляя же значение  $V_1$  в выражение к. п. д. (39), получим

$$\eta = \frac{2}{1 + \sqrt{1+B}}. \quad (45)$$

Из уравнений (43) и (44) получим

$$\frac{V_2}{V_0} = \sqrt{1+B}; \quad (46)$$

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{1+B}). \quad (47)$$

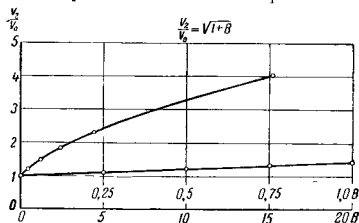


Фиг. 148. Зависимость коэффициента полезного действия идеального пропеллера от коэффициента нагрузки  $B$ . Верхняя кривая относится к верхнему масштабу  $B$ , а нижняя — к нижнему

На фиг. 148—150 даны кривые зависимостей, выраженных формулами (45), (46) и (47). Отношение скоростей  $V_1$  и  $V_2$  к скорости набегающего потока  $V_0$  увеличивается с увеличением нагрузки  $B$ , причем при  $B=0$ , т. е. когда тяги совсем нет, обе эти скорости становятся равными  $V_0$ . К. п. д.  $\eta$  увеличивается с уменьшением нагрузки  $B$ ; при  $B=0$  он становится равным единице; но в этом случае тяга обращается в нуль и пропеллер как двигатель теряет свой смысл.



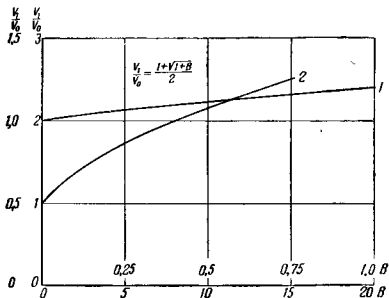
При различных расчетах и исследованиях обычно чаще приходится иметь дело не с тягой пропеллера, а с его мощностью, поэтому более интересны зависимости скоростей потока и к. п. д.



Фиг. 149. Зависимость скорости в струе далеко за идеальным пропеллером от коэффициента нагрузки  $B$ . Верхняя кривая относится к нижнему масштабу  $B$ , а нижняя — к верхнему.

от мощности пропеллера. Назовем коэффициентом мощности пропеллера величину

$$A = \frac{T}{F\rho \frac{V_0^3}{2}} \quad (48)$$



Фиг. 150. Зависимость скорости в плоскости идеального пропеллера от коэффициента нагрузки  $B$ . Кривая 1 относится к левому масштабу  $\frac{V_1}{V_0}$  и к верхнему масштабу  $B$ ; кривая 2 относится к правому масштабу  $\frac{V_1}{V_0}$  и к нижнему масштабу  $B$ .

Согласно обозначению (42) можно также написать

$$A = \frac{B}{\eta}. \quad (49)$$

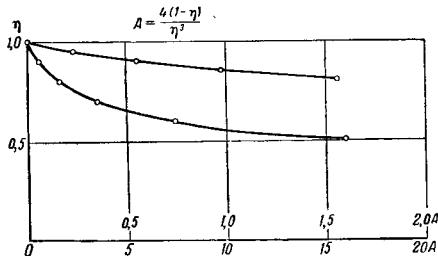
Подставляя в (45) вместо  $B$  его значения по (49), получим уравнение третьей степени относительно  $\eta$ :

$$\eta^3 + \frac{4}{A}\eta - \frac{4}{A} = 0$$

или

$$A = \frac{4(1-\eta)}{\eta^3}. \quad (50)$$

На фиг. 151 дана кривая  $\eta$  по  $A$ .



Фиг. 151. Зависимость коэффициента полезного действия идеального пропеллера от коэффициента мощности  $A$ . Верхняя кривая относится к верхнему масштабу  $A$ , а нижняя кривая — к нижнему.

Для нахождения связи между мощностью и скоростью потока  $V_2$  за идеальным пропеллером вставим вместо  $B$  в формуле (46) его значение через  $A$  по (49):

$$\frac{V_2}{V_0} = \sqrt{1 + A\eta}.$$

Для упрощения написания формул введем обозначение

$$\frac{V_2}{V_0} = x;$$

тогда

$$x^2 = 1 + A\eta$$

или, подставляя вместо  $\eta$  его значение через  $x$ :

$$\eta = \frac{V_0}{V_1} = \frac{2V_0}{V_0 + V_2} = \frac{2}{1+x},$$

получим

$$x^3 + x^2 - x - 1 = 2A$$

или

$$A = \frac{x^3 + x^2 - x - 1}{2}. \quad (51)$$

Рассмотрим работу идеального пропеллера «на месте». В этом случае поступательная скорость  $V_0=0$ , а скорости в плоскости диска пропеллера и далеко за пропеллером равны соответственно  $v_1$  и  $v_2$ . Тяга на месте пропеллера  $P_0$  согласно формуле (31) будет

$$P_0 = v_1 F \rho v_2 = \frac{F \rho v_2^2}{2}; \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{P_0}{T} = \frac{2}{v_2}}$$

тогда

$$P_0 = \frac{\pi D^2}{8} \rho v_2^2, \quad (52)$$

причем  $F = \frac{\pi D^2}{4}$ , где  $D$  — диаметр диска пропеллера, а мощность согласно формуле (37).

$$T = \frac{F \rho}{4} v_2^3 = \frac{\pi D^2}{16} \rho v_2^3. \quad (53)$$

Из последней формулы можно получить и скорость далеко за пропеллером в зависимости от мощности  $N$ , выраженной в л. с.:

$$v_2 = 14,5 \sqrt[3]{\frac{N}{D^2}}. \quad (54)$$

Рассмотрим распределение давления в струе идеального пропеллера (фиг. 152). Для этого применим теорему Бернулли к струе пропеллера сначала в сечении 1 — далеко перед пропеллером, а скорость  $V_0$ , а 2 — непосредственно перед пропеллером, где скорость в струе весьма близка к  $V_1$ , а давление равно  $p'$ . Будем предполагать, что в струе плотность воздуха  $\rho$  всюду постоянна. Получим

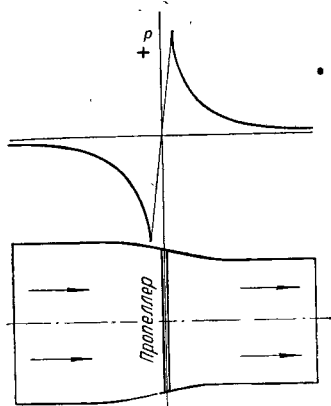
$$p_0 + \rho \frac{V_0^2}{2} = p' + \rho \frac{V_1^2}{2},$$

отсюда

$$p' = p_0 - \frac{\rho}{2} (V_1^2 - V_0^2). \quad (55)$$

Приложим теперь уравнение Бернулли к сечению 3 — непосредственно за пропеллером, где скорость потока  $V_1$  и давление  $p''$ , и 4, где скорость потока  $V_2$ , а давление уже сравнялось с атмосферным  $p_0$ :

$$p'' + \rho \frac{V_1^2}{2} = p_0 + \rho \frac{V_2^2}{2}.$$



Фиг. 152. Распределение давления в струе идеального пропеллера.

В обоих случаях мы предполагали, что там, где струя цилиндрическая, в струе устанавливается атмосферное давление  $p_0$ . Из последнего уравнения получим

$$p'' = p_0 + \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2). \quad (56)$$

Таким образом давление при переходе через диск пропеллера меняется скачком:

$$\Delta p = p'' - p' = \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_0^2), \quad (57)$$

или, подставляя сюда выражения (30) и (38),

$$\Delta p = 2\rho V_1 v_1.$$

Тяга пропеллера определится как произведение перепада давления  $\Delta p$  на площадь диска пропеллера:

$$P = \Delta p F = 2\rho F V_1 v_1 = \rho F V_1 v_2,$$

т. е. получаем то же выражение (31); отсюда

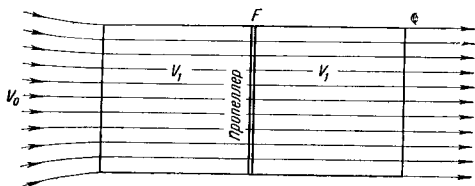
$$\Delta p = \frac{P}{F}$$

или

$$P = F \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - V_0^2),$$

что мы уже имели [формула (41)].

Для того чтобы судить, как велико давление в струе пропеллера, возьмем пример. Пусть тяга пропеллера равна 2000 кг, а его диаметр 5 м; тогда  $F = 19,6 \text{ м}^2$  и  $\Delta p \approx 100 \text{ кг/м}^2$ , т. е. соответствует 10 см водяного столба.



Фиг. 153. Идеальный пропеллер, заключенный в трубу.

Рассмотрим работу идеального пропеллера, заключенного в трубу (фиг. 153), с которой он движется со скоростью  $V_0$ . Пусть скорость в трубе  $V_1$ , а приращение скорости  $v_1 = V_1 - V_0$ . Секундная масса воздуха, проходящая через трубу, будет  $m = \rho F V_1$ , а приращение количества движения согласно теореме Эйлера будет равно тяге:

$$P = m v_1 = \rho F V_1 (V_1 - V_0).$$

Полезная мощность будет

$$P V_0 = \rho F V_1 V_0 (V_1 - V_0),$$

а живая сила отходящей струи

$$\frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} \rho F V_1 (V_1 - V_0)^2.$$

Полная мощность, как мы видели, сложится из полезной мощности и потерянной мощности, ушедшей в отходящей струе. Таким образом полная мощность будет

$$T = PV_0 + \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} \rho F V_1 (V_1^2 - V_0^2).$$

Коэффициент полезного действия идеального пропеллера, заключенного в трубу, будет

$$\eta_r = \frac{PV_0}{T} = \frac{2V_0}{V_1 + V_0}. \quad (58)$$

Для свободного пропеллера к. п. д. выражается формулой (39). Для сравнения разделим полученное значение (58) на (39):

$$\frac{\eta_r}{\eta} = \frac{2V_1}{V_1 + V_0} > 1,$$

так как  $V_0$  всегда меньше  $V_1$ . Таким образом к. п. д. пропеллера в трубе больше, чем для свободного пропеллера. Как видно из последней формулы, эта разница тем больше, чем больше разница между  $V_1$  и  $V_0$ . Следовательно, на малых скоростях выигрыш от применения трубы больше, чем на больших. Поэтому нет смысла применять громоздкое сооружение в виде трубы или кольца на самолете, тогда как на глиссерах и аэросанях, у которых скорости сравнительно невелики, применение кольца на воздушном винте может представить некоторую выгоду, к тому же кольцо может служить и ограждением винта.

Посмотрим, каким получается сжатие струн пропеллера. По уравнению расхода для сечения струи далеко перед и далеко за пропеллером получаем

$$V_0 F_0 = V_2 F_2.$$

Сжатие струи мы будем характеризовать отношением площадей; тогда полное сжатие струи будет

$$\frac{F_0}{F_2} = \frac{V_2}{V_0}$$

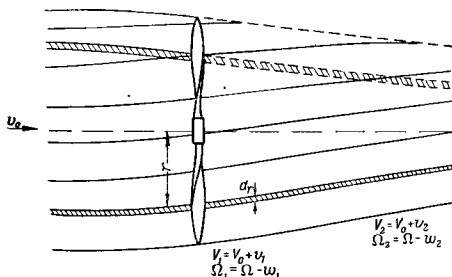
или по формуле (46)

$$\frac{F_0}{F_2} = \sqrt{1+B}.$$

Таким образом сжатие струи зависит от коэффициента нагрузки  $B$ . Сжатия совсем не будет, когда  $B=0$ , т. е. тяга равна нулю, и, наоборот, сжатие будет наибольшим, когда  $B$  наибольшее, а это бывает при работе пропеллера на месте.

## § 2. Теория идеального винта

В теории идеального пропеллера мы предполагали, что имеется только постоянная по всему сечению струи осевая скорость, которая складывается из скорости движения и вызванной пропеллером скорости. Предположим, что в струе такого идеального пропеллера имеется еще некоторая окружная вызванная скорость. Такую окружную скорость вызывает винт, и поэтому такой идеальный пропеллер мы назовем *идеальным винтом*. Итак, в теории идеального винта мы предполагаем, что воздух есть идеальная среда без вязкости и что в струе такого винта имеются вызванные винтом постоянная по всему сечению струи осевая



Фиг. 154. Элементарная кольцевая струя идеального винта.

скорость и изменяющаяся прямо пропорционально радиусу окружная скорость. Последнее предположение аналогично тому, что мы принимаем вращающуюся в струе массу воздуха как твердое тело.

Рассмотрим кольцевой элемент струи на радиусе  $r$  и толщиной  $dr$ . Обозначим вызванную винтом угловую скорость далеко за винтом через  $\omega_2$ , а в плоскости винта — через  $\omega_1$  (фиг. 154). Так как винт закручивает струю, то по отношению к струе винт будет вращаться не со скоростью  $\Omega$ , а со скоростью  $\Omega - \omega_1$ . В теории идеального пропеллера мы получили, что мощность пропеллера идет на создание, во-первых, полезной мощности  $PV_0$  и, во-вторых, на создание живой силы отходящей струи  $m \frac{v_2^2}{2}$ .

В идеальном винте вследствие вращения струи расходование мощности идет еще на создание живой силы закрученной отходящей струи. Если  $dM$  — момент вращения кольцевого элемента,  $dP$  — элемент тяги и  $dm$  — секундная масса воздуха, проходящая через кольцевой элемент струи винта, то мощность  $dT$ ,

потребляемая кольцевым элементом струи идеального винта, будет выражаться так:

$$dT = dM\Omega = dPV_0 + dm \frac{v_2^2}{2} + dm \frac{\omega_2^2 r^2}{2}. \quad (59)$$

Здесь первый член — полезная мощность кольцевого элемента, второй — живая сила осевой составляющей кольцевого элемента отходящей струи и третий — живая сила окружной составляющей элемента струи. Так как  $dmr^2$  есть момент инерции кольцевого элемента струи относительно ее оси, отнесенный к секундной массе воздуха, который обозначим  $dJ$ , а элементарная мощность, затрачиваемая на закрутку струи в плоскости винта, равна  $dM\omega_1$ , то

$$dM\omega_1 = dJ \frac{\omega_2^2}{2}. \quad (60)$$

Согласно теореме о моменте количества движения момент в струе винта равен приращению момента количества движения, т. е.

$$dM = dm \Delta\omega r^2 = dJ \Delta\omega.$$

Так как в нашем случае  $\Delta\omega = \omega_2$ , ибо спереди винта закрутки струи нет, то момент, затраченный на закрутку элемента струи, будет

$$dM = dJ\omega_2. \quad (61)$$

Таким образом, принимая во внимание равенство (60), получим

$$dJ \frac{\omega_2^2}{2\omega_1} = dJ\omega_2,$$

откуда

$$\frac{\omega_2}{2} = \omega_1, \quad (62)$$

т. е. мы получаем теорему, подобную теореме о соотношении вызванных осевых скоростей: *вызванная идеальным винтом угловая скорость в плоскости винта равна половине вызванной угловой скорости далеко за винтом.* Согласно уравнению (31) формула (59) примет такой вид:

$$dT = dM\Omega = dPV_0 + dP \frac{v_2}{2} + dJ \frac{\omega_2^2}{2}, \quad (63)$$

или иначе

$$dT = dP \left( V_0 + \frac{v_2}{2} \right) + dJ \frac{\omega_2^2}{2}. \quad (64)$$



Интегрируя вдоль радиуса, получим для всего винта

$$T = M\Omega = P\left(V_0 + \frac{v_2}{2}\right) + J\frac{\omega_2^2}{2} \quad (65)$$

или

$$T = M\Omega = PV_1 + J\frac{\omega_2^2}{2}, \quad (66)$$

где  $J$  — момент инерции относительно оси винта массы воздуха, проходящей через винт в единицу времени. Так как, интегрируя уравнения (61), получаем

$$M = J\omega_2, \quad (67)$$

то

$$M\Omega = PV_1 + M\frac{\omega_2}{2}. \quad (68)$$

Отсюда

$$M\left(\Omega - \frac{\omega_2}{2}\right) = PV_1$$

или согласно (62)

$$M(\Omega - \omega_1) = PV_1. \quad (69)$$

Тогда отношение тяги к моменту идеального винта будет

$$\frac{P}{M} = \frac{\Omega - \omega_1}{V_1}, \quad (70)$$

а так как к. п. д. идеального винта определяется формулой

$$\eta_{\text{ид. в}} = \frac{PV_0}{M\Omega},$$

то

$$\eta_{\text{ид. в}} = \frac{\Omega - \omega_1}{V_1} \frac{V_0}{\Omega} = \frac{V_0}{V_1} \frac{\Omega - \omega_1}{\Omega}. \quad (71)$$

К. п. д. идеального пропеллера выражается формулой (39); мы его можем назвать осевым к. п. д. и обозначим  $\eta_{\text{ос}}$ , тогда вполне естественно величину  $\frac{\Omega - \omega_1}{\Omega}$  назвать окружным к. п. д. и обозначить  $\eta_{\text{окр}}$ :

$$\eta_{\text{окр}} = \frac{\Omega - \omega_1}{\Omega}. \quad (72)$$

Таким образом к. п. д. идеального винта  $\eta_{\text{ид. в}}$  может быть выражен так:

$$\eta_{\text{ид. в}} = \eta_{\text{ос}} \eta_{\text{окр}} \quad (73)$$

Подставим в уравнение (66) вместо  $M$  его выражение (67) и вместо  $\omega_2$  по (62)

$$2\omega_1 \Omega J = P V_1 + 2\omega_1^2 J,$$

причем, так как  $dm = 2\pi r V_1 \rho dr$ , то

$$\begin{aligned} J &= \int_0^R r^2 dm = 2\pi \rho V_1 \int_0^R r^3 dr = \frac{1}{2} \pi \rho V_1 R^4 = \\ &= \frac{1}{32} \pi \rho V_1 D^4 = \frac{1}{8} F \rho V_1 D^2. \end{aligned} \quad (74)$$

Подставив первое значение формулы (74), получим

$$\pi \rho \omega_1^2 R^4 - \pi \rho \omega_1 \Omega R^4 + P = 0.$$

Отсюда

$$P = \pi \rho \omega_1 R^4 (\Omega - \omega_1). \quad (75)$$

Однако тяга идеального винта и пропеллера обусловлена наличием осевой скорости. Окружная скорость, перпендикулярная осевой, никакой проекции на ось винта дать не может; поэтому

$$P = m v_2 = F \rho V_1 v_2.$$

С другой стороны, тяга идеального винта выражается формулой (75), следовательно,

$$F \rho V_1 v_2 = \pi \rho \omega_1 R^4 (\Omega - \omega_1).$$

Отсюда получаем связь между осевой и окружной скоростью идеального винта

$$V_1 v_2 = \frac{D^2}{4} \omega_1 (\Omega - \omega_1). \quad (76)$$

Из формулы (75) получаем

$$\omega_1^2 - \omega_1 \Omega + \frac{P}{\pi \rho R^4} = 0.$$

Если подставить сюда  $P$  по формуле (42), то

$$\omega_1^2 - \omega_1 \Omega + \frac{B V_0^2}{2 R^2} = 0.$$

Отсюда получаем выражение для вызванной угловой скорости идеального винта

$$\omega_1 = \frac{\Omega}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{8 B V_0^2}{D^2 \Omega^2}} \right), \quad (77)$$

или, так как  $B = A\eta_{\text{ид. в}}$  и  $\Omega = 2\pi n_s$ ,

$$\omega_1 = \pi n_s \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2A}{\pi^2} \frac{V_0^2}{n_s^2 D^2} \eta_{\text{ид. в}}} \right) \quad (78)$$

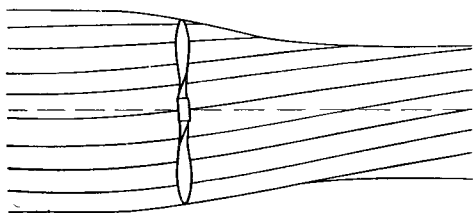
или через относительную поступь  $\lambda$

$$\omega_1 = \pi n_s \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2A}{\pi^2} \lambda^2 \eta_{\text{ид. в}}} \right). \quad (79)$$

Исходя из равенства (78) можно найти вызванную винтом окружную скорость  $u$  на радиусе  $r$ , подставив вместо  $A$  его выражение (48) через  $T = 75 N$ :

$$A = \frac{600N}{\pi \rho D^2 V_0^3};$$

$$u = \pi n_s r \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{1200N \eta_{\text{ид. в}}}{\pi^3 \rho n_s^2 D^4 V_0}} \right). \quad (80)$$



Фиг. 155. Струя идеального винта

Таким образом мы можем струю идеального винта представить в виде, данном на фиг. 155, причем все, что относится к осевым скоростям, одинаково с идеальным пропеллером. Таким образом идеальный пропеллер можно считать как частный случай идеального винта, у которого отсутствует вызванная окружная скорость. Точно так же мы можем считать идеальный винт частным случаем действительного винта, и тогда в мощность, потребную на вращение действительного винта, войдут еще остальные потери, которые мы обозначим  $T'$ , и для действительного винта уравнение (65) примет следующий вид:

$$T = PV_0 + \frac{Pv_2}{2} + J \frac{\omega_2^2}{2} + T'. \quad (81)$$

В этой формуле первый член — полезная мощность, а остальные три — потери, причем первые две можно назвать индуктивными потерями, а последнюю — профильной. Таким образом

$$T = T_{\text{пол}} + T_{\text{инд}} + T_{\text{проф}}. \quad (82)$$

Отсюда и к. п. д. действительного винта можно разделить на три к. п. д., представив его как произведение индуктивного к. п. д. на профильный:

$$\eta = \eta_{\text{инд}} \eta_{\text{проф}} \quad (83)$$

или

$$\eta = \eta_{\text{ос}} \eta_{\text{окр}} \eta_{\text{проф}}. \quad (84)$$

Иногда  $\eta_{\text{проф}}$  называют относительным к. п. д., так как он определяется как отношение к. п. д. действительного винта к к. п. д. идеального:

$$\eta_{\text{проф}} = \frac{\eta}{\eta_{\text{инд}}}. \quad (85)$$

Мощность идеального винта выражается формулой (66). Подставляя в нее выражение для  $J$  по (74), получим

$$T = PV_1 + \frac{1}{64} \pi \rho V_1 D^4 \omega_2^2$$

или

$$T = F \rho V_1^2 v_2 + \frac{1}{4} F \rho V_1 U_R^2, \quad (86)$$

где

$$U_R = \omega_1 R.$$

В формуле (86) первый член есть мощность, поглощаемая идеальным пропеллером, т. е. идущая на преодоление осевых сил, а второй член — мощность, идущая на преодоление окружных сил.

Формулу (77) или (78) в некоторых случаях можно упростить. Так, если величина

$$\frac{8BV_0^2}{D^2 \Omega^2} = \frac{2A}{\pi^2} \frac{V_0^2}{n_s^2 D^2} \eta_{\text{ид. в}}$$

мала по сравнению с единицей, то выражение с корнем можно разложить в ряд и ограничиться первыми двумя членами. Так как

$$(1-x)^{\frac{1}{2}} \approx 1 - \frac{1}{2}x,$$

то

$$\sqrt{1 - \frac{8BV_0^2}{D^2Q^2}} = 1 - \frac{4BV_0^2}{D^2Q^2} = 1 - \frac{AV_0^2}{\pi^2 n_s^2 D^2} \eta_{ид. в}$$

и тогда формула (78) примет такой вид

$$\omega_1 = \frac{AV_0^2}{\pi n_s D^2} \eta_{ид. в}$$

или после замены  $A$  его значением

$$A = \frac{600N}{\pi \rho D^2 V_0^3}$$

получим

$$\omega_1 = \frac{600N \eta_{ид. в}}{\pi^2 \rho n_s D^4 V_0}, \quad (87)$$

где  $N$  — в л с. и

$$\omega_2 = \frac{1200N \eta_{ид. в}}{\pi^2 \rho n_s D^4 V_0}. \quad (88)$$

### § 3. Практические приложения теорий идеального пропеллера и винта

Как видно из двух предыдущих параграфов, теории идеального пропеллера и винта основываются на применении общих теорем механики к струе, создаваемой пропеллером или винтом, которые дают возможность установить связь между силой тяги или мощностью, с одной стороны, и вызываемыми пропеллером или идеальным винтом скоростями в струе — с другой. В этих теориях мы не получаем связи с конструкцией движителя и вызываемым им потоком. При определении пропеллера мы не предопределяем даже, каким образом пропеллер гонит воздух через свой диск, а в теории идеального винта мы не предопределяем, как создается вращение струи. Поэтому конструировать по этим теориям воздушный винт нельзя; эти теории могут дать лишь некоторые общие соображения относительно струи, вызываемой винтом. Далее мы условились в этих теориях рассматривать лишь идеальную жидкость, т. е. воздух без вязкости, и, как мы видели в конце предыдущего параграфа, к. п. д. идеального винта будет отличаться от действительного множителем, который называется относительным к. п. д. В предыдущем параграфе мы разделили к. п. д. винта на осевой, окружной и относительный. Этот последний мы можем разделить еще на два — на относительный осевой и относительный окружной, т. е.

$$\eta = \eta_{ос} \eta_{оти ос} \eta_{окр} \eta_{оти окр}.$$

Иными словами, мы предполагаем, что может как бы существовать действительный пропеллер, который прогоняет воздух в струе только в осевом направлении, и тогда его к. п. д. будет

$$\eta_{\text{ос}} \eta_{\text{отн. ос.}}$$

Аналогично можем предположить, что формулы для осевой и окружной скоростей (43), (44), (54), (77), (78), (80), (87) и (88) будут давать для действительного винта значения этих скоростей меньше на какую-то величину (вообще говоря, переменную, зависящую от режима работы винта). Однако, как показывают опыт и расчеты по более совершенным теориям, разница в действительных вызванных скоростях и вычисленных по теории идеального пропеллера или винта невелика и во многих практических случаях такое приближение вполне достаточно. По теории идеального пропеллера или винта мы можем вычислять, во-первых, предельные для данного режима полета величины осевого и окружного к. п. д., во-вторых, осевые скорости за винтом и в его плоскости и, в-третьих, окружные скорости струн за винтом и в его плоскости, а из окружных и осевых скоростей можно определять и угол наклона потока за винтом к его осн. Знание первых величин бывает полезно при некоторых общих исследованиях работы винта, а знание векторов, вызванных винтом скоростей, бывает нужно при проектировании радиаторов, для того чтобы знать величину обдува радиаторов винтом и для установки их под углом максимального обдува, а также для определения влияния обдува винтом на увеличение подъемной силы и лобового сопротивления крыла, т. е. в вопросах взаимного влияния самолета и винта. Кроме того, теория идеального винта может быть полезна при проектировании соосных винтов, вращающихся в разные стороны.

Разберем как изменяется к. п. д. идеального пропеллера и идеального винта со скоростью. К. п. д. идеального пропеллера можно представить так:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{v_2}{2V_0}}.$$

При  $V_0 = 0$  и  $\eta = 0$ ; при  $V_0 = \infty$   $\eta = 1$ . Следовательно, к. п. д. идеального пропеллера со скоростью полета увеличивается, стремясь к единице.

Вставляя значение  $\omega_1$ , найденное из уравнения (75), в формулу (71), получим

$$\eta_{\text{ид. в}} = \frac{V_0}{V_1} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{64P}{\pi \rho D^4 \Omega^2}} \right) \right]. \quad (89)$$

При  $V_0=0$   $\eta_{\text{ид.в}}=0$ . Рассмотрим, как изменяется тяга  $P$  со скоростью полета  $V_0$ . В случае идеального пропеллера согласно формуле (33) мощность, поглощаемая пропеллером, будет

$$T = -\frac{1}{2} F\rho \left( V_0 + \frac{v_2}{2} \right) (2V_0 v_2 + v_2^2)$$

или

$$V_0^2 + V_0 v_2 + \frac{v_2^2}{4} - \frac{T}{F\rho v_2} = 0.$$

Отсюда

$$V_0 = -\frac{v_2}{2} + \sqrt{\frac{75N}{F\rho v_2}}, \quad (90)$$

где  $N = \frac{1}{75} T$  в лошадиных силах. Знак перед корнем следует брать плюс, так как иначе  $V_0$  получается отрицательным. Формула (90) устанавливает связь между вызванной скоростью  $v_2$  и скоростью полета  $V_0$  при постоянной мощности  $N$  (фиг. 156).

Согласно формуле (31)

$$P = F\rho \left( V_0 + \frac{v_2}{2} \right) v_2. \quad (91)$$

Подставляем сюда значение  $V_0$  по (90):

$$P = \sqrt{75NF\rho} v_2. \quad (92)$$

Из формулы (90) видно, что при  $V_0=0$  получается формула (54), а при  $V_0$ , стремящемся к бесконечности,  $v_2$  стремится к нулю. Действительно, возведем в квадрат уравнение (90):

$$\left( V_0 + \frac{v_2}{2} \right)^2 = \frac{75N}{F\rho v_2}.$$

При  $V_0 \rightarrow \infty$  левая часть этого уравнения стремится к бесконечности, правая же при конечных  $N$ ,  $F$  и  $\rho$  будет стремиться к бесконечности при  $v_2 \rightarrow 0$ .

Из формулы (36) видно, что при конечном  $T$  и при  $V_0 \rightarrow \infty$ ,  $P \rightarrow 0$ , так как при этом  $\eta \rightarrow 0$ . Таким образом при увеличении скорости полета тяга и вызванная скорость идеального пропеллера уменьшаются, приближаясь к нулю (фиг. 156). Обращаясь к формуле (89), получаем, что при  $V_0 = \infty$  к. п. д. идеального винта  $\eta_{\text{ид.в}} = 1$ , так как тяга идеального винта равна тяге идеального пропеллера при одинаковой осевой скорости и диаметре. На фиг. 157 приведены к. п. д. идеального пропеллера идеального винта и действительного винта в зависимости от скорости полета. Как видим, к. п. д. идеального пропеллера и идеального винта стремятся к единице, тогда как к. п. д. действительного винта имеет максимум, в чем мы убедимся далее.

Посмотрим теперь, как можно определить осевую скорость в зависимости от диаметра винта и поглощаемой им мощности, пользуясь теорией идеального пропеллера. Для этого обратимся к уравнению (51). Для удобства расчетов введем следующее обозначение:

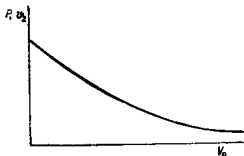
$$\frac{N}{\rho F v} = m, \quad (93)$$

где  $N$  — мощность двигателя в л. с., а  $F$  — омегаемая винтом площадь. Получим

$$A = \frac{150N}{\rho F V_0^3} = 150 \frac{m}{V_0^3};$$

или, если выражать  $V$  в км/час,

$$A = 7000 \frac{m}{V^2}.$$



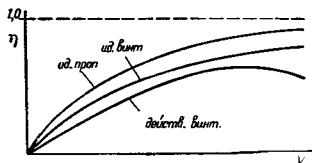
Фиг. 156. Зависимость вызванной в струе скорости и тяги идеального пропеллера от скорости полета.

Сравнивая это выражение с формулой (51), получаем

$$14000 \frac{m}{V^3} = x^3 + x^2 - x - 1.$$

Отсюда

$$m = \frac{x^3 + x^2 - x - 1}{14000} V^3. \quad (94)$$



Фиг. 157. Зависимость к. п. д. идеального пропеллера, идеального винта и действительного винта от скорости полета.

На фиг. 158 по формуле (94) построена диаграмма, в которой по оси абсцисс отложена величина  $m$ , которая физически представляет собой мощность двигателя, отнесенную к фиктивной как бы «материализованной» площади диска винта  $\rho F$ , а по оси ординат  $V_2$ . Кривые построены по параметру  $V_0$  скорости полета в км/час. Скорость  $V_2$  относится к тому месту струи, где поток уже сжался; обычно полное сжатие за винтом уже наблюдается на расстоянии, меньшем половины диаметра винта.

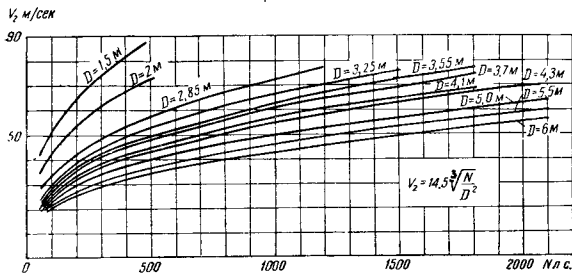


При работе винта на месте скорость за винтом можно определять по формуле (54) (фиг. 159). Вызванная угловая скорость за винтом может быть вычислена по формуле (77).

Во многих случаях практикн величина  $\frac{8BV_0^2}{D^2\omega^2}$  мала по сравнению с единицей; тогда можно пользоваться формулами (87) или (88), причем, если выражать скорость полета  $V$  в км/час, число оборотов винта  $n$  в минуту, а к.п.д. идеального винта пренебречь, так как при достаточно больших скоростях полета он близок к единице, то получим

$$\omega_1 = \frac{13\,200N}{\rho n D^4 V}, \quad (95)$$

$$\omega_2 = \frac{26\,400N}{\rho n D^4 V}. \quad (96)$$



Фиг. 159. Диаграмма для определения скорости за винтом при работе его на месте.

Угол закручивания струи идеального винта  $\varepsilon_2$  можно выразить так:

$$\operatorname{tg} \varepsilon_2 = \frac{\omega_2 r}{V_2}.$$

Подставляем сюда выражение для  $\omega_2$  по формуле (88):

$$\operatorname{tg} \varepsilon_2 = \frac{1200N\eta_{\text{ид. в}} r}{\pi^2 \rho n_s D^4 V_0 V_2}.$$

Так как при сравнительно больших скоростях  $V_2 \approx V_0$ , то

$$\operatorname{tg} \varepsilon_2 = \frac{1200N\eta_{\text{ид. в}}}{\pi^2 \rho n_s D^4 V_0^2};$$

согласно формуле (71)

$$\eta_{\text{нд. в}} = \eta_{\text{ос}} \left( 1 - \frac{\omega_1}{\Omega} \right). \quad (97)$$

Подставляем сюда  $\omega_1$  по формуле (87):

$$\eta_{\text{нд. в}} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_{\text{ос}}} + \frac{300N}{\pi^2 \rho n^2 D^4 V_0}}.$$

Так как  $\eta_{\text{ос}} \approx 1$ , то

$$\eta_{\text{нд. в}} \approx \frac{1}{1 + \frac{300N}{\pi^2 \rho n^2 D^4 V_0}}. \quad (98)$$

Подставляя это выражение для  $\eta_{\text{нд. в}}$  в формулу для  $\text{tg } \varepsilon_2$ , получим

$$\text{tg } \varepsilon_2 = \frac{94500Nr}{\rho n D^4 V^2} \frac{1}{1 + \frac{1,26 \cdot 10^6 N}{\rho n^2 D^4 V}}, \quad (99)$$

где  $N$  — мощность двигателя в л. с.,  $r$  — радиус рассматриваемой части струи в м,  $n$  — об/мин винта,  $V$  — скорость полета в км/час.

В случае соосных винтов можно приближенно считать, что задний винт работает в струе переднего, имеющей осевую скорость не  $V_0$ , а  $V_0 + v_1 = V_1$  и окружную скорость  $\omega_1 r$ . Соответственно этому углы установки заднего винта получаются несколько большими, чем переднего. Вследствие противоположного вращения винтов задний винт будет раскручивать струю, закрученную передним, отчего окружной к. п. д. может несколько увеличиться и, следовательно, может увеличиться и к. п. д. комбинации соосных винтов по сравнению с к. п. д. одиночного винта.

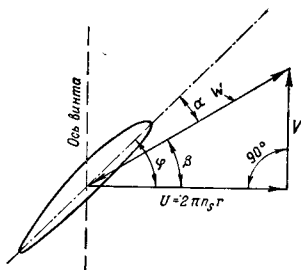
## Глава VIII

### ТЕОРИЯ ИЗОЛИРОВАННОГО ЭЛЕМЕНТА ЛОПАСТИ

#### § 1. Основные положения теории изолированного элемента лопасти

Лопасть винта представляет собой своего рода крыло. Однако обычное крыло самолета движется в воздухе поступательно, тогда как лопасть винта, кроме того, вращается, и поэтому разные части лопасти имеют разные скорости движения по отношению к неподвижному воздуху. Возьмем два сечения лопасти на радиусах  $r$  и  $r + dr$ ; полученную между этими сечениями часть лопасти назовем элементом лопасти на радиусе  $r$ . Площадь это-

го элемента лопасти будет  $bdr$ . Посмотрим, как расположен этот элемент лопасти по отношению к потоку. Обычно для удобства рассматривают не движение самого элемента по отношению к неподвижному потоку, а наоборот, — движение потока по отношению к неподвижному элементу. Сам же элемент лопасти движется с одной стороны поступательно со скоростью полета  $V$ , а с другой, — вращается с угловой скоростью  $\Omega = 2\pi n_s$ , или окружной скоростью  $U = \Omega r = 2\pi n_s r$ .



Фиг. 160. Треугольник скоростей у сечения лопасти.

Следовательно, обращая движение, можно сказать, что на элемент лопасти набегаёт, во-первых, поток со скоростью  $V$  в направлении, параллельном оси винта, и, во-вторых, — поток со скоростью  $U$  в направлении, перпендикулярном скорости  $V$  (фиг. 160); результирующую скорость  $W$  назовем скоростью набегающего потока на элемент лопасти. Угол между вектором  $W$  и хордой сечения будет углом атаки сечения  $\alpha$ . Угол  $\varphi$  между хордой сечения и вектором

$U$  (или, что то же, и плоскостью вращения винта) есть угол установки сечения лопасти, а угол  $\beta$  между векторами скоростей  $W$  и  $U$  называется углом притекания. Такой элемент лопасти мы можем рассматривать как крыло и приложить к нему общие формулы сопротивления. Получим для подъемной силы

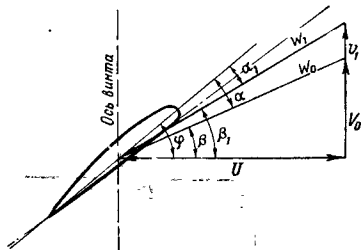
$$dY = c_y \rho b dr \frac{W^2}{2}, \quad (100)$$

для лобового сопротивления

$$dQ = c_x \rho b dr \frac{W^2}{2}. \quad (101)$$

Как известно из аэродинамики, коэффициент лобового сопротивления  $c_x$  зависит от относительного размаха крыла. Какой же относительный размах принимать в данном случае? На первый взгляд кажется, что следует принять бесконечный размах; но, как известно из теории индуктивного сопротивления, такое крыло не будет иметь индуктивного сопротивления и оно не будет вызывать индуктивных скоростей, что будет противоречить тому, что мы имели при рассмотрении струи идеального пропеллера — мы убедились, что там имеются вызванные пропеллером скорости. Таким образом, если принять элемент лопасти за крыло бесконечного размаха, то следует каким-либо другим путем находить

вызванную винтом скорость, и тогда треугольник скоростей сечения лопасти будет таким, как показано на фиг. 161. Для того чтобы можно было воспользоваться формулами (100) и (101) для определения тяги и мощности элемента лопасти, следует принять в этих формулах  $c_y$  и  $c_x$  для какого-то фиктивного относительного размаха, причем считать, что элемент работает в лопасти изолированно — без какого бы то ни было влияния соседних элементов. Далее мы предположим, что воздействие потока на такой элемент, несмотря на то, что он движется по винтовой траектории, подобно воздействию потока на крыло, движущееся



Фиг. 161. Треугольник скоростей с вызванной винтом осевой скоростью.

• поступательно. Это последнее предположение называется обычно гипотезой плоских сечений.

Спроектируем подъемную силу и лобовое сопротивление элемента лопасти на два взаимно перпендикулярных направления — на направление, параллельное оси винта, и на направление, совпадающее с плоскостью вращения винта (фиг. 162). Проекция на ось даст тягу элемента лопасти

$$dP = dY \cos \beta - dQ \sin \beta; \quad (102)$$

Проекция на плоскость вращения, умноженная на радиус элемента, даст момент вращения элемента, а умноженная на угловую скорость  $\Omega = 2\pi n_s$  — мощность, затрачиваемую на вращение элемента:

$$dT = (dY \sin \beta + dQ \cos \beta) r \Omega. \quad (103)$$

Подставим в эти уравнения значения  $dY$  и  $dQ$  по формулам (100) и (101):

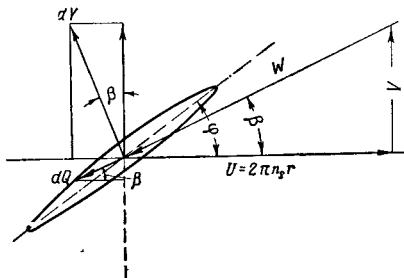
$$dT = (c_y \cos \beta - c_x \sin \beta) \rho b dr \frac{W^2}{2} \\ dT = (c_y \sin \beta + c_x \cos \beta) \rho b r dr 2\pi n_s \frac{W^2}{2}$$

На фиг. 160 видно, что

$$W = \sqrt{U^2 + V^2} = \frac{U}{\cos \beta} = \frac{2\pi n_s r}{\cos \beta} \quad (104)$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} dP &= \frac{c_y \cos \beta - c_x \sin \beta}{\cos^2 \beta} 2\pi^2 \rho b r^2 dr n_s^2 \\ dT &= \frac{c_y \sin \beta + c_x \cos \beta}{\cos^2 \beta} 4\pi^3 \rho b r^3 dr n_s^3 \end{aligned} \right\} \quad (105)$$



Фиг. 162 Схема аэродинамических сил на элементе лопасти

Пользуясь указанными выше гипотезами и отвлеченными обозначениями, получим для всего винта с  $k$  лопастями такие формулы для тяги и мощности

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{\kappa}{4} \pi^2 \rho n_s^2 D^4 \int_{\bar{r}_0}^1 \frac{c_y \cos \beta - c_x \sin \beta}{\cos^2 \beta} \bar{b} \bar{r}^2 d\bar{r} \\ T &= \frac{\kappa}{4} \pi^3 \rho n_s^3 D^5 \int_{\bar{r}_0}^1 \frac{c_y \sin \beta + c_x \cos \beta}{\cos^2 \beta} \bar{b} \bar{r}^3 d\bar{r} \end{aligned} \right\} \quad (106)$$

Здесь  $\bar{r}_0$  — радиус сечения лопасти, начиная от которого можно считать, что лопасть работает как крыло. От  $\bar{r}=0$ , т. е. от оси винта до радиуса  $\bar{r}_0$ , место лопасти занимает втулка; эта часть никакой тяги не создает, а только лобовое сопротивление, правда, сравнительно небольшое по отношению к сопротивлению всего самолета. Поэтому лобовым сопротивлением этого

участка, а также мощностью, которая затрачивается на вращение втулки и части лопасти до сечения  $\bar{r}_0$ , обычно пренебрегают. При расчетах  $\bar{r}_0$  часто принимают равным 0,25.

## § 2. Некоторые общие исследования винта с помощью теории изолированного элемента лопасти

Коэффициенты  $c_y$  и  $c_x$ , а также угол  $\beta$  являются переменными величинами, которые для каждого режима работы винта зависят от радиуса  $r$ ;  $c_y$  и  $c_x$  при определенном угле атаки  $\alpha$  (кажущемся) зависят от относительного размаха. Между тем для элемента лопасти можно принимать лишь какой-то средний для всех сечений условный размах. В формулах (106) мы принимаем  $c_y$  и  $c_x$  постоянными вдоль лопасти. В действительности эти коэффициенты обычно изменяются вдоль лопасти, но мы можем себе представить такой винт, в котором они постоянны. Тогда они выйдут за знак интеграла:

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{\kappa}{4} \pi^2 \rho c_y n_s^2 D^4 \int_{r_0}^1 \frac{1 - \mu \operatorname{tg} \beta}{\cos \beta} \bar{b} r^2 \bar{d} r, \\ T &= \frac{\kappa}{4} \pi^3 \rho c_y n_s^2 D^5 \int_{r_0}^1 \frac{\operatorname{tg} \beta + \mu}{\cos \beta} \bar{b} r^3 \bar{d} r. \end{aligned} \right\} (107)$$

Здесь

$$\mu = \frac{c_x}{c_y}.$$

Согласно фиг 160 угол  $\beta$  вполне определяется режимом работы винта. Действительно,  $\operatorname{tg} \beta = \frac{V}{U}$  или, так как

$$\begin{aligned} U &= 2\pi n_s r = \pi n_s \bar{r} D, \\ \operatorname{tg} \beta &= \frac{V}{\pi n_s D} \frac{1}{r} = \frac{\lambda}{\pi} \frac{1}{r}, \end{aligned} \quad (108)$$

т. е. угол  $\beta$  зависит от относительной поступи винта, которая определяет режим работы винта, и от радиуса  $r$ . Следовательно, для определенного режима работы винта интегралы в формулах (107) вполне определяются, и если бы был известен относительный размах лопасти, то по нему и по кажущемуся углу атаки  $\alpha = \varphi - \beta$  определялись бы  $c_y$  и  $\mu$ , а по ним тяга и мощность винта. Однако относительный размах лопасти нам неизвестен и поэтому не можем определить  $c_y$  и  $\mu$ , а следовательно, не можем определить тягу и мощность. По этой причине теория изо-

лированного элемента лопасти не получила практического применения. Ее можно применять лишь при некоторых исследованиях, когда требуется провести сравнительный анализ винтов. В этом случае принимается приближенно какой-то относительный размах лопасти (обычно близкий к 5).

Преобразуем формулы (107), введя обозначение

$$\bar{V} = \frac{\lambda}{\pi}, \quad (109)$$

откуда

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\bar{V}}{r}. \quad (110)$$

Будем иметь

$$\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} = \frac{\bar{r}}{\sqrt{\bar{V}^2 + \bar{r}^2}}. \quad (111)$$

Тригонометрические выражения в формулах (107) преобразуются так:

$$\frac{1 - \mu \operatorname{tg} \beta}{\cos \beta} = \frac{1}{r^2} (\bar{r} - \mu \bar{V}) \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{V}^2};$$

$$\frac{\operatorname{tg} \beta + \mu}{\cos \beta} = \frac{1}{r^2} (\bar{V} + \mu \bar{r}) \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{V}^2}$$

и формулы (107) примут следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{\kappa}{4} \pi^3 \rho c_y n_s^2 D^4 \int_{r_0}^1 (\bar{r} - \mu \bar{V}) \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{V}^2} \bar{b} \bar{d} \bar{r}, \\ T &= \frac{\kappa}{4} \pi^3 \rho c_y n_s^3 D^5 \int_{r_0}^1 (\bar{V} + \mu \bar{r}) \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{V}^2} \bar{b} \bar{r} \bar{d} \bar{r}. \end{aligned} \right\} \quad (112)$$

Коэффициент полезного действия выразится так:

$$\eta = \frac{PV}{T} = \bar{V} \frac{\int_{r_0}^1 (\bar{r} - \mu \bar{V}) \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{V}^2} \bar{b} \bar{d} \bar{r}}{\int_{r_0}^1 (\bar{V} + \mu \bar{r}) \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{V}^2} \bar{b} \bar{r} \bar{d} \bar{r}}. \quad (113)$$

Так как в формулах (112) и (113)  $\bar{b}$  обычно задается графически, то интегрирование в этих формулах можно произвести тоже только графически или численно. Однако если принять  $\bar{b}$

постоянным вдоль лопасти, то формула (113) может быть решена в конечном виде и может быть найдена зависимость к. п. д. винта от режима работы  $\bar{V}$  и от его аэродинамических свойств, характеризуемых величиной  $\mu$ . Пусть  $\bar{b} = \text{const}$ , тогда

$$\eta = \bar{V} \frac{\int_{r_0}^1 \sqrt{r^2 + \bar{V}^2} r dr - \mu \bar{V} \int_{r_0}^1 \sqrt{r^2 + \bar{V}^2} dr}{\bar{V} \int_{r_0}^1 \sqrt{r^2 + \bar{V}^2} r dr + \mu \int_{r_0}^1 \sqrt{r^2 + \bar{V}^2} r^2 dr}. \quad (114)$$

Это выражение зависит от следующих трех интегралов, которые сводятся к квадратам:

$$\left. \begin{aligned} H &= \int_{r_0}^1 \sqrt{r^2 + \bar{V}^2} dr, \\ G &= \int_{r_0}^1 \sqrt{r^2 + \bar{V}^2} r dr, \\ L &= \int_{r_0}^1 \sqrt{r^2 + \bar{V}^2} r^2 dr. \end{aligned} \right\} \quad (115)$$

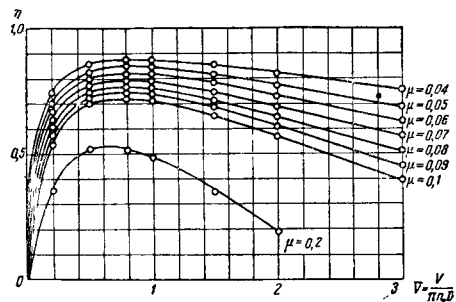
Выражение для к. п. д. (114) примет при  $\bar{b} = \text{const}$  следующий вид:

$$\eta = \bar{V} \times \frac{\frac{1}{3} [\sqrt{(1+\bar{V}^2)^3} - \bar{V}^3] - \frac{\mu \bar{V}}{2} \left[ \sqrt{1+\bar{V}^2} + \bar{V}^2 \ln \left( \frac{1+\sqrt{1+\bar{V}^2}}{\bar{V}} \right) \right]}{\frac{\bar{V}}{3} [\sqrt{(1+\bar{V}^2)^3} - \bar{V}^3] + \frac{\mu}{4} \left[ (2+\bar{V}^2) \sqrt{1+\bar{V}^2} - \bar{V}^4 \ln \left( \frac{1+\sqrt{1+\bar{V}^2}}{\bar{V}} \right) \right]}. \quad (116)$$

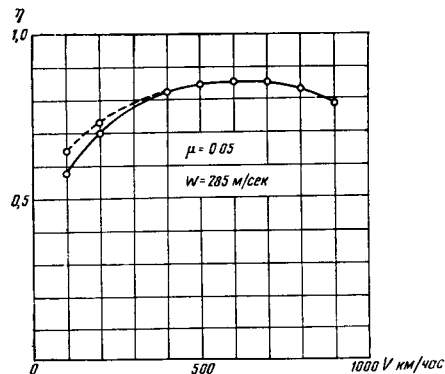
Таким образом, исходя из этой формулы, можно сказать, что при сделанных предположениях к. п. д. изолированного винта (т. е. без присутствия в его струе каких-либо тел) *зависит только от режима работы винта  $\bar{V}$  и от среднего обратного качества  $\mu$  его дужек.*

На фиг. 163 даны кривые для различных  $\mu$  и  $\bar{V}$ , вычисленные по формуле (116). Кривые показывают, что к. п. д. возрастает от нуля до наибольшего значения, а при дальнейшем увеличении  $\bar{V}$  уменьшается.

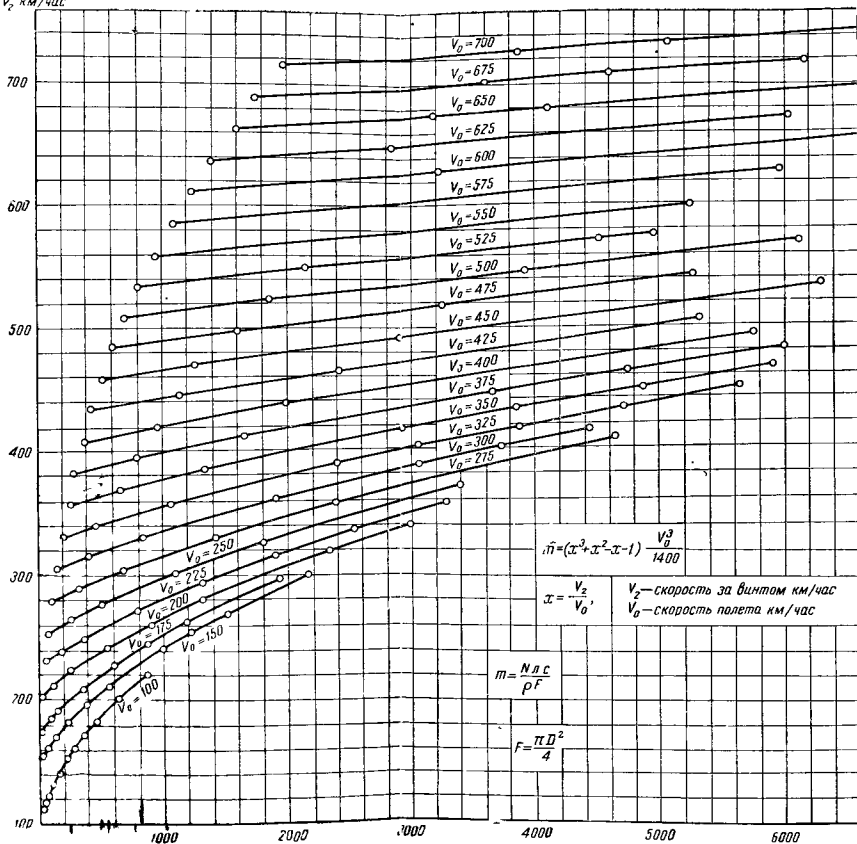




Фиг. 163. Зависимость к.п.д. винта от относительной скорости.



Фиг. 164. Зависимость к.п.д. винта от скорости полета при концевой скорости лопасти  $W_0=285$  м/сек и постоянном обратном качестве дужки  $\mu=0,05$ .

$V_2$  км/час

Фиг 158 Диаграмма для определения скорости за винтом в полете.

Посмотрим теперь, как зависит к. п. д. винта от скорости самолета. Для этого необходимо задаться каким-либо параметром, определяющим скорость вращения винта. За этот параметр примем результирующую скорость конца лопасти  $W$  (концевую скорость), причем предположим, что эта скорость все время постоянна. Согласно формуле (98) она выражается следующим образом.

$$W = \sqrt{U^2 + V^2} = U \sqrt{1 + \bar{V}^2},$$

$$\text{так как } \bar{V} = \frac{V}{U},$$

а отсюда

$$W = \frac{V}{\bar{V}} \sqrt{1 + \bar{V}^2} \quad (117)$$

и

$$\bar{V}^2 = \frac{1}{\left(\frac{W}{V}\right)^2 - 1}.$$

Подставляя это выражение для  $\bar{V}$  в формулу (116), получим зависимость  $\eta$  от скорости при определенном  $\mu$  и определенной концевой скорости  $W_0$ . На фиг. 164 представлена эта зависимость для  $W_0 = 285$  м/сек и  $\mu = 0,05$ . Видно, что при скоростях, меньших 400 км/час, к. п. д. довольно быстро уменьшается. Для тихоходных самолетов к. п. д. можно увеличить, подобрав соответствующую окружную концевую скорость. Так, если взять для  $V = 100$  км/час  $U = 200$  м/сек, а для  $V = 200$  км/час  $U = 240$  м/сек, то получим пунктирную линию на фиг. 164. Следовательно, на малых скоростях полета выгодно уменьшать концевую окружную скорость, а на больших — увеличивать. Предел этого увеличения мы определим в § 2 гл. XIII.

Формула (110) была выведена в предположении постоянства вдоль лопасти  $c_y$  и  $\bar{b}$ . Однако можно найти к. п. д., отбрасывая одно из этих ограничений, а именно постоянство  $\bar{b}$ . Несколько преобразуем формулы (112):

$$P = \frac{\kappa}{4} \pi^2 \rho c_y n_s^2 D^4 \left[ \int_{r_0}^1 \sqrt{r^2 + \bar{V}^2} \bar{b} r dr - \mu \bar{V} \int_{r_0}^1 \sqrt{r^2 + \bar{V}^2} \bar{b} dr \right],$$

$$T = \frac{\kappa}{4} \pi^3 \rho c_y n_s^3 D^5 \left[ \bar{V} \int_{r_0}^1 \sqrt{r^2 + \bar{V}^2} \bar{b} r dr + \mu \int_{r_0}^1 \sqrt{r^2 + \bar{V}^2} \bar{b} r^2 dr \right].$$

Обозначим

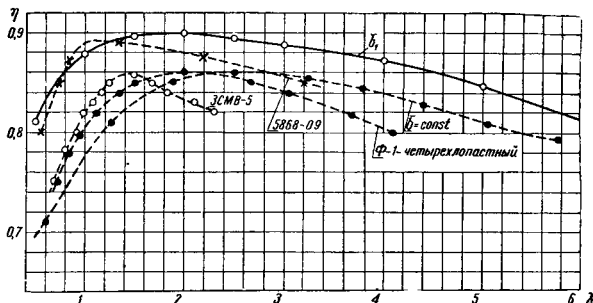
$$\left. \begin{aligned} C &= \bar{V} \int_{\bar{r}_0}^1 \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{V}^2} \bar{b} \bar{r} d\bar{r} + \mu \int_{\bar{r}_0}^1 \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{V}^2} \bar{b} \bar{r}^2 d\bar{r}, \\ J &= \int_{\bar{r}_0}^1 \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{V}^2} \bar{b} \bar{r} d\bar{r} - \mu \bar{V} \int_{\bar{r}_0}^1 \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{V}^2} \bar{b} d\bar{r}, \end{aligned} \right\} \quad (118)$$

тогда

$$P = \frac{\kappa}{4} \pi^2 \rho c_y n_s^2 D^4 J,$$

$$T = \frac{\kappa}{4} \pi^3 \rho c_y n_s^3 D^5 C,$$

$$\eta = \bar{V} \frac{J}{C}. \quad (119)$$



Фиг. 165. Зависимость коэффициента полезного действия винта от относительной поступи, найденная по теории изолированного элемента лопасти для ширины  $\bar{b}_1$  (фиг. 72) и  $\bar{b} = \text{const}$ . Здесь же приведены к п д некоторых испытанных винтов.

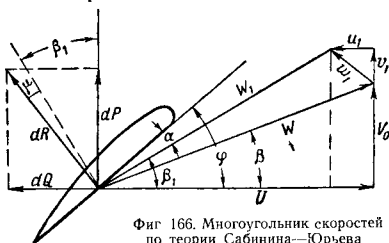
Таким образом к. п. д. винта зависит от  $\bar{V}$  и от величины  $J$  и  $C$ , которые в свою очередь зависят от  $\bar{V}$ , от качества  $\mu$  дужки лопасти и от распределения ширины по лопасти. На фиг. 165 приведена кривая к. п. д. по формуле (119) для распределения ширины  $\bar{b}_1$  лопасти по закону, указанному на фиг. 72, а также для  $\bar{b} = \text{const}$ .

## Глава IX

## ТЕОРИЯ ВИНТА САБИНИНА—ЮРЬЕВА

## § 1. Основные положения теории

Как упоминалось выше, теория идеального винта дает лишь связь между тягой и мощностью и полем вызванных винтом скоростей, теория же элемента лопасти дает связь тяги и мощности с конструктивными параметрами лопасти, не связывая их с полем потока. В 1910 г. студентам ВМТУ Б. Н. Юрьеву и Г. Х. Сабинину<sup>1</sup> под влиянием Н. Е. Жуковского пришла мысль соединить эти две теории вместе и таким образом получить связь между мощностью, тягой, конструктивными параметрами и полем скоростей. Таким образом теория Сабинина—Юрьева является соединением теории, опирающейся на общие теоремы механики, с теорией изолированного элемента лопасти.



Фиг. 166. Многоугольник скоростей по теории Сабинина—Юрьева

Рассмотрим какое-либо сечение лопасти, находящееся на расстоянии  $r$  от центра вращения ее. Будем рассматривать поток около лопасти в относительном движении, т. е. по отношению к лопасти, тогда на лопасть будет набегать поток с одной стороны в осевом направлении со скоростью  $V_0$  и с другой — со скоростью  $r\Omega$ , где  $\Omega$  — угловая скорость вращения лопасти. Как мы уже знаем, по теории изолированного элемента лопасти результирующая скорость  $W$  будет скоростью набегания потока на элемент лопасти. Однако по теории идеального винта известно, что в струе возникают добавочные, вызванные самим винтом скорости — осевая и окружная. Эти вызванные винтом скорости следует соответствующим образом прибавить к основным скоростям лопасти; тогда получим скоростной многоугольник (фиг. 166), отражающий собой истинное распределение скоростей у рассматриваемого сечения лопасти в отличие от ка-

<sup>1</sup> Ныне академик Б. Н. Юрьев и доктор технических наук, научный сотрудник института имени Н. Е. Жуковского Г. Х. Сабинин.

жущегося, которое представляется теорией изолированного элемента лопасти.

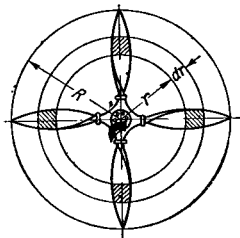
## § 2. Вывод основных формул

Выведем сначала зависимость между конструктивными параметрами лопасти и вызванными лопастью скоростями — так называемое уравнение связи. Для этого выразим силу сопротивления, действующую на рассматриваемый элемент лопасти, с одной стороны, через количество движения в струе, а с другой — через обычную в аэродинамике формулу.

Сложение осевой и окружной вызванных скоростей дает результирующую вызванную скорость  $w_1$ , которая выражается так:

$$w_1 = \sqrt{u_1^2 + v_1^2}. \quad (120)$$

Следствием появления этой результирующей вызванной скорости является наличие силы сопротивления элемента, направление которой параллельно направлению результирующей вызванной скорости  $w_1$ . Рассматриваемый элемент лопасти движется в кольцевом пространстве толщиной  $dr$ ; в этом же кольцевом пространстве движутся и другие элементы лопасти от других лопастей (фиг. 167), причем они все вызывают скорость  $w_1$ , которую мы принимаем осредненной по кольцевому пространству. Если обозначим через  $dm$  секундную массу воздуха, протекающую через кольцевое пространство винта с  $k$  лопастями, то по теореме о количестве движения сила воздействия потока на один элемент лопасти будет равна



Фиг. 167 Кольцевое сечение струн

$$dR = \frac{dm}{\kappa} w_2,$$

где  $w_2$  — вызванная винтом результирующая скорость в данном кольцевом пространстве далеко в струе за винтом.

Согласно теориям идеального пропеллера и винта осевая и окружная вызванные скорости в плоскости винта вдвое меньше вызванных скоростей далеко за винтом в струе, т. е.

$$v_1 = \frac{v_2}{2}, \quad u_1 = \frac{u_2}{2}.$$

Отсюда

$$w_2 = 2w_1$$

и, следовательно,

$$dR = \frac{dm}{\kappa} 2\omega_1.$$

Секундную массу  $dm$  можно выразить так:

$$dm = 2\pi r dr \rho V_1,$$

где

$$V_1 = V_0 + v_1,$$

и тогда сила сопротивления элемента лопасти будет

$$dR = \frac{4\pi}{\kappa} \rho V_1 \omega_1 r dr. \quad (121)$$

С другой стороны, по обычной формуле аэродинамики

$$dR = c_R \rho b dr \frac{W_1^2}{2}. \quad (122)$$

Сила сопротивления элемента  $dR$ , вычисленная в параметрах струи и в параметрах лопасти, должна иметь одинаковое значение, и, следовательно, мы можем приравнять друг другу уравнения (121) и (122):

$$\frac{4\pi}{\kappa} \rho V_1 \omega_1 r dr = c_R \rho b dr \frac{W_1^2}{2}$$

или

$$\frac{V_1 \omega_1}{W_1^2} = c_R \frac{\kappa b}{8\pi r}. \quad (123)$$

Это и есть уравнение связи теории Сабинина—Юрьева. Оно дает связь потока, характеризуемого величинами  $V_1$ ,  $\omega_1$ ,  $W_1$ , с лопастью, характеризуемой величинами  $\kappa$ ,  $b$ ,  $r$ ,  $c_R$ .

Следует обратить внимание на то, что в противоположность теории изолированного элемента лопасти в формуле (123) коэффициент сопротивления  $c_R$  относится к крылу бесконечного размаха, ибо вызванная (индуктивная) скорость лопасти уже учтена применением теории идеального винта, и скоростной многоугольник фиг. 166 включает в себя скорость  $W_1$ , которая направлена к элементу лопасти под углом атаки  $\alpha$ , называемым истинным углом атаки в противоположность кажущемуся, который составляется направлением скорости  $W$  и хордой.

Обычно лопасть работает на сравнительно малых углах атаки, при которых  $c_R \approx c_{R_0}$ ; тогда уравнение связи примет следующий вид:

$$\frac{V_1 \omega_1}{W_1^2} = c_y \frac{\kappa b}{8\pi r}. \quad (124)$$

Найдем теперь тягу и мощность. Полную силу сопротивления элемента  $dR$  мы разложим на две составляющих — по оси винта и по касательной к окружности, описываемой сечением лопасти. При  $\kappa$ -лопастном винте элементарная тяга  $dP$  и элементарная окружная сила  $dQ$  выразятся так:

$$\left. \begin{aligned} dP &= \kappa dR \cos(\beta_1 + \mu), \\ dQ &= \kappa dR \sin(\beta_1 + \mu), \end{aligned} \right\} \quad (125)$$

где  $\mu$  — угол между перпендикуляром к скорости  $W_1$  и направлением силы  $dR$ . Из курса аэродинамики известно, что вследствие трения полная сила сопротивления отклоняется от перпендикуляра к скорости набегающего потока на угол, тангенс которого равен отношению коэффициентов профильного сопротивления и полной силы, т. е.  $\mu = \text{tg} \frac{c_{xp}}{c_R}$ . Но, как мы уже упоминали, практически можно принять  $c_R = c_y$  и, следовательно, тангенс за дугу, т. е.

$$\mu = \frac{c_{xp}}{c_y}$$

или в градусах

$$\mu = 57,3 \frac{c_{xp}}{c_y}$$

Мощность, потребляемая элементом лопастей винта, равна

$$dT = dQr\Omega.$$

Если подставить вместо  $dR$  его значение по формуле (121) или (122), то получим

$$\left. \begin{aligned} dP &= c_y \kappa \cos(\beta_1 + \mu) \rho \frac{W_1^2}{2} b dr, \\ dT &= c_y \kappa \sin(\beta_1 + \mu) \rho \frac{W_1^2}{2} b \Omega r dr. \end{aligned} \right\} \quad (126)$$

Формулы (126) и (124) являются основными в теории Сабинина—Юрьева. Интегрируя по всей лопасти, найдем полную мощность и тягу винта. Б. Н. Юрьевым разработаны графический и аналитические методы расчета винта по этой теории<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Желающих подробнее ознакомиться с этой теорией и методами расчета по ней винтов отсылаем к первоисточнику: Б. Н. Юрьев, Импульсная теория воздушных винтов. Труды ВВИА им Жуковского, вып. 306, 1948.

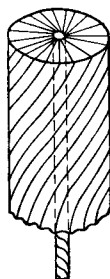


## Глава X

ВИХРЕВАЯ ТЕОРИЯ ВИНТА Н. Е. ЖУКОВСКОГО<sup>1</sup>

## § 1. Основные положения теории

Физическая модель явления, положенная в основу вихревой теории винта Н. Е. Жуковского, состоит в следующем. Действие винта в данном пространстве заменяется аналогичным действием на поток вихревой системы, состоящей из цилиндрического вихревого слоя, вихревого доннышка и центрального вихревого жгута (фиг. 168). По теории вихрей находится воздействие такого вихревого цилиндра на окружающую жидкость и поле скоростей около вихревой системы, т. е. около винта. Учет сжатия струи, т. е. сжатия вихревой системы, ведет к усложнению теории, не давая заметного практического уточнения при расчете. Затем в этой теории рассматриваются средние по окружности цилиндра скорости в абсолютном движении, что значительно упрощает весь анализ. В качестве основного параметра данной теории принята циркуляция скорости. В зависимости от циркуляции выражается вызванная винтом скорость в струе, иными словами, циркуляция определяет поле скоростей вокруг винта. Через нее же могут быть выражены тяга и мощность винта. Для связи конструктивных параметров лопасти с потоком, а следовательно, с тягой и мощностью служит так называемое уравнение связи.



Фиг. 168 Вихревая система по теории винта Н. Е. Жуковского

Построение вихревой теории винта Жуковского заключается в том, что находится связь между:

1) циркуляцией и вызванными винтом скоростями в струе, 2) циркуляцией и конструктивными параметрами лопасти (уравнение связи), 3) циркуляцией и мощностью и 4) циркуляцией и тягой винта. По полученным формулам можно полностью сконструировать винт под определенное задание или уже имеющийся винт рассчитать, найдя при заданных условиях развиваемую тягу и поле скоростей.

## § 2. Вывод основных формул поля скоростей

Для упрощения формул вихревой теории В. П. Ветчинкиным были введены отвлеченные обозначения. Эти обозначения значительно упрощают вычислительную работу. Скоростной многоугольник около сечения лопасти имеет обычный вид (фиг. 166). Отвлеченные обозначения будут следующие:

<sup>1</sup> Об исторических предпосылках возникновения этой теории, а также библиографические данные см. § 1, гл. II.

радиус, как обычно,

$$\bar{r} = \frac{r}{R};$$

скорость винта или потока

$$\bar{V} = \frac{V}{\Omega R}.$$

Это обозначение отличается от относительной поступи  $\lambda$  только тем, что

$$\bar{V} = \frac{V}{\pi n_s D} = \frac{\lambda}{\pi}.$$

Окружная скорость лопасти

$$\bar{U} = \frac{\Omega r}{\Omega R} = \bar{r}.$$

Вызванная окружная скорость

$$\bar{u} = \frac{u}{\Omega R}.$$

Вызванная осевая скорость

$$\bar{v} = \frac{v}{\Omega R}.$$

Ширина лопастей

$$\bar{b} = \frac{\kappa b}{4\pi R} = \frac{\kappa b}{2\pi D}.$$

Это обозначение отличается от указанного в § 3 гл. I тем, что в данном случае под  $\bar{b}$  подразумевается общая ширина всех лопастей на данном радиусе, так как в числитель входит число лопастей  $\kappa$ . Кроме того, в знаменатель входит число  $2\pi$ .

Циркуляция

$$\bar{\Gamma} = \frac{\kappa \Gamma}{4\pi \Omega R^2}.$$

Тяга винта

$$\bar{P} = \frac{P}{2\pi \rho \Omega^2 R^4}.$$

Крутящий момент винта

$$\bar{Q} = \frac{Q}{2\pi \rho \Omega^2 R^5}.$$

Мощность винта

$$\bar{T} = \frac{T}{2\pi \rho \Omega^3 R^6}.$$

Индексами «0» обозначается невозмущенный поток, индексами «1» — величины, относящиеся к плоскости вращения винта, и индексами «2» — величины, относящиеся к струе за винтом.

Так как мы будем иметь дело со средними скоростями потока в струе, то первую формулу, дающую связь циркуляции с вызванной винтом скоростью, мы выведем, пользуясь уравнением Бернулли.

Уравнение Бернулли применимо к струйке с установившимся движением, а потому это уравнение можно применить в относительном или в абсолютном движении при условии, что в первом случае будем брать лишь осредненные скорости, так как относительное движение — установившееся, и что во втором случае неустановившееся движение мы примем за установившееся с определенными средними скоростями струи.

Применим уравнение Бернулли к струе в *относительном движении*, т. е. по отношению к лопастям винта. Возьмем два сечения кольцевой струйки далеко перед винтом и далеко за винтом. Уравнение Бернулли напишется в следующем виде<sup>1</sup>:

$$\frac{W^2}{2} - \Phi + \frac{p}{\rho} = \text{const.}$$

Здесь  $\Phi$  — силовая функция массовых сил. Силой тяжести вследствие ее малости для воздуха мы пренебрегаем, и, следовательно, из массовых сил имеется только центробежная сила. Центробежная сила, отнесенная к единице массы, будет  $\Omega^2 r$ , а силовая функция

$$\Phi = \int \Omega^2 r dr = \frac{\Omega^2 r^2}{2}.$$

И перед и за винтом мы имеем скорости осевые и окружные. Пусть  $p_0$ ,  $V_0$  и  $U_0 = \Omega r_0$  будут давление, осевая и окружная скорости перед винтом и соответственно  $p_2$ ,  $V_2$  и  $U_2 = (\Omega - \omega_2) r_2$  за винтом. Так как перед и за винтом струя цилиндрическая, то радиальных скоростей нет. Получаем

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} + \frac{U_0^2}{2} - \frac{\Omega^2 r_0^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + \frac{U_2^2}{2} - \frac{\Omega^2 r_2^2}{2}. \quad (127)$$

Уравнения Бернулли мы прилагаем к одной кольцевой струйке. Вследствие сжатия струи радиусы кольцевой струйки перед и за винтом будут неодинаковыми, т. е.  $r_0$  и  $r_2$ . Но так как обычно сжатие струи невелико, то примем приближенно  $r_0 = r_2 = r$ . Преобразуем уравнение (127), подставив  $V_2 = V_0 + v_2$  и  $U_2 = U_0 - \omega_2 r$ . Получим

$$\frac{p_0}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} = v_2 \left( V_0 + \frac{v_2}{2} \right) - \omega_2 r^2 \left( \Omega - \frac{\omega_2}{2} \right). \quad (128)$$

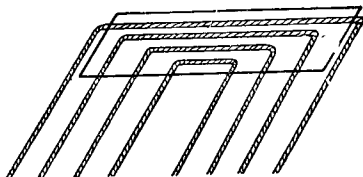
<sup>1</sup> См., например, В. Л. Александров. Техническая гидромеханика, издание 3-е, 1946, формула (71), стр. 92

Так как струя за винтом вращается, то на нее действуют центробежные силы, и поэтому атмосферное давление  $p_0 \neq p_2$ , т. е.  $p_2$  (давление в струе за винтом) меньше, чем  $p_0$  на величину давления от центробежных сил. Определим это давление. Предположим, что в кольцевой струе на радиусе  $r$ , которая вращается с угловой скоростью  $\omega_2$  между элементарными площадками  $d\sigma$ , отстоящими на расстоянии  $dr$  друг от друга, имеется разность давлений  $dp_2$ , которая уравнивается центробежной силой. Тогда

$$dp_2 d\sigma = \rho \omega_2^2 r dr d\sigma,$$

откуда

$$dp_2 = \rho \omega_2^2 r dr.$$



Фиг. 169 Система П-образных вихрей у крыла.

Интегрирование от внешнего потока до радиуса  $r$  даст величину разности между внешним давлением и давлением в струе

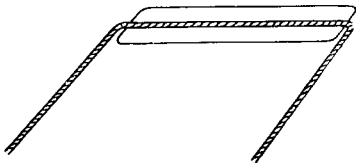
$$\frac{p_0}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} = \int_r^R \omega_2^2 r dr. \quad (129)$$

Правые части уравнений (128) и (129) равны между собой:

$$v_2 \left( V_0 + \frac{v_2}{2} \right) - \omega_2 r^2 \left( \Omega - \frac{\omega_2}{2} \right) = \int_r^R \omega_2^2 r dr. \quad (130)$$

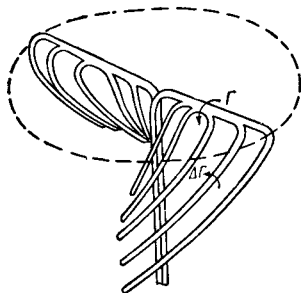
Согласно вихревой теории крыло обычно представляется в виде системы П-образных вихрей (фиг. 169). Фиктивные вихри, которые идут по крылу, называются присоединенными вихрями, а исходящие от них — свободными. Циркуляция скорости по контуру крыла,  $\Gamma$  е присоединенные вихри, меняется вдоль крыла, и сумма циркуляций по контурам, охватывающим составляющие свободные вихри с одной стороны крыла, т. е. одни хвосты П-образных вихрей, равна циркуляции присоединенного вихря в соответствующем месте. Можно также представить кры-

ло в виде одного П-образного вихря (фиг. 170). Тогда циркуляция по контуру, охватывающему свободный вихрь, равна циркуляции по контуру, охватывающему присоединенный вихрь.

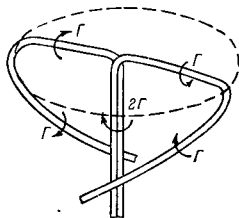


Фиг 170 П-образный одиночный вихрь у крыла

Точно так же можно представить и вихревую систему лопасти винта. С каждой лопасти будет исходить система П-образных вихрей (фиг. 171), которые расположатся приблизительно по винтовым линиям. После каждого свободного вихря с циркуля-



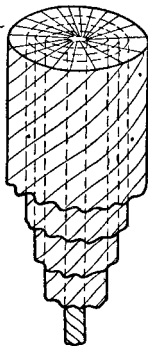
Фиг 171 Система сходящих с лопастей винта П образных вихрей



Фиг 172 Вихревая система винта НЕЖ

цией  $d\Gamma$ , исходящего от присоединенного, циркуляция присоединенного вихря будет увеличиваться или уменьшаться на эту величину  $d\Gamma$ . Если каждую лопасть представить себе в виде одного П-образного вихря, циркуляция которого по охватывающему его контуру равна  $\Gamma$ , то по концам будут сходиться свободные вихри с циркуляцией  $\Gamma$ , а в середине, по оси, циркуляция сложится и общая циркуляция по охватывающему их контуру будет равна  $2\Gamma$  для двухлопастного винта (фиг. 172). Таким образом в первом случае мы имели переменную вдоль лопасти циркуляцию, а во втором — постоянную.

При вращении винта связанные с лопастями вихревые системы устанавливаются в различные положения по отношению к наблюдателю, и ему кажется, что в струе находится корзинка из вихрей. Следовательно, каждый свободный вихрь можно заменить цилиндрической поверхностью, а присоединенные вихри — вихревым донышком, замыкающим эти цилиндрические поверхности (фиг. 173). В случае постоянной вдоль лопасти циркуляции вихревая система представится в виде одного вихревого цилиндра, вихревого донышка и центрального вихревого жгута (фиг. 168).



Фиг. 173 Вихревая система винта с переменной по лопасти циркуляцией.

Указанная вихревая система вызывает вокруг себя поле скоростей. Рассмотрим сначала винт с постоянной циркуляцией по лопасти, у которого вихревая система состоит из одного цилиндра, вихревого донышка и центрального вихревого жгута (фиг. 168). Винт такого типа называется винтом НЕЖ в честь Николая Егоровича Жуковского, который впервые его исследовал. Так как внутри вихревого цилиндра воздух не завихрен, то циркуляция по любому контуру, охватывающему центральный вихревой столб, равна сумме циркуляций всех лопастей, т. е. если циркуляция одной лопасти равна  $\Gamma$ , то циркуляция по указанному контуру равна  $\kappa\Gamma$ .

Если мы теперь обратимся к винту с переменной циркуляцией, то циркуляция по круговому контуру, появляющемуся от пересечения цилиндрических поверхностей с плоскостью, перпендикулярной оси винта, будет равна  $\kappa\Gamma$  и меняться с изменением  $\Gamma$  вдоль лопасти. Но, как известно, циркуляция скорости по контуру есть сумма произведений проекций скорости (на направление элемента контура) на элемент пути. Следовательно, мы можем установить связь между циркуляцией и вызванной винтом скоростью.

По указанному круговому контуру проекция вызванной скорости есть окружная вызванная скорость  $u$ . Как мы уже показали, циркуляция по этому контуру равна  $\kappa\Gamma$ , где  $\Gamma$  — циркуляция у одной лопасти. С другой стороны, эта же циркуляция равна окружной скорости, помноженной на длину контура, т. е. на длину окружности  $2\pi r$ .

Получаем

$$\kappa\Gamma = 2\pi r u,$$

отсюда

$$u_2 = \omega_2 r = \frac{\kappa\Gamma}{2\pi r} \quad \text{или} \quad \omega_2 = \frac{\kappa\Gamma}{2\pi r^2}. \quad (131)$$

Формулой (131) устанавливается связь между циркуляцией и вызванной угловой скоростью. Вставим в уравнение (130) полученное значение для этой скорости

$$v_2 \left( V_0 + \frac{v_2}{2} \right) - \frac{\kappa\Gamma}{2\pi} \left( \Omega - \frac{\kappa\Gamma}{4\pi r^2} \right) = \int_r^R \left( \frac{\kappa\Gamma}{2\pi} \right)^2 \frac{dr}{r^3} \quad (132)$$

и перейдем к отвлеченным обозначениям В. П. Ветчинкина, для чего разделим уравнение (132) на  $\Omega^2 R^2$  и сделаем соответствующие приведения:

$$\bar{v}_2 \left( \bar{V}_0 + \frac{\bar{v}_2}{2} \right) - 2\bar{\Gamma} \left( 1 - \frac{\bar{\Gamma}}{r^2} \right) = 4 \int_{\bar{r}}^1 \bar{\Gamma}^2 \frac{d\bar{r}}{\bar{r}^3}. \quad (133)$$

Если не учитывать центробежные силы, то правая часть этого уравнения обратится в нуль и мы получим

$$\bar{v}_2 \left( \bar{V}_0 + \frac{\bar{v}_2}{2} \right) = 2\bar{\Gamma} \left( 1 - \frac{\bar{\Gamma}}{r^2} \right). \quad (134)$$

Вычислить интеграл правой части уравнения (133) проще всего, когда  $\bar{\Gamma} = \text{const}$ , т. е. в случае винта НЕЖ. Подсчеты показывают, что при переменном  $\bar{\Gamma}$  этот интеграл немного отличается от случая НЕЖ, поэтому мы примем  $\bar{\Gamma} = \text{const}$ ; тогда

$$\bar{v}_2 \left( \bar{V}_0 + \frac{\bar{v}_2}{2} \right) - 2\bar{\Gamma} \left( 1 - \frac{\bar{\Gamma}}{r^2} \right) = 4\bar{\Gamma}^2 \int_{\bar{r}}^1 \frac{d\bar{r}}{\bar{r}^3}$$

или

$$\bar{v}_2 \left( \bar{V}_0 + \frac{\bar{v}_2}{2} \right) = 2\bar{\Gamma}(1 - \bar{\Gamma}). \quad (135)$$

В эту формулу входит вызванная скорость за винтом. Для расчетов удобнее пользоваться скоростью в плоскости винта. Из теории идеального пропеллера известно, что вызванная скорость в плоскости пропеллера вдвое меньше вызванной скорости далеко за пропеллером. Если не принимать во внимание влияние центробежных сил, то это положение будет иметь место и в данном случае. Приближенно можно написать

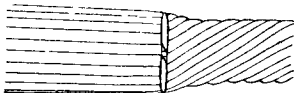
$$\bar{v}_1(\bar{V}_0 + \bar{v}_1) = \bar{\Gamma}(1 - \bar{\Gamma}). \quad (136)$$

Необходимо заметить, что величина  $\bar{\Gamma}$  обычно очень небольшая — порядка 0,005 и по сравнению с единицей ею можно пренебречь, так что в практических расчетах можно пользоваться формулой

$$\bar{v}_1(\bar{V}_0 + \bar{v}_1) = \bar{\Gamma}. \quad (137)$$

При учете влияния центробежных сил на вызванные скорости такого простого соотношения между вызванными скоростями в плоскости винта и далеко за винтом не получается. Вызванная скорость в плоскости винта будет немного больше половины скорости далеко за винтом. Это соотношение можно вывести на основании уравнения Бернулли, оно имеет такой вид:

$$\bar{v}_1 = \frac{v_2}{2} (1 + \bar{\Gamma}). \quad (138)$$



Фиг. 174 Струя винта.

