Е. М. ФАТЕЕВ

ВЕТРОДВИГАТЕЛИ И ВЕТРОУСТАНОВКИ

УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ВЫСШИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Е. М. ФАТЕЕВ
доктор технических наук

ВЕТРОДВИГАТЕЛИ И ВЕТРОУСТАНОВКИ

Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия для институтов и факультетов механизации сельского хозяйства

ОГИЗ — СЕЛЬХОЗГИЗ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА — 1948

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. РАЗВИТИЕ ВЕТРОИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В нашей стране энергия ветра широко использовалась издавна, главным образом, в сельском мукомольном производстве. Число ветряных мельниц достигало 200 000; в некоторых больших сёлах имелось до 80 мельниц. Это были деревянные мельницы местного крестьянского производства, средней мощностью, как правило, около 5 л. с.; встречались изредка и большие ветряные мельницы с диаметром ветроколеса в 20—24 м, мощностью в 15—20 л. с. Таким образом, кустарные мельницы имели среднюю установленную мощность в 1 млн. л. с. Средняя годовая выработка одной такой мельницы составляла около 8 500 л. с. часов, следовательно, все имевшиеся мельницы могли давать 1 700 млн. л. с. часов в год. Считая удельную производительность мельницы 20 кг/л. с. час, находим, что ветряные мельницы в России перемалывали в год около 34 млн. т., или 2 миллиарда пудов зерна.

Постройка ветродвигателей основывалась лишь на многолетнем практическом опыте. Мастера учили последующие поколения не по книгам, а на практической работе.

Развитие машиностроения позволило создать к концу XIX века новый тип ветродвигателя с автоматическим установом на ветер и регулированием числа оборотов. Начинает развиваться массовое производство многолопастных ветряков металлической конструкции.

Развитие авиации, огромный успех которой обязан истинному творцу современной аэродинамики знаменитейшему русскому учёному Н. Е. Жуковскому, создало условия для разрешения по-новому теоретических вопро-

сов использования энергии ветра. В 1914—1918 гг. Н. Е. Жуковским и его учениками, которые сейчас являются виднейшими учёными СССР, — В. П. Ветчинкиным, Г. Х. Сабининым, Г. Ф. Проскура и другими, — создаётся впервые теория ветродвигателей.

Теория и испытания крыла и винта самолёта применяются и к изучению явлений, происходящих при прохождении воздушного потока через ветровое колесо. В СССР в Центральном аэрогидродинамическом институте, в б. Центральном ветро-энергетическом институте и во Всесоюзном институте механизации и электрификации сельского хозяйства создан ряд оригинальных теоретических и экспериментальных работ по ветродвигателям и ветросиловым установкам, составляющих сейчас основу развития советской ветротехники.

Вместе с этим расширяется и область применения ветродвигателей в народном хозяйстве. Кроме мукомолья и водоснабжения, они используются для более широкой механизации в сельском хозяйстве, как-то: для подготовки кормов в животноводческих хозяйствах, орошения садов и огородных культур, для освещения селений и т. п.

В Советском Союзе ветроустановки нашли широкое применение и приобретают всё возрастающее значение. Благоприятные ветровые условия Юга, характеризующиеся высокими среднегодовыми скоростями ветра, позволяют регулирующемуся ветродвигателю типа Д-12 давать вполне равномерное напряжение тока и обеспечивать потребности в электроэнергии.

Энергия ветра может использоваться почти всюду; поэтому она и имеет особое значение среди других источников энергии.

Ветроиспользование в СССР рассматривается как важная государственная проблема. Ещё в 1918 г. В. И. Ленин считал необходимым поручить Академии наук включить в план реорганизации промышленности и экономического

подъёма России, наряду с другими проблемами, водные силы и ветряные двигатели вообще и в применении к земледелию [1].

XVIII съезд ВКП(б) в резолюции по докладу тов. В. М. Молотова указывал: «В целях экономии топлива широко развить строительство небольших ветроэлектростанций».

«Широко развернуть строительство мелких колхозных гидростанций, ветросиловых и газогенераторных электроустановок на местном топливе».

«Организовать массовое производство ветродвигателей»[2]

Закон о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг. гласит: «Обеспечить массовое строительство в сельских местностях небольших гидроэлектростанций, ветростанций и тепловых электростанций с локомобильными и газогенераторными двигателями».

§ 2. ПРИМЕНЕНИЕ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Энергия ветра используется в различных отраслях народного хозяйства, однако массовое развитие ветроустановки получили в сельском хозяйстве.

Водоснабжение представляет ту область, где наиболее удобно и выгодно применение ветродвигателей. При наличии водонапорной башни с баком для запаса воды на одни-двое суток, можно полностью обеспечить хозяйство водою за счёт энергии ветра. Накачивая воду в резервный бак, ветродвигатель аккумулирует энергию ветра в виде поднятой воды.

Таким образом, представляется возможность полностью освободить живую силу, которая во многих местах СССР

[1] В. И. Ленин. Сочинения, том XXII, 1931 г., стр. 232. «Набросок плана научно-технических работ».

[2] «ВКП(б) в резолюциях и решениях съездов, конференций и пленумов ЦК», ч. II, 1941 г., стр. 735 и 739.

ещё широко применяется для транспорта воды. Особенно большое значение ветродвигатели приобретают в водоснабжении животноводческих хозяйств степных районов, где воду получают, главным образом, из глубоких скважин и колодцев. Применение здесь ветронасосных установок является наиболее доступным способом механизации подъёма воды.

Орошение представляет одну из основных частей комплекса мероприятий по борьбе за высокий урожай. Механизация подъёма воды в оросительные системы встречается с серьёзнейшими трудностями из-за недостатка местных энергетических ресурсов.

Использование энергии ветра может дать в некоторых случаях вполне удовлетворительное решение задачи механизации орошения, особенно небольших участков овощных культур и садов, где сроки полива не столь жёстки. Овощные культуры требуют искусственного орошения почти повсюду и не только в засушливые годы. Здесь ветродвигатели могут быть выгодно использованы для подъёма воды на высоту от 4 до 20 м. Ветродвигатель мощностью в 15 л. с. может оросить за сезон до 15—20 га с подъёмом воды до 10 м. Целесообразно работу ветродвигателя по орошению совместить с какой-либо другой работой, например, на электроосвещение или помол в период, когда орошение не требуется.

Осушение заболоченных земель представляет наивыгоднейший случай применения ветродвигателей в сельском хозяйстве. Здесь не требуется ни аккумулирующих устройств, ни повседневного присутствия человека для пуска и останова ветродвигателя; он может работать и откачивать воду из осушительной системы всё время, когда есть ветер. Сельское хозяйство Голландии очень многим обязано именно работе ветродвигателей, превративших заболоченные земли в плодородные поля.

Помол зерна на ветряных мельницах не случайно имеет свою многовековую историю. Издавна мельницы играли

важнейшую роль в сельском мукомольном производстве. Этот вид работы, отличаясь большой трудоёмкостью, имеет весьма гибкий график нагрузки. Кроме того, возможность производить помол в запас позволяет ветродвигателю работать всё время, когда есть ветер. Необходимость создавать аккумуляторы энергии здесь полностью отпадает; энергия аккумулируется в самом продукте мукомольного производства. Таким образом, мельницы дают весьма полноценное использование ветровой энергии. Ветряные мельницы в СССР в среднем могут перемалывать в год около 2,5 млрд. пудов зерна. Если же выполнять этот помол на тепловых двигателях, то потребуется затрачивать ежегодно около 1,3 млн. т условного 7 000-калорийного топлива. Применением на этом виде работ ветродвигателя экономится огромное количество топлива и освобождается железнодорожный и гужевой транспорт от перевозок этого топлива.

Приготовление кормов в животноводческих хозяйствах, как-то: дробление зерна и жмыха, резка силоса и мытьё корнеплодов, представляет весьма трудоёмкий процесс производства, который следует стремиться всемерно механизировать. Применение здесь ветродвигателей не встречает препятствий, так как переработку зерна, жмыха и соломы можно производить в запас. Осложнения могут возникнуть лишь с подготовкой корнеплодов в штилевые дни. Однако, имея в резерве конный привод, можно всегда обеспечить работу машин по подготовке корнеплодов.

Зарядка аккумуляторных батарей для электроосвещения, радио и автотранспорта может производиться в любое время суток. Следовательно, применение ветродвигателей малой мощности, от 100 до 1 000 вт, в качестве ветрозарядных агрегатов не встречает никаких препятствий из-за непостоянства ветра по времени и должно найти широкое применение.

Электрификация сельского хозяйства с помощью ветродвигателей представляет насущную задачу. Работа вет-

родвигателя с генератором позволяет использовать энергию ветра почти во всех видах сельскохозяйственных работ и для освещения.

Однако серьёзным препятствием к использованию энергии ветра для электрификации, особенно в районах, где среднегодовые скорости ветра ниже 5 м/сек., является необходимость аккумулирования энергии для того, чтобы получить ток с постоянным напряжением и обеспечить потребителя электроэнергией в штилевые дни.

Крупные ветроэлектростанции, очевидно, могут быть эффективно использованы при параллельной работе с другими электростанциями: тепловыми и гидравлическими.

Приведённый перечень основных отраслей сельскохозяйственного производства, где широко и с успехом могут применяться ветровые двигатели, показывает важность и значимость развития ветроиспользования в нашем социалистическом хозяйстве.

Механизация сельскохозяйственных работ при помощи ветродвигателей весьма проста и доступна к осуществлению силами и средствами колхозов. В районах, где среднегодовая скорость ветра выше 4 м/сек., стоимость выработки ветродвигателя на этих работах обходится дешевле стоимости выработки теплового двигателя при равных условиях. Стоимость же эксплоатации ветросиловых агрегатов не выше, чем стоимость эксплоатации тепловых и водяных двигателей и примерно в 10 раз дешевле, чем работа конного привода.

Ветроустановки за границей применяются на различных работах в сельском хозяйстве; наибольшее же распространение имеют ветронасосные установки. Ветродвигатели для этой цели выпускаются многолопастного типа, с приводом к поршневому насосу.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ВЕТРОДВИГАТЕЛИ

Ветровыми двигателями, или, кратко, ветродвигателями, называются двигатели, преобразующие энергию ветра в механическую работу. Непостоянство и разреженность этой энергии обусловливают конструктивные особенности ветродвигателей: 1) наличие приспособлений, обеспечивающих возможность работы ветродвигателя на высоких скоростях ветра, с некоторой, примерно постоянной, мощностью, и ограничивающих число оборотов; 2) громоздкость ветродвигателей при сколько-нибудь значительной их мощности.