Если теперь учесть сжатие струи и влияние центробежных сил, то окончательно получится формула

$$\bar{v}_1(\bar{V}_0 + \bar{v}_1) = \bar{\Gamma}(1 - \bar{\Gamma}^2). \quad (139)$$

Решая уравнение (137) относительно  $\bar{v}_1$ , получим

$$\bar{v}_1 = -\frac{\bar{V}_0}{2} + \sqrt{\frac{\bar{V}_0^2}{4} + \bar{\Gamma}}. \quad (140)$$

Минус перед корнем нельзя взять потому, что тогда получится отрицательное значение  $v_1$ .

Эта формула устанавливает связь между циркуляцией вокруг лопасти и вызванной винтом скорости в его плоскости.

Для скорости в плоскости винта будем иметь

$$\bar{V}_1 = \frac{\bar{V}_0}{2} + \sqrt{\frac{\bar{V}_0^2}{4} + \bar{\Gamma}}. \quad (141)$$

Так как циркуляция скорости перед винтом по любому и, в частности, по круговому контуру равна нулю, то окружная вызванная скорость перед винтом тоже равна нулю и струя перед винтом не закручена (фиг. 174).



Окружная скорость вращения лопасти равна

$$\bar{U}_0 = \frac{\Omega r}{\Omega R} = r. \quad (142)$$

Вызванная окружная скорость далеко за винтом согласно уравнению (131) в отвлеченных обозначениях будет

$$\bar{u}_2 = \frac{\kappa \Gamma}{2\pi \Omega r R} = \frac{2\bar{\Gamma}}{r}. \quad (143)$$

Окружная скорость в плоскости винта, как мы знаем из теории идеального винта, вдвое меньше вызванной окружной скорости далеко за винтом, что мы приближенно можем принять и здесь, и, следовательно,

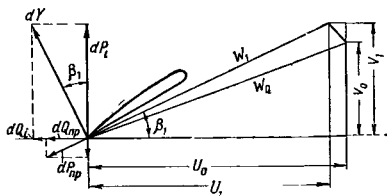
$$u_1 = \frac{\bar{\Gamma}}{r}, \quad (144)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_0 - \bar{u}_1 = r - \frac{\bar{\Gamma}}{r}. \quad (145)$$

Заметим, что все выведенные формулы с достаточной для практики точностью можно применять не только при постоянной вдоль лопасти циркуляции, но также и при переменной циркуляции.

### § 3. Формулы силы тяги и мощности. Уравнение связи

Рассмотрим какое-либо сечение лопасти (фиг. 175). Как и в случае, рассмотрим в теории изолированного элемента ло-



Фиг. 175 Распределение сил на элементе лопасти

пасти, спроектируем подъемную силу и лобовое сопротивление элемента лопасти на направление оси винта и на направление, перпендикулярное ему. Проекции подъемной силы назовем индуктивными силами, а проекции лобового сопротивления, которое в данном случае является профильным, назовем профиль-

ными силами. Профильные силы одной лопасти по фиг. 170 найдем, принимая во внимание, что  $\frac{dX}{dY} = \mu$ ,

$$\frac{dP_{np}}{\kappa} = -dX \sin \beta_1 = -\mu dY \sin \beta_1 = -\mu dQ_p,$$

$$\frac{dQ_{np}}{\kappa} = dX \cos \beta_1 = \mu dY \cos \beta_1 = \mu dP_i.$$

Элементарные тяга и окружное усилие  $\kappa$  лопастей будут

$$\left. \begin{aligned} dP &= dP_i + dP_{np} = dP_i - \mu dQ_i, \\ dQ &= dQ_i + dQ_{np} = dQ_i + \mu dP_i. \end{aligned} \right\} \quad (146)$$

Следовательно, для определения этих сил необходимо найти выражение для индуктивных сил. Для этого воспользуемся теоремой Жуковского. Эта теорема читается так: сила реакции жидкости на крыло длиной  $l$  с циркуляцией  $\Gamma$  перпендикулярна к направлению скорости в бесконечности, равна плотности жидкости, помноженной на циркуляцию, на скорость потока в бесконечности и на длину крыла. Направление этой реакции получится, если взять вектор, представляющий скорость в бесконечности, и повернуть его на прямой угол в сторону, обратную циркуляции. Для индуктивных сил  $dP_i$  и  $dQ_i$  такими скоростями в бесконечности будут соответственно  $U_1$  и  $V_1$ . Тогда эти силы по теореме Жуковского можно выразить следующим образом:

$$dP_i = \kappa \rho \Gamma U_1 dr,$$

$$dQ_i = \kappa \rho \Gamma V_1 dr.$$

Подставляем эти выражения в формулы (146):

$$dP = \kappa \rho \Gamma U_1 dr - \mu \kappa \rho \Gamma V_1 dr,$$

$$dQ = \kappa \rho \Gamma V_1 dr + \mu \kappa \rho \Gamma U_1 dr.$$

Так как согласно фиг. 170

$$\frac{V_1}{U_1} = \operatorname{tg} \beta_1,$$

то

$$\left. \begin{aligned} dP &= \kappa \rho \Gamma U_1 (1 - \mu \operatorname{tg} \beta_1) dr, \\ dQ &= \kappa \rho \Gamma V_1 (1 + \mu \operatorname{ctg} \beta_1) dr. \end{aligned} \right\} \quad (147)$$

Мощность, потребляемая винтом, будет выражаться как произведение момента на лопастях на угловую скорость вращения лопастей

$$dT = dM\Omega$$

или

$$dT = dQr\Omega = \kappa\rho\Gamma V_1 U_0 (1 + \mu \operatorname{ctg} \beta_1) dr.$$

Элементарный коэффициент полезного действия (одного элемента лопасти, находящегося на радиусе  $r$ ) выразится так:

$$\eta = \frac{dPV_0}{dT} = \frac{V_0}{V_1} \frac{U_1}{U_0} \frac{1 - \mu \operatorname{tg} \beta_1}{1 + \mu \operatorname{ctg} \beta_1}. \quad (148)$$

Из теории идеального пропеллера и винта следует, что первые два члена произведения равны соответственно осевому и окружному коэффициентам полезного действия  $\eta_{ос}$  и  $\eta_{окр}$ . Последний член мы можем назвать профилльным коэффициентом полезного действия  $\eta_{пр}$ . Таким образом

$$\eta_{ос} = \frac{V_0}{V_1}; \quad \eta_{окр} = \frac{U_1}{U_0}; \quad \eta_{пр} = \frac{1 - \mu \operatorname{tg} \beta_1}{1 + \mu \operatorname{ctg} \beta_1};$$

$$\eta = \eta_{ос} \cdot \eta_{окр} \cdot \eta_{пр}.$$

Перейдем к отвлеченным обозначениям Ветчинкина. Элементарная тяга всех лопастей будет

$$d\bar{P} = 2\bar{\Gamma} \bar{U}_1 (1 - \mu \operatorname{tg} \beta_1) d\bar{r},$$

а мощность

$$dT = 2\bar{\Gamma} V_1 (1 + \mu \operatorname{ctg} \beta_1) \bar{r} d\bar{r},$$

или, подставляя вместо

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\bar{V}_1}{\bar{U}_1},$$

получим

$$\left. \begin{aligned} d\bar{P} &= 2\bar{\Gamma} (\bar{U}_1 - \mu \bar{V}_1) d\bar{r}, \\ dT &= 2\bar{\Gamma} (\bar{V}_1 + \mu \bar{U}_1) \bar{r} d\bar{r}. \end{aligned} \right\}$$

Интегрируя по всей лопасти от радиуса  $\bar{r}_0$ , с которого начинается работающая часть лопасти, получим формулы для тяги и мощности всего винта:

$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= 2 \int_{\bar{r}_0}^b \bar{\Gamma} (\bar{U}_1 - \mu \bar{V}_1) d\bar{r}, \\ \bar{T} &= 2 \int_{\bar{r}_0}^b \bar{\Gamma} (\bar{V}_1 + \mu \bar{U}_1) \bar{r} d\bar{r}. \end{aligned} \right\} \quad (149)$$

В этих формулах величины  $\bar{\Gamma}$ ,  $\bar{U}_1$ ,  $\bar{V}_1$  и  $\mu$  являются переменными по радиусу. Следовательно, интегрирование можно выполнить, если известно распределение этих величин по радиусу лопасти. В одном случае это интегрирование можно довести до конца очень просто. Это случай винта НЕЖ, у которого циркуляция  $\bar{\Gamma}$  и, следовательно, скорость  $\bar{V}_1$  постоянны по лопасти. Кроме того, винт можно сконструировать так, чтобы и величина  $\mu$  была постоянна по лопасти, или во всяком случае изменялась бы очень мало, чтобы и ее можно было принять постоянной. В формулах (149) заменим  $\bar{U}_1$  его значением

$$\bar{U}_1 = r - \frac{\bar{\Gamma}}{r},$$

тогда

$$\bar{P} = 2\bar{\Gamma} \int_{\bar{r}_0}^1 \left( \bar{r} - \frac{\bar{\Gamma}}{r} - \mu \bar{V}_1 \right) d\bar{r},$$

$$\bar{T} = 2\bar{\Gamma} \int_{\bar{r}_0}^1 \left( \bar{V}_1 + \mu \bar{r} - \mu \frac{\bar{\Gamma}}{r} \right) \bar{r} d\bar{r}.$$

Выполняя интегрирование, получаем для винта НЕЖ

$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= \bar{\Gamma} [1 - \bar{r}_0^2 + 2\bar{\Gamma} \ln \bar{r}_0 - 2\mu \bar{V}_1 (1 - \bar{r}_0)], \\ \bar{T} &= \bar{\Gamma} [\bar{V}_1 (1 - \bar{r}_0^2) + \frac{2}{3} \mu (1 - \bar{r}_0^3) - 2\mu \bar{\Gamma} (1 - \bar{r}_0)]. \end{aligned} \right\} (150)$$

Найдем теперь выражение коэффициента полезного действия винта НЕЖ. Имеем

$$\eta = \frac{PV_0}{T} = \frac{\bar{P}\bar{V}_0}{\bar{T}}.$$

Подставляя в эту формулу значения тяги и мощности по (150), получим коэффициент полезного действия винта НЕЖ

$$\eta = \frac{[1 - \bar{r}_0^2 + 2\bar{\Gamma} \ln \bar{r}_0 - 2\mu \bar{V}_1 (1 - \bar{r}_0)] \bar{V}_0}{(1 - \bar{r}_0^2) \bar{V}_1 + \frac{2}{3} \mu (1 - \bar{r}_0^3) - 2\mu \bar{\Gamma} (1 - \bar{r}_0)}.$$

Эту формулу можно представить в таком виде:

$$\eta = \frac{\bar{V}_0}{\bar{V}_1} \frac{1 - \bar{r}_0^2 + 2\bar{\Gamma} \ln \bar{r}_0 - 2\mu \bar{V}_1 (1 - \bar{r}_0)}{(1 - \bar{r}_0^2) \bar{V}_1 + \frac{2}{3} \mu (1 - \bar{r}_0^3) - 2\mu \bar{\Gamma} (1 - \bar{r}_0)} \bar{V}_1,$$

где первый член произведения — осевой к. п. д., а второй — произведение окружного на профильный. Окружной можно найти, если положить  $\mu=0$ :

$$\gamma_{\text{окр}} = \frac{1 - r_0^2 + 2\Gamma \ln \bar{r}_0}{1 - r_0^2},$$

а профильный будет

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{[1 - \bar{r}_0^2 + 2\bar{\Gamma} \ln \bar{r}_0 - 2\mu \bar{V}_1 (1 - \bar{r}_0)] \bar{V}_1 (1 - \bar{r}_0^2)}{[(1 - \bar{r}_0^2) \bar{V}_1 + \frac{2}{3} \mu (1 - \bar{r}_0^3) - 2\mu \bar{\Gamma} (1 - \bar{r}_0)] (1 - \bar{r}_0^2 + 2\bar{\Gamma} \ln \bar{r}_0)}$$

Уравнение связи в вихревой теории может быть найдено сопоставлением сопротивления, выражаемого при посредстве циркуляции, и сопротивления, выражаемого по общим законам экспериментальной аэродинамики, т. е. через коэффициенты сопротивления.

По теореме Жуковского подъемная сила

$$Y = \rho \Gamma V l.$$

Для элемента лопасти длиной  $dr$  она будет

$$dY = \rho \Gamma W_1 dr.$$

Та же подъемная равна

$$dY = c_y \rho b dr \frac{W_1^2}{2}.$$

Из сопоставления обеих формул получим

$$\Gamma = \frac{1}{2} c_y b W_1$$

или в отвлеченных обозначениях Ветчинкина

$$\bar{\Gamma} = \frac{1}{2} c_y \bar{b} \bar{W}_1. \quad (151)$$

Это и есть *уравнение связи*. В данном случае поток, определяемый величинами  $\bar{\Gamma}$  и  $\bar{W}_1$ , связывается с лопастью, определяемой величинами  $\bar{b}$  и  $c_y$ .

#### § 4. Дальнейшие развития вихревой теории винта Н. Е. Жуковского. Лопастная теория

В вихревой теории винта Н. Е. Жуковского имеется три основных допущения, а именно:

1. Система вихрей, которая располагается по линиям токов относительного движения, принята для границы струи в виде цилиндра диаметром, равным диаметру винта.

2. Система вихрей принята в виде вихревой цилиндрической поверхности с циркуляцией, равной сумме циркуляций около лопастей.

3. Поле скоростей вокруг винта представляется в виде средних по окружности цилиндра скоростей.

Принятие этих допущений ведет к тому, что:

1. Выведенные формулы, строго говоря, пригодны только в том случае, когда струя винта по форме близка к цилиндру, т. е. сжатие ее невелико. Мы видели, что сжатие невелико тогда, когда нагрузка тягой на диск винта невелика (см. § 1 гл. IV), т. е. в случае, как говорят, слабо нагруженного винта.

2. Тяга и мощность прямо пропорциональны числу лопастей.

3. Осредненные скорости не дают той периодичности в работе винта, которая имеет место в действительности.

Н. Е. Жуковский отчетливо представлял себе все недостатки своей теории и поэтому им же была намечена программа дальнейших работ по вихревой теории винта, которые устранили бы эти недостатки. Так в конце его второй статьи по вихревой теории винта<sup>1</sup> написано:

«В дальнейшем развитии этой теории надо будет заменить соосные цилиндры некоторыми поверхностями вращения, которые при удалении от винта переходят в соосные цилиндры».

Такая работа была проделана Ф. И. Франклем и М. В. Келдышем, и оказалось, что принятие струи за поверхность вращения с учетом сжатия весьма усложняет теорию и не оправдывается теми небольшими поправками, которые могут быть введены.

Далее, в конце первой статьи по вихревой теории винта<sup>1</sup> Н. Е. Жуковский пишет:

«Основная идея присоединенных вихрей, положенных в основание этой статьи, позволила бы вести все вычисления, опираясь на истинные скорости относительного движения жидкости, но анализ этот вышел бы очень сложным».

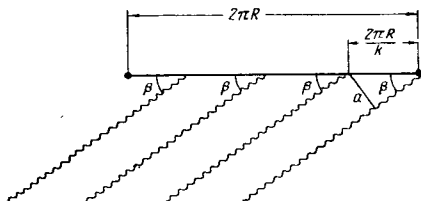
Принятие вихревой схемы в виде системы вихрей, сбегających с каждой лопасти (фиг. 171), позволяет вычислить истинные скорости, вызванные отдельными лопастями, почему такая теория и называется «лопастной».

Эта лопастная теория, развитая Б. Н. Юрьевым, а затем Г. И. Майкапаром и Д. В. Халезовым, является дальнейшим усовершенствованием вихревой теории Жуковского.

На основе вихревой теории В. П. Ветчинкиным была создана методика расчета наивыгоднейших винтов, названных им «вариационными». В этой теории определяется наивыгоднейшее распределение циркуляции вдоль лопасти с одновременным учетом прочности последней.

<sup>1</sup> См. сноску на стр. 30.

Рассмотрим основные положения лопастной теории. Замена отдельных винтовых свободных вихрей слоями вихрей, равномерно распределенных по цилиндрическим поверхностям, дала возможность Н. Е. Жуковскому вычислить вызванные скорости в конечном виде, что существенно упростило вихревую теорию. Такая замена, эквивалентная вычислению средних по окружностям скоростей вместо истинных, не вносит, как удалось показать в дальнейшем, существенных погрешностей в случае большого числа лопастей. Она допустима также при сравнительно небольших относительных поступях ( $\lambda < 1$ ), т. е. в тех случаях, когда относительное расстояние между свободными вихревыми поверхностями  $\sigma = \frac{a}{2\pi R} < 0,2$ ; здесь  $a$  — расстояние между



Фиг. 176. Развернутая цилиндрическая поверхность вихревой системы.

краями соседних вихревых поверхностей, измеренное на развернутой цилиндрической поверхности (фиг. 176). Из этой фигуры находим

$$\alpha = \frac{2\pi R}{\kappa} \sin \beta = \frac{2\pi R}{\kappa} \frac{V_0}{\sqrt{V_0^2 + \Omega^2 R^2}} = \frac{2\pi R}{\kappa} \frac{\bar{V}_0}{\sqrt{1 + \bar{V}_0^2}}.$$

Однако при больших относительных поступях винта отличие истинной вызванной скорости от средней настолько существенно, что расчет по вихревой теории Н. Е. Жуковского приводит к заметным погрешностям, что и вызвало необходимость вычисления истинных скоростей, т. е. скоростей, вызванных винтовыми вихрями по осям присоединенных вихрей. Эти вычисления были выполнены на основании замечательной работы Н. Е. Жуковского по вихревой теории винта и дали возможность построить метод расчета воздушных винтов, подобный методу расчета крыла конечного размаха.

В основе этого метода расчета, так же как и в основе расчета крыла, лежат: 1) гипотеза «плоских сечений» и 2) предположение о малости вызванных скоростей по сравнению со ско-

ростью полета  $V_0$  и окружной скоростью  $\Omega R$ , позволяющее считать свободные вихри винтовыми.

Следует отметить, что такая простая вихревая схема применима только в тех случаях, когда свободные вихри нормальны к присоединенным. Случаи саблевидных лопастей, косо обдувки винта требуют дополнительного анализа. Отметим еще, что влияние сжимаемости воздуха на величину вызванной скорости мало при дозвуковой скорости конца лопасти и им можно пренебречь.

В первой статье по вихревой теории Н. Е. Жуковский пишет: «Я предполагаю, что движение жидкости около вращающегося пропеллера управляется вихревым шнуром, который представляет осевой вихревой столб под винтом, вращающийся в сторону вращения пропеллера с циркуляцией  $2\Gamma$ . Этот вихревой столб разделяется на две системы присоединенных вихрей<sup>1</sup>, идущих внутри полостей винта, так что циркуляция скорости по контурам, охватывающим лопасти, равна  $\Gamma$ , и опускается, выходя из концов лопастей, вниз в виде двух винтовых вихревых шнуров с циркуляциями  $\bar{\Gamma}$ . При этом присоединенные вихри могут быть и с отрицательными циркуляциями, лишь бы сумма всех циркуляций была равна  $2\bar{\Gamma}$ ».

Вихревая схема с  $k$  лопастями и изменяющейся по радиусу циркуляцией состоит из  $k$  присоединенных вихрей, от которых отходят свободные вихревые поверхности (фиг. 177). Для вычисления скорости, вызываемой такой системой, сначала найдем скорость, вызываемую винтом с постоянной вдоль лопасти циркуляцией, т. е. вихревая система лопасти винта предполагается состоящей из свободного винтового вихря, присоединенного вихря и вихревого осевого столба.

Нахождение поля скоростей, вызванного такой системой вихрей, может быть сделано с помощью теоремы Био—Савара<sup>2</sup>. Найдем вызванные свободным вихрем скорости в плоскости винта у его лопастей. Расположим оси координат так, как показано на фиг. 178, причем ось  $z$  направим вдоль одной из лопастей. Для указанной схемы вихрей циркуляция вдоль лопасти постоянна и равна  $\Gamma$ . Вызванная осевая скорость выразится следующим образом:

$$d\bar{v} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{(z - z_0) dx_0 - (x - x_0) dz_0}{r_1^3}$$

$x, y, z$  — координаты точки  $N$ , в которой определяется вызванная вихрем скорость, а  $x_0, y_0, z_0$  — координаты элемента вихря. Так как в данном случае нас интересует только вызванная осевая

<sup>1</sup> Имеется в виду двухлопастный винт

<sup>2</sup> См В Л Александров, Техническая гидромеханика, М—Л, 1946, гл IV, § 4



скорость в плоскости винта, то точку  $N$  возьмем в этой плоскости. Заменяем входящие в предыдущую формулу величины следующими (фиг. 178):

$$x=0;$$

$$x_0 = r' \sin(\theta + \sigma)$$

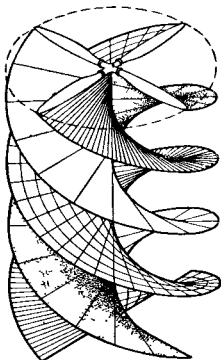
$$y=0;$$

$$y_0 = \frac{V_0}{\Omega} \theta$$

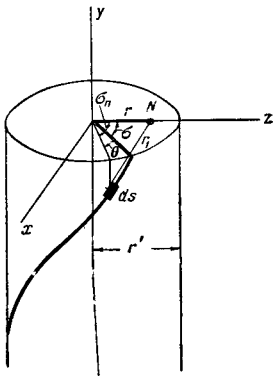
$$z=r;$$

$$z_0 = r' \cos(\theta + \sigma)$$

$$dx_0 = ds \cos \beta \cos(\theta + \sigma); \quad dz_0 = -ds \cos \beta \sin(\theta + \sigma).$$



Фиг. 177 Система вихрей у винта, принятая в лопастной теории.



Фиг. 178. Создание вихрем поля скоростей.

Так как  $ds \cos \beta = r' d\theta$ , то

$$dx_0 = r' d\theta \cos(\theta + \sigma); \quad dz_0 = -r' \sin(\theta + \sigma) d\theta.$$

Кроме того,

$$z - z_0 = r - r' \cos(\theta + \sigma); \quad x - x_0 = -r' \sin(\theta + \sigma);$$

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{r^2 + r'^2 + y_0^2 - 2rr' \cos(\theta + \sigma)} = \\ &= \sqrt{r^2 + r'^2 + \left(\frac{V_0}{\Omega} \theta\right)^2 - 2rr' \cos(\theta + \sigma)}. \end{aligned}$$

Подставляя все эти выражения в формулу для  $dV$ , будем иметь следующее выражение для вызванной элементом вихря  $ds$  осевой скорости в точке  $N$ :

$$\begin{aligned} dv &= \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{[r - r' \cos(\theta + \sigma)] r' \cos(\theta + \sigma) d\theta - r'^2 \sin^2(\theta + \sigma) d\theta}{r_1^3} = \\ &= \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{[r' r \cos(\theta + \sigma) - r'^2 \cos^2(\theta + \sigma) - r'^2 \sin^2(\theta + \sigma)] d\theta}{r_1^3} = \\ &= \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{r' - r \cos(\theta + \sigma)}{\left[ r^2 + r'^2 + \left( \frac{V_0}{\Omega} \theta \right)^2 - 2rr' \cos(\theta + \sigma) \right]^{\frac{3}{2}}} r' d\theta. \end{aligned}$$

Действие всего свободного вихря на точку  $N$  найдется, если проинтегрировать это выражение по  $\theta$  в пределах от  $\theta = 0$  до  $\theta = \omega$ .

$$v = \frac{\Gamma \Omega}{4\pi V_0} \int_0^{\omega} \frac{r' - r \cos(\theta + \sigma)}{\left[ r^2 + r'^2 + \left( \frac{V_0}{\Omega} \theta \right)^2 - 2rr' \cos(\theta + \sigma) \right]^{\frac{3}{2}}} r' d\left( \theta \frac{V_0}{\Omega} \right). \quad (152)$$

Формула (152) выражает собой воздействие на точку  $N$  только свободных вихрей. Присоединенные вихри не действуют на точку  $N$ . Действительно, присоединенный вихрь лопасти, на которой находится точка  $N$ , не действует на  $N$ , так как эта точка находится в центре вихря; присоединенные же вихри других лопастей вызывают в точке  $N$  скорости, противоположные по направлению, которые и сокращаются. Остается только еще воздействие центрального вихревого столба; однако он не вызывает осевых скоростей.

Если имеется  $k$  лопастей, то угол между  $n$ -ой лопастью и рассматриваемой, принятой за первую, т. е. на которой находится точка  $N$ , лежащая в плоскости лопастей и на которую действует свободный вихрь  $n$ -ой лопасти, будет

$$\sigma_n = \frac{2\pi(n-1)}{k},$$

а угол  $\theta_n$  будет

$$\theta_n = \theta + \sigma_n.$$

Тогда вызванная вихревой системой осевая скорость (фиг. 178) точки  $N$  выразится следующим образом:

$$v = \frac{\Gamma \Omega}{4\pi V_0} \sum_{n=1}^{n=\kappa} \int_0^{\infty} \frac{r' [r' - r \cos(\theta + \sigma_n)]}{\left[ r^2 + r'^2 + \left( \frac{V_0}{\Omega} \theta_n \right)^2 - 2rr' \cos(\theta + \sigma_n) \right]^{\frac{3}{2}}} \times \\ \times d\left( \theta \frac{V_0}{\Omega} \right).$$

Первая попытка решить приведенный в этой формуле интеграл принадлежит Б. Н. Юрьеву<sup>1</sup>. Решение было произведено графически и результат получился только качественный.

Для решения всей задачи необходимо составить заранее таблицы или графики функций, которой выражается этот интеграл, причем следует подобрать такую форму ее, которая давала бы возможность наиболее просто произвести вычисление. Такая работа была выполнена Г. И. Майкапаром, Д. В. Халезовым и А. М. Лепилкиным<sup>2</sup>.

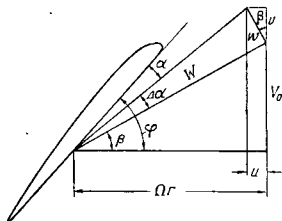
Можно доказать, что при принятых в лопастной теории предположениях полная вызванная винтом скорость нормальна к винтовой линии, представляющей собой линию токов относительного движения (фиг. 179).

Тогда  $\frac{u}{v} = \operatorname{tg} \beta$ . С другой стороны,

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V_0}{\Omega r};$$

отсюда

$$u = v \frac{V_0}{\Omega r}.$$



Фиг. 179. Скоростной многоугольник у сечения лопасти.

Введем обозначение

$$J = \frac{1}{\kappa} \sum_{n=1}^{n=\kappa} \int_0^{\infty} \frac{r' (r' - r \cos \theta_n) d\left( \theta \frac{V_0}{\Omega} \right)}{\left[ r^2 + r'^2 + \left( \frac{V_0}{\Omega} \theta \right)^2 - 2rr' \cos \theta_n \right]^{\frac{3}{2}}}.$$

<sup>1</sup> См. Б. Н. Юрьев. О современном положении теории гребного винта. Вестник Воздушного флота, № 5, 1923.

<sup>2</sup> См. Г. И. Майкапар, А. М. Лепилкин, Д. В. Халезов, Аэродинамический расчет винтов по лопастной теории. Труды ЦАГИ, вып. 529, 1940. А. М. Лепилкин. К вихревой теории изолированного винта. Там же.

Тогда :

$$v = \frac{\kappa \Gamma \Omega}{4\pi V_0} J. \quad (153)$$

Функция  $J$  зависит от ряда величин. Для сокращения ее вычислений вводятся следующие параметры:

$$\rho = \frac{r'}{r}, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{V_0}{\Omega r}.$$

Тогда

$$J = \frac{1}{\kappa} \sum_{n=1}^{n=\kappa} \int_0^{\omega} \frac{\rho (\rho - \cos \theta_n) \operatorname{tg} \beta d\theta}{(1 - 2\rho \cos \theta_n + \rho^2 + \operatorname{tg}^2 \beta \theta^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Так как для данного радиуса  $\operatorname{tg} \beta$  постоянная величина, то

$$J = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\kappa} \sum_{n=1}^{n=\kappa} \int_0^{\omega} \frac{\rho (\rho - \cos \theta_n) d\theta}{(1 - 2\rho \cos \theta_n + \rho^2 + \theta^2 \operatorname{tg}^2 \beta)^{\frac{3}{2}}}.$$

Вычисления показали, что функция  $J$  при  $\rho=1$  обращается в бесконечность, поэтому для удобства вычислений ее лучше представить в виде суммы функций: функции  $\frac{1}{\rho-1}$ , функции  $\ln |\rho-1|$ , имеющих разрыв при  $\rho=1$ , и конечной функции  $J_0$ . При этом мы можем представить функцию  $J$  в следующем виде:

$$J = \frac{\sin \beta}{\kappa} \left[ \frac{1}{\rho-1} - \frac{1}{2} \cos^2 \beta \ln |\rho-1| \right] + J_0;$$

отсюда

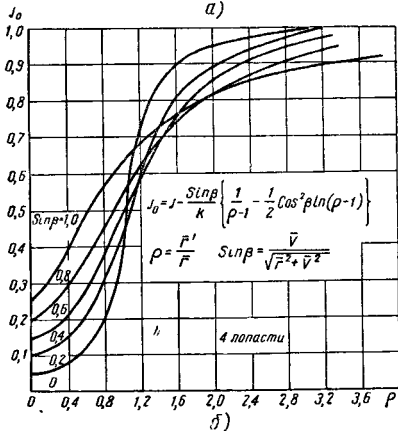
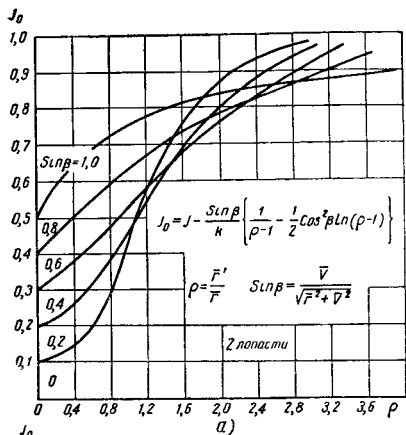
$$J_0 = J - \frac{\sin \beta}{\kappa} \left[ \frac{1}{\rho-1} - \frac{1}{2} \cos^2 \beta \ln |\rho-1| \right].$$

При определенном числе лопастей  $\kappa$  функция  $J_0$  зависит только от  $\rho = \frac{r'}{r}$  и  $\beta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{V_0}{\Omega r}$  и может быть заранее вычислена (фиг. 180).

Посмотрим теперь, как можно приложить данную теорию к практическому расчету винта. Прежде всего заметим, что в этой теории приняты, кроме указанных выше, следующие допущения.

1. Воздух принят невязким и несжимаемым. То и другое учитывается в характеристиках дужки  $c_y$  и  $c_z$ .

2. Предполагается линейная зависимость коэффициента подъемной силы  $c_y$  от угла атаки  $\alpha$ .

Фиг 180 Функция  $J_0$  лопастной теории.

Как мы уже видели при рассмотрении вихревой теории винта Н. Е. Жуковского, основным уравнением при расчете является уравнение связи лопасти с потоком

$$2\bar{\Gamma} = c_y \bar{b} \bar{W}.$$

Его мы можем преобразовать следующим образом:

$$2\bar{\Gamma} = a_\infty \alpha \bar{b} \bar{W},$$

где

$$a_\infty = \frac{dc_y}{d\alpha}$$

есть наклон прямой  $c_y$  для дужки бесконечного размаха к оси абсцисс. Согласно фиг. 179 угол атаки  $\alpha$  будет

$$\alpha = \varphi - \beta - \Delta\alpha.$$

Но из фиг. 179  $\Delta\alpha \approx \frac{w}{W} = \frac{\bar{w}}{\bar{W}}$  — угол скоса потока. Таким образом

$$\bar{\Gamma} = \frac{1}{2} a_\infty \left( \varphi - \beta - \frac{\bar{w}}{\bar{W}} \right) \bar{b} \bar{W}. \quad (154)$$

Согласно формуле (153) вызванная винтом скорость выражается через функцию  $I$  и циркуляцию  $\Gamma$ .

Элементарный вихрь радиуса  $r'$  с циркуляцией  $d\Gamma$  вызовет в точке  $r$  на лопасти осевую скорость

$$dv = \frac{\kappa \Omega}{4\pi V_0} J d\Gamma$$

или в отвлеченных обозначениях В. П. Ветчикина

$$d\bar{v} = \frac{\kappa}{V_0} J d\bar{\Gamma}.$$

Интегрируя по всему радиусу лопасти, найдем вызванную винтом осевую скорость в точке  $r$  на лопасти:

$$\bar{v} = \frac{\kappa}{V_0} \int_0^1 \frac{d\bar{\Gamma}}{d\bar{r}'} J dr'$$

или иначе

$$\bar{v} = \frac{\kappa}{V_0} \int_0^{\bar{\rho}} J d\bar{\Gamma},$$

Как мы уже видели при рассмотрении вихревой теории винта Н. Е. Жуковского, основным уравнением при расчете является уравнение связи лопасти с потоком

$$2\bar{\Gamma} = c_y \bar{b} \bar{W}.$$

Его мы можем преобразовать следующим образом:

$$2\bar{\Gamma}' = a_\infty \alpha \bar{b} \bar{W},$$

где

$$a_\infty = \frac{dc_y}{d\alpha}$$

есть наклон прямой  $c_y$  для дужки бесконечного размаха к оси абсцисс. Согласно фиг. 179 угол атаки  $\alpha$  будет

$$\alpha = \varphi - \beta - \Delta\alpha.$$

Но из фиг. 179  $\Delta\alpha \approx \frac{w}{W} = \frac{\bar{w}}{\bar{W}}$  — угол скоса потока. Таким образом

$$\bar{\Gamma}' = \frac{1}{2} a_\infty \left( \varphi - \beta - \frac{\bar{w}}{\bar{W}} \right) \bar{b} \bar{W}. \quad (154)$$

Согласно формуле (153) вызванная винтом скорость выражается через функцию  $I$  и циркуляцию  $\Gamma$ .

Элементарный вихрь радиуса  $r'$  с циркуляцией  $d\Gamma$  вызовет в точке  $r$  на лопасти осевую скорость

$$d\bar{v} = \frac{\kappa \Omega}{4\pi V_0} J d\Gamma'$$

или в отвлеченных обозначениях В. П. Ветчикина

$$d\bar{v} = \frac{\kappa}{V_0} J d\bar{\Gamma}'.$$

Интегрируя по всему радиусу лопасти, найдем вызванную винтом осевую скорость в точке  $r$  на лопасти:

$$\bar{v} = \frac{\kappa}{V_0} \int_0^1 \frac{d\bar{\Gamma}'}{d\bar{r}'} J dr'$$

или иначе

$$\bar{v} = \frac{\kappa}{V_0} \int_0^{\bar{\Gamma}'} J d\bar{\Gamma}',$$

где

$$\bar{\rho} = \frac{1}{r}.$$

Результирующая вызванная скорость  $\bar{\omega}$  согласно фиг. 179 будет

$$\bar{\omega} = \frac{\bar{v}}{\cos \beta};$$

так как

$$\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{\bar{V}_0}{r},$$

то

$$\bar{\omega} = \kappa \sqrt{\frac{1}{V_0^2} + \frac{1}{r^2}} \int_0^{\bar{\varphi}} J d\Gamma. \quad (155)$$

Вставляя это выражение для  $\bar{\omega}$  в формулу (154), получим

$$\bar{\Gamma} = \frac{1}{2} a_{\infty} \left[ \varphi - \beta^0 - \kappa \sqrt{\frac{1}{V_0^2} + \frac{1}{r^2}} \int_0^{\bar{\varphi}} J d\Gamma \right] \bar{b} \bar{\omega}. \quad (156)$$

Уравнение (156) может быть решено способами, которые применяются в теории крыла конечного размаха, в частности, с помощью представления  $\bar{\Gamma}$  в виде тригонометрического ряда.

Представим циркуляцию  $\bar{\Gamma}$  следующим рядом:

$$\bar{\Gamma}(\varphi) = \sum_{m=1}^{m=\infty} A_m \sin m\varphi (1 - \cos \varphi), \quad (157)$$

где  $\cos \varphi = 1 - 2 \frac{\bar{r}}{r}$ ,  $A_m$  — коэффициенты ряда.

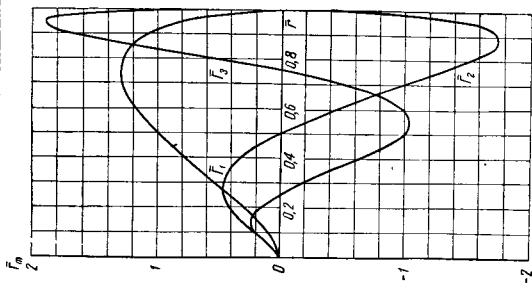
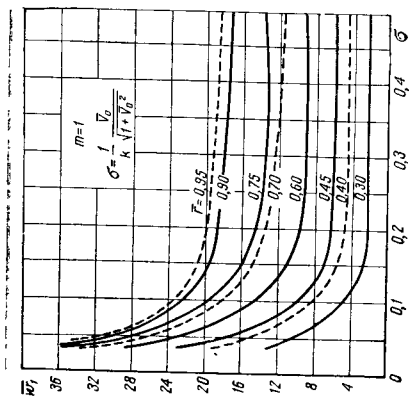
Обозначим

$$\bar{\Gamma}_m = \sin m\bar{\varphi} (1 - \cos \bar{\varphi}).$$

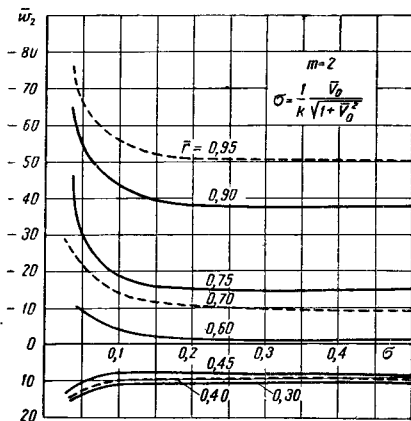
На фиг. 181 даны значения  $\bar{\Gamma}_m$  для первых трех членов ряда.  $\bar{\Gamma}_m$  представляет собой величину, пропорциональную членам ряда, на которые можно разложить циркуляцию  $\bar{\Gamma}$  вокруг лопасти винта на определенном радиусе лопасти. Так как вызванная полная скорость  $\bar{\omega}$  зависит, как мы видим, от циркуляции, и если обозначить через  $\bar{\omega}_m$  вызванную в плоскости винта скорость, соответствующую циркуляции  $\bar{\Gamma}_m$ , то вызванную скорость  $\bar{\omega}$  можно представить таким рядом:

$$\bar{\omega} = \sum_{m=1}^{m=\infty} A_m \bar{\omega}_m. \quad (1.8)$$



Фиг. 181. Значения функций  $\Gamma_m$ .Фиг. 182. Значения функции  $\omega_1$ .

Функции  $\bar{\omega}_m$  можно заранее вычислить по формуле (155), подставляя вместо  $\bar{\Gamma}$  соответственно  $\bar{\Gamma}_m$ . Величина  $\bar{\omega}_m$  зависит от  $\bar{r}$  и от  $\bar{V}_0$ . Вычисления показали, что функции  $\bar{\omega}_m$ , вычисленные для различных  $\kappa$ , совпадают, будучи построены по  $\sigma$ . На фиг. 182, 183 и 184 приведены кривые  $\bar{\omega}_m$  для первых трех членов ряда (157), построенные по параметру  $\bar{r}$  в функции величины  $\sigma = \frac{\bar{V}_0}{\kappa \sqrt{1 + \bar{V}_0^2}}$ . Подставляем выражение для  $\bar{\omega}$ , данное фор-



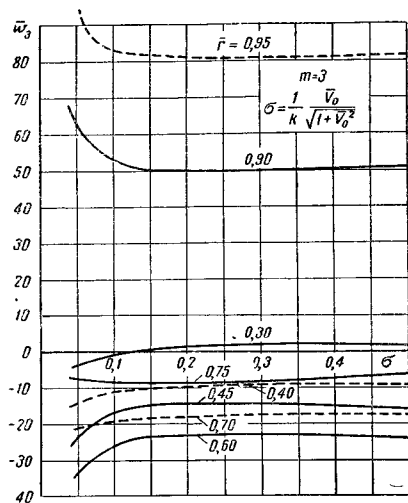
Фиг. 183. Значения функции  $\bar{\omega}_2$ .

мулой (158), и выражение для  $\bar{\Gamma}$  по формуле (157) в формулу (156):

$$\sum_{m=1}^{m=n} A_m (2\bar{\Gamma}_m + a_\infty \bar{b} \bar{\omega}_m) = a_\infty (\varphi - \beta) \bar{b} \bar{W}.$$

Расчеты показывают, что уже три члена ряда (т. е.  $n=3$ ) дают хорошее приближение. Коэффициенты  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  можно определить из условия, что предыдущее равенство имеет место при  $\bar{r}=\bar{r}_1$ ;  $\bar{r}=\bar{r}_2$  и  $\bar{r}=\bar{r}_3$ , причем удобно принять  $\bar{r}_1=0,4$ ;  $\bar{r}_2=0,7$  и  $\bar{r}_3=0,9$ . Тогда мы будем иметь три уравнения с тремя неизвестными

ми.  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ , которые и определяются из этих уравнений. Зная эти коэффициенты, можно определить и распределение циркуляции по лопасти (157), а также вызванную скорость  $\bar{w}$  по формуле (158).



Фиг. 184 Значения функции  $\bar{w}_3$

Величины  $\bar{v}$  и  $\bar{u}$  определяются по следующим формулам:

$$\bar{v} = \bar{w} \cos \beta = \frac{\bar{w} r}{\sqrt{r^2 + \bar{V}_0^2}},$$

$$\bar{u} = \bar{w} \sin \beta = \frac{\bar{w} \bar{V}_0}{\sqrt{r^2 + \bar{V}_0^2}} = \bar{v} \operatorname{tg} \beta.$$

Сравнение расчетов по лопастной теории с результатами испытаний винтов показало, что эта теория дает точность, вполне достаточную для практики

## Глава XI

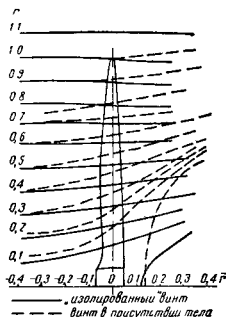
## ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ВИНТА И САМОЛЕТА

## § 1 Физическая сущность взаимного влияния винта и самолета

Во всех разобранных выше теориях мы предполагали, что винт работает вполне изолированно, — вокруг него и в особенности в его струе нет никаких предметов. Между тем на практике такого изолированного действия винта не бывает, — всегда в струе помещается какое либо тело — корпус самолета, крылья, гондола двигателя. Эти тела как то влияют на струю винта и, следовательно, влияют на его работу, т е видоизменяют его аэродинамические характеристики. С другой стороны, и винт тоже влияет на эти тела, видоизменяя их аэродинамические характеристики, уже хотя бы по одному тому, что скорость в струе винта больше, чем скорость полета



Фиг 185 Обтекание тела потоком  
Перед телом поток тормозится



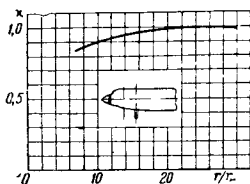
Фиг 186 Линии тока у изолированного винта и у винта в присутствии за винтом тела

Рассмотрим скоростное поле перед движущимся телом (фиг 185). Линии тока перед телом отклоняются в стороны, причем осевая составляющая уменьшается и образуется радиальная составляющая. Таким образом перед телом поток подтормаживается, и если поместить перед телом винт (фиг 186), то он будет работать в подторможенном потоке. На разных радиусах это торможение разное. Найти его можно экспериментальным путем. Обозначим скорость перед телом в плоскости винта, но без присутствия винта, через  $V_{10}$ , а отношение

$$\frac{V_{10}}{V} = \gamma.$$

На фиг 187 даны типичные кривые для коэффициента торможения  $\gamma$  в зависимости от соотношения радиусов  $r/r_m$ , где  $r$  —

радиус в данной точке, а  $r_m$  — приведенный радиус моторной гондолы, выражаемый формулой



Фиг. 187. Зависимость коэффициента торможения от относительного радиуса гондолы.

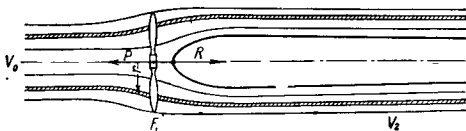
$$r_m = \sqrt{\frac{f}{\pi}}$$

$f$  — миделевое сечение фюзеляжа.

Кроме того, на носовую часть тела действует какая-то сила давления, давая определенное распределение давления по поверхности. Изолированный винт также создает определенное поле скоростей, которые мы определили и в теории идеального пропеллера и в вихревой теории Жуковского. Если теперь поместить в струю винта тело, то оно перераспределит скорости в струе, а следовательно, изменит и силу тяги при одной и той же скорости движения тела и винта.

## § 2. Учет взаимного влияния самолета и винта

Когда в теории идеального пропеллера выводилась формула (31), то предполагалось, что, кроме силы тяги, других сил нет. Предположим, что в струе пропеллера имеется тело, одним



Фиг. 188 Винт с телом, одним концом простирающимся в бесконечность

концом простирающееся в бесконечность (фиг. 188), создающее силу реакции  $R$  от увеличения давления в струе. Эта сила противоположна силе тяги, и, следовательно, формула (31) видоизменится так:

$$P - R = mv_2.$$

Эту же силу тяги можно представить через измененные давления в струе

$$P = \rho \frac{F_1}{2} (V_2^2 - V_0^2).$$

Применим приведенные формулы к элементарной кольцевой струйке. Получим

$$\left. \begin{aligned} dP - dR &= dm(V_2 - V_0) = 2\pi\rho V_1(V_2 - V_0)rdr, \\ dP &= \rho \frac{dF_1}{2}(V_2^2 - V_0^2). \end{aligned} \right\} \quad (159)$$

При наличии тела за винтом соотношения между скоростями  $V_0$  и  $V_1$  и между  $V_2$  и  $V_1$  будут другими, чем в изолированном винте, поэтому можно написать

$$V_0 = V_1(1 - G); \quad V_2 = V_1(1 + H), \quad (160)$$

где  $G$  и  $H$  — некоторые коэффициенты, учитывающие влияние тела на вызванные винтом скорости.

Вставляя эти выражения в формулы (159), получим

$$\left. \begin{aligned} dP - dR &= 2\pi\rho V_1^2(H + G)rdr, \\ dP &= \rho V_1^2 \pi r dr (2 + H - G)(H + G). \end{aligned} \right\} \quad (161)$$

Используем далее теорию изолированного элемента лопасти; будем рассматривать треугольник скоростей, составленный из скоростей  $V_1$ ,  $W_1$ ,  $U_1$ . Согласно формуле (102) получим для кольцевого элемента винта при  $\kappa$  лопастях

$$\begin{aligned} dP &= \kappa(dY \cos \beta_1 - dQ \sin \beta_1) = \frac{\kappa}{2}(c_{y\rho} W_1^2 \cos \beta_1 bdr - \\ &\quad - c_{x\rho} W^2 \sin \beta_1 bdr); \end{aligned}$$

$$\text{так как } c_x = \mu c_y, \text{ то } dP = \frac{\kappa\rho}{2} c_y \cos \beta_1 W_1^2 (1 - \mu \operatorname{tg} \beta_1) bdr.$$

Из фиг. 166 видно, что

$$W_1 = \frac{V_1}{\sin \beta_1},$$

и тогда

$$dP = \frac{\kappa\rho}{2} c_y V_1^2 \frac{\cos \beta_1}{\sin^2 \beta_1} (1 - \mu \operatorname{tg} \beta_1) bdr$$

или

$$dP = 4\pi\rho V_1^2 ardr, \quad (162)$$

где

$$a = \frac{\kappa c_y \cos \beta_1}{8\pi r \sin^2 \beta_1} b (1 - \mu \operatorname{tg} \beta_1). \quad (163)$$

Опыт показывает, что сила давления на носовую часть тела от присутствия винта пропорциональна силе тяги винта, так что можно положить

$$\frac{dR}{dP} = h. \quad (164)$$

Подставим выражение для  $dP$  из формулы (162) в уравнения (161)

$$\begin{aligned} 4\pi\rho V_1^2 a r dr (1-h) &= 2\pi\rho V_1^2 (H+G) r dr, \\ 4\pi\rho V_1^2 a r dr &= \pi\rho V_1^2 (2+H-G)(H+G) r dr \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} 2a(1-h) &= H+G, \\ 4a &= (2+H-G)(H+G). \end{aligned}$$

Из этих уравнений находим  $H$  и  $G$

$$\left. \begin{aligned} H &= a(1-h) + \frac{h}{1-h}, \\ G &= a(1-h) - \frac{h}{1-h}. \end{aligned} \right\} \quad (165)$$

Таким образом соотношения между скоростями (160) зависят от величины  $h$ , определяемой как возрастание в долях тяги давления на тело от влияния винта.

В первом крайнем случае — при отсутствии тела за винтом

$$R=0, \quad h=0, \quad G=H=a,$$

и соотношения (160) примут вид

$$V_0 = V_1(1-a), \quad V_2 = V_1(1+a), \quad (166)$$

откуда

$$v_1 = V_1 a$$

и

$$v_2 = 2v_1.$$

Во втором крайнем случае — при отсутствии винта или, что то же, при тяге, равной нулю, что по уравнению (162) может быть только если  $a=0$ , по уравнениям (165) получаем

$$-H = -\frac{h}{1-h} = G.$$

Подставляем эти значения в (160)

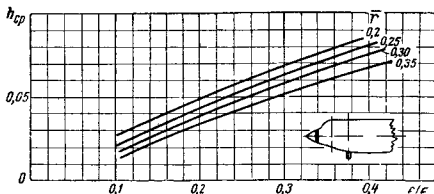
$$V_0 = V_2 = V_1 \frac{1}{1-h}, \quad (167)$$

как видим, в этом случае величина  $h$  характеризует торможение воздуха перед телом.

Мы разбирали влияние тела на кольцевую струйку винта. Перейдем теперь к полиному винту. Так как силы давления на переднюю часть тела от повышения давления в струе винта пропорциональны силе тяги, то можно написать

$$R = h_{\text{ср}} P,$$

и тогда все формулы будут аналогичны выведенным (160), только всюду вместо  $H$  будет  $H_{\text{ср}}$ , вместо  $G$  будет  $G_{\text{ср}}$  и  $h_{\text{ср}}$  будет средним торможением скорости в плоскости винта перед телом при отсутствии винта.



Фиг. 189. Зависимость среднего коэффициента  $h_{\text{ср}}$ , характеризующего среднее торможение потока перед телом, от отношения площади миделевого сечения gondoly к площади, ометаемой винтом.

На фиг. 189 даны типичные кривые  $h_{\text{ср}}$  в зависимости от отношения  $f/F$ , где  $f$  — площадь миделевого сечения gondoly, а  $F$  — ометаемая винтом площадь.

До сих пор мы учитывали влияние винта на тело только тем, что на передней части тела увеличивается давление. Между тем, кроме увеличения давления, влияние винта еще сказывается в том, что тело за винтом находится в потоке с увеличенной скоростью. Если через  $Q_1$  обозначить лобовое сопротивление тела с влиянием обдувки, т. е. увеличенной скорости, а через  $Q_0$  — сопротивление тела при скорости  $V_0$ , т. е. скорости полета без винта, то увеличение лобового сопротивления тела за счет увеличенной скорости за винтом может быть выражено так:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_0 = \frac{1}{2} c_x \rho f (V_1^2 - V_0^2).$$

Но согласно второму уравнению (159), распространенному на весь винт, будем иметь

$$V_1^2 - V_0^2 = \frac{2}{\rho} \frac{P}{F}$$

и

$$\Delta Q = P \frac{c_x f}{F}.$$



Если к этому прибавить добавочное сопротивление  $R$  от давления, то получим ту величину, на которую увеличивается сопротивление тела от влияния винта

$$\Delta Q + R$$

Предположим, что  $P$  — тяга винта, измеренная на его валу в присутствии тела, т. е. тяга, в которой учтено влияние тела на винт. С другой стороны, увеличенное сопротивление тела от влияния винта равно  $R + \Delta Q$ . Вместо того чтобы увеличивать лобовое сопротивление тела от влияния винта, можно просто уменьшить тягу винта на ту же величину, предполагая, что лобовое сопротивление тела не изменилось. Тяга, уменьшенная на величину добавочного лобового сопротивления тела от винта, называется *эффективной тягой*  $P_s$ . Таким образом эффективная тяга будет

$$P_s = P - R - \Delta Q.$$

Здесь под  $P$  подразумевается тяга на валу винта в присутствии тела. Величину  $R + \Delta Q$  мы можем определить из опыта. Сначала определяется сопротивление  $R_1$  тела в присутствии и при работе винта, а затем определяется при той же скорости лобовое сопротивление  $R_0$  тела без винта, тогда

$$P + \Delta Q = R_1 - R_0$$

Следовательно, мы можем эффективную тягу выразить еще так:

$$P_s = P - (R_1 - R_0), \quad (168)$$

где  $P$  — тяга винта в присутствии тела. Следовательно, эффективную тягу можно определить так: *эффективная тяга винта в присутствии тела при данной скорости полета есть та часть тяги, которая потребовалась бы для полета на той же скорости, но без винта.*

Оперировать с эффективной тягой удобно потому, что в ней уже учитывается взаимное влияние винта и самолета. Поэтому при аэродинамическом расчете самолета, оперируя значениями эффективных тяг, больше никаких операций по учету взаимного влияния самолета и винта делать не надо, ибо в самой эффективной тяге это влияние полностью учтено.

Если в выражение для коэффициента полезного действия винта вставить вместо тяги на валу  $P$  эффективную тягу  $P_s$ , то получим так называемый эффективный коэффициент полезного действия

$$\eta_s = \frac{P_s V}{T}. \quad (169)$$

Если эффективный к п. д. используется при аэродинамическом расчете самолета, то также никаких других поправок на влияние самолета на винт вводить не нужно.

Мы уже видели, что величина  $h$  характеризует торможение потока перед телом [формула (167)], и, следовательно, если в плоскости винта скорость потока  $V_1$ , то в присутствии тела она будет  $V_1(1-h)$ . По вихревой теории Жуковского скорость в плоскости винта выражается формулой (141); с учетом влияния самолета она примет вид

$$\bar{V}_1 = (1-h) \left( \frac{V_0}{2} + \sqrt{\frac{V_0^2}{4} + \bar{I}} \right). \quad (170)$$

Мы рассмотрели влияние винта только на лобовое сопротивление самолета, но винт оказывает также влияние и на подъемную силу. Увеличенная скорость перед крылом из-за струи винта увеличивает подъемную силу. Особенно резко это проявляется при малых скоростях полета, когда вызванная винтом добавочная скорость большая. Разбег тяжелых многомоторных самолетов ощутительно уменьшается из-за влияния струи винта, так как у этих самолетов больше половины площади крыла обдувается струей винта. Посмотрим, насколько надо увеличить коэффициент подъемной силы  $c_y$  в случае воздействия струи винта на крыло, обозначив коэффициент подъемной силы с учетом винта через  $c_{y \text{ обд}}$ .

Обозначим подъемную силу не обдуваемой винтом части крыла самолета через  $Y_{\text{необд}}$ , а подъемную силу обдуваемой части крыла —  $Y_{\text{обд}}$  и соответственно площади крыла необдуваемой  $S_{\text{необд}}$  и обдуваемой  $S_{\text{обд}}$ . Тогда  $Y = Y_{\text{необд}} + Y_{\text{обд}}$ .

Имеем

$$Y_{\text{необд}} = c_y \rho (S - S_{\text{обд}}) \frac{V_0^2}{2},$$

$$Y_{\text{обд}} = c_y \rho S_{\text{обд}} \frac{V_1^2}{2}.$$

Вставляем эти значения в предыдущее равенство:

$$c_{y \text{ обд}} \rho S \frac{V_0^2}{2} = c_y \rho S \frac{V_0^2}{2} - c_y \rho S_{\text{обд}} \frac{V_0^2}{2} + c_y \rho S_{\text{обд}} \frac{V_1^2}{2}.$$

Сокращаем обе части уравнения на  $\rho S \frac{V_0^2}{2}$ :

$$c_{y \text{ обд}} = c_y \left( 1 - \frac{S_{\text{обд}}}{S} + \frac{S_{\text{обд}}}{S} \frac{V_1^2}{V_0^2} \right).$$

Согласно формуле (46)

$$\frac{V^2}{V_0^2} = 1 + B$$

и тогда

$$c_{y \text{ обл}} = c_y \left( 1 + \frac{S_{\text{обл}}}{S} B \right). \quad (171)$$

По этой формуле и следует подсчитывать влияние винта на подъемную силу крыла самолета.

### Глава XII

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛЕЙ ВИНТОВ

### § 1. Теория аэродинамического подобия в применении к винту

Испытания винтов в аэродинамической трубе всегда бывает удобнее проводить на моделях, а иногда это является и единственно возможным способом. Однако, при применении модельных испытаний к натуре всегда встает вопрос о законе аэродинамического подобия для винтов, т. е. о тех условиях, при которых геометрически подобные винты можно считать и аэродинамически подобными, или найти те правила, при которых в геометрически подобных винтах можно переходить от одних аэродинамических условий к другим. К таким условиям относятся скорости полета, число оборотов винта. В том случае, когда закон подобия автоматически сам выполняется, например, в довольно большом диапазоне чисел  $M$ , меньших единицы, можно считать, что коэффициент лобового сопротивления крыла не зависит от числа  $M$ , то это свойство называется *автомодельностью* по отношению к данному условию.

Будем рассматривать геометрически подобные винты, т. е. такие, у которых относительные геометрические характеристики одинаковы, иными словами, у которых распределение по радиусу  $b$ ,  $c$  и крутки одинаковое. Практически для нас представляет интерес, как будут выражаться тяга и мощность для геометрически подобных винтов.

При рассмотрении теории изолированного элемента лопасти мы получили формулы (106) для тяги и мощности

$$P = \frac{\kappa}{4} \pi^2 \rho n_s^2 D^4 \int_{r_0}^1 \frac{c_y \cos \beta - c_x \sin \beta}{\cos^2 \beta} b \bar{r}^2 d \bar{r},$$

$$T = \frac{\kappa}{4} \pi^2 \rho n_s^3 D^5 \int_{r_0}^1 \frac{c_y \sin \beta + c_x \cos \beta}{\cos^2 \beta} b \bar{r}^3 d \bar{r}.$$

Для геометрически подобных винтов в подинтегральном выражении величины  $\bar{b}$  и  $\bar{r}$  одинаковы, величины же  $c_y$ ,  $c_x$  и  $\beta$  могут меняться от аэродинамических условий. Посмотрим, от чего зависят эти величины (фиг. 166). Имеем

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V_0}{2\pi n_s r} = \frac{V_0}{\pi n_s D r}.$$

Так как входящая сюда величина  $\bar{r}$  одинакова для геометрически подобных винтов, а  $\pi$  постоянна, то, следовательно,

$$\operatorname{tg} \beta = f\left(\frac{V}{n_s D}\right) = f \lambda$$

Величина  $\frac{V}{nD}$  есть уже известная нам относительная поступь  $\lambda$ . Величины  $c_y$  и  $c_x$  для данной лопасти зависят только от угла атаки  $\alpha^*$ , который выражается так

$$\alpha = \varphi - \beta,$$

где  $\varphi$  — угол установки сечения на радиусе  $\bar{r}$ , одинаковый для геометрически подобных винтов. Следовательно,  $c_y$  и  $c_x$  зависят от угла  $\beta$ , т. е. от  $\lambda$ . Таким образом мы получили, что подинтегральное выражение, а следовательно, и сам интеграл зависят от  $\lambda$ . Отсюда следует, что выражение для тяги и мощности винта можно представить так:

$$P = f_1(\lambda) \rho n_s^2 D^4,$$

$$T = f_2(\lambda) \rho n_s^3 D^5.$$

Обозначим

$$f_1(\lambda) = \alpha; \quad f_2(\lambda) = \beta, \quad (172)$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} P &= \alpha \rho n_s^2 D^4, \\ T &= \beta \rho n_s^3 D^5. \end{aligned} \right\} \quad (173)$$

Коэффициент полезного действия найдется по формулам (173) и будет выражаться так:

$$\eta = \frac{\alpha \lambda}{\beta}, \quad (174)$$

т. е. для геометрически подобных винтов к. п. д. зависит тоже от  $\lambda$ .

\* Мы опускаем здесь зависимость  $c_y$  и  $c_x$  от чисел  $M$  и  $Re$ ; о влиянии их см. § 4, гл. XII и § 2, гл. XIII.

Формулы (173) и (174) являются основными формулами теории аэродинамического подобия для винтов.

Аэродинамическое подобие у винтов соблюдается в том случае, если при одном и том же значении  $\lambda$  коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  одинаковы.

Формулы (173), (174) являются основными при расчете винтов. Коэффициент  $\alpha$  называется коэффициентом тяги, а коэффициент  $\beta$  — коэффициентом мощности. Оба они, как мы видели, зависят от относительной поступи  $\lambda$ .

Если известна зависимость (172) для винта с определенными геометрическими характеристиками, то по формулам (173) и (174) можно найти тягу, мощность и к.п.д. для винта любого диаметра, но геометрически подобного, т. е. с теми же относительными геометрическими характеристиками.

Введем обозначение

$$\bar{c}_x = \frac{c_y \sin \beta + c_x \cos \beta}{\cos^2 \beta} \quad \begin{matrix} \Gamma \\ \Gamma \\ 1 \end{matrix}$$

Величина  $\bar{c}_x$  зависит только от аэродинамических свойств лопасти и режима полета; она переменна по радиусу, поскольку переменны по радиусу  $c_y$  и  $\beta$ , уменьшаясь к концу лопасти. Однако если  $c_y$  будет достаточно быстро увеличиваться от втулки к концу, то  $\bar{c}_x$  может оказаться и постоянным по радиусу. Предположим, что  $\bar{c}_x$  не изменяется по радиусу, тогда мы его можем вынести за знак интеграла и получим

$$T = \frac{\pi^3}{4} \rho n_s^3 D^5 k \bar{c}_x \int_{r_0}^1 \bar{b} \bar{r}^3 d\bar{r}$$

Интеграл зависит только от геометрической формы лопасти. Величину

$$\Phi = \frac{10^5}{16} \int_{r_0}^1 \bar{b} \bar{r}^3 d\bar{r}$$

называют фактором эффективности (см. § 3 гл. I). Он характеризует собой влияние ширины лопасти на поглощаемую мощность.

## § 2. Методы аэродинамических испытаний винтов

Испытания винтов производятся обычно в аэродинамической трубе над моделями, меньшими натуральных винтов.

В малых аэродинамических трубах, диаметром около 2 м, испытываются модели винтов диаметром до 1 м. Особенно удобны для испытания винтов трубы с открытой рабочей частью, но и в них не рекомендуется испытывать винты диаметром больше

половины диаметра трубы из-за влияния трубы на характеристики винта.

Обычно в малых трубах модели винтов приводятся во вращение электродвигателем, а в больших — авиационным двигателем. На модель надевается кожух винта, сзади винта помещается моторная гондола, которая устанавливается на крыльях. По возможности обстановка испытания приближается к тому, что имеется в натуре на самолете ибо, как мы определили в предыдущей главе, нахождение в трубе эффективной тяги и к. п. д. дает возможность обходиться при аэродинамическом расчете самолета и при определении характеристик винта без учета взаимного влияния винта и самолета. По большей части винты испытываются как тянущие, но в отдельных случаях также проводятся испытания толкающих винтов.

Для того чтобы исключить учет взаимного влияния, необходимо определить эффективную тягу, выражаемую формулой (168), т. е.

$$P_0 = P - (R_1 - R_0), \quad (175)$$

где  $P$  — тяга, определяемая на валу винта,  $R_1$  — сопротивление тела в присутствии винта, но с ним не связанного, и  $R_0$  — сопротивление того же тела без винта.

Так как тяга, мощность и к. п. д. винта определяются формулами

$$P_0 = \alpha_0 \rho n_s^2 D^4,$$

$$T = \beta \rho n_s^3 D^5,$$

$$\eta = \frac{\alpha_0 \lambda}{\beta},$$

причем  $\alpha_0$ ,  $\beta$  и  $\eta$  зависят от  $\lambda = \frac{V_0}{n_s D}$ , то для знания аэродинамических характеристик винта необходимо определять тягу на валу винта, мощность на валу винта, скорость набегающего на винт потока, число оборотов винта, сопротивление тела, поставленного за винтом, в присутствии и при работе винта (и с ним механически не связанного) и сопротивление тела при той же скорости потока в отсутствии винта.

Скорость потока в трубе определяется соответствующими насадками и манометрами; число оборотов винта определяется счетчиками оборотов. Силы определяются специальными весами, которые называются «винтовым прибором». Конструкции винтовых приборов разнообразны; отсчеты соответствующих величин делаются или визуальными, или автоматически записываются на бумагу.

На винтовом приборе определяются следующие величины: тяга на валу винта  $P$ , сила  $Q_1$ , создающая на определенном плече

момент на валу, сопротивление  $Q_2$  всей системы винт — тело и сопротивление тела без винта  $Q_0$ . По этим величинам находятся:

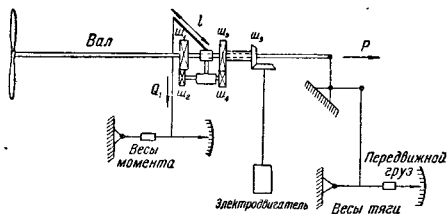
$$P_3 = P - (Q_2 - P - Q_0) = 2P - (Q_2 - Q_0),$$

$$T = Q_1 l \cdot 2\pi n_3,$$

где  $l$  — плечо весов. Отсюда находится и коэффициент полезного действия

$$\eta_3 = \frac{P_3 V}{T}.$$

На фиг. 190 представлена схема винтового прибора. На фиг. 191 изображена установка с тянущим винтом.



Фиг. 190. Схема винтового прибора.  $Ш_1, Ш_2, Ш_3, Ш_4$  — шестерни;  $Ш_1$  посажена на валу винта;  $Ш_2$  — свободно на нем вращается вместе с конической  $Ш_3$ ;  $Ш_2$  и  $Ш_4$  связаны между собой валиком. При вращении электродвигателя момент от него через  $Ш_3$  передается на  $Ш_2$  и на  $Ш_4$  и воспринимается силой, действующей на рычаге.

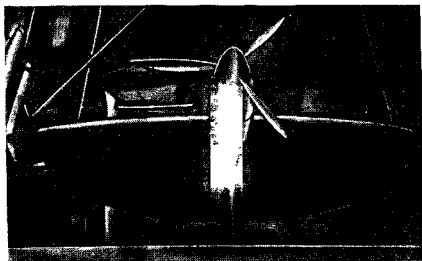
При испытаниях винтов больших размеров с авиационным двигателем в большой аэродинамической трубе вся система — винт — двигатель — гондола — устанавливается на весах, при помощи которых определяется лобовое сопротивление. Для определения тяги и мощности на валу между винтом и валом двигателя устанавливается динамометрический прибор (фиг. 192).

Кроме указанных основных испытаний, на винтовом приборе могут производиться и другие разнообразные испытания и научные исследования винтов.

Встает вполне естественный вопрос, а нельзя ли производить испытания винтов на самолете в полете — это даст проверку всех теорий и методов расчета винтов. К сожалению, на этом пути встанут большие затруднения.

В горизонтальном установившемся полете подъемная сила самолета равна весу самолета, а его лобовое сопротивление — тяге винта, т. е.

$$Y = G; \quad Q = P_3.$$



Фиг. 191. Установка для испытания винтов в аэродинамической трубе.



Фиг. 192. Установка для испытания натуральных винтов в аэродинамической трубе.



В то же время подъемная сила и лобовое сопротивление самолета выражаются так:

$$Y = G = c_y \rho S \frac{V_0^2}{2},$$

$$Q = P_s = c_x \rho S \frac{V_0^2}{2}.$$

Деля одно уравнение на другое, получим

$$\frac{G}{P_s} = \frac{c_y}{c_x}. \quad (176)$$

С другой стороны, к. п. д. винта равен

$$\eta_{\text{в}} = \frac{P_s \cdot V_0}{75N},$$

где  $N$  — мощность двигателя в л. с.;  
отсюда

$$P_s = \frac{75N\eta_{\text{в}}}{V_0}.$$

Подставляем в равенство (176)

$$\frac{GV_0}{75N\eta_{\text{в}}} = \frac{c_y}{c_x},$$

откуда

$$\eta_{\text{в}} \frac{c_y}{c_x} = \frac{V_0}{75q},$$

где  $q = \frac{G}{N}$  — нагрузка на лошадиную силу, или, если скорость  $V$  выражается в км/час,

$$\eta_{\text{в}} \frac{c_y}{c_x} = \frac{V}{270q}. \quad (177)$$

В этой формуле вполне точно можно определить  $V$  и  $q$ ; тогда так же можно определить произведение  $\eta_{\text{в}} \frac{c_y}{c_x}$ , т. е. произведение коэффициента полезного действия винта на качество всего самолета, но отделить одно от другого нельзя. Действительно, качество самолета надо определить в присутствии винта, но тогда в испытание вмешивается винт, который никак нельзя отделить от самолета. Были попытки устанавливать на двигатель так называемую динамометрическую втулку — встроенный в конструкцию винта прибор, который определяет тягу и мощность винта на валу. При этом требовалось ввести еще другое поня-

тие коэффициента полезного действия винта — так называемый кажущийся к. п. д., который определяется так:

$$\eta_{\text{каж}} = \frac{PV_0}{T},$$

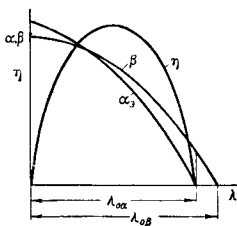
где  $P$  и  $T$  — тяга и мощность, измеренные на валу в присутствии тела. Этот к. п. д. не отражает истинной картины работы винта, — он может получиться и больше единицы, так как взаимное влияние в нем учитывается односторонне. Поэтому метод динамометрической втулки не получил распространения.

Необходимо заметить, что при определении к. п. д. винта в аэродинамической трубе, кроме различных неточностей, присущих самому методу, на точность определения к. п. д. влияют ошибки в определении тяги, мощности и скорости, и поэтому общая ошибка в определении к. п. д. винта может быть больше каждой из составляющих неточностей. На самолете же величина, в которую входит к. п. д., определяется непосредственно, поэтому если на самолете нельзя определить абсолютную величину к. п. д. винта, то с достаточной точностью определяется изменение к. п. д. Если на один и тот же самолет устанавливать последовательно различные винты и их испытывать, то, пренебрегая весьма малой величиной — различным влиянием на самолет разных винтов, можно получить для каждого случая отдельные значения величины  $\eta$ ,  $\frac{c_y}{c_x}$ , а так как качество  $\frac{c_y}{c_x}$  приближенно можно считать неизменным, то получим изменение  $\eta$  и определим, какой винт лучше работает на самолете.

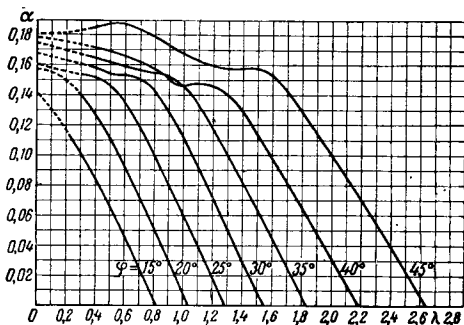
### § 3. Аэродинамические характеристики винтов

Как мы видели в предыдущих параграфах, коэффициенты тяги, мощности и полезного действия винта зависят для данного винта от относительной поступи  $\lambda$ .

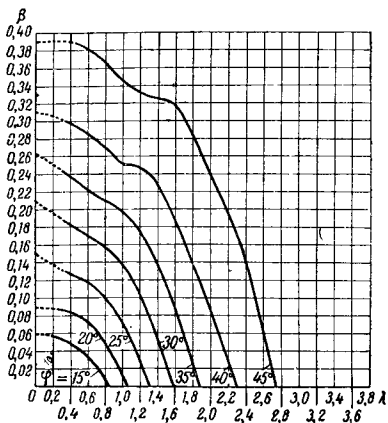
На фиг. 193 показана типичная диаграмма этой зависимости. Характерно в этой диаграмме то, что кривая  $\alpha$  пересекает ось абсцисс при значении  $\lambda_{\alpha}$  меньшем  $\lambda_{\beta}$ , при котором пересекает ось абсцисс кривая  $\beta$ . Объясняется это тем, что, когда  $\alpha = 0$ , т. е. винт движется с поступью, равной шагу винта, без скольжения, то хотя тяги и нет, но какая-то мощность требуется на преодоление трения воздуха и различных вихреобразований, сопутствующих движению лопастей винта. Что касается к. п. д. винта, то, как видно из фор-



Фиг. 193. Кривые зависимости коэффициентов тяги, мощности и полезного действия винта от относительной поступи.



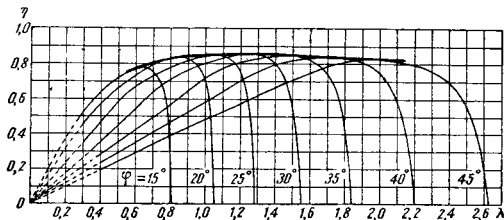
Фиг. 194. Зависимость коэффициента тяги винта от относительной поступи для семейства винтов с разными углами установки.



Фиг. 195. Зависимость коэффициента мощности от относительной поступи для семейства винтов с разными углами установки.

мулы (174), он должен обращаться в нуль дважды — при  $\lambda=0$  и при  $\alpha=0$ .

Аэродинамические характеристики винтов находятся для того, чтобы по ним выбрать наилучший винт. Но выбрать можно только тогда, когда есть из чего выбирать. Выбирать можно только из нескольких винтов, причем удобнее, если эти винты отличаются один от другого лишь каким-либо одним параметром, т. е. из семейства винтов, у которых меняется один параметр. За такой параметр удобно принять шаг винта, или, что то же, угол установки винта. Особенно это удобно и даже необходимо для винтов с переставными лопастями и винтов изменяемого ша-

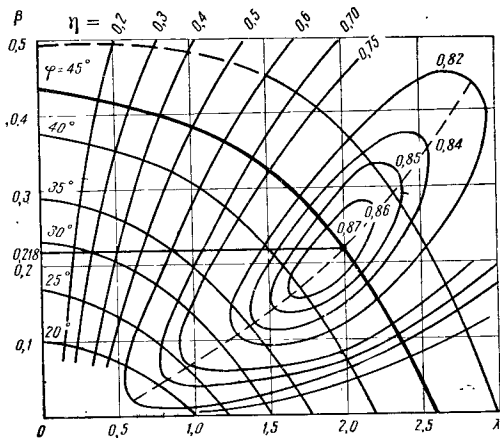


Фиг. 196 Зависимость коэффициента полезного действия от относительной поступи для семейства винтов с разными углами установки.

га. У такого семейства винтов семейство кривых  $\alpha$  и  $\beta$  выглядит так, как это представлено на фиг. 194 и 195. С увеличением угла установки винта значения  $\alpha$  и  $\beta$  увеличиваются до некоторого предела. Что касается к. п. д. винта, то совершенно ясно, что точка пересечения оси абсцисс, т. е. абсцисса  $\lambda_{0\alpha}$ , при увеличении угла установки винта  $\varphi$  должна увеличиваться, так как увеличивается шаг, и нулевое скольжение будет при большей относительной поступи (фиг. 196). При малых углах установки лопасти наибольший к. п. д. винта сравнительно невелик, с увеличением угла установки он увеличивается. Мы можем провести огибающую семейства винтов; эта огибающая обращается в нуль в начале координат, а затем увеличивается и достигает максимума, затем снова медленно падает.

Приведенные диаграммы применяют для подбора винта к самолету. Подбор по диаграммам всегда легче делать, когда диаграмм мало и они составлены удобно для пользования. Сократить эти диаграммы можно следующим образом. При подборе винта и при аэродинамическом расчете самолета задается мощность, передаваемая двигателем на винт, и требуется еще знание лишь коэффициента полезного действия винта, — тягой винта при аэродинамическом расчете обычно не пользуются. Следовательно-

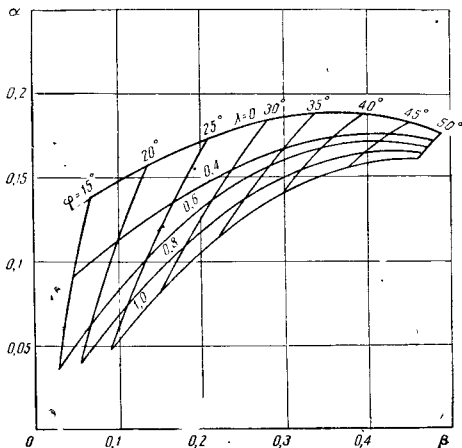
но, мы можем семейство кривых  $\alpha$  отбросить и оставить только кривые  $\beta$  и  $\eta$ . Еще удобнее совместить кривые  $\beta$  и  $\eta$  так, чтобы на кривых  $\beta$  были нанесены соответствующие значения  $\eta$ ; тогда получается диаграмма, изображенная на фиг. 197. На ней по оси абсцисс отложены  $\lambda$ , по оси ординат  $\beta$ ; кривые  $\beta$  расположены по параметру угла установки винта  $\varphi$ ; на кривых  $\beta$  нанесены точки соответствующих к. п. д. винта, при соединении которых образуются кривые одинаковых к. п. д. Как видим, кривые оди-



Фиг. 197. Аэродинамическая характеристика винта.

наковых к. п. д. замкнутые и пересекаются соответствующими кривыми  $\beta$  дважды. Ядро этих замкнутых кривых соответствует наибольшему значению к. п. д. огибающей семейства на фиг. 196. Такая диаграмма называется *аэродинамической характеристикой винта*. На диаграмме должны быть обозначены условия испытаний, т. е. тип винтового прибора, диаметр испытанного винта, тип винта или его геометрическая характеристика, формы и размеры тела за винтом, скорость потока и число оборотов при испытании.

Диаграмма, приведенная на фиг. 197, является основной для подбора винтов. Для некоторых специальных вопросов составляются отдельные диаграммы. Так, при расчете разбега самолета необходимо бывает определять  $\alpha$  и  $\beta$  при малых значениях  $\lambda$ . На основной диаграмме это делается не точно, и потому для этих целей применяется диаграмма, изображенная на фиг. 198.



Фиг. 198. Диаграмма коэффициента тяги и мощности при малой относительной поступи.

#### § 4. Влияние основных параметров на работу винта

Величиной, оценивающей качество работы винта, является его коэффициент полезного действия. Поэтому при разборе влияния основных параметров на работу винта мы главным образом будем рассматривать, как влияют эти параметры на его к. п. д., и лишь в тех случаях, где к. п. д. не характеризует работу винта, на иные, характеризующие качество винта, величины. Геометрическими параметрами винта, как мы знаем, являются диаметр, угол установки лопасти, ширина и толщина лопасти, число лопастей, дужка и форма лопасти. Кинематическими параметрами — скорость полета и число оборотов винта.

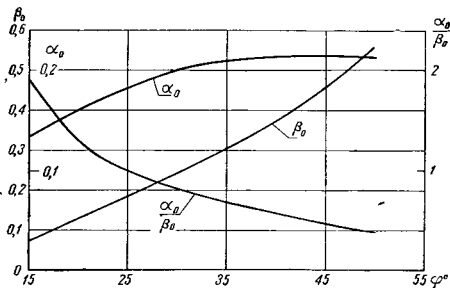
Рассмотрим сначала работу винта на месте. В этом случае к. п. д. равен нулю, и его нельзя брать за меру качества работы. Так как при работе винта на месте основное значение имеет наибольшая тяга при наименьшей затраченной работе, то качество работы винта на месте можно оценивать отношением  $\frac{P_0}{T_0}$ . При работе на месте тяга и мощность по формулам (173) будут:

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \alpha_0 \rho n^2 D^4, \\ T_0 &= \beta_0 \rho n^2 D^5. \end{aligned} \right\} \quad (178)$$

Коэффициенты  $\alpha_0$  и  $\beta_0$  в этом случае будут зависеть для данного типа винта только от угла установки винта  $\varphi$ . Типичная диаграмма этой зависимости приведена на фиг. 199. Качество винта при работе на месте будет

$$K = \frac{P_0}{T_0} = \frac{\alpha_0}{\beta_0} \frac{1}{n_s D}, \quad (179)$$

откуда видно, что качество винта зависит от  $\frac{\alpha_0}{\beta_0}$  и от величины  $n_s D$ , которая пропорциональна окружной скорости лопасти. Действительно, угловая скорость вращения лопасти равна  $2\pi n_s$ ,



Фиг. 199. Коэффициенты тяги и мощности винта при работе его на месте.

а окружная  $2\pi n_s r$  или для концов лопастей  $\pi n_s D$ . Окружная скорость  $U_0$  конца лопасти будет

$$U_0 = \pi n_s D = 0,0523 \pi n D, \quad (180)$$

где  $n$  — число оборотов в минуту.

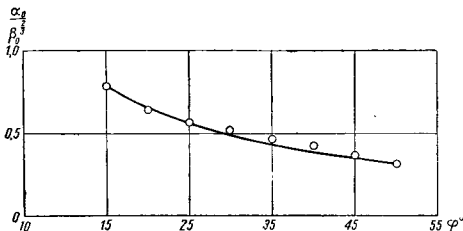
На фиг. 199 приведена кривая  $\frac{\alpha_0}{\beta_0} = f(\varphi)$ . Как видим, с увеличением угла  $\varphi$  уменьшается  $\frac{\alpha_0}{\beta_0}$  и, следовательно, при одной и той же концевой окружной скорости  $\pi n_s D = \text{const}$  согласно формуле (179) качество винта  $\frac{P_0}{T_0}$  увеличивается с уменьшением  $\varphi$ .

Но еще больше будет увеличиваться качество, если уменьшать концевую окружную скорость  $n_s D$ , т. е. уменьшать диаметр или число оборотов винта, или то и другое. Однако при уменьшении числа оборотов и диаметра уменьшается мощность, для нас же интересен вопрос, как увеличить качество при одной и той же

мощности  $T_0$ . Для этого по второй формуле (178) определим  $n_s D$  и вставим в формулу (179)

$$K = \frac{P_0}{T_0} = \frac{\alpha_0 D^{\frac{2}{3}}}{\beta_0^{\frac{2}{3}}} \sqrt{\frac{\rho}{T_0}}. \quad (181)$$

Следовательно, качество  $K$  зависит от  $\frac{\alpha_0}{\beta_0^{\frac{2}{3}}}$  и  $D^{\frac{2}{3}}$ . На фиг. 200 дана кривая  $\frac{\alpha_0}{\beta_0^{\frac{2}{3}}} = f(\varphi)$ , из которой видно, что с уменьшением угла установки лопасти  $\varphi$  увеличивается  $\frac{\alpha_0}{\beta_0^{\frac{2}{3}}}$ . Следовательно, согласно формуле (181) качество винта будет тем больше, чем



Фиг. 200. Зависимость функции  $\frac{\alpha_0}{\beta_0^{\frac{2}{3}}}$ , характеризующей работу винта на месте, от угла установки  $\varphi$ .

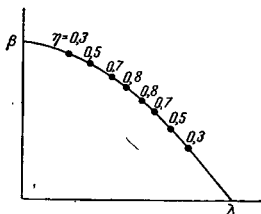
меньше угол установки  $\varphi$  и больше диаметр  $D$ . Отсюда становится ясным, почему у вертолетов, которые поддерживаются в воздухе тягой винта, угол установки лопасти делается очень малым, а диаметр очень большим.

Качество винта  $K$  есть величина размерная, оно выражает, сколько килограммов тяги приходится на 1 кг/сек или на 1 л. с. мощности двигателя. У самолетных винтов мы получаем качество при работе на месте, равное примерно 1—1,5 кг/л. с. Как увидим далее, эта величина играет некоторую роль при расчете разбега самолета.

Рассмотрим теперь влияние разных параметров винта на его работу в полете. Разберем сначала влияние скорости полета на работу данного винта фиксированного шага, т. е. при определенном угле установки  $\varphi$ . Для винта фиксированного шага



мы будем иметь только одну кривую  $\beta$  по  $\lambda$  (фиг. 201). Так как мы имеем определенный винт, то диаметр  $D$  постоянный, и, следовательно, относительная поступь  $\lambda$  определяется только отношением скорости и числа оборотов, т. е.  $\frac{V}{n_s}$ . Если

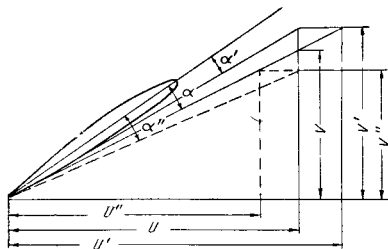


Фиг. 201. Коэффициент мощности винта фиксированного шага

диаметр постояен, то относительная поступь пропорциональна поступи винта. Величина  $\lg \beta$ , а следовательно, и пропорциональная отношению скоростей  $\frac{V_0}{U}$  величина

$\beta$  пропорциональна также относительной поступи (фиг. 202). Так как угол установки сечения постояен и равен  $\varphi = \alpha + \beta$ , то относительная поступь  $\lambda$  характеризуется собой углом атаки лопасти винта  $\alpha$ : чем больше  $\lambda$ , тем больше и угол атаки сечений лопасти. Предположим, что на самолете

с винтом фиксированного шага при всех прочих одинаковых условиях увеличилась скорость полета с  $V$  на  $V''$ ; тогда треугольник скоростей фиг. 202 изменится, причем, чтобы сохранить неизменными все прежние условия, надо, чтобы угол атаки остался



Фиг. 202 Изменение угла атаки лопасти винта фиксированного шага при изменении скорости полета

неизменным, а это ведет к увеличению окружной скорости, т. е. к увеличению числа оборотов. Наоборот, уменьшение скорости полета с  $V$  на  $V''$  ведет при винте фиксированного шага к уменьшению числа оборотов (см. пунктир). В обоих случаях предполагалось, что условия работы винта остаются одни и те же, т. е.

мощность двигателя одна и та же. А так как, как мы увидим далее, мощность двигателя обыкновенно несколько изменяется с изменением числа оборотов примерно пропорционально им, то при увеличении скорости для равновесного состояния следует несколько еще увеличить число оборотов.

Следовательно, при уменьшении скорости с винтом фиксированного шага число оборотов двигателя снижается (обороты падают), отчего уменьшается мощность двигателя. Но, как мы видели, при этом для данного винта уменьшается  $\lambda$ , и если характеристика винта находилась при большой скорости на кривой  $\rho$  (фиг. 197) на максимуме к. п. д., то при уменьшении скорости к. п. д. уменьшится. При эксплуатации самолета приходится перемещаться с разными скоростями, начиная от самой малой при разбеге на земле и кончая наибольшей скоростью на высоте, соответствующей высотности двигателя. Диапазон этих скоростей может быть весьма значительным, и если выбрать винт фиксированного шага, имеющий наибольший к. п. д. при максимальной скорости (предположим, сначала, на одной определенной высоте), то на уменьшенной, например, на скорости набора высоты, к. п. д. будет уменьшенным. Если же выбрать наибольший к. п. д. на малой скорости (например, скорости подъема), то на наибольшей получается уменьшенный к. п. д. Все это ясно видно по фиг. 196, на которой к. п. д. винта будет определяться одной кривой, соответствующей какому-либо углу установки лопасти. Если наибольший к. п. д. соответствует  $\lambda$ , в свою очередь соответствующей наибольшей скорости полета, то на меньшей скорости к. п. д. будет меньше, и чем больше диапазон скоростей данного самолета, тем большая разница будет в к. п. д. винта на крайних скоростях. Между тем огибающая к. п. д. данного семейства винтов (фиг. 196) лежит всегда выше всех кривых каждого члена семейства, поэтому для увеличения к. п. д. винта на всех скоростях следует сделать так, чтобы винт изменял свой угол установки, подлаживаясь к режиму полета. Это приводит к применению винтов *изменяемого шага*. Следовательно, для того чтобы получить наилучшее использование винта, надо так изменять угол установки винта в зависимости от скорости, чтобы к. п. д. изменялся по огибающей семейства. Для этого надо, чтобы изменение  $\rho$  по  $\lambda$  происходило так, как это показано пунктирной линией на фиг. 197, которая соединяет точки касания кривых одинаковых к. п. д. с кривыми  $\rho$ . Так как кривые одинаковых к. п. д. вытянуты в направлении этой линии, а наименьшую вытянутость имеют в направлении, близком к направлению кривой  $\rho$ , то винт фиксированного шага будет наименее выгоден при одной из крайних скоростей, если на другой крайней скорости он имеет наибольший к. п. д. Винт же изменяемого шага на крайних скоростях будет иметь наибольшие возможные к. п. д. Таким образом невыгоднейший винт изменяемого шага получается, если с уменьшением  $\lambda$  уменьшается

и  $\beta$ ; а это значит, что с уменьшением скорости должно увеличиваться число оборотов винта.

Рассмотрим пример. Пусть мощность двигателя равна 1000 л. с., диаметр винта 3,25 м. Предположим сначала, что мощность двигателя не изменяется с оборотами и полет происходит у земли.

Для того чтобы показать пример в обычных, принятых в эксплуатации единицах, формулы (173) представим в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 0,0162 \cdot 10^9 \frac{N}{\rho n^3 D^5}; & \alpha &= 3,6 \cdot 10^3 \frac{P}{\rho n^2 D^4}; \\ \lambda &= 16,65 \frac{V}{nD}, \end{aligned} \right\} \quad (182)$$

а для полета у земли:

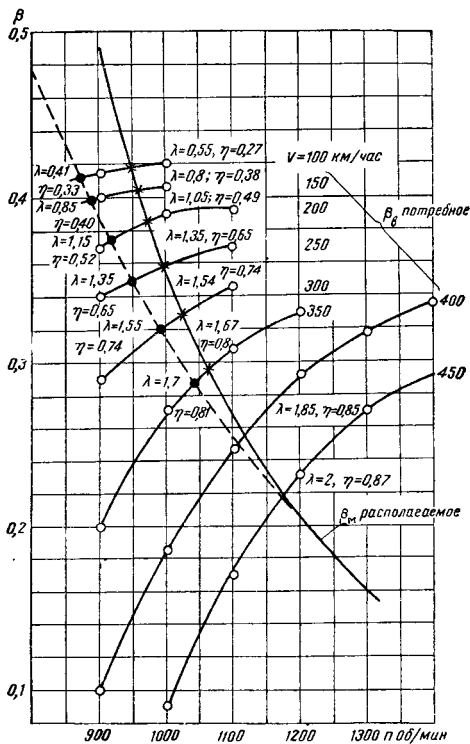
$$\begin{aligned} \beta &= 0,1296 \cdot 10^9 \frac{N}{n^3 D^5}, \\ \alpha &= 0,0288 \cdot 10^6 \frac{P}{n^2 D^4}, \end{aligned}$$

где  $n$  — число оборотов в минуту,  $N$  — мощность в л. с.,  
 $V$  — скорость в км/час.

Для нашего примера при полете у земли необходимые нам формулы (182) примут вид

$$\beta = \frac{0,355 \cdot 10^9}{n^3 \text{ об/мин}}; \quad \lambda = 5,13 \frac{V \text{ км/час}}{n \text{ об/мин}}. \quad (183)$$

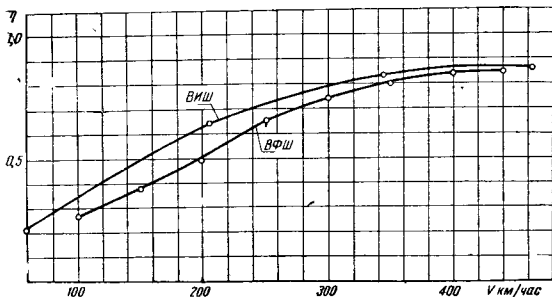
Первая формула (183) дает ту величину  $\rho$ , которая получается от двигателя — мы ее можем назвать располагаемым коэффициентом мощности. Она представлена на фиг. 203 и обозначена  $\rho_{\text{к}}$ . Выберем какой-либо винт фиксированного шага, который при наибольшей скорости дает наибольший к. п. д. Для этого выберем из семейства тот винт, кривая  $\rho$  которого проходит через ядро семейства (фиг. 197) (т. е. через область наибольшего к. п. д. семейства и соответствует углу установки  $45^\circ$ ). По формуле (183) можно для разных скоростей полета  $V$  км/час найти зависимость  $\lambda$  от  $n$ , которая представится равнобокой гиперболой. По кривой  $\rho$  выбранного винта, представленной жирной линией на фиг. 197, для каждого  $\lambda$  можно найти соответствующее  $\rho$  винта, которое обозначим  $\beta_{\text{в}}$ . Мы получим зависимость  $\beta_{\text{в}}$  от  $n$ , т. е. найдем, какой коэффициент мощности  $\rho_{\text{в}}$  требует винт при разных числах оборотов и разных скоростях. Эти кривые представлены также на фиг. 203. Мы их назовем *потребными коэффициентами мощности*. Пересечение располагаемых и потребных коэффициентов мощности даст при определенной скорости полета те обороты, которые должен иметь



Фиг. 203. Располагаемый и потребный коэффициенты мощности.

винт. У точек пересечения поставлены значения  $\lambda$  и к. п. д. Мы видим, что с уменьшением скорости полета у винта фиксированного шага уменьшается число оборотов и уменьшается к. п. д.

Если с числом оборотов уменьшается также и мощность двигателя, то кривая располагаемых коэффициентов мощности пойдет несколько ниже и пересечется в расчетной точке, соответствующей ядру (в нашем примере — скорости 450 км/час). В этом случае условия немного улучшаются, но так как мощность уменьшается, то небольшое увеличение к. п. д. не возместит даже падение мощности мотора. На фиг. 204 дана зависимость к. п. д. винта фиксированного шага (ВФШ) от скорости.



Фиг. 204. Сравнение к. п. д. у земли винта фиксированного и изменяемого шага.

Мы видели, что при винте фиксированного шага все аэродинамические и кинематические параметры винта изменяются и к. п. д. уменьшается довольно быстро со скоростью. Это падение к. п. д. можно, как мы видели, задержать, если винт все время будет так изменять свой угол установки, что к. п. д. будет лежать на огибающей. Однако при этом все кинематические и аэродинамические параметры тоже будут меняться, а это неудобно в смысле создания автоматики. При автоматическом регулировании удобнее всего конструктивно решается задача, если один параметр остается постоянным. Это привело к повсеместному применению такой автоматики в винте, которая основана на постоянном числе оборотов винта на всех режимах его работы. Если обороты винта постоянны, то располагаемая величина  $\omega$  тоже постоянна, и вся задача по расчету решается только по диаграмме фиг. 197. В этом случае  $\rho_4$  есть прямая линия, параллельная оси абсцисс. На всех режимах  $\rho_4 = \beta_0$ ,  $\lambda$  меняется пропорционально изменению скорости, и, следовательно, чтобы величина  $\beta_0$  была тоже постоянной, надо, чтобы с изменением  $\lambda$

менялся угол установки винта. Возьмем снова прежний пример, но в применении к винту изменяемого шага. На фиг. 204 дана кривая к. п. д. в зависимости от скорости для винта изменяемого шага (ВИШ). Как видим, она идет выше, чем для ВФШ. Таким образом преимущество винта изменяемого шага очевидно. В нашем примере мы брали диапазон скоростей на одной высоте, практически же приходится верхний предел брать на большой высоте (соответствующей границе высотности мотора), а нижний предел — у земли, так как он соответствует разбегу самолета при взлете. От этого диапазон увеличится и условия работы ВФШ ухудшатся. Вообще говоря, чем больше диапазон скоростей, тем резче выражено преимущество ВИШ.

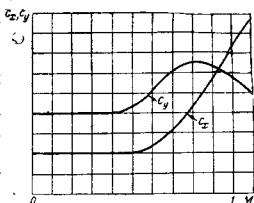
Работа винта и его к. п. д. сильно зависят от его диаметра. Действительно, диаметр входит в знаменатель формулы для  $\eta$  в пятой степени, а в формулу  $\lambda$  — в первой степени. Поэтому небольшое изменение в диаметре сильно изменяет значение  $\eta$  в обратном направлении. Большое же изменение  $\eta$  при небольшом изменении  $\lambda$  довольно сильно влияет на к. п. д. винта. В зависимости от положения на диаграмме точки, соответствующей определенному режиму, по отношению к ядру, увеличение диаметра может увеличить или уменьшить к. п. д. При режимах слева от ядра, что обычно и наблюдается на практике, к. п. д. увеличивается с увеличением диаметра.

Следующим параметром, сильно влияющим на работу винта, является число оборотов винта, или концевая скорость лопасти. Из треугольника скоростей сечения лопасти (фиг. 166) мы уже знаем, что результирующая скорость  $W$  равна

$$W = \sqrt{U^2 + V_0^2}, \quad (184)$$

причем при заданной скорости полета  $V_0$  скорость  $W$  будет тем меньше, чем меньше окружная скорость  $U$ .

Из аэродинамики известно, что сопротивление крыла при приближении к скорости звука сильно изменяется, причем лобовое сопротивление увеличивается, а подъемная сила сначала увеличивается, а затем уменьшается (фиг. 205). Наступает так называемый волновой кризис, обусловленный влиянием сжимаемости воздуха на течение около крыла. Если нигде около крыла нет скорости, превосходящей скорость звука, то можно считать, что крыло обладает автотельностью по отношению к скорости

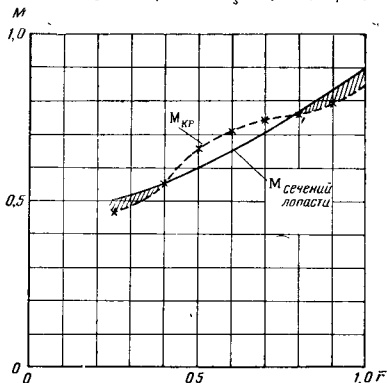


Фиг. 205 Изменение коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления дужки в зависимости от скорости (числа  $M$ )

полета или по отношению к числу  $M = \frac{V}{a}$ , где  $a$  — скорость звука.

Это значит, что сопротивление крыла не зависит от  $M$ . Как известно, число  $M$ , отнесенное к скорости полета и соответствующее местному числу  $M$  в какой-либо точке потока около крыла, равному единице, называется критическим значением числа  $M$ . Критическое значение числа  $M$  зависит от формы дужки; оно равно примерно  $M_{кр} = 0,65 - 0,75$ . Вполне естественно, что характеристики винтов должны зависеть от числа  $M$ , отнесенного к результирующей скорости данного сечения, т. е.  $M_p = \frac{W}{a}$ . Формулу (184) можно представить в таком виде:

$$W = \sqrt{\pi^2 n_s^2 \bar{r}^2 D^2 + V^2} = n_s D \sqrt{\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2} \quad (185)$$



Фиг. 206. Зоны сверхкритических чисел  $M$  на лопасти (заштриховано).

Первый член под корнем меняется в зависимости от относительного радиуса  $r$  в пределах от нуля при  $\bar{r} = 0$  до  $\pi^2$  при  $r = 1$  на конце. Следовательно, окружная скорость оказывает влияние на  $W$  больше всего на конце. На оси  $W = V$ ; на конце

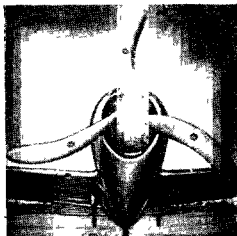
$$W = n_s D \sqrt{\pi^2 + \lambda^2} \quad (186)$$

Так как наибольшее  $\lambda$  обычно равно около 2, а  $\pi^2 \approx 10$ , то, следовательно, наибольшее влияние скорости полета на  $W$  может выразиться в  $\frac{\sqrt{14}}{\sqrt{10}} = 1,2$  раз, т. е. в 20%. Поэтому при малых

скоростях полета часто концевую скорость лопасти характеризуют только окружной концевой скоростью лопасти.

При больших концевых скоростях особенно сильно сказывается влияние толщины лопастей, так как критическое значение числа  $M$  у одного и того же типа дужки тем меньше, чем больше относительная толщина. Поэтому влияние больших скоростей на характеристики винта сказывается не только на конце лопасти. В зону скоростей, соответствующих числу  $M$ , большему критического, может попасть также и часть лопасти, прилегающая к втулке, как показано на фиг. 206. Учет влияния большой скорости на характеристику винта рассмотрен в гл. XIII.

Так как ухудшение качества работы винтов при больших скоростях обязано главным образом достижению сечениями лопастей критического числа  $M$ , то в винтах, так же как и в крыльях, можно увеличить критическое число  $M$ , применяя «скользящее крыло». Приближенно критическое число  $M$  скользящего крыла равно  $M_{кр} \cos \gamma$ , где  $M_{кр}$  — критическое число  $M$  для прямого крыла, а  $\gamma$  — угол скольжения. Такие винты принято называть винтами с саблевидными лопастями (фиг. 207). Практического применения такие винты не получили.



Фиг. 207. Винт с саблевидными лопастями на самолете.

Наряду с влиянием числа  $M$  рассмотрим также влияние на работу винта и числа  $Re = \frac{W b}{\nu}$ .

Из опытов с крыльями известно, что  $Re$  влияет на коэффициент лобового сопротивления  $c_x$ , причем при больших  $Re$  с увеличением  $Re$  коэффициент  $c_x$  сравнительно медленно уменьшается. Посмотрим, в каких пределах изменяется  $Re$  на винте, а также при переходе от модели к натуре.

Для одного и того же винта  $Re$  меняется от величины у комля  $Re = \frac{n_s D \lambda b_0}{\nu}$  до величины  $Re = \frac{n_s D \sqrt{\pi^2 + \lambda^2} b_k}{\nu}$  на конце, т. е. в

$$\frac{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2} b_k}{\lambda b_0} = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\lambda^2} \frac{b_k}{b_0}}$$

раз. Если  $\lambda = 2$ , то это соотношение равно  $2 \frac{b_k}{b_0}$ . Так как на самом конце  $b_k$  часто равно нулю, то следует брать  $b_k$  несколько



отступя от конца, тогда  $\frac{b_k}{b_0}$  примерно равно 0,5 и все соотношение равно 1; следовательно,  $Re$  на конце лопасти примерно такое же, как и у корня. Посмотрим теперь абсолютные значения чисел  $Re$  у натуральных винтов. В нашем примере  $D = 3,25$  м, число оборотов  $n_s = 20$  об/сек,  $b_k = 0,1$  м;  $\lambda = 2,0$ , тогда у земли, где  $v \approx 15 \cdot 10^{-6}$ , число  $Re = 1\ 600\ 000$ , на высоте около 9 км, где  $v \approx 30 \cdot 10^{-6}$ , число  $Re = 800\ 000$ .

Для модели винта диаметром 1 м при числе оборотов  $n_s = 50$  об/сек и  $b_k = 0,3$  м получим  $Re = 374\ 000$ . Таким образом число  $Re$  для натуральных винтов примерно в 2—3 раза больше, чем для моделей. Если же модели большие, то разница будет еще меньше. В указанных пределах чисел  $Re$  коэффициент лобового сопротивления  $c_x$  изменяется сравнительно мало и поэтому обычно поправок на число  $Re$  в характеристиках винтов не делают. Другие поправки, как, например, на число  $M$ , гораздо больше.

### § 5. Сопротивление самовращающегося, остановленного, флюгерного и тормозного винтов

В случае аварии двигателя в полете, когда двигатель не передает на винт никакой мощности, винт создает не тягу, а сопротивление, причем могут быть три режима винта, при которых без передачи мощности он будет давать сопротивление.

1. Винт вращается. В этом случае он работает как ветряк, и та мощность, которая передается на винт от набегающего потока, поглощается трением двигающихся в двигателе частей. Этот режим называется самовращением винта.

2. Винт остановлен. Как всякое тело, помещенное в движущийся поток воздуха, винт будет давать сопротивление.

3. Винт во флюгерном положении. Это положение винта есть частный случай предыдущего, когда угол установки лопастей винта таков, что сопротивление его минимальное.

Во всех трех случаях сопротивление винта пропорционально квадрату скорости полета. В обычные формулы с коэффициентами тяги и мощности скорость непосредственно не входит. В данном случае удобнее применять формулы, в выражение которых непосредственно входит скорость полета. Так как площадь лопастей пропорциональна квадрату диаметра, то согласно основному закону аэродинамики можно написать, что сопротивление винта выражается так:

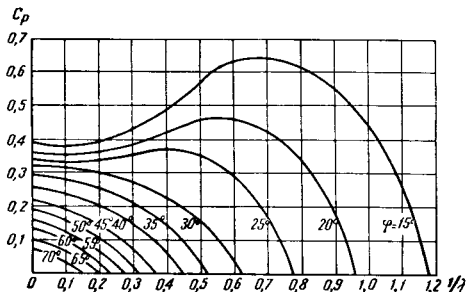
$$Q = c_{p0} D^2 V^2, \quad (187)$$

где  $c_{p0}$  — коэффициент лобового сопротивления винта, который для подобных лопастей зависит от угла установки лопастей и относительной поступи  $\lambda$ .

С другой стороны, крутящий момент на винте при его самовращении может быть выражен так:

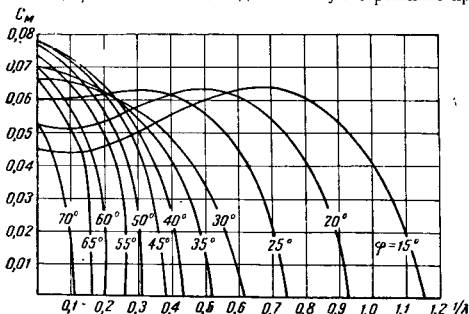
$$M = c_m \rho D^3 V^2, \quad (188)$$

где  $c_m$  — коэффициент момента винта, который для подобных лопастей зависит от тех же величин, что и  $c_p$ .



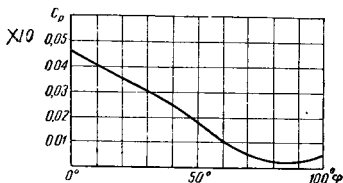
Фиг 208 Коэффициенты лобового сопротивления вращающегося винта.

Величины  $c_p$  и  $c_m$  находятся опытным путем в аэродинамической трубе. Так как при малых числах оборотов винта относительная поступь  $\lambda$  стремится к бесконечности, то удобнее коэффициенты  $c_p$  и  $c_m$  представлять не в зависимости от  $\lambda$ , а в зависимости от  $1/\lambda$ , тем более что в данном случае режимы при ма-



Фиг 209 Коэффициенты момента сопротивления вращающегося винта.

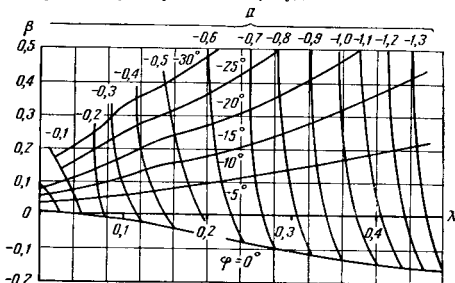
лых  $\lambda$  не представляют интереса (при малой поступательной скорости на режиме ветрянки больших чисел оборотов не может быть). На фиг. 208 и 209 даны типичные диаграммы  $c_p$  и  $c_m$  в зависимости от  $1/\lambda$  и углов установки лопасти  $\varphi$ .



Фиг. 210. Коэффициенты лобового сопротивления остановленного винта.

На фиг. 210 дана типичная диаграмма сопротивления остановленного винта в зависимости от угла установки лопасти. Она получается из диаграмм фиг. 208 при  $1/\lambda = 0$  на том основании, что при  $n_s = 0$   $1/\lambda = \frac{n_s D}{V} = 0$ .

При флюгерном положении лопастей сопротивление будет наименьшее и это соответствует наименьшему значению  $c_p$  на фиг. 210, при этом угол установки  $\varphi$  будет близок к  $90^\circ$ .



Фиг. 211. Аэродинамическая характеристика тормозного винта

Работа винта на режиме отрицательной тяги при отрицательных углах установки, т. е. на режиме торможения, может быть представлена с помощью диаграмм коэффициентов тяги  $a$  и мощности  $c$ . Для удобства расчетов эти диаграммы строятся в виде сетки  $\beta$  по  $\lambda$  для постоянных  $a$  с нанесенными на этих кривых углами установки лопасти  $\varphi$  (фиг. 211).

## Глава XIII

ПРИМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПЫТАННЫХ ВИНТОВ  
ДЛЯ ПОДБОРА ВИНТА К САМОЛЕТУ

## § 1. Основные положения подбора винта к самолету

Процесс подбора винта к самолету можно разделить на две части: а) подбор основных параметров винта — числа оборотов и диаметра, б) подбор остальных геометрических характеристик винта.

Такое разделение требуется потому, что число оборотов и диаметр винта связаны с конструкцией двигателя и самолета и должны быть определены в начале конструирования двигателя и самолета. Подбор же остальных геометрических характеристик винта можно производить позднее, — этим подбором уточняются параметры винта.

Подбор основных параметров винта имеет большое значение, во-первых, потому, что им до известной степени предопределяется конструкция самолета и двигателя. Действительно, если выбрана передача двигателя, которая определяет число оборотов винта, и выбраны габариты самолета, определяющие наибольший диаметр винта, то изменить передачу двигателя или увеличить диаметр винта весьма трудно, так как это связано с большими изменениями конструкции двигателя и самолета.

Во-вторых, число оборотов и диаметр винта относятся к параметрам винта, сильно влияющим на его коэффициент полезного действия, и поэтому при неправильно выбранной передаче и диаметре могут получиться большие потери к. п. д.

Так как первая часть подбора производится при выработке общих конструктивных форм самолета, то удобнее всего этот подбор делать на основании графиков аэродинамических характеристик винта, которые были описаны в § 3 гл. XII.

Иногда по конструктивным соображениям габариты самолета бывают очень ограничены и не допускают таких диаметров винта, при которых был бы обеспечен наивысший к. п. д. В этом случае иногда приходится уменьшать диаметр, но увеличивать ширину лопасти. Если в распоряжении конструктора имеются аэродинамические характеристики винтов только с узкими лопастями, то желательно иметь такой метод, который давал бы возможность пересчитывать аэродинамические характеристики с одной ширины на другую. Испытания винтов в аэродинамической трубе обычно производятся на сравнительно небольших скоростях и при небольших числах оборотов, т. е. винт при испытании в аэродинамической трубе работает при сравнительно небольших конечных скоростях. Мы же знаем из § 4 гл. XII, что изменение конечных скоростей при приближении их к скорости звука сильно влияет на к. п. д. винта. Следовательно, надо уметь учитывать

влияние больших концевых скоростей, или, иными словами, влияние сжимаемости воздуха.

Наконец относительные размеры гондолы и винта в модели и в натуре могут быть неодинаковыми. Изменение взаимного влияния при переходе от модели к натуре надо уметь учитывать. Таким образом при пользовании диаграммами аэродинамических характеристик винтов приходится делать поправки на: а) сжимаемость воздуха, б) взаимное влияние винта и самолета, в) изменение ширины или числа лопастей, или, что одно и то же, изменение покрытия.

В дальнейших параграфах мы разберем, каким образом делать эти поправки.

## § 2. Учет влияния сжимаемости воздуха и взаимного влияния винта и гондолы на характеристики винта

Из аэродинамики известно, что в известных пределах новое сопротивление тем больше, чем больше угол атаки крыла и число  $M$ , а так как коэффициент мощности винта  $\beta$  зависит от сопротивления винта, то, следовательно, этот коэффициент будет зависеть от угла атаки лопасти и числа  $M$ . От тех же величин будет зависеть и к. п. д. винта. На основании опытных данных можно составить диаграммы некоторого коэффициента  $k_\beta$ , который зависит от угла атаки лопасти на  $0,75 R$  и числа  $M_R = \frac{W_R}{a}$ , где  $W_R$  — концевая скорость лопасти. Этот коэффициент  $k_\beta$  определяется как отношение коэффициента мощности  $\beta_k$  без влияния сжимаемости к тому же коэффициенту с влиянием сжимаемости воздуха  $\beta_p$ :

$$k_\beta = \frac{\beta_k}{\beta_p}. \quad (189)$$

Угол атаки лопасти можно определять как разность угла установки и угла притекания на  $0,75 R$ , т. е. по формуле

$$\alpha = \varphi - \beta, \quad (190)$$

причем

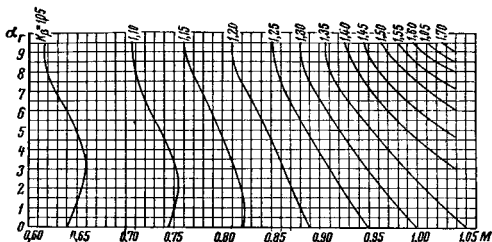
$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V}{2\pi n_s \cdot 0,75 R}. \quad (191)$$

Вообще говоря,  $\varphi_p$  должен находиться методом последовательных приближений, так как вследствие изменения  $\beta_p$  изменятся и  $\varphi$ , а следовательно, и  $\alpha$ ; но достаточно для расчетов и одного приближения. Когда найден  $\varphi_p$ , то по характеристике винта можно найти  $\eta_p$  и  $\varphi_p$  (второго приближения), а отсюда и

$$\alpha_p = \varphi_p - \beta. \quad (192)$$

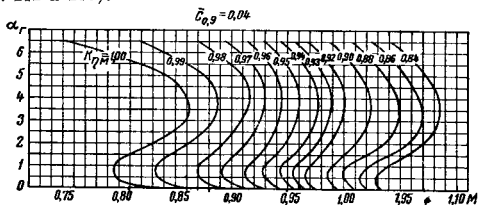
На основании опытных данных можно также составить диаграммы коэффициента  $k_{\tau M}$ , зависящего от  $\alpha_p$  и  $M_R$ , который определяется как отношение к. п. д. винта с влиянием сжимаемости воздуха  $\eta$  к к. п. д. винта  $\eta_r$ , найденного из характеристики винта по  $\lambda$  и  $\beta_p$ :

$$k_{\tau M} = \frac{\eta}{\eta_r} \quad (193)$$



Фиг. 212 Диаграмма  $k_\beta$  для учета влияния сжимаемости воздуха на коэффициент мощности  $\beta$ .

Описанный метод учета сжимаемости воздуха на аэродинамические характеристики винта разработан проф. Д. В. Халезовым и им же даны соответствующие диаграммы для  $k_\beta$  и  $k_{\tau M}$  (фиг. 212 и 213).



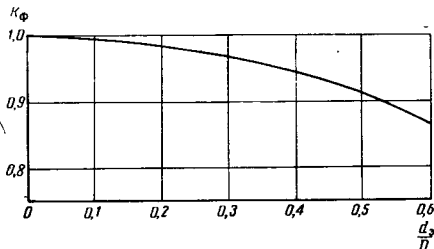
Фиг. 213 Диаграмма  $k_{\tau M}$  для учета влияния сжимаемости воздуха на коэффициент полезного действия винта.

Взаимное влияние винта и самолета обычно учитывается только в части влияния их относительных размеров, так как все испытания винтов в аэродинамической трубе производятся в присутствии gondoly, а иногда и крыльев. При учете влияния gondoly на винт удобно ввести понятие об эффективном диаметре gondoly, т. е. о диаметре цилиндра, эквивалентного дан-

ной гондоле с площадью миделевого сечения  $f$ . Эквивалентный диаметр выражается формулой

$$d_3 = C \sqrt{f}, \quad (194)$$

где  $C$  — некоторый коэффициент, зависящий от формы сечения гондолы. Для обычных гондол  $C=1,13$ . Обработка опытов дает возможность построить диаграмму некоторого коэффициента  $k_\Phi$



Фиг. 214. Диаграмма  $k_\Phi$  для учета относительного влияния самолета на винт.

в зависимости от соотношения  $\frac{d_3}{D}$  (фиг. 214). Если через  $k_{\Phi 0}$  обозначить тот же коэффициент  $k_\Phi$ , но для такого соотношения  $\frac{d_3}{D}$ , при котором строилась диаграмма аэродинамической характеристики данного винта, то коэффициент  $k_{\gamma\Phi}$  относительного влияния гондолы (или фюзеляжа) на винт будет выражаться формулой

$$k_{\gamma\Phi} = C_k \frac{k_\Phi}{k_{\Phi 0}},$$

где  $C_k$  зависит от типа моторной гондолы (двигатель воздушного или водяного охлаждения). Его можно принять равным 0,985. Тогда искомый к. п. д. винта с учетом сжимаемости воздуха и относительного влияния гондолы на винт будет

$$\eta = \eta_r \cdot k_{\gamma m} \cdot k_{\gamma\Phi}. \quad (195)$$

### § 3. Пересчет характеристики винта на другое покрытие лопастей<sup>1</sup>

В первом приближении пересчет винта на другое покрытие можно делать исходя из следующих соображений.

<sup>1</sup> Пересчет характеристики винта на другое покрытие лопастей был впервые предложен В. П. Ветчинкиным в 1918 г. и затем развит М. Н. Веселовским и Г. И. Кузьминым.

Предположим, что имеются два винта с одинаковым распределением по лопасти относительной толщины и крутки, но с различной, хотя и подобно распределенной ширной, т. е.  $b_2(r) = a \cdot b_1(r)$ , где  $a$  — некоторое постоянное число. Обозначим покрытия этих винтов через  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ .

Приблизительно можно принять, что тяга и мощность винта пропорциональна покрытию его лопастей. Тогда если для первого винта тяга будет  $P$ , то для второго тяга будет  $\frac{P}{\sigma_1} \sigma_2$ . Точно так же, если мощность, поглощаемая первым винтом, будет  $N$ , то мощность, поглощаемая вторым винтом, будет  $\frac{N}{\sigma_1} \sigma_2$ . При этом углы установки лопастей при соответственных режимах полета у обоих винтов будут одинаковыми (так как удельные нагрузки одинаковы). Относительные поступки  $\lambda$  для обоих винтов останутся одинаковыми. Таким образом, чтобы пересчитать характеристику винта 1 с покрытием  $\sigma_1$  на характеристику винта 2 с покрытием  $\sigma_2$ , следует найти коэффициент мощности  $\beta_2$  для заданных условий:

$$\beta_2 = \frac{75 \cdot N}{\rho n_s^3 D^5};$$

изменить его в отношении покрытий:

$$\beta_1 = \beta_2 \frac{\sigma_1}{\sigma_2}. \quad (196)$$

По характеристике винта с покрытием  $\sigma_1$  по заданному  $\lambda = \frac{V}{n_s D}$  и найденному по формуле (196)  $\beta_1$  найти к. п. д.  $\eta$  и коэффициент тяги  $\alpha_1$ ; исправить  $\alpha_1$  на отношение покрытий:

$$\alpha_2 = \alpha_1 \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (197)$$

и по этому значению  $\alpha_2$  найти тягу  $P = \alpha_2 \rho n_s^2 D^4$ . При этом к. п. д.  $\eta_2 = \eta_1$ .

Этот метод может быть уточнен следующим образом<sup>1</sup>. Предположим, что мы имеем два геометрически подобных винта, имеющих только разные покрытия. При одинаковых осевых и окружных скоростях в плоскости вращения этих винтов углы атаки соответственных сечений будут тоже одинаковы, а отсюда следует, что тяга и мощность этих винтов пропорциональны ширине лопастей, т. е. покрытию. Приблизительно мы будем считать, что осевые скорости в плоскости винтов равномерно распределены по радиусу. Обозначим у исходного винта покрытие через

<sup>1</sup> См. Г. И. Кузьмин, Пересчет характеристики винта на другое покрытие. Техника Воздушного Винта, № 12, 1928.



$\sigma_1$ , а у искомого — через  $\sigma_2$ . Будем относить относительную поступь  $\lambda_1$  к величинам в плоскости винта, т. е. к скорости  $V_1$  и к числу оборотов  $n_{s1}$ . Последнее относится, следовательно, к числу оборотов потока, и если  $\Omega$  — угловая скорость вращения винта, а  $\omega_1$  — вызванная винтом угловая скорость, то угловая скорость вращения потока в плоскости винта будет

$$\Omega_1 = 2\pi n_{s1} = \Omega - \omega_1.$$

По нашему предположению при одной и той же относительной поступи  $\lambda_1$  тяга и мощность винта пропорциональны покрытию. Если  $\sigma_1$ ,  $\alpha_1$  — коэффициенты мощности и тяги, отнесенные к плоскости винта, то по условию

$$\alpha_{1\sigma} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \alpha_1; \quad \beta_{1\sigma} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \beta_1, \quad (198)$$

где индекс  $\sigma$  относится к винту с измененным покрытием  $\sigma_2$ .

Если обозначить через  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$  и  $\eta$  коэффициенты для исходного винта с покрытием  $\sigma_1$ , а через  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$ ,  $\lambda_2$  и  $\eta_2$  — для винта с покрытием  $\sigma_2$ , то нашей задачей является получение связи между этими величинами для исходного винта с покрытием  $\sigma_1$  и винта с покрытием  $\sigma_2$ .

Относительная поступь винта  $\lambda_1$ , отнесенная к скорости в плоскости винта и не зависящая от покрытия, выражается следующим образом:

$$\lambda_1 = \frac{V_1}{n_{s1} D},$$

а так как  $n_{s1} = \frac{\Omega_1}{2\pi} = \frac{\Omega - \omega_1}{2\pi}$ , то, подставляя это выражение в предыдущую формулу, получим

$$\lambda_1 = \frac{V_1}{V_0} \frac{V_0 \cdot 2\pi}{\frac{\Omega - \omega_1}{\Omega} D \Omega} = \frac{V_1}{V_0} \frac{V_0}{n_s D} \frac{1}{\frac{\Omega - \omega_1}{\Omega}},$$

откуда на основании формул (39) и (72) имеем

$$\lambda_1 = \lambda \frac{1}{\eta_{ос} \eta_{окр}}. \quad (199)$$

Далее

$$\alpha_1 = \frac{P}{\rho n_{s1}^2 D^4} = \frac{P}{\rho n_s^2 D^4} \left( \frac{n_s}{n_{s1}} \right)^2,$$

$$\beta_1 = \frac{T}{\rho n_{s1}^3 D^5} = \frac{T}{\rho n_s^3 D^5} \left( \frac{n_s}{n_{s1}} \right)^3;$$

а так как

$$n_{s1} = \frac{\Omega - \omega_1}{2\pi}; \quad n_s = \frac{\Omega}{2\pi},$$

то

$$\frac{n_s}{n_{s1}} = \frac{\Omega}{\Omega - \omega_1} = \frac{1}{\gamma_{окр}}$$

и таким образом

$$\alpha_1 = \frac{\alpha}{\gamma_{окр}^2}; \quad \beta_1 = \frac{\beta}{\gamma_{окр}^3}. \quad (200)$$

Так как по условию  $\lambda_1$ , отнесенная к плоскости винта, одинакова для обоих витов, то будем иметь

$$\lambda_1 = \lambda_\sigma \frac{1}{\gamma_{ос\sigma} \gamma_{окр\sigma}} = \lambda \frac{1}{\gamma_{ос} \gamma_{окр}}, \quad (201)$$

откуда

$$t_\sigma = \lambda \frac{\gamma_{ос\sigma} \gamma_{окр\sigma}}{\gamma_{ос} \gamma_{окр}}. \quad (202)$$

По формулам (200) имеем

$$\alpha_{1\sigma} = \frac{\alpha_\sigma}{\gamma_{окр\sigma}^2}, \quad \beta_{1\sigma} = \frac{\beta_\sigma}{\gamma_{окр\sigma}^3},$$

а по формулам (198) и (200)

$$\alpha_\sigma = \alpha \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \left( \frac{\gamma_{окр\sigma}}{\gamma_{окр}} \right)^2, \quad \beta_\sigma = \beta \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \left( \frac{\gamma_{окр\sigma}}{\gamma_{окр}} \right)^3. \quad (203)$$

Из формул (202) и (203) получаем

$$\gamma_\sigma = \frac{\alpha_\sigma \lambda_\sigma}{\beta_\sigma} = \frac{\alpha \lambda}{\beta} \frac{\gamma_{ос\sigma}}{\gamma_{ос}}. \quad (204)$$

Для того чтобы найти  $\lambda_\sigma$ ,  $\alpha_\sigma$ ,  $\beta_\sigma$  и  $\gamma_\sigma$ , надо найти выражения для  $\frac{\gamma_{ос\sigma}}{\gamma_{ос}}$  и  $\frac{\gamma_{окр\sigma}}{\gamma_{окр}}$ .

Согласно формуле (45) осевой к. п. д. винта выражается так:

$$\gamma_{ос} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + B}},$$

где

$$B = \frac{P}{\rho F_1 \frac{V_0^2}{2}} = \frac{P}{\frac{\pi D^2}{8} \rho V_0^2},$$

или, так как  $P = \alpha r n_s^2 D^4$ , то  $B = \frac{8\alpha}{\pi} \frac{n_s^2 D^2}{V_0^2} = \frac{8\alpha}{\pi} \frac{1}{\lambda^2}$ .

Отсюда

$$\eta_{\text{loc}} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{8\alpha}{\pi} \frac{1}{\lambda^2}}}. \quad (205)$$

Подставляя сюда по формулам (200) и (201) вместо  $\alpha$  и  $\lambda$  их выражения через  $\alpha_1$  и  $\lambda_1$ , получаем

$$\eta_{\text{loc}} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{8}{\pi} \frac{\alpha_1}{\lambda_1^2} \frac{1}{\eta_{\text{loc}}^2}}}. \quad (206)$$

Представим это уравнение в таком виде:

$$\sqrt{1 + \frac{8}{\pi} \frac{\alpha_1}{\lambda_1^2} \frac{1}{\eta_{\text{loc}}^2}} = \frac{2}{\eta_{\text{loc}}} - 1$$

и решим его относительно  $\eta_{\text{loc}}$ ; получим

$$\eta_{\text{loc}} = 1 - \frac{2}{\pi} \frac{\alpha_1}{\lambda_1^2}. \quad (207)$$

Найдем отношение

$$\frac{\eta_{\text{loc} \sigma}}{\eta_{\text{loc}}}.$$

Так как

$$\eta_{\text{loc} \sigma} = 1 - \frac{2}{\pi} \frac{\alpha_{1\sigma}}{\lambda_1^2},$$

то согласно равенству (198) получим

$$\frac{\eta_{\text{loc} \sigma}}{\eta_{\text{loc}}} = \frac{1 - \frac{2}{\pi} \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \frac{\alpha_1}{\lambda_1^2}}{\eta_{\text{loc}}}.$$

Таким образом

$$\frac{\eta_{\text{loc} \sigma}}{\eta_{\text{loc}}} = \frac{1 + \eta_{\text{loc}} \frac{\sigma_2}{\sigma_1} - \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}{\eta_{\text{loc}}}. \quad (208)$$

или

$$\frac{\eta_{\text{loc} \sigma}}{\eta_{\text{loc}}} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} - \frac{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1}{\eta_{\text{loc}}}. \quad (209)$$

Согласно уравнению (69)

$$M(\Omega - \omega_1) = PV_1,$$

а по уравнению (31)

$$P = mv_2 = F_1 V_1 \rho v_2.$$

Принимая во внимание уравнение (76), получим

$$P = \frac{\pi D^4}{16} \rho \omega_1 (\Omega - \omega_1). \quad (210)$$

Подставляем это выражение в формулу (69):

$$M = \frac{\pi D^4}{16} \rho \omega_1 V_1. \quad (211)$$

Отсюда

$$M\Omega = T = \frac{\pi D^4}{16} \rho \omega_1 \Omega V_1 = \beta \rho \pi^3 D^5.$$

Но так как

$$\beta = \frac{\alpha \lambda}{\eta} = \frac{\alpha \lambda}{\eta_{\text{ос}} \eta_{\text{окр}} \eta_{\text{от}}},$$

то, заменяя  $\Omega = 2\pi n_s$  и делая приведения, получим

$$\frac{\pi^2}{8} \omega_1 = \frac{\alpha \lambda}{\eta_{\text{ос}} \eta_{\text{окр}} \eta_{\text{от}}} \frac{n_s D V_0}{V_0 V_1} \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{\alpha}{\eta_{\text{окр}} \eta_{\text{от}}} \frac{\Omega}{2\pi}.$$

Отсюда

$$\frac{\pi^3}{4} = \frac{\alpha}{\eta_{\text{окр}} \eta_{\text{от}}} \frac{\Omega}{\omega_1}. \quad (212)$$

Так как

$$\eta_{\text{окр}} = \frac{\Omega - \omega_1}{\Omega} = 1 - \frac{\omega_1}{\Omega},$$

то

$$\frac{\Omega}{\omega_1} = \frac{1}{1 - \eta_{\text{окр}}}$$

и тогда формула (212) примет вид

$$\frac{\pi^3}{4} = \frac{\alpha}{\eta_{\text{окр}} \eta_{\text{от}}} \frac{1}{1 - \eta_{\text{окр}}}.$$

Решая это квадратное уравнение относительно  $\eta_{\text{окр}}$ , получим

$$\eta_{\text{окр}} = \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{16}{\pi^3} \frac{\alpha}{\eta_{\text{от}}}}}{2}. \quad (213)$$

Так как  $\eta_{от}$  близок к единице, а  $\frac{16}{\pi^4} < 1$ , то величина  $\frac{16}{\pi^3} \frac{\alpha}{\eta_{от}}$  несколько меньше  $\alpha$ , и выражение под корнем можно разложить в ряд, ограничившись двумя членами.

$$\eta_{окр} = \frac{1 + 1 - \frac{8\alpha}{\pi^3 \eta_{от}}}{2} = 1 - \frac{4\alpha}{\pi^3 \eta_{от}}. \quad (214)$$

Так как величина  $\eta_{от}$  близка к единице, то приближенно

$$\eta_{окр} = 1 - \frac{4}{\pi^3} \alpha = 1 - \frac{4}{\pi^3} \frac{\eta_p^2}{\lambda}. \quad (215)$$

Подставляем сюда вместо  $\alpha$  его выражение (200) через  $\alpha_1$ :

$$\eta_{окр} = 1 - \frac{4}{\pi^3} \alpha_1 \eta_{окр}^2.$$

Но так как  $\eta_{окр}$  близок к единице, то приближенно можно принять

$$\eta_{окр} = 1 - \frac{4}{\pi^3} \alpha_1. \quad (216)$$

Таким образом получим

$$\frac{\eta_{окр} \sigma}{\gamma_{окр}} = \frac{1 - \frac{4}{\pi^3} \alpha_1 \sigma}{\gamma_{окр}}$$

или, согласно формуле (198)

$$\frac{\eta_{окр} \sigma}{\gamma_{окр}} = \frac{1 - \frac{4}{\pi^3} \alpha_1 \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}{\gamma_{окр}}.$$

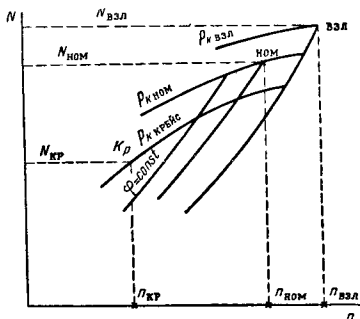
Тогда, принимая во внимание формулу (216) получаем

$$\frac{\eta_{окр} \sigma}{\gamma_{окр}} = \frac{1 + \eta_{окр} \frac{\sigma_2}{\sigma_1} - \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}{\gamma_{окр}} = \frac{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1}{\gamma_{окр}}. \quad (217)$$

Пересчет с одного покрытия на другое делается по формулам (202), (203) и (204), причем предварительно определяются соотношения  $\frac{\eta_{ос\sigma}}{\eta_{ос}}$  и  $\frac{\eta_{окр\sigma}}{\eta_{окр}}$  по формулам (209) и (217). Входящие в эти формулы  $\eta_{ос}$  и  $\eta_{окр}$  находятся по формулам (205) и (215) и по соответствующим графикам характеристик винтов.

#### § 4. Характеристики авиационных двигателей

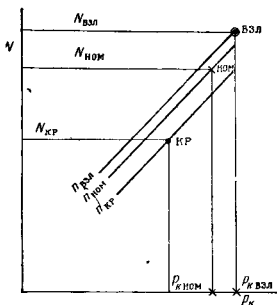
Характеристиками авиационного двигателя называются зависимости основных параметров двигателя от числа оборотов и высоты. К таким характеристикам в первую очередь относится мощность двигателя. Для винтов эта характеристика является самой важной, поэтому под характеристикой двигателя часто подразумевается зависимость его мощности от числа оборотов и наддува, с одной стороны, и от высоты — с другой. В современных поршневых двигателях мощность на определенной вы-



Фиг. 215 Характеристика двигателя — мощность по числу оборотов при постоянном наддуве

соте зависит от двух величин — от числа оборотов и наддува. Следовательно, чтобы получить полное представление о мощности двигателя, надо иметь семейство кривых — изменение мощности по числу оборотов при различном наддуве (фиг. 215) или изменение мощности от наддува при разных числах оборотов (фиг. 216). Обычно первое семейство называется внешними характеристиками двигателя, причем кривые будут тем выше расположены, чем больше наддув. Однако должен быть и предел наддува, т. е. предел мощности, или предельная внешняя характеристика. Поэтому вводится понятие о различных мощностях. Имеется много наименований мощностей двигателя. Мы укажем лишь основные, связанные с расчетом и эксплуатацией винта. Номинальной мощностью называется мощность, которой маркируется двигатель и на которой двигатель может непрерывно работать длительное, но все же ограниченное время, обусловленное в технических условиях. Взлетной называется мощность, которой пользуются только при взлете. Эта мощность больше номинальной и ею разрешается пользоваться непре-

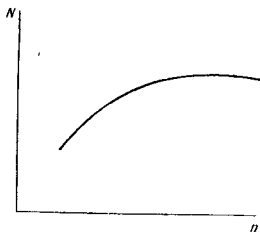
рывно в течение небольшого промежутка времени (порядка пяти минут), обусловленного в технических условиях. Крейсерская мощность обычно выражается в процентах от номинальной, на ней происходят обычно все полеты и ею разрешается пользо-



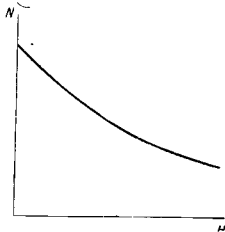
Фиг. 216 Характеристика двигателя — мощность по наддуву при постоянном числе оборотов.

ваться непрерывно весьма долгое время, ограниченное только долговечностью двигателя (до ремонта). Так как мощность поршневого двигателя зависит от числа оборотов, то, следовательно, всем указанным мощностям должно соответствовать и определенное число оборотов. Так, номинальное число оборотов соответствует номинальной мощности, взлетное число оборотов — взлетной мощности и крейсерское число оборотов — крейсерской мощности. Как увидим далее (§ 5), взлетное число оборотов всегда больше номинального. На фиг. 215 и 216 указаны все точки, соответствующие перечисленным режимам двигателя.

Если двигатель не имеет наддува, то его характеристика представится в виде одной кривой (фиг. 217).



Фиг. 217 Характеристика двигателя без наддува



Фиг. 218 Высотная характеристика невысотного двигателя

Изменение мощности по высоте — так называемая высотная характеристика двигателя — имеет различный вид, в зависимости от способа, каким достигается высотность. Обычный не-высотный двигатель внутреннего сгорания, у которого нет никаких специальных приспособлений для поддержания мощности по

высоте, имеет высотную характеристику, данную на фиг. 218. В этом случае мощность двигателя уменьшается по высоте по следующему закону:

$$N_H = AN_0, \quad (218)$$

$$A = 0,0248 \frac{p_H}{\sqrt{T_H}} - 0,11,$$

где  $p_H$  и  $T_H$  — давление и температура воздуха на высоте  $H$ ,  $N_0$  — мощность у земли.

Так как уменьшение мощности двигателя по высоте происходит вследствие того, что в цилиндры поступает недостаточное количество воздуха из-за уменьшения плотности с высотой, искусственно можно поддерживать мощность, наддувая двигатель нагнетателями, приводящимися в действие от того же двигателя. По фиг. 216 видно, что, увеличивая  $p_k$ , т. е. давление во всасывающем трубопроводе, мы повышаем мощность двигателя у земли. Но увеличивать мощность данного двигателя у земли беспредельно нельзя, ибо этому ставит предел его тепловой режим.

Совершенно очевидно, что если поддерживать на всасывании и на выхлопе двигателя постоянное по высоте давление, то двигатель будет иметь одну и ту же мощность по высоте. На самом же деле, так как агрегаты, поддерживающие это постоянное давление, приводятся от того же двигателя и мощность, отбираемая этими агрегатами-нагнетателями, должна увеличиваться по высоте вследствие уменьшения давления воздуха, то опять-таки поддерживать постоянную мощность можно не беспредельно. Нагнетатели, производящие наддув двигателя, бывают двух родов — приводные центробежные нагнетатели (ПЦН) и турбокомпрессоры (ТК). Первые имеют механическую передачу от двигателя, а вторые работают от газовой турбины, приводимой во вращение выхлопными газами двигателя.

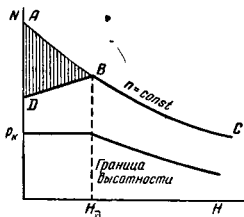
Центробежный нагнетатель обладает тем свойством, что при постоянной скорости вращения при уменьшении давления на входе будет уменьшаться давление и на выходе. Присоединяя центробежный нагнетатель к двигателю через повышающую передачу для увеличения давления на выходе из него, мы увеличиваем мощность двигателя у земли примерно пропорционально увеличению наддува и, следовательно, получаем обычную невысокую характеристику двигателя (фиг. 219).

Однако, создавая достаточно большой наддув, мы сильно увеличиваем тепловую напряженность двигателя, которую он не в состоянии выдерживать, необходимо снизить наддув и поддерживать его по высоте так, чтобы не выходить за пределы допустимой тепловой напряженности двигателя. Таким образом до некоторой высоты приходится «срезать» высотную характе-

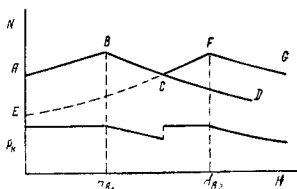


ристику (фиг. 219), и мощность двигателя, вместо того, чтобы изменяться по линии  $ABC$ , изменяется по линии  $DBC$ . Это снижение наддува производят дросселированием подачи воздуха во всасывающем трубопроводе. Дросселирование производится автоматически специальным прибором — регулятором постоянного давления (РПД). Следовательно, до какой-то высоты  $H_0$  поддерживается постоянное давление. При большей высоте давление начинает падать, а мощность двигателя изменяется по обычной невысокой характеристике.

Предполагается, что регулятором винта все время поддерживается постоянное число оборотов. Высота  $H_0$  называется границей выносливости двигателя. В точке  $B$  дроссель двигателя



Фиг. 219. Высотная характеристика двигателя с ПЦН



Фиг. 220. Высотная характеристика двигателя с двухскоростным ПЦН

полностью открыт и нагнетатель подает максимальное количество воздуха (по объему). Для того чтобы еще повысить высоту двигателя, надо, чтобы нагнетатель подавал в двигатель большее количество воздуха. Если увеличить мощность нагнетателя и этим повысить всю кривую  $ABC$ , высота будет увеличиться. Однако это может оказаться невыгодным, так как слишком много мощности будет тратиться на вращение нагнетателя и притом с большими потерями.

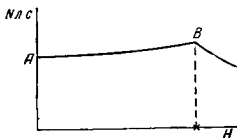
Можно увеличить мощность того же нагнетателя, увеличив скорость его вращения после точки  $B$ . Для этого надо сделать вторую передачу на нагнетатель, или, как говорят, вторую скорость. Мы будем иметь в этом случае как бы два разных нагнетателя. На первом нагнетателе (1-я скорость) высотная характеристика двигателя представится в виде кривой  $ABCD$ , а на втором нагнетателе (2-я скорость) — в виде кривой  $ECFG$  (фиг. 220).

Снижение мощности до высоты, соответствующей точке  $C$ , произошло из-за того, что нагнетатель стал больше потреблять мощности. Давление  $p_k$  в первом случае до точки  $B$ , а во втором случае до точки  $F$  постоянно. До высоты, соответствующей точ-

ке  $C$ , двигатель на 2-й скорости нагнетателя дает меньшую мощность, так как нагнетатель работает с меньшим к. п. д.—слишком много приходится его дросселировать. Следовательно, до высоты, соответствующей точке  $C$ , двигатель работает с нагнетателем 1-й скорости. В точке  $C$  включается 2-я скорость нагнетателя. Высота  $H_{в2}$  называется второй границей высотности двигателя.

Высотные характеристики, представленные на фиг. 219 и 220, относятся к постоянным оборотам двигателя; при больших или меньших числах оборотов характеристики будут идти выше или ниже указанной.

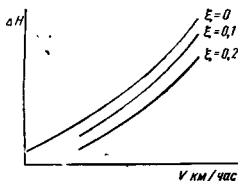
На фиг. 220 видно, что если сделать переменную, непрерывно изменяющую передачу к нагнетателю, то можно получить высотную характеристику с почти постоянной мощностью по высоте до определенной высоты. Такой системой с непрерывной передачей может служить система турбокомпрессора (соединение газовой турбины с компрессором) работающего на выхлопных газах двигателя. Перепуская нужное количество выхлопных газов в турбину, можно получить все время постоянное давление наддува и следовательно при постоянных числах оборотов двигателя — почти постоянную мощность по высоте. Высотная характеристика двигателя с турбокомпрессором представлена на фиг. 221. Точка  $B$  соответствует границе высотности этого двигателя. После этой высоты мощность будет уменьшаться.



Фиг. 221. Высотная характеристика двигателя с турбокомпрессором

Характеристики двигателей даются обычно заводами, выпускающими данный двигатель. Эти характеристики определяются или на станке в земных условиях или в специальной высотной камере. При постановке двигателя на самолет его высотная характеристика должна по большей части измениться. Дело в том, что у самолетов, имеющих большую скорость, создается большой скоростной напор. Этим напором можно воспользоваться, чтобы еще несколько надуть двигатель. Добавочный наддув может повысить высотность двигателя. Для того чтобы получить наилучший эффект, следует всасывающие патрубки двигателя расположить так, чтобы иметь в них наибольший скоростной напор. Использование скоростного напора будет зависеть от сопротивлений во всасывающем трубопроводе: чем меньше это сопротивление, тем лучше может быть использован дополнительный скоростной напор. Следовательно, повышение высотности двигателя на самолете зависит от скоростного напора, т. е. от скорости полета и от сопротивлений во всасывающем трубопроводе двигателя.

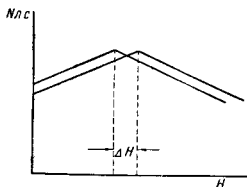
На фиг. 222 даны кривые прироста высотности при различных коэффициентах потерь во всасывающем трубопроводе  $\xi$ . Обычно этот коэффициент может быть принят равным 0,1—0,15. Перемещение высотной характеристики двигателя показано на фиг. 223. Видно, что от скоростного напора у высотного двигателя мощность до границы высотности уменьшается, а за границей



Фиг. 222 Приращение высотности двигателя от скоростного напора. Коэффициент потерь во всасывающем трубопроводе  $\xi = \frac{\Delta p}{\frac{\rho v^2}{2}}$ , где

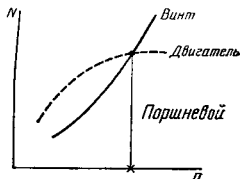
$$\xi = \frac{\Delta p}{\frac{\rho v^2}{2}}, \text{ где}$$

$\Delta p$  — потеря давления во всасывающем трубопроводе двигателя.



Фиг. 223. Исправление высотной характеристики двигателя на влияние скоростного напора

цей высотности увеличивается. Получается это по той же причине, что и в случае применения 2-й скорости нагнетателя — тепловой режим двигателя ограничивается наибольшим наддувом, и при увеличении его двигатель приходится дросселировать.



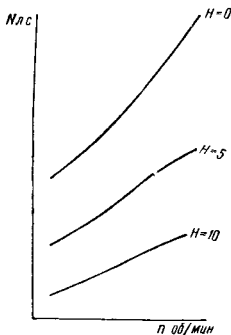
Фиг. 224 Сравнение характеристики поршневого двигателя и газовой турбины.

Обратимся теперь к газовой турбине, работающей на винт. Такую комбинацию называют турбовинтовым двигателем.

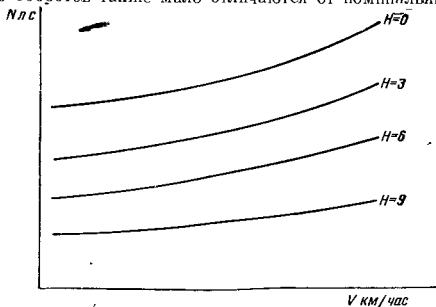
Обращает на себя внимание некоторая разница в характеристиках поршневого двигателя и газовой турбины (фиг. 224). Если у поршневого двигателя кривая линия, представляющая характеристику, выпуклостью всегда обращена в сторону повышения мощностей, то у турбинного двигателя эта кривая может быть обращена как в ту, так и в другую сторону. Так как характеристика винта (мощность по числу оборотов) является кубической параболой, то в случае поршневого двигателя разница

в мощностях двигателя (располагаемая мощность) и винта (потребная мощность) вне точки пересечения их характеристик составляет относительно большую величину, тогда как в случае газовой турбины эта разница может быть невелика. Это усложняет вопросы регулирования газовой турбины.

Газовая турбина является двигателем невысотым, т. е. ее мощность с высотой уменьшается за счет уменьшения подачи воздуха компрессором, подобно тому как это имеет место и в поршневых двигателях. На фиг. 225 дана характеристика газовой турбины по различным высотам. Необходимо заметить, что устойчивая работа газовой турбины находится в сравнительно небольшом диапазоне чисел оборотов. Экономичность ее мало зависит от мощности, и поэтому по большей части номинальные числа оборотов и мощность одновременно являются и крейсерскими. Взлетная мощность и число оборотов также мало отличаются от номинальных.



Фиг. 225. Характеристика газовой турбины по высотам.



Фиг. 226. Зависимость мощности газовой турбины от скорости полета.

Как и в поршневых двигателях, мощность газовой турбины зависит от скорости полета, так как скоростной напор увеличивает давление в компрессоре. На фиг. 226 представлена типичная характеристика газовой турбины по скорости и по высотам.

### § 5. Выбор передачи к винту и подбор винта к самолету

При конструировании поршневого и газотурбинного двигателя важно правильно выбрать передачу (редукцию) к винту, т. е. отношение числа оборотов вала винта к числу оборотов вала двигателя. Для поршневого двигателя еще важно подобрать число оборотов для взлетного режима. Выбор передачи и подбор винта к самолету тесно между собой связаны, так как в первом случае подбираются наиболее выгодные обороты винта, а во втором — главным образом диаметр винта.

Основными режимами, на которые приходится базироваться при выборе передачи и диаметра винта, являются следующие: максимальной скорости, разбега самолета и дальности (для самолетов дальнего действия). Эти режимы являются основными потому, что первый касается важнейшего летного свойства самолета — скорости, которая должна быть наибольшей, а так как скорость непосредственно зависит от коэффициента полезного действия винта, то к. п. д. должен быть на этом режиме наибольшим. Второй режим (разбег) касается безопасности взлета, а иногда и вообще возможности его осуществления (в случае малых размеров аэродрома и большой перегруженности машины), поэтому винт должен подбираться так, чтобы разбег был наименьшим. Третий режим имеет решающее значение для дальних самолетов, а к. п. д. винта имеет непосредственное влияние на него. Посмотрим теперь, как влияет к. п. д. на характеристики этих режимов.

Потребная самолету мощность в горизонтальном полете на высоте, соответствующей плотности  $\rho$ , с площадью крыльев  $S$  выражается так:

$$75 N \eta = c_x \rho S \frac{V^3}{2},$$

здесь  $c_x$  — коэффициент лобового сопротивления всего самолета, а  $N$  — мощность двигателя в л. с. Отсюда получаем скорость горизонтального полета

$$V = \sqrt[3]{\frac{150N}{c_x \rho S}} \sqrt{\eta}.$$

В этом равенстве при заданной мощности двигателя  $N$ , заданной площади крыльев  $S$  и заданной высоте можно считать  $c_x$  мало меняющимся со скоростью, и тогда *наибольшая скорость полета самолета будет приблизительно пропорциональна кубическому корню из коэффициента полезного действия винта*<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> При больших высотах полета, когда угол атаки велик,  $c_x$  изменяется со скоростью (углом атаки); в этом случае наибольшая скорость полета будет приблизительно пропорциональна квадратному корню из к. п. д. винта.

Быстрый подсчет (в уме) изменения скорости в зависимости от к. п. д. может быть сделан по следующему мнемоническому правилу. Пусть при к. п. д.  $\eta_1$  скорость будет  $V_1$ , а при к. п. д.  $\eta_2$  скорость  $V_2$ , тогда

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt[3]{\frac{\eta_1}{\eta_2}}$$

Предположим, что  $\eta_1 > \eta_2$ , тогда  $V_1 > V_2$  и, следовательно, можно написать

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt[3]{1+\varepsilon} = (1+\varepsilon)^{\frac{1}{3}}, \text{ где } \varepsilon = \frac{\eta_1}{\eta_2} - 1.$$

Разлагая последнее выражение по биному, получим

$$\frac{V_1}{V_2} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{3}.$$

Дальность самолета тесно связана с так называемым километровым расходом топлива  $q_k$ , т. е. расходом топлива на километр полета. Чем меньше километровый расход, тем больше дальность самолета. Километровый расход выражается следующей формулой<sup>1</sup>:

$$q_k = \frac{G}{270} \frac{c_x}{c_y} \frac{c_e}{\eta}.$$

Здесь  $G$  — полный средний вес самолета,  $\frac{c_y}{c_x}$  — качество самолета на данном режиме полета и  $c_e$  — расход топлива на 1 л. с./час. Как видим, километровый расход обратно пропорционален к. п. д. винта и прямо пропорционален величине  $c_e$ .

Длину разбега самолета можно определить по формуле

$$L = \frac{V_{\text{отр}}^2}{2g \left( \frac{P_{0.75}}{G} - K \right)}. \quad (219)$$

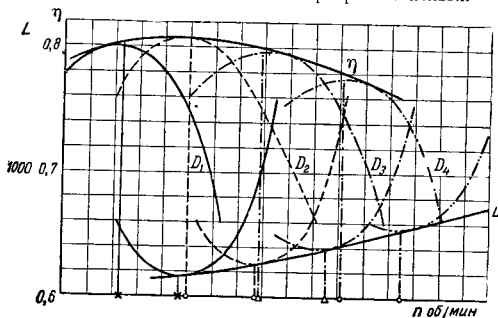
Здесь  $P_{0.75}$  — тяга винта в кг на скорости, соответствующей 0,75 скорости отрыва самолета,  $G$  — вес самолета в кг при отрыве,  $V_{\text{отр}}$  — скорость отрыва самолета в м/сек, которая может быть определена по формуле

$$V_{\text{отр}} = \sqrt{\frac{16}{c_{y \text{ отр}}} V \sqrt{p}}, \quad (220)$$

где  $p = \frac{G}{S}$  — нагрузка на  $m^2$  площади крыла при отрыве, а  $c_{y \text{ отр}}$  — коэффициент подъемной силы крыла при отрыве с уче-

<sup>1</sup> См., например, формулу (85) на стр. 174 в книге И. В. Остославского и В. М. Титова. Аэродинамический расчет самолета, Оборонгиз, Москва, 1947.

том соответствующей механизации крыла,  $K$  — коэффициент, зависящий от лобового сопротивления самолета и коэффициента трения колес самолета. В среднем коэффициент  $K$  можно принимать равным около 0,05. Из формулы (219) видно, что разбег самолета зависит от тяги винта на скорости  $0,75 V_{отр}$ ; для данного же винта эта тяга зависит от тяги на единицу мощности  $\frac{P_{0,75}}{N}$ . Таким образом критерием качества винта при разбеге является тяга на единицу мощности при скорости, равной 0,75 скорости отрыва. При выборе же винта и передачи следует основываться на длине разбега, ибо общий вес самолета при отрыве обычно бывает задан и им варьировать нельзя.



Фиг. 227 Выбор диаметра винта и передачи на винт

Из сказанного следует, что при подборе передачи и винта надо к. п. д. винта на наибольшей скорости, к. п. д. при крейсерском режиме и длину  $L$  разбега самолета выразить через число оборотов и диаметр винта. С изменением числа оборотов и диаметра к. п. д. винта на наибольшей и на крейсерской скорости изменяется, имея некоторый максимум; длина разбега также изменяется и имеет минимум.

Определять все эти величины следует по аэродинамическим характеристикам винтов, испытанных в аэродинамической трубе, вводя все необходимые поправки, указанные в § 2 и 3 данной главы. Результаты таких подсчетов к. п. д. при наибольшей и крейсерской скоростях и длины разбега наносятся на диаграммы (фиг. 227). Из этих диаграмм видно, что действительно существует наименьшая длина разбега самолета и наибольший коэффициент полезного действия винта как на наибольшей, так и на крейсерской скорости, которые соответствуют каждому определенному диаметру и числам оборотов. Обычно наибольший

к. п. д. винта на крейсерской скорости больше, чем на наибольшей скорости. Наивыгоднейшие значения диаметра и числа оборотов на всех этих режимах между собой не совпадают и поэтому приходится выбирать диаметр и передачу, исходя из режимов, наиболее важных для данного типа самолета.

Иногда полезно подбор диаметра делать для винтов с различным числом лопастей. В таких случаях можно пользоваться аэродинамическими характеристиками винтов с соответствующим числом лопастей или производить пересчет на другое покрытие. Выбрать следует винт с тем числом лопастей, которое дает лучшие результаты.

Если заявленное число оборотов крейсерского режима сильно отличается от наивыгоднейшего, то следует построить диаграмму  $\frac{C_e}{\gamma}$  по оборотам и выбрать то число оборотов, которое соответствует наименьшему значению этой величины.

В случае газовой турбины, у которой взлетные числа оборотов часто близки к номинальным, иногда целесообразно сделать специальную двухскоростную передачу, у которой передаточное число (понижающее число оборотов) было бы на взлетном режиме меньше, чем на номинальном. Этим можно улучшить работу винта на разбеге и сократить разбег самолета. Необходимость такой двухступенчатой передачи должна быть выяснена в каждом отдельном случае указанным расчетом.

При определении наивыгоднейшего винта для заданной скорости задаемся несколькими диаметрами винта и для каждого диаметра находим к. п. д. в зависимости от числа оборотов. Вычисления располагаются для каждого диаметра в следующей таблице.

Серия винта . . . . .	$D = \dots \dots \dots \text{м}$	$H \dots \dots \dots \text{м}$
$V = \dots \dots \dots \text{км/час}$	$N = \dots \dots \dots \text{л. с}$	$p \dots \dots \dots$
1. $n$	Число оборотов винта в об/мин	
2. $\lambda = 16,65 \frac{V}{n D}$	Относительная поступь; здесь $V$ — скорость в км/час; $n$ — об/мин	
3. $U = 0,0523 n D$	Окружная скорость конца лопасти в м/сек, $n$ — об/мин	
4. $W = \sqrt{U^2 + V_0^2}$	Результирующая скорость конца лопасти в м/сек; $V_0$ — в м/сек	
5. $\beta_w = 0,0161 \cdot 10^9 \frac{N}{\rho n^3 D^5}$	Коэффициент мощности, $N$ л. с, $n$ — об/мин	
6. $M_R$	Концевое число $M = \frac{W}{a}$ , где $a$ — скорость звука в м/сек	



Продолжение

7. $\beta$	Угол протекания воздуха на $0,75 R$ $\operatorname{tg} \beta = \frac{V}{2 \pi n_s 0,75 R}$ , $n_s$ — об/сек, $V$ — м/сек
8. $\varphi_{\Gamma}$	Угол установки лопасти. Находится по фиг. 197 в точке, соответствующей значению $\beta_m$ по пункту 5 и $\lambda$ по пункту 2
9. $\alpha_{\Gamma} = \varphi_{\Gamma} - \beta$	Угол атаки лопасти на $0,75 R$
10. $k_{\beta}$	Поправочный коэффициент мощности Определяется из фиг. 212 по $\alpha_{\Gamma}$
11. $\beta_p = \frac{\beta_m}{k_{\beta}}$	Расчетный коэффициент мощности
12. $\varphi_p$	Расчетный угол установки лопасти на $0,75 R$ . Получается из графика фиг. 197 по полученным $\lambda$ и $\beta_p$
13. $\eta_{\Gamma}$	Коэффициент полезного действия. Получается из графика фиг. 197 по $\lambda$ и $\beta_p$
14. $\alpha_p^{\circ} = \varphi_p - \beta^{\circ}$	Расчетный угол атаки
15. $k_{\gamma_m}$	Поправочный коэффициент. Получается из графика фиг. 213 по $\alpha_p^{\circ}$ и $M_R$
16. $k_{\gamma_{\Phi}}$	Поправочный коэффициент на относительные размеры винта и гондолы. Определяется по формуле $k_{\gamma_{\Phi}} = 0,985 \frac{k_{\Phi}}{k_{\Phi 0}}$ , где $k_{\Phi}$ определяется по фиг. 214 по $d_3$ и $D$ ; $d_3$ определяется по формуле $d_3 = 1,128 \sqrt{f}$ , где $f$ — площадь габаритного сечения гондолы (без частей крыла, обдуваемых винтом); $k_{\Phi 0}$ находится по фиг. 214 для $\frac{d_3}{D}$ , при которых строился график фиг. 197
17. $\eta = \eta_{\Gamma} \cdot k_{\gamma_m} \cdot k_{\gamma_{\Phi}}$	Искомый коэффициент полезного действия

При определении длины разбега задаемся несколькими диаметрами (тем же, как и в предыдущем случае) и для каждого диаметра находим длину разбега по формуле (119) в зависимости от числа оборотов винта.

Вычисления располагаются для каждого диаметра в следующей таблице.

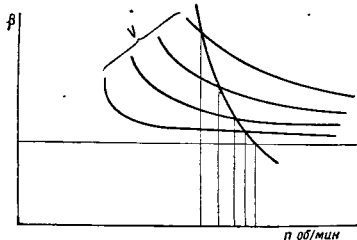
Серия винта . . . . .	$D = . . . . . \text{ м}$
Скорость отрыва $V_{отр} = . . \text{ м/сек}$	Расчетная скорость $V = 0,75 V_{отр} . . . . . \text{ м/сек}$
Вес самолета $G = . . . . \text{ кг}$	Взлетная мощность $N_{взл} = . . \text{ л с}$
Все пункты до 12 одинаковы с предыдущей таблицей (только соответствующие значения величин найдены для высоты $H = 0$ )	
13. $\alpha_{\Gamma}$	Коэффициент тяги. Определяется из фиг. 198 по найденным $\beta_p$ и $\lambda$
14. $\alpha_p^{\circ} = \varphi - \beta^{\circ}$	Расчетный угол атаки
15. $k_{\eta M}$	Поправочный коэффициент. Определяется из фиг. 213 по $\alpha_p^{\circ}$ и $M_R$
16. $\alpha_p = \alpha_{\Gamma} k_{\eta M}$	Исправленный коэффициент тяги
17. $P = \alpha_p \frac{\pi^2 D^4}{0,0288 \cdot 10^6}$	Тяга одного винта; $n$ — об/мин
18. $P$	Тяга всех винтов
19. $\frac{P}{G} - 0,05$	
20. $2g \left( \frac{P}{G} - 0,05 \right)$	
21. $L = \frac{V_{отр}^2}{2g \left( \frac{P}{G} - 0,05 \right)}$	Искомая длина разбега в м, $V_{отр}$ в м/сек

Необходимо заметить, что если установлена газовая турбина с винтом и реактивным действием или поршневой двигатель с винтом и реактивным действием, то длину разбега следует определять, учитывая тягу также и от силы реакции.

Тормозной винт обычно делается так, что при отрицательном угле установки он обращается в винт фиксированного шага, и, следовательно, от скорости полета будет зависеть число оборотов двигателя. Отрицательный угол установки винта подбирается так, чтобы винт при работе на месте в тормозном положении давал номинальное или другое (не большее) выбранное число оборотов. Тогда при посадочной скорости числа оборотов винта будут меньше. Найти эту усадку чисел оборотов можно, построив семейство кривых изменения коэффициента мощности  $\beta$  винта по числам оборотов при разных скоростях и изменение коэффициента мощности  $\beta$  двигателя по числам оборотов. Пересечение этих кривых даст значение чисел оборотов по скорости. Идея этого способа та же, какую мы применяли в § 4 гл. XII на

фиг. 203. При выбранном значении  $\varphi$  задаются разными значениями скорости  $V$  и для каждого значения чисел оборотов находят  $\lambda = \frac{V}{n_s D}$ , а отсюда по диаграмме 'фиг. 211 находят  $\beta$ . Получаются кривые, указанные на фиг. 228, причем для  $V=0$   $\beta$  переходит в прямую, параллельную оси абсцисс, так как при работе на месте у винта с определенным углом установки имеется и определенное значение  $\beta$ . На эту диаграмму наносится кривая  $\beta_m$  двигателя, которая определяется по формуле

$$\beta_m = \frac{75N}{\rho n_s^3 D^5}$$



Фиг. 228. Определение усадки чисел оборотов тормозного винта при увеличении скорости полета.

Зависимость мощности  $N$  от чисел оборотов  $n_s$  определяется по характеристике двигателя. На основании диаграммы фиг. 228 можно построить кривую изменения чисел оборотов двигателя для тормозного винта по скорости (фиг. 229). Имея значения числа оборотов  $n_s$  и  $\beta$  винта при разных скоростях, можно найти по диаграмме фиг. 211 коэффициент тяги  $\alpha$  и тягу тормозного винта по скорости. Типичная кривая дана на фиг. 230, на которой нанесены значения чисел оборотов, полученных по фиг. 229.

При подборе винта к самолету следует делать также и расчет посадочного пробега с тормозными винтами (если таковые установлены на данном самолете) и выбрать винт, удовлетворяющий условиям наименьшего пробега.

Для подбора винта расчет пробега может быть проделан следующим приближенным методом.

Сделаем упрощающие предположения.

1. Самолет после касания земли на посадке имеет угол атаки, соответствующий стояночному углу, опираясь на все три колеса.

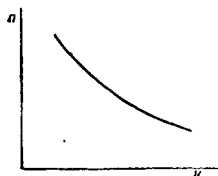
2. Коэффициент трения от скорости не зависит и в него входит трение от тормозов.

3. Если используются не все винты самолета как тормозные, то тягой остальных винтов пренебрегаем.

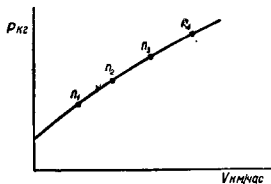
4. Тяга тормозных винтов изменяется со скоростью по закону прямой.

Последнее предположение можно сделать потому, что, как показывает фиг. 230, тяга по скорости тормозного винта не много отстает от прямой.

Уравнение движения самолета по земле на всех трех колесах, на которые он встал сейчас же после касания земли с посадоч-



Фиг. 229. Усадка чисел оборотов тормозного винта по скорости.



Фиг. 230. Тяга тормозного винта по скорости.

ной скоростью  $V_{\text{пос}}$ , причем в этот же момент включаются на полную номинальную мощность и тормозные винты, будет

$$m \frac{dV}{dt} = P + c_{x \text{ ст}} \rho S \frac{V^2}{2} + \left( G - c_{y \text{ ст}} \rho S \frac{V^2}{2} \right) f,$$

где  $m$  — масса самолета при посадке, равная  $\frac{G}{g}$ ;

$P$  — отрицательная тяга винтов (т. е. сопротивление);

$S$  — площадь крыльев самолета;

$c_{x \text{ ст}}$  — коэффициент лобового сопротивления самолета при стояночном угле атаки;

$c_{y \text{ ст}}$  — коэффициент подъемной силы при том же угле атаки;

$f$  — коэффициент трения колес с тормозами.

Заменяя  $m \frac{dV}{dt} = mV \frac{dV}{dx}$  и разделяя переменные  $V$  и  $x$ , получим

$$dx = \frac{mV dV}{P + fS \frac{V^2}{2} (c_{x \text{ ст}} - c_{y \text{ ст}} f) + Gf}$$

Линейное изменение отрицательной тяги винтов выразим уравнением

$$P = a + 2bV.$$

Обозначим

$$\rho \frac{S}{2} (c_{x \text{ ст}} - c_{y \text{ ст}} f) = A, \quad (221)$$

$$a + Gf = B, \quad (222)$$

тогда

$$dx = \frac{mVdV}{AV^2 + 2bV + B},$$

или, интегрируя от  $V=0$  до  $V=V_{\text{пос}}$  и соответственно от  $x=0$  до  $x=L$ , получим

$$L = m \int_0^{V_{\text{пос}}} \frac{VdV}{AV^2 + 2bV + B}.$$

Решение этого интеграла зависит от величины  $b^2 - AB$ .

Если  $b^2 - AB > 0$ , что обычно и бывает, так как  $A$  отрицательно, то решение этого интеграла будет

$$L = \frac{m}{2A} \left\{ \text{Ип} \frac{B + 2bV_{\text{пос}} + AV_{\text{пос}}^2}{B} + \frac{b}{\sqrt{b^2 - AB}} \text{Ип} \left[ \frac{V_{\text{пос}} (\sqrt{b^2 - AB} - b) - B}{-V_{\text{пос}} (b + \sqrt{b^2 - AB}) - B} \right] \right\}. \quad (223)$$

Следует помнить, что  $\text{Ип}$  в этой формуле натуральный; для перевода его в десятичный ( $\lg$ ) служит соотношение

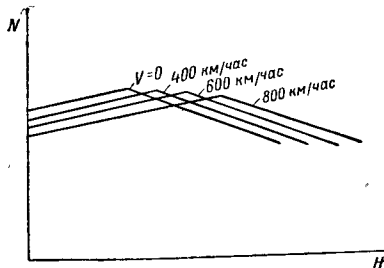
$$\text{Ип} N = \frac{\lg N}{0,434}.$$

Коэффициент трения  $f$  (трение колес с тормозами) в формулах (221) и (222) можно принимать равным 0,15.

### § 6. Построение характеристик винтомоторной группы

Под характеристиками винтомоторной группы подразумевается зависимость полезной мощности или силы тяги винта при работе с данным двигателем от скорости полета. Эта характеристика нужна при аэродинамическом расчете самолета. Аэродинамический расчет самолета обычно производится методом мощностей или методом тяг. По первому методу строятся диаграммы располагаемой (полезной) мощности, по второму — располагаемой тяги. Полученные мощности сравнивают с потребными мощностями и полученную тягу (при методе тяг) сравнивают с сопротивлением данного самолета на различных скоростях полета. Характеристике винтомоторной группы легко получить по способам, указанным в предыдущем параграфе. Действительно, имея высотную характеристику данного двигателя, исправленную на влияние скоростного напора (фиг. 231)

и построенную для определенных чисел оборотов, можно для данного винта найти значение к. п. д. в зависимости от скорости полета, проводя расчет в порядке, указанном на стр. 279. Имея значение к. п. д., можно найти и полезную, т. е. располагаемую



Фиг 231. Высотная характеристика двигателя при разных скоростях полета.