Комплекс научных и практических вопросов использования энергии ветра с помощью ветродвигателей составляет в настоящее время техническую дисциплину — ветротехнику.

Основная задача ветротехники состоит в создании ветродвигателей и ветроустановок, способных давать удобную для применения движущую силу и работать с высоким коэфициентом использования энергии ветра.

Ветротехника может быть разделена на следующие части: 1) теория и экспериментальные исследования ветродвигателей; 2) конструирование эффективных ветродвигателей; 3) изучение ветра в энергетическом отношении; 4) конструкции ветроустановок и рациональная эксплоатация их.

Важнейшим разделом ветротехники является теория и экспериментальные исследования ветродвигателей, базирующиеся на аэродинамике — науке, изучающей движение воздуха и исследующей действие воздуха на соприкасающиеся с ним тела.

Аэродинамика разделяется на теоретическую и экспериментальную. Теоретическая аэродинамика основана на законах механики, применяемых к газообразным телам; экспериментальная — на испытаниях в аэродинамических трубах и в природных условиях.

Мы будем касаться аэродинамики лишь по вопросам, имеющим непосредственное отношение к изучению ветродвигателей.

ГЛАВА I

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ АЭРОДИНАМИКИ [55]

§ 3. ВОЗДУХ И ЕГО СВОЙСТВА

Воздушную оболочку, покрывающую земной шар, называют атмосферой земли. Высота верхнего предела атмосферы не установлена, однако известно, что метеориты загораются на высоте в 200—300 км, а северные сияния наблюдаются на ещё больших высотах: от 300 до 750 км. Эти явления свидетельствуют о том, что атмосфера земли имеет верхний предел не менее 300 км.

Тропосфера. Нижний слой атмосферы, простирающийся до высоты около 11 км, называется тропосферой. С изменением широты места средняя годовая высота тропосферы изменяется от 8 км на полюсе, до 17 км на экваторе. Для широт от 50° до 60° принято её считать равной в среднем 11 км. Рельеф и тепловые изменения земли, а также солнечная радиация влияют на состояние тропосферы. В ней происходят вертикальные течения воздуха, образуются облака, выпадают осадки, дуют ветры. Таким образом, тропосфера находится в состоянии постоянного перемешивания её слоёв, вследствие чего состав воздуха тропосферы весьма однороден. В процентах по объёму сухой воздух содержит:

азота	N_2 78,03	углекислоты .	CO_2 0,03
кислорода . .	O_2 20,99	неона	Ne 0,0012
аргона . . .	A_r 0,94	гелия	He 0,0004

и в незначительном количестве (следы) криптон и ксенон.

По весовому составу воздух содержит 23,2% кислорода и 76,8% остальных газов.

Стратосфера. Слои воздуха, лежащие выше тропосферы, образуют стратосферу. Состояние стратосферы характеризуется тем, что там почти нет вертикального перемещения слоёв; ветры отличаются большим постоян-

ством: облаков и туманов не бывает; температура почти постоянная и равна —56,5°.

Изучение стратосферы производят с помощью шаров-зондов, поднимающих самопишущие метеорологические приборы. В СССР стратосфера изучается с помощью радиозондов проф. Молчанова, автоматически передающих показания приборов на землю по радио.

До настоящего времени изучен слой воздуха толщиною до 20 км. Наибольшая высота, достигнутая несколькими шарами-зондами, составляет 37 км, а высота, достигнутая человеком, равна 22 км. Таким образом, верхние слои атмосферы ещё не изучены, и те или иные заключения о её состоянии даются различными исследователями на основе теоретических предположений, в сопоставлении с наблюдаемыми явлениями природы, например, по яркости сумерек. Химический состав воздуха стратосферы до сих пор ещё не определён. имеются лишь предположения. Так, например, по Генфри, на высоте в 100 км, в процентах по объёму: азота N_2 — 2,95, водяных паров H_2O — 0,04, кислорода O_2 — 0,11, водорода H_2 — 95,58, гелия He — 1,31, общее давление 0,0067 мм рт. ст., а на высоте 140 км: азота — 0,01, водяных паров — 0, кислорода — 0, водорода — 99,15, гелия — 0,84 и общее давление 0,0040 мм рт. ст.

До высоты примерно в 22 км состав воздуха остаётся неизменным, т. е. таким же, как у самой поверхности земли.

Давление воздуха. Упругость воздуха проявляется в давлении на соприкасающиеся с ним тела. Давление воздуха на тело нормально к его поверхности и представляет предел отношения силы давления ΔP к площади ΔF поверхности тела:

$$p = \lim \frac{\Delta P}{\Delta F} = \frac{dP}{dF}.$$

В аэродинамике давление принято измерять в килограммах на квадратный метр (кг/м²). При измерении давления воздуха по барометру величину давления выражают в миллиметрах ртутного столба.

Нормальное давление атмосферы по барометру на уровне моря равно:

$$p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

В технической системе измерения это давление равно:

$$p_0 = 10\,333 \text{ кг/м}^2 = 1{,}0333 \text{ кг/см}^2.$$

При технических расчётах, в качестве единицы давления пользуются атмосферой, равной 1 кг/см². Сопоставляя эту единицу измерения с нормальным барометрическим давлением, получаем:

$$1 \text{ кг/см}^2 = \frac{760}{1{,}033} = 735{,}6 \text{ мм рт. ст.};$$

отсюда:

$$p \text{ кг/см}^2 = \frac{p \text{ мм рт. ст.}}{735{,}6}.$$

Часто в расчётах пользуются не абсолютным давлением воздуха, а избыточным над атмосферным:

$$p' = p - p_0,$$

где p_0 — атмосферное давление.

Температура воздуха. Температуру воздуха обычно измеряют в градусах Цельсия. При тепловых расчётах принимают температуру в абсолютных градусах, которая называется абсолютной температурой. Нуль абсолютной температуры находится на 273° ниже нуля шкалы градусов Цельсия.

Обозначив абсолютную температуру через T, получим:

$$T = 273 + t.$$

Нормальную температуру t воздуха в СССР принимают равной 15°С; в других странах, как стандарт, принята температура в 20°С.

Температура на высотах, меньших 11 км в тропосфере:

$$t_T = 15° - 6{,}5H, \qquad (1)$$

где 6,5 — среднее годовое изменение температуры тропосферы на каждый километр подъёма до высоты H=11 км.

Давление на высотах, меньших 11 км, равно:

$$p_T = p_0\left(1 - \frac{H}{44{,}3}\right)^{5{,}256}. \qquad (2)$$

Массовая плотность воздуха вблизи земли:

$$\rho_0 = \frac{\gamma}{g} \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}^4},$$

где γ — удельный вес воздуха, g =9,81 — ускорение силы тяжести.

При температуре $t=15°C$ и давлении $B_0 = 760$ мм рт. ст., величина плотности воздуха у земли равна:

$$\rho_0 = \frac{1}{8} = 0{,}125.$$

Для других условий плотность равна:

$$\rho = \rho_0 \frac{B}{B_0} \cdot \frac{T_0}{T} = 0{,}125 \cdot \frac{B}{760} \cdot \frac{288}{273 + t}. \quad (3)$$

Массовая плотность в тропосфере на высоте $H < 11$ км определяется по формуле:

$$\rho_T = \rho_0 \left(1 - \frac{H}{44{,}3}\right)^{4{,}256}. \quad (4)$$

Для быстрых подсчётов массовой плотности в области тропосферы можно пользоваться приближённой формулой:

$$\rho_T = \rho_0 \left(\frac{20 - H}{20 + H}\right), \quad (4а)$$

где H — высота в километрах.

Давление и массовую плотность воздуха на высотах, бо́льших 11 км, подсчитывают по формуле Галлея:

$$\frac{p}{p_T} = \frac{\rho}{\rho_T} = e^{\frac{H-11}{6{,}350}}, \quad (5)$$

где H — высота в километрах.

§ 4. УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ

Скоростное поле около обтекаемого тела. При изучении обтекания тел рассматривают движение независимо от того, движется ли тело в воздухе или же движется воздух, обтекая неподвижное тело, так как силы, возникающие при этом в обоих случаях, одинаковы.

При обтекании тела воздушным потоком, скорости его частиц вдали от тела будут везде одинаковы; вблизи же в разных точках потока скорости каждой частицы будут различны как по величине, так и по направлению. Вокруг тела образуется *скоростное поле*; оно представляет картину скоростей в данный момент времени в пространстве, заполненном жидкостью.

При изучении скоростного поля исходят из понятия линий тока жидкости, находящейся в движении

Линией тока называется линия, в каждой точке которой в данный момент вектор скорости жидкости касателен к этой линии.

Совокупность всех линий тока иногда называют полем тока.

Линии тока жидкости при обтекании тела можно воспроизвести, если на поверхность жидкости насыпать мелкий порошок. Каждая частица порошка, плавающая на поверхности жидкости, при фотографировании даст на пластинке след в виде чёрточки. Совокупность всех чёрточек представит картину линий тока; частота их характеризует величину скорости в данном месте поля.

Если при движении жидкости в любой точке занимаемого ею пространства скорость, давление, плотность и т. д. остаются постоянными во времени, то остаётся постоянной и картина линий тока. Такое движение называется установившимся. Движение, при котором скорость во всём занятом ею пространстве (или в части этого пространства) изменяется с течением времени, называется неустановившимся. Часть жидкости, ограниченная линиями тока, проведёнными через все точки малого простого замкнутого контура, находящегося в области, занятой жидкостью, называется элементарной трубкой тока.

Так как линии тока во всех точках имеют направление скоростей, то через воображаемые стенки трубки жидкость не может ни войти, ни выйти, и, при установившемся движении, трубку тока можно представить как бы жёсткой. Жидкость, протекающая в этой трубке, называется струйкой, которая не может смешаться с соседней струйкой. Таким образом, каждую такую струйку можно представить как бы изолированной от общей массы жидкости, и, следовательно, весь поток можно рассматривать как составленный из отдельных струек.

Уравнение неразрывности. Выделим в потоке трубку тока AB и проведём два сечения I и II, нормальных к оси трубки (рис. 1). Через сечение I за 1 сек. войдёт масса жидкости, равная

$$m_1 = \rho_1 F_1 V_1 \frac{\text{кг} \cdot \text{сек.}}{\text{м}}.$$

Через сечение II за то же время выйдет масса жидкости, величина которой равна:

$$m_2 = \rho_2 F_2 V_2,$$

где: m — масса,
ρ — плотность,
F — площадь сечения трубки тока,
V — скорость в сечении.

При установившемся движении масса в рассматриваемом отрезке I и II не может ни накапливаться, ни убывать. В противном случае в этом отрезке менялось бы давление, плотность и скорость находящихся в ней частиц жидкости. Поэтому можем написать:

$$m_1 = m_2 = m = \text{Const},$$

или

$$\rho_1 F_1 V_1 = \rho_2 F_2 V_2 = \text{Const}. \qquad (6)$$

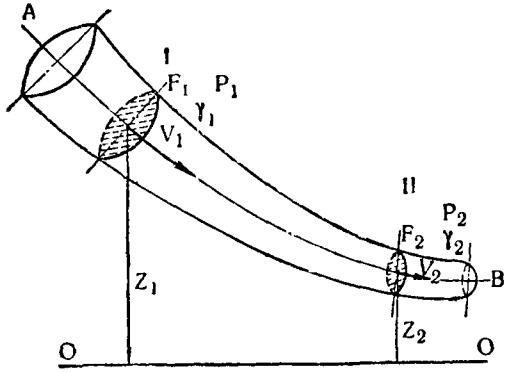


Рис. 1. Трубка тока.

Выражение (6) называется уравнением неразрывности струйки, или уравнением непрерывности.

Для несжимаемой жидкости $\rho_1 = \rho_2$, и уравнение (6) можно написать в виде:

$$F_1 V_1 = F_2 V_2 = \text{Const}. \qquad (7)$$

Это выражение представляет объёмный расход трубки и показывает, что объём притекающей за 1 сек. в трубку жидкости должен равняться объёму вытекающей за то же время жидкости.

Уравнение Бернулли. Уравнение Бернулли представляет закон сохранения энергии, применённый к струйке жидкости в установившемся движении. Для сечений I и II (рис. 1) было получено уравнение неразрывности:

$$\rho_1 F_1 V_1 = \rho_2 F_2 V_2 = m.$$

За время dt через сечение I пройдёт столбик жидкости $V_1 dt$. Объём этого столбика будет равен $F_1 V_1\, dt$; умножив этот объём на массовую плотность, получим массу, проходящую через сечение I за время dt.

$$\rho_1 F_1 V_1 dt = m dt.$$

За это же время через сечение II пройдёт столбик жидкости $V_2 dt$, объём которого равен $F_2 V_2 dt$ и масса:

$$\rho_2 F_2 V_2 dt = m dt.$$

Масса жидкости, войдя в сечение I, внесла запас энергии, который, по закону сохранения энергии, должен быть постоянным между сечениями I и II. Запас энергии, внесённой в трубку тока через сечение I, слагается из:

кинетической энергии массы жидкости, движущейся со скоростью V_1 и равной:

$$\frac{m dt V_1^2}{2};$$

потенциальной энергии давления жидкости, равной работе, произведённой частицами жидкости на пути слева до сечения I. Эта работа равна:

$$p_1 F_1 V_1 dt, \qquad \text{(а)}$$

где $p_1 F_1$ — давление на столбик жидкости сечением F_1, а $V_1 dt$ — путь, на который продвинулся этот столбик в положении I. Умножив и разделив выражение (а) на ρ_1, получим:

$$\frac{p_1}{\rho_1} \rho_1 F_1 V_1 dt = \frac{p_1}{\rho_1} m dt,$$

где: p_1 — давление,

ρ_1 — плотность жидкости, находящейся слева сечения I;

потенциальной энергии веса, которая равна возможной работе веса жидкости, прошедшей через сечение I. Эта жидкость находится на высоте Z_1, считая от какого-либо уровня, например, 0—0. Высота Z_1 называется нивелирной высотой, или высотой уровня.

Потенциальная энергия веса будет равна:

$$Z_1 G dt;$$

так как вес жидкости $G = mg$, то

$$Z_1 G dt = Z_1 m g dt;$$

внутренней энергии; для упругой жидкости, т. е. газа, необходимо учесть и внутреннюю тепловую энергию, которую внесла масса mdt через сечение I в трубку. Из термодинамики известно, что внутренняя энергия газа U выражается обычно в больших калориях на 1 кг веса газа. Величина её зависит от температуры газа и, следовательно, будет различна в разных сечениях трубки тока.

Внутренняя энергия, прошедшая через сечение I, будет равна:

$$U_1 mgdt.$$

Так как механический эквивалент тепла

$$A = \frac{1}{427} \frac{\text{кал.}}{\text{кгм}},$$

то внутренняя энергия в кгм будет равна

$$\frac{U}{A} mgdt.$$

Таким же путём найдём энергию жидкости, протекающей через сечение II, а именно:

Кинетическую энергию:

$$\frac{mdtv_2^2}{2}.$$

Потенциальную энергию давления:

$$\frac{p_2}{\gamma_2} mdt.$$

Потенциальную энергию веса: $Z_2 mgdt$.

Потенциальную тепловую энергию:

$$\frac{U_2}{A} mgdt.$$

В случае протекания жидкости без потерь на трение и без потерь теплоты через стенки трубки сумма энергий тока в сечении I должна равняться такой же сумме энергий в сечении II.

Если же на участке между сечениями I и II произойдут механические (трение) и тепловые потери энергии, которые можно учесть величиною K, то вошедшая энергия будет равна вышедшей плюс потери K.

Взяв сумму энергий для сечений I и II, получим уравнение баланса энергии:

$$\frac{mV_1^2}{2}dt+\frac{p_1}{\rho_1}mdt+Z_1mgdt+\frac{U_1}{A}mgdt=$$
$$=\frac{mV_2^2}{2}dt+\frac{p_2}{\rho_2}mdt+Z_2mgdt+\frac{U_2}{A}mgdt+K.$$

Разделив все члены этого уравнения на $mgdt$ — вес протекающей жидкости, получим:

$$\frac{V_1^2}{2g}+\frac{p_1}{g\rho_1}+Z_1+\frac{U_1}{A}=\frac{V_2^2}{2g}+\frac{p_2}{g\rho_2}+Z_2+\frac{U_2}{A}+\frac{K}{mgdt}.$$

В этом равенстве $g\rho_1=\gamma_1$; $g\rho_2=\gamma_2$; обозначим потери через ζ, т. е.:

$$\zeta=\frac{K}{mgdt};$$

получим окончательно:

$$\frac{V_1^2}{2g}+\frac{p_1}{\gamma_1}+Z_1+\frac{U_1}{A}=\frac{V_2^2}{2g}+\frac{p_2^2}{\gamma_2}+Z_2+\frac{U_2}{A}+\zeta=\text{Const}. \quad (8)$$

Выражение (8) представляет общий вид уравнения Бернулли для любой жидкости, в том числе и для газа.

После деления членов данного уравнения на вес $mgdt$ мы получили линейную размерность в метрах.

Уравнение Бернулли для несжимаемой жидкости получается из общего уравнения (8). Так как для несжимаемой жидкости:

$$\gamma_1=\gamma_2=\gamma \text{ и } U_1=U_2,$$

то уравнение (8) можем переписать в следующем виде:

$$\frac{V_1^2}{2g}+\frac{p}{\gamma}+Z_1=\frac{V_2^2}{2g}+\frac{p_2}{\gamma}+Z_2+\zeta. \quad (9)$$

Большинство практических задач решаются с помощью этого уравнения.

Все члены, входящие в уравнение (9), имеют линейную размерность, поэтому их называют высотами:

$\frac{V^2}{2g}$ — скоростная высота или скоростной напор;

$\frac{p}{\gamma}$ — пьезометрическая высота;

Z — нивелирная высота;

ζ — высота потерь.

Если уравнение баланса отнести не к 1 кг, а к 1 м³ жидкости, что можно сделать умножением на γ уравнения (9), то получим:

$$\frac{\rho V_1^2}{2} + p_1 + \gamma Z_1 = \frac{\rho V_2^2}{2} + p_2 + \gamma Z_2 + \gamma\zeta. \qquad (9а)$$

При этом члены этого уравнения получают размерность давления $\left[\frac{кг}{м^2}\right]$ и называются:

$\frac{\rho V^2}{2}$ — скоростной напор, или динамическое давление;

p — давление статическое, или гидродинамическое;

γZ — гидростатическое давление;

$\gamma\zeta$ — потерянный напор.

Сумма всех членов уравнения Бернулли называется полным напором.

Если уравнение Бернулли применяется к воздуху, то обычно рассматриваются течения, близкие к горизонтальным, и, следовательно, Z очень мало.

Сравнивая малые нивелирные высоты Z и потери ζ с членами $\frac{V^2}{2g}$, которые для современных самолётов очень велики, можем отбросить и Z и ζ вследствие их малости; при этом получим простое выражение уравнения Бернулли, постоянно применяемое в теоретической аэродинамике:

$$\frac{\rho V_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho V_2^2}{2} + p_2 = \text{Const}. \qquad (10)$$

Давление в критической точке. Допустим, на некоторое тело набегает поток со скоростью V_1. Очертив бесконечно

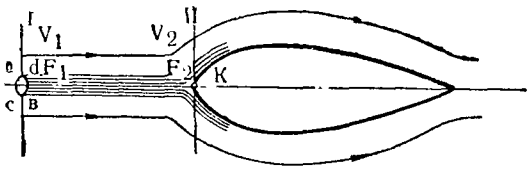


Рис. 2. Обтекание тела.

малый контур abc в сечении I (рис. 2), мы получим струйку бесконечно малого сечения, которая, при приближении к телу, всё более и более расширяется и, растекаясь по нему, получит конечное сечение, так как тело имеет конечные размеры.

На основании уравнения неразрывности струи (7) для сечений I и II можем написать:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{dF_1}{F_2} \to 0;$$

так как F_2, по сравнению с dF_1, очень велико, то отношение dF_1 к F_2 стремится к нулю, следовательно, V_2 тоже стремится к нулю.

Точка K, где $V_2=0$, называется критической точкой. По уравнению Бернулли, найдём давление в этой точке. Для сечений I и II имеем:

$$\frac{\rho V_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho V_2^2}{2} + p_2;$$

отсюда:

$$p_2 = \frac{\rho V_1^2}{2} + p_1 - \frac{\rho V_2^2}{2}.$$

Так как в критической точке $V_2=0$, то:

$$p_2 = \frac{\rho V_1^2}{2} + p_1. \qquad (11)$$

Таким образом, давление в критической точке является наибольшим, которое может быть при обтекании тела.