мощность  $N_{\text{пол}} = N \cdot \eta$ , где  $N$  — мощность двигателя на данной высоте и данной скорости. Диаметр винта и передача предполагается уже выбранной. Подсчеты следует провести для ряда высот. Вычисления удобно располагать в следующем порядке:

Серия винта . . . . .	$D = \dots \dots \dots$ м
$n \dots \dots$ об/мин	$H = \dots \dots \dots$ м
	$\rho = \dots \dots \dots$
1. $V$ км/час	Скорость полета
2. $\lambda = 16,65 \frac{V}{nD}$	Относительная поступь; $V$ — в км/час, $n$ — в об/мин
3. $U = 0,0523 \cdot n \cdot D$	Окружная скорость конца лопасти в м/сек, $n$ — в об/мин
4. $W = \sqrt{U^2 + V_0^2}$	Результирующая скорость в м/сек, $V_0$ — в м/сек
5. $N$	Мощность двигателя в л. с.
6. $\beta_m = 0,0161 \cdot 10^9 \frac{N}{\rho n^3 D^5}$	Коэффициент мощности; $N$ — в л. с., $n$ — в об/мин

Продолжение

7. $M_R$	Концевое число $M_R = \frac{W_R}{a}$ , $a$ — скорость звука в м/сек
8. $\beta^\circ$	Угол притекания на $0,75 R$ $\operatorname{tg} \beta^\circ = \frac{V_0}{2 \pi n_s 0,75 R} \cdot n_s$ — в об/сек. $V_0$ — в м/сек
9. $\varphi_\Gamma$	Угол установки лопасти. Находится на фиг. 197 по $\lambda$ и $\beta_m$
10. $\alpha^\circ = \varphi_\Gamma - \beta^\circ$	Угол атаки лопасти на $0,75 R$
11. $k_\beta$	Определяется из фиг. 212 по $\alpha$ и $M_R$
12. $\beta_p = \frac{\beta_m}{k_\beta}$	Расчетный коэффициент мощности
13. $\varphi_p$	Расчетный угол установки лопасти на $0,75 R$ Получается из графика фиг. 197 по $\lambda$ и $\beta_p$
14. $\eta_\Gamma$	Коэффициент полезного действия. Получается из графика фиг. 197 по $\lambda$ и $\beta_\Phi$
15. $\alpha_p^\circ = \varphi_p - \beta^\circ$	Расчетный угол атаки на $0,75 R$
16. $k_{\gamma M}$	Получается из графика фиг. 213 по $\alpha_p$ и $M$
17. $k_{\gamma \Phi}$	Поправочный коэффициент на относительные размеры винта и гондолы. Определяется по формуле $k_{\gamma \Phi} = 0,985 \frac{k_\Phi}{k_{\Phi 0}}$ , где $k_\Phi$ определяется на фиг. 214 по $d_3$ и $D$ ; $d_3$ определяется по формуле $d_3 = 1,128 \sqrt{f}$ . $k_{\Phi 0}$ находится по фиг. 214 для $\frac{d_3}{D}$ , при которых строился график фиг. 197
18. $\eta = \eta_\Gamma \cdot k_{\gamma M} \cdot k_{\gamma \Phi}$	Искомый коэффициент полезного действия
19. $N_{\text{пол}} = N \eta$	Полезная или располагаемая мощность винтомоторной группы
20. $P = \frac{N_{\text{пол}}}{V_0}$	Тяга винта; $V_0$ в м/сек

## Глава XIV

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛОПАСТИ ВИНТА

## § 1. Основные положения проектирования лопасти винта

При проектировании лопастей винта приходится иметь в виду основные пять условий, указанных в § 1 гл. I: проектирование лопасти связано не только с аэродинамикой винта, но также и с конструкцией лопасти, ее динамикой, технологией и эксплуатацией. В силу этого аэродинамический расчет лопасти винта можно рассматривать с двух точек зрения.

1. Заданы условия работы винта — скорость полета и мощность двигателя по высотам, число оборотов двигателя в передаточное число на винт и диаметр винта. Находятся геометрические характеристики винта, т. е. изменение ширины, толщины и крутки лопасти по радиусу, и число лопастей, которые удовлетворяли бы аэродинамическим требованиям при условии получения, по возможности наибольшего коэффициента полезного действия на главнейших режимах работы данного самолета и при условии наименьшего разбега самолета. Этот случай называется проективным расчетом винта.

2. По имеющимся геометрическим характеристикам винта определить его аэродинамические характеристики. Этот случай расчета называется поверочным аэродинамическим расчетом винта.

Для чего же нужен этот поверочный расчет? Дело в том, что при проективном расчете обычно трудно сразу предусмотреть все разносторонние требования к лопасти винта. После проективного расчета ее приходится еще подправлять, а иногда и значительно переделывать. Эту, уже сконструированную лопасть надо проверить, дает ли она нужные аэродинамические характеристики.

Наличие в винте большого количества параметров, которые необходимо увязать при проектировании, причем многие из них противоречат друг другу, не позволяет остановиться на одном решении в задаче определения геометрических характеристик винта под определенное задание. Проектирование винта вообще и, в частности, лопастей носит характер инженерного искусства, и задачей конструктора является так предусмотреть все наиболее важные взаимосвязи, чтобы получить в конечном счете наилучший результат.

В зависимости от важности и сложности задания проективный и поверочный расчеты могут совмещаться или, наоборот, расширяться и все проектирование лопасти вестись по одному из следующих путей.

1. Лопасти подбираются из испытанных семейств винтов с различными соотношениями параметров.



2. Лопастей рассчитываются по какой-либо аэродинамической теории винта, причем сначала делается проективный расчет, а затем поверочный.

3. Геометрические и аэродинамические характеристики винта находятся расчетом, как в п. 2, и после этого модель винта испытывается еще в аэродинамической трубе и находятся аэродинамические характеристики.

Последний путь самый правильный, хотя и самый дорогой, так как; помимо многочисленных расчетов, приходится вести и испытания в трубе иногда не одного, а нескольких вариантов лопастей винтов.

## § 2. Нахождение основных геометрических характеристик винта

При проектировании винта задаются следующие величины.

1. Характеристика двигателя, на который устанавливается винт, с учетом влияния скоростного напора в полете.

2. Передаточное число, т. е. отношение числа оборотов винта к числу оборотов двигателя.

3. Скорость полета самолета наибольшая и крейсерская на определенных высотах, а также скорость отрыва при наибольшем полетном весе.

4. Диаметр винта обычно предполагается уже выбранным; также предполагается выбранным число лопастей.

Рассмотрим сначала, как подобрать винт по имеющимся аэродинамическим характеристикам различных семейств винтов. Допустим, что требуется подобрать винт изменяемого шага. Для этого находим по характеристикам нескольких серий, которые по мнению конструктора наиболее подходят для его целей, руководствуясь всем изложенным в данном курсе, для заданных скоростей полета (наибольшая и крейсерская скорости) при соответствующей мощности и числе оборотов двигателя на заданной высоте, к. п. д. винта по методу, указанному в § 5 предыдущей главы. В данном случае в качестве параметра следует уже брать не число оборотов винта, а разные семейства винтов. В зависимости от назначения самолета выбирается то семейство винтов, которое дает наибольший к. п. д. на наибольшей или крейсерской скорости или наименьший разбег. Геометрические характеристики этого семейства и будут искомыми геометрическими характеристиками.

Для выбранного винта изменяемого шага надо еще найти угол установки малого шага. Он находится из условия, чтобы при работе винта на месте на номинальной или взлетной мощности получились номинальные или взлетные числа оборотов двигателя.

О том, как задавать угол установки винта на малом шаге, сказано в § 3 гл. XXIII. Сейчас же предположим, что заданы мощность двигателя и числа оборотов винта при работе на месте. Требуется определить угол установки лопастей.

По заданной мощности, числе оборотов и диаметру находим коэффициент  $\beta$  по формуле

$$\beta = 1,296 \cdot 10^8 \frac{N}{n^3 D^5}, \quad (224)$$

где  $N$  — в л. с.,  $n$  — в об/мин.

В этом случае не нужно делать поправку на сжимаемость воздуха и тогда по найденному  $\beta$  по графику аэродинамической характеристики данного семейства винтов (фиг. 197) находится угол установки  $\varphi$ , соответствующий той кривой семейства, которая пересекает ось ординат (т. е. при нулевой скорости) при значении найденного  $\beta$ .

По найденным геометрическим характеристикам и малому углу установки винта составляется чертеж по правилам, указанным в § 4 настоящей главы. Таким способом можно проектировать винты для аэросаней, глиссеров и маломощных самолетов (с мощностью двигателя до 500 л. с.). В этом случае почти никогда не требуется проверять данный винт на прочность, если только его режимы работы не сильно отличаются от обычных, свойственных данному семейству. При проектировании винтов по этому способу к более мощным двигателям рекомендуется делать после выбора семейства поверочный расчет прочности лопасти.

Заново проектировать винт можно по одной из аэродинамических теорий винта. Рассмотрим сначала общий ход расчета, а затем в качестве примера приведем проективный расчет по вихревой теории Н. Е. Жуковского.

При проектировании винта по какой-либо аэродинамической теории должны быть ранее определены или заданы: 1) диаметр винта; 2) число лопастей; 3) ширина лопасти (эти три величины удобнее выбирать по методу, указанному в § 5 гл. XIII, и поэтому их можно считать заданными). Далее необходимо иметь: 4) поле скоростей около тела, впереди или сзади которого устанавливается винт (если такое поле получить опытным путем трудно, то можно воспользоваться приближенными методами, указанными в § 2 гл. XI); 5) мощность двигателя на расчетной высоте; 6) взлетную мощность двигателя; 7) расчетные скорости самолета на соответствующих высотах.

В зависимости от назначения самолета за расчетную точку винта, т. е. ту точку режима, на котором он имеет наибольший к. п. д., принимается наибольшая скорость горизонтального полета, соответствующая определенной высоте, или крейсерская скорость тоже на определенной высоте.

Прежде всего следует задаться определенным распределением нагрузки по лопасти, если данная теория не дает сразу указаний о законе распределений нагрузки. В вихревых теориях таким параметром нагрузки служит циркуляция скорости. По большей части эту нагрузку принимают по закону эллипса. За-

тем по уравнению связи лопасти с потоком находят при заданном законе распределения ширины соответствующие коэффициенты подъемной силы  $c_y$ . Далее по характеристикам дужек находят те углы атаки, которые соответствуют выбранным  $c_y$ . Необходимо заметить, что характеристика дужек, которыми следует пользоваться при подборе сечения, должны относиться к бесконечному размаху и, кроме того, к тем большим скоростям, которые имеются у винта. Если испытаний дужек на больших скоростях нет, то следует сделать поправку по методу, указанному в § 2 гл. XIII. Для того чтобы найти углы установки сечений, следует определить вызванные винтом скорости по мощности, имеющейся в распоряжении винта.

В качестве примера разберем проективный расчет винта по вихревой теории П. Е. Жуковского и для частного случая винта НЕЖ, т. е. с постоянным распределением циркуляций по лопастям. В этом случае все расчетные формулы получаются в конечном виде. Если циркуляцию принять не постоянной, а, например, эллиптической, то решение задачи придется делать методом последовательных приближений, т. е. задаться определенной циркуляцией и определить получающуюся мощность, затем снова задаться циркуляцией и снова определить мощность, такие подсчеты делать до тех пор, пока полученные мощности и заданные не совпадут.

Расчетными формулами для винта НЕЖ будет формула (141) связи скорости в плоскости винта и циркуляций, формулы (150) связи мощности, циркуляций и скорости в плоскости винта и уравнение связи (151). Решая совместно уравнения (141) и второе уравнение (150), находим два неизвестных  $\bar{V}_1$  и  $\bar{\Gamma}$ . Так как  $\bar{W}_1 = \sqrt{\bar{U}_1^2 + \bar{V}_1^2}$ , то, находя по уравнению (145) окружную скорость  $\bar{U}_1$ , найдем скорость  $W$  по сечению, а по уравнению связи (151) — и связь ширины лопасти  $\bar{b}$  с коэффициентом подъемной силы  $c_y$  на каждом радиусе. По характеристикам дужек по найденным  $c_y$  найдем углы атаки по сечениям.

От распределения толщины вдоль лопасти зависит прочность лопасти. Подбор толщины можно делать двойным способом, или задаться уже проверенным законом распределения толщины вдоль лопасти, или пользоваться для подбора сечений методом В. П. Ветчинкина. Этот метод заключается в следующем. Модуль сопротивления на изгиб сечения лопасти можно представить следующим образом:

$$W_n = \left(\frac{b}{A}\right)^s, \quad (225)$$

где  $A$  — некоторый коэффициент, зависящий от формы дужки и ее толщины. Из уравнения связи (152)

$$b = \frac{2\Gamma'}{c_y W_1}$$

и тогда

$$W_u = \left( \frac{2\Gamma}{A_{c_y} W_1} \right)^3.$$

Пусть  $M_u$  — изгибающий момент, меняющийся вдоль лопасти; тогда в каждом сечении должно выполняться неравенство

$$W_u \geq \frac{M_u}{\sigma_u},$$

где  $\sigma_u$  — условное допустимое напряжение от изгиба материала лопасти или

$$A_{c_y} \leq \frac{2\Gamma}{W_1} \sqrt[3]{\frac{M_u}{\sigma_u}}. \quad (226)$$

Можно составить для определенного типа дужки диаграммы типа, показанного на фиг. 232, на которой по оси ординат отложен вверх коэффициент подъемной силы  $c_y$  дужек разной толщины с отметкой угла атаки  $\alpha$ , вниз — качество дужки, а по оси абсцисс — величина  $A_{c_y}$ . Определяя в каждом сечении величину  $M_u$  (см. § 1 гл. XVI),  $\Gamma$  и  $W_1$ , найдем значение правой части неравенства (226) и, следовательно, ту наибольшую величину  $A \cdot c_y$ , которая допускается указанной выше прочностью. Дужка на каждом сечении выбирается такой толщины, чтобы она удовлетворяла этому условию прочности и, кроме того, имела возможно большее качество. После выбора толщин дужек в сечениях их приходится «сглаживать», чтобы не получилось неплавное течение толщины по лопасти.

Практически обычно проективный расчет делается в коэффициентах тяги  $\alpha$  и мощности  $\beta$ . В этом случае формулы вихревой теории примут следующий вид. Так как легко видеть, что

$$\alpha = \frac{\pi^3}{2} P, \quad (227)$$

$$\beta = \frac{\pi^4}{2} \bar{T}, \quad (228)$$

$$\lambda = \pi \bar{V}_0, \quad (229)$$

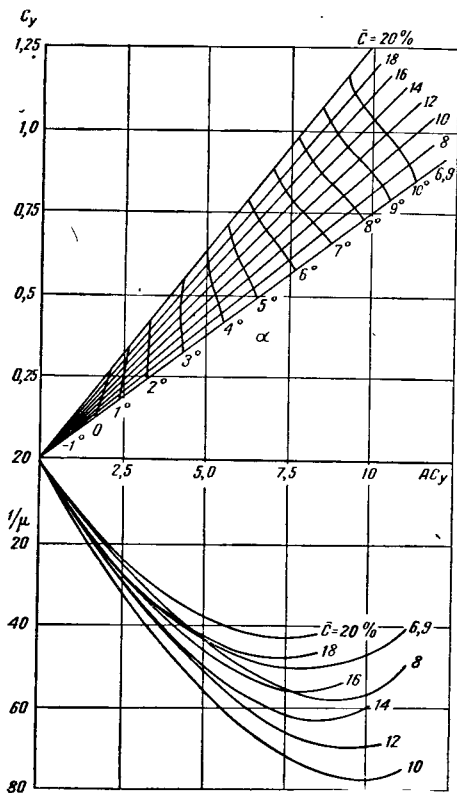
то формула (141) примет вид

$$\bar{V}_1 = \frac{\lambda}{2\pi} + \sqrt{\frac{\lambda^2}{4\pi^2} + \bar{\Gamma}}, \quad (230)$$

а формулы (149)

$$\frac{d\alpha}{dr} = \pi^3 \bar{\Gamma} (\bar{U}_1 - \mu \bar{V}_1), \quad (231)$$

$$\frac{d\beta}{dr} = \pi^4 \bar{\Gamma} (\bar{V}_1 + \mu \bar{U}_1) \bar{r}, \quad (232)$$



Фиг. 232. Диаграмма для подбора дужек по методу В. П. Ветчинкина.

$$\alpha = \pi^3 \int_{r_0}^1 \bar{\Gamma} (\bar{U}_1 - \mu \bar{V}_1) \bar{d}r, \quad (233)$$

$$\beta = \pi^4 \int_{r_0}^1 \bar{\Gamma} (\bar{V}_1 + \mu \bar{U}_1) \bar{r} \bar{d}r. \quad (234)$$

Надо иметь в виду, что окружная скорость  $\bar{U}_1$  выражается формулой (145).

Для винта НЕЖ получим

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\pi^3}{2} \bar{\Gamma} [1 - \bar{r}_0^2 + 2\bar{\Gamma} \ln \bar{r}_0 - 2\mu \bar{V}_1 (1 - \bar{r}_0)], \\ \beta &= \frac{\pi^4}{2} \bar{\Gamma} \left[ \bar{V}_1 (1 - \bar{r}_0^2) + \frac{2}{3} \mu (1 - \bar{r}_0^3) - 2\mu \bar{\Gamma} (1 - \bar{r}_0) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (235)$$

Так как обычно задаются эллиптическим законом распределения циркуляции по лопасти, то уравнение циркуляции имеет вид

$$\bar{\Gamma}^2 = 4\bar{\Gamma}_{\max}^2 \bar{r} (1 - \bar{r}). \quad (236)$$

Все вычисления удобно свести в следующую таблицу.

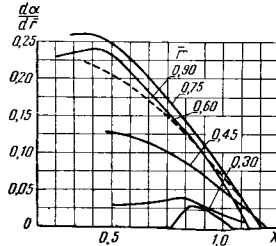
$\bar{r}$	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
1. $\bar{\Gamma}_{\max}$	Задается								
2. $\bar{\Gamma}$	Находится по формуле (236)								
3. $\bar{U}_1$	Находится по формуле (145)								
4. $\bar{V}_1$	Находится по формуле (230)								
5. $\frac{d\beta}{dr} \kappa$	Находится по формуле (232)								
6.	Строится кривая $\kappa \frac{d\beta}{dr}$ в функции $\bar{r}$ и находится ее площадь, выражающая собой $\beta$ для всего винта								
7.	Сравнивается полученное значение $\beta$ с заданным. Если оно не совпадает, то подсчеты повторяются снова								
8. $\bar{W}_1$	$\bar{W}_1 = \sqrt{\bar{U}_1^2 + \bar{V}_1^2}$								
9. $\beta'$	Угол притекания $\text{tg } \beta' = \frac{\bar{V}_1}{\bar{U}_1}$								
10. $\bar{b}$	Ширина лопасти (относительная) задана								
11. $c_y$	По уравнению связи (151)								
12. $\bar{c}$	Задаана по одной из серий								
13. $\alpha^*$	По характеристике лужек								
14. $\varphi = \beta' + \alpha^*$									

Задано: мощность мотора  $N$  в л. с., диаметр винта  $D$  в м, скорость полета  $V$  в м/сек, число оборотов винта  $n_b$  в об/сек; по этим данным находятся  $\lambda$  и  $\varphi$ . Кроме того, задано распределение ширины  $b$  и толщины  $c$  по лопасти.

Можно  $b$  и не задавать, а подобрать по уравнению связи, принимая во внимание зависимость качества дужки от  $c_y$ .

### § 3. Поверочный расчет воздушного винта

Рассмотрим поверочный расчет винта по вихревой теории Н. Е. Жуковского методом, предложенным Г. И. Кузьминым. В этом случае заданы все геометрические характеристики винта,



Фиг. 233 Диаграмма зависимости изменения коэффициента тяги по радиусу от скорости (относительной поступи  $\lambda$ )

его число оборотов и скорость полета; ищется поглощаемая винтом мощность и его тяга. Выведем некоторые вспомогательные формулы. Скорость  $\bar{W}_1$  выражается так:

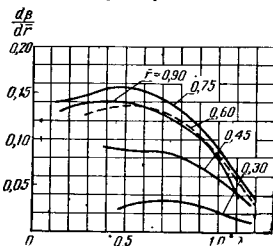
$$\bar{W}_1 = \frac{U_1}{\sin \beta'},$$

а угол притекания  $\beta'$

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{U_1}{V_1}. \quad (237)$$

Вставляя в уравнение связи это значение  $\bar{W}_1$  и  $U_1$  по (145), получим

$$\bar{\Gamma} = \frac{c_y b r}{2 \sin \beta' + \frac{c_y b}{r}}. \quad (238)$$



Фиг. 234 Диаграмма зависимости изменения коэффициента мощности по радиусу от скорости (от  $\lambda$ ).

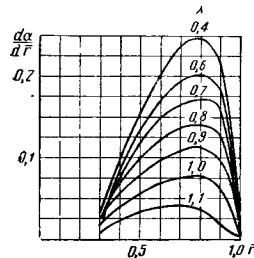
Определим из уравнения (230)  $\lambda$ :

$$\lambda = \pi \left( \bar{V}_1 - \frac{\bar{\Gamma}}{V_1} \right). \quad (239)$$

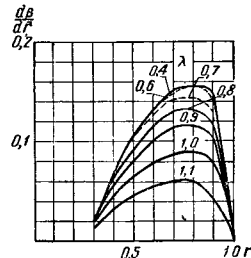
Расчет ведем для каждого сечения отдельно, задаваясь рядом величин  $c_y$ . Для каждого сечения расчеты располагаем в следующей таблице.

$c_y =$	$\mu =$	$\alpha =$	$\beta' =$	$\sin \beta' =$	$\operatorname{tg} \beta' =$	$\bar{\Gamma} =$	$\bar{U}_1 =$	$\bar{V}_1 =$	$\lambda =$	$\frac{d\alpha}{dr} =$	$\frac{d\beta}{dr} =$
Задается	Находится по характеристике дужки по $c_y$	Находится по характеристике дужки по $c_y$	Находится по формуле $\beta' = \varphi - \alpha$			Находится по формуле (238)	Находится по уравнению (145)	Находится по уравнению (237)	Находится по уравнению (239)	Находится по уравнению (231)	Находится по уравнению (232)

Строим диаграммы  $\frac{d\alpha}{dr}$  и  $\frac{d\beta}{dr}$  по  $\lambda$  типа указанных на фиг. 233 и 234 по параметру  $r$ . Затем эти диаграммы перестраиваем по  $r$  для искомого  $\lambda$  (фиг. 235, 236). Графическим интегри-



Фиг. 235 Распределение коэффициента тяги по лопасти.

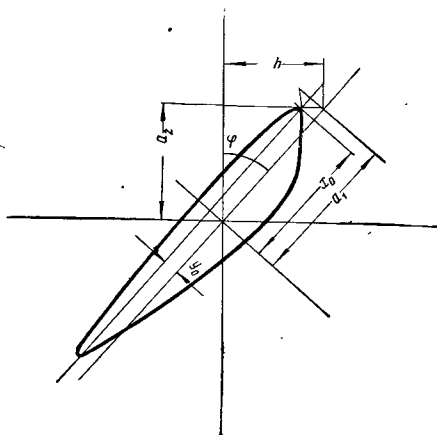


Фиг. 236 Распределение коэффициента мощности по лопасти

рованием, т. е. подсчетом площади под кривой для каждой  $\lambda$  с учетом масштаба, находим величины  $\alpha$  и  $\beta$  одной лопасти, умножая которые на число лопастей, можно определить  $\alpha$  и  $\beta$ , а по ним найти тягу и мощность.

#### § 4. Изготовление чертежа лопасти

Чертеж лопасти делается по ее геометрическим характеристикам в двух проекциях — вид в плане и вид сбоку. Лопасть вычерчивается обычно в положении малого угла ее установки, или при нулевом угле установки на радиусе  $0,75R$ , причем на плановой проекции наносятся также и соответствующие сечения под углами их установки. По большей части винт конструирует-



Фиг. 238. Ориентировка дужек на чертеже лопасти винта.

ся так, что в плановой и боковой проекциях центры тяжести сечений находятся на оси лопасти. В тех случаях, когда приходится разгружать лопасть от изгибающих сил, линия центров тяжести сечений на боковой проекции откинута вперед — по полету. На фиг. 237 дан типичный чертеж лопасти. Сечения наносятся на определенных стандартных радиусах согласно таблице, приведенной на стр. 297. Если винт делается с коком, то места выхода лопастей из кока желательно делать круглыми для того, чтобы при повороте лопасти не образовывались большие щели между лопастью и коком; кроме того, в случае двигателя воздушного охлаждения необходимо, чтобы прикомлеванная часть винта его обдувала при работе на месте и при рулежке самолета. Для этого прикомлевуемую часть делают профилированной с достаточно резким переходом на круглую часть.



## Стандартные радиусы лопасти винта в мм

400;	550;	700;	850;	1000;	1150;	1300;	1450;	1600;
1750; <sup>1</sup>	1900;	2050;	2200;	2350;	2500;	2650;	2800;	2950;

Для каждого стандартного радиуса сначала вычисляют ординаты верхней и нижней частей дужки сечения по соответствующим таблицам, в которых даны эти ординаты в относительных единицах для определенных стандартных абсцисс. За ось абсцисс дужки принимают ее хорду. Ориентировку дужек на плановой проекции производят следующим образом. Координаты центра тяжести дужки  $x_0$  и  $y_0$  всегда известны (они приводятся в характеристиках дужки), по геометрическим характеристикам лопасти известны и углы установки дужек на сечениях. Тогда по фиг. 238 и согласно обозначениям на этой фигуре получают

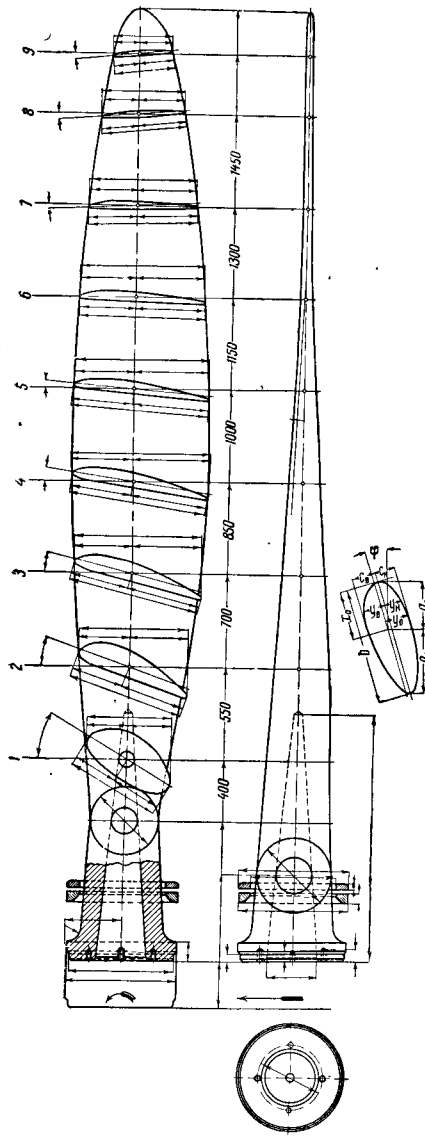
$$h = a_1 \sin \varphi; \quad a_1 = x_0 + y_0 \operatorname{tg} \varphi,$$

отсюда

$$h = x_0 \sin \varphi + y_0 \operatorname{tg} \varphi \sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi (x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi).$$

Обозначают  $x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi = a_2$ , тогда  $h = a_2 \operatorname{tg} \varphi$ .

По этим формулам можно определить  $a_2$  и  $h$  и по этим величинам и координатам центра тяжести так построить дужки, чтобы их центры тяжести совпали с осью лопасти. Все необходимые размеры для изготовления лопасти по чертежу указаны на фиг. 237.



Фиг. 237. Типичный чертёж лопасти винта.

---

ЧАСТЬ IV  
**ДИНАМИКА ВИНТА**

---

*Глава XV*

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ДИНАМИКЕ ВИНТА**

**§ 1. Силы и моменты, действующие на винт**

Предположим, что невесомый винт вращается вокруг своей оси с равномерной угловой скоростью и передвигается прямолинейно вдоль оси с постоянной скоростью. В этом случае к валу винта будет приложен постоянный вращающий момент, а реактивными силами будут аэродинамические силы. Передача этих сил будет совершаться через материал лопасти и втулки, в которых от этого будут возникать напряжения и деформации.

Описанная схема является гипотетической и мало отражающей действительную картину сил и моментов, действующих в работающем винте. Реальный винт имеет вес и, следовательно, массу, а так как при вращении винта возбуждаются центробежные ускорения, то возникают еще и центробежные силы, величина которых зависит, как известно, от скорости вращения и массы. При скоростях вращения современных винтов величина центробежной силы весьма велика и ею при рассмотрении сил, действующих на винт, пренебрегать ни в коем случае нельзя.

Предположим далее, что винт вращается на оси неравномерно. Это может происходить от того, что крутящий момент винта или реакция аэродинамических сил непостоянны по времени, или, наконец, соотношения между аэродинамическими силами и силами упругости винта таковы, что получается изменение этих сил. Во всех этих случаях мы будем иметь неустановившееся движение винта, от чего будут возникать инерционные силы, которые тоже приходится принимать во внимание.

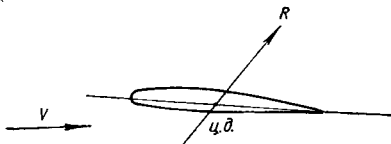
Если к неравномерному вращению винта вокруг его оси прибавить еще неустановившееся движение самого винта, то картина движения еще более усложнится.

Задачей данного раздела является рассмотрение указанных сил, вызываемых ими движений, нахождение напряжений в материале винта, получающихся от этих сил, и исследование всех явлений, которые при этом происходят. Иными словами, дина-

мика винта охватывает вопросы исследования прочности винта, нахождения усилий, действующих на механизм втулки винта, исследования устойчивости работы винта и шума, порождаемого винтом.

Очевидно, что исследование неустановившихся движений винта значительно сложнее, чем исследование установившихся движений. Поэтому в данном параграфе мы рассмотрим силы и вызываемые ими деформации лопастей лишь в случае установившегося движения винта. Неустановившиеся движения рассмотрены в гл. XVII.

Итак, при равномерном вращении винта и установившемся прямолинейном движении в направлении оси с постоянной скоростью на винт будут действовать аэродинамические силы и вызываться центробежные силы. Какие же из этих сил создают деформации?



Фиг. 239 Центр давления дужки

Аэродинамические силы появляются как результат воздействия воздуха на лопасть и действуют по всей ее поверхности. Результирующую поверхностных сил, действующих на элемент сечения лопасти, представим в виде вектора, лежащего в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения винта и оси лопасти. Предполагаем, что ось лопасти лежит в плоскости вращения. Положение этого вектора на сечении будет определяться центром давления сечения, т. е. точкой пересечения вектора аэродинамической силы с хордой дужки (фиг. 239). Эти векторы как-то образом распределятся вдоль лопасти.

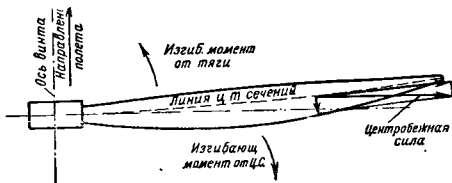
С точки зрения сопротивления материалов такую схему нагружения лопасти можно рассматривать как балку, одним концом закрепленную и подверженную действию распределенной нагрузки, представляющей собой указанное распределение векторов. Такая нагрузка изгибает и скручивает лопасть и тем самым выводит ось лопасти из плоскости вращения, в которой по условию она находилась, и поворачивает сечения около оси лопасти.

Центробежная сила есть сила массовая, она направлена от оси вращения и перпендикулярна ей.

Рассмотрим какой-либо элемент, вырезанный в сечении лопасти (фиг. 240). При вращении винта в нем будет возбуждаться центробежная сила, вектор которой будет проходить через



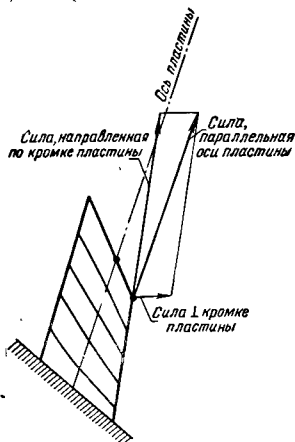
плоскости вращения. В этом случае растягивающие центробежные силы лежат в плоскости, находящейся под углом к изогнутой оси лопасти (фиг. 242). Эти центробежные силы можно



Фиг. 242. Разгрузка лопасти от изгибающего момента тяги с помощью центробежной силы, создающей противоположный изгибающий момент при откинутой вперед по полету лопасти.

разложить по направлению оси лопасти в каждом сечении и параллельно оси вращения винта. Первая составляющая поперечному будет растягивать лопасть, а вторая создает изгибающий момент, противоположный изгибающему моменту от аэродинамических сил. Следовательно, под влиянием центробежных сил лопасть может изгибаться.

Лопасть может быть представлена в виде закрученной пластины, на которую действует вдоль ее оси растягивающая центробежная сила. Эта сила будет раскручивать лопасть. Действительно, если мы рассмотрим закрученную по винтовой поверхности пластину (фиг. 243) и приложим к ее элементу продольную силу, то эту силу можно разложить на касательную к винтовой поверхности и на перпендикулярную к ней. Эта последняя сила и будет раскручивать пластину. Точно такое же явление происходит и с лопастью — под влиянием продольных центробежных сил



Фиг. 243. Схема раскручивающего действия закрученной пластины под действием силы, направленной параллельно оси скручивания пластины.

*лопасть раскручивается*, т. е. углы установки сечений увеличиваются.

Таким образом под влиянием центробежных сил происходит двойное кручение лопасти — под влиянием пары сил лопасть стремится повернуться, устанавливаясь на меньший угол установки, а под влиянием продольной силы углы установки увеличиваются. Однако между этими двумя кручениями есть принципиальная разница. В первом случае поперечная пара сил получается потому, что на сечение лопасти действуют непараллельные силы, разложение которых дает еще поперечные силы. Для того чтобы удержать лопасть от движения под действием этих сил, следует приложить у комля какой-то реактивный момент. Во втором случае мы просто раскладываем продольную силу на составляющие: сама осевая сила возбуждает реакцию, ее же составляющие реакцию создать не могут, так как реакция уже имеется, и все остальные силы дадут в сумме нуль. Следовательно, скручивающий момент от продольной силы будет моментом внутренним, и он не даст никакого движения лопасти, а лишь деформирует ее: внешнего реактивного момента не будет. Поэтому первый скручивающий момент приходится принимать во внимание при расчете механизма винта изменяемого шага, тогда как второй скручивающий момент принимается лишь при расчете прочности лопасти. Необходимо заметить, что этот последний момент относительно мал и им при расчете часто пренебрегают.

Таким образом можно сказать, что *аэродинамические силы изгибают и скручивают лопасть, а центробежные силы растягивают, скручивают и изгибают лопасть.*

## § 2. Методы расчета прочности винта

В предыдущем параграфе мы упоминали, что в общем случае движение винта и его лопастей может быть неустановившимся. В особенности это имеет место при установке винта на поршневых двигателях, у которых момент на валу переменный. Неустановившееся движение винта по большей части носит колебательный характер, а при достаточно больших частотах колебаний ускорения могут быть значительными, и силы, порождаемые этими колебаниями, могут быть очень велики. Поэтому в практике эксплуатации воздушных винтов на поршневых двигателях почти всегда все поломки носили следы усталостного характера материала. Следовательно, строго говоря, *расчет на прочность винта следует делать исходя из его неустановившегося движения.* Однако, как увидим далее, динамический расчет прочности представляет большую сложность, и поэтому часто пользуются упрощенным способом расчета, при котором рассматривается статическая картина сил и моментов, действующих на винт. Для еще большего упрощения моменты и силы, которые имеют относительно малое значение, совсем не рассматриваются.

Таким образом имеются два метода расчета винта на прочность — метод расчета, основанный на динамической картине сил и моментов, действующих на винт, и метод расчета, основанный на статической картине сил и моментов, действующих на винт. Первый метод основан на схеме, близкой к действительности, тогда как второй метод является более искусственным, но зато более простым.

## Глава XVI

### СТАТИЧЕСКАЯ КАРТИНА СИЛ И МОМЕНТОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ВИНТ

#### § 1. Упрощенный метод расчета прочности лопастей

Расчет и опыт показывают, что деформации кручения металлических лопастей, или так называемая закрутка лопастей, не велика. Напряжения от крутящих моментов тоже невелики, и поэтому в упрощенном расчете прочности винта крутящие лопасть моменты во внимание не принимаются. Остаются напряжения растяжения, вызываемые центробежными силами и изгибающими моментами от аэродинамических сил. Общее напряжение мы будем выражать как сумму напряжений от центробежных сил и от растяжения изгиба моментами аэродинамических сил. Таким образом

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_n,$$

где  $\sigma_c$  — напряжение растяжения от центробежных сил, а  $\sigma_n$  — напряжение растяжения от изгиба аэродинамическими силами.

Центробежная сила элемента массы  $m$ , находящейся на расстоянии от оси вращения  $r$  и вращающейся с угловой скоростью  $\Omega$ , выражается формулой

$$P_c = m\Omega^2 r. \quad (240)$$

Эта сила приложена к центру тяжести элемента массы  $m$  и направлена по перпендикуляру, опущенному из центра тяжести массы  $m$  на ось вращения в сторону от оси вращения к периферии.

Выделим на каком-либо радиусе  $r$  элемент лопасти  $dm$ , ограниченный двумя сечениями, находящимися на расстоянии  $dr$  друг от друга; тогда центробежная сила этого элемента будет

$$dP_c = \Omega^2 r dm. \quad (241)$$

Элемент массы будет

$$dm = \frac{\gamma}{g} S dr,$$



где  $S$  — площадь сечения лопасти, которую можно выразить так:

$$S = k_3 b c,$$

здесь  $b$  — ширина лопасти,  $c$  — ее толщина,  $k_3$  — некоторый коэффициент, зависящий от типа профиля. Так, например,

для профиля	Кларк Y	$k_3 = 0,725$	
»	»	типа Ф	$k_3 = 0,70$
»	»	РАФ-6	$k_3 = 0,738$

Подставляя приведенные значения в формулу (241), получим выражение для центробежной силы элемента лопасти

$$dP_c = \frac{1}{g} \gamma \Omega^2 k_3 b c r dr$$

или

$$\frac{dP_c}{dr} = \frac{\gamma}{g} k_3 \Omega^2 b c r.$$

В отвлеченных обозначениях будем иметь

$$\frac{dP_c}{dr} = \frac{1}{4} \frac{\gamma}{g} k_3 \Omega^2 \bar{b}^2 \bar{c} r D^4. \quad (242)$$

Заменяя угловую скорость  $\Omega$  через  $2\pi n_s$ , получим

$$dP_c = \frac{\gamma}{g} \pi^2 k_3 n_s^2 D^4 \bar{b}^2 \bar{c} r dr.$$

Обозначим

$$dK_c = \frac{\pi^2}{60^2} k_3 \bar{b}^2 \bar{c} r dr, \quad (243)$$

тогда

$$\frac{dK_c}{dr} = \frac{\pi^2}{60^2} k_3 \bar{b}^2 \bar{c} r$$

и

$$dP_c = dK_c \frac{\gamma}{g} n^2 D^4, \quad (244)$$

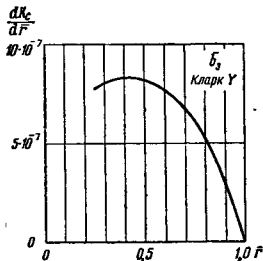
где  $n$  — число оборотов в минуту.

Величину  $dK_c$  можно назвать коэффициентом центробежной силы элемента лопасти.

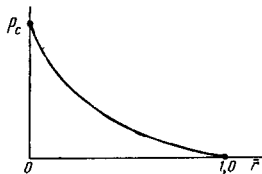
На фиг. 244 дана типичная кривая  $\frac{dK_c}{dr}$  по  $\bar{r}$ . Величина  $\frac{dP_c}{dr}$  будет иметь аналогичное течение вдоль лопасти. Ее можно найти, умножив  $\frac{dK_c}{dr}$  на  $\frac{\gamma}{g} n^2 D^4$ . Не следует забывать, что кривая, данная на фиг. 244, представляет собой изменение

величины центробежной силы, пропорциональной  $\frac{dK_c}{dr}$ , по сечениям лопасти.

Формула (244) дает величину центробежной силы, действующей на *определенный элемент лопасти*. Для того чтобы найти, какая центробежная сила будет действовать на *определенном сечении*, следует просуммировать центробежные силы, действующие на все элементы лопасти, лежащие от данного сечения к внешнему концу лопасти.



Фиг. 244. Распределение по лопасти коэффициента центробежной силы.



Фиг. 245. Распределение вдоль лопасти центробежной силы.

пасти. Причем, очевидно, что если рассматривать сечения, начиная от внешнего конца лопасти к оси винта, то центробежная сила будет все увеличиваться, так как к центробежной силе на каждом сечении будет прилагаться центробежная сила соседнего элемента. Следовательно, можно заранее сказать, что распределение центробежной силы в каждом сечении будет таково, что максимум окажется на оси винта (фиг. 245).

Интегрируя уравнение (244) в пределах от какого-либо сечения  $r_0$  до конца лопасти, получим

$$P_c = \frac{\gamma}{g} n^2 D^4 \int_{r_0}^1 dK_c.$$

Величину  $\int_{r_0}^1 dK_c$  обозначим  $K_c$  и назовем *коэффициентом центробежной силы в сечении лопасти*. Согласно формуле (243) он выражается следующим образом:

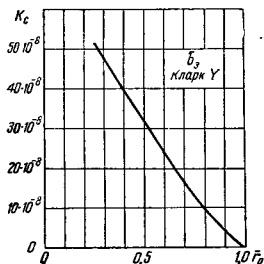
$$K_c = \frac{\pi^3 k_3}{60^2} \int_{r_0}^1 \frac{1}{b^2 c^2} r^2 dr. \quad (245)$$

Как видим, коэффициент центробежной силы в сечении лопасти зависит от радиуса рассматриваемого сечения и от типа сечений, характеризуемых коэффициентом  $k_3$  и распределением ширины и толщины по радиусу. Для определенной лопасти винта этот коэффициент зависит только от радиуса рассматриваемого сечения  $r_0$ .

Центробежная сила на радиусе  $\bar{r}_0$  выразится так:

$$P_c = K_c \frac{\gamma}{g} n^2 D^4. \quad (246)$$

Коэффициент  $K_c$  вычисляется по формуле (245) методами численного интегрирования. Для типичных лопастей величину  $K_c$  вдоль лопасти можно вычислить заранее, и тогда определение центробежной силы сведется к простому подсчету по формуле (246). На фиг. 246 приведена типичная кривая течения  $K_c$  вдоль лопасти. В таблице даны значения  $\bar{K}_c$  разных типов лопастей для  $\bar{r}_0 = 0,25$ .



Фиг. 246 Изменение коэффициента центробежной силы  $K_c$  вдоль лопасти (фиг. 72).

$$\bar{b}_1; K_c = 34,3 \cdot 10^{-8}$$

$$\bar{b}_2; K_c = 41,1 \cdot 10^{-8}$$

$$\bar{b}_3; K_c = 52,6 \cdot 10^{-8}$$

$$\bar{b}_4; K_c = 60,9 \cdot 10^{-8}$$

$$\bar{b}_5; K_c = 71,0 \cdot 10^{-8}$$

Напряжение от центробежных сил найдется по формуле

$$\sigma_c = \frac{P_c}{S} = \frac{K_c r}{k_3 b^2 c} \frac{\gamma}{g} n^2 D^2. \quad (247)$$

На фиг. 247 показано типичное распределение напряжений от центробежных сил вдоль лопасти.

Изгиб лопасти аэродинамическими силами будем рассматривать в упрощенном виде. Так как сечение лопасти относительно двух главных осей инерции имеет жесткости, значительно отличающиеся друг от друга, то будем рассматривать изгиб лишь относительно оси наименьшей жесткости

Аэродинамические силы на лопасти создают силы реакции, которые выражаются в виде тяги — силы, направленной параллельно оси винта, и в виде реактивного момента, лежащего в плоскости вращения винта (фиг. 248). Момент от тяги элемента лопасти, лежащего на расстоянии  $r$  от оси винта, обозначим че-

рез  $dM_P$ , а реактивный момент элемента — через  $dM_Q$ . Результирующий момент будет  $dM_u$ , а момент относительно оси наименьшей жесткости  $dM_n$ . Расчеты показывают, что с достаточным для практики приближением можно принять, что в среднем по радиусу  $dM_n = dM_P$ , т. е. можно принять за нагрузку, изгибающую лопасть, тягу элемента лопасти.

Из главы XII знаем, что тяга элемента лопасти может быть выражена так:

$$dP = d\alpha \rho n_s^2 D^4.$$

Изгибающий момент в сечении на радиусе  $r_0$  от аэродинамических сил элемента лопасти на радиусе  $r$  будет

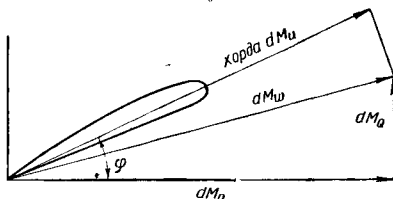
$$dM_n = dP(r - r_0) = \rho n_s^2 D^4 (r - r_0) d\alpha \quad (248)$$

или

$$dM_n = \frac{1}{2} \rho n_s^2 D^5 (\bar{r} - r_0) d\alpha. \quad (249)$$

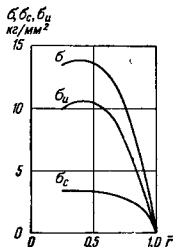
Значение полного изгибающего момента в сечении на радиусе  $r_0$  найдется интегрированием уравнения (249) в пределах от относительного радиуса  $r_0$  до конца лопасти:

$$M_n = \frac{1}{2} \rho n_s^2 D^5 \int_{r_0}^1 \frac{d\alpha}{d\bar{r}} (\bar{r} - r_0) d\bar{r}. \quad (250)$$



Фиг. 248 Векторы моментов на сечении лопасти.

Как видим, изгибающий момент зависит от распределения коэффициента тяги  $\frac{d\alpha}{d\bar{r}}$  вдоль лопасти. Это распределение тяги можно найти, сделав поперечный аэродинамический расчет лопасти. Оно бывает известно при проектировании винта, когда производится его аэродинамический расчет. Поперечный аэро-

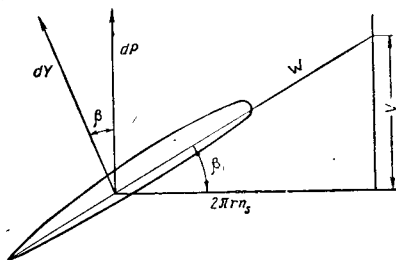


Фиг. 247. Распределение напряжений вдоль лопасти при работе винта на месте:  $\sigma_n$  — напряжение от изгиба;  $\sigma_c$  — напряжение от центробежной силы;  $\sigma$  — полное напряжение.

динамический расчет делать довольно сложно, а между тем на практике часто бывает необходимо проверить прочность винта, из аэродинамических характеристик которого известны лишь коэффициенты тяги и мощности  $\alpha$  и  $\beta$ , найденные из диаграмм. В этом случае можно применить следующий приближенный метод расчета.

Рассмотрим элемент лопасти винта (фиг. 249), на который действует подъемная сила  $dY$ , направленная перпендикулярно вектору результирующей скорости  $W$ . Эта сила выражается так:

$$dY = \frac{1}{2} c_{y\rho} b W^2 dr = \frac{1}{4} c_{y\rho} b W^2 D^2 \bar{dr}.$$



Фиг. 249 Аэродинамические силы на элементе лопасти.

Результирующая скорость  $W$  определится из формулы

$$W^2 = V^2 + 4\pi^2 n_s^2 r^2 = n_s^2 D^2 (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2). \quad (251)$$

Здесь скорости  $W$  и  $V$  — в м/сек.

Подставляя, получим

$$dY = \frac{1}{4} c_{y\rho} \bar{b} n_s^2 D^4 (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) \bar{dr}.$$

Приближению можно положить, пренебрегая составляющей от силы лобового сопротивления, что

$$dP = dY \cos \beta$$

или

$$dP = \frac{1}{4} c_{y\rho} \bar{b} n_s^2 D^4 \cos \beta (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) \bar{dr}. \quad (252)$$

Угол  $\beta$  определится из выражения

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V}{2\pi n_s r} = \frac{V}{\pi n_s r D} = \frac{\lambda}{\pi r}. \quad (253)$$

Так как изгибающий момент на радиусе  $\bar{r}_0$  от элемента лопасти на радиусе  $\bar{r}$  будет

$$dM_{\text{н}} = dY \frac{D}{2} (\bar{r} - \bar{r}_0),$$

то

$$M_{\text{н}} = \frac{1}{8} \rho n_s^2 D^3 \int_{\bar{r}_0}^1 c_y (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) (\bar{r} - \bar{r}_0) \bar{b} \, d\bar{r}. \quad (254)$$

В этой формуле нам известны все величины, кроме  $c_y$ . Предположим, что  $c_y$  приближенно постоянна вдоль лопасти, тогда из формулы (252) мы найдем силу тяги  $k$ -лопастного винта

$$P = \kappa \frac{1}{4} \rho n_s^2 D^4 c_y \int_{0,25}^1 (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) \cos \beta \bar{b} \, d\bar{r}.$$

Обозначим

$$B = \int_{0,25}^1 (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) \cos \beta \bar{b} \, d\bar{r}. \quad (255)$$

Тогда

$$P = \frac{\kappa}{4} \rho n_s^2 D^4 c_y B. \quad (256)$$

Величина  $B$  зависит от  $\lambda$  и ширины лопасти  $\bar{b}$ , ее можно подсчитать по геометрическим характеристикам винта. Из формулы (256)

$$c_y = \frac{4P}{\kappa \rho n_s^2 D^4 B} = \frac{4\alpha \rho n_s^2 D^4}{\kappa \rho n_s^2 D^4 B}$$

или

$$c_y = \frac{4\alpha}{\kappa B}. \quad (257)$$

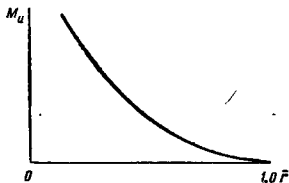
Так как  $\alpha$  зависит от  $\lambda$ , то и  $c_y$  тоже зависит от  $\lambda$ . Вынося  $c_y$  за знак интеграла и подставляя его значение (257) в формулу (254), получим для момента

$$M_{\text{н}} = \frac{1}{2} \alpha \rho n_s^2 D^3 \frac{1}{\kappa B} \int_{\bar{r}_0}^1 (\bar{r} - \bar{r}_0) (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) \bar{b} \, d\bar{r}. \quad (258)$$

Порядок расчета по формуле (258) следующий:

1. Задаемся  $\lambda=0; 0,5; 1,0$ .
2. По графикам аэродинамических характеристик винта или если таких характеристик даного винта нет, то по характеристикам подходящего по геометрическим характеристикам винта находим  $\alpha$  для заданных  $\lambda$  и  $\beta$ .  $\beta$  находим по мощности двигателя, к которому предназначается винт  $\left(\beta = \frac{75N}{\rho n_s^3 D^5}\right)$ . По формуле (253) находим угол  $\beta$ .
3. По геометрическим и аэродинамическим характеристикам винта и углу  $\beta$  находим  $B$ .

4. По формуле (258) находим  $M_n$  для определенных  $\lambda$  и  $\bar{r}_0$ .  
 Как для всякой консольной балки, каковой является лопасть винта, изгибающий момент непрерывно увеличивается от внешнего конца к месту заделки (фиг. 250).



Фиг. 250. Распределение изгибающего момента вдоль лопасти.

При изгибе балки одни крайние волокна испытывают растяжение, а другие сжатие. Выше мы уже упоминали, что для расчета прочности лопасти следует принимать напряженное растяжения при изгибе. Так как напряжение при изгибе

определяется следующим образом:

$$\sigma_n = \frac{M_n}{I_{\min}} \eta_{1 \max},$$

то, следовательно, чтобы получить напряжение растяжения, следует под  $\eta_{1 \max}$  подразумевать расстояние наиболее удаленного растянутого волокна дужки от главной оси инерции, а под  $I_{\min}$  — минимальный момент инерции дужки относительно главной оси инерции. Величину  $\eta_{1 \max}$  можно найти, зная ординаты дужки у относительно хорды и ординаты центра тяжести у<sub>0</sub> дужки относительно хорды, именно

$$\eta_{1 \max} = y_{1 \max} - y_0.$$

При определении  $\eta_{1 \max}$  необходимо иметь в виду правило знаков, т. е. находится ли центр тяжести дужек выше или ниже хорды. На фиг. 247 дано также типичное распределение напряжения от изгиба  $\sigma_n$  вдоль лопасти.

Полное напряжение от растяжения сил и от изгиба выразится формулой

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_o.$$

В зависимости от формы лопасти максимальное полное напряжение от растяжения находится ближе или дальше от втулки. Типичный вид кривой распределения полного напряжения по радиусу представлен на фиг. 247.

В § 1 предыдущей главы мы видели, что центробежные силы могут изгибать лопасть, причем если лопасть имеет предварительный изгиб в направлении полета, то лопасть будет центробежными силами разгружаться. То же будет иметь место если и нет предварительного изгиба, но он появляется от аэродинамических сил. Если же винт будет работать на режиме самовращения (как ветрянка) или как тормоз, то у предварительно изогнутой лопасти центробежные силы могут ее уменьшать, а, наоборот, увеличивать напряжения. Кроме того, изготовлять разгруженные лопасти значительно труднее, чем неразгруженные, главным образом из-за вопросов уравнивания их. Поэтому по большей части лопасти делаются неразгруженными центробежными силами от изгиба и центры тяжести их сечений располагаются по оси лопасти. Получающиеся изгибные деформации от аэродинамических сил до некоторой степени разгружаются центробежными силами. В упрощенном методе расчета винта на прочность расчет разгрузки лопасти центробежными силами не производится, эта разгрузка идет в запас прочности.

Максимальное напряжение фиг. 247 не должно превышать допустимое напряжение. В современных металлических винтах в качестве материала применяется дуралюмин типа АК1, который имеет временное сопротивление около  $36 \text{ кг/мм}^2$ , а сопротивление на усталость около  $18 \text{ кг/мм}^2$ . В металлических винтах это напряжение  $18 \text{ кг/мм}^2$  и может быть принято как допустимое при расчете изложенным упрощенным методом. В деревянных винтах за допустимое напряжение принимается  $300\text{—}400 \text{ кг/см}^2$ .

При проектировании винта геометрические размеры его назначаются исходя из конструктивных соображений и аэродинамического расчета, а затем делается поверочный расчет прочности и если напряжения где-либо по сечениям выходят из допустимых, то в этом месте лопасть упрочняется.

Необходимо заметить, что большая часть напряжения вызывается центробежными силами. Кроме того, изгибные моменты, как мы видели, могут быть уменьшены конструктивными мероприятиями, тогда как растяжение от центробежных сил ничем уменьшить нельзя. Встает вопрос, каковы же максимальные центробежные силы, которые может выдерживать данная лопасть? Иными словами, каковы наибольшие допустимые обороты винта? Будем определять допустимое число оборотов винта или, лучше, наибольшую концевую окружную скорость  $U_0$  при усло-



ви, что на относительном радиусе 0,25 напряжение от центробежной силы равно временному сопротивлению материала лопасти. По формуле (247), заменяя  $nD$  через  $nD = \frac{U_0}{0,0523}$ , найдем

$$\sigma_c = \frac{K_c}{k_3 b^2 c} \frac{U_0^2}{0,0523^2} \frac{\gamma}{g}.$$

Примем временное сопротивление равным  $36 \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>, относительную толщину лопасти на 0,25 радиуса равной 0,4, тогда конечная окружная скорость лопасти будет

$$U_0 = 10 \frac{\bar{b}}{\sqrt{K_c}}.$$

Найдем  $U_0$  для типичных ширины лопастей фиг. 72, для которых имеются определенные значения  $K_c$  на радиусе 0,25. Таким образом получим окружные концевые скорости при условии, что на радиусе 0,25 напряжение от центробежной силы лопасти равно временному сопротивлению:

1.  $\bar{b}_1 = 0,048$ ;  $K_c = 34,3 \cdot 10^{-8}$ ;  $U_0 = 818$  м/сек
2.  $\bar{b}_2 = 0,0516$ ;  $K_c = 41,1 \cdot 10^{-8}$ ;  $U_0 = 805$  "
3.  $\bar{b}_3 = 0,062$ ;  $K_c = 52,6 \cdot 10^{-8}$ ;  $U_0 = 855$  "
4.  $\bar{b}_4 = 0,062$ ;  $K_c = 60,9 \cdot 10^{-8}$ ;  $U_0 = 795$  "
5.  $\bar{b}_5 = 0,065$ ;  $K_c = 71,0 \cdot 10^{-8}$ ;  $U_0 = 818$  "

Как видим, предельные скорости для типичных винтов весьма велики, если принять во внимание, что окружные скорости современных винтов обычно равны  $\sim 250$  м/сек. Это указывает, что статически современные винты достаточно прочны.

## § 2. Расчет на прочность втулки винта

Втулка винта изменяемого шага подвергается нагрузкам, исходящим от лопастей, от вала двигателя, передающего на втулку крутящий момент, и от сил, возникающих при действии механизма изменения шага винта. Точный расчет втулки представляет большие затруднения вследствие ее статической неопределимости. Кроме того, втулка подвержена вибрационным нагрузкам, исходящим от двигателя. Приблизительно втулка рассчитывается по общим методам сопротивления материалов.

Размеры вала, на который насаживается втулка, задаются заводом, изготовляющим авиационный двигатель, ибо эти размеры определяются исключительно прочностью вала двигателя.

Поэтому втулку рассчитывают главным образом от нагрузок лопастей и от усилий механизма изменения шага, если они велики. Обычно бывает, что крутящий момент, передаваемый от втулки к лопастям, достаточно велик только при запуске двигателя, а затем он сильно разгружается центробежными силами лопастей. Основная нагрузка на втулку получается от центробежной силы лопастей. Она вычисляется по формуле (246), причем  $K_c$  принимается для относительного радиуса 0,25, ибо обычно здесь кончается профилированная часть лопасти и остальная часть уже дает очень небольшой добавок, которым можно пренебречь. В этом случае для  $K_c$  получим формулу

$$K_c = \frac{\pi^2 k_2}{60^2} \int_{0,25}^1 \bar{b}^2 \bar{c} \bar{r} d\bar{r}. \quad (259)$$

На это усилие проверяется как весь корпус, так и заплечики, которые удерживают лопасть, а также опорные подшипники. Принимается примерно шестикратный запас прочности при работе на номинальном режиме двигателя. Если по конструкции втулка подвержена еще добавочным нагрузкам, как, например, давление масла, то эти нагрузки следует принимать во внимание при вычислении полного напряжения.

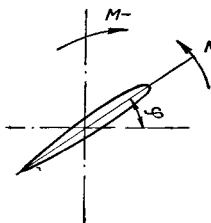
### § 3. Расчет механизма втулки винта изменяемого шага

Рассмотрим расчет механизма винта изменяемого шага только гидравлического типа. Движущей силой в этом случае будет сила давления масла на поршень, который кинематически связан с лопастью и поступательное движение которого преобразуется во вращательное движение лопасти. В зависимости от конструкции винта это преобразование может происходить по той или иной схеме.

Для того чтобы лопасть повернуть около ее оси, необходимо создать некоторый момент относительно этой оси. Реакцией этого момента будут моменты, действующие на лопасть и на механизм втулки. Для простоты рассуждений мы все моменты — активные и реактивные — приведем к моменту относительно оси лопасти. При изменении шага вращающегося винта в общем случае следует рассмотреть следующие моменты относительно оси лопасти:

1. Момент от центробежных сил лопасти  $M_c$ .
2. Момент от аэродинамических сил  $M_a$ .
3. Момент от противовесов лопасти  $M_n$ .
4. Момент от давления масла на поршень  $M_m$ .
5. Момент от трения в механизме винта  $M_\tau$ .
6. Момент от гидравлических сопротивлений, получающийся от выдавливания масла из цилиндра,  $M_{соп}$ . Условимся считать,

что момент, увеличивающий угол установки лопасти, будет положительным, а уменьшающий — отрицательным (фиг. 251). Так как скорость поворота лопасти около ее оси невелика, то моментом от инерционных сил лопасти пренебрегаем. Сумма

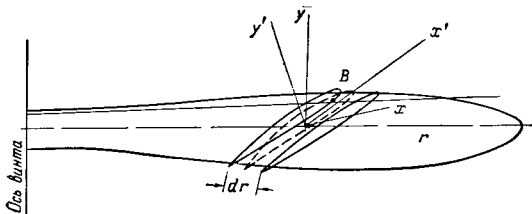


Фиг. 251 Знаки моментов относительно оси лопасти.

всех моментов должна быть равна нулю. Прежде чем обратиться к уравнениям моментов для различных схем винтов, посмотрим, как выражаются указанные моменты.

Момент от центробежных сил: Как уже было указано, современные лопасти по большей части делаются так, что их ось вращения проходит через центры тяжести сечений и лежит в плоскости вращения винта. Выведем формулу момента от центробежных сил только для этого случая<sup>1</sup>. Ею можно пользоваться и в тех случаях, когда имеются небольшие отступления от указанного условия, т. е. когда линия центров тяжести не совпадает с осью лопасти.

Будем рассматривать массу материала лопасти, находящейся между двумя смежными сечениями лопасти, отстоящими друг



Фиг. 252 Сечение лопасти.

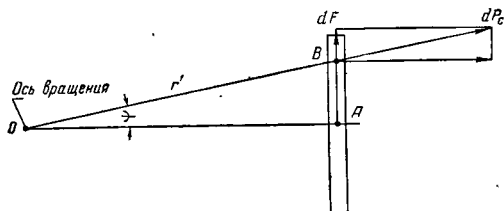
от друга на  $dr$ . В центре тяжести этой массы установим начало координат, причем ось  $r$  направим вдоль оси лопасти, ось  $x$  перпендикулярно к ней в плоскости вращения винта, а ось  $y$  — перпендикулярно обеим этим осям. Для простоты будем называть выделенную массу «сечением лопасти». Рассмотрим на нашем элементе точку  $B$  (фиг. 252), которая является центром тяжести элемента массы  $dm$  нашего сечения. Возьмем другую координату

<sup>1</sup> Вывод формулы момента от центробежных сил для общего случая приведен в монографии Д. Ю. Панова «Расчет воздушного винта на прочность» Труды ЦАГИ, вып. 288, Москва, 1937.

натную систему  $x'y'$ , имеющую то же начало, но повернутую относительно первой на угол установки  $\varphi$  этого сечения. Сделаем еще одно допущение, — что одна из главных осей инерции сечения совпадает с хордой сечения  $x'$ .

Центробежная сила элемента  $B$  массы  $dm$  определится по формуле

$$dP_c = \Omega^2 r' dm,$$



Фиг. 253 Проекция сечения лопасти на плоскость вращения винта.  
Центробежная сила элемента сечения

где  $r'$  — расстояние элемента  $B$  от оси вращения винта. Центробежная сила  $dP_c$  будет направлена по прямой, проведенной через точку  $B$  и ось винта, перпендикулярно последней и параллельно плоскости вращения винта. Согласно обозначениям, приведенным на фиг. 253 и 254, будем иметь из треугольника  $OAB$ :  $r' = \frac{AB}{\sin \psi}$ ; из треугольника  $ABC$ :  $AB = a \cos \varphi'$  или  $r' = \frac{a \cos \varphi'}{\sin \psi}$  и центробежная сила элемента будет

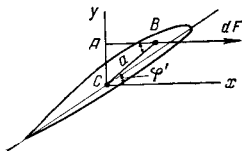
$$dP_c = \Omega^2 \frac{a \cos \varphi'}{\sin \psi} dm.$$

Центробежную силу  $dP_c$  в плоскости, параллельной плоскости вращения винта и проходящей через точку  $B$ , разложим на две составляющих — одну параллельную оси лопасти, а другую ей перпендикулярную. Последнюю составляющую обозначим  $dF$ , она выразится так:

$$dF = dP_c \sin \psi.$$

Эта составляющая дает момент относительно оси поворота лопасти, равный

$$dM_c = dF \cdot AC,$$



Фиг. 254 Поперечная составляющая центробежной силы сечения лопасти

но

$$AC = a \sin \varphi'.$$

Подставляя в формулу для  $dM$  полученные выражения для  $AC$ ,  $dF$  и  $dP_c$ , будем иметь

$$dM_c = \Omega^2 a \cos \varphi' \cdot a \sin \varphi' dm.$$

Координаты точки  $B$  будут

$$y = a \sin \varphi'; \quad x = a \cos \varphi',$$

отсюда

$$dM_c = \Omega^2 x \cdot y \cdot dm.$$

Если обозначить площадь нашего элемента  $B$  на сечении через  $dS$ , то

$$dm = \frac{\gamma}{g} dS dr,$$

где  $\gamma$  — удельный вес материала лопасти. Тогда

$$dM_c = \frac{\gamma}{g} \Omega^2 xy dS dr.$$

Но  $xy dS = dJ_{xy}$  — элементарный центробежный момент нашего элемента сечения, а

$$\int_s xy dS = J_{xy}$$

центробежный момент площади сечения лопасти. Интегрируя выражение для момента от рассматриваемого сечения  $r_0$  до конца лопасти, а также по площади сечения, получим

$$M_c = \frac{\gamma}{g} \Omega^2 \int_{r_0}^R J_{xy} dr.$$

Для расчетов неудобно иметь выражение центробежного момента площади  $J_{xy}$  относительно осей  $xu$ , так как по сечениям меняется угол установки сечения и поэтому придется бы для каждого сечения вычислять центробежный момент даже для подобных сечений. Гораздо проще перейти к другой системе координат  $x'y'$ , относительно которой могут быть заранее вычислены моменты инерции сечений. Найдем выражения координат точки  $B(x, y)$  через координаты  $x'y'$ . По фиг. 255  $BD = ED + BE$ ; найдя из треугольников  $CED$  и  $EBG$ :

$$ED = x \operatorname{tg} \varphi, \quad EB = \frac{y'}{\cos \varphi},$$

получим

$$BD = y = x \operatorname{tg} \varphi + \frac{y'}{\cos \varphi}.$$

Так как  $x' = CE + EG$ , то точно так же получим

$$x' = \frac{x}{\cos \varphi} + y' \operatorname{tg} \varphi;$$

отсюда

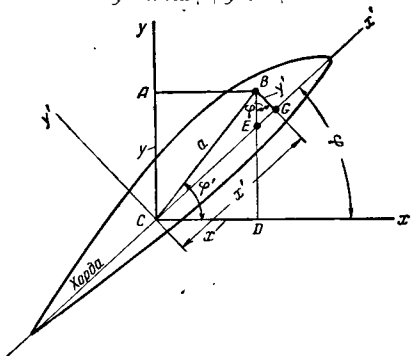
$$x = x' \cos \varphi - y' \sin \varphi$$

и

$$y = x' \sin \varphi - y' \operatorname{tg} \varphi \sin \varphi + \frac{y'}{\cos \varphi} = x' \sin \varphi + \frac{y'}{\cos \varphi} (1 - \sin^2 \varphi)$$

или

$$y = x' \sin \varphi + y' \cos \varphi.$$



Фиг. 255. Переход от одной системы координат к другой.

Имеем

$$\begin{aligned} dJ_{xy} &= xy dS = (x' \cos \varphi - y' \sin \varphi) (x' \sin \varphi + y' \cos \varphi) dS = \\ &= [\sin \varphi \cos \varphi (x'^2 - y'^2) + x' y' (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi)] dS. \end{aligned}$$

Так как оси  $x'y'$  по предположению главные, то  $x'y' dS = 0$  ч, следовательно,

$$dJ_{xy} = \frac{1}{2} \sin 2\varphi (x'^2 dS - y'^2 dS).$$

Так как

$$\int_S x'^2 dS = J_{\max}$$

и

$$\int_S y'^2 dS = J_{\min},$$

то

$$J_{xy} = \frac{1}{2} \sin 2\varphi (J_{\max} - J_{\min}), \quad (260)$$

где  $J_{\max}$  и  $J_{\min}$  — соответственно моменты инерции сечения наибольший и наименьший.

Таким образом момент от центробежных сил при принятых предположениях будет выражаться формулой

$$M_c = \frac{\gamma}{2g} \Omega^2 \int_{r_0}^R (J_{\max} - J_{\min}) \sin 2\varphi dr. \quad (261)$$

Для практических расчетов, а также для возможности приближенного определения момента от центробежных сил, в том случае когда точная геометрическая характеристика лопасти неизвестна, сделаем некоторые преобразования формулы (261).

Моменты инерции сечения могут быть выражены следующими формулами:

$$J_{\max} = a_1 b^3 c; \quad J_{\min} = a_2 b c^3$$

или в отвлеченных обозначениях

$$\left. \begin{aligned} J_{\max} &= a_1 \bar{b}^3 \bar{c} D^4, \\ J_{\min} &= a_2 \bar{b} \bar{c}^3 D^4, \end{aligned} \right\} \quad (262)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  — числовые коэффициенты, зависящие от формы сечения. Величины их для некоторых сечений следующие:

RAF-6	$a_1 = 0,0446$	$a_2 = 0,0464$
Кларк Y	$a_1 = 0,0418$	$a_2 = 0,0454$
Ф	$a_1 = 0,040$	$a_2 = 0,046$

В отвлеченных обозначениях формула (261) примет такой вид:

$$M_c = \frac{\gamma}{g} \pi^2 n_s^2 D^5 \int_{\bar{r}_0}^1 (a_1 - a_2 \bar{c}^2) \bar{b}^3 \bar{c} \sin 2\varphi d\bar{r}. \quad (263)$$

Для расчета механизма винта необходимо иметь тот момент, который возбуждается всей лопастью. Следовательно, нижний предел интеграла в формуле (263) надо брать равным нулю, ибо, как и в случае центробежной силы, момент от центробежных сил в сечении изменяется так, что максимум получается на оси (фиг. 256). Однако для расчета удобнее и достаточно с точки зрения точности брать нижний предел, равный 0,25, так

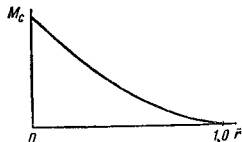
как прибавка к центробежному моменту от концевой части лопасти обычно мала и в практике расчетов при численном интегрировании суммирование начинают с сечения  $0,25 \bar{r}$ .

Обозначим

$$A = (a_1 - a_2 \bar{c}^2) \bar{b}^4 \bar{c} \quad (264)$$

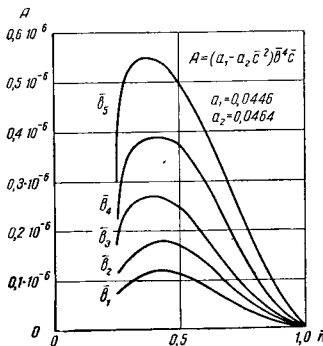
и тогда

$$M_c = \frac{\gamma}{g} \pi^2 n_s^2 D^5 \int_{0,25}^1 \sin 2\varphi A \bar{d}\bar{r}. \quad (265)$$



Фиг 256 Распределение вдоль лопасти моментов от поперечных центробежных сил

Величина  $A$  зависит от закона распределения вдоль лопасти ширины и толщины ее, а также от формы сечения, т. е. только от геометрической характеристики лопасти. Следовательно, для данного профиля и заданного закона распределения  $b$  и  $c$  вдоль



Фиг 257 Распределение величины  $A$  вдоль лопасти для типичных лопастей по фиг 72

лопасти величину  $A$  можно вычислить заранее. Тогда момент  $M_c$  можно вычислить по формуле (265), принимая определенный закон изменения крутки вдоль лопасти. На фиг 257 дан график распределения вдоль лопасти величины  $A$  для типичных лопастей с профилем RAF-6 по фиг. 72. Так как законы изменения

<sup>1</sup> Если приклеиваемая часть лопасти профилированная, то нижний предел иногда приходится принимать равным 0,15



крутки вдоль лопасти у современных винтов различаются между собой не очень сильно, то для приближенных расчетов можно пользоваться готовыми значениями интеграла в формуле (265), взяв типичное распределение крутки вдоль лопасти. Тогда значение этого интеграла будет зависеть только от угла установки лопасти. В качестве такой крутки возьмем ниже приведенную крутку.

## Крутка винта

$\bar{r}$	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
$\varphi \rightarrow \varphi_{75}$	20°	17° 42'	11° 18'	6° 36'	3° 06'	0	-2° 33'	-4° 42'

Формулу (265) можно представить в следующем виде:

$$M_c = B_c \frac{\gamma}{g} n^2 D^5, \quad (266)$$

где  $n$  — об/мин, а

$$B_c = \frac{\pi^2}{60^2} \int_{0,25}^1 \sin 2\varphi A dr. \quad (267)$$

На фиг. 258 дано значение коэффициента  $B_c$ , вычисленного по формуле (267) для типичных лопастей по фиг. 72, имеющих указанную выше крутку, выраженную через нулевой угол установки лопасти  $\varphi$  на  $r=0,75$ .

Возьмем пример:  $n=1600$  об/мин;  $D=3,4$  м; ширина лопасти  $\bar{b}_3$ ; дужка лопасти  $\Phi$ ;  $\frac{\gamma}{g}=290$ . Максимальное значение  $B_c$  получается равное  $B_c=0,355 \cdot 10^{-9}$  при  $\varphi=35^\circ$  и  $M_c=119$  кгм.

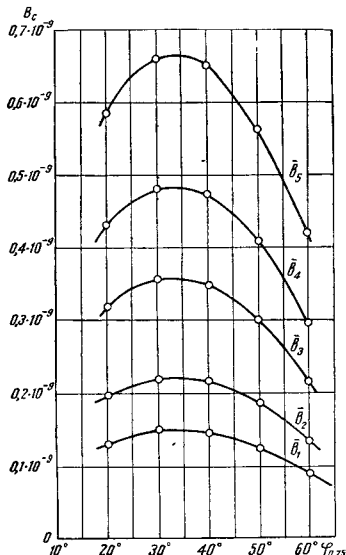
Если известна геометрическая характеристика лопасти, то расчет следует вести по формулам (264), (267) и (266), вычисляя сначала распределение  $A$  вдоль лопасти, а затем численно интегрируя выражение для  $B_c$  при нескольких значениях  $\varphi$  (достаточно бывает трех), для того чтобы найти максимум  $B_c$ . Этот максимум находится вблизи  $\varphi=35^\circ$ ; поэтому при расчете следует брать одно значение  $\varphi$  меньше  $35^\circ$ , другое больше и третье равное  $35^\circ$ .

Момент от аэродинамических сил. Момент дужки от аэродинамических сил обычно относится к носку дужки и к ее хорде; формула для момента имеет вид

$$M_a = c_m \rho S \frac{V^2}{2} b. \quad (268)$$

Будем рассматривать момент элемента лопасти, образованного двумя смежными сечениями, находящимися друг от друга

на расстоянии  $dr$ . Так как качество дужек лопастей обычно довольно большое, то можно вместо полной силы сопротивления рассматривать лишь подъемную силу  $Y$ . Опять предположим, что центр тяжести сечения совпадает с осью вращения лопасти.



Фиг. 258. Значение коэффициента центробежного момента, умноженного на  $\frac{Y}{g}$ , в зависимости от угла установки лопасти для типичных лопастей по фиг 72.

Обозначим расстояние центра тяжести сечения от носка профиля через  $x_t$ . Будем пренебрегать моментом от сил лобового сопротивления вследствие сравнительно малой его величины. Для нашего расчета интерес представляет момент относительно оси поворота лопасти, т. е. относительно центра тяжести сечения. Для того чтобы перейти от момента относительно носка к моменту относительно центра тяжести, приложим к носку две равные и противоположно направленные силы  $Y$  и тогда будем иметь одну пару сил  $YY$  и силу  $Y$ . Пара сил эквивалентна мо-

менту относительно носка  $M_n$ , а сила  $Y$  дает момент относительно центра тяжести. Тогда для элемента лопасти будем иметь

$$dM_a = dYx_T - dM_n \quad (269)$$

причем, как и прежде, моменты имеют знаки, указанные на фиг. 251. Пусть  $m_z$  — коэффициент момента относительно центра тяжести, а  $c_m$  — коэффициент момента относительно носка, тогда для элемента лопасти, площадь которой равна  $bdr$ , получим

$$dM_a = m_z \rho \frac{W^2}{2} b^2 dr; \quad dM_n = c_m \rho \frac{W^2}{2} b^2 dr; \quad dY = c_y \rho \frac{W^2}{2} bdr$$

или в отвлеченных обозначениях

$$dM_a = m_z \rho \frac{W^2}{4} \bar{b}^2 D^3 d\bar{r}; \quad dM_n = c_m \rho \frac{W^2}{4} \bar{b}^2 D^3 d\bar{r};$$

$$dY = c_y \rho \frac{W^2}{4} \bar{b} D^2 d\bar{r}.$$

Подставляем в уравнение (269)

$$m_z \rho \frac{W^2}{4} \bar{b}^2 D^3 d\bar{r} = c_y \rho \frac{W^2}{4} x_T \bar{b}^2 D^3 d\bar{r} - c_m \rho \frac{W^2}{4} \bar{b}^2 D^3 d\bar{r}$$

или, сокращая,

$$m_z = c_y \bar{x}_T - c_m. \quad (270)$$

Таким образом элементарный момент относительно оси вращения лопасти будет выражаться так:

$$dM_a = (c_y \bar{x}_T - c_m) \rho \frac{W^2}{4} \bar{b}^2 D^3 d\bar{r}. \quad (271)$$

Мы уже имели формулу для скорости (251), ее мы подставляем в равенство (271):

$$dM_a = \frac{\rho}{4} n_s^2 \bar{b}^2 D^5 (c_y \bar{x}_T - c_m) (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) d\bar{r}. \quad (272)$$

Интегрируя это выражение в пределах от 0,25 радиуса до конца лопасти, получим формулу для аэродинамического момента лопасти

$$M_a = \frac{1}{4} \rho n_s^2 D^5 \left\{ \int_{0,25}^1 (c_y \bar{x}_T - c_m) (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) \bar{b}^2 d\bar{r} \right\}. \quad (273)$$

Зная из аэродинамического расчета винта  $c_y$  и  $c_m$  сечений, по формуле (273) можно найти для данного винта момент как функцию числа оборотов и  $\lambda$  (т. е. скорости).

Во многих случаях формула (273) мало пригодна для расчетов, так как не всегда бывают известны  $c_y$  и  $c_m$  сечений. Выведем приближенную формулу. Обозначим расстояние от носка до центра давления профиля через  $\bar{x}_d$ . Тогда момент элемента лопасти относительно носка может быть выражен, с одной стороны, так:

$$dM_n = c_m \rho \frac{W^2}{4} \bar{b}^2 D^3 d\bar{r},$$

а с другой стороны, приближенно так:

$$dM_n = dY x_d = c_y \rho \frac{W^2}{4} \bar{x}_d \bar{b}^2 D^3 d\bar{r},$$

где

$$\bar{x}_d = \frac{x_d}{b},$$

отсюда

$$c_m = c_y \bar{x}_d.$$

Подставляем это выражение в формулу (273):

$$M_a = \frac{1}{4} \rho n_s^2 D^5 \int_{0,25}^1 (\bar{x}_T - \bar{x}_d) (\pi^2 \bar{r}^3 + \lambda^2) c_y \bar{b}^2 d\bar{r}.$$

Примем, как и раньше,  $c_y$  постоянным по радиусу. Примем также приближенно, что величина  $\bar{x}_d$  не изменяется по лопасти. Тогда выражение  $c_y (\bar{x}_T - \bar{x}_d)$  можно вынести за знак интеграла:

$$M_a = \frac{1}{4} \rho n_s^2 D^5 c_y (\bar{x}_T - \bar{x}_d) \int_{0,25}^1 \bar{b}^2 (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) d\bar{r}.$$

Но мы уже имели значение  $c_y$  для лопасти по уравнению (257), и, следовательно, момент можно представить формулой

$$M_a = \frac{\alpha}{\kappa B} (\bar{x}_T - \bar{x}_d) \frac{1}{60^2} \rho n^2 D^5 \int_{0,25}^1 (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) \bar{b}^2 d\bar{r}.$$

Обозначим

$$K_a = \frac{\alpha (\bar{x}_T - \bar{x}_d)}{\kappa B 60^2} \int_{0,25}^1 (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) \bar{b}^2 d\bar{r}. \quad (274)$$

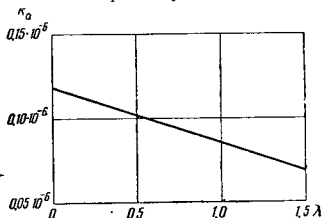
Тогда

$$M_a = K_a \rho n^2 D^5. \quad (275)$$

Если дужка вдоль лопасти одинаковая, то величина  $\bar{x}_T$  находится по геометрической характеристике дужки;  $x_1$  следует брать из аэродинамической характеристики дужки, как наименьшее расстояние центра давления от носка;  $\alpha$  находится по графикам данного винта, а  $B$  определяется по формуле (255),  $k$  — число лопастей винта. Таким образом  $K_a$  может быть найдена как функция  $\lambda$  для данного винта и двигателя (мощность двигателя входит через  $\alpha$ , который определяется по графикам, по  $\lambda$  и  $\beta$ ).

На фиг. 259 представлена типичная диаграмма для  $K_a$ .

Момент от противовесов лопасти. Предположим, что главная ось инерции противовеса проходит через его



Фиг. 259. Диаграмма коэффициента  $K_a$  аэродинамического момента в зависимости от скорости полета (относительной поступи)

ось поворота. Выделим в противовесе элемент массы  $dm$  (фиг. 260), центр тяжести которого отстоит от оси вращения винта на расстоянии  $r'$ , причем луч  $r'$  составляет с осью лопасти угол  $\psi$ . Центробежная сила элемента  $dm$  будет

$$dP_n = \Omega^2 r' dm,$$

вектор ее проходит через ось вращения винта, перпендикулярен ей и лежит в плоскости, параллельной плоскости вращения винта. Разложим указанную силу в этой плоскости на две составляющие: одну параллельную оси лопасти, а другую ей перпендикулярную. Первая будет изгибать противовес, а вторая создаст момент, поворачивающий противовес около оси лопасти. Последняя составляющая может быть представлена так:

$$dF_n = dP_n \sin \psi.$$

Так как

$$x = r' \sin \psi,$$

то элементарная сила  $dF_n$  может быть представлена так:

$$dF_n = dP_n \frac{x}{r'}.$$

Момент от противовеса будет

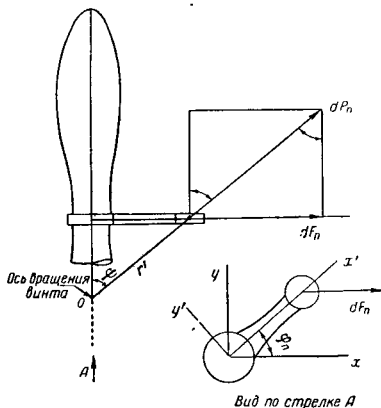
$$dM_n = dF_n y$$

или, подставляя сюда значения для  $dF_n$  и  $dP_n$ , получим

$$dM_n = dP_n \frac{x}{r'} y = \Omega^2 x y dm.$$

Выделенный нами элемент массы может быть выражен так:

$$dm = \frac{\gamma}{g} a dS,$$



Фиг. 260. Определение моментов противовесов.