Кавитация. Разрыв в текущей жидкости, сопровождающийся образованием пустот, заполненных парами и газами, находящимися в жидкости, называют кавитацией. Разрыв струй происходит, когда давление жидкости делается отрицательным; в этот момент давление переходит в напряжение растяжения. Обычные жидкости никакого напряжения на растяжение не выдерживают и разрываются.

Напишем уравнение Бернулли для большого резервуара, из которого отсасывается вода с помощью трубопровода, и посмотрим, при какой скорости воды в трубе произойдёт кавитация. Приняв плоскость, проходящую через сечение трубы, расположенной ниже уровня воды в резервуаре, будем иметь:

$$Z_2 = 0 \text{ и } p_1 = p_0, \text{ т. е. атмосферному.}$$

Скорость движения воды в большом резервуаре, при сравнении её со скоростью V_2 в трубопроводе с малым сечением, будет очень мала, и её можно принять равной

нулю, т. е. $V_1=0$. Потерями ζ на трение в резервуаре можно пренебречь ввиду их малости; при этом получим:

$$\frac{p_0}{\gamma}+Z_1=\frac{V_2^2}{2g}+\frac{p_2}{\gamma};$$

отсюда:

$$p_2=p_0-\frac{\gamma V_2^2}{2g}+\gamma Z_1.$$

Это уравнение показывает, что чем больше V_2, тем меньше давление p_2. Наибольшая скорость V_2 будет та, при которой давление $p_2=0$; при этом имеем равенство:

$$p_0-\frac{\gamma V_2^2}{2g}+\gamma Z_1=0.$$

Отсюда предельная скорость воды в трубопроводе будет равна:

$$V_2=\sqrt{2g\left(Z_1+\frac{p_0}{\gamma}\right)}. \qquad (12)$$

Эта скорость будет минимальной, когда высасывающий воду трубопровод находится вблизи уровня воды в резервуаре, т. е. когда $Z_1=0$.

В этом случае:

$$V_2=\sqrt{2g\frac{p_0}{\gamma}}. \qquad (12а)$$

Для воды $\gamma=1\,000$ кг/м³; $p_0=10\,330$ кг/м² и $g=9{,}81$ м/сек.

Подставляя эти значения в уравнение (12а), получим:

$$V_2=\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot\frac{10\,330}{1\,000}}=14{,}15 \text{ м/сек.}$$

При этой скорости движения вытекающей воды может наступить кавитация.

Формула (12) применима лишь при невысоких температурах. При высоких температурах разрыву жидкости способствует упругость её паров, и кавитация наступает при значительно меньшей скорости.

Уравнение Бернулли для газа. При больших скоростях, выше 100 м/сек., в уравнении Бернулли нельзя пренебрегать членами, содержащими значение внутренней энергии газа, и следует пользоваться уравнением (8).

В большинстве случаев авиационной практики приходится иметь дело с большими скоростями, когда воздух не успевает вступить в обмен теплом с обтекаемым телом, следовательно, процесс будет протекать по адиабате, т. е.:

$$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k = pV^k = \text{Const},$$

где k — показатель адиабаты.

На основании этого закона уравнение Бернулли (8) приводится к следующему виду [55]:

$$\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 - \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\gamma_1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] + \zeta. \quad (13)$$

Для воздуха $k=1{,}41$, следовательно, можем написать:

$$\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 - 3{,}45\,\frac{p_1}{\gamma}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0{,}29}\right] + \zeta. \quad (14)$$

Давление газа в критической точке. Обращаясь к рисунку 2, где изображена струйка, подходящая к телу в критической точке k, напишем уравнение (13) для этой точки. Так как в критической точке $V_2=0$; $Z_1=Z_2$, а потерями ζ у струйки можно пренебречь, то это уравнение напишется в следующем виде:

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\gamma_1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]. \quad (а)$$

Разделив это равенство на kp_1 и умножив на k—1 и γ, получим:

$$\frac{V_1^2}{2} \cdot \frac{\gamma_1}{gkp_1} \cdot (k-1) = -1 + \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (б)$$

Из физики известна формула скорости звука [1, стр. 113]:

$$a = \sqrt{k\,\frac{p}{\rho}} = \sqrt{\frac{gkp}{\gamma}}; \quad (15)$$

отсюда

$$a^2 = \frac{gkp}{\gamma}, \text{ или } \frac{1}{a^2} = \frac{\gamma}{gkp}.$$

Введя a в равенство (б), получим:

$$\left(\frac{V_1}{a_1}\right)^2 \cdot \frac{k-1}{2} = -1 + \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (16)$$

Отношение скорости газа V в какой-нибудь точке к скорости звука a в той же точке называется числом Маха — Ма.

$$\text{Ма} = \frac{V}{a}.$$

Подставляя это число в равенство (16) и решая его относительно $\frac{p_2}{p_1}$, получим:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(1 + \frac{k-1}{2}\,\text{Ма}_1^2\right)^{\frac{k}{k-1}} = (1 + 0{,}205\text{Ма}_1^2)^{3{,}45}. \quad (17)$$

Таким образом, давление газа в критической точке зависит лишь от начального давления и числа Маха.

Для решения вопроса, при каких скоростях надо вводить поправку на сжимаемость воздуха, сделаем следующие преобразования уравнения (17):

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(1 + \frac{k-1}{2}\,\text{Ма}_1^2\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left[1 + \frac{k-1}{2}\left(\frac{V_1}{a_1}\right)^2\right]^{\frac{k-1}{k}}. \quad (а)$$

Разложим правую часть этого равенства в ряд по биному Ньютона, отбрасывая члены высшего порядка в отношении $\frac{V_1}{a_1}$; предполагая, что $\frac{V_1}{a_1} < 1$, получим:

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{k}{2}\left(\frac{V_1}{a_1}\right)^2 + \frac{k}{8}\left(\frac{V_1}{a_1}\right)^4 + \ldots \quad (б)$$

Сделаем преобразования правой части этого равенства, воспользовавшись уравнением (15) скорости звука и подставляя вместо a_1^2, его значение $k\frac{p_1}{\rho_1}$ в уравнение (б), получим:

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{k}{2}\cdot\frac{\rho_1 V_1^2}{k p_1} + \frac{k}{8}\cdot\frac{\rho_1 V_1^2}{k p_1}\left(\frac{V_1}{a_1}\right)^2 = 1 + \frac{\rho_1 V_1^2}{2p_1} + \frac{\rho_1 V_1^2}{8p_1}\left(\frac{V_1}{a_1}\right)^2,$$

откуда:

$$p_2 = p_1 + \frac{\rho_1 V_1^2}{2} + \frac{\rho_1 V_1^2}{8}\left(\frac{V_1}{a_1}\right)^2 = p_1 + \frac{\rho_1 V_1^2}{2}\left[1 + \frac{1}{4}\left(\frac{V_1}{a_1}\right)^2\right]. \quad (18)$$

Сравнивая это уравнение с уравнением (11) для несжимаемой жидкости, видим, что они отличаются друг от друга членом в правой части $\frac{\rho_1 V_1^2}{2}\cdot\frac{1}{4}\left(\frac{V_1}{a_1}\right)^2$

уравнения (18). Отсюда следует, что чем меньше скорость потока по сравнению со скоростью звука, тем меньше отличаются между собою давления в выбранной точке для сжимаемого и несжимаемого потоков. Задаваясь рядом скоростей V_1, посмотрим, в каком соотношении находятся давления несжимаемой и сжимаемой жидкостей.

Таблица 1

Скорости потока	$V_1 = 50$	100	150	200
Число Маха $Ma_1 = \frac{V_1}{a_1} = 0{,}151$		0,303	0,456	0,606
при скорости звука $a_1 = 330$ м/сек. $\frac{(p_2 - p_1)\ \text{несжим.}}{(p_2 - p_1)\ \text{сжим.}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4}\left(\frac{V_1}{a_1}\right)^2}$	0,994	0,977	0,95	0,913
в $\% = 1 - \frac{(p_2 - p_1)\ \text{несжим.}}{(p_2 - p_1)\ \text{сжим.}} 100 =$	0,6	2,3	5,0	8,7

где отношение $\frac{(p_2 - p_1)\ \text{несжим.}}{(p_2 - p_1)\ \text{сжим.}}$ получено делением уравнения (11) на уравнение (18).

Приведённый подсчёт показывает, что при скоростях потока или тела в спокойном потоке, меньших 100 м/сек., влияние сжимаемости воздуха на давление в рассматриваемой точке очень незначительно.

§ 5. ПОНЯТИЕ О ВИХРЕВОМ ДВИЖЕНИИ

Вихревым движением называют движение жидкости в области, сплошь заполненной вихрями. Это движение можно наблюдать в природе в виде вихревых столбов пыли, возникающих иногда даже в тихую погоду, или в виде мощных вихреобразований, называемых смерчами, или тайфунами (рис. 3). Вихри появляются также в виде колец, которые можно наблюдать на выхлопе двигателя внутреннего сгорания или над трубой паровоза.

Наиболее интенсивное вихревое движение образуется позади какого-нибудь тела, движущегося в жидкости, например, парохода или моторной лодки (рис. 4).

Демонстрация вихрей и их свойств. Если в сосуд, наполненный водой, опустить на тонкой оси вертушку и

приводить её в быстрое вращение, то внутри сосуда получится вихревой столб, а окружающая его жидкость придёт в общее циклическое движение. Опыт по образованию вихря можно произвести с помощью прибора, изображён-

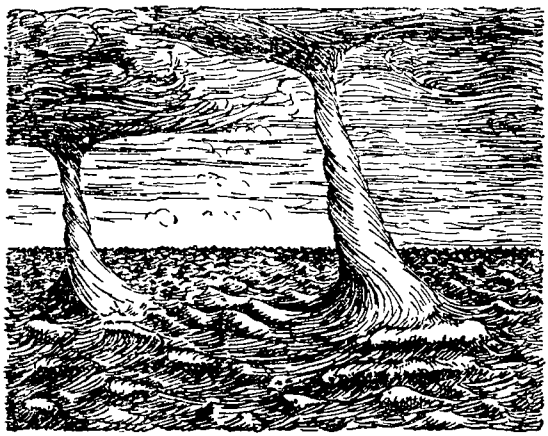


Рис. 3. Тайфун, или смерч.

ного на рис. 5. Полый шкив с несколькими плоскими радиальными перегородками, не доходящими, однако, до оси, приводится в быстрое вращение машиной. Под шкивом на расстоянии 3 м стоит чан с водой. Чтобы опыт

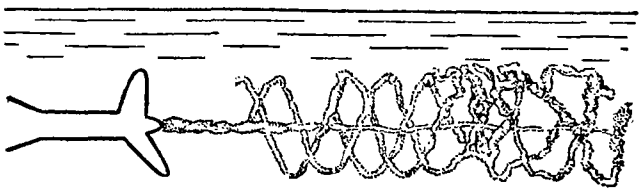


Рис. 4. Вихреобразование за винтом моторной лодки.

лучше удался, воду следует немного подогреть. Шкив при своём вращении закручивает столб воздуха. Вследствие пониженного давления в середине образовавшегося вихря вода начинает подниматься и сама приходит во вращательное движение. Через некоторое время образуется высокий водяной столб в виде тонкого шнура,

тянущегося от уровня воды к центру шкива. Под самым шкивом вихревой шнур состоит из очень мелких капелек, которые разбрасываются перегородками шкива [8].

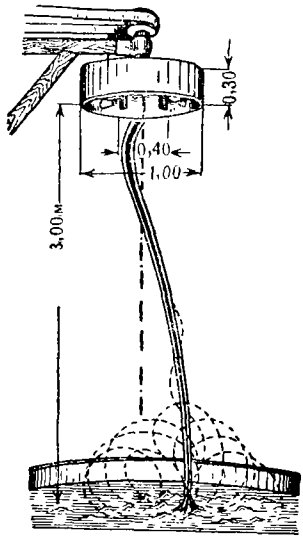


Рис. 5. Прибор для образования вихрей.

Ещё интересный опыт по образованию вихревых колец можно проделать с помощью прибора, изображённого на рис. 6 и представляющего собою деревянный ящик. Задняя стенка ящика затянута упругой перепонкой, а передняя имеет круглое отверстие. Если наполнить этот ящик дымом, то, при ударах маленьким молоточком по задней стенке, из передней будут вылетать вихревые кольца. Некоторые курильщики умеют выпускать изо рта дым в виде подобных же колец. Дым из трубы паровоза иногда вылетает кольцами. В неподвижном воздухе вихревое кольцо движется само.

Из теории вихревого движения известно, что и вихрь и скоростное поле обусловливают друг друга, поэтому в опыте по образованию вихревых колец мы видим, что сосед-

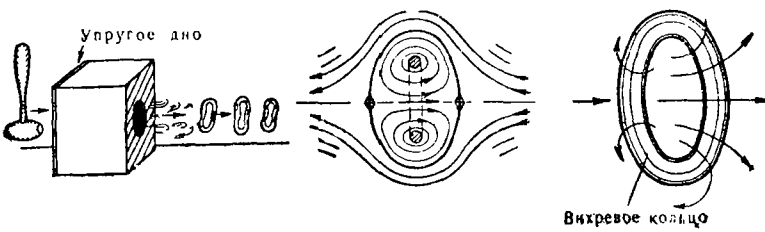


Рис. 6. Прибор для образования вихревых колец.

ние части кольца действуют на каждую его точку и оно быстро летит в воздухе. При этом получается воздушный поток, изображённый на рисунке 6, справа: воздух внутри кольца движется вперёд, в результате чего

вихревое кольцо несёт с собой некоторый объём воздуха. Этот объём воздуха образует атмосферу кольца.

Если из прибора (рис. 6) выпустить подряд два вихревых кольца, то заднее кольцо подсосётся передним, сожмётся и пройдёт внутри первого. Далее оно расширится и будет бежать впереди первого, после чего они опять поменяются местами. Этот пример демонстрирует чрезвычайную сложность вихревого движения.

Вращение жидкости существенно отличается от вращения твёрдого тела. Частицы вращающегося твёрдого тела имеют линейный закон изменения скорости с изменением радиуса, что выражается формулой:

$$V = \omega r,$$

где ω — угловая скорость вращения, r — радиус.

Частицы жидкости могут вращаться с разными угловыми скоростями. Радиусы даже у одной жидкой частицы могут вращаться не только с разными по величине, но и с разными по знаку угловыми скоростями. По определению Гельмгольца, жидкая частица движется поступательно со скоростью своего центра тяжести, деформируется и вращается.

Излагая основные понятия аэрогидродинамики лишь с точки зрения применения их при опытах, мы будем считать почти всегда рассматриваемую жидкость несжимаемой и не имеющей трения. Такая жидкость называется идеальной несжимаемой.

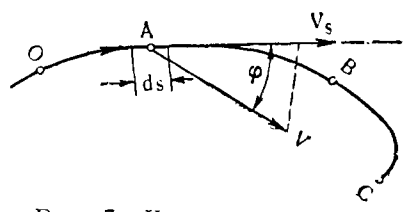


Рис. 7. Циркуляция скорости по контуру.

Для изучения движения жидкости вводят ряд особых величин и понятий, соотношения между которыми и дают теоремы аэродинамики.

Течение скорости. Проведём в текущей идеальной жидкости произвольную линию $OABC$ (рис. 7). В любой точке A этой линии мы будем иметь некоторую скорость жидкости V. Точку A мы можем задать расстоянием S по кривой от начальной точки O. Величину S будем считать в направлении стрелки положительной, а в противоположном — отрицательной.

Выделим на этой кривой элемент dS с точкой A и спроектируем скорость потока V на направление касательной в этой точке. Помножив проекцию V_s этой скорости на элемент dS, получим течение скорости $d\Gamma$ вдоль по этому элементу, т. е.:

$$d\Gamma = V_s dS. \tag{19}$$

Просуммировав все элементарные течения скорости по линии $OALC$, получим течение скорости вдоль по этой кривой:

$$\Gamma_{oc} = \int_{oc} V_s dS. \tag{19а}$$

Размерность течения скорости равна $м^2 сек.^{-1}$

Циркуляция скорости. Течение скорости по замкнутому контуру называют циркуляцией скорости. Выделим в текущей жидкости замкнутый контур длиною S (рис. 8). В любой точке этого контура будем иметь некоторую скорость жидкости V. Проекция скорости V в точке A элемента dS на касательную кривой в этой точке, умноженная на элемент dS, даёт элементарное течение:

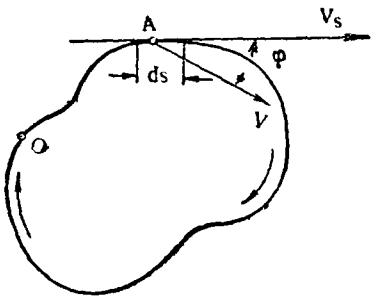


Рис. 8. Циркуляция скорости по замкнутому контуру.

$$d\Gamma = V_s dS,$$

где V_s — тангенциальная (касательная) составляющая скорость потока.

Просуммировав все элементарные течения скорости по замкнутому контуру, получим циркуляцию скорости:

$$\Gamma = \oint V_s dS; \tag{20}$$

здесь $\oint$ — знак интеграла по замкнутому контуру.

Если обход контура делать в обратном направлении, то и знак изменится на противоположный.

Обозначив угол между положительным направлением

касательной и скоростью через φ (рис. 8), предыдущую формулу можно переписать в другом виде:

$$\Gamma = \oint V_s dS = \oint V \cos \varphi dS,$$

где $V\cos\varphi = V_s$ — проекция скорости жидкости на касательную в точке A элемента dS.

Из уравнения (19) видим, что понятие циркуляции аналогично понятию работы силы на некотором пути dS.

Размерность циркуляции $м^2 сек.^{-1}$

Потенциал скорости. Потенциалом скорости называется такая функция пространства $\varphi(x,y,z)$, производная которой по любому направлению даёт проекцию скорости V на это направление:

$$V_s = \frac{\partial \varphi}{\partial S}. \qquad (а)$$

В уравнении (а) дана частная производная, так как функция φ зависит от трёх координат пространства и времени. Поток, имеющий потенциал скоростей, называют потенциальным.

Если в пространстве дан зафиксированный контур, то вместо частной производной пишут полную производную:

$$V_s = \frac{d\varphi}{dS}, \qquad (б)$$

откуда:

$$d\varphi = V_s dS. \qquad (в)$$

Интегрируя один раз в пределах от точки A до точки B (рис. 7) и другой раз по всему замкнутому контуру (рис. 8), получим следующие два равенства:

$$\varphi_A - \varphi_B = \int_B^A V_s dS = \Gamma_{AB}, \qquad (21)$$

т. е. разность потенциалов для двух точек равна течению скорости по любой линии, соединяющей эти точки:

$$\varphi_A - \varphi_A = \oint_A V_s dS = 0, \qquad (21а)$$

т. е. в случае существования у потока однозначного потенциала скоростей циркуляция скорости по любому замкнутому контуру равна нулю.

Следовательно, чтобы решить вопрос, имеется ли в каком-нибудь частном случае потенциальный поток,

достаточно доказать, что циркуляция Γ по любому контуру равна или не равна нулю.

Основные теоремы о вихрях. При рассмотрении вращательного движения частицы в какой-либо плоскости, проходящей через её центр тяжести, пользуются понятием о средней угловой скорости вращения. Для определения скорости вращения жидкости в точке A (рис. 9), проводят через эту точку плоскость p, берут на ней контур k и определяют величину циркуляции Γ по этому контуру. При этом за проекцию средней скорости вращения жидкости в точке A относительно нормали к площадке принимают величину:

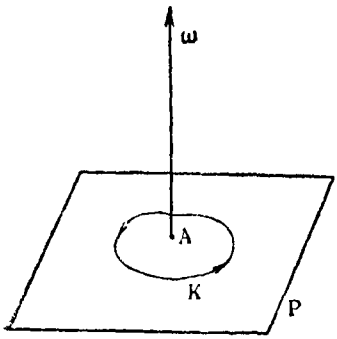


Рис. 9. Вектор средней угловой скорости.

$$\omega = \frac{\Gamma}{2\sigma}. \qquad (22)$$

Чем меньше взятый контур, тем точнее будет это выражение, и в пределе мы получим:

$$\omega = \frac{d\Gamma}{2d\sigma}, \qquad (22а)$$

или

$$d\Gamma = 2\omega d\sigma. \qquad (22б)$$

Произведение $\omega d\sigma$ называют потоком вихря через площадку $d\sigma$; оно аналогично расходу $V d\sigma$.