где  $a$  — толщина противовеса (вообще говоря, переменная);  $dS$  — элемент площади боковой проекции противовеса. Элементарный момент противовеса можно тогда представить так:

$$dM_n = \frac{\gamma}{g} \Omega^2 x y a dS,$$

а интегрируя это выражение по всей площади боковой проекции противовеса, получим выражение для его момента

$$M_n = \Omega^2 \frac{\gamma}{g} \int x y a dS.$$

Выражение

$$\frac{\gamma}{g} \int_S xy a dS = J_{xy}$$

представляет собой центробежный массовый момент инерции противовеса относительно осей  $x$  и  $y$ , следовательно, момент противовеса представится формулой

$$M_n = \Omega^2 J_{xy}$$

Но мы имеем уже такую формулу (260), выведенную для элемента сечения лопасти. Мы можем ее приложить к случаю противовеса и тогда получим момент для него:

$$M_n = \frac{1}{2} \Omega^2 (J_{n \max} - J_{n \min}) \sin 2\varphi_n$$

или

$$M_n = \frac{2\pi^2}{60^2} n^2 (J_{n \max} - J_{n \min}) \sin 2\varphi_n, \quad (276)$$

где  $\varphi_n$  — угол установки противовеса, отсчитываемый от его главной большой оси инерции,  $n$  — число оборотов винта в минуту. Наибольший и наименьший моменты инерции (массовые) противовеса могут быть вычислены графическим или численным интегрированием.

Момент от давления масла на поршень. Этот момент на лопасти получается от передачи силы давления масла через соответствующую кинематическую цепь и служат для поворота лопасти в ту или иную сторону. Кинематическая цепь между поршнем и лопастью может быть самая разнообразная; мы рассмотрим две такие цепи (фиг. 66 и 69).

Наиболее простая и естественная кинематическая передача, применяемая в советских конструкциях, состоит в том, что поршень или цилиндр, передвигаясь поступательно, воздействуют на кривошип, укрепленный на лопасти эксцентрично ее оси (фиг. 66). Если площадь поршня обозначим через  $S$ , давление на него через  $p$  и число лопастей  $k$ , то получим момент на лопасти

$$M_n = \frac{pS}{k} l \cos(\gamma - \varphi). \quad (277)$$

Здесь  $\gamma$  — угол между хордой сечения, от которой отсчитывается угол установки лопасти, и лучом, соединяющим ось поворота лопасти с центром кривошипа.

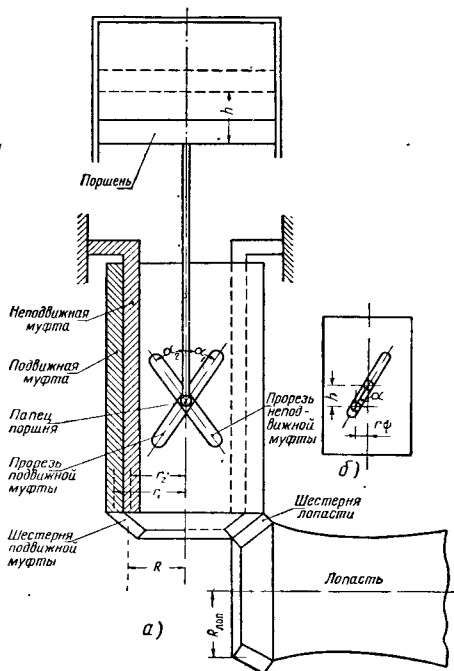
Вторая схема, данная на фиг. 69, более сложная. Введем следующие обозначения (фиг. 261):

$R$  — средний радиус шестерни подвижной муфты,

$R_{\text{лоп}}$  — средний радиус шестерни лопасти,

$h$  — ход поршня,

- $\alpha_1$  — угол наклона прорези в подвижной муфте,  
 $\alpha_2$  — угол наклона прорези в неподвижной муфте,  
 $r_1$  — средний радиус подвижной муфты,  
 $r_2$  — средний радиус неподвижной муфты,



Фиг. 261. Кинематическая схема передачи от поршня к лопасти.

- $\psi$  — угол поворота подвижной муфты относительно неподвижной,  
 $\psi_1$  — угол поворота поршня относительно неподвижной муфты,  
 $\psi_2$  — угол поворота подвижной муфты относительно поршня,  
 $\psi_{\text{лоп}}$  — угол поворота лопасти.



Так как шестерня подвижной муфты находится в зацеплении с шестерней лопасти, то длины дуг, описываемых при движении, должны быть одинаковы:

$$R \cdot \psi = R_{\text{лоп}} \psi_{\text{лоп}}.$$

Но поворот подвижной муфты составляется из поворота поршня относительно неподвижной муфты и поворота подвижной муфты относительно поршня:

$$\psi = \psi_1 + \psi_2.$$

В то же время для подвижной муфты (фиг. 261,а) будем иметь

$$h \operatorname{tg} \alpha_1 = r_1 \psi_1,$$

а для неподвижной

$$h \operatorname{tg} \alpha_2 = r_2 \psi_2,$$

откуда

$$\psi_1 = \frac{h}{r_1} \operatorname{tg} \alpha_1; \quad \psi_2 = \frac{h}{r_2} \operatorname{tg} \alpha_2.$$

Следовательно,

$$\psi = h \left( \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{r_1} + \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{r_2} \right).$$

Таким образом

$$\psi_{\text{лоп}} = \frac{R}{R_{\text{лоп}}} \psi = \frac{R}{R_{\text{лоп}}} h \left( \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{r_1} + \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{r_2} \right),$$

а так как обычно в винтах бывает

$$R = R_{\text{лоп}},$$

то

$$\psi_{\text{лоп}} = h \left( \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{r_1} + \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{r_2} \right). \quad (278)$$

Это уравнение дает связь между поворотом лопасти  $\psi_{\text{лоп}}$  и ходом поршня  $h$ .

Поршень, передвигаясь в цилиндре, производит работу, которая без потерь (потери мы учитываем отдельным моментом) передается на лопасть. Это положение может быть выражено так:

$$pS \cdot h = \kappa M_{\text{м}} \psi_{\text{лоп}},$$

откуда

$$M_{\text{м}} = \frac{pS}{\kappa} \frac{h}{\psi_{\text{лоп}}}.$$

Отношение  $\frac{h}{\Psi_{\text{доп}}}$  может быть найдено из формулы (278) и тогда

$$M_{\text{м}} = \frac{pS}{\kappa} \frac{1}{\frac{\text{tg } \alpha_1}{r_1} + \frac{\text{tg } \alpha_2}{r_2}}. \quad (279)$$

Зная давление в цилиндре  $p$  и площадь поршня  $S$ , а также величины, определяющие кинематическую цепь, можно по формуле (277) или (279) найти момент от масла  $M_{\text{м}}$ , приходящийся на одну лопасть.

Момент  $M_{\text{т}}$  от трения в механизме винта. Трение в механизме винта может быть разделено на три части: 1) трение в узле заделки лопасти; 2) трение в поршне и 3) трение в передаточном механизме. Трение в узле заделки лопасти получается от трения в подшипниках (как качения, так и скольжения). Обычно заделка такова, что имеются только подшипники качения, которые воспринимают главным образом центробежную силу лопасти. Если ролик катится по гладкой поверхности, то сила трения качения будет создавать момент относительно точки касания ролика, т. е. относительно точки приложения силы трения. Момент от этого трения может быть выражен через нагрузку  $G$  на ролик и коэффициент трения качения  $\lambda$  так:

$$P \cdot r = G \cdot \lambda. \quad (280)$$

Если ролик катится между двух поверхностей, то сила  $P'_{\text{ш}}$ , которую надо приложить к подвижной поверхности, чтобы преодолеть трение качения ее относительно неподвижной, будет равна  $2P$  или по формуле (280)

$$P'_{\text{ш}} = 2P = \frac{2G}{r} \lambda.$$

Если в подшипнике  $n$  роликов, то сила трения качения всего подшипника  $P_{\text{ш}}$  будет

$$P_{\text{ш}} = P'_{\text{ш}} n.$$

Момент, создаваемый упорным подшипником, у которого средний диаметр беговой дорожки  $D_{\text{д}}$ , будет

$$M_{\text{ш}} = P_{\text{ш}} \frac{1}{2} D_{\text{д}} = \frac{2Gn}{r} \lambda \frac{D_{\text{д}}}{2}.$$

Так как  $G \cdot n = P_{\text{с}}$ , т. е. центробежной силе лопасти, то

$$M_{\text{ш}} = 2P_{\text{с}} \lambda \frac{D_{\text{д}}}{d}, \quad (281)$$

где  $d$  — диаметр ролика.

Коэффициент трения качения  $\lambda$  можно принимать 0,001 см. Рассмотрим пример. Пусть  $P_c = 40\,000$  кг,  $D_d = 150$  мм,  $d = 8$  мм, тогда  $M_{ш} = 15$  кгм.

Трение поршня в цилиндре создается за счет того, что имеющееся в цилиндре давление масла  $p$  при движении поршня прижимает резиновые манжеты поршня к стенкам цилиндра. Пусть  $D_n$  — диаметр поршня,  $h$  — ширина манжеты поршня, тогда площадь соприкосновения манжеты с цилиндром будет  $\pi D_n \cdot h$ , а сила трения  $p\pi D_n h \mu$ , где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения манжеты о цилиндр. Для винтов с первой схемой кинематической цепи, исходя из уравнения подобного (277), получим для момента трения в поршне

$$M_{т.п} = \frac{p\pi D_n h \mu}{\kappa} l \cos(\gamma - \varphi), \quad (282)$$

а для винтов со второй схемой кинематической цепи по уравнению, подобному (279),

$$M_{т.п} = \frac{p\pi D_n h \mu}{\kappa} \frac{1}{\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{r_1} + \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{r_2}}. \quad (283)$$

Рассмотрим пример. Пусть  $p = 20$  кг/см<sup>2</sup>,  $D_n = 30$  см,  $h = 1,0$  см,  $\mu = 0,07$ ;  $k = 4$ ;  $l = 7$  см. По формуле (282) получим

$$M_{т.п} = \frac{20 \cdot 30 \cdot 1 \cdot 0,07 \cdot 7}{4} = 230 \text{ кгсм} = 2,3 \text{ кгм}.$$

Здесь мы  $\cos(\gamma - \varphi)$  приняли за 1.

Трение в передаточном механизме, вообще говоря, очень невелико и по сравнению с другими моментами для большинства винтов им можно пренебречь. Таким образом момент трения в механизме винта, отнесенный к одной лопасти, может быть выражен суммой формул (281) и (282) или (283), т. е.

$$M_t = M_{ш} + M_{т.п} = 2P_c \lambda \frac{D_d}{d} + \frac{p\pi D_n h \mu}{\kappa} l \cos(\gamma - \varphi) \quad (284)$$

или

$$M_t = 2P_c \lambda \frac{D_d}{d} + \frac{p\pi D_n h \mu}{\kappa} \frac{1}{\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{r_1} + \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{r_2}}. \quad (285)$$

В рассмотренном нами примере  $M_t = 17,3$  кгм.

Гидравлическое сопротивление самого винта у большинства винтов невелико и им при расчете можно пренебречь. Главное сопротивление создается в каналах регулятора при выдавливании масла поршнем винта. Обычно потери от этого сопротивления исчисляются в несколько атмосфер. Все же момент от этого сопротивления невелик по сравнению с другими моментами.

Потерю давления в регуляторе можно представить следующей формулой:

$$\Delta p = 2,36 \frac{q^2}{\mu_p^2}, \text{ кг/см}^2$$

где  $\mu_p$  — коэффициент расхода, зависящий от величины отклонения золотника регулятора от нейтрального положения,  $q$  — расход масла в кг/сек. Тогда для первой кинематической цепи

$$M_{\text{снр}} = \frac{\Delta p S}{\kappa} l \cos(\gamma - \varphi). \quad (286)$$

Для винта прямой схемы направление моментов принимается по фиг. 251. Уравнение моментов при увеличении шага будет иметь следующий вид:

$$M_n + M_a - M_c - M_T - M_{\text{снр}} = 0$$

или

$$M_n + M_a = M_c + M_T + M_{\text{снр}}. \quad (287)$$

Момент трения всегда действует против движения и поэтому согласно нашей схеме он может быть и положительным и отрицательным. В данном случае увеличения шага он отрицательный. При уменьшении шага уравнение моментов будет иметь такой вид:

$$M_n + M_a + M_T - M_c - M_m = 0$$

или

$$M_m + M_c = M_n + M_a + M_T. \quad (288)$$

Для винта обратной схемы. При увеличении шага

$$M_m + M_a - M_c - M_T = 0$$

или

$$M_m + M_a = M_c + M_T. \quad (289)$$

При уменьшении шага

$$M_a + M_T + M_{\text{снр}} - M_c = 0$$

или

$$M_c = M_T + M_{\text{снр}} + M_a. \quad (290)$$

Для винта двухсторонней схемы при увеличении шага

$$-M_c + M_a + M_m - M_{\text{снр}} - M_T + M_n = 0$$

или

$$M_c + M_{\text{снр}} + M_T = M_m + M_a + M_n. \quad (291)$$

Если противовесы отсутствуют, то  $M_n = 0$ .

При уменьшении шага

$$-M_c + M_a - M_m + M_{\text{ср}} + M_\tau + M_n = 0$$

или

$$M_c + M_m = M_a + M_{\text{ср}} + M_\tau + M_n. \quad (292)$$

В полученное уравнение моментов следует вставить выражения для отдельных моментов  $M_c$  по формуле (266),  $M_a$  по формуле (273) или (275),  $M_m$  по формуле (276),  $M_n$  по формуле (277) или (279),  $M_\tau$  по формуле (284) или (285) и  $M_{\text{ср}}$  по формуле (286). В качестве примера возьмем двухстороннюю схему. Подставим в уравнение (291) значения моментов:

$$\begin{aligned} B_c \frac{\gamma}{g} n^2 D^5 + \frac{2,36 \cdot q^2 S}{\mu_p^2 \kappa} l \cos(\gamma - \varphi) + 2K_c \frac{\gamma}{g} n^2 D^4 \lambda \frac{D_d}{d} + \\ + \frac{p\pi D_n h \mu}{k} l \cos(\gamma - \varphi) = \frac{pS}{\kappa} l \cos(\gamma - \varphi) + K_d \rho n^2 D^5 + \\ + \frac{4\kappa^2 n^2}{60^2} J_{\text{п.зв}}. \end{aligned} \quad (293)$$

В этом уравнении нам известны следующие величины:

$$D, B_c, \frac{\gamma}{g}, \mu_p, \kappa, l, \gamma, K_c, \lambda, D_d, d, h, \mu, K_d;$$

$n$  и  $\varphi$  являются параметрами. Необходимо, чтобы уравнение удовлетворялось на всем диапазоне рабочих значений  $n$  и  $\varphi$ . Центробежный момент инерции  $J_{\text{п.зв}}$  противовесов предопределяет собой размеры последних; поэтому следует задаться какими-либо первоначальными величинами противовесов,  $q$  входит только в один член  $M_{\text{ср}}$  и им тоже можно сначала задаться. Таким образом мы имеем два неизвестных  $p$  и  $D_n$ , которые связаны между собой. Лучше и нагляднее решать уравнение (293) графически. Для этого по оси абсцисс откладывают число оборотов, а по оси ординат — соответствующие величины моментов, причем там, где входит давление  $p$ , можно его считать параметром и построить несколько кривых для разных значений  $p$ . Дело в том, что  $p$  зависит от того давления, какое дает регулятор, а поэтому и его приходится считать заданным и подбирать диаметр поршня, который зависит от конструктивных особенностей винта. При конструировании приходится выбирать между значениями  $p$  и  $D_n$ .

#### § 4. Экспериментальные исследования статической прочности винта

В § 2 главы XV мы упоминали, что статическая картина сил и моментов, действующих на винт, является лишь приближенной и полностью не отражает действительную картину явления. Поэтому и экспериментальные исследования по статической прочности винта не являются полноценными. Ввиду этого за

последнее время, когда почти повсеместное распространение получили металлические винты, экспериментальными исследованиями статической прочности, в особенности изгиба лопастей, почти не стали заниматься. Действительно, что может дать исследование статического изгиба металлических лопастей? Лопаста могут быть загнуты очень сильно и все же не сломаться, их материал лишь выйдет из предела пропорциональности. Получаемые прогибы на самом деле существовать не могут, так как центробежная сила обязательно выпрямит и, следовательно, разгрузит лопасть. Остается только исследовать растяжение лопасти; но для этого требуется очень мощная разрывная машина, а между тем разница между разрывающими напряжениями, полученными в лопасти и в образце, вырезанном из лопасти, будет невелика. Исследование на разрыв лопасти производится лишь у деревянных лопастей, вставляемых в стальную втулку. По поводу этих лопастей у конструктора может возникнуть сомнение относительно прочности заделки лопасти, которую и следует испытать.

Для контроля за качеством материала металлического винта производятся испытания на растяжение образцов, вырезанных из разных частей лопасти. Необходимо, чтобы полученные результаты были достаточно однородными. В противном случае следует заключить, что материал после обработки лопасти неоднороден.

Деревянные лопасти иногда испытываются на статическое кручение, так как эти лопасти в эксплуатации могут ломаться от кручения.

Статическим испытаниям иногда подвергают различные детали втулки, так как обычно они трудно поддаются расчету. Иногда испытывается на статические усилия и вся втулка, например, на растяжение от центробежных сил. Однако для этого требуется мощная специальная установка.

### § 5. Напряжения в лопастях от гироскопических сил

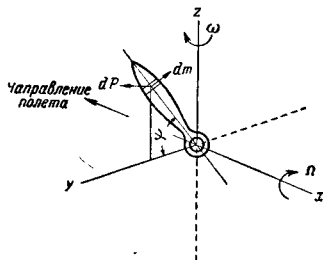
При эволюциях самолета в воздухе в лопастях винта могут возникать добавочные напряжения от действия гироскопических сил.

Гироскопические силы возникают от так называемого поворотного ускорения, которое получается от сложения двух ускорений. В нашем случае такое поворотное ускорение может получиться, когда винт, вращающийся на самолете с угловой скоростью  $\Omega$  относительно оси  $x$  (фиг 262), получает еще вращение с угловой скоростью  $\omega$  относительно другой оси, перпендикулярной первой<sup>1</sup>, например, оси  $z$  в нашем случае. Тогда при сло-

<sup>1</sup> Если векторы  $\omega$  и  $\Omega$  не перпендикулярны, то, разлагая  $\omega$  на составляющие,— одну перпендикулярно  $\Omega$  а другую на направление  $\Omega$  получим, что к вектору  $\Omega$  прибавляется только еще угловая скорость, которая не вызывает поворотных ускорений.

женн двух ускорений получается поворотное ускорение, которое равно удвоенному произведению окружной относительной скорости данной точки  $\Omega r$  на угловую скорость переносного движения  $\omega$  и на синус угла  $\psi$  между векторами этих скоростей. Угол  $\psi$  равен также углу радиуса вектора рассматриваемой точки с осью  $u$ , следовательно,  $\frac{d\psi}{dt} = \Omega$ . Таким образом поворотное ускорение

$$j_n = 2\omega\Omega \sin \psi. \quad (294)$$



Фиг. 262 Гироскопические силы на винте.

Возникающая от поворотного ускорения гироскопическая сила элемента лопасти  $dm$ , находящегося на расстоянии  $r$  от оси вращения винта, будет

$$dP_r = j_n dm = 2\omega\Omega \sin \psi dm. \quad (295)$$

Направление поворотного ускорения, а следовательно, и гироскопической силы, получается так. Вектор относительной окружной скорости надо повернуть на прямой угол в сторону, обратную переносному вращению. Следовательно, направление гироскопической силы зависит от положения лопасти по отношению к переносному вращению. Так, для верхнего положения лопасти, показанного на фиг. 262, гироскопическая сила будет направлена вперед по полету, а для нижнего положения лопасти она будет направлена против полета. Величина этой силы найдется, если мы проинтегрируем уравнение (295) по всей лопасти. Так как обычно лопасти винтов делаются сравнительно неширокими, то можно считать, что для определенного положения лопасти угол  $\psi$  один и тот же по всей лопасти и тогда

$$P_r = 2\Omega\omega \sin \psi \int_{r_0}^R r dm.$$

Нас больше интересует тот момент от гироскопических сил, который отгибает лопасть в сечении на радиусе  $r_0$ ; этот момент будет

$$M_r = \int_{r_0}^R (r - r_0) dP_r = 2\Omega\omega \sin \psi \int_{r_0}^R r(r - r_0) dm.$$

Подставим вместо  $dm$  его значение.

$$dm = S \frac{\gamma}{g} dr = k_3 bc \frac{\gamma}{g} dr.$$

Перейдя к отвлеченным обозначениям, получим

$$M_r = \frac{1}{4} \Omega\omega \sin \psi k_3 \frac{\gamma}{g} D^5 \int_{r_0}^1 \bar{b}^2 \bar{c} (\bar{r} - \bar{r}_0) \bar{r} d\bar{r}. \quad (296)$$

По этой формуле можно определить изгибающий момент гироскопических сил на каждом радиусе. Максимальное значение этого момента будет при  $\psi$ , равном  $\frac{1}{2} \pi$ ,  $\frac{3}{2} \pi$  и т. д.

$$M_{r \max} = \frac{1}{4} \Omega\omega k_3 \frac{\gamma}{g} D^5 \int_{r_0}^1 \bar{b}^2 \bar{c} (\bar{r} - \bar{r}_0) \bar{r} d\bar{r}. \quad (297)$$

Отгиб лопасти происходит силой, перпендикулярной плоскости вращения винта. Разложим изгибающий момент на две составляющих — вдоль хорды сечения и перпендикулярно ей. Последний момент и будет изгибать лопасть, первой же составляющей мы пренебрегаем. Таким образом изгибающий момент лопасти от гироскопических сил на радиусе  $r_0$  будет

$$M_{r \text{ изг}} = \frac{1}{4} \frac{\gamma}{g} \Omega\omega k_3 \cos \varphi D^5 \int_{r_0}^1 \bar{b}^2 \bar{c} (\bar{r} - \bar{r}_0) \bar{r} d\bar{r}$$

или

$$M_{r \text{ изг}} = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} \pi n_s \omega k_3 \cos \varphi D^5 \int_{r_0}^1 \bar{b}^2 \bar{c} (\bar{r} - \bar{r}_0) \bar{r} d\bar{r}. \quad \circ$$

Если в уравнении (296) положить  $r_0$  равным нулю, то получим значение изгибающего момента лопасти у оси винта

$$M_r = 8\Omega\omega \sin \psi k_3 \frac{\gamma}{g} R^5 \int_0^1 \bar{b}^2 \bar{c} \bar{r}^2 d\bar{r}. \quad (298)$$



Величина

$$\frac{1}{4} k_3 \frac{\gamma}{g} R^5 \int_0^R \bar{b}^2 \bar{c} r^2 d\bar{r} = J_d$$

есть момент инерции лопасти относительно оси винта. Следовательно,

$$M_{г. изг} = 2\Omega\omega \sin \psi J_d \quad (299)$$

Напряжение от гироскопического момента будет

$$\sigma = \frac{M_{г. изг}}{W}$$

Таким образом при расчете это напряжение следует прибавить к полученному нами в § 1 напряжению от изгибающих и растягивающих сил в том случае, если в данном винте могут быть значительные гироскопические силы.

### Глава XVII

## ДИНАМИЧЕСКАЯ КАРТИНА СИЛ И МОМЕНТОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ВИНТ

### § 1. Неустановившееся движение винта

В реальных условиях винт работает в неустановившемся движении и из практики эксплуатации винтов известно, что все поломки винтов носят усталостный характер. Неустановившееся движение винта имеет обычно периодический характер, — имеют место колебания винта. Колебания характеризуются частотой и амплитудой. При достаточно больших частотах и амплитудах ускорения в колеблющемся винте могут быть весьма велики, а так как колебания обычно продолжаются долго, то следовательно, при колебаниях винт испытывает большие и продолжительно действующие напряжения. Это вызывает усталость материала винта.

Колебания вызываются периодически действующей силой. Источник колебаний, связанный как-либо с данной деталью, передает ей свои колебательные движения и вызывает в ней соответствующие ускорения. Если собственная частота колебаний данной детали равна или близка к частоте возбуждающих колебаний, то имеет место резонанс. Известно, что качели можно очень легко раскачать, если их раскачивать в такт, т. е. в резонанс с их собственными колебаниями, и, наоборот, их весьма трудно качать не в такт. В винте также может иметься резонанс, т. е. совпадение собственных частот колебаний лопастей с частотой возбуждающей силы. Резонанса всегда стараются избегать,

ибо он может вызвать колебания с весьма большой амплитудой и при большой частоте создать большие напряжения, которые могут привести к поломке винта.

Получается это потому, что при резонансе энергия, передаваемая от возмущающей силы колеблющемуся предмету, может накапливаться, и если рассеяние энергии вследствие затухания невелико, то эта накопленная энергия может вызвать большие амплитуды колебания. Теоретически при отсутствии затухания в условиях резонанса могут получиться бесконечно большие амплитуды. На самом деле бесконечно большие амплитуды не получатся, возрастание амплитуд прекратится, когда приток энергии будет равен ее рассеянию. Источниками колебания винта могут явиться: неравномерный крутящий момент двигателя, неравномерная нагрузка на лопасти винта, неуравновешенность двигателя или винта и меняющееся соотношение между упругими свойствами лопасти и аэродинамическими силами.

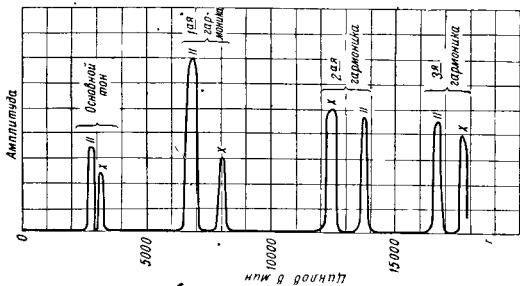
Для того чтобы избежать этого, необходимо знать частоту собственных колебаний винта. Таким образом при динамических расчетах винта следует найти, во-первых, напряжения, которые получаются при колебаниях винта, и, во-вторых, знать собственную частоту винта,— она должна быть такой, чтобы винт не попадал в резонанс с возбуждающими силами. И тот и другой расчеты сложны и кропотливы. Мы не будем в нашем курсе рассматривать теоретические выкладки по динамическим расчетам винтов, а также по теоретическому определению собственной частоты колебания лопастей, а остановимся на описании способа определения собственных частот экспериментальным путем.

## § 2. Экспериментальное определение частот собственных колебаний лопастей винтов

Характер колебаний винта может быть разнообразный. Он может иметь изгибные, крутильные колебания, а также колебания растяжения. Последние очень малы и во внимание не принимаются. Кроме того, колебания одного характера могут быть различного порядка. На фиг. 263 представлены различные типы колебаний винтов. На фиг. 264 представлены колебания винта по возрастающим частотам. Как видим, у винта собственных частот весьма много. Будем рассматривать только изгибные колебания, как наиболее простые.

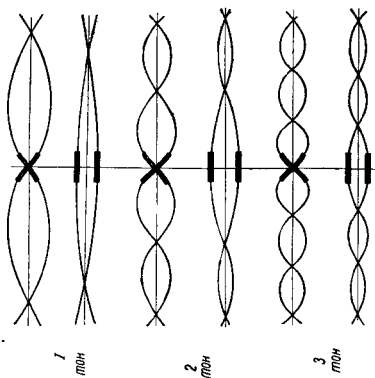
Как известно из теории колебаний, частоту собственных колебаний тела (т. е. число колебаний в единицу времени) можно выразить следующей формулой:

$$p = \frac{v}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{EJ_0}{\frac{\gamma}{g} S_0}}, \quad (300)$$



Фиг. 264. Собственные частоты колебаний винта.

X — означает колебание лопастей в разных фазах, II — означает колебание лопастей в одной фазе.



Фиг. 263. Различные типы колебаний двухлопастных винтов.

где  $\mu$  — некоторый коэффициент, зависящий от формы тела и способа его закрепления,  $R$  — длина тела,  $\gamma$  — удельный вес материала,  $E$  — модуль упругости материала,  $J_0$  — момент инерции исходного сечения тела и  $S_0$  — площадь исходного сечения. Знание коэффициента  $\mu$  предопределяет собой теоретическое определение частоты.

Казалось бы, можно просто определить собственную частоту лопастей винта. Если ударить по лопасти чем-нибудь, то лопасть придет в колебание подобно камертону. Записав эти колебания, можно найти и собственную частоту. Однако такой метод неудобен тем, что необходимо иметь какой-то записывающий аппарат. Проще вызывать колебание лопастей резонансом. Для этого на винт устанавливается так называемый вибратор, который представляет собой вращающийся эксцентрично груз. Так как этот груз неуравновешен, то он вызывает тряску винта, которая особенно сильно отзывается, когда частота колебаний груза попадет в резонанс с собственной частотой лопастей винта, — в этом случае лопасти будут очень сильно колебаться. Частоту можно определить по счетчику оборотов вибратора. Резонансный способ весьма прост и поэтому он получил большое распространение. Однако собственная частота, найденная резонансным способом, не будет соответствовать собственной частоте винта, работающего на самолете. Дело в том, что на вращающийся винт действуют центробежные силы, которые изменяют собственную частоту винта. Кроме того, при резонансном методе винт обычно подвешивается на резиновых шнурах и таким образом создаются колебания свободного винта. На самом же деле работающий винт жестко укреплен на носке вала двигателя. Это тоже изменяет собственную частоту винта. Таким образом собственная частота, определенная резонансным методом, требует поправки на вращение винта и на жесткость посадки его на валу. Теоретически можно найти, что если через  $p$  обозначить число колебаний в минуту неподвижного винта, а через  $p$  — вращающегося винта, то

$$\bar{p}^2 = p^2 + kn^2. \quad (301)$$

Такое же соотношение будет иметь место и для обертонов, только для каждого вида колебаний будут разные значения коэффициента  $k$ . Таким образом для основного тона

$$\bar{p}_1^2 = p_1^2 + k_1 n^2;$$

для первого обертона

$$\bar{p}_2^2 = p_2^2 + k_2 n^2;$$

для второго обертона

$$\bar{p}_3^2 = p_3^2 + k_3 n^2.$$

Коэффициенты  $k$  будут иметь следующие значения:  $k_1=1,46$ ,  $k_2=3,63$ ,  $k_3=12,2$ . Необходимо иметь в виду, что обычно в теоретических работах рассматривают не число колебаний, а так называемую круговую частоту, под которой подразумевается выражение  $\frac{2\pi}{T} = \omega$ , где  $T$  — период колебания. При этом круговая частота связана с числом колебаний следующим образом:

$$p = \frac{30n}{\pi} \quad (302)$$

Тогда уравнение (301) примет вид

$$\bar{\omega}^2 = \omega^2 + k\Omega^2, \quad (303)$$

где значения  $k$  те же.

Переход от свободной лопасти к жестко закрепленной делается следующим путем.

Обозначим число колебаний жестко закрепленной лопасти через  $p^*$ , а свободной лопасти через  $p$ . Тогда для свободной лопасти будем иметь

$$p = \frac{\mu_1}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{EJ_0}{\gamma S_0 g}}$$

а для жестко закрепленной

$$p^* = \frac{\mu_2}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{EJ_0}{\gamma S_0 g}}$$

$\mu_1$  и  $\mu_2$  — некоторые коэффициенты.

Между  $p$  и  $p^*$  для основной частоты существует следующая связь:

$$p_1^{*2} = p_1^2 - 12,8 \left( \frac{900}{\pi^2 R^4} \frac{EJ_0}{\gamma S_0} \right) \quad (304)$$

или приближенно можно принять

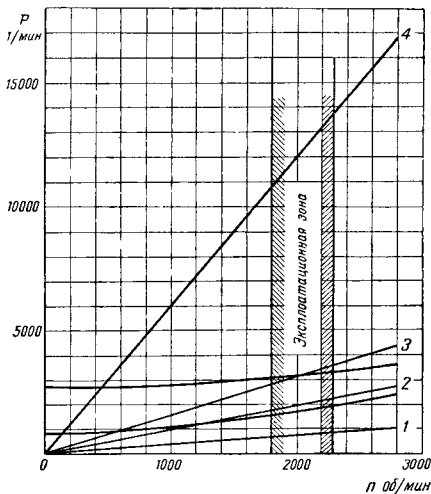
$$p_1^* = 0,836 p_1. \quad (305)$$

Для первого обертона приближенно

$$p_2^* = 1,25 p_2. \quad (306)$$

Определив вибратором резонансным методом собственные частоты колебаний свободного винта, по формулам (305) и (306) определяем частоты жесткого винта, а затем по формулам (301) — частоты вращающегося винта.

Для того чтобы решить, может ли винт попасть в резонанс, следует построить диаграмму частот, показанную на фиг. 265. Так как почти всегда главным источником возмущающей силы является двигатель, то по оси абсцисс откладывается его число оборотов в минуту. В зависимости от числа оборотов по оси ординат откладываются возбуждающие частоты, которые ли-



Фиг. 265. Диаграмма частот лопасти винта.

нейно зависят от числа оборотов двигателя. Самой низкой возбуждающей частотой обычно бывает сам винт. Возбуждающая сила получается за счет неуравновешенности винта; эта частота получится помножением числа оборотов двигателя на передаточное число, т. е.

$$p_v = i n_m \quad (\text{линия 1 на фиг. 265}).$$

Сам двигатель может вызвать колебания вследствие своей неуравновешенности первого порядка:

$$p_{m1} = n_m \quad (\text{линия 2 на фиг. 265}).$$

Винт может возбудить возмущающую силу при прохождении лопасти около препятствия и частота этой силы будет равна числу оборотов винта, умноженному на число лопастей  $k$ :

$$p_{вз} = k \cdot i \cdot n_m \quad (\text{линия 3 на фиг. 265})$$

Другие возбуждающие частоты двигателя равны также числу его оборотов, умноженному на половинное число цилиндров  $\frac{z}{2}$ .

Действительно, полный цикл работы цилиндров в четырехтактном двигателе заканчивается через два оборота вала, следовательно, за один оборот вала происходит число вспышек, равное половине числа цилиндров, и в одну минуту произойдет число вспышек, равное числу оборотов двигателя, умноженное на половину числа цилиндров. Следовательно,

$$p_{м4} = \frac{1}{2} z n_m \quad (\text{линия 4 на фиг. 265}).$$

Проводим линии, соответствующие собственным частотам винта (жесткого, вращающегося). Пересечение этих параллельных линий с лучами, выходящими из начала координат и соответствующими возбуждающим частотам, дает значение числа колебаний, соответствующего резонансному. На той же диаграмме обозначаем зону эксплуатационных оборотов двигателя. Если в эту зону попали точки пересечения, будет иметь место резонанс. В приведенном на фиг. 265 примере в эту зону попадает одна точка и, следовательно, при числах оборотов двигателя, соответствующих этой точке, винт будет вибрировать. Для того чтобы избежать этого, следует увеличить частоту первого обертона; однако необходимо иметь в виду, что при этом в эксплуатационную зону может попасть точка пересечения луча 2. Задачей конструктора является так сконструировать винт, чтобы в эксплуатационной зоне оборотов не было резонансов лопастей.

### § 3. Экспериментальное определение динамической прочности лопастей винта

Ввиду того что расчеты динамической прочности лопастей винта сложны и не всегда могут дать полную уверенность в действительной динамической прочности лопастей, весьма распространены экспериментальные определения этой прочности. Наиболее близкими к действительным условиям работы являются испытания винтов на авиационном двигателе как при работе его на месте (см. гл. XXIII, § 2), так и в полете. Эти испытания могут быть двух родов. Во-первых, испытание винта на выносливость; эти испытания производятся при работе на месте, так как в этом случае нагрузка на лопасти наибольшая. Если по истечении определенного срока работы винта, обусловленного

в технических условиях, не обнаружено никаких дефектов, то считается, что винт прошел испытания. Во-вторых, испытания могут производиться с определением динамических напряжений в лопастях или во втулке винта; эти испытания проводятся как при работе на месте, так и в полете. Определение динамических напряжений производится с помощью тензометров сопротивления. Датчики этих тензометров представляют собой обычно проволоочки, соединенные проводами с осциллографом, которые наклеиваются специальным клеем в различных местах лопасти; под влиянием деформаций электрическое сопротивление этих проволоочек меняется и это изменение регистрируется осциллографом.

Следует, однако, заметить, что такие испытания сложны и громоздки и поэтому стараются найти более простой и дешевый способ испытания лопастей винтов в лабораторных условиях. Достаточно простым способом испытания лопастей является так называемый резонансный способ. По существу это тот же способ, который был нами описан в предыдущем параграфе и которым определяется собственная частота колебаний лопасти. При испытании винт подвешивается на резиновых шнурах и на нем устанавливается вибратор. Испытания проводятся на различных резонансных частотах. Изменение амплитуды колебания и, следовательно, напряжений производится двояким образом: во-первых, изменением эксцентриситета груза вибратора или величиной груза вибратора, во-вторых, большим или меньшим приближением к резонансу — чем дальше от резонанса, тем амплитуда меньше.

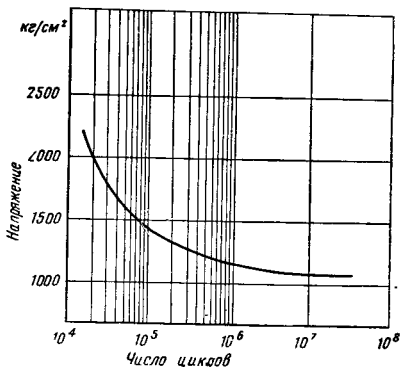
Этим способом можно испытывать лопасти винта на выносливость. Правда, такое испытание, отличаясь простотой и дешевизной, не может полностью отразить истинной картины динамических напряжений. При этих испытаниях не будет вращения винта, т. е. будут отсутствовать напряжения от центробежной силы, не всегда можно осуществить жесткую заделку винта и, наконец, демпфирование колебаний будет иное.

Выше мы рассмотрели различные формы колебаний двухлопастного винта. Такие же формы колебаний будет иметь трехлопастный винт, а четырехлопастный винт может иметь, кроме этих, еще одну форму колебаний. Эта форма колебаний состоит в том, что две противоположные лопасти колеблются в одной фазе (второй тип колебаний из изображенных на фиг. 263), а каждая пара по отношению к другой паре колеблется в разной фазе. В результате втулка стоит на месте — не колеблется, и поэтому указанный тип колебаний воспроизводит жесткую заделку винта. Таким образом жесткую заделку винта можно осуществить при резонансных испытаниях только в случае четырехлопастных винтов.

Наконец следует заметить, что при колебаниях лопастей винта имеет место демпфирование колебаний. Разные частоты



по разному демпфируются — высокие частоты больше подвержены демпфированию, чем низкие. Демпфирование может быть внутреннее и внешнее. В первом случае демпфирующие силы возбуждаются в самом материале лопасти — это силы внутреннего трения материала. Во втором случае демпфирование получается за счет внешних демпфирующих сил; это — аэродинамические силы, действующие на лопасть.



Фиг. 266 Кривая усталости материала лопастей винта

Демпфирование мало изменяет собственную частоту лопасти, но оно заметно может изменить динамические напряжения в лопасти в сторону их снижения. При испытании лопастей винтов резонансным методом внутреннее демпфирование имеет место, тогда как внешнее почти отсутствует, ибо аэродинамические силы, действующие на вибрирующую лопасть, очень малы и производимое ими демпфирование невелико, тогда как при работе винта на двигателе эти демпфирующие силы значительно возрастают.

Резонансные испытания могут принести пользу в том отношении, что лопасти винта при этих испытаниях можно довести иногда до поломки от усталостных напряжений.

Если на диаграмме по оси абсцисс откладывать число колебаний, а по оси ординат — разрушающее напряжение, которое вызывается в образце, то для стали получается кривая, асимптотически приближающаяся к прямой, параллельной оси абсцисс. Для дуралюмина эта кривая неуклонно приближается к оси

абсцисс; правда, это приближение идет очень медленно, но все же всякий образец из дуралюмина при очень большом числе циклов может быть сломан. Это свойство характерно для алюминиевых сплавов. На фиг. 266 показана такая кривая для дуралюмина; характерно в ней то, что при малом числе циклов разрушающее напряжение от усталости велики, а с увеличением числа циклов уменьшение идет сначала быстро, а затем медленнее. Приблизительно можно считать, что медленное снижение разрушающего напряжения от усталости при увеличении числа циклов начинается примерно с  $10^7$  циклов.

В настоящее время считается, что дуралюминовые лопасти винта динамически прочны, если напряжения в них не превосходят  $8-9$  кг/мм<sup>2</sup>.

Вследствие указанного свойства алюминиевого сплава лопасти винтов бесконечно долго работать не могут, и поэтому всегда назначается определенный срок службы, зависящий от величины тех динамических напряжений, которые имеют место в лопастях, и от повторяемости тех или иных напряжений. На самолете винт работает на различных режимах, при которых получаются и различные напряжения. Если высокие напряжения повторяются чаще, чем малые, то срок службы винта должен быть меньше, чем в том случае, когда повторяются меньшие напряжения. Поэтому основным испытанием винта и является испытание на выносливость на авиационном двигателе при работе его на месте по определенной программе, в которую входят различные режимы работы винта. Такие испытания по большей части более тяжелы для винта, чем испытания в полете, и поэтому если винт выдержал такое испытание, то в полете при меньших напряжениях его запас прочности будет больше и будет обеспечена безопасность полета.

## Глава XVIII

### НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ХОДА ВИНТА

#### § 1. Тряска винтов

Вопрос тряски самолета является одним из самых важных вопросов эксплуатации самолета. Тряска вызывает дополнительные динамические напряжения в конструкции самолета, а также неприятные физиологические воздействия на экипаж и пассажиров, сказывающиеся в большом утомлении. Тряска самолета получается главным образом из-за того, что какая-то деталь или несколько деталей попадают в резонанс с периодической возмущающей силой. Источником этой периодической силы может быть неуравновешенная вращающаяся деталь. Такие вращающиеся детали находятся или в двигателе (вал с кривошипом, шатунами и поршнями) или на валу двигателя — винт. Мы будем рассматривать тряску самолета, вызванную только неуравнове-

шеиностью винта. В § 2 мы разберем все виды неуравновешенности винта, а в этом параграфе в качестве примера разберем самую очевидную неуравновешенность винта, так называемую статическую неуравновешенность, т. е. несовпадение центра тяжести винта с осью его вращения. Предположим, что центр тяжести винта находится на расстоянии  $\rho$  от оси. При наличии такой неуравновешенности винта получается центробежная сила, вектор которой вращается вместе с винтом со скоростью винта. Следовательно, по отношению к винту этот вектор неподвижен; по отношению же к моторной установке он вращается с числом оборотов винта и создает на моторной установке переменные усилия, которые и создают ее тряску. Предположим для простоты, что жесткость моторной установки одинакова по всем направлениям; тогда вращающийся вектор центробежной силы создаст одинаковые деформации по всем направлениям, т. е. вектор деформации синхронно вращается с вектором центробежных сил. Центр тяжести винта будет описывать при этом круг. При абсолютно жесткой моторной установке центр тяжести винта описывает круг радиусом  $\rho$  и центробежная сила выражается формулой

$$P_c = m\Omega^2\rho.$$

Теперь предположим, что под влиянием этой силы моторная установка деформируется на величину  $\delta$ ; винт будет вращаться так, что его центр (точка пересечения плоскости вращения винта с его осью) будет описывать круг радиуса  $\delta$ , а его центр тяжести — круг радиуса  $r = \rho + \delta$ . Следовательно, центробежная сила будет

$$P_c = m\Omega^2r.$$

Предполагая, что система находится в динамическом равновесии, следует приравнять силу упругости мотоустановки центробежной силе винта, т. е.

$$P_c = k\delta,$$

где  $k$  — коэффициент эластичности мотоустановки. Или

$$m\Omega^2(\delta + \rho) = k\delta.$$

Отсюда получаем

$$\delta = \rho \frac{\Omega^2}{\frac{k}{m} - \Omega^2}.$$

\* Для простоты предполагаем, что масса двигателя не принимает участия в колебаниях.

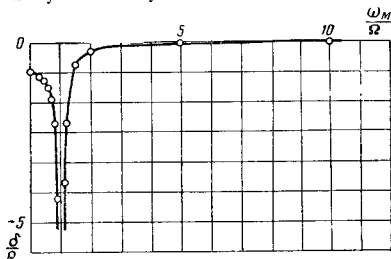
Но величина  $\frac{k}{m}$  есть квадрат круговой частоты собственных колебаний винта на мотоустановке  $\omega_M^2$  и, следовательно,

$$\delta = \rho \frac{\Omega^2}{\omega_M^2 - \Omega^2}$$

или

$$\delta = \rho \frac{1}{\left(\frac{\omega_M}{\Omega}\right)^2 - 1}. \quad (307)$$

Если  $\Omega = \omega_M$ , т. е. система попадает в резонанс с частотой собственных колебаний винта на мотоустановке, то  $\delta = \infty$ ; деформация получается бесконечно большой. На самом деле этого не будет, так как демпфирующие силы, которых мы не учли, будут отнимать энергию и не дадут деформации развиться в бесконечно большую величину.



Фиг. 267 Резонанс мотоустановки

Из уравнения (307) получаем

$$\frac{\delta}{\rho} = \frac{1}{\left(\frac{\omega_M}{\Omega}\right)^2 - 1}. \quad (308)$$

На фиг. 267 дана кривая  $\frac{\delta}{\rho}$  по  $\frac{\omega_M}{\Omega}$ . При  $\frac{\omega_M}{\Omega} = 1$  получается резонанс, причем при  $\frac{\omega_M}{\Omega} = 1,5$  амплитуда колебания становится уже весьма малой  $\left(\frac{\delta}{\rho} = 0,8\right)$ .

$\rho$  обычно очень мало, например, при неуравновешенности в 10 гм и весе винта 150 кг  $\rho = 0,07$  мм. Почти всегда частота собственных колебаний винта на мотоустановке меньше числа оборотов винта. Следовательно, чаще всего они соответствуют левой

ветви кривой фиг. 267, причем уже при  $\frac{\omega_m}{\Omega} = 0,9$   $\delta = -5,26r$  или  $\delta \approx 0,3$  мм. Величина эта хотя и малая, но все же ощутимая на самолете, в особенности, если мотоустановка не имеет демпфера. Из всего сказанного следует, что для уменьшения тряски самолета необходимо добиваться выполнения следующих трех условий.

1. Конструировать мотоустановку так, чтобы собственные ее частоты (т. е. собственные частоты всех масс, подвешенных на ней) были меньше эксплуатационных оборотов винта и все имеющиеся ее частоты не были разбросаны, а по возможности были сосредоточены.

2. Чтобы колебания, исходящие от винта, были задемпфированы в мотоустановке.

3. Возмущающая сила была бы возможно меньшей.

Первое и второе требования осуществляются применением на мотоустановке эластичной подвески двигателя на демпферах такого типа, чтобы центр жесткости мотоустановки совпадал или был близок к центру тяжести ее. Это уменьшает разброс частот мотоустановки. Третье требование осуществляется возможно лучшим уравновешением винта.

## § 2. Различные виды неуравновешенности винта

Как мы видели в § 1 гл. XV, на винт при его работе действуют аэродинамические и массовые силы. Винт будет уравновешен, если и те и другие силы, а также моменты, порождаемые ими, не будут изменяться при довороте винта на  $360^\circ$ , т. е. при выполнении полного цикла его работы. Кроме того, нужно, чтобы никакие из этих сил не создавали моментов относительно оси вращения. Таким образом можно говорить об уравновешенности сил и моментов винта.

*Неуравновешенность массовой силы* выражается в том, что центр тяжести винта не совпадает с осью его вращения. Если обозначим этот эксцентриситет центра тяжести через  $r_c$ , то при вращении винта с угловой скоростью  $\Omega$  в нем разовьется неуравновешенная центробежная сила

$$P_c = Gr_c \frac{\Omega^2}{g}.$$

Следовательно, центробежная сила винта пропорциональна величине эксцентриситета его центра тяжести и его весу. При различных положениях винта на его оси относительно этой оси будут создаваться моменты силы тяжести различной величины: от нуля до какой-то максимальной величины. Эта максимальная величина момента выразится как произведение веса винта на эксцентриситет его центра тяжести. Согласно приведенной выше формуле этот максимальный момент может служить мерилом

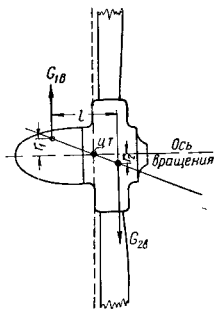
неуравновешенности массовой силы и обычно он называется *статической неуравновешенностью винта*. Следовательно, статическая неуравновешенность  $N_c$  будет

$$N_c = G \cdot r_c \text{ гм.} \quad (309)$$

Если  $G$  выражается в  $г$ , а  $r_c$  в  $м$  или  $G$  в  $кг$ , а  $r_c$  в  $мм$ , то неуравновешенность выражается в  $гм$ . Центробежная сила вследствие неуравновешенности может быть выражена так:

$$P_c = \frac{4\pi^2}{1000g} N_c n^2 \text{ кг.} \quad (310)$$

Здесь неуравновешенность  $N_c$  в  $гм$  *Неуравновешенность массового момента* выражается в том, что главная ось инерции винта не совпадает с осью вращения винта. Рассечем винт на две части плоскостью, перпендикулярной оси вращения и проходящей через центр тяжести винта. Каждая из частей будет иметь вес  $G_{1в}$  и  $G_{2в}$ , причем сумма их равна весу винта  $G_v$ . Предположим, что в этом винте массовые силы уравновешены, следовательно, центр тяжести его совпадает с осью вращения. Центры тяжести частей могут и не лежать на оси вращения винта, однако по условию (статическая уравновешенность) наибольшие моменты веса каждой части относительно оси винта должны быть равны между собой (фиг. 268).



Фиг. 268. Неуравновешенность массового момента винта.

$G_{1в} \cdot r_1 = G_{2в} \cdot r_2$ . Совершенно ясно, что главная ось инерции винта пройдет через центры тяжести этих половинок и, следовательно, может быть наклонена к оси вращения винта. Если каждая из частей будет обладать статической неуравновешенностью — одинаковой и противоположно направленной:

$G_{1в} \cdot r_1 = G_{2в} \cdot r_2$ , то в каждой части при вращении будет возбуждаться центробежная сила противоположного направления; эти две силы и создадут моменты относительно центра тяжести винта, причем векторы моментов будут вращаться вместе с винтом. Эти моменты будут изгибать вал винта и создавать переменную нагрузку на опоры вала.

При различных положениях винта, при его вращении вокруг его осн, вес каждой части винта вследствие эксцентричного положения центров тяжести каждой части будет создавать в определенном положении винта максимальный момент относительно оси. Мерилом получающегося момента из-за несовпадения центров тяжести частей с осью может служить момент веса какой-

либо части относительно центра тяжести винта. Так как мерилем неуравновешенности каждой части служит наибольший статический момент части, то мерилем неуравновешенности массового момента может служить произведение из момента статической неуравновешенности части на проекцию  $l$  расстояния между центрами тяжести частей на ось винта. Эта неуравновешенность момента массовых сил иногда называется *динамической неуравновешенностью винта*.

Следовательно, динамической неуравновешенностью винта будет

$$N_m = G_{1B}lr_1 = G_{2B}lr_2 \quad (311)$$

или

$$N_m = (G_B - G_{2B})lr_1 = (G_B - G_{1B})lr_2;$$

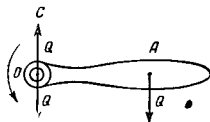
$$N_m = \left(G_B - \frac{G_{1B}r_1}{r_2}\right)lr_1 = \left(G_B - \frac{G_{2B}r_2}{r_1}\right)lr_2.$$

Таким образом

$$N_m = G_Blr_1 - \frac{G_{1B}r_1^2}{r_2}l = G_Blr_2 - \frac{G_{2B}r_2^2}{r_1}l.$$

Если обе части имеют одинаковый вес, то

$$N_m = \frac{G_B}{2}lr_c,$$



Фиг. 269. Неуравновешенность аэродинамической силы однолопастного винта.

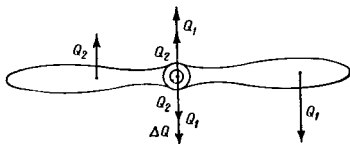
где  $r_c$  — эксцентриситет частей. Если  $G_B$  выражается в  $g$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  и  $l$  в  $m$ , то динамическая неуравновешенность выражается в  $gm^2$ . Получающийся при вращении момент будет иметь величину

$$M_m = \frac{N_m}{1000g} 4\pi^2 n_s^2 \text{ кгм.} \quad (312)$$

Здесь неуравновешенность  $N_m$  выражена в  $gm^2$ .

Неуравновешенность аэродинамической силы выражается в том, что абсолютные величины проекций силы сопротивления каждой лопасти на плоскость вращения винта неодинаковы и, следовательно, равнодействующая их не равна нулю. Действительно, для однолопастного винта (фиг. 269) мы имеем приложенной силу сопротивления вращению  $Q$  в точке  $A$ . Из механики известно, что всякую силу можно представить в виде силы и пары; для этого прикладываем к центру винта две равные и противоположно направленные силы  $Q$ , тогда будем иметь пару  $Q \cdot AO$  и силу  $Q$ . Пара является реакцией от вращающего момента двигателя, а сила  $Q$  неуравновешена, она будет вращаться вместе с валом винта и создавать переменное усилие на подшипники вала винта.

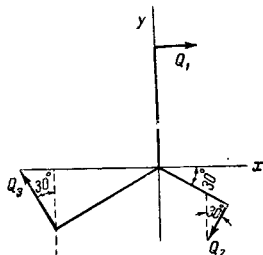
В случае двухлопастного винта предположим, что силы сопротивления лопастей  $Q_1$  и  $Q_2$  приложены в разных местах лопасти и имеют разные величины (фиг. 270). Разлагая каждую



Фиг. 270. Неуравновешенность аэродинамической силы двухлопастного винта.

силу на силу и пару, получим две пары, которые являются реакциями вращающего момента двигателя, и одну силу, приложенную к опоре винта, т. е. к его валу, равную разности сил  $Q_1$  и  $Q_2$ . Эта равнодействующая не будет уравновешена и будет создавать переменное усилие на вал винта.

В случае трехлопастного винта (фиг. 271) равнодействующую, приложенную к опоре, получим, спроектировав все силы на две взаимно перпендикулярные оси. Пусть  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$  — упомянутые силы сопротивления лопастей и пусть направление оси первой лопасти совпадает с осью  $y$ , тогда проекция равнодействующей на ось  $x$  будет



Фиг. 271. Неуравновешенность аэродинамической силы трехлопастного винта.

$$\Delta Q_x = Q_1 - \sin 30^\circ (Q_2 + Q_3) = Q_1 - \frac{1}{2} (Q_2 + Q_3), \quad (313)$$

а на ось  $y$

$$\Delta Q_y = \cos 30^\circ (Q_3 - Q_2) = \frac{\sqrt{3}}{2} (Q_3 - Q_2), \quad (314)$$

полная равнодействующая будет

$$\Delta Q = \sqrt{\Delta Q_x^2 + \Delta Q_y^2}. \quad (315)$$

Вполне очевидно, что местоположение точки приложения силы сопротивления на лопасти не влияет ни на величину, ни на точку приложения равнодействующей, которая, конечно,



всегда должна быть приложена на опоре, т. е. на оси вала винта. Подставляя значения  $\Delta Q_x$  и  $\Delta Q_y$  по формулам (313) и (314) в формулу (315), получим для трехлопастного винта выражение для неуравновешенной силы

$$\Delta Q = \sqrt{Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 - Q_1 Q_2 - Q_1 Q_3 - Q_2 Q_3}.$$

Проекция силы сопротивления элемента лопасти на плоскость вращения может быть представлена так:

$$dQ = (c_y \sin \varphi + c_x \cos \varphi) \rho \frac{W^2}{2} b dr.$$

Сопротивление всей лопасти будет

$$Q = \frac{1}{4} \rho n_s^2 D^4 \int_{0,25}^1 (c_y \sin \varphi + c_x \cos \varphi) (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) \bar{b} d\bar{r}.$$

Без большой погрешности для наших приближенных и относительных рассуждений можно величиной  $c_x \cos \varphi$  пренебречь по сравнению с  $c_y \sin \varphi$  и  $c_y$  считать постоянным, тогда получим

$$Q = \frac{1}{4} \rho n_s^2 D^4 c_y \int_{0,25}^1 \sin \varphi (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2) \bar{b} d\bar{r},$$

а при работе винта на месте

$$Q = \frac{1}{4} \rho n_s^2 D^4 c_y \pi^2 \int_{0,25}^1 \sin \varphi \bar{r}^2 \bar{b} d\bar{r}.$$

Для двухлопастного винта равнодействующая  $\Delta Q$  будет

$$\Delta Q = \frac{\pi^2}{4} \rho n_s^2 D^4 \left\{ c_{y1} \int_{0,25}^1 \sin \varphi_1 \bar{r}^2 \bar{b} d\bar{r} - c_{y2} \int_{0,25}^1 \sin \varphi_2 \bar{r}^2 \bar{b} d\bar{r} \right\}, \quad (316)$$

где индексы относятся к той или иной лопасти.

Оценивать величину неуравновешенности аэродинамической силы можно просто разностью углов установки, которая создает равнодействующую, не равную нулю. Однако для сравнения этой неуравновешенности с неуравновешенностью массовой силы удобнее выражать ее в каком-либо эквиваленте к массовой силе. Так как и массовая и аэродинамическая силы производят одно и то же воздействие на вал винта, то оценивать величину неуравновешенной аэродинамической силы  $\Delta Q$  удобно величиной неуравновешенной массовой силы  $P_c$ , равной по величине аэроди-

намической силе. Отсюда согласно формуле (310) неравномерность аэродинамической силы  $N_a$  будет

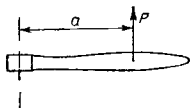
$$N_a = \frac{1000g\Delta Q}{4\pi^2 n_s^2} \quad (317)$$

Здесь неравномерность аэродинамической силы  $N_a$  выражена в *гм*.

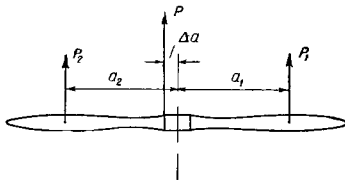
**Неуравновешенность аэродинамического момента** происходит от того, что тяги отдельных лопастей неодинаковы или приложены на различных расстояниях от оси вращения и равнодействующая тяги всех лопастей может не пройти через ось винта. В этих случаях получится момент, лежащий в плоскости, параллельной оси винта.

Рассмотрим однолопастный винт (фиг. 272). Он будет создавать момент от тяги, равный  $P \cdot a$ , который будет вращаться вместе с винтом и создавать переменные усилия на подшипники.

В случае двухлопастного винта (фиг. 273) предположим, что лопасти будут иметь разные тяги, приложенные на разных расстояниях от оси. В то же время предположим, что точки прило-



Фиг. 272. Неуравновешенность аэродинамического момента однолопастного винта.



Фиг. 273. Неуравновешенность аэродинамического момента двухлопастного винта.

жения будут лежать на прямой, проходящей через ось винта. Равнодействующая будет приложена где-то вне оси, она равна  $P = P_1 + P_2$ . Точка ее приложения найдется по формуле центра параллельных сил

$$\Delta a = \frac{\sum x_i P_i}{\sum P_i}$$

В нашем случае получим

$$\Delta a = \frac{P_2 a_2 - P_1 a_1}{P} \quad (318)$$

Если  $a_2 = a_1$ , то

$$\Delta a = \frac{a_1}{\rho} (P_2 - P_1). \quad (319)$$

Для трехлопастного винта (фиг. 274) будем иметь

$$x = \frac{\sum x_i P_i}{\sum P_i}; \quad y = \frac{\sum y_i P_i}{\sum P_i}.$$

В нашем случае

$$\sum x_i P_i = P_2 a_2 \frac{\sqrt{3}}{2} - P_3 a_3 \frac{\sqrt{3}}{2}$$

и

$$x = \frac{\sqrt{3}}{2\rho} (P_2 a_2 - P_3 a_3).$$

Так же

$$\sum y_i P_i = P_1 a_1 - \frac{P_2 a_2}{2} - \frac{P_3 a_3}{2}$$

и

$$y = \frac{1}{2\rho} (2P_1 a_1 - P_2 a_2 - P_3 a_3).$$

Таким образом

$$\Delta a^2 = x^2 + y^2 \quad (320)$$

и

$$\Delta a = \frac{1}{2\rho} \sqrt{3(P_2 a_2 - P_3 a_3)^2 + (2P_1 a_1 - P_2 a_2 - P_3 a_3)^2}.$$

Если принять  $a_1 = a_2 = a_3 = a$ , то

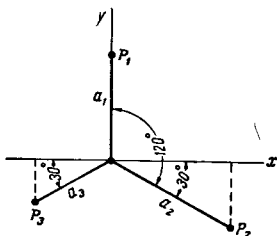
$$\Delta a = \frac{a}{2\rho} \sqrt{3(P_2 - P_3)^2 + (2P_1 - P_2 - P_3)^2}. \quad (321)$$

Предположим, что  $P_1 - P_2 = \Delta P$  и  $P_2 = P_3$ , т. е.  $P_1 - P_3 = \Delta P$ , тогда по формуле (321) получим

$$M = \Delta a \cdot P = a \Delta P. \quad (322)$$

Для четырехлопастного винта, рассматривая его как два двухлопастных, получим

$$x = \frac{P_2 a_2 - P_4 a_4}{\rho}; \quad y = \frac{P_1 a_1 - P_3 a_3}{\rho},$$



Фиг. 274 Неуровновешенность аэродинамического момента трехлопастного винта.

откуда, так как  $\Delta a = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,

$$\Delta a = \frac{1}{P} \sqrt{(P_2 a_2 - P_4 a_4)^2 + (P_1 a_1 - P_3 a_3)^2}. \quad (323)$$

Если  $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a$ , то

$$\Delta a = \frac{a}{P} \sqrt{(P_2 - P_4)^2 + (P_1 - P_3)^2}. \quad (324)$$

Неуравновешенность аэродинамического момента получается из-за неодинаковости геометрических размеров разных лопастей. Обычно наиболее сильно влияет на эту неуравновешенность неодинаковый угол установки разных лопастей. Поэтому величину неуравновешенности аэродинамического момента можно оценивать просто разностью углов установки лопастей. Однако в целях сравнения этой неуравновешенности с неуравновешенностью массового момента удобнее выражать ее в каком-либо эквиваленте к массовому моменту. Так как неуравновешенность массового и аэродинамического моментов производит одно и то же воздействие на вал винта, то оценивать величину неуравновешенного аэродинамического момента удобно величиной неуравновешенного массового момента, равного аэродинамическому моменту. Если неуравновешенный аэродинамический момент равен  $\Delta a \cdot P$ , а неуравновешенный массовый момент выражается формулой (312), то, приравнявая их между собой, для неуравновешенности аэродинамического момента получим

$$N_{a. м} = \frac{\Delta a P 1000 g}{4\pi^2 n_s^2} \text{ гм}^2. \quad (325)$$

Способы уравнивания винтов, т. е. сведение к минимуму всех их неуравновешенностей, описаны в главе XXII.

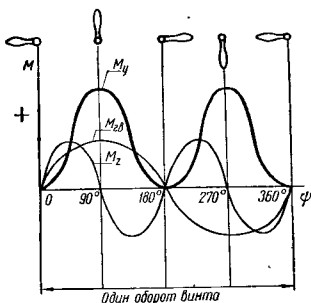
### § 3. Влияние поворота самолета в полете на равномерность хода винта

Как уже указывалось в § 5 гл XVI, при повороте самолета возникают гироскопические силы, создающие дополнительные напряжения в винте. Кроме того, эти силы создают неравномерность хода винта и могут вызвать тряску самолета.

При однолопастном винте гироскопический момент согласно формуле (299) будет равен

$$\cdot M_{г. в} = 2\Omega \omega \sin \psi J_{д}. \quad (326)$$

Момент (326) знакопеременен и действует по синусоиде (фиг. 275), следовательно, вал *изгибается от гироскопического момента одной лопасти винта с частотой, равной числу оборотов винта*. Так изгибается вал как неподвижный, но он вращается и его вращение складывается с колебаниями, вследствие чего колебания моторной установки будут несколько иными. Действительно, колебания моторной установки мы можем разделить на вертикальные и горизонтальные, т. е. колебания относительно осей  $y$  и  $z$ .



Фиг. 275. Периодическое изменение гироскопической силы на винте при его повороте.

Гироскопический момент от одной лопасти, создающий колебания моторной установки в вертикальном направлении относительно оси  $y$ , будет

$$M_y = \int z l P_r, \quad (327)$$

Но  $z = r \sin \psi$  и, следовательно, по формуле (295)

$$dP_r = 2\Omega\omega z \, dm.$$

Отсюда

$$M_y = 2\Omega\omega \int z^2 \, dm \quad (328)$$

или

$$M_y = 2\Omega\omega \sin^2 \psi \int_0^R r^2 \, dm = 2\Omega\omega \sin^2 \psi J_x. \quad (329)$$

Так как в эту формулу входит  $\sin^2 \psi$ , то момент  $M_y$  будет всегда одного знака, а частота его будет равна двойному числу оборотов винта (фиг. 275).

Горизонтальный момент будет

$$M_z = \int y dP_r = 2\Omega\omega \int yz dm. \quad (330)$$

Так как  $y = r \cos \psi$ , то

$$M_z = 2\Omega\omega \sin \psi \cos \psi \int r^2 dm = \Omega\omega \sin 2\psi J_x. \quad (331)$$

Следовательно, горизонтальный момент будет иметь частоту, вдвое большую оборотов винта (фиг. 275). Легко показать, что

$$M_{г.в} = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}.$$

В случае двухлопастного винта моменты  $M_y$  от каждой лопасти будут складываться, и, следовательно, получим ту же частоту, что и для одной лопасти, только действующие моменты будут вдвое больше. Действительно,

$$\begin{aligned} M_{y2} &= 2\Omega\omega J_x [\sin^2 \psi + \sin^2(\psi + 180)] = 4\Omega\omega J_x \sin^2 \psi = \\ &= 2\Omega\omega J_b \sin^2 \psi, \end{aligned} \quad (332)$$

где  $J_b$  — момент инерции двухлопастного винта.

Что касается момента  $M_z$ , то для двухлопастного винта он будет

$$M_{z2} = \Omega\omega J_x [\sin 2\psi + \sin 2(\psi + 180)] = \Omega\omega J_b \sin 2\psi. \quad (333)$$

Он будет такой же частоты, как и для однолопастного винта, но вдвое больше по величине.

В случае трехлопастных винтов моменты  $M_y$  от каждой лопасти будут складываться так, что сумма их будет постоянной и, следовательно, колебаний вызываться не будет. Действительно, периодичность момента  $M_y$  в формуле (329) обусловливается наличием  $\sin^2 \psi$ . Для каждого  $\psi$  сумма моментов  $M_y$ , вызываемых каждой лопастью, будет пропорциональна величине

$$\sin^2 \psi + \sin^2(\psi + 120^\circ) + \sin^2(\psi + 240^\circ),$$

причем легко убедиться, что

$$\sin(\psi + 120^\circ) = -\frac{1}{2} \sin \psi + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \psi,$$

а

$$\sin(\psi + 240^\circ) = -\frac{1}{2} \sin \psi - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \psi.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} & \sin^2 \psi + \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \psi - \frac{1}{2} \sin \psi \right)^2 + \\ & + \left( \frac{1}{2} \sin \psi + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \psi \right)^2 = \frac{3}{2}. \end{aligned}$$

Таким образом

$$M_{y3} = 3\Omega\omega J_x = \Omega\omega J_n. \quad (334)$$

Следовательно, у трехлопастного винта момент  $M_y$  воздействия винта на моторную установку будет постоянным. Он в полтора раза больше, чем момент однолопастного винта, и на 25% меньше, чем момент двухлопастного. Момент  $M_z$  для трехлопастного винта равен нулю. Действительно,

$$M_{z3} = \Omega\omega J_x [\sin 2\psi + \sin 2(\psi + 120^\circ) + \sin 2(\psi + 240^\circ)].$$

Раскрывая выражение в скобках и вычисляя его, получим, что оно равно нулю.

Для четырехлопастного винта получим

$$M_{y4} = 2\Omega\omega J_x [\sin^2 \psi + \sin^2(\psi + 90^\circ) + \sin^2(\psi + 180^\circ) + \sin^2(\psi + 270^\circ)]$$

или

$$M_{y4} = 4\Omega\omega J_x = \Omega\omega J_n, \quad (335)$$

$$M_z = \Omega\omega J_x [\sin 2\psi + \sin 2(\psi + 90^\circ) + \sin 2(\psi + 180^\circ) + \sin 2(\psi + 270^\circ)] = 0.$$

Итак, для всех винтов, у которых число лопастей больше двух,

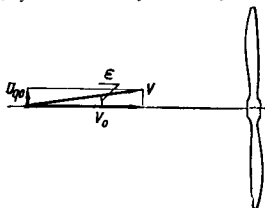
$$M_{y_k} = \text{const}(k > 2) \quad \text{и} \quad M_{z_k} = 0.$$

#### § 4. Влияние косой обдувки на неравномерность хода винта

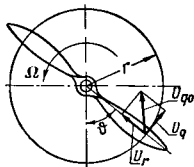
При некоторых режимах полета, как подъем, крутой вираж, угол атаки самолета получается большим и ось винта не совпадает с направлением полета. Диск винта встречает воздух не под прямым углом, а под углом меньшим  $90^\circ$ . Посмотрим, как отразится такая косая обдувка винта на равномерности его хода

Скорость набегающего под некоторым углом  $\epsilon$  по отношению к оси винта потока можно разложить на две составляющие — одну по направлению оси винта  $V_0$  и вторую ей перпендикулярную и лежащую в плоскости симметрии самолета  $U_{q0}$  (фиг. 276). Первая составляющая является обычной осевой скоростью, которая мало отличается от скорости по траектории  $V$ , вторая же составляющая будет видоизменять треугольник скоростей у сечений лопасти в зависимости от положения лопастей при их вращении (фиг. 277). Разложим составляющую  $U_{q0}$  еще на два направления — тангенциальное  $U_q$  и радиальное  $U_r$ . Последней скоростью можно пренебречь,

так как она очень незначительно влияет на величину вызванной винтом скорости  $\omega$ . На фиг 278 представлены получающиеся скорости у сечения радиусе  $r$  лопасти винта. Как видим, косая обдувка изменяет угол атаки сечения. Найдем это изменение угла атаки  $\Delta\alpha$  сечения от косой обдувки, пользуясь общей теорией изолированного элемента лопасти.



Фиг. 276. Схема потока при косой обдувке.



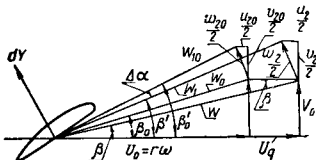
Фиг. 277. Схема добавочных скоростей потока при косой обдувке винта.

Согласно фиг 278 изменение угла атаки  $\Delta\alpha$  при косой обдувке будет

$$\Delta\alpha = \beta'_0 - \beta'$$

или

$$\Delta\alpha = (\beta'_0 - \beta_0) + (\beta_0 - \beta) - (\beta' - \beta).$$



Фиг 278. Скоростные многоугольники у сечения лопасти винта при косой его обдувке

Пользуясь связью между вызванными скоростями далеко за винтом и в плоскости винта согласно теории идеального пропеллера, из соответствующих треугольников (фиг. 278) получим

$$\Delta\alpha = \frac{w_{20}}{2W_0} + \frac{U_q \frac{V_0}{W}}{W_0} - \frac{w_2}{2W}. \quad (336)$$

Подъемную силу элемента лопасти  $dY$  можно определить, исходя из коэффициента подъемной силы  $c_y$  и пользуясь теоремой о количестве движения. Будем иметь при осевой обдувке винта

$$dY_0 = c_{y0} b dr \rho \frac{W_{10}^2}{2} = dm \omega_{20} = 2\pi r dr \rho \left( V_0 + \frac{v_{20}}{2} \right) \omega_{20}, \quad (337)$$



а при кривой обдувке

$$dY = c_y b dr \rho \frac{W_1^2}{2} = 2\pi r dr \rho \left( V_0 + \frac{v_2}{2} \right) \omega_2. \quad (338)$$

Коэффициент подъемной силы  $c_y$  с влиянием кривой обдувки лопасти можно представить так:

$$c_y = c_{y0} + \Delta \alpha \frac{dc_y}{d\alpha}, \quad (339)$$

$$\frac{dc_y}{d\alpha} = p,$$

тогда

$$c_y = c_{y0} (1 + \rho \Delta \alpha).$$

Подставив это выражение в формулу (338), получим

$$dY = c_{y0} (1 + \rho \Delta \alpha) b dr \rho \frac{W_1^2}{2} = 2\pi r dr \rho \left( V_0 + \frac{v_2}{2} \right) \omega_2.$$

Деля последнее равенство на равенство (337), будем иметь

$$\frac{\omega_2}{\omega_{20}} = (1 + \rho \Delta \alpha) \frac{W^2}{W_0^2} N, \quad (340)$$

где

$$N = \frac{V_0 + \frac{v_{20}}{2}}{V_0 + \frac{v_2}{2}}. \quad (341)$$

и  $W$  принято равным  $W_1$ , а  $W_0$  равным  $W_{10}$ . Подставляя значение  $\omega_2$  из уравнения (340) в уравнение (336), решим его относительно  $\Delta \alpha$ :

$$\Delta \alpha = \frac{\frac{U_q V_0}{W W_0} - \frac{\omega_{20}}{2 W_0} \left( \frac{W}{W_0} N - 1 \right)}{1 + \frac{\rho \omega_{20} W N}{2 W_0^2}}. \quad (342)$$

По фиг. 278

$$W_0 = \sqrt{V_0^2 + U_0^2} = R \Omega \sqrt{r^2 + \bar{V}^2},$$

где  $\bar{V} = \frac{\lambda}{\pi} = \frac{V_0}{R \Omega}$ . Так как  $W = W_0 + U_q \cos \beta$ , а  $\cos \beta = \frac{U_0}{W_0}$ ,

то  $\frac{W}{W_0} = 1 + \frac{U_q U_0}{W_0^2}$ .

Согласно фиг. 277

$$U_q = U_{q0} \sin \vartheta = V_0 \operatorname{tg} \varepsilon \sin \vartheta = V_q k, \quad (343)$$

где  $k = \operatorname{tg} \varepsilon \sin \theta$  (344)

Отсюда

$$\frac{W}{W_0} = 1 + \frac{V_0 k \dot{U}_0}{W_0^2} = 1 + \frac{V_0 k r \Omega}{R^2 \Omega^2 (r^2 + \bar{V}^2)} = 1 + k \frac{\bar{V} r}{r^2 + \bar{V}^2}. \quad (345)$$

Теперь определим выражение  $\frac{w_{20}}{2W_0}$ :

$$\frac{w_{20}}{2W_0} = \operatorname{tg}(\beta'_0 - \beta_0) = \frac{\operatorname{tg} \beta'_0 - \operatorname{tg} \beta_0}{1 + \operatorname{tg} \beta'_0 \operatorname{tg} \beta_0}.$$

Из фиг. 278

$$\operatorname{tg} \beta'_0 = \frac{V_0 + \frac{v_{20}}{2}}{U_0 - \frac{u_{20}}{2}}; \quad \operatorname{tg} \beta_0 = \frac{V_0}{U_0}.$$

Подставляем это в предыдущую формулу:

$$\frac{w_{20}}{2W} = \frac{\frac{V_0 + \frac{v_{20}}{2}}{U_0 - \frac{u_{20}}{2}} - \frac{V_0}{U_0}}{1 + \frac{V_0 + \frac{v_{20}}{2}}{U_0 - \frac{u_{20}}{2}} \frac{V_0}{U_0}}.$$

Выражение

$$\frac{U_0 - \frac{u_{20}}{2}}{V_0 + \frac{v_{20}}{2}} \frac{V_0}{U_0} = \eta_{i0}$$

есть индуктивный коэффициент полезного действия элемента лопасти безкосой обдувки. Получим

$$\begin{aligned} \frac{w_{20}}{2W_0} &= \frac{1}{\eta_{i0}} \frac{V_0}{U_0} - \frac{V_0}{U_0} = \frac{1 - \eta_{i0}}{\eta_{i0} \frac{U_0}{V_0} + \frac{V_0}{U_0}} = \frac{1 - \eta_{i0}}{\eta_{i0} \frac{r\Omega}{V_0} + \frac{V_0}{r\Omega}} = \\ &= \frac{1 - \eta_{i0}}{\eta_{i0} \frac{\bar{V}}{r} + \frac{\bar{V}}{r}} = (1 - \eta_{i0}) \frac{\bar{V} r}{\eta_{i0} r^2 + \bar{V}^2}. \end{aligned} \quad (346)$$

Найдем выражения

$$\frac{U_q V_0}{W W_0} = \frac{V_0^2 k}{W W_0} = \frac{V_0^2}{W_0^2} \frac{W_0}{W} k.$$

Равенство (345) можно представить разложением в ряд и ограничиваясь двумя членами:

$$\frac{W_0}{W} = \left( \frac{W}{W_0} \right)^{-1} = \left( 1 + \frac{k \bar{V} \bar{r}}{r^2 + \bar{V}^2} \right)^{-1} \approx 1 - \frac{k \bar{V} \bar{r}}{r^2 + \bar{V}^2}.$$

Тогда

$$\frac{U_q V_0}{W W_0} = \frac{\bar{V}^2 k}{r^2 + \bar{V}^2} \left( 1 - \frac{k \bar{V} \bar{r}}{r^2 + \bar{V}^2} \right).$$

Подставляем полученное выражение, а также (345) и (346) в (342):

$$\Delta \alpha = \frac{\frac{\bar{V}^2 k}{r^2 + \bar{V}^2} \left( 1 - \frac{k \bar{V} \bar{r}}{r^2 + \bar{V}^2} \right) - (1 - \eta_{i0}) \frac{\bar{V} \bar{r}}{\eta_{i0} r^2 + \bar{V}^2} \left[ \left( 1 + \frac{k \bar{V} \bar{r}}{r^2 + \bar{V}^2} \right) N - 1 \right]}{1 + pN (1 - \eta_{i0}) \frac{\bar{V} \bar{r}}{\eta_{i0} r^2 + \bar{V}^2} \left( 1 + \frac{k \bar{V} \bar{r}}{r^2 + \bar{V}^2} \right)}$$

Так как индуктивный коэффициент полезного действия  $\eta_{i0}$  обычно бывает близок к 1, то, полагая  $\eta_{i0} = 1$ , получим приближенное выражение для  $\Delta \alpha$

$$\Delta \alpha = \frac{k \bar{V}^2}{r^2 + \bar{V}^2} \left( 1 - \frac{k \bar{V} \bar{r}}{r^2 + \bar{V}^2} \right)$$

или

$$\Delta \alpha = \operatorname{tg} \varepsilon \sin \vartheta \frac{\bar{V}^2}{r^2 + \bar{V}^2} \left( 1 - \operatorname{tg} \varepsilon \sin \vartheta \frac{\bar{V} \bar{r}}{r^2 + \bar{V}^2} \right). \quad (347)$$

Как видим,  $\Delta \alpha$  на каждом радиусе  $r$  зависит от режима полета  $\bar{V}$ , угла наклона оси винта  $\varepsilon$  и от угла положения лопасти  $\vartheta$ . Следовательно, при определенном режиме полета  $\Delta \alpha$  будет периодически меняться в зависимости от положения лопасти ( $\vartheta$ ) — от значения 0 при  $\vartheta = 0$  и  $180^\circ$ , т. е. когда лопасть находится в плоскости симметрии самолета, до значения

$$\Delta \alpha = \pm \operatorname{tg} \varepsilon \frac{\bar{V}^2}{r^2 + \bar{V}^2} \left( 1 \mp \operatorname{tg} \varepsilon \frac{\bar{V} \bar{r}}{r^2 + \bar{V}^2} \right)$$

при  $\vartheta = 90^\circ$  или  $270^\circ$ , т. е. при положении лопасти перпендикулярно плоскости симметрии самолета (фиг. 277). Приближенно можно принять, что угол  $\beta_0 - \beta$  равен углу  $\beta'_0 - \beta' = \Delta \alpha$  или также, что  $\beta_0 - \beta = \varphi_0 - \varphi = \Delta \alpha$  и, следовательно, можно приближенно принять, что действие косой обдувки подобно тому, что угол установки лопасти меняется с углом поворота лопасти  $\vartheta$  на угол  $\Delta \alpha^*$ .

\* Такое положение весьма лишь приближенно, так как изменение угла установки сечения лопасти по радиусу при повороте лопасти на угол  $\Delta \varphi = \varphi_0 - \varphi$  постоянно, тогда как  $\Delta \alpha$  меняется вдоль лопасти от значения  $\Delta \alpha = \operatorname{tg} \varepsilon$  при  $\bar{r} = 0$  до  $\Delta \alpha = \operatorname{tg} \varepsilon \sin \vartheta \frac{\bar{V}^2}{1 + \bar{V}^2} \left( 1 - \operatorname{tg} \varepsilon \sin \vartheta \frac{\bar{V}}{1 + \bar{V}^2} \right)$  при  $\bar{r} = 1$ .