Поворачивая площадку по всем направлениям вокруг точки A, можно найти такое положение, при котором ω будет иметь максимальное значение.

Величина ω и её направление определяют завихренность жидкости в точке A. Вектор ω является вектором вихря.

Для изучения вихревых движений вводят ряд понятий о составных элементах вихревого движения, облегчающих формулировку его законов.

Линия, в каждой точке которой в данный момент вектор вихревой скорости жидкости касателен к этой линии, называется вихревой линией (рис. 10).

Поверхность, в каждой точке которой в данный момент вектор вихревой скорости жидкости касателен к этой

поверхности, называется вихревой поверхностью (рис. 10).

Часть жидкости, ограниченная вихревыми линиями, проведёнными через все точки какого-нибудь малого

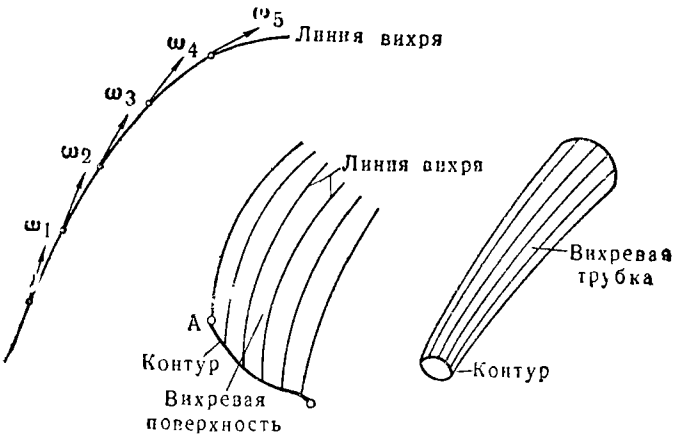


Рис. 10. Линия вихря, вихревая поверхность и вихревая трубка.

простого замкнутого контура, находящегося в области, занятой жидкостью, называется вихревою трубкой. Жидкость, заключённая в вихревой трубке, называется вихревой нитью.

Если считать ω за скорость, то вихревую трубку можно уподобить струйке жидкости, с сечением $d\sigma$. Произведение $\omega d\sigma$ называют, как было сказано выше, потоком вихря через площадку $d\sigma$. Таким образом, формула (22б) показывает, что циркуляция скорости по бесконечно малому контуру равна удвоенному потоку вихря через площадку, охваченному этим контуром. Надо заметить, что Гельмгольц называет произведение $\omega d\sigma$ напряжением вихревой нити [8].

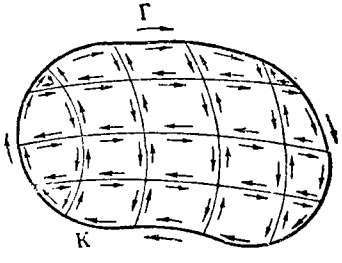


Рис. 11. Контур поверхности.

Теорема Стокса. Разбив произвольную поверхность S, ограниченную контуром K (рис. 11) на бесконечно малые

площадки, которые можно считать плоскими, мы можем написать для каждой из них:

$$d\Gamma = 2\,\omega d\sigma.$$

Суммируя эти выражения для всех элементарных площадок, получим: $\iint d\Gamma = 2\iint_s s\omega d\sigma$. Из рисунка 11 видим, что на всякой внутренней стороне прямоугольников будем иметь по две циркуляции в противоположных направлениях, которые взаимно уничтожаются. В результате суммирования останутся в левой части после сокращения лишь произведения $V_s dS$, относящиеся к элементам контура K. Эти произведения в сумме и дадут циркуляцию скорости по контуру K.

$$\Gamma = 2\iint_s \omega d\sigma, \tag{23}$$

т. е. циркуляция скорости по любому контуру равна удвоенному полному потоку вихря через любую поверхность, ограниченную этим контуром.

Согласно формуле (20), можем также написать:

$$\oint V_s dS = 2\iint_s \omega d\sigma. \tag{24}$$

В формуле (24) в правой части стоит интеграл по поверхности, а в левой по контуру. Заметим, что как поверхность, так и контур K могут быть при этом не плоскими.

Теорема Гельмгольца. Если мы выделим на поверхности вихря замкнутый контур (рис. 12), то в любой её точке будем иметь $\omega = 0$. Это видно из того, что вектор ω касателен к данной поверхности (она может быть боковой поверхностью вихревой трубки) и поток вихря через неё равен нулю, что, по теореме Стокса, даёт $\Gamma = 0$, т. е. циркуляция скорости по контуру, лежащему на вихревой поверхности, равна нулю.

Если на поверхности вихревой трубки провести контур, как показано на рис. 12, справа, с бесконечно малыми расстояниями 1—4 и 5—8, то циркуляция скорости по этому контуру, как доказано выше (рис. 12, слева), равна нулю. Циркуляция же на участке контура 1—2—3—4 равна Γ_1 и на участке 5—6—7—8 равна

Γ_2, а на участках 5—1 и 4—8 имеем равные, но противоположные течения скорости. Следовательно, обозначив циркуляцию в направлении цифр 1—2—3—4—8—7—6—5—1 через Γ_3, в направлении 1—2—3—4—1 через Γ_4, в направлении 8—7—6—5—8 через Γ_5 и в направлении 8—5—6—7—8 через Γ_6, получим:

$$\Gamma_3 = 0 = \Gamma_4 + \Gamma_5,$$

откуда

$$\Gamma_4 = -\Gamma_5 = \Gamma_6.$$

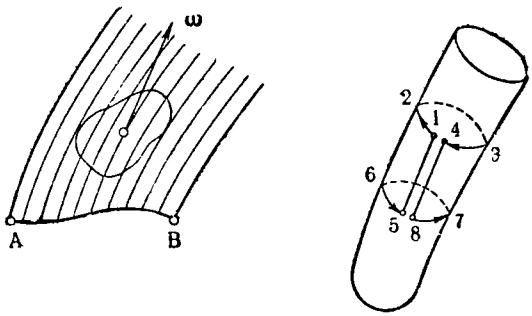


Рис. 12. Замкнутый контур на поверхности вихря и контур на поверхности вихревой трубки.

Таким образом, циркуляция скорости по контуру, охватывающему вихревую трубку, постоянна по всей её длине.

Согласно уравнению (22):

$$\omega = \frac{\Gamma}{2\sigma};$$

следовательно, если Γ постоянна, то и вектор ω должен быть непрерывным во всём пространстве течения жидкости, если отбросить особые случаи $\sigma = 0$ и $\sigma = \infty$.

Отсюда получаем теорему Гельмгольца: вихревые нити не могут в жидкости оканчиваться внезапно; они или простираются концами в бесконечность, или замыкаются в кольца, или же опираются на границы жидкости (рис. 13).

Вихревые шнуры. Если в потоке с незавихренной жидкостью образуется вихревая область, ограниченная вихревой поверхностью в виде трубки конечной толщины, то такая трубка называется в и х р е в ы м ш н у р о м.

Наблюдаемые в природе смерчи представляют один из видов вихревых шнуров огромных размеров. Простейшим типом вихревых шнуров (рис. 14) являются равномерно завихренные шнуры, у которых внутри каждого сечения ω постоянно; в другом же их сечении ω может иметь и другую величину.

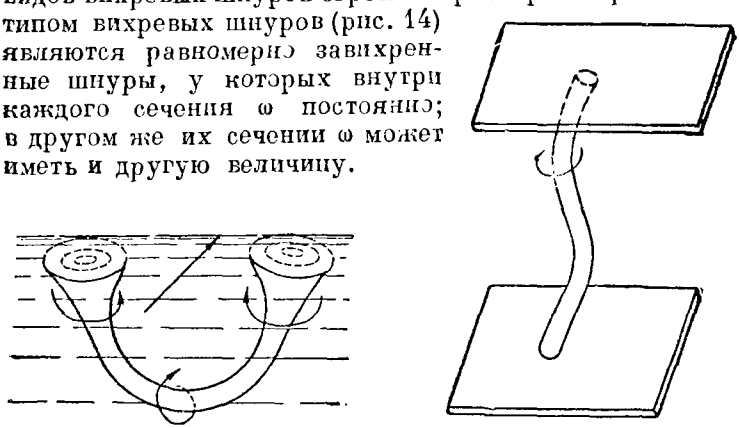


Рис. 13. Форма вихрей.

Поток внутри шнура завихрен, снаружи — нет. Любой контур внутри вихря даёт циркуляцию Γ, равную, по теореме Стокса, удвоенному вихревому потоку через охваченную контуром площадку. Контур, лежащий вне вихревого шнура, имеет циркуляцию скорости, равную нулю, так как никакого потока вихря через него протекать не будет. Согласно уравнению (21а), условие $\Gamma=0$ указывает, что в потоке существует потенциал скоростей φ. Следовательно, поток, текущий вне вихревого шнура, имеет потенциал скоростей, а поток, текущий внутри шнура, не имеет потенциала. Отсюда в аэродинамике имеет место выражение «потенциальный поток» — это значит *невихревой поток*.

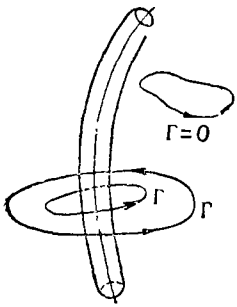


Рис. 14. Вихревой шнур.