Угол  $\Delta\alpha$  обычно небольшой — порядка  $1^\circ$ , поэтому можно приближенно считать, что добавочная тяга, получающаяся благодаря добавочному углу атаки, пропорциональна этому углу. Ввиду этого можно построить  $\Delta\alpha$  для разных лопастей винта, которые будут находиться в разных фазах друг относительно друга, и суммировать для всего винта. Обозначим

$$\frac{\sqrt{Vz}}{r^2 + \sqrt{Vz}} \operatorname{tg} \varepsilon = A; \quad \operatorname{tg} \varepsilon^2 \frac{\sqrt{Vz} r}{(r^2 + \sqrt{Vz})^2} = B,$$

тогда формула (347) примет такой вид:

$$\Delta\alpha = A \sin \vartheta - B \sin^2 \vartheta. \quad (348)$$

Эта формула для однолопастного винта. Для двухлопастного получим

$$\Delta\alpha_2 = A [\sin \vartheta + \sin (\vartheta + 180)] - B [\sin^2 \vartheta + \sin^2 (\vartheta + 180^\circ)]$$

или, раскрывая  $\sin$ ,

$$\Delta\alpha_2 = -2B \sin^2 \vartheta. \quad (349)$$

Для трехлопастного винта

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_3 = A [\sin \vartheta + \sin (\vartheta + 120) + \sin (\vartheta + 240)] - \\ - B [\sin^2 \vartheta + \sin^2 (\vartheta + 120) + \sin^2 (\vartheta + 240)] \end{aligned}$$

или, раскрывая  $\sin$ ,

$$\Delta\alpha_3 = 0,365A (\cos \vartheta - \sin \vartheta) - B (\sin^2 \vartheta + 1). \quad (350)$$

Для четырехлопастного винта

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_4 = A [\sin \vartheta + \sin (\vartheta + 90) + \sin (\vartheta + 180) + \sin (\vartheta + 270)] - \\ - B [\sin^2 \vartheta + \sin^2 (\vartheta + 90) + \sin^2 (\vartheta + 180) + \sin^2 (\vartheta + 270)] \end{aligned}$$

или, раскрывая  $\sin$ ,

$$\Delta\alpha_4 = -2B. \quad (351)$$

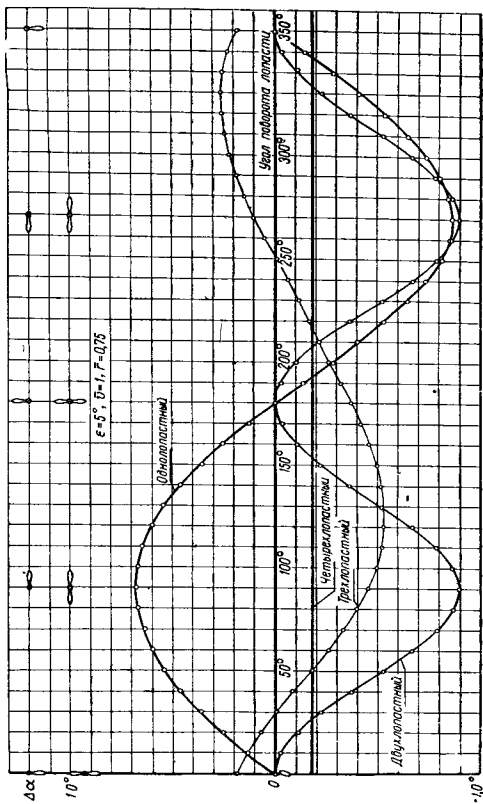
На фиг. 279 представлены кривые, полученные согласно формулам (348), (349), (350) и (351). Как видим, для однолопастного винта частота колебаний равна числу оборотов винта, для двухлопастного винта частота вдвое больше числа оборотов, для трехлопастного винта частота снова равна числу оборотов, а у четырехлопастного винта вообще колебаний от косой обдувки нет. У всех этих колебаний есть одна особенность — они не симметричны относительно оси абсцисс. Определим среднюю величину  $\Delta\alpha$ . Для этого площадь кривой  $\Delta\alpha = f(\vartheta)$  приравняем величине  $\Delta\alpha_{\text{ср}} \cdot 2\pi$ .

Отсюда для однолопастного винта

$$\Delta\alpha_{\text{ср1}} = \frac{1}{2\pi} \left[ A \int_0^{2\pi} \sin \vartheta d\vartheta - B \int_0^{2\pi} \sin^2 \vartheta d\vartheta \right] = -\frac{B}{2}.$$

Для двухлопастного винта

$$\Delta\alpha_{\text{ср2}} = -\frac{B}{\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \vartheta d\vartheta = -B = 2\Delta\alpha_{\text{ср1}}.$$



Фиг. 279 Колебание угла атаки лопастей винта при кривой обдувке.

Для трехлопастного винта

$$\Delta\alpha_{ср3} = \frac{1}{2\pi} \left[ 0,365A \int_0^{2\pi} (\cos \vartheta - \sin \vartheta) d\vartheta - B \int_0^{2\pi} (\sin^2 \vartheta + 1) d\vartheta \right] =$$

$$= -\frac{3}{2} B = 3\Delta\alpha_{ср1}.$$

Для четырехлопастного винта

$$\Delta\alpha_{ср4} = -2B = 4\Delta\alpha_{ср1}.$$

Как видим, всюду получается отрицательный средний угол  $\Delta\alpha$ . Это значит, что на нисходящей лопасти тяга будет меньше, чем на восходящей, и таким образом будет создаваться момент, который поворачивает самолет в сторону нисходящей лопасти. Следовательно, при косой обдувке винта создается момент, поворачивающий самолет около нормальной оси в сторону нисходящих лопастей. При этом частота колебаний, создаваемых на моторной установке двухлопастным винтом, равна двойному числу оборотов винта, а трехлопастным винтом — равна числу оборотов винта. У четырехлопастных винтов колебания отсутствуют и момент постоянный.

## Глава XIX

### РЕГУЛИРОВАНИЕ ВИНТА

#### § 1. Статика регулятора

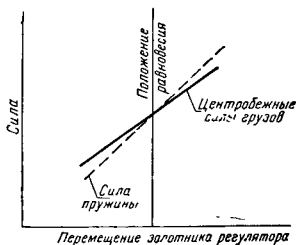
Как мы видели в гл. III, автоматическое управление винтом осуществляется посредством специального устройства — регулятора, который реагирует на изменение числа оборотов двигателя, и с помощью «сервомотора» — насоса, находящегося в регуляторе, и поршня винта поворачивает лопасти винта. Так как сам регулятор действует на винт через сервомотор, то такая схема регулирования называется схемой «непрямого действия». При наших кратких теоретических выводах для простоты принимаем, что регулятор работает по схеме «прямого действия», т. е. регулятор действует непосредственно на регулируемый объект, и запаздывания действия сервомотора не будет.

От регулятора требуются два качества: чувствительность и малая инертность.

*Чувствительность* измеряется величиной силы или момента, которые требуются, чтобы вывести систему из равновесия. *Инертность* регулятора измеряется временем, потребным для того, чтобы вернуть его в состояние равновесия, после того как он был выведен из него.

В каждом центробежном регуляторе имеются грузы, центробежная сила которых уравнивается натяжением пружины. Для устойчивой работы регулятора нужно, чтобы характеристика пружины при данной скорости вращения была такова, чтобы при отходе грузов от оси их вращения сила, возбуждаемая пружинной силой, была больше силы, вызываемой центробежной силой.

жиной, была больше центробежной силы грузов и, наоборот, при приближении грузов к оси сила пружины должна быть меньше, чем центробежные силы грузов. Разность между этими силами определяет собой восстанавливающую силу регулятора. На фиг 280 показано соотношение между этими двумя силами. Зависимость центробежных сил грузов от их отклонения опреде-



Фиг 280. Характеристики центробежных грузов и пружины регулятора.

ляется значение, ибо она определяет величину восстанавливающих сил. Если эта разница в наклонах очень велика, то восстанавливающие силы велики, и это может повести к уменьшению чувствительности регулятора; наоборот, если эти силы малы, то устойчивость регулятора может быть недостаточна.

## § 2. Динамика регулятора

Рассмотрение восстанавливающих сил ведет к исследованию регулятора в статическом состоянии; а так как и регулятор и вся регулируемая система имеет массу, то вся система может совершать колебания, рассмотрение которых ведет к исследованию динамики регулятора. Под влиянием действующих сил система будет совершать колебания — затухающие, незатухающие или увеличивающиеся. Так как колебания системы винт — регулятор имеют большое эксплуатационное значение, то приходится обычно исследовать динамическую устойчивость системы.

При непосредственном воздействии регулятора на винт, при допущении, что сервомотор безинертен, система винт — регулятор будет состоять из двух частей — винта и регулятора. Для каждого из них следует составить дифференциальное уравнение движения. Сначала предположим для простоты, что мы имеем «идеальный регулятор», т. е. такой регулятор, который сам не имеет инерции, действует на винт мгновенно и не имеет ни трения, ни демпфирования в своем механизме

ляется линейно; зависимость же силы пружины, вообще говоря, есть функция нелинейная. Однако при небольших отклонениях без большой ошибки и ее можно принять линейной. Таким образом мы будем иметь две пересекающиеся прямые, точка пересечения которых соответствует положению равновесия.

Как видно по фиг. 280, разница в наклонах прямых, определяющих зависимость силы от отклонения грузов и пружины, имеет большое

Пусть  $L$  — момент, возмущающий регулятор и исходящий от винта, когда число оборотов винта отклонилось от равновесного. Изменение угловой скорости вращения винта при этом будет  $\Delta\Omega$ ,  $J$  — момент инерции винта (полярный — относительно оси), и  $s_v$  — чувствительность регулятора, т. е. момент регулятора, отнесенный к единице отклонения угловой скорости винта. Сначала предположим, что винт демпфирования не имеет. Так как момент от регулятора при этом будет  $s_v\Delta\Omega$ , то, суммируя все моменты, получим дифференциальное уравнение регулируемой системы при идеальном регуляторе

$$J\Delta\Omega' + s_v\Delta\Omega = L. \quad (352)$$

Величина

$$\frac{L}{s_v} = \Delta\Omega_{\text{ст}} \quad (353)$$

есть статическое отклонение скорости вращения. Кроме того, обозначим

$$\frac{J}{s_v} = T. \quad (354)$$

Размерность этой величины есть время, поэтому мы назовем ее «характеристическим временем». Таким образом уравнение (352) преобразуется так:

$$\Delta\Omega' + \frac{\Delta\Omega}{T} = \frac{\Delta\Omega_{\text{ст}}}{T}. \quad (355)$$

Это дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами. Общее решение без правой части будет

$$\Delta\Omega = Ce^{-\frac{t}{T}},$$

а частное решение с правой частью будет  $\Delta\Omega_{\text{ст}}$ , тогда общее решение с правой частью будет

$$\Delta\Omega = Ce^{-\frac{t}{T}} + \Delta\Omega_{\text{ст}}.$$

Предположим, что в начальный момент  $t=0$  отклонение скорости вращения, т. е.  $\Delta\Omega = 0$ , тогда

$$C = -\Delta\Omega_{\text{ст}}$$

и решение представится в таком виде:

$$\Delta\Omega = \Delta\Omega_{\text{ст}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (356)$$



Кривая этого уравнения представлена на фиг. 281. Таким образом при «идеальном регуляторе» винт не совершает колебаний, а асимптотически приближается к положению равновесия.

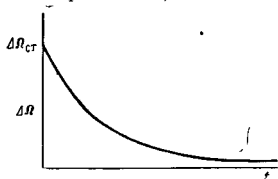
Предположим, что винт не имеет регулятора, тогда  $s_v = 0$  и уравнение (352) примет вид

$$J\Delta\Omega' = L.$$

Решение его будет

$$\Delta\Omega = \frac{L}{J}t. \quad (357)$$

Это означает, что винт будет непрерывно отклоняться от положения равновесия, т. е. *винт без регулятора неустойчив*.



Фиг. 281. Переход в положение равновесия при «идеальном регуляторе».

Предположим теперь, что винт имеет демпфирование (которое практически всегда имеется в виде трения в механизме или вязкости в системе винта), а регулятор «идеальный». Обозначим коэффициент демпфирования винта через  $c_v$ , тогда уравнение движения представится в таком виде

$$J\Delta\Omega' + c_v\Delta\Omega + s_v\Delta\Omega = L \quad (358)$$

или

$$\Delta\Omega' + \Delta\Omega \left( \frac{c_v}{J} + \frac{s_v}{J} \right) = \frac{L}{J}.$$

Решение этого уравнения будет

$$\Delta\Omega = \Delta\Omega_{ст} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \frac{T_1}{T}, \quad (359)$$

где

$$T_1 = \frac{T}{\frac{c_v}{s_v} + 1}.$$

Уравнение (359) такого же типа, как и (356); винт также не будет колебаться и лишь его передвижение будет замедленным.

Из уравнений (356) и (359) видно, что *винт сам колебания вызвать не может*; колебания, следовательно, могут быть вызваны или регулятором или двигателем.

Рассмотрим теперь движение неидеального регулятора. Пусть  $x$  — перемещение штока регулятора,  $m$  — масса передвигаемой части регулятора,  $c_p$  — коэффициент демпфирования и

$K$  — характеристика пружины регулятора; тогда дифференциальное уравнение движения штока регулятора будет<sup>1</sup>

$$mx'' + c_p x' + Kx = 0. \quad (360)$$

Предположим, что пружины нет, тогда

$$x'' + \frac{c_p}{m} x' = 0.$$

Корни характеристического уравнения будут 0 и  $-\frac{c_p}{m}$ , а решение

$$x = Ce^{-\frac{c_p}{m}t}. \quad (361)$$

Это не колебательное движение и регулятор без пружины неустойчив. Если пружина есть, т. е. имеет место уравнение (360), то корни характеристического уравнения будут

$$-\frac{c_p}{2m} \pm \sqrt{\frac{c_p^2}{4m^2} - \frac{K}{m}}. \text{ Оба корня будут действительны, если } \frac{c_p^2}{4m^2} > \frac{K}{m}.$$

Но  $\frac{K}{m}$  есть квадрат частоты собственных колебаний регулятора  $p_0$  и, следовательно, в этом случае  $c_p > 2mp_0$  и колебаний не будет.

Если

$$c_p < 2mp_0,$$

то корни будут мнимые и регулятор будет совершать колебания. Назовем  $c_{p \text{ крит}} = 2mp_0$  критическим демпфированием регулятора, при котором начинаются колебания системы. Тогда предыдущее неравенство примет вид

$$c_p < c_{p \text{ крит}}.$$

Рассмотрим теперь совместно движение системы винт—регулятор, причем примем.

$C_1$  — момент регулятора, действующий на единицу его перемещения,

$C_2$  — сила, стремящаяся передвинуть регулятор на единицу отклонения угловой скорости винта,

$K$  — статическая устойчивость регулятора, т. е. сила в регуляторе, на единицу перемещения штока. Так как  $Kx$  есть

<sup>1</sup> См. С. П. Тимошенко, Теория колебаний в инженерном деле Москва, Ленинград, 1932.

сила на штоке регулятора, то, обозначив через  $M_p$  момент на регуляторе, воздействующий на лопасть винта, получим

$$C_1 = \frac{M_p}{x}; \quad C_2 = \frac{Kx}{\Delta\Omega}; \quad M_p = \frac{C_1 C_2 \Delta\Omega}{K}.$$

Чувствительность регулятора  $s_v = \frac{M_p}{\Delta\Omega}$  или после подстановки

$$s_v = \frac{C_1 C_2}{K} = \frac{C_1 x}{\Delta\Omega}. \quad (362)$$

Так как регулятор связан с винтом, то возмущающей силой у него будет  $C_2 \Delta\Omega$  и уравнение движения его будет

$$m x'' + c_p x' + Kx = C_2 \Delta\Omega. \quad (363)$$

Уравнение движения винта представим в следующем виде, подставив в уравнение (358) вместо  $s_v$  его значение (362):

$$J \Delta\Omega' + c_n \Delta\Omega + C_1 x = L. \quad (364)$$

Из уравнения (364) получаем

$$x = \frac{L}{C_1} - \frac{J \Delta\Omega'}{C_1} - \frac{c_n \Delta\Omega}{C_1}.$$

Дифференцируем это выражение по  $t$  два раза:

$$x' = -\frac{J}{C_1} \Delta\Omega'' - \frac{c_n}{C_1} \Delta\Omega',$$

$$x'' = -\frac{J}{C_1} \Delta\Omega''' - \frac{c_n}{C_1} \Delta\Omega''.$$

Подставляем эти выражения в уравнение (363):

$$\Delta\Omega''' + \left(\frac{c_n}{J} + \frac{c_p}{m}\right) \Delta\Omega'' + \left(\frac{c_n c_p}{mJ} + \frac{K}{m}\right) \Delta\Omega' + \left(\frac{c_n}{J} \frac{K}{m} + \frac{C_2 C_1}{mJ}\right) \Delta\Omega = \frac{L}{J} \frac{K}{m}.$$

Обозначим

$$A_0 = \frac{c_n}{J} p^2 + \frac{p^2}{J} s_v; \quad A_1 = \frac{c_n c_p}{mJ} + p^2; \quad A_2 = \frac{c_n}{J} + \frac{c_p}{m}.$$

Тогда

$$\Delta\Omega''' + A_2 \Delta\Omega'' + A_1 \Delta\Omega' + A_0 \Delta\Omega = \frac{L}{J} p^2. \quad (365)$$

Это — дифференциальное уравнение движения винта под влиянием регулятора. Характеристическое уравнение его будет иметь вид

$$y^3 + A_2 y^2 + A_1 y + A_0 = 0.$$

Если корни этого уравнения обозначим  $y_1, y_2, y_3$ , то это уравнение можно представить так:

$$(y - y_1)(y - y_2)(y - y_3) = 0.$$

Раскрывая его и сравнивая коэффициенты при неизвестном  $s$  предыдущим, получим

$$A_2 = -(y_1 + y_2 + y_3),$$

$$A_1 = y_1 y_2 + y_1 y_3 + y_2 y_3,$$

$$A_0 = -y_1 y_2 y_3.$$

Один из трех корней кубического уравнения должен быть действительным, а два других могут быть как действительными, так и мнимыми, но обязательно сопряженными. Таким образом получим

$$y_1 = a_1; \quad y_2 = a_2 + ib_2; \quad y_3 = a_2 - ib_2,$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= -(a_1 + 2a_2), \\ A_1 &= 2a_1 a_2 + a_2^2 + b_2^2, \\ A_0 &= -a_1(a_2^2 + b_2^2). \end{aligned} \right\} \quad (366)$$

Как известно из теории колебаний, мнимая часть корня характеристического уравнения определяет собой частоту, а действительная — быстроту затухания. Следовательно, система будет динамически устойчива, если действительная часть корней будет отрицательной, т. е. будет иметь место затухание колебаний. В нашем случае система будет устойчива, если  $a_1$  и  $a_2$  отрицательны. Из выражений (366) видно, что тогда коэффициенты  $A_0, A_1$  и  $A_2$  должны быть положительны. Если хотя бы  $a_2$  отрицательно, то система будет неустойчива, причем  $a_2 = 0$  соответствует в этом случае границе неустойчивости. Тогда, полагая  $a_2 = 0$  в выражениях (366), получим

$$A_2 = -a_1; \quad A_1 = b_2^2; \quad A_0 = -a_1 b_2^2$$

или

$$A_0 = A_1 A_2.$$

Это равенство выполняется на границе устойчивости. Для того чтобы решить, в какое неравенство оно обратится в случае

устойчивости, рассмотрим простейшее заведомо устойчивое движение. Пусть  $|a| = |a_2| = |b_2| = 1$ , тогда по уравнению (366)  $A_2 = 3$ ;  $A_1 = 4$  и  $A_0 = 2$  и, следовательно,

$$A_0 < A_1 A_2. \quad (367)$$

Это и есть признак устойчивости системы. Таким образом признак динамической устойчивости системы, описываемой уравнением (365), заключается в том, чтобы все коэффициенты  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  были положительными и выполнялось неравенство (367).

Для нашего случая, подставляя вместо коэффициентов их значения, получим неравенство

$$\frac{c_v}{J} p^2 + \frac{s_v}{J} p^2 < \left( \frac{c_v}{J} + \frac{c_p}{m} \right) \left( \frac{c_v c_p}{mJ} + p^2 \right),$$

или, открывая скобки и делая соответствующие приведения,

$$\frac{c_v^2 c_p}{mJ^2} + \frac{c_v c_p^2}{m^2 J} + \frac{c_v}{J} p^2 + \frac{p^2 c_p}{m} > \frac{c_v}{J} p^2 + \frac{s_v}{J} p^2$$

или

$$\frac{c_v^2 c_p}{mJ^2} + \frac{c_v c_p^2}{m^2 J} + \frac{c_p}{m} p^2 > \frac{s_v}{J} p^2.$$

Так как величина  $\frac{m}{p^2}$  положительна, то, помножив на нее это неравенство, получим

$$\frac{s_v}{J} m < \left( \frac{c_v^2}{J^2} + \frac{c_v c_p}{mJ} \right) \frac{c_p}{p^2} + c_p. \quad (368)$$

Это неравенство и определяет собой устойчивость системы винт—регулятор.

Если в винте нет демпфирования, то  $c_v = 0$  и

$$\frac{s_v}{J} m < c_p.$$

Если в регуляторе нет демпфирования, то  $c_p = 0$  и

$$\frac{s_v}{J} m < 0,$$

т. е. система неустойчива, так как  $s_v$ ,  $J$  и  $m$  положительные величины.

Таким образом из неравенства (368) можно сделать следующие общие выводы по значению параметров регулятора и винта. 1. Винт без регулятора неустойчив.

2. При отсутствии демпфирования винта устойчивость системы может быть соблюдена.

3. При отсутствии демпфирования у регулятора система неустойчива.

4. При демпфировании винта устойчивость будет обеспечиваться при меньшем демпфировании регулятора.

5. Устойчивость системы уменьшается при увеличении инерции регулятора и его чувствительности.

6. Устойчивость системы увеличивается при увеличении инерции регулируемой системы (большом моменте инерции винта) и демпфировании регулятора.

## Глава XX

### ШУМ ВИНТА

#### § 1. Физические характеристики звуков

Звуком мы называем то физиологическое ощущение, которое непосредственно воспринимается нашим ухом. Звук образуется в воздухе тогда, когда в последнем происходит какое-нибудь возмущение, например, колеблется какое-либо тело, которое создает в окружающем его воздухе попеременно сжатие и разрежение. От места возмущения будут разбегаться во все стороны звуковые волны со скоростью, величина которой зависит только от температуры воздуха. Звуки могут быть кратковременные, например, взрыв, выстрел и т. п., или долговременные — звук от винта, звук человеческого голоса и т. д.; нас будут интересовать только долговременные звуки. Такие звуки состоят из переменного повторяющихся сжатий и разрежений много раз в секунду. Простейший звук состоит из плавно нарастающего давления, затем плавно переходящего в разрежение. Такой звук называется чистым и он характеризуется синусоидальным изменением давления по времени в данной точке пространства. Время, по истечении которого давление достигает исходного значения, называется периодом  $T$ , а частота  $N = \frac{1}{T}$ . Частота измеряется в герцах, что означает число колебаний в секунду.

Не все колебания могут быть восприняты нашим ухом. Звуковой частотой называется та частота, которая воспринимается нашим ухом. Ухо может воспринимать частоты от 15 до 20 000 гц. Звуки с большими частотами мы называем более высокими. Из двух чистых звуков одинаковой высоты наше ухо воспринимает как более громкий тот, избыточное давление или разрежение которого больше. Под избыточным давлением или разрежением подразумевается то увеличение и уменьшение давления, которое происходит в данном месте наблюдения, когда через него проходит звуковая волна. Наибольшее значение давления или разрежения называется амплитудой колеба-

ния. Величина амплитуды звукового колебания измеряется в барах. Бар равен одной миллионной нормального атмосферного давления, или приблизительно давлению одного миллиграмма на квадратный сантиметр.

Любой звук в природе можно рассматривать как сложный звук, состоящий из простых чистых звуков разной высоты и амплитуды. Но разные звуки различаются между собой по характеру, — есть звуки приятные, музыкальные, а есть резкие, неприятные или даже такие, в которых трудно различить высоту, это так называемые шумы. Оказывается, что в музыкальных звуках спектр звука, т. е. все его простые составляющие, состоят из основного тона и других тонов, различающихся между собой по высоте на величину, кратную основному тону. Это означает, что если частоту основного тона принять за единицу, то остальные составляющие будут иметь частоты, кратные ряду целых чисел 2, 3, 4 и т. д. Эти кратные тоны называются гармониками. Если звук имеет также и дробные гармоники, то такой звук будет неровный — с биениями.

Высоту музыкального звука наше ухо воспринимает по высоте основного тона, и наличие же гармоник воспринимается как тембр звука. Амплитуды гармоник тем меньше, чем выше соответствующая гармоника, однако чем больше амплитуда гармоник, тем резче кажется звук. Что касается шума, то он имеет настолько много составляющих различных кратностей, что колебания получаются очень неправильными и поэтому трудно говорить об определенной частоте шума. Таким образом шум в отличие от музыкального звука представляет собой беспорядочное нагромождение простых звуков с очень близкими одна к другой частотами.

Сила звука измеряется тем количеством энергии, которое проносит звуковая волна к воспринимающему аппарату через единицу поверхности, нормальной направлению распространения звука. Сила звука пропорциональна квадрату амплитуды; следовательно, если амплитуда  $a$  измеряется в барах, то сила звука  $I$  будет равна

$$I = \frac{a^2}{84} \text{ эргов в сек. на кв. см.}$$

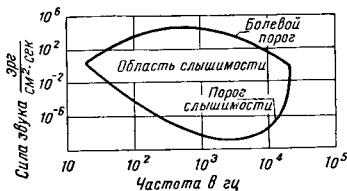
Можно выражать также силу звука и числом ватт на кв. см., тогда

$$I = \frac{a^2}{84 \cdot 10^7} \text{ ватт на кв. см.}$$

Выше было указано, что человеческое ухо воспринимает ощущение звука только в определенном диапазоне частот. С другой стороны, ухо улавливает на каждой частоте звук только определенной силы. Эта минимальная сила звука называется *порогом слышимости*. Максимальная величина силы звука, при пре-

вышении которой уже возникает боль, называется порогом *болевого ощущения*. Если начертить кривую порога слышимости и болевого порога, т. е. соотношение между силой звука и частотой для обоих этих порогов, то получится некоторая замкнутая кривая, внутри которой и будет лежать *область слышимости* (фиг. 282).

По психофизическому закону Вебера—Фехнера прирост силы ощущения пропорционален логарифму отношению энергий двух сравниваемых раздражений. Поэтому для измерения силы звука удобнее принять другие единицы измерений. Если  $I$  — сила дан-



Фиг. 282. Диапазон слышимости звука человеческого ухом.

ного звука, а  $I_0$  сила того же звука на пороге слышимости, то сила ощущения, т. е., иными словами, уровень силы звука, отсчитываемый от порога слышимости, будет выражаться так:

$$L = k \lg \frac{I}{I_0}.$$

Если  $k=1$ , то *уровень силы звука* будет выражаться в *беллах*. Если же принять величину в 10 раз меньшую — так называемый *децибелл*, то получим

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ децибеллов.}$$

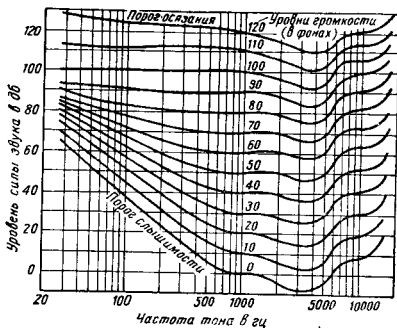
Так как наше ухо по-разному воспринимает силу звука в зависимости от частоты, то следует различать силу звука и *громкость звука*.

Единицы, измеряющие уровень громкости, называются *фонами*. На фиг. 283 даны кривые, при помощи которых можно переводить децибеллы в фонны и обратно. По фиг. 283 видно, что при частоте 1000 гц фонны и децибеллы совпадают.

Следует еще упомянуть об одном важном свойстве нашего уха воспринимать звуки. Если имеются два звука разной силы, то физические приборы, определяющие силу звука, отметят



каждый звук и его силу. Ухо же, восприняв ощущение более сильного звука, слабый может совсем не заметить. Так, например, если более сильный шум возбуждает винт и менее силь-



Фиг. 283. Перевод децибелл в фоны.

ный — выхлоп двигателя, то последний не будет заметен нашему уху. Сильный шум совершенно маскирует слабый шум, если первый громче второго на 12—15 фон.

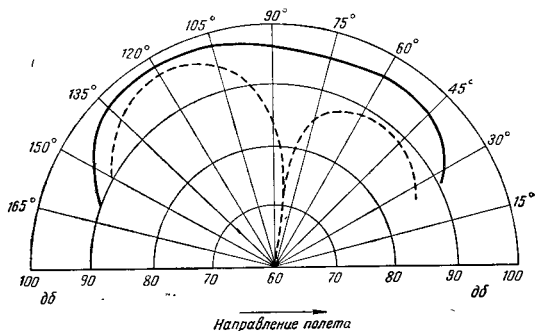
## § 2. Происхождение шума винта

Шум винта происходит от нескольких причин. Рассматривая каждую из этих причин, т. е. разлагая основной шум на его составляющие, будем каждую из составляющих характеризовать, во-первых, направленностью, а во-вторых, частотой.

Опыт и теоретические соображения показывают, что шум винта происходит главным образом от действия периодического изменения давления при прохождении лопастей и от срывающихся с лопастей вихрей. Отсюда шум винта составляется из шума вращения и шума вихрей.

До наблюдателя, стоящего в стороне от винта, будут доходить импульсы, вызванные прохождением каждой лопасти, возмущающей воздух. Эти возмущения происходят за один оборот винта столько раз, сколько лопастей имеет винт. Следовательно, частота шума вращения будет  $n \cdot k$ . Шум вращения можно в свою очередь расчленить еще на две части — шум за счет утолщения лопасти и шум от тяги. Шум от утолщения можно представить следующим образом. Предположим, что винт имеет лопасти, сделанные так, что они не имеют закрутки и установлены под углом около  $0^\circ$ . Так как в сечении лопасть имеет определенной

толщины профиль, то такой вращающийся винт будет раздвигать набегающей лопастью воздух и создавать этим периодическое возмущение, которое и создаст звук вращения, зависящий от утолщения лопасти. Так как шум вращения имеет достаточно определенную частоту, то об этом шуме можно говорить как о звуке определенного тембра, а следовательно, у него будут существовать гармоники. У звука вращения можно рассмотреть лишь две первые гармоники (основной тои и две высшие кратные частоты), остальные значительно слабее и их можно не



Фиг. 284 Векторная диаграмма силы шума, 1-я гармоника. Сплошная кривая — полный шум вращения, пунктирная — шум тяги.

принимать во внимание. Сила звука возрастающих гармоник уменьшается, а направленность несколько изменяется, хотя и незначительно. Для наглядного представления о направленности звука строят векторные диаграммы (фиг. 284). Наибольшая сила звука утолщения находится в области углов 60—90°. На ось винта звук утолщения совсем пропадает.

Шум тяги обуславливается наличием тяги и, следовательно, некоторой подъемной силой лопасти, при которой и получается разность давлений на верхней и нижней сторонах дужки лопасти. Шум тяги имеет несколько иную направленность, чем шум утолщения. Кроме ослабления шума по оси винта, имеется еще на всех гармониках ослабление в направлении около 80°. Наиболее сильное излучение получается в направлении 120° и несколько меньшее в направлении 55°.

Шум вихрей образуется за счет отрывания с лопастей вихрей. Как известно, с пластинки, поставленной нормально потоку, будут периодически отрываться вихри, располагающиеся в шах-

матном порядке. Частота звука, вызываемого таким периодическим отрывом вихрей от пластинки, выражается формулой

$$p = \frac{W}{6b},$$

где  $W$  — скорость потока в  $м/сек$ ,  $b$  — ширина пластинки в  $м$ . Если эта пластинка или крыло стоит под некоторым углом, меньшим  $90^\circ$ , то под  $b$  следует подразумевать проекцию ширины на направление, перпендикулярное направлению потока, тогда

$$p = \frac{W}{6b \sin \alpha},$$

где  $\alpha$  — угол атаки лопасти винта. Так как вдоль лопасти скорость набегающего потока изменяется, то следует ожидать, что на разных сечениях лопасти будут возбуждаться и разной высоты звуки. Чем дальше от оси вращения винта, тем звук вихрей будет выше. Следовательно, общий вихревой звук винта представляет собой сложный комплекс звуков разной частоты. Поэтому в отличие от звука вращения, который имеет до известной степени музыкальный тон, звук вихрей является шумом. Происходит это не только от того, что, как мы видели, он сложен, но и от того, что вихреобразование на лопастях неправильное, неустойчивое и интенсивность вихрей неравномерная. Так как можно считать, что наиболее интенсивные вихри срываются примерно на радиусе  $0,75 R$ , то наиболее интенсивный звук вихрей будет иметь частоту

$$p = \frac{\sqrt{V^2 + (2\pi n_s 0,75R)^2}}{6b \sin \alpha}.$$

Если взять винт диаметром  $3,2 м$ , скорость полета  $120 м/сек$ , ширину лопасти на  $0,75 R$  равную  $0,110 м$ , число оборотов  $1600$  в минуту и угол атаки  $5^\circ$ , то частота будет

$$p = \frac{\sqrt{200^2 + 120^2}}{6 \cdot 0,11 \sin 5^\circ} = 4\,100 \text{ гц.}$$

Кроме звука вращения и вихрей, иногда бывает еще звук от вибрации лопастей. Однако, как правило, лопасти винта не должны вибрировать и этого звука не должно существовать. В редких случаях звук от вибрации лопастей может быть достаточно сильным. Частота его небольшая — порядка нескольких десятков герц.

Что касается ослабления звука с расстоянием, то опыты показали, что уровень силы звука от винта изменяется обратно пропорционально расстоянию в степени, немного меньшей, чем 2, — около 1,7.

### § 3. Снижение шума винта

Как было выше упомянуто, существует порог болевого ощущения звука. Следовательно, громкие звуки и шумы вызывают у человека болевые ощущения. Так как экипажу и пассажирам приходится иногда долгое время находиться на летящем самолете, то вполне естественно должно быть поставлено требование о возможном снижении громкости шумов на самолете и, в частности, о снижении шума винта.

Громкие шумы весьма неблагоприятно воздействуют физиологически на человека — скорее наступает утомление, притупляется внимание и т. д. Поэтому конструктору винтов всегда надо иметь в виду шум, производимый винтом, и по возможности конструктивными мероприятиями его снизить.

Как мы видели, составляющая звука вращения — звук утолщения тем меньше, чем тоньше лопасть винта. Поэтому с точки зрения уменьшения этого шума лопасти винта выгодно делать тоньше. Как указано в гл. XII, и с точки зрения аэродинамической выгоднее делать лопасти тоньше.

Большое влияние на силу звука утолщения оказывает скорость конца лопасти, — чем больше эта скорость, тем сильнее звук.

В свое время на четырехмоторном самолете ТБ-3 вначале были установлены безредукторные двигатели М-34 и винты диаметром 3,2 м, так что окружная скорость конца лопасти была 320 м/сек, а полная скорость конца лопасти 325 м/сек, т. е. близка скорости звука. Эти винты издавали очень сильный шум. Когда на ту же машину были поставлены редукторные двигатели с винтами диаметром 4,4 м и окружной скоростью конца лопасти 250 м/сек, то шум значительно снизился. В первом случае он был для летчика почти невыносимым, а во втором — вполне терпимым.

Звук тяги зависит от нагрузки на лопасть и при одинаковых других условиях, если нагрузку на лопасть тягой снизить, то шум должен уменьшиться. Это снижение нагрузки может быть сделано уширением лопастей или увеличением их числа. В самолете ТБ-3 на редукторные двигатели были впоследствии установлены четырехлопастные винты диаметром 4,1 м, у которых звук еще уменьшился по сравнению с двухлопастными диаметром 4,4 м. Это уменьшение произошло как за счет уменьшения концевой скорости, так и за счет увеличения числа лопастей и снижения нагрузки.

Вихревой шум, как мы видели, имеет очень большую частоту. Как известно, изолировать звук проще высокой частоты, чем низкой. Если самолет летит на сравнительно большой высоте, то высокие частоты его поглощаются атмосферой, а пропускается полоса частот от 100 до 400 гц. Поэтому с земли звук вихрей почти не будет слышен.

Таким образом для ослабления звука конструктор винта всегда должен иметь в виду, что с точки зрения шумности винта желательно уменьшать окружную скорость, толщину лопасти и нагрузку на лопасть. Что касается звука вихрей, то уменьшить его влияние можно лишь хорошей звукоизоляцией кабины.

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОИЗВОДСТВА ВИНТОВ***Глава XXI***КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЛОПАСТЕЙ  
И ВТУЛОК ВИНТОВ****§ 1. Основные принципы производства винтов**

Винт является точным механизмом, в котором должна быть соблюдена не только геометрическая, но и весовая симметрия. Детали винта при его работе сильно нагружены статическими и динамическими нагрузками. Все это налагает повышенные требования к производству винтов. Каждая деталь винта должна быть взаимозаменяема как геометрически, так и в весовом отношении. Как указано в гл. XXII, аэродинамическое уравновешивание винта накладывает большие ограничения в допусках лопастей, а это требует весьма тщательного изготовления лопастей. Первое правило производственника — это в точности соблюдать те допуски, которые проставлены на чертеже, причем их надо соблюдать так, чтобы в деталях получались не крайние величины допусков, а средние их величины, т. е. чтобы наименее вероятная величина размера детали была близка к номиналу. Если мы говорим, что такая-то деталь должна иметь точный размер, или какая-либо ось должна быть перпендикулярна такой-то линии, то это значит, что наименее вероятное значение размера должно быть близко к номиналу и только в исключительных, редких случаях идти по границам допусков и во всяком случае не выходить из их пределов. То же самое относится и к соблюдению углов наклона сечений лопастей.

Взаимозаменяемость не только геометрическая, но и весовая всех деталей винта должна являться непреложным законом. Всегда нужно помнить об этом при разработке технологии производства винтов. Часть ответственности в достижении весовой взаимозаменяемости ложится также и на заводы, поставляющие заготовки; необходимо иметь материал совершенно однородный. Поэтому обычно предпочитают делать детали не из литья, а из штамповки, если же из литья, то полученного под давлением или центробежным путем.

Большое значение в эксплуатации имеет долговечность работы винта, которая характеризуется временем его работы на двигателе до ремонта. В эксплуатационной практике это время называют «ресурсом» винта. Обычно долговечность винта определяется качеством его производства. Тщательное изготовление винта увеличивает его долговечность, а следовательно, уменьшает стоимость часа его работы.

Не нужно смешивать указанную долговечность работы винта с общей его долговечностью, которая составляется из суммы времени, составляемой из нескольких промежутков между ремонтами. В практике эксплуатации были случаи общей наработки винтов свыше 13 000 час.

В настоящей главе мы рассмотрим подробно уравнивание винтов и лопастей и лишь кратко остановимся на процессах изготовления лопастей и втулок.

## § 2. Изготовление деревянных моноблочных винтов

Деревянные моноблочные винты по конструкции являются наиболее простыми и их производство также очень просто. Квалифицированный столяр, имея обычный набор столярных инструментов, может изготовить такой винт. На заре авиации деревянные винты строились столярными мастерскими.

Моноблочные винты можно изготавливать из следующих пород дерева: красное дерево, американский орех (гикори), ясень, дуб, бук, лиственница, сосна и т. п. В последнее время применяется лишь сосна и прессованная древесина. В поделку идут доски шириной от 100 мм и толщиной 20—25 мм. Материал предварительно высушивают в сушилках, с тем чтобы влажность была не выше заданной. По шаблону согласно чертежу вырезают из досок дроки, из которых в дальнейшем и склеивают болванки винтов. Дроки могут быть составными, — склеенными по ширине. Можно их также склеивать и по длине на-ус, но только необходимо следить, чтобы в дальнейшем, при склейке болванки, в соседних дроках места склейки не совпадали.

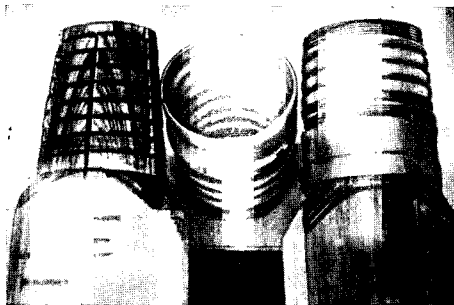
Дроки отфуговывают с обеих сторон и затем склеивают в струбцинах или в специальных гидравлических прессах. После склейки просверливают центральное отверстие, а затем болванка поступает или прямо на верстак для дальнейшей ручной обработки по шаблонам — в случае мелкосерийного производства или на копировальный станок, который по шаблону фрезой обрабатывает с обеих сторон перо лопасти. После копировального станка винт поступает на верстак для окончательной оправки по шаблонам. После этого винт оклеивают материей и производят оковку передней кромки, а затем шпатлевку и окраску. До оклейки материей винт проверяют на балансировочном станке, а окончательное уравнивание его произво-

дят после окраски. В настоящее время такие винты изготовляются только для маломощных самолетов.

Кроме указанного простейшего процесса производства моноблочных винтов, применяется также более сложный технологический процесс. После оправки тем или иным способом винта и оклейки его материей на лопасти наносится целлулоидная пленка толщиной около 1 мм, а затем производится оковка передней кромки и окраска. Целлулоидная пленка наносится в виде размягченного листового целлулоида на лопасть, а затем эта лопасть под гидравлическим прессом выдерживается в сушильном шкафу. После этого она ручным способом окончательно оправляется.

### § 3. Изготовление деревянных лопастей

Изготовление деревянных лопастей, вставляемых во втулку фиксированного или изменяемого шага, более сложно, чем изготовление моноблочных винтов, и требует специального заводского оборудования. Объясняется это тем, что обычно комлевая



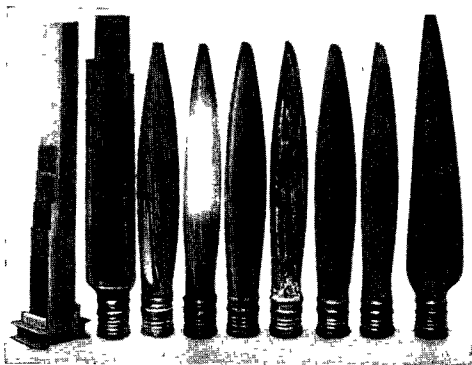
Фиг. 285. Комлевая часть деревянной лопасти с нарезкой.

часть таких лопастей делается из прессованной древесины, имеющей значительную твердость. Кроме того, для правильного и надежного соединения комля со стаканом втулки требуется относительно высокая точность изготовления.

Существует несколько технологических процессов изготовления лопастей из прессованной древесины. Эти процессы различаются между собой, во-первых, потому, что сама конструкция лопастей бывает разная, например, лопасти могут делаться по длине из различного материала — у комля из твердой прессованной древесины, а само перо может быть сделано из мягкого,



легкого дерева, как сосна, ель. Во-вторых, сам процесс изготовления может быть различным, например, лопасть можно склеивать из дроков или при определенной повышенной температуре прессовать из шпона, пропитанного специальным наполнителем. Несколько особняком стоит изготовление комлевой части лопасти. У комлевой части на токарном станке делается нарезка, на которую навинчивается или напрессовывается стальной стакан. Специальный цемент, залитый между соединяемыми деталями, после высушивания крепко сцепляет стальной стакан с деревом (фиг. 285). Весь процесс изготовления лопасти состоит в следующем:



Фиг. 286. Различные стадии изготовления деревянной лопасти.

1. Отдельные дроки древесины плотно прифуговываются друг к другу, причем каждая дрока склеена на-ус из двух частей из прессованной древесины (малая часть) и легкой древесины (большая часть).

2. Дроки склеиваются между собой под давлением гидравлического пресса.

3. Находятся центра болванки.

4. На комлевой части делается винтовая нарезка.

5. На комлеву часть наворачивается или напрессовывается стакан.

6. На копировальном станке обрабатывается перо лопасти.

7. Вручную лопасть доводится до нужных размеров по шаблону.

8. Лопасть обклеивается материей.

9. На передней кромке лопасти укрепляется с помощью гвоздей металлическая сетка.

10. На переднюю кромку наплавляется оковка.

11. На лопасть наносится целлулоидное покрытие и она выдерживается под прессом.

12. Лопасть окончательно оправляется.

13. Лопасть окрашивается.

14. Лопасть уравнивается. Неуровненность ее доводится до минимальной величины в пределах технических условий.

На фиг. 286 показаны различные стадии изготовления деревянной лопасти.

Можно деревянные лопасти делать и из шпона, который предварительно пропитывается специальным составом, отдельные дроки из шпона укладываются в специальные штампы и лопасть прессуется, причем под влиянием температуры, которая поддерживается на определенном уровне, происходит полимеризация пропитывающего вещества и лопасть получается монолитной. Затем для большего сопротивления передней кромки действию твердых частиц при работе винта на переднюю кромку укрепляется латунная оковка. Эту оковку можно устанавливать на заклепках. Комлевая часть заделывается в стакан так же, как описано выше.

#### § 4. Изготовление дуралюминовых лопастей

В отличие от деревянных лопастей, изготовление которых сосредоточено на одном заводе, сплошные дуралюминовые лопасти изготавливаются последовательно на двух заводах. Заготовка лопастей требует специального тяжелого оборудования и производится на одном заводе, а дальнейшая обработка — на другом — собственно винтовом заводе. Таким образом производство дуралюминовых лопастей разделяется на две стадии — заготовку лопастей и их обработку.

Заготовка лопастей должна быть такой, чтобы при дальнейшей механической обработке сьем материала был наименьшим, т. е. заготовка по форме должна быть возможно ближе к окончательно отделанной лопасти (фиг. 287). Это достигается штамповкой или прессовкой заготовки. При штамповке и малой механической обработке волокна материала заготовки следуют за формой заготовки и не перерезываются, отчего окончательно отделанная лопасть бывает прочнее, чем изготовленная из ковanej болванки. Последняя иногда применяется при изготовлении опытных единичных лопастей (фиг. 288).

Для того чтобы заготовка имела более однородный характер, а также легче обрабатывалась под штампом, до штамповки заготовку пропускают через ряд валков, которые постепенно обжимают ее (фиг. 289). Если конструкция лопасти такова что на комлевой ее части имеется упорный подшипник, то комлевою



Фиг. 287. Штамповка дуралеевой лопасти. Справа готовая лопасть

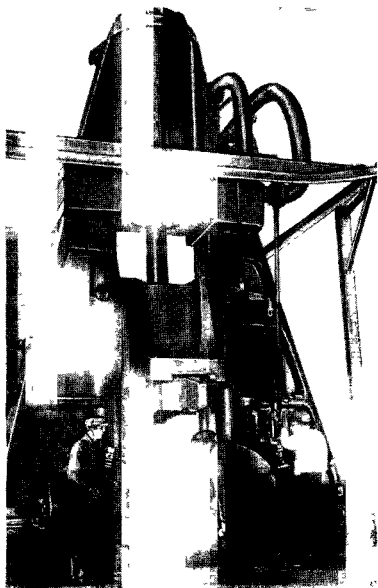


Фиг. 288 Поковка дуралюминовой лопасти. Справа готовая лопасть.



Фиг. 289. Валки для придания заготовке дуралюминовой лопасти различной толщины по длине.

часть лопасти, после того как обойма подшипника одета, осаживают на горизонтально ковочной машине.



Фиг. 290. Штампование дуралюминовой лопасти под молотом.

Последовательно изготовленне заготовки состоит из следующих операций.

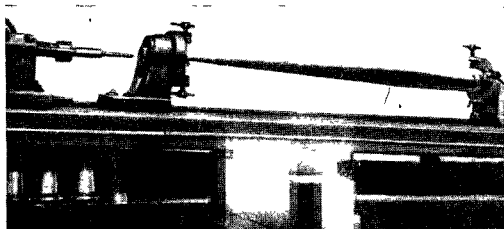
1. По количеству необходимого материала обрезывается брусок.
2. Брусок центрируется.
3. В случае необходимости брусок обдирается на токарном станке.
4. Нагревается до  $450^{\circ}$ .
5. Прокатывается на специальных валках, которые постепенно обжимают заготовку (фиг. 289).
6. Нагревается и штампуются под молотом (фиг. 290).

7. Получившийся облой и концевой шипцевой захват обрезаются, из них изготавливаются образцы, которые исследуются в лаборатории на механические и физико-химические качества материала.

8. На цилиндрическую комлевую часть надеваются обоймы роликовых подшипников, если таковые предусмотрены в конструкции лопасти. После этого цилиндрическая часть нагревается и осаживается на горизонтально ковочной машине.

9. После указанных операций производится термическая обработка поковки, состоящая из медленного нагрева до  $500^{\circ}$ , закалки в горячей воде и искусственного старения в печи.

На винтовом заводе заготовка лопасти в виде штамповки (фиг. 287) подвергается дальнейшей обработке с последовательным применением следующих операций.



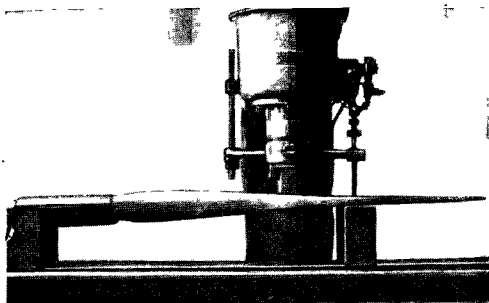
Фиг. 291. Центровка лопасти.

1. Наметка центров по концам лопастей (фиг. 291) на специальном центровальном станке. Специальные приспособления позволяют поворачивать штамповку под любым углом и смещать положение ее оси по высоте над плитой станка. В случае необходимости до центровки производится правка штамповки

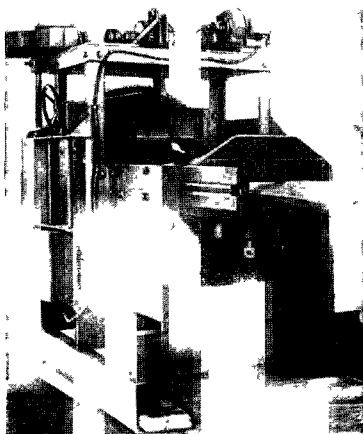
2. Правка штамповки под гидропрессом (фиг. 292), а в случае надобности и выкрутка ее (фиг. 293).

3. Токарная обработка комля лопасти и установление «установочной базы». В случае резьбового крепления лопасти — нарезка резьбы. Обработка комля может производиться на планетарном станке при неподвижной лопасти (фиг. 294) или на обыкновенном — при вращающейся в люнете лопасти с помощью ведущего барабана (фиг. 295).

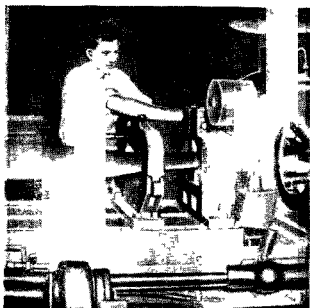
4. Если в конструкции предусмотрено глубокое сверление, то таковое производится на специальном вертикальном сверлильном станке в несколько проходов с помощью особых конических разверток (фиг. 296).



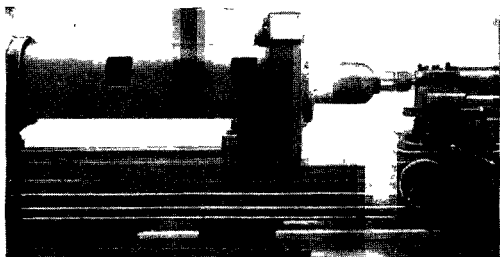
Фиг 292 Правка лопасти под прессом.



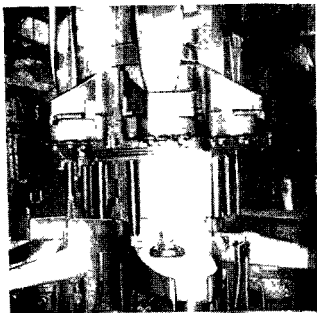
Фиг 293. Выкрутка лопасти специальным прессом.



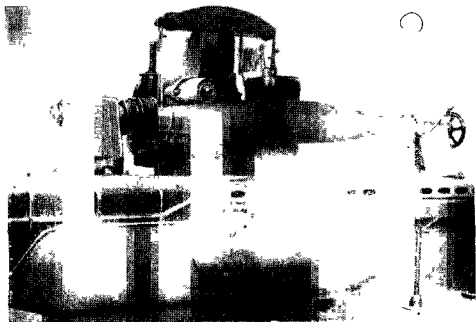
Фиг. 294. Обработка комлевой части лопасти на планетарном станке.



Фиг. 295. Обработка комлевой части лопасти и нарезка резьбы.



Фиг 296. Глубокое сверление комлевой части лопасти.

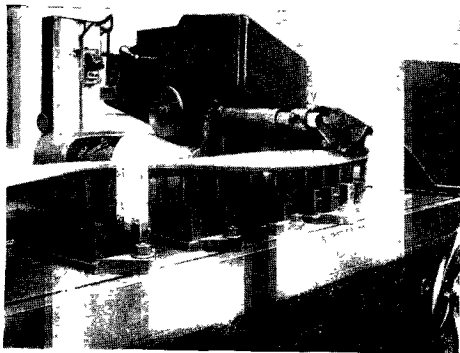


Фиг 297 Фрезерование кромок лопасти на копировальном станке.



5. Фрезеровка кромок лопасти на специальном копировально-фрезерном станке (фиг. 297). Обе кромки фрезеруются одновременно по контуру; при этом лопасть медленно поворачивается с помощью копирной линейки.

6. После разметки сечений на кромках лопасть фрезеруется последовательно на двух специальных копировально-фрезерных станках по копирам (фиг. 298). На одном станке фрезеруется одна сторона, а на другом — другая.



Фиг. 298. Фрезерование поверхности лопасти на копировальном станке.

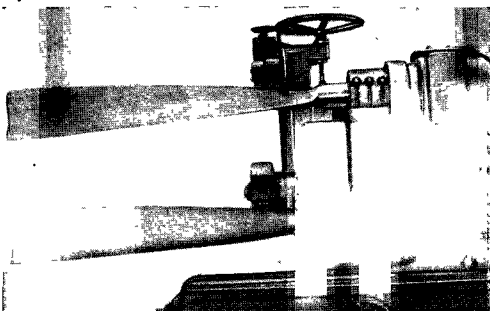
7. Прикомлевая часть лопасти фрезеруется отдельно также на специальном копировально-фрезерном станке (фиг. 299). В головку верхнего шпинделя крепится лопасть, служащая копиром, и по ней ходит ролик копира, а в головку нижнего шпинделя крепится фрезеруемая лопасть. Как лопасть, так и копир одновременно вращаются, при этом фреза обкатывает лопасть.

8. Закругление кромок а также зачистка следов фрезы производится вручную специальной фрезерной головкой с электродвигателем (фиг. 300).

9. В конструкциях лопастей без глубокого сверления высверливается обычным сверлом канал для закладки уравнивающей лопасти груза (фиг. 301).

10. Подправка лопасти под прессом (фиг. 292).

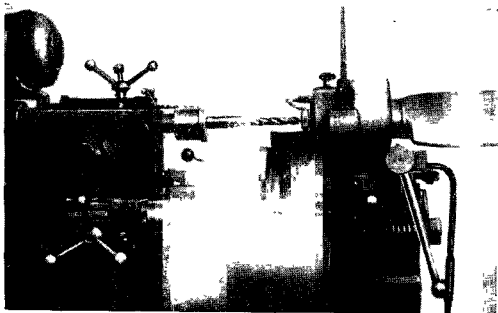
11. Шлифование лопастей по окончательным шаблонам с помощью шлифовальной головки с наждачной шкуркой (фиг. 302).



Фиг. 299. Фрезерование прикомлевой части лопасти на копировальном станке.



Фиг. 300. Зачистка вручную поверхностей лопасти после фрезерования.

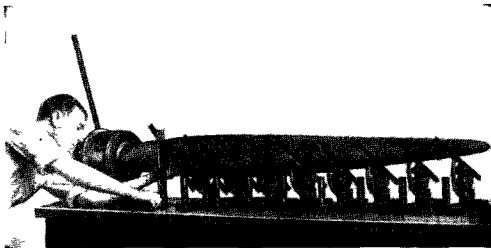


Фиг. 301. Сверление комлевой части лопасти.

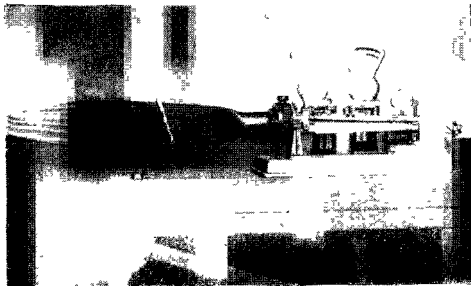


Фиг. 302. Шлифование поверхностей лопасти.

12. Окончательный контроль лопасти по геометрическим размерам (фиг. 303).
13. Окраска лопасти.
14. Уравновешивание лопасти (фиг. 304).



Фиг. 303. Контроль сечений лопасти.



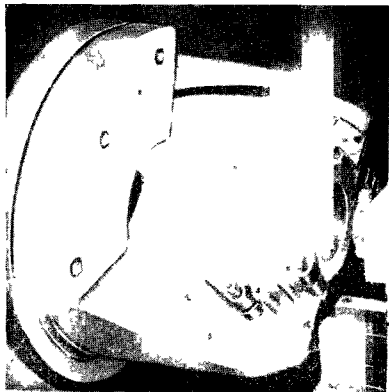
Фиг. 304. Уравновешивание лопасти.

При механической обработке тщательно изготовленной штамповки с малыми припусками снимается небольшое количество материала. На фиг. 287 дано сравнение штамповки и лопасти в готовом обработанном виде.

#### § 5. Изготовление втулок винтов

Технология изготовления втулок винтов и их деталей по существу является обычной технологией машинных деталей. Заготовки этих деталей в зависимости от того, большая это лопать

по размеру или нет, серийное изготовление или опытный образец, представляют собой штамповку, отливку или обычный стандартный материал (пруток). Все детали втулки обрабатываются по большей части на обычных металлорежущих станках и лишь для некоторых операций применяются специальные станки. Обработка деталей ведется по 2-му и 3-му классам точности, причем свободные размеры обрабатываются по 5-му

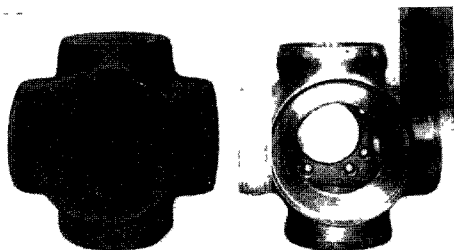


Фиг. 305. Обработка корпуса втулки в специальном приспособлении.

классу. Во многих случаях при сопряжении деталей применяется шлифование поверхностей, а иногда даже и современные более тонкие операции, как обкатка, притирка и т. п. Большое значение в изготовлении деталей втулок имеет взаимозаменяемость деталей; поэтому обработка деталей должна производиться в приспособлениях, обеспечивающих эту взаимозаменяемость, с применением различных кондукторов и точных измерителей.

Основной, наиболее трудоемкой деталью втулки является корпус втулки. Как мы видели в § 8 гл. III, по конструкции втулка может быть разъемной и целой. Разъемная втулка более удобна для изготовления. Заготовка делается по отдельности для каждой половинки штамповкой под молотом. После штамповки обе половинки обрабатываются по плоскости сопряжения, в них просверливаются по кондуктору отверстия согласно чертежу, обе половинки соединяются болтами и дальнейшая обра-

ботка производится, как целой заготовки (фиг. 305). Вся обработка ведется резцом, только некоторые части, как, например, гнезда для посадки узла лопасти, шлифуются. Весьма важна большая точность в пределах указанных на чертеже допусков в обработке рукавов втулки, причем необходима особая точность в перпендикулярности осей лопастей к оси винта, нахождении осей всех лопастей в одной плоскости и соблюдении одинаковости углов между осями лопастей. Кроме того, необходимо соблюдать одинаковость в расстоянии от оси винта до внутренней стороны буртика, в который упирается опорный подшипник узла крепления лопасти. В остальном при изготовлении деталей необходимо всегда помнить, что все детали втулки нагружаются



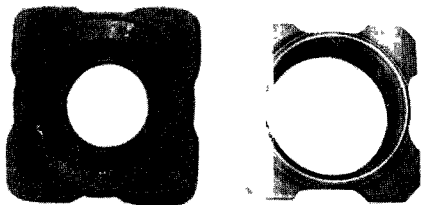
Фиг. 306. Заготовка корпуса втулки четырехлопастного винта  
Справа обработанный корпус.

большими центробежными силами и малейшая геометрическая, а следовательно, и весовая несимметрия влечет за собой неуравновешенность винта и отсутствие весовой взаимозаменяемости.

В некоторых конструкциях разъемных втулок часть втулки, надеваемая на носок вала, составляет одно целое с задней половинкой втулки, в других же имеется специальная переходная деталь (крестовина). В первом случае штамповка имеет довольно сложную форму. Иногда для упрощения производства ступицу, сажаемую на носок вала, делают в виде отдельной детали (фиг. 308), которая соединяется с основным корпусом на болтах. Тогда форма штамповки корпуса получается значительно проще (фиг. 305). И в этом и другом случаях втулка, сажаемая на шлицы носка вала, протягивается на протяжном станке для нарезки шлиц. Шлицы делаются по стандарту.

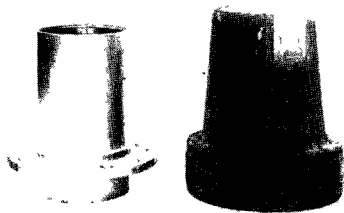
При изготовлении корпуса из двух половинок штампованная заготовка весит примерно на 20—25% больше окончательно обработанной детали.

При целом корпусе заготовка получается весьма громоздкой и хотя всюду, где это возможно, производится прошивка отверстий (фиг. 306), все же заготовка получается очень тяжелой — примерно на 300—400% тяжелее обработанной детали. Кроме



Фиг. 307. Заготовка траверсы механизма поворота лопастей винта. Справа обработанная траверса.

того, что получается потеря в металле на стружку и тратится большее время на механическую обработку, тяжелая заготовка требует более громоздких приспособлений и станков. Волокна



Фиг. 308. Заготовка ступицы втулки лопасти. Слева обработанная ступица.

могут быть при обработке перерезаны, поэтому прочность такой втулки будет несколько пониженная.

Материалом для изготовления корпуса должна служить вязкая, прочная сталь; для этих целей лучше всего применять хромованадиевую сталь марки ЭХ1В.

Другой важной деталью втулки в некоторых типах винтов является крестовина. Заготовка ее получается в виде штамповки. Обработка ее должна быть произведена с большой точностью, ибо крестовина — весьма ответственная деталь. Так же как и в корпусе, оси рогов крестовины должны лежать в одной плоскости, строго перпендикулярной к оси винта; углы между осями рогов крестовины должны быть одинаковыми. Другие более мелкие детали заготавливаются по форме возможно ближе к готовой детали, чтобы оставалось меньше механической обработки (фиг. 307, 308).

### § 6. Сборка винтов

Сборка является конечным этапом в процессе изготовления винта; от тщательности сборки в большой степени зависит качество винта. Процесс сборки весьма прост, если все детали изготовлены хорошо и полностью взаимозаменяемы, однако он чрезвычайно сложен, если детали изготовлены плохо и взаимозаменяемы. В последнем случае процесс сборки превращается в процесс подгонки деталей, и в конечном счете винты, собранные таким образом, не могут иметь требуемого качества. Часто, если завод не достиг еще полной взаимозаменяемости деталей, сборку производят подбором деталей, т. е. к каждому собираемому винту детали комплектуются, чтобы собранный винт удовлетворял техническим требованиям.

При массовом изготовлении сборка производится на конвейере, причем сборке подлежат в отдельности основные узлы винта, как то: втулка, цилиндрическая группа и т. п. Для того, чтобы в конечном счете получить достаточно уравновешенный винт, отдельные его узлы уравновешиваются самостоятельно. Основным правилом сборки является правильная затяжка болтов и контровка их. Для правильной затяжки болтов иногда применяют предельные ключи, которыми можно затянуть гайку лишь до определенного момента на ключе. Во время сборки на трущиеся части должна быть положена смазка в определенных количествах.

## Глава XXII

### УРАВНОВЕШИВАНИЕ ВИНТОВ

#### § 1. Причины, порождающие неуравновешенность винтов

В § 2 главы XVIII рассмотрены различные виды неуравновешенности винтов. Задачей производства является довести эти неуравновешенности до наименьших величин в пределах допусков, даваемых техническими условиями. Как и всякая производственная задача, она решается построением соответствующей технологии, обеспечивающей выполнение деталей строго по чертежам, и соответствующим контролем. Этот контроль за не-



уравновешенностью может быть частным и общим. В первом случае он касается отдельных деталей, а во втором — всего винта в целом.

Причинами неуравновешенности винта могут быть:

1. Геометрическая асимметрия винта.
2. Весовая асимметрия винта.
3. Механическая асимметрия винта.

*Условие геометрической симметрии* лопастей заключается в том, что сечения всех лопастей на любом радиусе должны быть одинаково расположены в пространстве относительно плоскости, перпендикулярной оси винта. В случае геометрической асимметрии лопастей аэродинамические силы на лопастях будут неодинаковы и по-разному направлены, что, как мы видели в § 2 гл. XVIII, вызовет неуравновешенность аэродинамической силы и момента. Нарушение геометрической симметрии является следствием отступления от номинальных чертежных размеров.

*Весовая симметрия* должна соблюдаться в винте относительно его оси, т. е. чтобы весовые моменты его лопастей — произведение веса лопасти на расстояние центра тяжести ее от оси, были одинаковыми. Этим будет обеспечиваться статическая уравновешенность винта. Для обеспечения динамической уравновешенности винта необходимо, чтобы была обеспечена весовая симметрия также и относительно плоскости, перпендикулярной оси винта и проходящей через центр тяжести винта, т. е. чтобы центры тяжести каждой половины винта, рассеченного указанной плоскостью, находились на оси винта.

*Механической асимметрией* называется нарушение геометрической симметрии под действием сил при работающем винте. Как мы знаем из § 1 гл. XV, на лопасти винта действуют растягивающие, изгибающие и скручивающие силы; под действием этих сил может нарушиться как геометрическая, так и весовая симметрия и, следовательно, может нарушиться уравновешенность винта.

Несомненно, что между геометрической, весовой и механической симметрией винта существует взаимная связь. Нарушение геометрической симметрии может повести за собой нарушение весовой и механической симметрии. Нарушение весовой симметрии может повести к нарушению симметрии механической.

Разберем, как разные виды асимметрии винта могут влиять на неуравновешенность винта.

На неуравновешенность аэродинамических сил и моментов непосредственно может влиять только геометрическая асимметрия винта. Действительно, аэродинамические силы, развивающиеся на лопастях при определенной скорости вращения винта, будут зависеть только от ширины, толщины и длины лопасти, а также от угла атаки; а это все величины, которые могут нарушить геометрическую симметрию винта. Весовая и механическая

асимметрии могут влиять на неуравновешенность аэродинамических сил и моментов лишь косвенно — через нарушение геометрической симметрии.

Возьмем пример. Предположим, что у трехлопастного винта диаметром 3,8 м при работе с числом оборотов 1350 об/мин на месте с углом установки лопастей  $20^\circ$ , а в полете при  $\lambda=1,5$  с углом установки  $\varphi=35^\circ$ , одна лопасть установлена под углом на  $20'$  большим, чем две другие. Разность между тягой лопасти, установленной под углом  $\varphi+20'$ , и тягой лопасти, установленной под углом  $\varphi$ , можно выразить так:

$$\Delta P = \frac{\Delta \alpha}{\kappa} \rho n_s^2 D^4,$$

где  $\Delta \alpha$  — разность коэффициентов тяги двух винтов, углы установки которых отличаются на  $20'$ . Если обозначим расстояние точки приложения тяги одной лопасти от оси винта через  $a$ , то момент от наличия разности тяг лопастей будет

$$M = a \Delta P.$$

Неуравновешенность аэродинамического момента найдется по формуле (325):

$$N_{aM} = \frac{1000gM}{4\pi^2 n_s^2}$$

или

$$N_{aM} = \frac{1000ga\rho D^4}{4\pi^2 \kappa} \Delta \alpha. \quad (369)$$

$\Delta \alpha$  можно найти следующим образом. При работе винта на месте по графикам характеристик винта находим, что при  $\lambda=0$ ,  $\varphi=20^\circ$ ;  $\alpha=0,155$ ; при  $\varphi=25^\circ$ ,  $\alpha=0,183$ ; следовательно,  $\frac{\Delta \alpha}{\Delta \varphi} = \frac{0,028}{5^\circ} = 0,0056$ , а для  $\Delta \varphi=20'$   $\Delta \alpha=0,00187$ . Вычисления показывают, что для нашего примера  $a=1,35$  м, тогда по формуле (369) найдем

$$N_{aM} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 1,35 \cdot 0,125 \cdot 208}{4\pi^2 \cdot 3} 0,00187 = 5,5 \text{ гм}^2.$$

В полете при  $\lambda=1,5$  получим при  $\varphi=35^\circ$   $\alpha=0,057$ ; при  $\varphi=40^\circ$   $\alpha=0,117$ , следовательно,  $\frac{\Delta \alpha}{\Delta \varphi} = \frac{0,06}{5^\circ} = 0,012$  и для  $\Delta \varphi = 20'$   $\Delta \alpha=0,004$ . По формуле (369) найдем для  $\lambda=1,5$   $N_{aM} \approx 12 \text{ гм}^2$ .

Из этого примера получается интересный результат, что неуравновешенность аэродинамического момента в полете примерно в два с лишним раза больше, чем при работе винга на

месте. Объясняется это тем, что наклон кривых  $\alpha$  по  $\lambda$  больше при больших  $\lambda$ , чем при  $\lambda=0$ . Следовательно, если при работе на месте неуравновешенность аэродинамического момента не очень заметна, то в воздухе на скорости она может быть больше и дать уже заметную тряску самолета. Таким образом неуравновешенность аэродинамического момента изменяется с режимом полета.

Так как  $\Delta P$  зависит от плотности воздуха, то неуравновешенность аэродинамического момента будет также зависеть от высоты полета при прочих одинаковых условиях, уменьшаясь с высотой.

Найдем теперь, как изменится в том же случае наличия разности в углах установки в  $20'$  неуравновешенность аэродинамической силы. Так как  $\beta = \frac{T}{\rho n_s^2 D^5}$ , а составляющая сопротивления

одной лопасти в плоскости вращения винта равна  $Q = \frac{M}{ak}$  и, кроме того,  $T = 2\pi n_s M$ , где  $T$  — мощность в кгм, то

$$\beta = \frac{2\pi Q ak}{\rho n_s^2 D^5} \quad \text{или} \quad \Delta Q = \frac{\rho n_s^2 D^5}{2\pi ka} \Delta\beta,$$

откуда по формуле (317)

$$N_a = \frac{1000 g \rho D^5}{8\tau^2 ka} \Delta\beta. \quad (370)$$

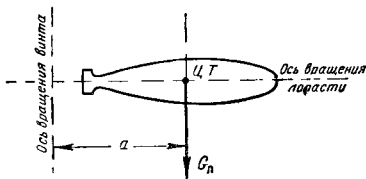
По графикам характеристик винта. найдем для  $\lambda=0$ : при  $\varphi=20^\circ$   $\beta=0,12$ ; при  $\varphi=25^\circ$   $\beta=0,185$ ; следовательно, при  $\lambda=0$   $\frac{\Delta\beta}{\Delta\varphi} = \frac{0,065}{5^\circ} = 0,012$ , а для  $\Delta\varphi=20'$   $\Delta\beta=0,004$ .

Если  $\lambda=1,5$ , то при  $\varphi=35^\circ$   $\beta=0,1$ ; при  $\varphi=40^\circ$   $\beta=0,22$ ;  $\frac{\Delta\beta}{\Delta\varphi} = \frac{0,12}{5^\circ} = 0,024$  и для  $\Delta\varphi=20'$   $\Delta\beta=0,008$ . Таким образом получаем по формуле (370) при  $\lambda=0$   $N_a=4$  гм; при  $\lambda=1,5$   $N_a=8$  гм. Как и для неуравновешенности аэродинамического момента, неуравновешенность аэродинамической силы зависит от режима полета.

Из приведенных примеров видно, что даже небольшая геометрическая асимметрия, получившаяся за счет разной установки лопастей, порождает достаточно большие неуравновешенности как момента, так и силы, которые могут вызвать ощутимую тряску самолета. Указанная асимметрия может получиться от неправильной установки лопастей во втулке, когда установочные риски на лопастях нанесены недостаточно точно; от какого-либо перекоса в механизме винта; от разных линейных размеров лопастей в одном комплекте — разных толщин или ширин. Поэтому для получения лучшей аэродинамической уравновешенности винта это необходимо учитывать при назначении допусков и при со-

ставлении технологического процесса изготовления винта на это следует обращать особое внимание.

Если на аэродинамическую неуравновешенность винта непосредственное влияние оказывает геометрическая асимметрия винта, то на массовую неуравновешенность силы и момента непосредственное влияние оказывает весовая асимметрия винта. Поэтому контроль массовой неуравновешенности силы и момента обуславливает собой контроль за весовой симметрией винта. По своему определению массовая уравновешенность силы (статическая уравновешенность) требует нахождения на оси винта его центра тяжести, причем для обеспечения этой уравновешенности



Фиг. 309 Большой момент лопасти

необходимо, чтобы центры тяжести деталей, на которые расчленяется винт от оси винта к его периферии, были расположены на одинаковом расстоянии от осн. Крупными деталями, из которых расчленяется винт от центра к периферии, является втулка винта и лопасти. Отсюда следует, что для обеспечения статической уравновешенности всего винта необходимо, чтобы статическую уравновешенность относительно оси винта имели и втулка винта и лопасти.

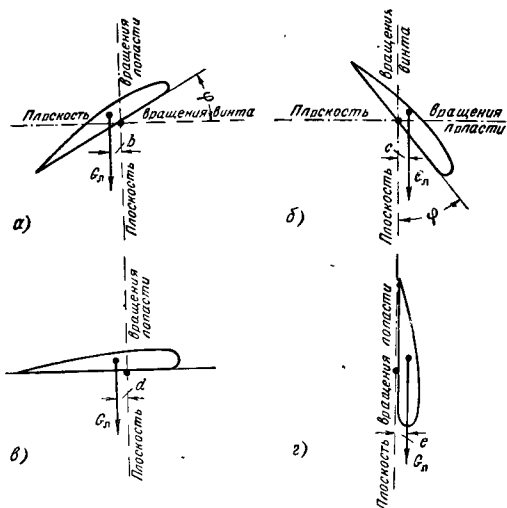
В винтостроении установилась следующая терминология<sup>1</sup>.

*Большим моментом лопасти* называется произведение веса лопасти на расстояние ее центра тяжести от оси винта (фиг. 309). *Малым моментом лопасти* называется произведение веса лопасти на расстояние ее центра тяжести до оси поворота лопасти во втулке.

При уравновешивании лопастей на специальных станках приходится иметь дело с различными разновидностями этого момента, которые получаются, если поворачивать лопасть около ее оси и относить этот момент к разным плоскостям (фиг. 310). Так, *статическим малым моментом* называется произведение из веса лопасти на расстояние ее центра тяжести от плоскости, перпендикулярной плоскости вращения винта и проходящей через ось поворота лопасти (фиг. 310,а). *Динамическим малым*

<sup>1</sup> См. А. Флеров, Балансировка воздушных винтов Бюллетень авиационной промышленности № 2, 1946

моментом называется произведение из веса лопасти на расстояние ее центра тяжести от плоскости вращения винта (фиг. 310,б). Горизонтальным малым моментом называется произведение из веса лопасти на расстояние ее центра тяжести от плоскости, проходящей через ось поворота лопасти и перпендикулярной хорде дужки на стандартном сечении лопасти (фиг. 310,в); вертикальным малым моментом называется произведение из веса



Фиг. 310. Малые моменты лопасти

лопасти на расстояние ее центра тяжести от плоскости, проходящей по оси поворота лопасти параллельно хорде сечения (фиг. 310,г). Наконец, *заявленным моментом* называется величина соответствующего момента, выраженная в гм. Величины средних заявленных моментов определяются опытным путем заводами-изготовителями после изготовления большого числа лопастей данного типа.

На статическую неуравновешенность винта оказывает влияние большой момент и статический малый момент. Большой момент исчисляется десятками тысяч граммометров, а статический малый момент 20—30 гм. Если изготовить лопасти по

верхним пределам допусков, то собранный винт может иметь статическую неуравновешенность порядка 1000 гм, которую устранить трудно. Поэтому необходимо лопасти уравновешивать индивидуально, причем допуск на отклонение большого момента равен  $\pm 5$  гм от заявленного. В том случае когда исходный материал недостаточно однороден, трудно доводить лопасти до заявленного момента и приходится прибегать к комплектованию лопастей, причем в этом случае нарушается взаимозаменяемость лопастей. Поэтому прибегать к такому комплектованию лопастей, вообще говоря, нежелательно и делать это следует только в случае крайней необходимости.

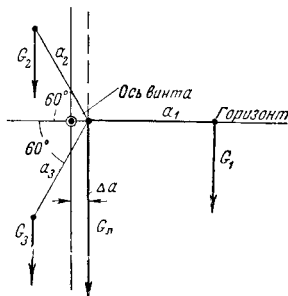
Неуравновешенность втулки винта может доходить до 50 гм и поэтому каждую втулку тоже надо уравновешивать, доводя ее неуравновешенность до 2—3 гм.

Полностью собранный винт контролируется на специальных станках на статическую неуравновешенность, которая доводится до допускаемой величины 5—8 гм с помощью специальных шайб, гаек на стяжных болтах втулки и т. п. способами в зависимости от конструкции винта. Очень удобно, когда в конструкции винта предусматривается возможность его уравновешивания определенными способами.

Рассмотрим трехлопастный винт и обозначим веса его лопастей через  $G_1, G_2, G_3$ , а расстояния центров тяжести лопастей от оси винта соответственно через  $a_1, a_2, a_3$ . Предположим, что большой момент  $G_1 a_1$  равен заявленному плюс допуск, т. е.  $G_1 a_1 = M_{ном} + \Delta M$ , а  $G_2 a_2 = M_{ном} - \Delta M$ . Кроме того,  $G_2 a_2 = G_3 a_3$ . Это будет наиболее невыгодное распределение допусков. Отсюда  $G_1 a_1 - G_2 a_2 = 2\Delta M$ . Пусть лопасти расположатся так, что ось лопасти  $G_1$  займет горизонтальное положение. Эта лопасть самая «тяжелая», а в таком положении статический момент лопасти наибольший. Оси лопастей  $G_2$  и  $G_3$  расположатся под углом  $60^\circ$  к горизонтالي (фиг. 311). Получим

$\sum G_n \Delta a_n = G_1 a_1 - G_2 a_2 \cos 60 - G_3 a_3 \cos 60 = G_1 a_1 - G_2 a_2 = 2\Delta M$ ,  
где  $\sum G_n$  — вес всех лопастей; отсюда

$$\Delta a_n = \frac{2\Delta M}{\sum G_n} \quad (371)$$



Фиг. 311. Нахождение допусков на уравновешивание винта.

Найдем, какой допуск должен быть на большой момент, чтобы винт имел неуравновешенность в пределах допуска на статическую неуравновешенность всего винта. Предположим, что втулка винта имеет неуравновешенность  $\pm N_{\text{свт}}$ . Имеем

$$N_c = \Delta a_b G_b, \quad (372)$$

где  $G_b$  — вес винта,  $\Delta a_b$  — расстояние центра тяжести винта от оси винта. С другой стороны,  $\pm N_{\text{свт}} + \sum G_d \Delta a_d = G_b \Delta a_b$  и  $\Delta a_b = \frac{\Delta a_d \sum G_d \pm N_{\text{свт}}}{G_b}$  или согласно формуле (371)

$$\Delta a_b = \frac{2\Delta M \pm N_{\text{свт}}}{G_b}.$$

По формуле (372) получим

$$N_c = 2\Delta M \pm N_{\text{свт}}$$

или

$$\Delta M = \frac{N_c \pm N_{\text{свт}}}{2}. \quad (373)$$

Следовательно, если допуск на втулку  $N_{\text{свт}} = \pm 3 \text{ гм}$ , то допуск на большой момент лопастей при  $N_c = 6 \text{ гм}$  должен быть  $\Delta M = 4,5 \text{ гм}$ .

Динамическая неуравновешенность винта, т. е. неуравновешенность массового момента, зависит от такой же неуравновешенности отдельно втулки и лопастей. Для того чтобы обеспечить динамическую уравновешенность втулки, надо, чтобы были статически уравновешены относительно оси вращения все ее детали и узлы. При этом условии главная ось инерции ее будет совпадать с осью винта. Для этого следует отдельно статически уравновешивать половинки корпуса втулки, если он разъемный, и отдельно цилиндр со всеми находящимися в нем деталями.

Предположим, что мы статически уравновесили отдельно цилиндр и отдельно остальную часть втулки с точностью 1 гм, т. е. статическая неуравновешенность этих деталей будет по 1 гм. Предположим, кроме того, что эти неуравновешенности разного знака, т. е. центр тяжести цилиндра и корпуса, расположились с противоположных сторон оси винта. Получающийся от этого неуравновешенный момент на всей втулке будет

$$M_m = \Theta J_{\text{вт}} \Omega^2 \text{ кгм}, \quad (374)$$

где  $\Theta$  — угол наклона главной оси инерции всей втулки к оси винта (в радианах),  $J_{\text{вт}}$  — момент инерции (массовый) всей втулки относительно оси, перпендикулярной оси вращения, в  $\text{кгмсек}^2$ . Тогда динамическая неуравновешенность всей втулки будет

$$N_m = 1000g\Theta J_{\text{вт}} \text{ гм}^2. \quad (375)$$

Пусть  $N_{c.ц}$  и  $N_{c.в2}$  — статические неуравновешенности цилиндра и остальной части втулки,  $l$  — расстояние между центрами тяжести цилиндра и остальной части втулки,  $\Delta a_{ц}$  и  $\Delta a_{в2}$  — соответственно расстояния их центров тяжести от оси винта. Тогда

$$\Delta a_{ц} = \frac{N_{c.ц}}{1000G_{ц}}; \quad \Delta a_{в2} = \frac{N_{c.в2}}{1000G_{в2}},$$

$$\Theta = \frac{\Delta a_{ц} - \Delta a_{в2}}{l},$$

откуда

$$\Theta = \left( \frac{N_{c.ц}}{G_{ц}} + \frac{N_{c.в2}}{G_{в2}} \right) \frac{1}{1000l},$$

и

$$N_{м} = \frac{gJ_{вт}}{l} \left( \frac{N_{c.ц}}{G_{ц}} + \frac{N_{c.в2}}{G_{в2}} \right). \quad (376)$$

С помощью этой формулы можно найти динамическую неуравновешенность втулки по статической неуравновешенности отдельных деталей цилиндра и остальной части втулки.

Пример. Предположим, что

$$G_{ц} = G_{в2} = \frac{1}{2} G_{вт} \text{ и } N_{c.ц} = N_{c.в2};$$

тогда

$$N_{м} = \frac{gJ_{вт}}{l} \frac{4N_{c.в2}}{G_{вт}} \text{ гм}^2.$$

Пусть  $J_{вт} = 0,12 \text{ кгмсек}^2$ ,  $l = 0,25 \text{ м}$ ,  $N_{c.в2} = 1 \text{ гм}$ ,  $G_{вт} = 100 \text{ кг}$ . Тогда  $N_{м} \approx 0,2 \text{ гм}^2$ . Так как, повидимому, динамическую неуравновешенность втулки можно допустить до  $1 \text{ гм}^2$ , то статическую неуравновешенность цилиндра и остальной части втулки можно допускать до  $4-5 \text{ гм}$  согласно формуле (376).

Посмотрим теперь, как влияет на динамическую уравновешенность винта динамический малый момент. Для простоты возьмем двухлопастный винт, так как трех- и четырехлопастные легко привести к двухлопастному. Обозначим номинальное значение динамического малого момента через  $M$ , номинальный вес лопасти  $G_{л0}$ , допуск на вес лопасти  $\Delta G_{л}$  и допуск на динамический малый момент  $\Delta M$ . Предположим, что допуск на веса и моменты у обеих лопастей расположены противоположно, тогда расстояние между смещенными центрами тяжести лопастей  $\Delta a$  будет

$$\Delta a = \frac{M_0 + \Delta M}{G_{л0} - \Delta G_{л}} - \frac{M_0 - \Delta M}{G_{л0} + \Delta G_{л}}$$



или

$$\Delta a = \frac{2(G_0 \Delta M + M_0 \Delta G_n)}{G_{n0}^2 - \Delta G_n^2}. \quad (377)$$

Величина  $\Delta G_2$  мала по сравнению с  $G_0^2$  и ею можно пренебречь. Также мала  $M_0 \Delta G_n$  по сравнению с  $G_0 \Delta M$ , тогда

$$\Delta a = \frac{2 \Delta M}{1000 G_{n0}}, \quad (378)$$

где величина  $\Delta M$  выражена в гм. По формуле (311) имеем

$$N_m = 1000 \cdot G_n \cdot r_n \cdot \Delta a.$$

Подставляем сюда значение  $\Delta a$  по формуле (378):

$$N_m = \frac{2 \Delta M G_n r_n}{G_{n0}}.$$

Так как вес лопасти  $G_n$  очень мало отличается от номинала  $G_{n0}$ , то

$$N_m = 2 \Delta M \cdot r_n. \quad (379)$$

По этой формуле можно найти динамическую неуравновешенность  $N_m$  по разнице  $\Delta M$  в динамическом малом моменте у лопастей. Здесь  $r_n$  — расстояние центра тяжести лопасти от оси, которое можно принять постоянным и равным номинальному значению. Если  $\Delta M = 6$  гм, а  $r_n = 0,7$  м, то  $N_m = 8$  гм<sup>2</sup>.

Таким образом, для того чтобы обеспечить в производстве отдельных деталей общую уравновешенность винта, по техническим условиям следует: 1) возможно ближе подходить в выполнении геометрических размеров деталей к номиналу; 2) статически уравновешивать в процессе производства отдельные крупные детали и узлы винта.

## § 2. Статическое уравновешивание винтов и лопастей

Для статического уравновешивания винтов и лопастей по ходу производства применяются специальные станки, которые называются «балансировочными». Эти станки должны удовлетворять следующим условиям:

1. Иметь необходимую точность в определении статической неуравновешенности.

2. Быть простыми по конструкции.

3. Быть удобными для пользования.

Для того чтобы определить потребную точность балансировочного станка, следует сначала определить, с каким допуском приходится уравновешивать винты и лопасти. Допуски на лопасти уже разобраны в предыдущем параграфе.

Согласно формуле (310) центробежная сила винта вследствие его неуравновешенности выражается так:

$$P_c = \frac{N_c}{1000g} \Omega^2.$$

Но угловую скорость вращения винта  $\Omega$  можно представить так:

$$\Omega = \frac{2U_0}{D}.$$

Тогда

$$P_c = \frac{4N_c U_0^2}{1000g} \frac{1}{D^2}, \quad (380)$$

а отсюда

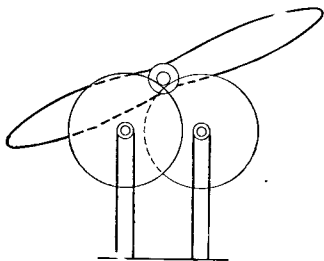
$$N_c = 250g P_c \frac{D^2}{U_0^2}. \quad (381)$$

Если задаться такой центробежной силой  $P_c$ , которая вызывает допустимую тряску, то величина  $250 \cdot g \cdot P_c$  будет постоянной для всех винтов и, следовательно, статическая неуравновешенность  $N_c$  прямо пропорциональна квадрату диаметра и обратно пропорциональна квадрату концевой окружной скорости лопасти. Для обычных винтов во многих случаях концевая окружная скорость  $U_0$  изменяется мало (в пределах 240—260 м/сек) и если ее принять постоянной, то можно сказать, что статическая неуравновешенность приблизительно прямо пропорциональна квадрату диаметра винта. Так, например, если при диаметре 3 м принять допустимую статическую неуравновешенность, равную 3 гм, что будет соответствовать при  $U_0 = 250$  м/сек центробежной силе в 8 кг, то при диаметре винта 5 м той же центробежной силе при  $U_0 = 250$  м/сек будет соответствовать статическая неуравновешенность в 8,4 гм. Следовательно, при больших диаметрах винтов допуск на статическую неуравновешенность должен быть больше. Строго говоря, допуск на статическую неуравновешенность следует определять по формуле (381), задаваясь только допустимой центробежной силой  $P_c$ . Эту последнюю можно определять из статистики наблюдений над тряской винтов на самолете. Повидимому, эту центробежную силу можно принять равной 8 кг. Как мы видели, для диаметра 3 м это дает неуравновешенность 3 гм. Так как винты меньшего диаметра устанавливаются на маломощные самолеты, у которых окружная концевая скорость винта сравнительно невелика, то можно считать, что 3 гм является наименьшим допуском на статическую неуравновешенность винта. Для того чтобы винты можно было уравновешивать с допуском в 3 гм, необходимо выяснить точность самого станка, т. е. определить, от каких факторов она зависит. Прежде всего совершенно очевидно, что чем точнее

станок, тем лучше; поэтому рассмотрим вкратце существующие типы станков и оценим их относительную точность.

Существующие балансировочные станки по конструкции разделяются на следующие четыре группы: 1) роликовые, 2) весовые, 3) ножевые, 4) механические.

1. В роликовых станках винт, насаженный на вал, катается на роликах, которые в свою очередь катаются на шариковых подшипниках (фиг. 312). Аналогичным по принципу действия является станок, в котором вал винта вращается на шариковых или роликовых подшипниках. В этих случаях на точность станков влияет наличие трения при катании вала на роликах



ито

Фиг. 312. Схема роликового балансировочного станка

и при катании шариков или роликов в подшипниках. Подшипники быстро загрязняются, трение во всем станке большое и поэтому чувствительность его небольшая. Такие станки теперь совершенно вышли из употребления.

2. Весовые станки основаны на принципе весов. Винт устанавливается на ножах или на подвеске так, чтобы его ось вращения была вертикальна и линия ножей или точка подвеса находились немного выше центра тяжести, но вблизи его. Кроме того, линия ножей или линия отвеса, проходящая через точку подвеса, должны пересекать ось вращения винта. Находя уравновешивающий момент, который будет поддерживать ось винта на вертикали при двух взаимно перпендикулярных положениях винта в горизонтальной плоскости, можно найти и положение центра тяжести относительно оси вращения в плоскости, перпендикулярной оси вращения винта. Расстояние центра тяжести от оси и определит неуравновешенность винта.

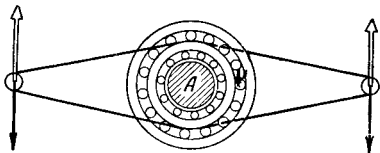
Весовые станки могут быть сделаны весьма чувствительными. Чувствительность тем больше, чем меньше расстояние линии ножей или точки привеса от центра тяжести и чем больше частота колебания винта на ножах. Первая величина зависит от

конструктивных особенностей станка, вторая — от размеров винта.

Весовые станки стационарного типа для уравновешивания винтов не применяются из-за сложности, но широко применяются для уравновешивания лопастей. В этом случае они достаточно удобны для пользования.

Весовой станок удобен также для уравновешивания винтов в полевых условиях (см. § 3, глава XXIV).

3. Ножевые станки основаны на том, что винт, насаженный на вал, соосный с вингом, заставляют кататься по двум горизонтальным ножам, причем центр тяжести винта, не совпадающий с осью вала, при качении отходит на большее или меньшее расстояние от вертикальной плоскости, проведенной через ось вала. Наибольшее расстояние центра тяжести от указанной



Фиг 313. Схема механического балансирующего станка.

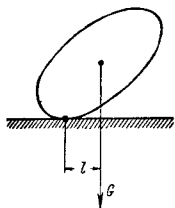
вертикали, умноженное на вес винта, и определяет неуравновешенность винта. Если уравновесить винт при таком его положении (наибольшее удаление центра тяжести от указанной вертикальной плоскости), то уравновешивающий момент определит величину неуравновешенности винта.

4. Механические станки являются разновидностью роликовых станков, но более чувствительны. Идея их заключается в следующем. Предположим, что вал А (фиг. 313) покоится на двух опорах с подшипниками, каждый из которых в свою очередь покоится на другом подшипнике, причем у каждого последнего подшипника имеется рычаг, соединенный с эксцентриком, вращающимся от электродвигателя таким образом, что рычаги двигаются в противоположные друг к другу стороны. Колебательные движения каждого рычага создают моменты трения вала А в подшипниках, направленные в разные стороны и взаимно уничтожающиеся. При таком устройстве вал А при вращении в подшипниках не создает момента трения, и такой балансирующий станок имеет хорошую чувствительность.

Механические станки достаточно сложны и широкого распространения не получили. Наибольшее распространение получил ножевой станок, и поэтому мы подробнее остановимся на объяснении его чувствительности и точности.

При уравнивании винта на ножевом станке винт колеблется на нем, причем, чем больше частота этих колебаний, тем легче заметить неуравновешенность, т. е. тем больше чувствительность станка. С другой стороны, чем больше отвечает станок на эксцентриситет центра тяжести относительно оси винта, тем больше чувствительность станка. Таким образом под чувствительностью ножевого станка можно подразумевать отношение частоты колебания винта на станке к эксцентриситету центра тяжести винта. В приложении 6 подробно разобрано колебание винта на ножевом станке и выведена формула для определения периода колебаний.

Для удобства под чувствительностью станка будем подразумевать величину  $\frac{p}{\sqrt{a}} = \epsilon$ , тогда, так как частота колебаний на основании формулы (412) приложения 6 будет



Фиг. 314. Катание эллипсоидного вала по ножам.

$$p = \frac{1}{T} = \frac{\sqrt{ag}}{C\rho},$$

то

$$\epsilon = \frac{\sqrt{g}}{C\rho}, \quad (382)$$

где  $C$  — постоянная.

Мы видим, что чувствительность балансировочного станка зависит от радиуса инерции винта  $\rho$  и не зависит от конструктивных параметров станка — диаметра его вала. Таким образом можно сделать следующий общий вывод, что обычные ножевые балансировочные станки по общей конструкции обладают предельной чувствительностью и увеличить эту чувствительность можно только точной установкой и тщательным изготовлением деталей для уменьшения трения. По этой причине ножевые балансировочные станки и получили большое распространение в винтовой промышленности, хотя и предлагалось большое количество других конструкций балансировочных станков.

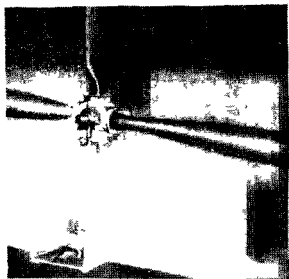
Чувствительность станка сильно меняется в зависимости от величины винта. Так, для винта диаметром 3,8 м чувствительность уменьшается примерно на 30% по сравнению с винтом диаметром 3 м. Поэтому при уравнивании винтов большого диаметра необходимо иметь особо тщательно изготовленные балансировочные станки.

В балансировочном станке вал катается по ножам, причем вал может иметь какую-то эллипсовидность. В приложении 7 дано определение величины  $l$  (фиг. 314), которая создает плечо и, следовательно, момент, могущий дать ошибку в определении статической уравновешенности. При эллиптичности вала в

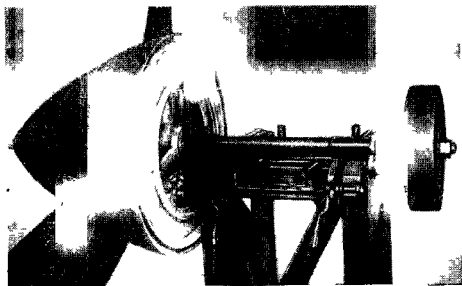
0,05 мм по индикатору и весе винта 400 кг получается ошибка в определении неуравновешенности винта в 2 гм. Желательно эллиптичность доводить до 0,01 мм, что можно сделать на обычных хороших токарных станках.

Винт устанавливается на валу двигателя на разрезных конусах. На балансировочном станке нельзя устанавливать разрезные конуса, так как это вызывает добавочные ошибки. Конуса на валу станка следует делать весьма тщательно, причем задний конус должен быть насажен на вал с прессовой посадкой и конус проверен на станке вместе с валом. Допуски должны быть более жесткими, чем на стандартные конуса. Передний конус навинчивается на вал и нарезка у него и на валу должна быть сделана по 2-му классу точности.

Ножевые балансировочные станки бывают двух типов — обычные (фиг. 315) и лобовые (фиг. 316). Первые применяются



Фиг. 315 Ножевой балансировочный станок.

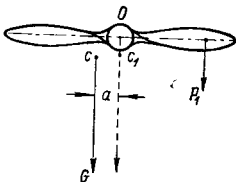


Фиг. 316 Лобовой ножевой балансировочный станок

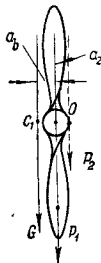
на винтовых заводах, а вторые на самолетных заводах, на которых винт перед установкой на самолет уравновешивается со всем принадлежащим ему оборудованием (коком винта, проти-

вооблденительным устройством и т. п.), которое не дает возможности сквозного одевания винта на вал. В обычных станках винт помещается на валу между ножами, в лобовом же станке он насаживается на вал так, что находится вне ножей. Для компенсации веса винта на противоположном конце вала насаживается груз. Вал вместе с грузом и задним конусом предварительно должны быть тщательно уравновешены (неуравновешенность не должна быть более 1 гм).

Для того чтобы токи воздуха в помещении, в котором находится балансировочный станок, не влияли на точность уравновешивания, следует станок ставить в закрытом помещении, в котором нет таких токов.



Фиг. 317. Уравновешивание двухлопастного винта. Первое — горизонтальное положение.



Фиг. 318. Уравновешивание двухлопастного винта. Второе — вертикальное положение.

Уравновешивание винта состоит в следующем. При двухлопастном винте сначала винт уравновешивают в горизонтальном положении, помещая на более легкой лопасти (стремящейся подняться вверх) груз  $P_1$  на расстоянии 1 м от оси винта (фиг. 317). Этим перемещают центр тяжести винта в положение  $c_1$ . Затем винт поворачивают на станке на  $90^\circ$  и в таком «вертикальном» положении снова уравновешивают, помещая на втулке груз  $P_2$  на расстоянии  $a_2$  от оси винта в горизонтальном направлении (фиг. 318). Общая неуравновешенность винта будет выражаться следующим образом. Пусть в горизонтальном положении статическая неуравновешенность винта будет  $N_{с\text{гор}}$ , а в вертикальном положении  $N_{с\text{вер}}$ ; тогда

$$P_1 \cdot 1 = N_{с\text{гор}} = G_B a_r,$$

$$P_2 a_2 = N_{с\text{вер}} = G_B a_B,$$

откуда

$$a_r = \frac{N_{с\text{гор}}}{G_B}; \quad a_B = \frac{N_{с\text{вер}}}{G_B}.$$

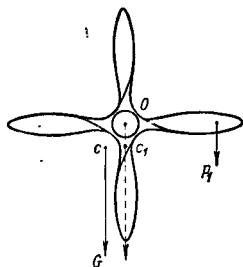
Несоосность центра тяжести винта  $a$  тогда будет

$$a = \sqrt{a_r^2 + a_n^2} = \frac{1}{G_b} \sqrt{N_{c \text{ гор}}^2 + N_{c \text{ вер}}^2},$$

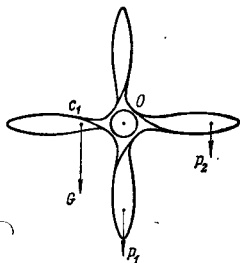
откуда статическая неуравновешенность винта

$$N_c = aG_b = \sqrt{N_{c \text{ гор}}^2 + N_{c \text{ вер}}^2}. \quad (383)$$

Если  $N_c$  равна или меньше величины, допускаемой по техническим условиям, то такой винт считается уравновешенным, если же она больше, то этот винт приходится доводить. Обычно эта доводка заключается в снятии очень тонкого слоя металла на более тяжелой лопасти.



Фиг. 319. Первое положение при уравновешивании четырехлопастного винта.



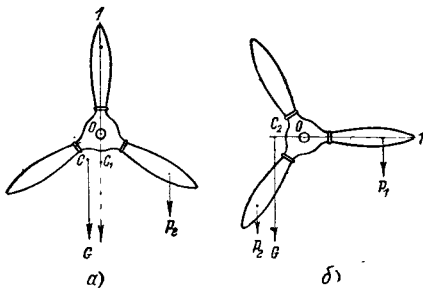
Фиг. 320. Второе положение при уравновешивании четырехлопастного винта.

Четырехлопастный винт уравновешивается тоже в двух положениях. В первом положении (фиг. 319) при горизонтальном положении одной пары лопастей винт уравновешивается подвешиванием на «легкую» лопасть груза  $P_1$  на расстоянии  $l$  м от центра вала винта. Центр тяжести перемещается тогда в положение  $c_1$ . Во втором положении (фиг. 320) при вертикальном положении предыдущей пары лопастей на «легкую» лопасть подвешивается груз  $P_2$  на расстоянии  $l$  м от центра винта, и тогда центр тяжести винта переходит в центр винта  $O$ . Общая неуравновешенность винта выразится следующим образом. Если неуравновешенность в первом положении  $N_{c1} = P_1$ , а во втором положении  $N_{c2} = P_2$ , то общая неуравновешенность, как и в предыдущем случае, будет

$$N_c = \sqrt{N_{c1}^2 + N_{c2}^2}.$$



При уравнивании трехлопастного винта какую-либо лопасть — назовем ее лопастью № 1 — устанавливают вертикально и уравнивают винт грузом  $P_2$ , подвешенным на расстоянии 1 м от центра вала винта на лопастях № 2 или 3. Этим центр тяжести переводится в положение  $c_1$  (фиг. 321, а). Во втором положении лопасть № 1 устанавливается горизонтально и винт уравнивается в этом положении подвешиванием к лопасти



Фиг. 321 Уравнивание трехлопастного винта.

№ 1 на расстоянии 1 м от центра груза  $P_1$ . Общая неуравновешенность трехлопастного винта будет

$$N_c = \sqrt{N_{c1}^2 + N_{c2}^2},$$

а так как

$$N_{c1} = P_1 \text{ и } N_{c2} = P_2 \sin 60^\circ,$$

то

$$N_c = \sqrt{P_1^2 + \frac{3}{4} P_2^2}. \quad (384)$$

### § 3. Динамическое и аэродинамическое уравнивание винтов

Если бы все геометрические размеры винта были соблюдены точно по номиналу и материал был совершенно однородным, то в производстве не стоял бы вопрос ни о статическом, ни о динамическом, ни о аэродинамическом уравнивании винта. Допуски в чертежах обычно назначаются с таким расчетом, чтобы все уравновешенности соблюдались в том случае, если винт имеет допуски, близкие к номиналу. Но может случиться, что все допуски так расположатся, что в сборке винт сильно отойдет от номинала и тогда неуравновешенности могут превзойти вели-

чины, назначенные в технических условиях. Поэтому должен существовать контроль не только за статической уравновешенностью, но также и за динамической и аэродинамической.

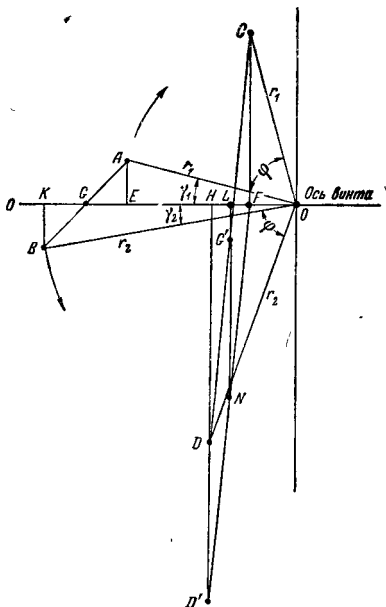
Динамическая неуравновешенность может контролироваться двумя способами — на специальных станках для динамической балансировки, в которых неуравновешенный динамический момент выявляется при вращении винта, и на станках для статического уравновешивания путем двойного уравновешивания при двух положениях лопастей.

Иден станков для динамической балансировки винтов заключается в том, что вращающийся динамически неуравновешенный винт колеблется на пружинах станка. Эти колебания записываются как по фазе (т. е. по расположению по отношению к винту), так и по величине амплитуды. В других станках колебания винта уравновешиваются непосредственно на станке и, следовательно, сразу определяется величина динамической неуравновешенности винта. Однако все эти станки не получили до сих пор большого распространения вследствие сложности работы на них, и поэтому обычно динамическая неуравновешенность контролируется статической. Разберем, каким образом можно статически определить динамическую неуравновешенность винта.

Неуравновешенность винта получается главным образом за счет лопастей, т. е., иными словами, наклон главной оси инерции винта к оси винта обусловлен тем, что центры тяжести лопастей не лежат в одной плоскости. Предположим, что при каком-то угле установки лопастей соблюдена статическая уравновешенность винта. Если при этом изменить угол установки, то при динамической неуравновешенности нарушится и статическая уравновешенность винта. Устанавливая связь между статической неуравновешенностью и динамической, можно получить значение динамической неуравновешенности. Установим эту связь.

Пусть мы имеем двухлопастный винт, который статически уравновешен, но центры тяжести лопастей не лежат в одной плоскости, перпендикулярной оси винта. Угол установки лопастей  $\varphi_1$ . Переставим лопасти винта на угол установки  $\varphi_2$  и обозначим  $\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi$ . Найдем ту величину  $a$ , на которую отойдет от оси вращения винта  $O - O$  центр тяжести лопастей при их перестановке на угол  $\varphi$ . Пусть ось, которая проектируется на плоскость чертежа (фиг. 322) в точку  $O$ , является осью поворота лопастей, причем ц. т. первой лопасти отстоит от этой оси на расстоянии  $r_1$ , а ц. т. второй лопасти — на расстоянии  $r_2$ . Обозначим угол между осью винта  $O - O$  и плоскостью, проходящей через ось лопастей  $x$  и их центр тяжести через  $\gamma_1$  для первой лопасти и  $\gamma_2$  для второй лопасти. Так как по условию винт в исходном положении статически уравновешен, то центр тяжести лопастей лежит на оси  $O - O$  в точке  $G$ . При повороте

лопастей на угол  $\varphi$  точка  $G$  сойдет с оси и займет положение  $G'$ . Расстояние  $LG'$  и будет то плечо  $a$ , на которое передвинется центр тяжести лопастей при повороте их на угол  $\varphi$ . Опустим из



Фиг 322 Влияние статического уравнивания винта на его динамическую неуравновешенность. Точки  $A$  и  $B$  — ц. т. лопастей при первом их положении,  $C$  и  $D$  — ц. т. при втором положении. Ось поворота лопастей перпендикулярна плоскости чертежа и проектируется в точку  $O$ .

точек  $C$  и  $D$  перпендикулярны на  $OO$ . Из точки  $F$  проведем линию, параллельную  $CD$ , до пересечения с линией  $HD$  в точке  $D'$ . Из подобия треугольников  $FHD'$  и  $FNL$  находим

$$\frac{LN}{HD'} = \frac{FL}{FH},$$

но так как  $DCFD'$  есть параллелограмм и  $G'$  лежит на середине  $CD$  (вес лопастей принят одинаковым), то  $FN = \frac{1}{2} FD'$  и

$$FL = \frac{1}{2} FH; \text{ отсюда } \frac{LN}{HD'} = \frac{1}{2}; \text{ по фиг. 322 видно, что}$$

$$LN = LG' + G'N = LG' + CF,$$

отсюда

$$\frac{LN}{HD'} = \frac{LG' + CF}{HD + CF} = \frac{1}{2};$$

$$LG' = \frac{1}{2} HD + \frac{1}{2} CF - CF = \frac{1}{2} HD - \frac{1}{2} CF;$$

но так как

$$HD = r_2 \sin(\varphi + \gamma_2) \text{ и } CF = r_1 \sin(\varphi + \gamma_1),$$

то

$$a = LG' = \frac{1}{2} [r_2 \sin(\varphi + \gamma_2) - r_1 \sin(\varphi + \gamma_1)]. \quad (385)$$

Динамический момент при исходном (первом) положении лопастей будет выражаться таким образом:

$$M_m = m\Omega^2 \cdot R \cdot KE,$$

где  $KE$  — расстояние между центрами тяжести лопастей по оси винта при первом их положении,  $m$  — масса одной лопасти, а  $R$  — расстояние ц. т. каждой из лопастей от оси винта. Из фиг. 322  $KE$  определяется так:

$$KE = KO - EO = r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1$$

и тогда

$$M_m = m\Omega^2 R (r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1). \quad (386)$$

Раскроем  $\sin$  в формуле (385).

$$2a = r_2 \sin \varphi \cos \gamma_2 + r_2 \sin \gamma_2 \cos \varphi - r_1 \sin \varphi \cos \gamma_1 - r_1 \sin \gamma_1 \cos \varphi = \\ = \sin \varphi (r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1) + r_2 \sin \gamma_2 \operatorname{ctg} \varphi - r_1 \sin \gamma_1 \operatorname{ctg} \varphi.$$

Определим отсюда  $r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1$ :

$$r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1 = \frac{2a}{\sin \varphi} - (r_2 \sin \gamma_2 - r_1 \sin \gamma_1) \operatorname{ctg} \varphi \quad (387)$$

и подставим в формулу (386):

$$M_m = m\Omega^2 \frac{R}{\sin \varphi} [2a - (r_2 \sin \gamma_2 - r_1 \sin \gamma_1) \cos \varphi]. \quad (388)$$

Так как мы предположили, что в первом положении лопасти уравновешены и, следовательно,  $KB=AE$ , то  $r_2 \sin \gamma_2 = r_1 \sin \gamma_1$ . В этом случае

$$M_m = m\Omega^2 \frac{2aR}{\sin \varphi}. \quad (389)$$

Найдем теперь динамический момент при втором положении лопастей; он будет выражаться таким образом:

$$M_{m1} = m\Omega^2 RHF,$$

но

$$HF = HO - FO = r_2 \cos(\varphi + \gamma_2) - r_1 \cos(\varphi + \gamma_1) = \\ = \sin \varphi (r_1 \sin \gamma_1 - r_2 \sin \gamma_2 + r_2 \cos \gamma_2 \operatorname{ctg} \varphi - r_1 \cos \gamma_1 \operatorname{ctg} \varphi),$$

и  $r_1 \sin \gamma_1 - r_2 \sin \gamma_2 = 0$ , а также, подставляя сюда значение  $r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1$  по формуле (387), получим

$$HF = 2a \operatorname{ctg} \varphi,$$

отсюда

$$M_{m1} = m\Omega^2 \frac{2aR}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (390)$$

Для простоты мы предположили, что при первом положении лопастей, когда  $\varphi = 0$ , статическая неуравновешенность равна нулю; однако мы можем и не делать этого предположения, а допустим, что при первом положении имеется какая-то статическая неуравновешенность  $N_{c\varphi}$ , вызванная наличием эксцентриситета п. т.  $a_1$ . Пусть статическая неуравновешенность при положении  $\varphi_2$  будет  $N_{c\varphi_2}$ , а эксцентриситет  $a_2$ .

Полагая в формуле (385)  $\varphi = 0$ , получим

$$a_1 = \frac{1}{2} (r_2 \sin \gamma_2 - r_1 \sin \gamma_1),$$

откуда

$$r_2 \sin \gamma_2 - r_1 \sin \gamma_1 = 2a_1.$$

Подставляя это значение в формулу (389) и заменив на  $a_2$ , получим

$$M_m = m\Omega^2 \frac{2R}{\sin \varphi} (a_2 + a_1 \cos \varphi). \quad (391)$$

Так как  $N_{c\varphi_1} = 2a_1 mg$ ,  $N_{c\varphi_2} = 2a_2 mg$ , то формула (391) примет вид

$$M_m = \frac{\Omega^2 R}{g \sin \varphi} (N_{c\varphi_2} + N_{c\varphi_1} \cos \varphi). \quad (392)$$

Если  $N_{c\varphi_1} = 0$ , то получим

$$M_m = \frac{\Omega^2 R N_{c\varphi_2}}{g \sin \varphi}. \quad (393)$$

На основании формулы (312) формулы (392) и (393) для динамического момента в первом положении лопастей могут быть преобразованы так:

$$\sqrt{N_{m1}} = \frac{1000R}{\sin \varphi} (N_{c \varphi 2} + N_{c \varphi 1} \cos \varphi), \quad (394)$$

$$N_{m1} = \frac{1000RN_{c \varphi 2}}{\sin \varphi}. \quad (395)$$

Формулу для динамического момента во втором положении лопастей получим, представив выражение для  $HF$  в таком виде:

$$HF = 2 \sin \varphi \left[ a_1 + \frac{\operatorname{ctg} \varphi}{\sin \varphi} (a_2 - a_1 \cos \varphi) \right].$$

откуда

$$M_m = m\Omega^2 R^2 \sin \varphi \left[ a_1 + \frac{\cos \varphi}{\sin^2 \varphi} (a_2 - a_1 \cos \varphi) \right].$$

Если  $a_1 = 0$ , то эта формула обращается в формулу (390).

Таким образом для динамического момента во втором положении лопастей

$$N_{m2} = 1000R \sin \varphi \left[ N_{c \varphi 1} + \frac{\cos \varphi}{\sin^2 \varphi} (N_{c \varphi 2} - N_{c \varphi 1} \cos \varphi) \right]. \quad (396)$$

Таким образом формулы (394) и (396) дают связь между динамической и статической неуравновешенностью винта при повороте лопастей на угол  $\varphi$ . В виду того что в эти формулы входят только угол  $\varphi$ , радиус ц. т. лопастей и статические неуравновешенности всего винта, причем мы принимаем в данных формулах углы  $\varphi$  и радиусы  $R$  одинаковыми для всех лопастей, то указанную формулу можно применять для винта с любым числом лопастей.

На производстве все винты всегда уравновешивают по двум углам установки и этим обеспечивается не только статическая, но и динамическая уравновешенность винта.

Аэродинамическая уравновешенность винта обеспечивается выполнением геометрических размеров лопастей в пределах допусков.

---

ЧАСТЬ VI

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВИНТОВ

---

Глава XXIII

### ИСПЫТАНИЕ ВИНТА И ЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

#### § 1. Испытание опытных винтов

Всякий винт новой или значительно измененной конструкции носит название опытного винта. Такой винт до установки его на самолет и полетов следует всесторонне испытать. Испытания производятся для того, чтобы быть уверенным, что данная конструкция винта прочна и безопасна для эксплуатации. Кроме того, всякий опытный винт следует испытать с точки зрения его эксплуатационных и аэродинамических качеств. Таким образом испытания опытного винта можно разделить на четыре части.

1. Испытание на прочность.
2. Испытание механизма винта.
3. Аэродинамические испытания на самолете.
4. Испытание всех деталей оборудования винта.

Прочность винта имеет большое значение для безопасности полета, ибо поломка винта (например, отрыв лопасти) может повести к нежелательным последствиям и окончиться в лучшем случае аварией, а иногда и катастрофой. Поэтому к прочности винта следует относиться как к прочности самой ответственной детали самолета. Между тем винт и большинство его деталей оборудования находятся в весьма тяжелых условиях работы. Кроме большой статической нагрузки, выражающейся в действии на винт большой центробежной силы и сил аэродинамических, как мы видели в гл. XV, на винт действуют иногда довольно значительной величины динамические нагрузки. Эти последние вызывают в материале винта усталостные явления, которые могут проявиться не сразу, а по истечении некоторого времени эксплуатации. Поэтому нельзя о прочности винта судить по кратковременным статическим испытаниям, а приходится прибегать к длительным испытаниям, которые выявили бы прочность винта на усталость.

Подобно самолету, конструкцию которого испытывают на перегрузку, винт тоже желательно испытывать на перегрузку,

матном порядке. Частота звука, вызываемого таким периодическим отрывом вихрей от пластинки, выражается формулой

$$p = \frac{W}{6b},$$

где  $W$  — скорость потока в  $м/сек$ ,  $b$  — ширина пластинки в  $м$ . Если эта пластинка или крыло стоит под некоторым углом, меньшим  $90^\circ$ , то под  $b$  следует подразумевать проекцию ширины на направление, перпендикулярное направлению потока, тогда

$$p = \frac{W}{6b \sin \alpha},$$

где  $\alpha$  — угол атаки лопасти винта. Так как вдоль лопасти скорость набегающего потока изменяется, то следует ожидать, что на разных сечениях лопасти будут возбуждаться и разной высоты звуки. Чем дальше от оси вращения винта, тем звук вихрей будет выше. Следовательно, общий вихревой звук винта представляет собой сложный комплекс звуков разной частоты. Поэтому в отличие от звука вращения, который имеет до известной степени музыкальный тон, звук вихрей является шумом. Происходит это не только от того, что, как мы видели, он сложен, но и от того, что вихреобразование на лопастях неправильное, неустойчивое и интенсивность вихрей неравномерная. Так как можно считать, что наиболее интенсивные вихри срываются примерно на радиусе  $0,75 R$ , то наиболее интенсивный звук вихрей будет иметь частоту

$$p = \frac{\sqrt{V^2 + (2\pi n_s 0,75R)^2}}{6b \sin \alpha}.$$

Если взять винт диаметром  $3,2 м$ , скорость полета  $120 м/сек$ , ширину лопасти на  $0,75 R$  равную  $0,110 м$ , число оборотов  $1600$  в минуту и угол атаки  $5^\circ$ , то частота будет

$$p = \frac{\sqrt{200^2 + 120^2}}{6 \cdot 0,11 \sin 5^\circ} = 4\ 100 \text{ гц.}$$

Кроме звука вращения и вихрей, иногда бывает еще звук от вибрации лопастей. Однако, как правило, лопасти винта не должны вибрировать и этого звука не должно существовать. В редких случаях звук от вибрации лопастей может быть достаточно сильным. Частота его небольшая — порядка нескольких десятков герц.

Что касается ослабления звука с расстоянием, то опыты показали, что уровень слышимости звука от винта изменяется обратно пропорционально расстоянию в степени, немного меньшей, чем 2, — около 1,7.



### § 3. Снижение шума винта

Как было выше упомянуто, существует порог болевого ощущения звука. Следовательно, громкие звуки и шумы вызывают у человека болевые ощущения. Так как экипажу и пассажирам приходится нюгда долгое время находиться на летящем самолете, то вполне естественно должно быть поставлено требование о возможном снижении громкости шумов на самолете и, в частности, о снижении шума винта.

Громкие шумы весьма неблагоприятно воздействуют физиологически на человека — скорее наступает утомление, притупляется внимание и т. д. Поэтому конструктору винтов всегда надо иметь в виду шум, производимый винтом, и по возможности конструктивными мероприятиями его снизить.

Как мы видели, составляющая звука вращения — звук утолщения тем меньше, чем тоньше лопасть винта. Поэтому с точки зрения уменьшения этого шума лопасти винта выгодно делать тоньше. Как указано в гл. XII, и с точки зрения аэродинамической выгоднее делать лопасти тоньше.

Большое влияние на силу звука утолщения оказывает скорость конца лопасти, — чем больше эта скорость, тем сильнее звук.

В свое время на четырехмоторном самолете ТБ-3 вначале были установлены безредукторные двигатели М-34 и винты диаметром 3,2 м, так что окружная скорость конца лопасти была 320 м/сек, а полная скорость конца лопасти 325 м/сек, т. е. близка скорости звука. Эти винты издавали очень сильный шум. Когда на ту же машину были поставлены редукторные двигатели с винтами диаметром 4,4 м и окружной скоростью конца лопасти 250 м/сек, то шум значительно снизился. В первом случае он был для летчика почти невыносимым, а во втором — вполне терпимым.

Звук тяги зависит от нагрузки на лопасть и при одинаковых других условиях, если нагрузку на лопасть тягой снизить, то шум должен уменьшиться. Это снижение нагрузки может быть сделано уширением лопастей или увеличением их числа. В самолете ТБ-3 на редукторные двигатели были впоследствии установлены четырехлопастные винты диаметром 4,1 м, у которых звук еще уменьшился по сравнению с двухлопастными диаметром 4,4 м. Это уменьшение произошло как за счет уменьшения концевой скорости, так и за счет увеличения числа лопастей и снижения нагрузки.

Вихревой шум, как мы видели, имеет очень большую частоту. Как известно, изолировать звук проще высокой частоты, чем низкой. Если самолет летит на сравнительно большой высоте, то высокие частоты его поглощаются атмосферой, а пропускается полоса частот от 100 до 400 гц. Поэтому с земли звук вихрей почти не будет слышен.

Таким образом для ослабления звука конструктор винта всегда должен иметь в виду, что с точки зрения шумности винта желательно уменьшать окружную скорость, толщину лопасти и нагрузку на лопасть. Что касается звука вихрей, то уменьшить его влияние можно лишь хорошей звукоизоляцией кабины.

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОИЗВОДСТВА ВИНТОВ***Глава XXI***КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЛОПАСТЕЙ  
И ВТУЛОК ВИНТОВ****§ 1. Основные принципы производства винтов**

Винт является точным механизмом, в котором должна быть соблюдена не только геометрическая, но и весовая симметрия. Детали винта при его работе сильно нагружены статическими и динамическими нагрузками. Все это налагает повышенные требования к производству винтов. Каждая деталь винта должна быть взаимозаменяема как геометрически, так и в весовом отношении. Как указано в гл. XXII, аэродинамическое уравновешивание винта накладывает большие ограничения в допусках лопастей, а это требует весьма тщательного изготовления лопастей. Первое правило производителя — это в точности соблюдать те допуски, которые проставлены на чертеже, причем их надо соблюдать так, чтобы в деталях получались не крайние величины допусков, а средние их величины, т. е. чтобы наименьшая величина размера детали была близка к номиналу. Если мы говорим, что такая-то деталь должна иметь точный размер, или какая-либо ось должна быть перпендикулярна такой-то линии, то это значит, что наименьшее значение размера должно быть близко к номиналу и только в исключительных, редких случаях итти по границам допусков и во всяком случае не выходить из их пределов. То же самое относится и к соблюдению углов наклона сечений лопастей.

Взаимозаменяемость не только геометрическая, но и весовая всех деталей винта должна являться непреложным законом. Всегда нужно помнить об этом при разработке технологии производства винтов. Часть ответственности в достижении весовой взаимозаменяемости ложится также и на заводы, поставляющие заготовки; необходимо иметь материал совершенно однородный. Поэтому обычно предпочитают делать детали не из литья, а из штамповки, если же из литья, то полученного под давлением или центробежным путем.

Большое значение в эксплуатации имеет долговечность работы винта, которая характеризуется временем его работы на двигателе до ремонта. В эксплуатационной практике это время называют «ресурсом» винта. Обычно долговечность винта определяется качеством его производства. Тщательное изготовление винта увеличивает его долговечность, а следовательно, уменьшает стоимость часа его работы.

Не нужно смешивать указанную долговечность работы винта с общей его долговечностью, которая составляется из суммы времени, составляемой из нескольких промежутков между ремонтами. В практике эксплуатации были случаи общей наработки винтов свыше 13 000 час.

В настоящей главе мы рассмотрим подробно уравнивание винтов и лопастей и лишь кратко остановимся на процессах изготовления лопастей и втулок.

## § 2. Изготовление деревянных моноблочных винтов

Деревянные моноблочные винты по конструкции являются наиболее простыми и их производство также очень просто. Квалифицированный столяр, имея обычный набор столярных инструментов, может изготовить такой винт. На заре авиации деревянные винты строились столярными мастерскими.

Моноблочные винты можно изготавливать из следующих пород дерева: красное дерево, американский орех (гикори), ясень, дуб, бук, лиственница, сосна и т. п. В последнее время применяется лишь сосна и прессованная древесина. В поделку идут доски шириной от 100 мм и толщиной 20—25 мм. Материал предварительно высушивают в сушилках, с тем чтобы влажность была не выше заданной. По шаблону согласно чертежу вырезают из досок дроки, из которых в дальнейшем и склеивают болванки винтов. Дроки могут быть составными, — склеенными по ширине. Можно их также склеивать и по длине на-ус, но только необходимо следить, чтобы в дальнейшем, при склейке болванки, в соседних дроках места склейки не совпадали.

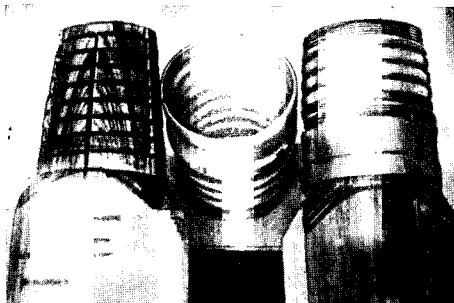
Дроки отфуговывают с обеих сторон и затем склеивают в струбцинах или в специальных гидравлических прессах. После склейки просверливают центральное отверстие, а затем болванка поступает или прямо на верстак для дальнейшей ручной обработки по шаблонам — в случае мелкосерийного производства или на копировальный станок, который по шаблону фрезой обрабатывает с обеих сторон перо лопасти. После копировального станка винт поступает на верстак для окончательной оправки по шаблонам. После этого винт оклеивают материей и производят оковку передней кромки, а затем шпатлевку и окраску. До оклейки материей винт проверяют на балансировочном станке, а окончательное уравнивание его произво-

дят после окраски. В настоящее время такие винты изготавливаются только для маломощных самолетов.

Кроме указанного простейшего процесса производства моноблочных винтов, применяется также более сложный технологический процесс. После оправки тем или иным способом винта и оклейки его материей на лопасти наносится целлулоидная пленка толщиной около 1 мм, а затем производится оковка передней кромки и окраска. Целлулоидная пленка наносится в виде размягченного листового целлулоида на лопасть, а затем эта лопасть под гидравлическим прессом выдерживается в сушильном шкафу. После этого она ручным способом окончательно оправляется.

### § 3. Изготовление деревянных лопастей

Изготовление деревянных лопастей, вставляемых во втулку фиксированного или изменяемого шага, более сложно, чем изготовление моноблочных винтов, и требует специального заводского оборудования. Объясняется это тем, что обычно комлевая

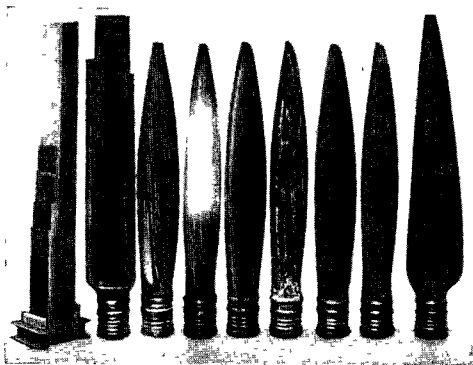


Фиг. 285. Комлевая часть деревянной лопасти с нарезкой.

часть таких лопастей делается из прессованной древесины, имеющей значительную твердость. Кроме того, для правильного и надежного соединения комля со стаканом втулки требуется относительно высокая точность изготовления.

Существует несколько технологических процессов изготовления лопастей из прессованной древесины. Эти процессы различаются между собой, во-первых, потому, что сама конструкция лопастей бывает разная, например, лопасти могут делаться по длине из различного материала — у комля из твердой прессованной древесины, а само перо может быть сделано из мягкого,

легкого дерева, как сосна, ель. Во-вторых, сам процесс изготовления может быть различным, например, лопасть можно склеивать из дроков или при определенной повышенной температуре прессовать из шпона, пропитанного специальным наполнителем. Несколько особняком стоит изготовление комлевой части лопасти. У комлевой части на токарном станке делается нарезка, на которую навинчивается или напрессовывается стальной стакан. Специальный цемент, залитый между соединяемыми деталями, после высушивания крепко сцепляет стальной стакан с деревом (фиг. 285). Весь процесс изготовления лопасти состоит в следующем:



Фиг. 286. Различные стадии изготовления деревянной лопасти.

1. Отдельные дроки древесины плотно прифуговываются друг к другу, причем каждая дрока склеена на-ус из двух частей из прессованной древесины (малая часть) и легкой древесины (большая часть).
2. Дроки склеиваются между собой под давлением гидравлического пресса.
3. Находятся центра болванки.
4. На комлевой части делается винтовая нарезка.
5. На комлеву часть наворачивается или напрессовывается стакан.
6. На копировальном станке обрабатывается перо лопасти.
7. Вручную лопасть доводится до нужных размеров по шаблону.
8. Лопасть обклеивается материей.

9. На передней кромке лопасти укрепляется с помощью гвоздей металлическая сетка.

10. На переднюю кромку наплавляется оковка.

11. На лопасть наносится целлулоидное покрытие и она выдерживается под прессом.

12. Лопасть окончательно оправляется.

13. Лопасть окрашивается.

14. Лопасть уравнивается. Неуровненность ее доводится до минимальной величины в пределах технических условий.

На фиг. 286 показаны различные стадии изготовления деревянной лопасти.

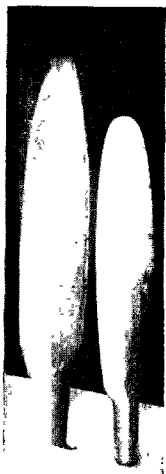
Можно деревянные лопасти делать и из шпона, который предварительно пропитывается специальным составом, отдельные дроки из шпона укладываются в специальные штампы и лопасть прессуется, причем под влиянием температуры, которая поддерживается на определенном уровне, происходит полимеризация пропитывающего вещества и лопасть получается монолитной. Затем для большего сопротивления передней кромки действию твердых частиц при работе винта на переднюю кромку укрепляется латунная оковка. Эту оковку можно устанавливать на заклепках. Комлевая часть заделывается в стакан так же, как описано выше.

#### § 4. Изготовление дуралюминовых лопастей

В отличие от деревянных лопастей, изготовление которых сосредоточено на одном заводе, сплошные дуралюминовые лопасти изготавливаются последовательно на двух заводах. Заготовка лопастей требует специального тяжелого оборудования и производится на одном заводе, а дальнейшая обработка — на другом — собственно винтовом заводе. Таким образом производство дуралюминовых лопастей разделяется на две стадии — заготовку лопастей и их обработку.

Заготовка лопастей должна быть такой, чтобы при дальнейшей механической обработке съем материала был наименьшим, т. е. заготовка по форме должна быть возможно ближе к окончательно отделанной лопасти (фиг. 287). Это достигается штамповкой или прессовкой заготовки. При штамповке и малой механической обработке волокна материала заготовки следуют за формой заготовки и не перерезываются, отчего окончательно отделанная лопасть бывает прочнее, чем изготовленная из ковальной болванки. Последняя иногда применяется при изготовлении опытных единичных лопастей (фиг. 288).

Для того чтобы заготовка имела более однородный характер, а также легче обрабатывалась под штампом, до штамповки заготовку пропускают через ряд валков, которые постепенно обжимают ее (фиг. 289). Если конструкция лопасти такова что на комлевой ее части имеется упорный подшипник, то комлевою



Фиг. 287. Штамповка дуралеевой лопасти. Справа готовая лопасть



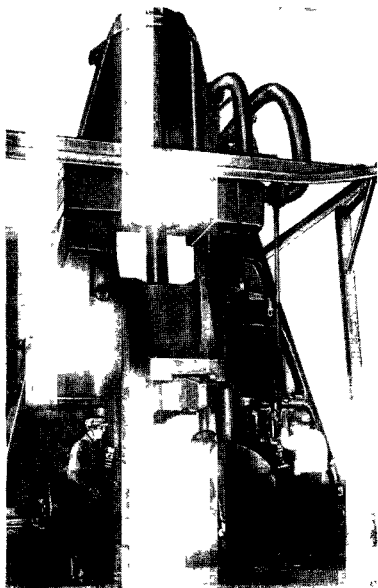
Фиг. 288. Поковка дуралюминовой лопасти. Справа готовая лопасть.



Фиг. 289. Валки для придания заготовке дуралюминовой лопасти различной толщины по длине.



часть лопасти, после того как обойма подшипника одета, осаживают на горизонтально ковочной машине.



Фиг. 290. Штампование дуралюминовой лопасти под молотом.

Последовательно изготовленне заготовки состоит из следующих операций.

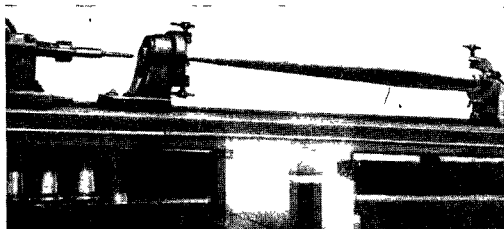
1. По количеству необходимого материала обрезывается брусок.
2. Брусок центрируется.
3. В случае необходимости брусок обдирается на токарном станке.
4. Нагревается до  $450^{\circ}$ .
5. Прокатывается на специальных валках, которые постепенно обжимают заготовку (фиг. 289).
6. Нагревается и штампуется под молотом (фиг. 290).

7. Получившийся облой и концевой шипцевой захват обрезаются, из них изготавливаются образцы, которые исследуются в лаборатории на механические и физико-химические качества материала.

8. На цилиндрическую комлевую часть надеваются обоймы роликовых подшипников, если таковые предусмотрены в конструкции лопасти. После этого цилиндрическая часть нагревается и осаживается на горизонтально ковочной машине.

9. После указанных операций производится термическая обработка поковки, состоящая из медленного нагрева до  $500^{\circ}$ , закалки в горячей воде и искусственного старения в печи.

На винтовом заводе заготовка лопасти в виде штамповки (фиг. 287) подвергается дальнейшей обработке с последовательным применением следующих операций.



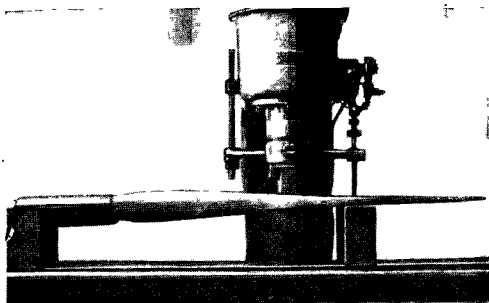
Фиг. 291. Центровка лопасти.

1. Наметка центров по концам лопастей (фиг. 291) на специальном центровальном станке. Специальные приспособления позволяют поворачивать штамповку под любым углом и смещать положение ее оси по высоте над плитой станка. В случае необходимости до центровки производится правка штамповки

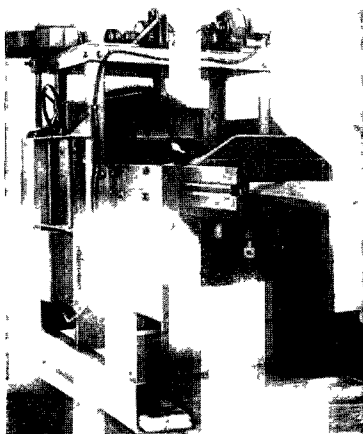
2. Правка штамповки под гидропрессом (фиг. 292), а в случае надобности и выкрутка ее (фиг. 293).

3. Токарная обработка комля лопасти и установление «установочной базы». В случае резьбового крепления лопасти — нарезка резьбы. Обработка комля может производиться на планетарном станке при неподвижной лопасти (фиг. 294) или на обыкновенном — при вращающейся в люнете лопасти с помощью ведущего барабана (фиг. 295).

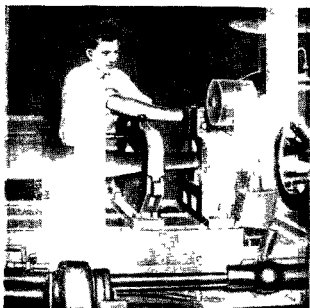
4. Если в конструкции предусмотрено глубокое сверление, то такое производится на специальном вертикальном сверлильном станке в несколько проходов с помощью особых конических разверток (фиг. 296).



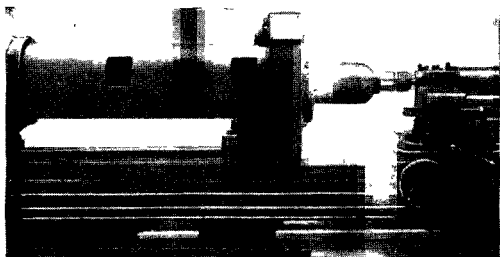
Фиг 292 Правка лопасти под прессом.



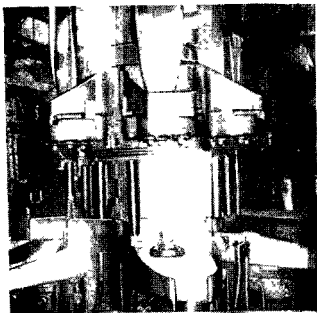
Фиг 293. Выкрутка лопасти специальным прессом.



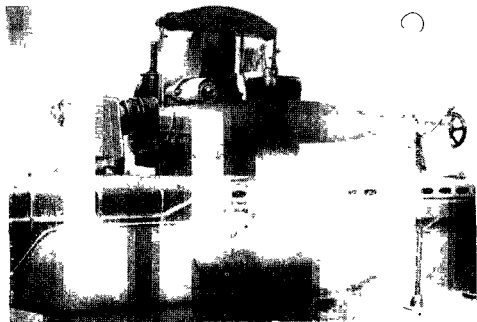
Фиг. 294. Обработка комлевой части лопасти на планетарном станке.



Фиг. 295. Обработка комлевой части лопасти и нарезка резьбы.



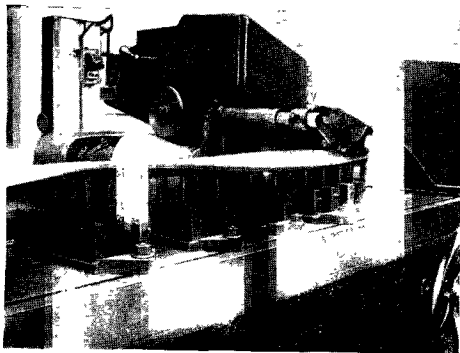
Фиг 296. Глубокое сверление комлевой части лопасти.



Фиг 297 Фрезерование кромок лопасти на копировальном станке.

5. Фрезеровка кромок лопасти на специальном копировально-фрезерном станке (фиг. 297). Обе кромки фрезеруются одновременно по контуру; при этом лопасть медленно поворачивается с помощью копирной линейки.

6. После разметки сечений на кромках лопасть фрезеруется последовательно на двух специальных копировально-фрезерных станках по копирам (фиг. 298). На одном станке фрезеруется одна сторона, а на другом — другая.



Фиг. 298. Фрезерование поверхности лопасти на копировальном станке.

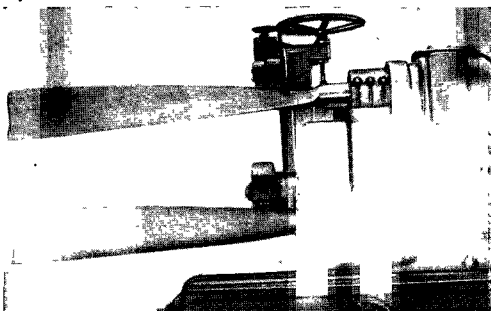
7. Прикомлевая часть лопасти фрезеруется отдельно также на специальном копировально-фрезерном станке (фиг. 299). В головку верхнего шпинделя крепится лопасть, служащая копиром, и по ней ходит ролик копира, а в головку нижнего шпинделя крепится фрезеруемая лопасть. Как лопасть, так и копир одновременно вращаются, при этом фреза обкатывает лопасть.

8. Закругление кромок а также зачистка следов фрезы производится вручную специальной фрезерной головкой с электромотором (фиг. 300).

9. В конструкциях лопастей без глубокого сверления высверливается обычным сверлом канал для закладки уравнивающей лопасти груза (фиг. 301).

10. Подправка лопасти под прессом (фиг. 292).

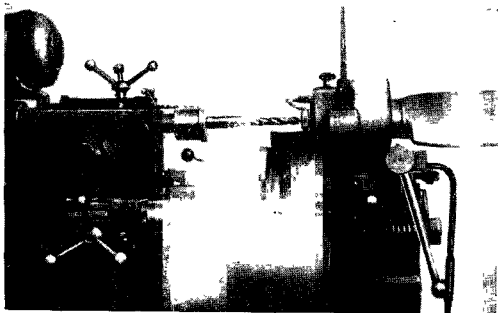
11. Шлифование лопастей по окончательным шаблонам с помощью шлифовальной головки с наждачной шкуркой (фиг. 302).



Фиг. 299. Фрезерование прикомлевой части лопасти на копировальном станке.



Фиг. 300. Зачистка вручную поверхностей лопасти после фрезерования.



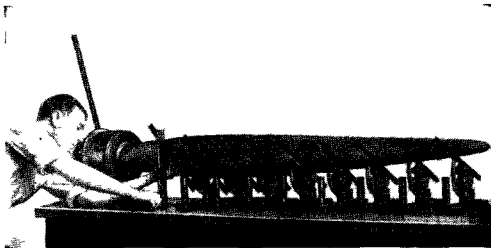
Фиг. 301. Сверление комлевой части лопасти.



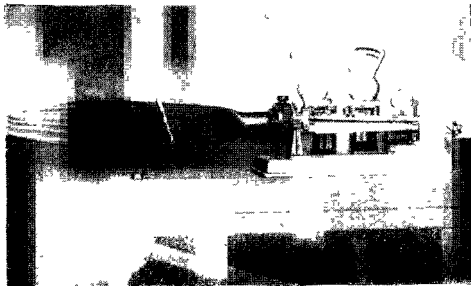
Фиг. 302. Шлифование поверхностей лопасти.



12. Окончательный контроль лопасти по геометрическим размерам (фиг. 303).
13. Окраска лопасти.
14. Уравновешивание лопасти (фиг. 304).



Фиг. 303. Контроль сечений лопасти.



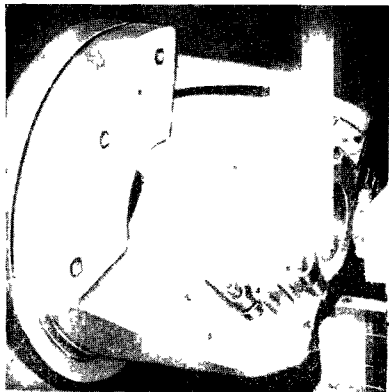
Фиг. 304. Уравновешивание лопасти.

При механической обработке тщательно изготовленной штамповки с малыми припусками снимается небольшое количество материала. На фиг. 287 дано сравнение штамповки и лопасти в готовом обработанном виде.

#### § 5. Изготовление втулок винтов

Технология изготовления втулок винтов и их деталей по существу является обычной технологией машинных деталей. Заготовки этих деталей в зависимости от того, большая это лезель

по размеру или нет, серийное изготовление или опытный образец, представляют собой штамповку, отливку или обычный стандартный материал (пруток). Все детали втулки обрабатываются по большей части на обычных металлорежущих станках и лишь для некоторых операций применяются специальные станки. Обработка деталей ведется по 2-му и 3-му классам точности, причем свободные размеры обрабатываются по 5-му

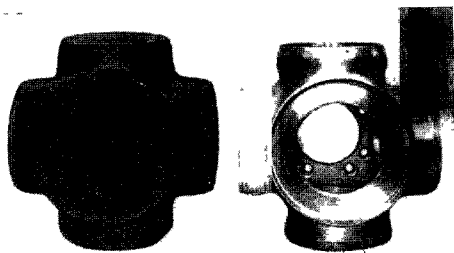


Фиг 305. Обработка корпуса втулки в специальном приспособлении.

классу. Во многих случаях при сопряжении деталей применяется шлифование поверхностей, а иногда даже и современные более тонкие операции, как обкатка, притирка и т. п. Большое значение в изготовлении деталей втулок имеет взаимозаменяемость деталей; поэтому обработка деталей должна производиться в приспособлениях, обеспечивающих эту взаимозаменяемость, с применением различных кондукторов и точных измерителей.

Основной, наиболее трудоемкой деталью втулки является корпус втулки. Как мы видели в § 8 гл. III, по конструкции втулка может быть разъемной и целой. Разъемная втулка более удобна для изготовления. Заготовка делается по отдельности для каждой половинки штамповкой под молотом. После штамповки обе половинки обрабатываются по плоскости соприкосновения, в них просверливаются по кондуктору отверстия согласно чертежу, обе половинки соединяются болтами и дальнейшая обра-

ботка производится, как целой заготовки (фиг. 305). Вся обработка ведется резцом, только некоторые части, как, например, гнезда для посадки узла лопасти, шлифуются. Весьма важна большая точность в пределах указанных на чертеже допусков в обработке рукавов втулки, причем необходима особая точность в перпендикулярности осей лопастей к оси винта, нахождении осей всех лопастей в одной плоскости и соблюдении одинаковости углов между осями лопастей. Кроме того, необходимо соблюдать одинаковость в расстоянии от оси винта до внутренней стороны буртика, в который упирается опорный подшипник узла крепления лопасти. В остальном при изготовлении деталей необходимо всегда помнить, что все детали втулки нагружаются



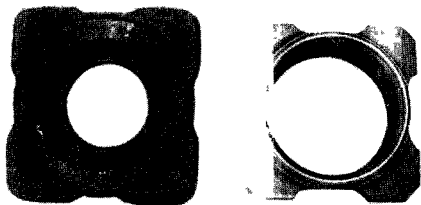
Фиг. 306. Заготовка корпуса втулки четырехлопастного винта  
Справа обработанный корпус.

большими центробежными силами и малейшая геометрическая, а следовательно, и весовая несимметрия влечет за собой неуравновешенность винта и отсутствие весовой взаимозаменяемости.

В некоторых конструкциях разъемных втулок часть втулки, надеваемая на носок вала, составляет одно целое с задней половинкой втулки, в других же имеется специальная переходная деталь (крестовина). В первом случае штамповка имеет довольно сложную форму. Иногда для упрощения производства ступицу, сажаемую на носок вала, делают в виде отдельной детали (фиг. 308), которая соединяется с основным корпусом на болтах. Тогда форма штамповки корпуса получается значительно проще (фиг. 305). И в этом и другом случаях втулка, сажаемая на шлицы носка вала, протягивается на протяжном станке для нарезки шлиц. Шлицы делаются по стандарту.

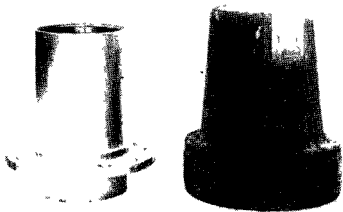
При изготовлении корпуса из двух половинок штампованная заготовка весит примерно на 20—25% больше окончательно обработанной детали.

При целом корпусе заготовка получается весьма громоздкой и хотя всюду, где это возможно, производится прошивка отверстий (фиг. 306), все же заготовка получается очень тяжелой — примерно на 300—400% тяжелее обработанной детали. Кроме



Фиг. 307. Заготовка траверсы механизма поворота лопастей винта. Справа обработанная траверса.

того, что получается потеря в металле на стружку и тратится большее время на механическую обработку, тяжелая заготовка требует более громоздких приспособлений и станков. Волокна



Фиг. 308. Заготовка ступицы втулки лопасти. Слева обработанная ступица.

могут быть при обработке перерезаны, поэтому прочность такой втулки будет несколько пониженная.

Материалом для изготовления корпуса должна служить вязкая, прочная сталь; для этих целей лучше всего применять хромованадиевую сталь марки ЭХ1В.

Другой важной деталью втулки в некоторых типах винтов является крестовина. Заготовка ее получается в виде штамповки. Обработка ее должна быть произведена с большой точностью, ибо крестовина — весьма ответственная деталь. Так же как и в корпусе, оси рогов крестовины должны лежать в одной плоскости, строго перпендикулярной к оси винта; углы между осями рогов крестовины должны быть одинаковыми. Другие более мелкие детали заготавливаются по форме возможно ближе к готовой детали, чтобы оставалось меньше механической обработки (фиг. 307, 308).

### § 6. Сборка винтов

Сборка является конечным этапом в процессе изготовления винта; от тщательности сборки в большой степени зависит качество винта. Процесс сборки весьма прост, если все детали изготовлены хорошо и полностью взаимозаменяемы, однако он чрезвычайно сложен, если детали изготовлены плохо и взаимозаменяемы. В последнем случае процесс сборки превращается в процесс подгонки деталей, и в конечном счете винты, собранные таким образом, не могут иметь требуемого качества. Часто, если завод не достиг еще полной взаимозаменяемости деталей, сборку производят подбором деталей, т. е. к каждому собираемому винту детали комплектуются, чтобы собранный винт удовлетворял техническим требованиям.

При массовом изготовлении сборка производится на конвейере, причем сборке подлежат в отдельности основные узлы винта, как то: втулка, цилиндрическая группа и т. п. Для того, чтобы в конечном счете получить достаточно уравновешенный винт, отдельные его узлы уравновешиваются самостоятельно. Основным правилом сборки является правильная затяжка болтов и контровка их. Для правильной затяжки болтов иногда применяют предельные ключи, которыми можно затянуть гайку лишь до определенного момента на ключе. Во время сборки на трущиеся части должна быть положена смазка в определенных количествах.

## Глава XXII

### УРАВНОВЕШИВАНИЕ ВИНТОВ

#### § 1. Причины, порождающие неуравновешенность винтов

В § 2 главы XVIII рассмотрены различные виды неуравновешенности винтов. Задачей производства является довести эти неуравновешенности до наименьших величин в пределах допусков, даваемых техническими условиями. Как и всякая производственная задача, она решается построением соответствующей технологии, обеспечивающей выполнение деталей строго по чертежам, и соответствующим контролем. Этот контроль за не-

уравновешенностью может быть частным и общим. В первом случае он касается отдельных деталей, а во втором — всего винта в целом.

Причинами неуравновешенности винта могут быть:

1. Геометрическая асимметрия винта.
2. Весовая асимметрия винта.
3. Механическая асимметрия винта.

*Условие геометрической симметрии* лопастей заключается в том, что сечения всех лопастей на любом радиусе должны быть одинаково расположены в пространстве относительно плоскости, перпендикулярной оси винта. В случае геометрической асимметрии лопастей аэродинамические силы на лопастях будут неодинаковы и по-разному направлены, что, как мы видели в § 2 гл. XVIII, вызовет неуравновешенность аэродинамической силы и момента. Нарушение геометрической симметрии является следствием отступлений от номинальных чертежных размеров.

*Весовая симметрия* должна соблюдаться в винте относительно его оси, т. е. чтобы весовые моменты его лопастей — произведение веса лопасти на расстояние центра тяжести ее от оси, были одинаковыми. Этим будет обеспечиваться статическая уравновешенность винта. Для обеспечения динамической уравновешенности винта необходимо, чтобы была обеспечена весовая симметрия также и относительно плоскости, перпендикулярной оси винта и проходящей через центр тяжести винта, т. е. чтобы центры тяжести каждой половины винта, рассеченного указанной плоскостью, находились на оси винта.

*Механической асимметрией* называется нарушение геометрической симметрии под действием сил при работающем винте. Как мы знаем из § 1 гл. XV, на лопасти винта действуют растягивающие, изгибающие и скручивающие силы; под действием этих сил может нарушиться как геометрическая, так и весовая симметрия и, следовательно, может нарушиться уравновешенность винта.

Несомненно, что между геометрической, весовой и механической симметрией винта существует взаимная связь. Нарушение геометрической симметрии может повести за собой нарушение весовой и механической симметрии. Нарушение весовой симметрии может повести к нарушению симметрии механической.

Разберем, как разные виды асимметрии винта могут влиять на неуравновешенность винта.

На неуравновешенность аэродинамических сил и моментов непосредственно может влиять только геометрическая асимметрия винта. Действительно, аэродинамические силы, развивающиеся на лопастях при определенной скорости вращения винта, будут зависеть только от ширины, толщины и длины лопасти, а также от угла атаки; а это все величины, которые могут нарушить геометрическую симметрию винта. Весовая и механическая

асимметрии могут влиять на неуравновешенность аэродинамических сил и моментов лишь косвенно — через нарушение геометрической симметрии.

Возьмем пример. Предположим, что у трехлопастного винта диаметром 3,8 м при работе с числом оборотов 1350 об/мин на месте с углом установки лопастей  $20^\circ$ , а в полете при  $\lambda=1,5$  с углом установки  $\varphi=35^\circ$ , одна лопасть установлена под углом на  $20'$  большим, чем две другие. Разность между тягой лопасти, установленной под углом  $\varphi+20'$ , и тягой лопасти, установленной под углом  $\varphi$ , можно выразить так:

$$\Delta P = \frac{\Delta \alpha}{\kappa} \rho n_s^2 D^4,$$

где  $\Delta \alpha$  — разность коэффициентов тяги двух винтов, углы установки которых отличаются на  $20'$ . Если обозначим расстояние точки приложения тяги одной лопасти от оси винта через  $a$ , то момент от наличия разности тяг лопастей будет

$$M = a \Delta P.$$

Неуравновешенность аэродинамического момента найдется по формуле (325):

$$N_{aM} = \frac{1000gM}{4\pi^2 n_s^2}$$

или

$$N_{aM} = \frac{1000ga\rho D^4}{4\pi^2 \kappa} \Delta \alpha. \quad (369)$$

$\Delta \alpha$  можно найти следующим образом. При работе винта на месте по графикам характеристик винта находим, что при  $\lambda=0$ ,  $\varphi=20^\circ$ ;  $\alpha=0,155$ ; при  $\varphi=25^\circ$ ,  $\alpha=0,183$ ; следовательно,  $\frac{\Delta \alpha}{\Delta \varphi} = \frac{0,028}{5^\circ} = 0,0056$ , а для  $\Delta \varphi=20'$   $\Delta \alpha=0,00187$ . Вычисления показывают, что для нашего примера  $a=1,35$  м, тогда по формуле (369) найдем

$$N_{aM} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 1,35 \cdot 0,125 \cdot 208}{4\pi^2 \cdot 3} 0,00187 = 5,5 \text{ гм}^2.$$

В полете при  $\lambda=1,5$  получим при  $\varphi=35^\circ$   $\alpha=0,057$ ; при  $\varphi=40^\circ$   $\alpha=0,117$ , следовательно,  $\frac{\Delta \alpha}{\Delta \varphi} = \frac{0,06}{5^\circ} = 0,012$  и для  $\Delta \varphi = 20'$   $\Delta \alpha=0,004$ . По формуле (369) найдем для  $\lambda=1,5$   $N_{aM} \approx 12 \text{ гм}^2$ .

Из этого примера получается интересный результат, что неуравновешенность аэродинамического момента в полете примерно в два с лишним раза больше, чем при работе винга на

месте. Объясняется это тем, что наклон кривых  $\alpha$  по  $\lambda$  больше при больших  $\lambda$ , чем при  $\lambda=0$ . Следовательно, если при работе на месте неуравновешенность аэродинамического момента не очень заметна, то в воздухе на скорости она может быть больше и дать уже заметную тряску самолета. Таким образом неуравновешенность аэродинамического момента изменяется с режимом полета.

Так как  $\Delta P$  зависит от плотности воздуха, то неуравновешенность аэродинамического момента будет также зависеть от высоты полета при прочих одинаковых условиях, уменьшаясь с высотой.

Найдем теперь, как изменится в том же случае наличия разности в углах установки в  $20'$  неуравновешенность аэродинамической силы. Так как  $\beta = \frac{T}{\rho n_s^2 D^5}$ , а составляющая сопротивления

одной лопасти в плоскости вращения винта равна  $Q = \frac{M}{ak}$  и, кроме того,  $T = 2\pi n_s M$ , где  $T$  — мощность в кгм, то

$$\beta = \frac{2\pi Q ak}{\rho n_s^2 D^5} \quad \text{или} \quad \Delta Q = \frac{\rho n_s^2 D^5}{2\pi ka} \Delta\beta,$$

откуда по формуле (317)

$$N_a = \frac{1000 g \rho D^5}{8\tau^2 ka} \Delta\beta. \quad (370)$$

По графикам характеристик винта. найдем для  $\lambda=0$ : при  $\varphi=20^\circ$   $\beta=0,12$ ; при  $\varphi=25^\circ$   $\beta=0,185$ ; следовательно, при  $\lambda=0$   $\frac{\Delta\beta}{\Delta\varphi} = \frac{0,065}{5^\circ} = 0,012$ , а для  $\Delta\varphi=20'$   $\Delta\beta=0,004$ .

Если  $\lambda=1,5$ , то при  $\varphi=35^\circ$   $\beta=0,1$ ; при  $\varphi=40^\circ$   $\beta=0,22$ ;  $\frac{\Delta\beta}{\Delta\varphi} = \frac{0,12}{5^\circ} = 0,024$  и для  $\Delta\varphi=20'$   $\Delta\beta=0,008$ . Таким образом

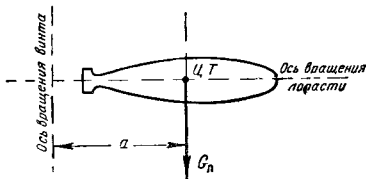
получаем по формуле (370) при  $\lambda=0$   $N_a=4$  гм; при  $\lambda=1,5$   $N_a=8$  гм. Как и для неуравновешенности аэродинамического момента, неуравновешенность аэродинамической силы зависит от режима полета

Из приведенных примеров видно, что даже небольшая геометрическая асимметрия, получившаяся за счет разной установки лопастей, порождает достаточно большие неуравновешенности как момента, так и силы, которые могут вызвать ощутимую тряску самолета. Указанная асимметрия может получиться от неправильной установки лопастей во втулке, когда установочные риски на лопастях нанесены недостаточно точно; от какого-либо перекоса в механизме винта; от разных линейных размеров лопастей в одном комплекте — разных толщин или ширин. Поэтому для получения лучшей аэродинамической уравновешенности винта это необходимо учитывать при назначении допусков и при со-



ставлении технологического процесса изготовления винта на это следует обращать особое внимание.

Если на аэродинамическую неуравновешенность винта непосредственное влияние оказывает геометрическая асимметрия винта, то на массовую неуравновешенность силы и момента непосредственное влияние оказывает весовая асимметрия винта. Поэтому контроль массовой неуравновешенности силы и момента обуславливает собой контроль за весовой симметрией винта. По своему определению массовая уравновешенность силы (статическая уравновешенность) требует нахождения на оси винта его центра тяжести, причем для обеспечения этой уравновешенности



Фиг. 309 Большой момент лопасти

необходимо, чтобы центры тяжести деталей, на которые расчленяется винт от оси винта к его периферии, были расположены на одинаковом расстоянии от осн. Крупными деталями, из которых расчленяется винт от центра к периферии, является втулка винта и лопасти. Отсюда следует, что для обеспечения статической уравновешенности всего винта необходимо, чтобы статическую уравновешенность относительно оси винта имели и втулка винта и лопасти.

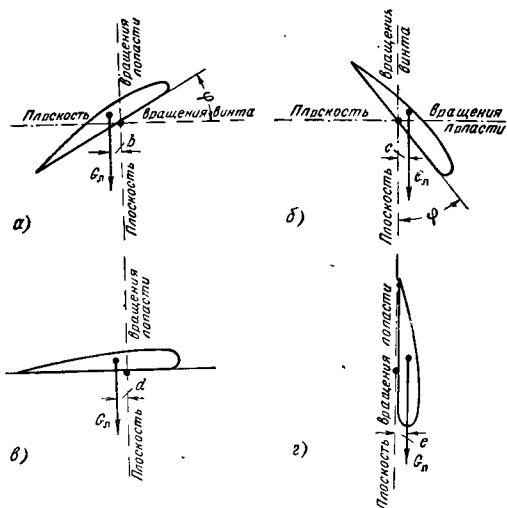
В винтостроении установилась следующая терминология<sup>1</sup>.

*Большим моментом лопасти* называется произведение веса лопасти на расстояние ее центра тяжести от оси винта (фиг. 309). *Малым моментом лопасти* называется произведение веса лопасти на расстояние ее центра тяжести до оси поворота лопасти во втулке.

При уравновешивании лопастей на специальных станках приходится иметь дело с различными разновидностями этого момента, которые получаются, если поворачивать лопасть около ее оси и относить этот момент к разным плоскостям (фиг. 310). Так, *статическим малым моментом* называется произведение из веса лопасти на расстояние ее центра тяжести от плоскости, перпендикулярной плоскости вращения винта и проходящей через ось поворота лопасти (фиг. 310,а). *Динамическим малым*

<sup>1</sup> См. А. Флеров, Балансировка воздушных винтов Бюллетень авиационной промышленности № 2, 1946

моментом называется произведение из веса лопасти на расстояние ее центра тяжести от плоскости вращения винта (фиг. 310.б). Горизонтальным малым моментом называется произведение из веса лопасти на расстояние ее центра тяжести от плоскости, проходящей через ось поворота лопасти и перпендикулярной хорде дужки на стандартном сечении лопасти (фиг. 310,в); вертикальным малым моментом называется произведение из веса



Фиг. 310. Малые моменты лопасти

лопасти на расстояние ее центра тяжести от плоскости, проходящей по оси поворота лопасти параллельно хорде сечения (фиг. 310,г). Наконец, *заявленным моментом* называется величина соответствующего момента, выраженная в гм. Величины средних заявленных моментов определяются опытным путем заводами-изготовителями после изготовления большого числа лопастей данного типа.

На статическую неуравновешенность винта оказывает влияние большой момент и статический малый момент. Большой момент исчисляется десятками тысяч граммометров, а статический малый момент 20—30 гм. Если изготовить лопасти по

верхним пределам допусков, то собранный винт может иметь статическую неуровненность порядка 1000 гм, которую устранить трудно. Поэтому необходимо лопасти уравновешивать индивидуально, причем допуск на отклонение большого момента равен  $\pm 5$  гм от заявленного. В том случае когда исходный материал недостаточной однороден, трудно доводить лопасти до заявленного момента и приходится прибегать к комплектованию лопастей, причем в этом случае нарушается взаимозаменяемость лопастей. Поэтому прибегать к такому комплектованию лопастей, вообще говоря, нежелательно и делать это следует только в случае крайней необходимости.

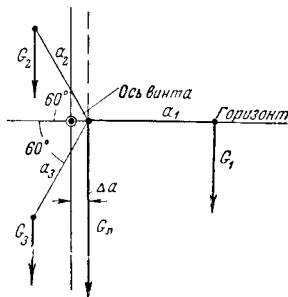
Неуровненность втулки винта может доходить до 50 гм и поэтому каждую втулку тоже надо уравновешивать, доводя ее неуровненность до 2—3 гм.

Полностью собранный винт контролируется на специальных стайках на статическую неуровненность, которая доводится до допускаемой величины 5—8 гм с помощью специальных шайб, гаек на стяжных болтах втулки и т. п. способами в зависимости от конструкции винта. Очень удобно, когда в конструкции винта предусматривается возможность его уравновешивания определенными способами.

Рассмотрим трехлопастный винт и обозначим веса его лопастей через  $G_1, G_2, G_3$ , а расстояния центров тяжести лопастей от оси винта соответственно через  $a_1, a_2, a_3$ . Предположим, что большой момент  $G_1 a_1$  равен заявленному плюс допуск, т. е.  $G_1 a_1 = M_{ном} + \Delta M$ , а  $G_2 a_2 = M_{ном} - \Delta M$ . Кроме того,  $G_2 a_2 = G_3 a_3$ . Это будет наиболее невыгодное распределение допусков. Отсюда  $G_1 a_1 - G_2 a_2 = 2\Delta M$ . Пусть лопасти расположатся так, что ось лопасти  $G_1$  займет горизонтальное положение. Эта лопасть самая «тяжелая», а в таком положении статический момент лопасти наибольший. Оси лопастей  $G_2$  и  $G_3$  расположатся под углом  $60^\circ$  к горизонтали (фиг. 311). Получим

$\sum G_n \Delta a_n = G_1 a_1 - G_2 a_2 \cos 60 - G_3 a_3 \cos 60 = G_1 a_1 - G_2 a_2 = 2\Delta M$ ,  
где  $\sum G_n$  — вес всех лопастей; отсюда

$$\Delta a_n = \frac{2\Delta M}{\sum G_n}. \quad (371)$$



Фиг. 311. Нахождение допусков на уравновешивание винта.

Найдем, какой допуск должен быть на большой момент, чтобы винт имел неуровновешенность в пределах допуска на статическую неуровновешенность всего винта. Предположим, что втулка винта имеет неуровновешенность  $\pm N_{\text{свт}}$ . Имеем

$$N_c = \Delta a_b G_b, \quad (372)$$

где  $G_b$  — вес винта,  $\Delta a_b$  — расстояние центра тяжести винта от оси винта. С другой стороны,  $\pm N_{\text{свт}} + \sum G_d \Delta a_d = G_b \Delta a_b$  и  $\Delta a_b = \frac{\Delta a_d \sum G_d \pm N_{\text{свт}}}{G_b}$  или согласно формуле (371)

$$\Delta a_b = \frac{2\Delta M \pm N_{\text{свт}}}{G_b}.$$

По формуле (372) получим

$$N_c = 2\Delta M \pm N_{\text{свт}}$$

или

$$\Delta M = \frac{N_c \pm N_{\text{свт}}}{2}. \quad (373)$$

Следовательно, если допуск на втулку  $N_{\text{свт}} = \pm 3 \text{ гм}$ , то допуск на большой момент лопастей при  $N_c = 6 \text{ гм}$  должен быть  $\Delta M = 4,5 \text{ гм}$ .

Динамическая неуровновешенность винта, т. е. неуровновешенность массового момента, зависит от такой же неуровновешенности отдельно втулки и лопастей. Для того чтобы обеспечить динамическую уравновешенность втулки, надо, чтобы были статически уравновешены относительно оси вращения все ее детали и узлы. При этом условию главная ось инерции ее будет совпадать с осью винта. Для этого следует отдельно статически уравновешивать половинки корпуса втулки, если он разъемный, и отдельно цилиндр со всеми находящимися в нем деталями.

Предположим, что мы статически уравновесили отдельно цилиндр и отдельно остальную часть втулки с точностью 1 гм, т. е. статическая неуровновешенность этих деталей будет по 1 гм. Предположим, кроме того, что эти неуровновешенности разного знака, т. е. центр тяжести цилиндра и корпуса, расположились с противоположных сторон оси винта. Получающийся от этого неуровновешенный момент на всей втулке будет

$$M_m = \Theta J_{\text{вт}} \Omega^2 \text{ кгм}, \quad (374)$$

где  $\Theta$  — угол наклона главной оси инерции всей втулки к оси винта (в радианах),  $J_{\text{вт}}$  — момент инерции (массовый) всей втулки относительно оси, перпендикулярной оси вращения, в  $\text{кгмсек}^2$ . Тогда динамическая неуровновешенность всей втулки будет

$$N_m = 1000g\Theta J_{\text{вт}} \text{ гм}^2. \quad (375)$$

Пусть  $N_{c.ц}$  и  $N_{c.в2}$  — статические неуравновешенности цилиндра и остальной части втулки,  $l$  — расстояние между центрами тяжести цилиндра и остальной части втулки,  $\Delta a_{ц}$  и  $\Delta a_{в2}$  — соответственно расстояния их центров тяжести от оси винта. Тогда

$$\Delta a_{ц} = \frac{N_{c.ц}}{1000G_{ц}}; \quad \Delta a_{в2} = \frac{N_{c.в2}}{1000G_{в2}},$$

$$\Theta = \frac{\Delta a_{ц} - \Delta a_{в2}}{l},$$

откуда

$$\Theta = \left( \frac{N_{c.ц}}{G_{ц}} + \frac{N_{c.в2}}{G_{в2}} \right) \frac{1}{1000l}$$

и

$$N_{м} = \frac{gJ_{вт}}{l} \left( \frac{N_{c.ц}}{G_{ц}} + \frac{N_{c.в2}}{G_{в2}} \right). \quad (376)$$

С помощью этой формулы можно найти динамическую неуравновешенность втулки по статической неуравновешенности отдельных деталей цилиндра и остальной части втулки.

**Пример.** Предположим, что

$$G_{ц} = G_{в2} = \frac{1}{2} G_{вт} \text{ и } N_{c.ц} = N_{c.в2};$$

тогда

$$N_{м} = \frac{gJ_{вт}}{l} \frac{4N_{c.в2}}{G_{вт}} \text{ гм}^2.$$

Пусть  $J_{вт} = 0,12 \text{ кгмсек}^2$ ,  $l = 0,25 \text{ м}$ ,  $N_{c.в2} = 1 \text{ гм}$ ,  $G_{вт} = 100 \text{ кг}$ . Тогда  $N_{м} \approx 0,2 \text{ гм}^2$ . Так как, повидимому, динамическую неуравновешенность втулки можно допустить до  $1 \text{ гм}^2$ , то статическую неуравновешенность цилиндра и остальной части втулки можно допускать до  $4-5 \text{ гм}$  согласно формуле (376).