Так как поток вихря ωds не равен нулю и существует лишь внутри шнура, а снаружи он равен нулю, то какой бы большой контур любой формы мы ни провели, всё равно поток вихря будет равен потоку, идущему внутри шнура. Следовательно, за меру силы вихревого шнура мы можем принимать имеющуюся вокруг

него циркуляцию Γ. При этом циркуляция скорости по любому контуру, охватывающему вихревой шнур, постоянна и не зависит от величины и формы контура. Это видно из того, что как бы мы ни проводили такой контур, через него всё время будет проходить один и тот же поток вихря, равный, согласно теореме Стокса:

$$\Gamma = 2\int\int \omega ds = \text{Const.} \quad (24)$$

Скоростное поле, возникающее около вихревого шнура, связано с его циркуляцией. Найдём скоростное поле у простейшего бесконечного прямолинейного шнура с циркуляцией Γ (рис. 15). Проведя нормальное к оси шнура сечение плоскостью p, заметим, что скорости потока у частиц жидкости, находящихся на одинаковых расстояниях от оси, будут одинаковы. Из центра на оси шнура очертим окружность, проходящую через точку A. Вызванная шнуром скорость V в точке A будет постоянной и касательной к окружности, следовательно, проекция скорости будет равна самой скорости, т. е.:

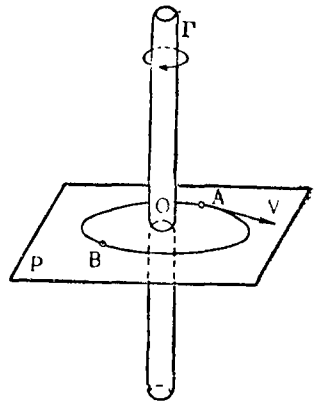


Рис. 15. Скоростное поле у вихревого шнура.

$$V_s = V = \text{Const.}$$

Циркуляция скорости по этой окружности будет равна:

$$\Gamma = \oint V_s dS = V \oint dS = V\,2\pi r,$$

откуда:

$$V = \frac{\Gamma}{2\pi r}. \quad (25)$$

Таким образом, частицы жидкости, окружающие вихревой шнур, движутся со скоростями, изменяющимися обратно пропорционально их расстоянию от оси шнура. Направление этих скоростей совпадает с направлением вращения шнура.

Внутри простейшего вихревого шнура ω=Const и шнур вращается как твёрдое тело. При этом скорость на

радиусе r может быть получена по обычной формуле:

$$V = \omega r,$$

т. е. V будет изменяться по линейному закону. Наибольшая скорость получится на поверхности шнура. Линии тока и снаружи и внутри шнура представят окружности. При этом снаружи будет иметься потенциал скоростей без вращающихся частиц, а внутри без потенциала скоростей, но с вращающимися частицами.

§ 6. ВЯЗКОСТЬ

Выводы, сделанные в § 5, относились, главным образом, к идеальной жидкости, не имеющей внутренних сил трения. В действительности же все реальные жидкости обладают силами внутреннего трения, которые называются вязкостью. Поэтому почти все приведённые выше формулы для идеальной жидкости являются приближёнными для жидкости вязкой. Физическая сущность вязкости состоит в проявлении сил внутреннего трения между слоями в текущей жидкости, вызываемых беспорядочным движением её молекул.

Силы вязкости стремятся затормозить быстро движущиеся части жидкости. В вязкой жидкости вихри постепенно рассасываются и исчезают. Однако вязкость может также и создавать вихри. Наиболее сильное вихреобразование наблюдается возле самой поверхности тел, обтекаемых потоком. На самой поверхности тела жидкость неподвижна: она прилипает к нему. По мере удаления от тела уже на малом расстоянии жидкость приобретает большую скорость, равную скорости обтекания.

Тонкий слой, прилегающий к поверхности тела, где происходит нарастание скорости от нуля до скорости отличающейся на 1% от скорости потенциального потока, обтекающего тело, называется пограничным слоем. Вследствие вязкости, обусловливающей наличие тангенциальных сил, жидкость в этом слое сильно завихрена, поэтому его иногда называют слоем поверхностного завихрения.

Коэфициент вязкости. Если в пограничном слое выделить две элементарных площадки dS (рис. 16) с расстоянием между ними δy, то нарастание скорости при

переходе от одной площадки к другой будет равно $\frac{\partial V}{\partial y}\delta y$. Разделив эту величину на δy, получим $\frac{\partial V}{\partial y}$. Эту величину называют градиентом скорости по нормали к поверхности тела.

Так как скорости между площадками dS различны, то между ними появится сила, касательная к этим площадкам, вызванная вязкостью жидкости. Эта сила будет зависеть от градиента скорости и от величины площадки dS:

$$dx = \mu \frac{\partial V}{\partial y} dS. \quad (26)$$

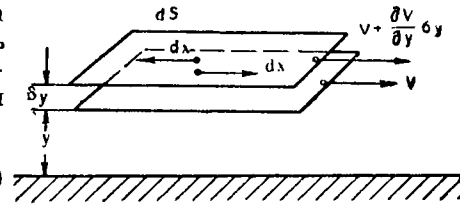


Рис. 16. Действие слоёв друг на друга вследствие вязкости.

В этом равенстве μ называется коэфициентом вязкости.

Разделив силу dx на площадку dS, получим напряжение силы вязкости τ, равное:

$$\tau = \frac{dx}{dS} = \mu \frac{\partial V}{\partial y}. \quad (27)$$

Это напряжение действует вдоль по площадкам и называется тангенциальным напряжением.

Размерность коэфициента вязкости μ получаем из формулы (27):

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{\partial V}{\partial y}} = \frac{\frac{\text{кг}}{\text{м}^2}}{\frac{\text{м}}{\text{сек.}} \cdot \frac{1}{\text{м}}} = [\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \text{сек.}].$$

Для удобства сопоставлений сил вязкости, зависящих от μ, с силами инерции, которые зависят от массовой плотности ρ, вводят понятие кинематического коэфициента вязкости ν:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} [\text{м}^2 . \text{сек} \cdot ^{-1}]. \quad (28)$$

Отсюда видим, что размерность ν такая же, как и у циркуляции или течения скорости.

Величина коэфициентов μ и ν для воздуха при $t=15°$ и $B=760$ мм рт. ст. имеет значения:

$$\mu_0 = 1{,}82 \cdot 10^{-6}.$$

$$\nu_0 = \frac{\mu_0}{\rho_0} = 1{,}45 \cdot 10^{-5} \text{м}^2 \cdot \text{сек.}^{-1},$$

или $\nu_0 = 0{,}145$ см^2/сек.

Кинематический коэфициент вязкости ν для других атмосферных условий можно находить по графику

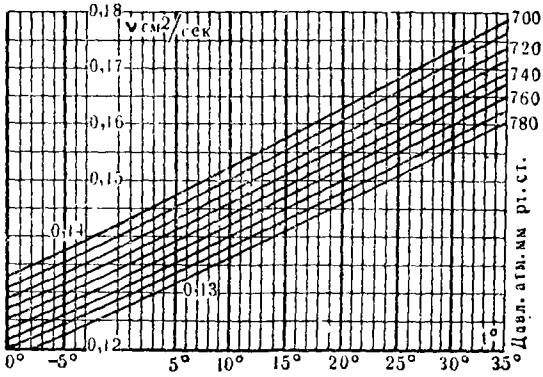


Рис. 17. График для определения коэфициента кинематической вязкости воздуха.

Л. Прандтля, приведённому на рис. 17, где по оси абсцисс отложены температуры в градусах Цельсия, по оси ординат коэфициенты кинематической вязкости в см^2/сек.

Коэфициент кинематической вязкости для воды при 15°:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu g}{\gamma} = \frac{1{,}164 \cdot 10^{-4} \cdot 9{,}81}{1\,000} = 0{,}1145 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}.$$

Отношение кинематических вязкостей воздуха и воды равно:

$$\frac{\nu_{\text{возд.}}}{\nu_{\text{воды}}} = \frac{1{,}45 \cdot 10^{-5}}{0{,}1145 \cdot 10^{-5}} = 12{,}7.$$

§ 7. ЗАКОН ПОДОБИЯ. КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ

Подобными называются такие явления в аэродинамике, у которых все характеризующие их однородные

физические величины находятся для любой точки пространства в одинаковом отношении [55, 56].

На основании закона аэродинамического подобия делают заключения о лётных свойствах самолёта, об эффективности ветроколеса по испытаниям в аэродинамической трубе малых моделей этих машин в целом, либо по частям.

Подобие модели натуре выражается в пропорциональности всех линейных размеров модели и натуры и в равенстве их соответственных углов.

Отношение сходственных размеров модели к натуре называется масштабом модели и выражается отношением:

$$k_l = \frac{l_1}{l}.$$

Это значит, если у натуры отрезок будет равен l, то сходственный отрезок у модели будет равен:

$$l_1 = k_l l.$$

Аналогично определяем понятия и о других масштабах: силовом, времени, плотности и др. Например, отношение плотностей в двух сходственных точках сравниваемых явлений определяет масштаб плотностей:

$$k_\rho = \frac{\rho_1}{\rho},$$

аналогично масштаб вязкостей, скоростей и сил:

$$k_\mu = \frac{\mu_1}{\mu};\quad k_V = \frac{V_1}{V} \quad \text{и} \quad k_R = \frac{R_1}{R}.$$

Величины с индексом относятся к модели.

Линейные масштабы — k_l, силовой — k_R и времени — k_t называются основными масштабами явлений.

Основное свойство этих масштабов заключается в том, что при соблюдении подобия постоянство их будет во всём пространстве, где происходят сравниваемые явления.

Получив понятие о масштабах явлений, мы можем сформулировать следующее определение закона аэродинамического подобия: два явления называются подобными, если у них всюду в сходственных точках получаются одинаковые масштабы для однородных величин.

Если не все масштабы отвечают этому условию, то говорят о приближённом, или частичном, подобии.

При пользовании аэродинамическими коэфициентами для решения многих практических задач, а также и при получении этих коэфициентов, достаточно соблюдение только приближённого, или частичного, подобия. Это значит в двух явлениях, скажем, в аэродинамической трубе и в действительном полёте, достаточно соблюсти постоянство масштабов не для всех физических величин, а только для некоторых, например, вязкости или упругости среды, или силы веса и т. д., играющих в каждом отдельном случае наиболее важную роль.

Новейшие исследования показали, что аэродинамические коэфициенты зависят не только от формы тела и углов ориентировки, но и от ряда отвлечённых чисел, установленных различными учёными. Эти числа называются **критериями подобия** и обозначаются начальными буквами фамилий их авторов. Каждое из этих чисел учитывает один какой-нибудь фактор, влияющий на обтекание.

Соблюдая равенство какого-либо числа критерия у модели и натуры, можно получить приближённое подобие.

В современной ветротехнике пользуются критериями подобия:

Рейнольдса (Re) — оценивающим вязкость жидкости, Маха (Ma) — оценивающим упругость жидкости. Эти числа имеют следующие выражения:

$$\mathrm{Re} = \frac{V_1 l_1}{\nu} = \frac{Vl}{\nu} = \mathrm{Const}, \tag{29}$$

$$\mathrm{Ma} = \frac{V_1}{a} = \frac{V}{a} = \mathrm{Const}, \tag{30}$$

где: V и V_1 — скорости потоков;

l и l_1 — линейные размеры натуры и модели;

ν и ν_1 — коэфициенты кинематической вязкости.