Посмотрим теперь, как влияет на динамическую уравновешенность винта динамический малый момент. Для простоты возьмем двухлопастный винт, так как трех- и четырехлопастные легко привести к двухлопастному. Обозначим номинальное значение динамического малого момента через  $M$ , номинальный вес лопасти  $G_{л0}$ , допуск на вес лопасти  $\Delta G_{л}$  и допуск на динамический малый момент  $\Delta M$ . Предположим, что допуски на веса и моменты у обеих лопастей расположены противоположно, тогда расстояние между смещенными центрами тяжести лопастей  $\Delta a$  будет

$$\Delta a = \frac{M_0 + \Delta M}{G_{л0} - \Delta G_{л}} - \frac{M_0 - \Delta M}{G_{л0} - \Delta G_{л}}$$

или

$$\Delta a = \frac{2(G_0 \Delta M + M_0 \Delta G_n)}{G_{n0}^2 - \Delta G_n^2}. \quad (377)$$

Величина  $\Delta G_2$  мала по сравнению с  $G_0^2$  и ею можно пренебречь. Также мала  $M_0 \Delta G_n$  по сравнению с  $G_0 \Delta M$ , тогда

$$\Delta a = \frac{2 \Delta M}{1000 G_{n0}}, \quad (378)$$

где величина  $\Delta M$  выражена в гм. По формуле (311) имеем

$$N_m = 1000 \cdot G_n \cdot r_n \cdot \Delta a.$$

Подставляем сюда значение  $\Delta a$  по формуле (378):

$$N_m = \frac{2 \Delta M G_n r_n}{G_{n0}}.$$

Так как вес лопасти  $G_n$  очень мало отличается от номинала  $G_{n0}$ , то

$$N_m = 2 \Delta M \cdot r_n. \quad (379)$$

По этой формуле можно найти динамическую неуравновешенность  $N_m$  по разнице  $\Delta M$  в динамическом малом моменте у лопастей. Здесь  $r_n$  — расстояние центра тяжести лопасти от оси, которое можно принять постоянным и равным номинальному значению. Если  $\Delta M = 6$  гм, а  $r_n = 0,7$  м, то  $N_m = 8$  гм<sup>2</sup>.

Таким образом, для того чтобы обеспечить в производстве отдельных деталей общую уравновешенность винта, по техническим условиям следует: 1) возможно ближе подходить в выполнении геометрических размеров деталей к номиналу; 2) статически уравновешивать в процессе производства отдельные крупные детали и узлы винта.

## § 2. Статическое уравновешивание винтов и лопастей

Для статического уравновешивания винтов и лопастей по ходу производства применяются специальные станки, которые называются «балансирующими». Эти станки должны удовлетворять следующим условиям:

1. Иметь необходимую точность в определении статической неуравновешенности.

2. Быть простыми по конструкции.

3. Быть удобными для пользования.

Для того чтобы определить потребную точность балансирующего станка, следует сначала определить, с каким допуском приходится уравновешивать винты и лопасти. Допуски на лопасти уже разобраны в предыдущем параграфе.

Согласно формуле (310) центробежная сила винта вследствие его неуравновешенности выражается так:

$$P_c = \frac{N_c}{1000g} \Omega^2.$$

Но угловую скорость вращения винта  $\Omega$  можно представить так:

$$\Omega = \frac{2U_0}{D}.$$

Тогда

$$P_c = \frac{4N_c U_0^2}{1000g} \frac{1}{D^2}, \quad (380)$$

а отсюда

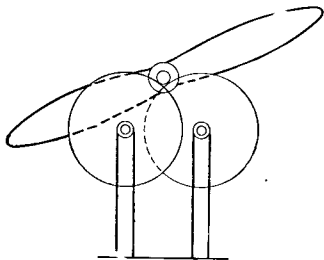
$$N_c = 250g P_c \frac{D^2}{U_0^2}. \quad (381)$$

Если задаться такой центробежной силой  $P_c$ , которая вызывает допустимую тряску, то величина  $250 \cdot g \cdot P_c$  будет постоянной для всех винтов и, следовательно, статическая неуравновешенность  $N_c$  прямо пропорциональна квадрату диаметра и обратно пропорциональна квадрату концевой окружной скорости лопасти. Для обычных винтов во многих случаях концевая окружная скорость  $U_0$  изменяется мало (в пределах 240—260 м/сек) и если ее принять постоянной, то можно сказать, что статическая неуравновешенность приблизительно прямо пропорциональна квадрату диаметра винта. Так, например, если при диаметре 3 м принять допустимую статическую неуравновешенность, равную 3 гм, что будет соответствовать при  $U_0 = 250$  м/сек центробежной силе в 8 кг, то при диаметре винта 5 м той же центробежной силе при  $U_0 = 250$  м/сек будет соответствовать статическая неуравновешенность в 8,4 гм. Следовательно, при больших диаметрах винтов допуск на статическую неуравновешенность должен быть больше. Строго говоря, допуск на статическую неуравновешенность следует определять по формуле (381), задаваясь только допустимой центробежной силой  $P_c$ . Эту последнюю можно определять из статистики наблюдений над тряской винтов на самолете. Повидимому, эту центробежную силу можно принять равной 8 кг. Как мы видели, для диаметра 3 м это дает неуравновешенность 3 гм. Так как винты меньшего диаметра устанавливаются на маломощные самолеты, у которых окружная концевая скорость винта сравнительно невелика, то можно считать, что 3 гм является наименьшим допуском на статическую неуравновешенность винта. Для того чтобы винты можно было уравновешивать с допуском в 3 гм, необходимо выяснить точность самого станка, т. е. определить, от каких факторов она зависит. Прежде всего совершенно очевидно, что чем точнее

станок, тем лучше; поэтому рассмотрим вкратце существующие типы станков и оценим их относительную точность.

Существующие балансировочные станки по конструкции разделяются на следующие четыре группы: 1) роликовые, 2) весовые, 3) ножевые, 4) механические.

1. В роликовых станках винт, насаженный на вал, катается на роликах, которые в свою очередь катаются на шариковых подшипниках (фиг. 312). Аналогичным по принципу действия является станок, в котором вал винта вращается на шариковых или роликовых подшипниках. В этих случаях на точность станков влияет наличие трения при катании вала на роликах



ито

Фиг. 312. Схема роликового балансировочного станка

и при катании шариков или роликов в подшипниках. Подшипники быстро загрязняются, трение во всем станке большое и поэтому чувствительность его небольшая. Такие станки теперь совершенно вышли из употребления.

2. Весовые станки основаны на принципе весов. Винт устанавливается на ножах или на подвеске так, чтобы его ось вращения была вертикальна и линия ножей или точка подвеса находились немного выше центра тяжести, но вблизи его. Кроме того, линия ножей или линия отвеса, проходящая через точку подвеса, должны пересекать ось вращения винта. Находя уравновешивающий момент, который будет поддерживать ось винта на вертикали при двух взаимно перпендикулярных положениях винта в горизонтальной плоскости, можно найти и положение центра тяжести относительно оси вращения в плоскости, перпендикулярной оси вращения винта. Расстояние центра тяжести от оси и определит неуравновешенность винта.

Весовые станки могут быть сделаны весьма чувствительными. Чувствительность тем больше, чем меньше расстояние линии ножей или точки привеса от центра тяжести и чем больше частота колебания винта на ножах. Первая величина зависит от

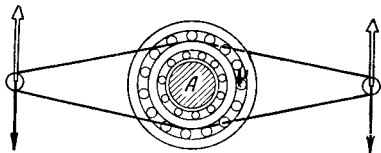


конструктивных особенностей станка, вторая — от размеров винта.

Весовые станки стационарного типа для уравновешивания винтов не применяются из-за сложности, но широко применяются для уравновешивания лопастей. В этом случае они достаточно удобны для пользования.

Весовой станок удобен также для уравновешивания винтов в полевых условиях (см. § 3, глава XXIV).

3. Ножевые станки основаны на том, что винт, насаженный на вал, соосный с винтом, заставляют кататься по двум горизонтальным ножам, причем центр тяжести винта, не совпадающий с осью вала, при качении отходит на большее или меньшее расстояние от вертикальной плоскости, проведенной через ось вала. Наибольшее расстояние центра тяжести от указанной



Фиг. 313. Схема механического балансирующего станка.

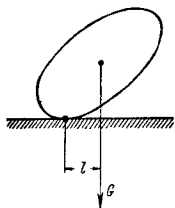
вертикали, умноженное на вес винта, и определяет неуравновешенность винта. Если уравновесить винт при таком его положении (наибольшее удаление центра тяжести от указанной вертикальной плоскости), то уравновешивающий момент определит величину неуравновешенности винта.

4. Механические станки являются разновидностью роликовых станков, но более чувствительны. Идея их заключается в следующем. Предположим, что вал А (фиг. 313) покоится на двух опорах с подшипниками, каждый из которых в свою очередь покоится на другом подшипнике, причем у каждого последнего подшипника имеется рычаг, соединенный с эксцентриком, вращающимся от электродвигателя таким образом, что рычаги движутся в противоположные друг к другу стороны. Колебательные движения каждого рычага создают моменты трения вала А в подшипниках, направленные в разные стороны и взаимно уничтожающиеся. При таком устройстве вал А при вращении в подшипниках не создает момента трения, и такой балансирующий станок имеет хорошую чувствительность.

Механические станки достаточно сложны и широкого распространения не получили. Наибольшее распространение получил ножевой станок, и поэтому мы подробнее остановимся на объяснении его чувствительности и точности.

При уравнивании винта на ножовом станке винт колеблется на нем, причем, чем больше частота этих колебаний, тем легче заметить неуравновешенность, т. е. тем больше чувствительность станка. С другой стороны, чем больше отвечает станок на эксцентриситет центра тяжести относительно осн винта, тем больше чувствительность станка. Таким образом под чувствительностью ножового станка можно подразумевать отношение частоты колебания винта на станке к эксцентриситету центра тяжести винта. В приложении 6 подробно разобрано колебание винта на ножовом станке и выведена формула для определения периода колебаний.

Для удобства под чувствительностью станка будем подразумевать величину  $\frac{p}{\sqrt{a}} = \epsilon$ , тогда, так как частота колебаний на основании формулы (412) приложения 6 будет



Фиг. 314. Катание эллипсоидного вала по ножам.

$$p = \frac{l}{T} = \frac{\sqrt{ag}}{C\rho},$$

то

$$\epsilon = \frac{\sqrt{g}}{C\rho}, \quad (382)$$

где  $C$  — постоянная.

Мы видим, что чувствительность балансировочного станка зависит от радиуса инерции винта  $\rho$  и не зависит от конструктивных параметров станка — диаметра его вала. Таким образом можно сделать следующий общий вывод, что обычные ножовые балансировочные станки по общей конструкции обладают предельной чувствительностью и увеличить эту чувствительность можно только точной установкой и тщательным изготовлением деталей для уменьшения трения. По этой причине ножовые балансировочные станки и получили большое распространение в винтовой промышленности, хотя и предлагалось большое количество других конструкций балансировочных станков.

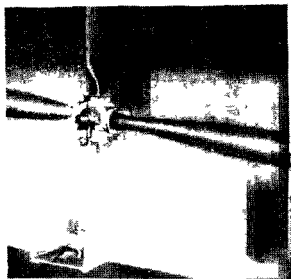
Чувствительность станка сильно меняется в зависимости от величины винта. Так, для винта диаметром 3,8 м чувствительность уменьшается примерно на 30% по сравнению с винтом диаметром 3 м. Поэтому при уравнивании винтов большого диаметра необходимо иметь особо тщательно изготовленные балансировочные станки.

В балансировочном станке вал катается по ножам, причем вал может иметь какую-то эллипсоидность. В приложении 7 дано определение величины  $l$  (фиг. 314), которая создает плечо и, следовательно, момент, могущий дать ошибку в определении статической уравновешенности. При эллиптичности вала в

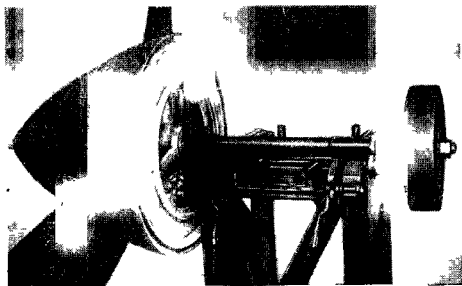
0,05 мм по индикатору и весе винта 400 кг получается ошибка в определении неуравновешенности винта в 2 гм. Желательно эллиптичность доводить до 0,01 мм, что можно сделать на обычных хороших токарных станках.

Винт устанавливается на валу двигателя на разрезных конусах. На балансировочном станке нельзя устанавливать разрезные конуса, так как это вызывает добавочные ошибки. Конуса на валу станка следует делать весьма тщательно, причем задний конус должен быть насажен на вал с прессовой посадкой и конус проверен на станке вместе с валом. Допуски должны быть более жесткими, чем на стандартные конуса. Передний конус навинчивается на вал и нарезка у него и на валу должна быть сделана по 2-му классу точности.

Ножевые балансировочные станки бывают двух типов — обычные (фиг. 315) и лобовые (фиг. 316). Первые применяются



Фиг. 315 Ножевой балансировочный станок.

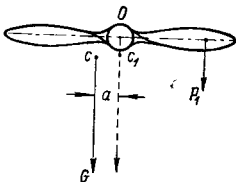


Фиг. 316 Лобовой ножевой балансировочный станок

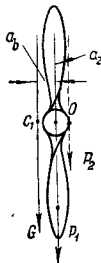
на винтовых заводах, а вторые на самолетных заводах, на которых винт перед установкой на самолет уравновешивается со всем принадлежащим ему оборудованием (коком винта, проти-

вооблденительным устройством и т. п.), которое не дает возможности сквозного одевания винта на вал. В обычных станках винт помещается на валу между ножами, в лобовом же станке он насаживается на вал так, что находится вне ножей. Для компенсации веса винта на противоположном конце вала насаживается груз. Вал вместе с грузом и задним конусом предварительно должны быть тщательно уравновешены (неуравновешенность не должна быть более 1 гм).

Для того чтобы токи воздуха в помещении, в котором находится балансировочный станок, не влияли на точность уравновешивания, следует станок ставить в закрытом помещении, в котором нет таких токов.



Фиг. 317. Уравновешивание двухлопастного винта. Первое — горизонтальное положение.



Фиг. 318. Уравновешивание двухлопастного винта. Второе — вертикальное положение.

Уравновешивание винта состоит в следующем. При двухлопастном винте сначала винт уравновешивают в горизонтальном положении, помещая на более легкой лопасти (стремящейся подняться вверх) груз  $P_1$  на расстоянии 1 м от оси винта (фиг. 317). Этим перемещают центр тяжести винта в положение  $c_1$ . Затем винт поворачивают на станке на  $90^\circ$  и в таком «вертикальном» положении снова уравновешивают, помещая на втулке груз  $P_2$  на расстоянии  $a_2$  от оси винта в горизонтальном направлении (фиг. 318). Общая неуравновешенность винта будет выражаться следующим образом. Пусть в горизонтальном положении статическая неуравновешенность винта будет  $N_{с\text{гор}}$ , а в вертикальном положении  $N_{с\text{вер}}$ ; тогда

$$P_1 \cdot 1 = N_{с\text{гор}} = G_B a_r,$$

$$P_2 a_2 = N_{с\text{вер}} = G_B a_B,$$

откуда

$$a_r = \frac{N_{с\text{гор}}}{G_B}; \quad a_B = \frac{N_{с\text{вер}}}{G_B}.$$

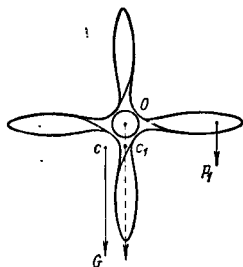
Несоосность центра тяжести винта  $a$  тогда будет

$$a = \sqrt{a_r^2 + a_n^2} = \frac{1}{G_B} \sqrt{N_{с\text{гор}}^2 + N_{с\text{вер}}^2},$$

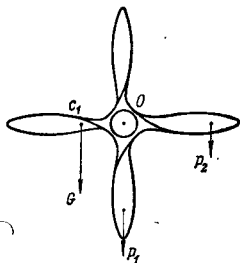
откуда статическая неуравновешенность винта

$$N_c = aG_B = \sqrt{N_{с\text{гор}}^2 + N_{с\text{вер}}^2}. \quad (383)$$

Если  $N_c$  равна или меньше величины, допускаемой по техническим условиям, то такой винт считается уравновешенным, если же она больше, то этот винт приходится доводить. Обычно эта доводка заключается в снятии очень тонкого слоя металла на более тяжелой лопасти.



Фиг. 319. Первое положение при уравновешивании четырехлопастного винта.

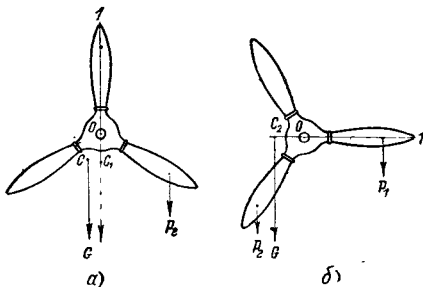


Фиг. 320. Второе положение при уравновешивании четырехлопастного винта.

Четырехлопастный винт уравновешивается тоже в двух положениях. В первом положении (фиг. 319) при горизонтальном положении одной пары лопастей винт уравновешивается подвешиванием на «легкую» лопасть груза  $P_1$  на расстоянии  $l$  м от центра вала винта. Центр тяжести перемещается тогда в положение  $c_1$ . Во втором положении (фиг. 320) при вертикальном положении предыдущей пары лопастей на «легкую» лопасть подвешивается груз  $P_2$  на расстоянии  $l$  м от центра винта, и тогда центр тяжести винта переходит в центр винта  $O$ . Общая неуравновешенность винта выразится следующим образом. Если неуравновешенность в первом положении  $N_{c1} = P_1$ , а во втором положении  $N_{c2} = P_2$ , то общая неуравновешенность, как и в предыдущем случае, будет

$$N_c = \sqrt{N_{c1}^2 + N_{c2}^2}.$$

При уравнивании трехлопастного винта какую-либо лопасть — назовем ее лопастью № 1 — устанавливают вертикально и уравнивают винт грузом  $P_2$ , подвешенным на расстоянии 1 м от центра вала винта на лопастях № 2 или 3. Этим центр тяжести переводится в положение  $c_1$  (фиг. 321, а). Во втором положении лопасть № 1 устанавливается горизонтально и винт уравнивается в этом положении подвешиванием к лопасти



Фиг. 321 Уравнивание трехлопастного винта.

№ 1 на расстоянии 1 м от центра груза  $P_1$ . Общая неуравновешенность трехлопастного винта будет

$$N_c = \sqrt{N_{c1}^2 + N_{c2}^2},$$

а так как

$$N_{c1} = P_1 \text{ и } N_{c2} = P_2 \sin 60^\circ,$$

то

$$N_c = \sqrt{P_1^2 + \frac{3}{4} P_2^2}. \quad (384)$$

### § 3. Динамическое и аэродинамическое уравнивание винтов

Если бы все геометрические размеры винта были соблюдены точно по номиналу и материал был совершенно однородным, то в производстве не стоял бы вопрос ни о статическом, ни о динамическом, ни о аэродинамическом уравнивании винта. Допуски в чертежах обычно назначаются с таким расчетом, чтобы все уравновешенности соблюдались в том случае, если винт имеет допуски, близкие к номиналу. Но может случиться, что все допуски так расположатся, что в сборке винт сильно отойдет от номинала и тогда неуравновешенности могут превзойти вели-

чины, назначенные в технических условиях. Поэтому должен существовать контроль не только за статической уравновешенностью, но также и за динамической и аэродинамической.

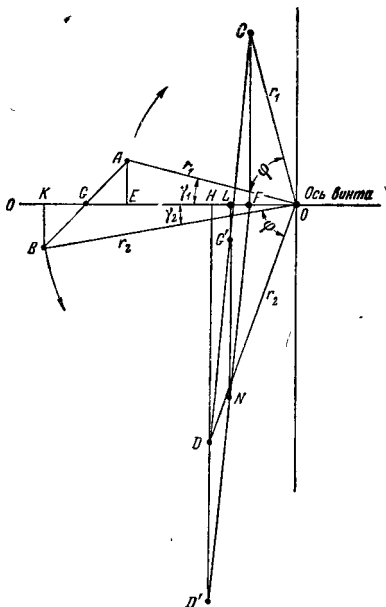
Динамическая неуравновешенность может контролироваться двумя способами — на специальных станках для динамической балансировки, в которых неуравновешенный динамический момент выявляется при вращении винта, и на станках для статического уравновешивания путем двойного уравновешивания при двух положениях лопастей.

Иден станков для динамической балансировки винтов заключается в том, что вращающийся динамически неуравновешенный винт колеблется на пружинах станка. Эти колебания записываются как по фазе (т. е. по расположению по отношению к винту), так и по величине амплитуды. В других станках колебания винта уравновешиваются непосредственно на станке и, следовательно, сразу определяется величина динамической неуравновешенности винта. Однако все эти станки не получили до сих пор большого распространения вследствие сложности работы на них, и поэтому обычно динамическая неуравновешенность контролируется статической. Разберем, каким образом можно статически определить динамическую неуравновешенность винта.

Неуравновешенность винта получается главным образом за счет лопастей, т. е., иными словами, наклон главной оси инерции винта к оси винта обусловлен тем, что центры тяжести лопастей не лежат в одной плоскости. Предположим, что при каком-то угле установки лопастей соблюдена статическая уравновешенность винта. Если при этом изменить угол установки, то при динамической неуравновешенности нарушится и статическая уравновешенность винта. Устанавливая связь между статической неуравновешенностью и динамической, можно получить значение динамической неуравновешенности. Установим эту связь.

Пусть мы имеем двухлопастный винт, который статически уравновешен, но центры тяжести лопастей не лежат в одной плоскости, перпендикулярной оси винта. Угол установки лопастей  $\varphi_1$ . Переставим лопасти винта на угол установки  $\varphi_2$  и обозначим  $\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi$ . Найдем ту величину  $a$ , на которую отойдет от оси вращения винта  $O - O$  центр тяжести лопастей при их перестановке на угол  $\varphi$ . Пусть ось, которая проектируется на плоскость чертежа (фиг. 322) в точку  $O$ , является осью поворота лопастей, причем ц. т. первой лопасти отстоит от этой оси на расстоянии  $r_1$ , а ц. т. второй лопасти — на расстоянии  $r_2$ . Обозначим угол между осью винта  $O - O$  и плоскостью, проходящей через ось лопастей  $x$  и их центр тяжести через  $\gamma_1$  для первой лопасти и  $\gamma_2$  для второй лопасти. Так как по условию винт в исходном положении статически уравновешен, то центр тяжести лопастей лежит на оси  $O - O$  в точке  $G$ . При повороте

лопастей на угол  $\varphi$  точка  $G$  сойдет с оси и займет положение  $G'$ . Расстояние  $LG'$  и будет то плечо  $a$ , на которое передвинется центр тяжести лопастей при повороте их на угол  $\varphi$ . Опустим из



Фиг 322 Влияние статического уравнивания винта на его динамическую неуравновешенность. Точки  $A$  и  $B$  — ц. т. лопастей при первом их положении,  $C$  и  $D$  — ц. т. при втором положении. Ось поворота лопастей перпендикулярна плоскости чертежа и проектируется в точку  $O$ .

точек  $C$  и  $D$  перпендикулярны на  $OO$ . Из точки  $F$  проведем линию, параллельную  $CD$ , до пересечения с линией  $HD$  в точке  $D'$ . Из подобия треугольников  $FHD'$  и  $FNL$  находим

$$\frac{LN}{HD'} = \frac{FL}{FH},$$



но так как  $DCFD'$  есть параллелограм и  $G'$  лежит на середине  $CD$  (вес лопастей принят одинаковым), то  $FN = \frac{1}{2} FD'$  и

$FL = \frac{1}{2} FH$ ; отсюда  $\frac{LN}{HD'} = \frac{1}{2}$ ; по фиг. 322 видно, что

$$LN = LG' + G'N = LG' + CF,$$

отсюда

$$\frac{LN}{HD'} = \frac{LG' + CF}{HD + CF} = \frac{1}{2};$$

$$LG' = \frac{1}{2} HD + \frac{1}{2} CF - CF = \frac{1}{2} HD - \frac{1}{2} CF;$$

но так как

$$HD = r_2 \sin(\varphi + \gamma_2) \text{ и } CF = r_1 \sin(\varphi + \gamma_1),$$

то

$$a = LG' = \frac{1}{2} [r_2 \sin(\varphi + \gamma_2) - r_1 \sin(\varphi + \gamma_1)]. \quad (385)$$

Динамический момент при исходном (первом) положении лопастей будет выражаться таким образом:

$$M_m = m\Omega^2 \cdot R \cdot KE,$$

где  $KE$  — расстояние между центрами тяжести лопастей по оси винта при первом их положении,  $m$  — масса одной лопасти, а  $R$  — расстояние ц. т. каждой из лопастей от оси винта. Из фиг. 322  $KE$  определяется так:

$$KE = KO - EO = r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1$$

и тогда

$$M_m = m\Omega^2 R (r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1). \quad (386)$$

Раскроем  $\sin$  в формуле (385).

$$2a = r_2 \sin \varphi \cos \gamma_2 + r_2 \sin \gamma_2 \cos \varphi - r_1 \sin \varphi \cos \gamma_1 - r_1 \sin \gamma_1 \cos \varphi = \\ = \sin \varphi (r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1 + r_2 \sin \gamma_2 \operatorname{ctg} \varphi - r_1 \sin \gamma_1 \operatorname{ctg} \varphi).$$

Определим отсюда  $r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1$ :

$$r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1 = \frac{2a}{\sin \varphi} - (r_2 \sin \gamma_2 - r_1 \sin \gamma_1) \operatorname{ctg} \varphi \quad (387)$$

и подставим в формулу (386):

$$M_m = m\Omega^2 \frac{R}{\sin \varphi} [2a - (r_2 \sin \gamma_2 - r_1 \sin \gamma_1) \cos \varphi]. \quad (388)$$

Так как мы предположили, что в первом положении лопасти уравновешены и, следовательно,  $KB=AE$ , то  $r_2 \sin \gamma_2 = r_1 \sin \gamma_1$ . В этом случае

$$M_m = m\Omega^2 \frac{2aR}{\sin \varphi}. \quad (389)$$

Найдем теперь динамический момент при втором положении лопастей; он будет выражаться таким образом:

$$M_{m1} = m\Omega^2 RHF,$$

ио

$$HF = HO - FO = r_2 \cos(\varphi + \gamma_2) - r_1 \cos(\varphi + \gamma_1) = \\ = \sin \varphi (r_1 \sin \gamma_1 - r_2 \sin \gamma_2 + r_2 \cos \gamma_2 \operatorname{ctg} \varphi - r_1 \cos \gamma_1 \operatorname{ctg} \varphi),$$

и  $r_1 \sin \gamma_1 - r_2 \sin \gamma_2 = 0$ , а также, подставляя сюда значение  $r_2 \cos \gamma_2 - r_1 \cos \gamma_1$  по формуле (387), получим

$$HF = 2a \operatorname{ctg} \varphi,$$

отсюда

$$M_{m1} = m\Omega^2 \frac{2aR}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (390)$$

Для простоты мы предположили, что при первом положении лопастей, когда  $\varphi = 0$ , статическая неуровновешенность равна нулю; однако мы можем и не делать этого предположения, а допустим, что при первом положении имеется какая-то статическая неуровновешенность  $N_{c\varphi}$ , вызванная наличием эксцентриситета п. т.  $a_1$ . Пусть статическая неуровновешенность при положении  $\gamma_2$  будет  $N_{c\varphi 2}$ , а эксцентриситет  $a_2$ .

Полагая в формуле (385)  $\varphi = 0$ , получим

$$a_1 = \frac{1}{2} (r_2 \sin \gamma_2 - r_1 \sin \gamma_1),$$

откуда

$$r_2 \sin \gamma_2 - r_1 \sin \gamma_1 = 2a_1.$$

Подставляя это значение в формулу (389) и заменяя на  $a_2$ , получим

$$M_m = m\Omega^2 \frac{2R}{\sin \varphi} (a_2 + a_1 \cos \varphi). \quad (391)$$

Так как  $N_{c\varphi 1} = 2a_1 mg$ ,  $N_{c\varphi 2} = 2a_2 mg$ , то формула (391) примет вид

$$M_m = \frac{\Omega^2 R}{g \sin \varphi} (N_{c\varphi 2} + N_{c\varphi 1} \cos \varphi). \quad (392)$$

Если  $N_{c\varphi 1} = 0$ , то получим

$$M_m = \frac{\Omega^2 R N_{c\varphi 2}}{g \sin \varphi}. \quad (393)$$

На основании формулы (312) формулы (392) и (393) для динамического момента в первом положении лопастей могут быть преобразованы так:

$$\sqrt{N_{m1}} = \frac{1000R}{\sin \varphi} (N_{c \varphi 2} + N_{c \varphi 1} \cos \varphi), \quad (394)$$

$$N_{m1} = \frac{1000RN_{c \varphi 2}}{\sin \varphi}. \quad (395)$$

Формулу для динамического момента во втором положении лопастей получим, представив выражение для  $HF$  в таком виде:

$$HF = 2 \sin \varphi \left[ a_1 + \frac{\operatorname{ctg} \varphi}{\sin \varphi} (a_2 - a_1 \cos \varphi) \right].$$

откуда

$$M_m = m\Omega^2 R^2 \sin \varphi \left[ a_1 + \frac{\cos \varphi}{\sin^2 \varphi} (a_2 - a_1 \cos \varphi) \right].$$

Если  $a_1 = 0$ , то эта формула обращается в формулу (390).

Таким образом для динамического момента во втором положении лопастей

$$N_{m2} = 1000R \sin \varphi \left[ N_{c \varphi 1} + \frac{\cos \varphi}{\sin^2 \varphi} (N_{c \varphi 2} - N_{c \varphi 1} \cos \varphi) \right]. \quad (396)$$

Таким образом формулы (394) и (396) дают связь между динамической и статической неуравновешенностью винта при повороте лопастей на угол  $\varphi$ . В виду того что в эти формулы входят только угол  $\varphi$ , радиус ц.т. лопастей и статические неуравновешенности всего винта, причем мы принимаем в данных формулах углы  $\varphi$  и радиусы  $R$  одинаковыми для всех лопастей, то указанную формулу можно применять для винта с любым числом лопастей.

На производстве все винты всегда уравновешивают по двум углам установки и этим обеспечивается не только статическая, но и динамическая уравновешенность винта.

Аэродинамическая уравновешенность винта обеспечивается выполнением геометрических размеров лопастей в пределах допусков.

---

ЧАСТЬ VI

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВИНТОВ

---

Глава XXIII

### ИСПЫТАНИЕ ВИНТА И ЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

#### § 1. Испытание опытных винтов

Всякий винт новой или значительно измененной конструкции носит название опытного винта. Такой винт до установки его на самолет и полетов следует всесторонне испытать. Испытания производятся для того, чтобы быть уверенным, что данная конструкция винта прочна и безопасна для эксплуатации. Кроме того, всякий опытный винт следует испытать с точки зрения его эксплуатационных и аэродинамических качеств. Таким образом испытания опытного винта можно разделить на четыре части.

1. Испытание на прочность.
2. Испытание механизма винта.
3. Аэродинамические испытания на самолете.
4. Испытание всех деталей оборудования винта.

Прочность винта имеет большое значение для безопасности полета, ибо поломка винта (например, отрыв лопастей) может повести к нежелательным последствиям и окончиться в лучшем случае аварией, а иногда и катастрофой. Поэтому к прочности винта следует относиться как к прочности самой ответственной детали самолета. Между тем винт и большинство его деталей оборудования находятся в весьма тяжелых условиях работы. Кроме большой статической нагрузки, выражающейся в действии на винт большой центробежной силы и сил аэродинамических, как мы видели в гл. XV, на винт действуют иногда довольно значительной величины динамические нагрузки. Эти последние вызывают в материале винта усталостные явления, которые могут проявиться не сразу, а по истечении некоторого времени эксплуатации. Поэтому нельзя о прочности винта судить по кратковременным статическим испытаниям, а приходится прибегать к длительным испытаниям, которые выявили бы прочность винта на усталость.

Подобно самолету, конструкцию которого испытывают на перегрузку, винт тоже желательно испытывать на перегрузку,

однако такое испытание сопряжено с большими трудностями. Дело в том, что на винт действуют сложная система сил, воспроизвести которую искусственно трудно, принимая во внимание огромные силы, которыми нагружается винт. Лучше всего производить испытания винта на перегрузку, давая ему повышенное число оборотов, однако это требует специальных сложных установок повышенной мощности.

При испытании механизма винта следует воспроизводить естественные условия его работы, так как при работе винт деформируется, что может отразиться на работе механизма. Поэтому, кроме предварительного «статического» испытания механизма винта, следует производить также и длительное испытание его при работе винта. Этим будет испытан, кроме действия самого механизма, также и износ элементов этого механизма.

Вследствие того что винт, установленный на двигатель, представляет собой систему, составленную из нескольких масс и соединенных между собой упругими связями, эта система может притти в колебательное состояние, отчего повысятся динамические напряжения в системе. Особенно в этом отношении опасны крутильные колебания валов. Поэтому следует всегда определять напряжения от этих колебаний.

Может случиться, что винт данной конструкции, установленный на определенном двигателе, будет иметь вибрацию лопастей, тогда как на другом двигателе такой вибрации не будет. Поэтому всегда необходимо винт обязательно испытать на том двигателе, на котором он будет эксплуатироваться.

Аэродинамические свойства данного винта могут быть выявлены только испытанием на самолете. Так как обычно изменение аэродинамики винта при его модификации весьма незначительно и поэтому мало влияет на аэродинамику самолета (на скорости — на несколько км/час), то никакими предварительными испытаниями или расчетами уловить эту разницу обычно невозможно, так как эта разница выходит из пределов точности определения к. п. д. винта. Лишь прямыми испытаниями самолета можно дать действительную характеристику данного винта. Следовательно, для того чтобы иметь окончательное суждение об аэродинамических качествах винта, его следует испытать на самолете.

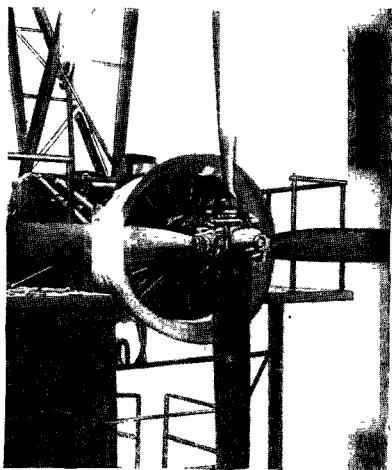
Наконец, все детали оборудования винта требуют испытания для того, чтобы их можно было допустить к постановке на самолет и производить с ними полеты. Все оборудование предварительно должно пройти лабораторные испытания по определенной программе, где были бы выявлены все его эксплуатационные качества, затем оно должно пройти испытания на двигателе с тем винтом, с которым оно будет в дальнейшем эксплуатироваться, и, наконец, окончательные испытания должны производиться на самолете.

Вся серия испытаний винта разделяется на: 1) испытания неработающего винта в лабораторных условиях; 2) испытание работающего винта на стенде; 3) испытание винта в полете.

Особенно большое значение имеет длительное испытание на стенде, ибо при этом выявляются все основные недостатки винта.

## § 2. Испытание винтов на стендах

Одним из самых важных этапов является испытание винта на том двигателе, на котором он будет работать в эксплуатации (фиг. 323). Это относится как к поршневому двигателю, так и



Фиг. 323. Винт на испытательном стенде.

к газовой турбине. Имитировать подобие испытания винта на других установках полностью обыкновенно бывает нельзя, ибо у каждого типа двигателя имеются свои особенности в работе. Особенно отличаются частотные характеристики, которые влияют на работу винта. Всякая периодически двигающаяся система возбуждает определенную полосу частот, которая в той или иной мере может воздействовать на составляющие элементы этой системы. Таким образом как поршневой двигатель, так и газо-

вая турбина возбуждают при своей работе серию частот. Источником этих частот являются неравномерность хода двигателя, присущая ему по принципу работы (поршневой двигатель), и неуравновешенность вращающихся деталей (в поршневом двигателе и в турбине). Кроме того, могут быть еще и другие источники колебаний, вызванные соотношением упругих и внешних действующих сил, являющихся следствием появления вибраций частей двигателя. Все эти источники возбуждают широкую полосу частот, которые и воздействуют через вал на винт, возбуждая в винте ускорения, которые в свою очередь вызывают дополнительные напряжения, величина которых может достигнуть довольно больших значений и превзойти «статические напряжения» в винте, как указывалось в гл. XV. В практике эксплуатации винтов было много случаев, когда на одном двигателе данный винт работал вполне хорошо, тогда как на двигателе другого типа ломался от усталостных напряжений. Особенно важно длительное испытание на двигателе, во время которого могут вывиться все неполадки винта.

Испытание на стенде можно разделить на две серии — длительные испытания на разных режимах и испытание механизма винта. При длительных испытаниях основное время винт работает на крейсерском режиме и лишь часть на номинальном и взлетном режимах. Испытания винта производятся по программе, обусловленной техническими требованиями на винт. Гарантийный срок работы винта, то, что в гл. XXI названо «долговечностью работы винта», устанавливается после соответствующих испытаний заводом-поставщиком. После длительных испытаний винт должен быть полностью разобран и обмерен для установления степени износа деталей.

Обычно на гражданских самолетах винты служат дольше, чем на военных, ибо на последних они больше нагружаются повышенными режимами.

Поломки винтов в воздухе происходят большей частью из-за усталостных напряжений, которые лучше всего контролируются длительными испытаниями на двигателе.

Длительные испытания на авиационном двигателе часто совмещаются с длительными испытаниями самого двигателя.

Ввиду того что для выявления износа механизма винта следует все время менять режим работы винта, для этих целей во время длительных испытаний производятся переключения винта изменяемого шага из одного предельного положения в другое.

Испытание механизма винта в смысле его динамических свойств производится по следующим пунктам.

1. Определение заброса числа оборотов при резкой даче газа.
2. Устойчивость работы винта при перемене режима.
3. Скорость поворота лопастей.
4. Скорость ввода во флюгерное положение и вывода из него.
5. Скорость перехода на торможение.

Специальные наблюдения должны быть проведены по выявлению вибрационных свойств винта.

Для выявления соответствия данного винта двигателю с точки зрения их совместных динамических свойств должны быть определены крутильные колебания вала двигателя с целью вычисления динамических напряжений при данном сочетании масс винта и двигателя. Эти крутильные колебания находятся с помощью приборов торсиографов.

Наиболее тяжелыми условия работы винта оказываются на поршневых двигателях и, в частности, на двигателях с самовоспламенением дизеля, где особенно неравномерен крутящий момент вала. Несколько легче условия работы на обычном поршневом двигателе и, наконец, наиболее легкие — на газовой турбине.

### § 3. Испытание винтов на самолете

Конечной стадией испытания винта является испытание на самолете. Это испытание можно разделить на следующие три серии испытаний.

1. Испытание работы механизма винта на самолете и его динамики

2. Определение аэродинамических характеристик винта

3. Длительные эксплуатационные испытания

Как бы тщательно ни был испытан винт на моторном стенде, испытание на самолете может выявить ряд его недостатков хотя бы уже по тому, что в большинстве случаев сама «установка» винта на самолете несколько отлична от установки на стенде. На стенде вся проводка управления и гидравлической или электрической системы проще, чем на самолете. Сама установка может иногда обладать такими дефектами, которые не позволят эксплуатировать винт на самолете. Например, трубка подвода масла к регулятору может быть установлена так, что в полете она вибрирует и через несколько часов эксплуатации ломается, или небольшая неуравновешенность винта возбуждает большие колебания выхлопного коллектора двигателя, который также претерпевает поломки и т. п. Все это относится не к самой конструкции винта, а к его установке на самолете, но работа винта на самолете оценивается в целом, и иногда эти дефекты устраняются не «лечением» винта или его установки, а видоизменением соответствующей детали самолета. Так, например, вибрацию детали самолета, вызванную винтом, иногда проще устранить изменением числа собственных колебаний, посредством укрепления ее хомутиком или другими средствами.

Иногда вибрации лопастей винта вызываются прохождением лопастей вблизи какой-либо части самолета. Вибрация винта выражается в виде характерного шума винта, а также тряски самолета. Равномерность работы винта должна являться всегда предметом наблюдения при испытаниях винтов.



Испытания механизма винта выражаются в следующем

1 В определении устойчивости работы винта при переменах режима

2 В определении заброса числа оборотов при резкой даче и сбавлении газа

3 В определении степени устойчивости работы винта при вводе в пикирование и выводе из него

4 В определении малого угла установки винта

5 В определении угла установки флюгера

6 В определении времени ввода во флюгерное положение и вывода из него

7 В определении скорости изменения угла установки лопастей по времени перестановки с малого шага на большой

8 В определении тормозных свойств винта

*Устойчивость работы винта* определяется степенью отклонения числа оборотов винта от заданного как при постоянном, так и при переменных режимах. На первый взгляд кажется, что при постоянном режиме работы винта не может быть неустойчивой работы, однако эта неустойчивость может быть по двум причинам. Во-первых, сам регулятор может быть малоустойчивым и плохо держать числа оборотов постоянными; обычно в окончательной форме это может быть выявлено на самолете. Во-вторых, проводка управления регулятором может быть плохо сделана и от тряски двигателя штурвальчик регулятора может съезжать и самопроизвольно изменять настройку регулятора и тем самым число оборотов.

При переменных режимах система винт — регулятор может получать большие или слабо затухающие колебания. Такими режимами могут быть разбег по земле, вираж, горки, пикирование. При всех этих маневрах двигатель не должен иметь заброс более 150 об/мин и колебания должны затухать после первого цикла. Для проведения этих испытаний должны применяться самозаписывающие (синхронно) приборы — показатель скорости, показатель числа оборотов, указатель установки управления регулятором, указатель установки дросселя двигателя.

«Забросом оборотов винта» называется кратковременное увеличение числа оборотов винта (двигателя) при перемене режима его работы. Так, например, при резкой даче газа может получиться «заброс оборотов», так как регулятор не успевает переставить лопасти винта на больший угол.

Заброс числа оборотов определяется при помощи тех же приборов, летчик на горизонтальном полете резко дает газ или сбавляет его. Допустимый заброс числа оборотов на форсированном режиме может быть таким, чтобы не превышать пределов, допустимых для данного двигателя. Кратковременный заброс числа оборотов, зарегистрированный записью тахографа, не всегда характеризует собой истинный заброс числа оборотов

двигателя, поэтому обычно действительным можно считать заброс до тех чисел оборотов, которые делятся не менее  $1/2$  сек.

Одним из наиболее характерных режимов для определения устойчивости работы винта является пикирование, ибо в этом случае иногда может получиться «раскрутка винта», т. е. значительное превышение числа оборотов над заданными. Эта раскрутка в гидравлических винтах может получиться из-за дефектной работы регулятора и неправильной установки винта. Исключая аварийные случаи, которые могут вызывать раскрутку у некоторых конструкций винтов, раскрутка может получиться при так называемом «масляном голодании» двигателя вследствие неправильной установки масляного бака на самолете и отлива из него масла под действием инерционных сил при пикировании. Установка масляного бака и его конструкция должны быть такими, чтобы масляного голодания двигателя не было и тогда раскрутка винта при пикировании по этой причине исключается.

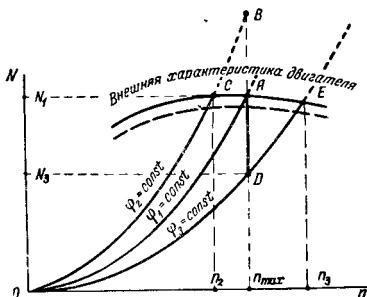
При испытании винта на пикировании используются те же приборы, что были указаны выше.

Определение малого угла установки винта является первой операцией, с которой начинается испытание опытного винта на самолете. Упор малого шага является обязательным для винтов изменяемого шага, как указано в § 4 гл. III. На этом упоре винт становится винтом фиксированного шага и может служить показателем мощности двигателя. Действительно, винт фиксированного шага при работе на месте, установленный на самолете, поглощает определенную мощность в зависимости от числа оборотов. Поэтому при винтах фиксированного шага по числу оборотов, которые дает двигатель при полном дросселе, можно судить о том, дает ли двигатель полную мощность. Например, если двигатель с данным винтом должен развивать на полном дросселе 2400 об/мин, а он развивает только 2350 об/мин, это значит, что имеется какая-то неисправность, которая снижает его мощность. Поэтому в эксплуатационной авиационной практике имеется термин «двигатель не додает обороты», это значит, что двигатель работает неправильно и надо искать причину уменьшения его мощности. Обычно это бывает из-за плохой работы свечей, неправильной карбюрации и т. п. Подбор малого шага винта заключается в определении самого угла и в правильной установке упора регулятора на наибольшее число оборотов.

Обычно малый угол выбирается таким, чтобы двигатель на мощности, близкой к номинальной, давал номинальное число оборотов, ибо пробу двигателя лучше всего производить на номинальной, а не на взлетной мощности, так как нет смысла каждый раз перед взлетом гонять двигатель на форсированном режиме. Часто взлетная мощность и номинальная мощность лежат на одной кубической параболе (фиг. 324). Малый угол

подбирается с точностью, соответствующей 10—15 оборотов в минуту двигателя. Когда малый угол подобран, то следует установить упор регулятора на максимальное число оборотов.

Упор максимальных оборотов регулятора устанавливается для того, чтобы летчик ни при каких манипуляциях не мог получить оборотов больше допустимых; в этом случае регулятор служит предельным предохранителем. Такими предельными максимальными оборотами являются обычно взлетные обороты двигателя, которыми пользуются при разбеге и подъеме на первоначальную небольшую высоту.



Фиг. 324 Характеристика двигателя.

Вообще говоря, упор регулятора максимальных оборотов должен устанавливаться на заводе, выпускающем регулятор, но в эксплуатационной практике бывают случаи, когда или установка упора по тем или иным причинам сбита, или упор был установлен не на те обороты, которые требуются для данного двигателя, и т. п.

Не следует путать упор малого шага винта с упором максимальных оборотов регулятора; упор малого шага винта фиксирует лопасти на определенном наименьшем угле установки, причем в зависимости от передаваемой винту мощности число оборотов винта на этом угле установки будет меняться по кривой фиг. 324. Максимальное число оборотов найдется как пересечение этой кривой с внешней характеристикой двигателя. Упор же регулятора максимальных оборотов служит для того, чтобы отсекать число оборотов двигателя, как только оно достигнет максимального (установленного упором). Мы говорим «достигнет» потому, что, с одной стороны, на малых числах оборотов регулятор еще не вступает в строй и не воздействует на поворот лопастей, а, с другой стороны, малый угол установки таков ( $\varphi_2$  на фиг. 324), что мощность, требуемая для вращения винта

с максимальными числами оборотов, на которые установлен упор регулятора при даче рычага управления регулятором до упора, больше чем дает двигатель на этом числе оборотов (точка  $B$  на фиг. 324). Естественно, что двигатель «сбавит обороты» и для того, чтобы наступил баланс мощностей (равенство даваемой двигателем мощности и потребляемой винтом), число оборотов должно снизиться и соответствовать точке  $C$ . Все рассуждения мы ведем для работы винта на месте, т. е. для работы на земле. Следовательно, при угле установки лопастей  $\varphi_2$  на месте получить число оборотов больше, чем  $n_2$ , нельзя. Если же установить лопасти винта под углом  $\varphi_3$ , то мощность, потребляемая таким винтом в зависимости от числа оборотов, представляется кривой  $\varphi_3 = \text{const}$ ; при даче двигателю газа число оборотов будет увеличиваться, но как только оно достигнет  $n_{\text{max}}$ , вступит в действие регулятор, который начнет переставлять лопасти на больший шаг. Мощность, потребляемая винтом, будет расти и как только достигнет величины, соответствующей внешней характеристике двигателя (точка  $A$ ), наступит равенство мощностей. Следовательно, при увеличении газа двигателя мощность, потребляемая винтом, представится ломаной  $ODA$ , составленной из кривой  $OD$ , когда угол установки  $\varphi_3$  не меняется и винт стоит на упоре, и из вертикальной прямой  $DA$ , когда угол установки лопастей изменится от  $\varphi_3$  до  $\varphi_1$ . Таким образом, когда винт стоит на угле установки  $\varphi_2$  больше, чем тот, который соответствует наибольшему числу оборотов, на который должен быть установлен упор регулятора, то достигнуть этих наибольших чисел оборотов нельзя. Наоборот, при угле  $\varphi_3$  меньше, чем тот, который соответствует наибольшему числу оборотов, достигнуть этих наибольших чисел оборотов можно. Следовательно, для того чтобы установить упор регулятора максимальных оборотов при работе винта на месте, необходимо предварительно выбрать такой угол установки лопасти  $\varphi_3$ , который был бы заведомо меньше угла  $\varphi_1$ , соответствующего наибольшему числу оборотов двигателя при работе винта как фиксированного, т. е. на упоре винта. При таком наименьшем угле установки  $\varphi_3$  винт в определенном диапазоне мощностей (от  $N_3$  до  $N_1$ ) будет, как говорят, «висеть» на регуляторе, т. е. если рычагом управления дросселем двигателя уменьшать газ, то двигатель не будет сбавлять число оборотов, а будет уменьшаться лишь мощность в пределах от  $N_1$  до  $N_3$  (прямая  $AD$ ). Если еще больше сбавить газ, то винт перейдет на кривую  $DO$  и двигатель начнет сбавлять число оборотов.

Все авиационные поршневые двигатели можно разделить на следующие три типа:

1. Взлетная и номинальная мощности и соответствующие числа оборотов равны:

$$N_{\text{взл}} = N_{\text{ном}} \quad \text{и} \quad n_{\text{взл}} = n_{\text{ном}}$$

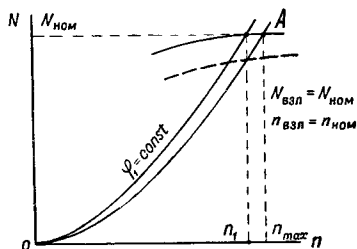
2. Взлетная мощность больше номинальной, а числа оборотов одинаковы:

$$N_{взл} > N_{ном} \text{ и } n_{взл} = n_{ном}.$$

3. Взлетные мощность и число оборотов соответственно больше номинальных:

$$N_{взл} > N_{ном} \text{ и } n_{взл} > n_{ном}.$$

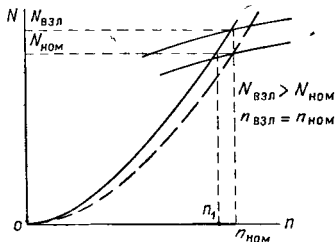
В первом случае, когда взлетная и номинальная мощности и числа оборотов равны, установка упоров и регулятора и винта на одно число оборотов может представить некоторые неудоб-



Фиг 325 Установка упора малого шага винта. Должна соответствовать числу оборотов немного меньшему наибольших чисел оборотов.

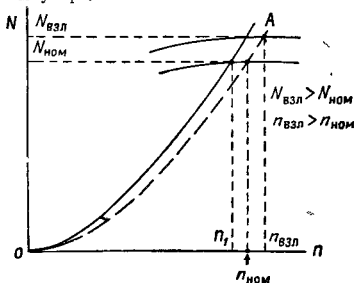
ства в эксплуатации. Действительно, в этом случае мы будем иметь кривую  $OA$  (фиг. 324), которая пересечет внешнюю характеристику двигателя в точке, соответствующей максимальным числам оборотов. Так как обычно кривая  $OA$  около точки  $A$  достаточно крута, то если двигатель имеет по каким-либо причинам пониженную мощность, выражаемую внешней характеристикой, обозначенной пунктирной кривой, то число оборотов немного уменьшится, однако не вполне будет ясно, за счет чего они уменьшились, за счет понижения мощности двигателя или за счет не вполне четкой отсечки числа оборотов регулятором. Поэтому лучше всего в этом случае установку упора малого угла лопастей делать не на номинальном числе оборотов, а немного (на 40—50) меньшем (фиг. 325). Правда, тогда при разбеге несколько теряется мощность. Однако при пологой внешней характеристике потеря эта небольшая, если же характеристика крутая, то все же нарастание числа оборотов при разбеге самолета происходит настолько быстро, что уже при пробеге первых десятков метров число оборотов достигает наибольшего значения, установленного упором регулятора.

Точно так же и для второго и третьего типов двигателя удобнее упор малого угла устанавливать на 40—50 оборотов меньше соответствующего номинальному числу оборотов (фиг. 326, 327). Для того чтобы проверить, не «висит» ли винт на регуляторе,



Фиг. 326. Установка упора малого шага при  $N_{взл} > N_{ном}$  и  $n_{взл} = n_{ном}$ .

следует дать газ, соответствующий номинальному режиму, а затем понемногу передвигать рычаг управления регулятором на уменьшение числа оборотов. Если двигатель не реагирует на такое передвижение, это служит подтверждением того, что винт стоит на своем упоре.



Фиг. 327. Установка упора малого шага винта при  $N_{взл} > N_{ном}$  и  $n_{взл} > n_{ном}$ .

Если на двигателе имеется какое-либо устройство для определения мощности, например, специальный указатель мощности, то проверка мощности винтом отпадает и упор малого угла установки можно устанавливать в точности совпадающим с уг-

лом, соответствующим кривой *OA* (фиг. 324), т. е. дающим на наибольшей мощности наибольшее число оборотов. Указателем мощности может также служить указатель угла установки винта (пока такой прибор широкого распространения не получил). Действительно, зная, что номинальное число оборотов двигателя получается при определенном угле установки винта, можно проверять мощность двигателя по углу; если при номинальном числе оборотов угол установки получился меньшим, то следовательно, мощность двигателя мала, и следует искать причину его неисправной работы. В этом случае (при наличии указателя угла установки) малый угол следует выбирать несколько меньшим (на  $1-2^\circ$ ) угла, соответствующего номинальной мощности и числу оборотов. Уничтожать совершенно упор малого шага в винте ни в коем случае не следует, ибо тогда при каких-либо неисправностях регулятора может получиться «раскрутка винта».

Определение угла установки флюгера производится в полете. Перед полетом на земле упор флюгерного положения устанавливается на угол, заведомо меньший флюгерного (например,  $80^\circ$ ), и производится полет, в котором винт устанавливается во флюгерное положение.

Если винт вращается во флюгерном положении в сторону нормального вращения, то следует на земле переставить упор флюгера в сторону увеличения угла. Такие операции следует производить до тех пор, пока не будет достигнут такой угол установки флюгера, когда винт не вращается во флюгерном положении на всех скоростях полета. Следует избегать обратного вращения винта, ибо конструкция некоторых двигателей не допускает этого. Исходная величина угла определяется по характеристике винта.

Определение времени ввода во флюгерное положение и вывода из него производится как при работе винта «на месте», так и в полете. По секундомеру засекается время от начала ввода до момента остановки винта в полете или до видимого положения флюгера при переводе во флюгерное положение на земле. Не следует переводить во флюгерное положение винт, работающий на месте на земле, так как при флюгерном положении лопастей двигатель может заглохнуть. Начало ввода во флюгерное положение при испытании на земле считается с положения на минимальном угле, в полете же угол ввода определится скоростью полета.

Определение скорости угла перестановки лопастей в рабочем диапазоне производится путем нахождения времени перестановки из одного крайнего положения в другое, т. е. с малого шага на большой и обратно. На земле такое испытание не всегда возможно, так как часто упор большого шага соответствует очень большому углу установки лопастей, при котором двигатель будет слишком нагружаться. В полете рычагом управления регулятором устанавливается максимальное число оборотов

двигателя на какой-либо скорости полета (лучше на наименьшей или близкой к ней, чтобы увеличить диапазон перестановки), затем одновременно включается секундомер и рычаг регулятора переставляется на крайнее малое число оборотов. Секундомер засекается, когда число оборотов достигает наименьшего. Затем определяется время обратного хода лопастей. Время перестановки лопастей с больших на малые числа оборотов и обратно является лишь относительным критерием скорости перестановки лопастей, так как обычно малый угол установки в полете не бывает известен. Для точного определения скорости перестановки лопастей следует применять указатель угла установки лопастей. Однако этот прибор не является пока стандартным и применяется лишь при точных научно-исследовательских испытаниях.

*Определение качества работы винта в условиях низких температур* производится в полете на высоте, соответствующей той температуре, при которой следует произвести испытание винта. Предварительно следует находиться при этой температуре 10—15 мин., чтобы температура винта успела снизиться до соответствующей низкой температуры, а затем при наименьшей скорости следует рычагом управления регулятором переставить винт с наибольшего (номинального) числа оборотов на наименьшее. Время перестановки с больших оборотов на малые и будет служить критерием скорости перестановки, а отношение времени перестановки при нормальной температуре ко времени перестановки при низкой температуре будет служить критерием работы винта при низких температурах.

При низких температурах следует также определить время ввода во флюгерное положение и вывода из него. Тогда отношение времени ввода или вывода при нормальной температуре ко времени ввода или вывода при низкой температуре и будет служить критерием работы флюгерного устройства винта при низких температурах.

Аэродинамические свойства винта определяются его аэродинамическими характеристиками, поэтому задачей испытания винта является определение этих аэродинамических характеристик. Однако оказывается, что определение этих характеристик весьма сложно и в эксплуатационной практике трудно достижимо.

Главнейшей характеристикой, выявляющей качество винта, является к. п. д.  $\eta$ , который равен

$$\eta = \frac{PV}{75N} = \frac{\alpha\lambda}{\beta},$$

следовательно, чтобы найти к. п. д., надо знать тягу, скорость и мощность или их коэффициенты.



По формуле (173) можно получить к. п. д. винта

$$\eta = \frac{1}{270} \frac{Vq}{\frac{c_y}{c_x}}, \quad (397)$$

где  $q = \frac{G}{N}$  кг/л. с. — нагрузка на 1 лошадиную силу мощности двигателя, а скорость полета  $V$  выражена в км/час.

Как указывалось в § 2 гл. XII, в эксплуатационных условиях можно достаточно точно определить из полетных испытаний произведение коэффициента полезного действия винта на качество самолета, отделить же к. п. д. винта от качества самолета, т. е. отделить винт от самолета, задача весьма сложная и может быть сделана только с применением сложной аппаратуры.

Следовательно, из полетных испытаний винта его аэродинамические характеристики не определяются и приходится довольствоваться относительным качеством винта, т. е. определять летные характеристики самолета — наибольшую горизонтальную скорость, скороподъемность, разбег и потолок и сравнивать эти характеристики, полученные с другим винтом. *Из полетных испытаний можно лишь узнать, что такой-то винт лучше или хуже другого, но нельзя узнать его к. п. д.*

Накопец последним испытанием винта является длительное эксплуатационное его испытание на самолете. После таких испытаний делается общее заключение о данном типе винта, устраняются все замеченные дефекты и винт запускается в производство.

#### § 4. Испытание деталей оборудования винтов

Испытания всех деталей оборудования винта можно разделить на два типа:

1. Испытание опытных образцов с их доводкой.
2. Контрольные испытания серийных деталей оборудования.

К первым относятся длительные доводочные и эксплуатационные испытания как самих деталей, так и всей установки в целом, к которой относится данное оборудование. Во время этих испытаний выявляются все дефекты конструктивного, технологического и эксплуатационного характера. По этим испытаниям дается заключение о возможности пуска данного оборудования в серийное производство.

Ко вторым относятся испытания контрольного характера серийной продукции с целью контроля качества изготовления.

*Испытания регуляторов* обыкновенно разделяются на два вида: 1 — испытание гидравлической или электрической части и 2 — испытание его регулирующей части.

При испытании гидравлического регулятора производится:

- 1) определение расхода масла насосом, т. е. нахождение полной характеристики насоса регулятора (фиг. 104) при различных давлениях подачи, и изменение этой характеристики по времени;
- 2) определение утечки масла через зазоры и изменение ее по времени;
- 3) нахождение величины износа деталей после определенного времени наработки регулятора.

При электродистанционном управлении гидравлическим регулятором одновременно должно производиться и испытание электрической головки, причем это испытание может быть сделано и раздельно, т. е. головка может испытываться и независимо от испытания гидравлической части регулятора. Это испытание состоит в проведении определенного числа полных переключений от одного концевого контакта (большого шага) до другого (малого шага) и обратно для того, чтобы выявить работоспособность электродвигателя головки и его редуктора в течение длительного времени, а также качество концевых контактов.

В электрических регуляторах испытанию подлежат лишь контакты, которые при том или ином положении центробежных грузов производят включение или выключение цепи.

Испытание регулирующей части заключается в определении чувствительности регулятора, степени затухания его колебаний и амплитуды колебаний.

Все испытания регуляторов, как гидравлических, так и электрических, производятся на специальных установках. Программы этих испытаний предопределяется теми техническими требованиями, которые предъявляются к данному типу регулятора.

Контрольные испытания регулятора при серийном производстве заключаются в определении расхода масла при определенных давлениях на входе и выходе и определенной температуре масла и утечки масла — для гидравлических регуляторов; правильной отсечке контактов — для электрических регуляторов. Иногда у тех и других контролируется и чувствительность, т. е. степень реагирования золотника или контактов при изменении числа оборотов на некоторую минимальную величину.

Ввиду того, что регуляторы всегда устанавливаются на двигателе и поэтому подвержены тряске, в особенности в случае звездообразного двигателя, необходимы испытания регулятора на вибрацию. Для этого опытный регулятор проходит длительное испытание на вибрационном стенде, на котором ему задаются колебания определенной частоты и амплитуды.

Частота и амплитуда колебаний задаются техническими требованиями к регулятору и зависят от того, какие вибрационные характеристики имеет двигатель, на который предназначается данный регулятор.

После описанных испытаний в лаборатории завода опытный регулятор должен пройти длительное испытание на двигателе, при работе его на стенде. Обычно эти испытания совмещаются

с какими-либо длительными испытаниями двигателя. Наконец регулятор должен пройти летные испытания, при которых выявляются его конструктивные и эксплуатационные качества и свойства регулятора как такового.

Из флюгерного устройства обычно основной частью, подлежащей испытанию, является флюгерный электронасос, который испытывается на производительность. Все условия испытания устанавливаются соответствующими техническими требованиями, которые составляются исходя из эксплуатационных и конструктивных требований к винту.

Остальные части флюгерного оборудования, если они не являются стандартными деталями, также испытываются исходя из требований к ним.

В противообледенительном устройстве отдельным испытаниям подвергается основная его часть, которой при жидкостно-химическом противообледенителе является электронасос. Он подвергается стандартным испытаниям, т. е. определению производительности и длительным испытаниям. При контрольных испытаниях определяется только производительность.

Весьма важным этапом испытания противообледенительного устройства являются летные испытания, в которых выявляется действие всей системы. Однако полное испытание этого устройства представляет большие трудности, так как редко могут представиться условия, при которых будет происходить обледенение. Поэтому испытание жидкостных противообледенителей заключается в снятии спектров омывания лопастей жидкостью. Для этого лопасти намазывают раствором меда, а жидкость, попадая на лопасть, оставляет на ней след, который и будет являться спектром омывания (фиг. 328). Так как спектр зависит от режима работы винта, то эти испытания следует произвести при различных режимах. Сначала обычно проводится испытание при работе винта на месте при различных числах оборотов винта. Однако следует заметить, что спектр омывания в этом случае будет значительно отличаться от того спектра, который получится в полете. Как при работе на месте, так и в полете испытание производится следующим образом. Уста-



Фиг. 328 Спектр омывания лопасти противообледенительной жидкостью.

навливается режим работы винта и после 3—5 мин. включается на 10 мин. противообледенительное устройство. После посадки снимается фотоаппаратом спектр омывания. Такие испытания проводятся на нескольких режимах работы винта, близких к крейсерскому. Во время испытаний производятся наблюдения за работой схемы и отмечаются все дефекты.

*Испытание кока винта* производится для выявления его прочности и главным образом вибростойкости. Это испытание производится на двигателе в течение длительного промежутка времени. Конструкция кока должна быть такой, чтобы выдержат без дефектов испытание в течение гарантийного срока серийного винта. Такие испытания совмещаются с длительными испытаниями двигателя или винта и проводятся на разных режимах, установленных для испытания двигателя.

### § 5. Уравновешивание винтов на самолете

Перед установкой на самолет винт должен быть статически уравновешен в полной сборке, т. е. со всем оборудованием: коком, противообледенительным устройством и другими добавочными частями оборудования, которые не поставляются винтовым заводом. Это уравновешивание производится на лобовом станке, который должен давать возможность его уравновесить в точности в таком же виде, как он устанавливается на самолет. Но все же даже и при этом уравновешивании винт на самолете может трясти по причинам, указанным в § 1 гл. XXII. Поэтому на самолете винт снова приходится уравновешивать, но уже динамическим путем. Идея этого способа заключается в следующем. Если на каждую лопасть последовательно навешивать какой-либо груз, то при вращении винта груз на той лопасти, на которой он более всего приближает центр тяжести винта к оси вращения, дает наименьшую тряску самолета; этим определяется фаза неуравновешенности. Если подобрать соответствующую величину груза для этой лопасти, то можно довести тряску самолета до минимальных размеров. Обычно таким грузом служит изолировочная лента, несколько витков которой наматывается на лопасть на расстоянии одного метра от оси винта. Когда винт уравновешен, то на болты втулки укрепляется груз, соответствующий по моменту весу ленты. Тряска самолета определяется по ощущению человека или, лучше, при помощи виброметра или вибрографа, которые устанавливаются в каком-либо наиболее характерном в смысле тряски месте самолета. На разных типах самолетов эти места бывают разные. При таком уравновешивании винта часто колебания, вызываемые винтом, маскируются колебаниями самолета на пневматиках или амортизаторах шасси. В этом случае следует как-либо исключить эти колебания, например, заклинчиванием амортизации или подвешиванием самолета так, чтобы пневматики не сжимались.

Иногда успокоить эти колебания можно подвизыванием хвоста самолета. Однако даже все эти предосторожности не всегда дают возможность уравновесить винт. Случается это тогда, когда винт не уравновешен динамически и простым навешиванием грузов этот динамический момент не уравнивается. Следует тогда сменить винт на этом самолете. Если же этот винт и на другом самолете ведет себя так же и дает не уменьшающуюся с уравниванием тряску, то следует попробовать уравновесить его динамический момент противоположным аэродинамическим моментом. Как мы видели в § 2 гл XVIII, аэродинамическая неуравновешенность подобна динамической неуравновешенности, поэтому если создать аэродинамический момент, равный по величине, противоположный по знаку и совпадающий по фазе с неуравновешенным динамическим моментом, то тряска самолета может уменьшиться. Создать такой аэродинамический момент можно, если на какой-нибудь лопасти немного изменить в ту или иную сторону угол установки лопасти. Насколько, в какую сторону и на какой лопасти надо это сделать — находят пробам, каждый раз запуская двигатель. Следует, однако, заметить, что созданием такого аэродинамического момента можно уравновесить динамический момент только на одном режиме полета, на других же режимах полного уравнивания не будет. Все же таким путем иногда возможно если не полностью уничтожить, то во всяком случае значительно уменьшить тряску самолета.

## Глава XXIV

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВИНТОВ НА САМОЛЕТЕ

#### § 1. Транспортировка винтов

Транспортировка винтов может быть дальняя и ближняя. Под последней подразумевается отправка собранного, уравнированного, отрегулированного винта с завода или из ремонтной мастерской для установки на самолет в том случае, когда завод или мастерская находятся на самом аэродроме или на некотором сравнительно небольшом расстоянии от него. Ввиду весьма больших габаритов собранного винта дальняя транспортировка винта почти всегда производится в разобранном виде. Поэтому винты с легко съемными лопастями представляют в этом смысле большие удобства. Разобранный винт имеет весьма небольшие габариты и укладывается обычно в два ящика — в одном помещается втулка с запасными частями и инструментом, а в другом лопасти.

Транспортировка винтов на дальние расстояния может производиться по железной дороге, на автомобиле и на самолете. В первых двух случаях упаковка должна быть в двух ящиках, при доставке же винта на самолете упаковка может быть об-

легченная, при которой лопасти обертываются в крепкую упаковочную бумагу и перевязываются бичевкой, причем комлевая часть должна быть отдельно предохранена и завернута более плотным картоном или обложена дощечками так, чтобы они образовали коробку. При укладке лопастей в ящик необходимо, чтобы лопасти опирались в нем на подставки, обитые войлоком, и были надежно в нем закреплены. Ящики как для втулки, так и для лопастей должны быть изнутри обиты толстым картоном для предохранения от сырости.

При упаковке больших винтов необходимо следить за тем, чтобы общий вес каждого ящика не превышал 100—150 кг и при большом количестве лопастей помещать их не в одном, а в двух ящиках.

Винты двухлопастные деревянные или металлические укладываются в собранном виде в одном ящике.

При ближайшей транспортировке винтов на автомобиле следует руководствоваться следующими соображениями. Наименьшие габариты винта меньше его диаметра; на фиг. 48 даны габаритные размеры трехлопастных и четырехлопастных винтов. Согласно правилам уличного движения ширина механического транспорта не должна превышать 2,6 м, высота (от земли) 4 м, а длина сзади выступающего груза 2 м. В противном случае должно быть получено разрешение Госавтоинспекции. Из фиг. 48 видно, что по городу можно провозить собранные винты трехлопастные диаметром до 3,4 м, а четырехлопастные — до 3,7 м.

При перевозке собранного винта на автомобиле он устанавливается на специальную подставку и прочно укрепляется к кузову.

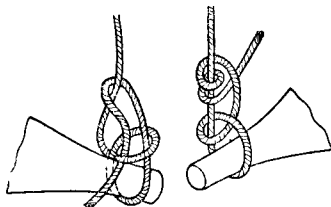
Перед самолетом, до того как он надевается на носок вала двигателя, винт следует устанавливать на подставку или на козлы так, чтобы он лежал на опорах всеми своими лопастями. Подставки лучше всего делать деревянными и в месте соприкосновения с лопастями обивать войлоком.

## § 2. Установка и снятие винта на самолете

Доставленный к самолету винт, будь он в ангаре или на открытом воздухе, должен быть поставлен на специальную подставку или козлы. Ни в коем случае нельзя ставить винт на пол или на землю. Если винт устанавливается не сразу же на самолет, то втулку его следует чем-либо укрыть от попадания пыли.

Прежде чем окончательно надевать винт на носок двигателя, следует проверить прилегание конусов. Необходимо добиваться, чтобы поверхность конусов прилегала до 60% всей своей поверхности. Опробование прилегания производится по краске и пробным надеванием винта на носок. Для этого передний и задний конуса смазываются тонко размельченной краской и винт

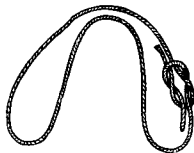
способом, указанным ниже, надевается на носок и зажимается слегка гайкой. Если конуса касаются поверхностью меньше 60% всей поверхности, то их следует притереть и добиться такого прилегания. При недостаточном прилегании на конусах при работе получается наклеп, а иногда и пригорание поверхности, что связано с большой трудностью снятия винта.



Фиг. 329 Узлы крепления строп за винт

Перед окончательной установкой винта на носок вала следует промыть конуса, а также шлицы на носке и на втулке бензином, а затем смазать их техническим вазелином или на крайний случай моторным маслом.

Для установки винта применяется передвижной кран, так называемый «гусь» грузоподъемностью от 0,5 до 1,0 т. Кран захватывает винт через специальные стропы, перекинутые через две лопасти. Стропы делаются из стального троса, обязательно обтянутого кожей. Ни в коем случае нельзя пользоваться голым тросом в качестве строп, так как трос царапает лопасти, а царапины на лопастях весьма опасны, так как могут явиться очагами начала усталости материала и, следовательно, понижения прочности винта. В случае отсутствия специальных строп можно пользоваться пеньковым канатом толщиной около 20 мм, который захватывает две лопасти одним из двух способов, указанных на фиг. 329 и 330. В первом случае применяется одинарный канат, а во втором двойной — кольцевой.



Фиг. 330 Кольцевая стропа с узлом

Прежде чем надевать стропы, следует посмотреть, в каком положении стоит заглушенная шлица на носке двигателя, и соответственно с этим захватывать стропами те лопасти, которые позволили бы винту стать в положение, при котором пропущенная шлица во втулке совпадала бы с заглушенной шлицей на носке вала. Необходимо следить за тем, чтобы стропы не заде-

вали за кок винта и за трубки противообледенительного устройства и не попортили то и другое. После этого следует поднимать винт краном, принимая все меры предосторожности, чтобы лопасти винта не заделали за что-нибудь и не поцарапались.

Перед надеванием винта на носок следует удостовериться, что на носке надет задний конус. Установив винт на кране по высоте так, чтобы отверстие во втулке совпадало с носком, осторожно пододвигают кран к двигателю и вдвигают винт на носок, регулируя положение втулки на совпадение заглушенной и пропущенной шлиц. Вдвижение следует делать резко, так, чтобы винт стукнулся о задний конус, при этом винт должен совершенно легко вдвигаться на вал; не следует его надевать силой. Если винт не входит на вал (что встречается очень редко), следует осмотреть шлицы носка и втулки, нет ли в них инородных предметов. Если и после этого винт не входит, то его следует сменить, отослав на завод для проверки шлиц. После установки винта на валу надевается передний конус вместе с гайкой и съёмным кольцом. Предварительно перед установкой винта следует проверить, хорошо ли завинчивается гайка на носке. Она должна идти и не туго и не очень слабо. Если гайка идет туго, то ее обязательно следует сменить и ни в коем случае не завинчивать силой. Нарезка вала и гайки сделана в очень твердой легированной стали и если гайка «заест», то отвинтить ее уже невозможно и придется распиливать. Поэтому если при пробе гайка идет туго, то ее надо отвинтить и посмотреть нарезку на валу и на гайке, нет ли на них заусенцев, которые следует снять надфилем. Если гайка идет недопустимо слабо, то ее надо сменить.

При окончательном затягивании гайки к ней надо приложить момент примерно в 50 кгм. Далее гайка законтривается соответствующим приспособлением и на винт надеваются остальные детали и узлы, как то: цилиндр в гидравлических винтах и электродвигатель в электрических. Надо следить, чтобы в эти узлы перед установкой их на винт не попала пыль. После этого проверяется, правильно ли установлены все трубки подачи противообледенительной жидкости и надевается ли кок винта.

Некоторые винты удобнее монтировать на двигатель, когда лопасти установлены на большой шаг. В этом случае после окончательного монтажа следует лопасти переставить на малый шаг. В гидравлических винтах сделать это механизмом винта на неработающем двигателе нельзя, поэтому следует лопасти переставить на малый шаг принудительным путем, захватывая каждую лопасть специальным рычажным приспособлением — «гитарой». Передвигать на малый шаг следует, прилагая усилия одновременно ко всем лопастям во избежание перекоса механизма. Не следует запускать двигатель на большом шаге винта, так как это излишне нагружает его и затрудняет запуск, в особенности холодного двигателя.



Может случиться в гидравлическом винте прямой схемы, что после первых нескольких вспышек двигателя винт самопроизвольно встанет на большой шаг и двигатель заглохнет. Происходит это от того, что в цилиндре и в магистрали к винту скопился воздух и насос регулятора вследствие малых чисел оборотов не развил достаточного давления, между тем как центробежные грузы на лопастях передвигают винт на большой шаг. Для того чтобы устранить эту неполадку, нужно снять цилиндр винта и заполнить его маслом, а затем осторожно надеть, чтобы не вылить много масла из цилиндра. После этого винт будет нормально работать.

Если на самолет устанавливается новый винт или регулятор, то следует установить упоры винта и регулятора по методу, указанному в § 3 гл. XXIII.

Снятие винта производится в порядке, обратном установке. При отвинчивании зажимной гайки ключ сначала идет очень туго, когда отпускается сильно затянутая гайка, а затем, когда затяжка вся выбрана, гайка отвертывается легко до того, пока она не упрется в съемное кольцо, после чего отвертыванием гайки винт будет стаскиваться с конусов. Если конуса пригорели, то стаскивание винта бывает иногда трудным; поэтому всегда нужно следить за конусами и не давать им пригорать — гарантией этому служит хорошее прилегание конусов.

Как только винт стронут с конусов, следует надеть на него стропы и с указанными выше предосторожностями подвести кран, которым приподнять винт и затем снять его с носка, принимая все меры предосторожности, чтобы не повредить поверхности конусов, шлицы, нарезку на носке вала и другие выступающие детали, как штуцеры подвода масла в винт и т. п.

При спуске винта с крана он должен быть положен обязательно на подставки, упирающиеся в лопасти, и если винт сейчас же не отвозится от самолета, то втулка его должна быть укрыта от попадания пыли и влаги.

Первой операцией после установки винта на двигатель для возможности контроля правильности работы винта и его оборудования является запуск и прогрев двигателя.

Как правило, двигатель должен запускаться всегда на малом шаге винта и на этом же шаге должен производиться прогрев его. Для этого винт после полета перед остановкой двигателя переводят на малый шаг. Однако в некоторых случаях установка винта на малый шаг при его остановке представляет в эксплуатации большие затруднения. Дело в том, что в случае применения гидравлических винтов прямой схемы винт находится на малом шаге тогда, когда цилиндр винта наполнен маслом. В зимнее время при долгой стоянке самолета с таким винтом на малом шаге от низкой температуры масло в цилиндре загустеет и при запуске двигателя нужно долго прогревать винт. Для того чтобы масло в моторной магистрали не загустевало от низкой тем-

пературы, в эксплуатационной практике применяется разжижение масла бензином перед остановкой двигателя. Такое разжижение масла благоприятно действует на работу винта, поэтому при разжиженном масле даже и винты прямой схемы можно останавливать на малом шаге без опасения, что масло в цилиндре загустеет при низкой температуре. Если же разжижения масла в двигателе не производится, то гидравлические винты прямой схемы рекомендуется останавливать на большом шаге и на этом же шаге запускать двигатель. Иногда в этом случае применяется еще следующий метод. После остановки двигателя на большом шаге регулятор переводится на малый шаг и винт рычагами переводится на малый шаг. В этом случае в цилиндр винта частично будет засосан воздух, что и необходимо иметь в виду при запуске двигателя.

Прогрев двигателя следует производить всегда только на малом шаге. Прогрев двигателя, особенно в зимнее время, составляет достаточно большой процент времени, а так как на большом шаге и на необходимых для прогрева числах оборотов мощности тратится больше, чем на малом шаге (вследствие большего угла атаки лопастей винта), то расход горючего при прогреве на большом шаге будет больше, чем на малом. Кроме того, при прогреве на большом шаге вследствие большей отдачи мощности прогрев охлаждающей системы будет идти быстрее, чем прогрев масла. Поэтому после запуска двигателя на большом шаге надо быстрее переводить винт на малый шаг, как только манометр давления масла в двигателе покажет нормальное давление для данных чисел оборотов.

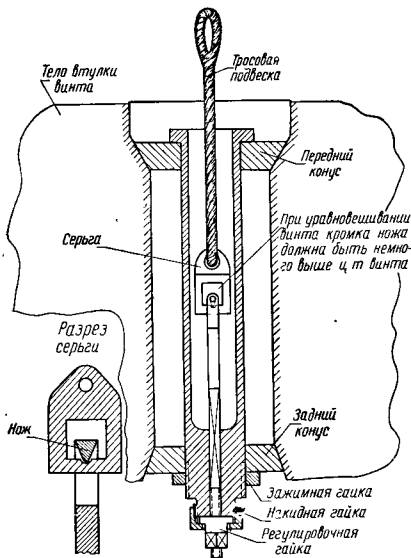
### § 3. Эксплуатация винтов изменяемого шага

Винты изменяемого шага различных конструкций требуют различного ухода при эксплуатации. О том, как эксплуатировать винт, обычно указывается в специальных инструкциях, прилагаемых к винту. В случае опытных винтов, еще не бывших в эксплуатации, завод, выпустивший этот винт, должен прислать инструкцию по уходу за винтом. Но, помимо специальных вопросов, описываемых в этих инструкциях, можно наметить и некоторые общие положения по уходу за винтами.

Всякий хороший, испытанный и доведенный винт при правильной его эксплуатации требует так называемых регламентных работ, т. е. некоторых предупредительных работ, которые давали бы возможность винту работать в нормальных для него условиях. Регламентные работы заключаются в том, что через определенное число наработанных винтом часов, указанное в инструкции, необходимо производить над винтом некоторые операции, как то: прочистку механизма винта, смену смазки, износившихся деталей и т. п.

Ввиду того что лопасти винта работают в тяжелых условиях тряски и больших нагрузок, следует особое внимание уделять

внешнему осмотру лопастей, уходу за ними и содержанию их в чистоте. Дуралюминиевые лопасти подвержены усталости, а различные царапины, зазубрины могут явиться очагами распространения усталостных трещин. Поэтому необходимо во время

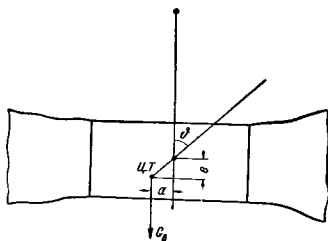


Фиг. 331 Схема прибора для уравновешивания винта в полевых условиях.

эксплуатации строго следить за состоянием лопастей винта и уничтожать царапины и зазубрины. Царапины следует уничтожать шкуркой, а зазубрины заглаживать бархатным напильником, чтобы не было резких переходов.

Так как дуралюминий подвержен коррозии, то лопасти следует защищать от атмосферного воздействия и при стоянке самолета на винты должны быть обязательно надеты чехлы.

Лопастей следует поддерживать в чистоте, помня, что грязные лопасти создают в полете большое сопротивление. В качестве примера можно привести следующий случай. В 1934 г. М. М. Громовым был установлен на самолете АНТ-25 мировой рекорд дальности полета по замкнутой кривой. На этом самолете в то время были установлены деревянные винты. При испытании оказалось, что в том случае, если винты вполне чистые и гладко отполированы, двигатель дает несколько большее число оборотов. Так как винты были фиксированного шага, то это доказывало, что полированные винты дают меньшее сопротивление вращению двигателя и поэтому двигатель увеличивал число оборотов. Это дало возможность несколько увеличить дальность полета самолета АНТ-25.



Фиг. 332 Схема уравнивания винта на подвесе.

Большое значение имеет правильная уравновешенность винта. Полностью доведенный винт во время эксплуатации не должен требовать уравнивания. Однако в том случае, когда приходится менять кож винта или какое-либо другое оборудование, повешенное на винт, то следует проверить уравновешенность винта в полностью собранном виде. Применять обычные балансировочные станки во многих случаях не представляется возможным и следует воспользоваться каким-либо другим способом уравнивания, который можно было бы применять в полевых условиях. В этом случае можно применять способ подвешивания винта. Винт подвешивается в положении, в котором плоскость его вращения горизонтальна, с помощью троса, укрепленного специальным приспособлением немного выше центра тяжести винта (фиг. 331). Отклонение от горизонтального положения свидетельствует об уравновешенности винта. Пусть винт при уравнивании таким способом отклонился от горизонтальной на угол  $\varphi$  и пусть расстояние точки подвеса от плоскости, параллельной плоскости вращения винта и проходящей через центр

тяжести винта, равно  $e$  (фиг. 332). Тогда статическая неуравновешенность винта будет

$$N_e = G_b \cdot a.$$

С другой стороны,  $a = e \operatorname{tg} \theta$ , отсюда

$$N_e = G_b e \operatorname{tg} \theta.$$

Следовательно, если известно расстояние  $e$  и угол отклонения плоскости винта от горизонтали  $\theta$ , то можно определить и статическую неуравновешенность винта  $N_e$ .