Число Рейнольдса (Re) оценивает силы вязкости, тормозящие движение жидкости. Эта величина играет чрезвычайно важную роль при решении задач аэро- и гидродинамики.

Для воздуха при нормальных условиях кинематическая вязкость:

$$\nu = 1{,}45 \cdot 10^{-5},$$

следовательно, число Рейнольдса для воздуха:

$$\mathrm{Re} = \frac{Vl}{1{,}45 \cdot 10^{-5}} = 69\,000\,Vl.$$

В тех случаях, когда и у модели и у натуры кинематический коэфициент вязкости одинаков, имеем равенство:

$$V_1 l_1 = Vl. \qquad (31)$$

Произведение Vl называется характеристикой опыта, которое применяется вместо Re при одинаковом ν для модели и натуры.

Таким образом, для получения подобия при наличии сил вязкости необходимо соблюсти следующие условия: 1) модель и натура должны быть геометрически подобными; 2) ориентировка модели и натуры по отношению к потоку должна быть одинаковой; 3) модель и натура должны иметь одинаковые числа Рейнольдса.

Переход от модели к натуре. Из равенства $V_1 l_1 = Vl = \mathrm{Const}$ имеем:

$$\frac{V_1}{V} = \frac{l}{l_1} = \frac{1}{k_l},$$

где — $k_l = \frac{l_1}{l}$ — линейный масштаб.

Таким образом при испытании модели в аэродинамической трубе, где можно принимать $\rho_1 = \rho$ и $\mu_1 = \mu$, подобие будет соблюдено, если взять скорость в трубе равной:

$$V_1 = \frac{1}{k_l} V = \frac{l}{l_1} V,$$

т. е. скорость V_1 у модели должна быть во столько раз больше скорости V натуры, во сколько раз линейные размеры модели меньше натуры.

Выполнение этих требований для испытания моделей самолётов, скорость полёта которых в настоящее время превосходит 100 м/сек., составляет большие затруднения. В самом деле, чтобы получить подобие явлений при модели, выполненной в масштабе $^1/_{10}$, надо было бы получить у модели скорость потока равной 1 000 м/сек. Такую скорость достигнуть в трубе невозможно, так как для этого потребовалась бы мощность для создания потока в несколько сот тысяч лош. сил. Кроме того, при таких скоростях подобие будет нарушаться упругостью воздуха, которая сильно влияет на обтекание тел уже при

скорости звука — 330 м/сек. В данном случае будет преобладать влияние числа Маха:

$$\text{Ма} = \frac{V_1}{a}.$$

Чтобы получить удовлетворительный результат эксперимента с моделями самолётов, строят трубы высокого давления или гигантских размеров; последние позволяют производить продувку самолётов в натуральную величину.

Экспериментальными исследованиями установлено, что при малых числах Рейнольдса коэфициент сопротивления

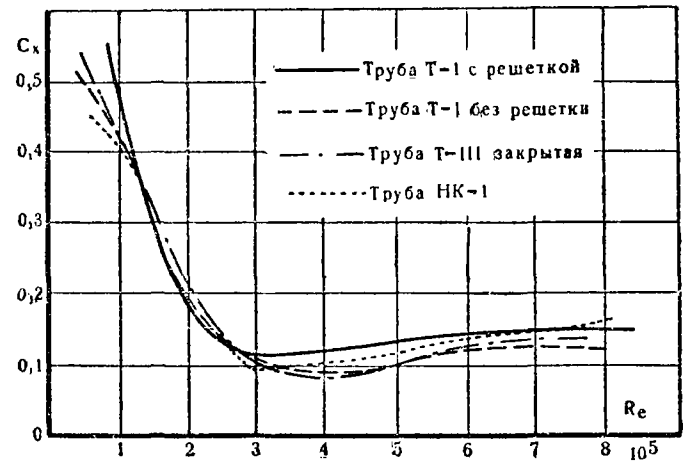


Рис. 18. Изменение коэфициента сопротивления C_x шара в зависимости от числа Рейнольдса.

тел больше, а с увеличением $V_1 l_1$ сопротивление падает и при некотором значении $V_1 l_1$ сопротивление практически остаётся постоянным.

Интересные опыты были проделаны в ЦАГИ в разных трубах с шарами разных размеров. Полученные кривые сопротивлений, в зависимости от скорости потока, были перестроены в зависимости от числа Рейнольдса и представлены в виде диаграммы, показанной на рис. 18. Эта диаграмма показывает, что коэфициент сопротивления C_x резко изменяется для всех кривых опыта при числах Рейнольдса $\text{Re} < 3 \cdot 10^5$; при $\text{Re} > 3 \cdot 10^5$ коэфициент сопротивления практически остаётся постоянным.

Отсюда можем заключить, что при испытании моделей необходимо получить число Рейнольдса для модели большим некоторой определённой величины. Например, для крыла нужно, чтобы

$$\frac{V_1 l_1}{\nu} > \mathrm{Re};$$

по графику рис. 18 видим, что наименьшее сопротивление получается при числах Рейнольдса от 300 000 и выше. Приняв с запасом Re=440 000, получим:

$$V_1 l_1 > \frac{Re}{\nu} > \frac{440\,000}{145\,000},$$

откуда:

$$V_1 l_1 > 3 \frac{\text{м}^2}{\text{сек.}}.$$

§ 8. ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

При обтекании тела воздушным потоком слои воздуха в непосредственной близости к поверхности тела, вследствие вязкости жидкости, затормаживаются, и в них возникают вихри. Эти вихри увлекаются общим потоком, вытягиваются в беспорядочно завихренные хвосты (рис. 19). Завихренный слой воздушного потока, непосредственно прилегающий к обтекаемому телу, как было сказано в § 6, называется пограничным слоем, или слоем поверхностного завихрения.

Для доказательства завихренности этого слоя возьмём контур *abcd* (рис. 19, внизу) и вычислим по нему циркуляцию скорости. Стороны *a l* и *bc* направим по скорости потока, а стороны *cd* и *ab* — перпендикулярно к ним. Так как $\overline{bc}=\overline{ad}$, циркуляция будет равна:

$$\Gamma abcda = V_2 \overline{bc} - V_1 \overline{ad} = \overline{ad}\,(V_2 - V_1).$$

Но V_2 больше V_1 и Γ не равна 0, следовательно, поток завихрен.

Поток, лежащий вне вихревого слоя, можно считать потенциальным (см. уравнения (21) и (21а)). В пограничном слое главную роль играют силы вязкости и отчасти силы инерции. Вследствие вязкости, частицы жидкости закручиваются в вихревые кольца и уносятся, образуя позади тела вихревой хвост, где силы вязкости играют меньшую роль.

Чёткого раздела между пограничным слоем и внешним потоком нет: скорость от нуля на поверхности тела увеличивается до скорости потока вдали от него. За толщину пограничного слоя можно принять то расстояние δ от поверхности обтекаемого тела, где скорость отличается от скорости потенциального потока на 1%. Теоретически толщина слоя δ в зависимости от X меняется по параболическому закону (рис. 19, внизу), где X — расстояние измеряемой толщины от передней кромки обтекаемого воздухом тела.

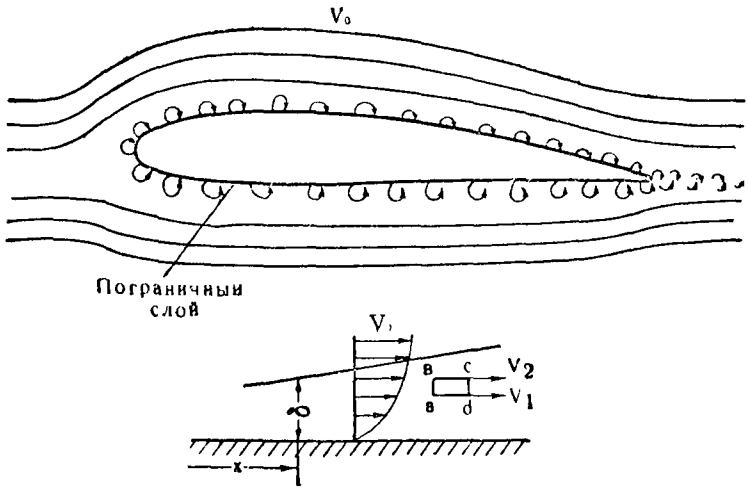


Рис. 19. Пограничный слой.

Жидкость в пограничном слое при малых числах Рейнольдса течёт в виде несмешивающихся слоёв. Такой поток называется л а м и н а р н ы м.

Исследованиями установлено, что ламинарный поток при обтекании пластинки, длиною l, расположенной параллельно потоку, получается лишь для малых чисел Рейнольдса. При увеличении числа на некоторой длине l_k поток остаётся ламинарным, а далее переходит в сильно завихренное состояние, которое называется т у р б у л е н т н ы м (рис. 20).

Длина, на которой поток будет ещё ламинарным, определяется критическим числом:

$$\mathrm{Re} \cong 485\,000 = \frac{V_0 l_k}{\nu}.$$

Отсюда длина ламинарной части будет равна:

$$l_k = 485\,000 = \frac{\nu}{V_0}.$$

Для нормального воздуха получим:

$$l_k = \frac{485\,000 \cdot 1{,}45 \cdot 10^{-5}}{V_0} = \frac{7{,}05}{V_0}.$$

Начальная турбулентность потока резко изменяет величину получаемых в трубах коэфициентов. Это происходит вследствие того, что турбулентность сильно действует на пограничный слой обтекаемых потоком тел. Например, если бы пластинку, показанную на рис. 20, обтекал не ламинарный поток, а поток с начальной турбулентностью, то, как известно из опытов, ламинарная часть значительно сократилась бы. При большой начальной турбулентности ламинарная часть пограничного слоя может совершенно отсутствовать. При этом сопротивление пластинки повышается, так как коэфициент сопротивления пластинки у турбулентного слоя больше, чем у ламинарного.

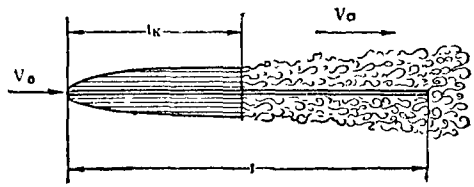


Рис. 20. Переход ламинарного потока в турбулентный.

Однако увеличение турбулентности увеличивает коэфициент сопротивления лишь у таких тел, где главной частью сопротивления является трение, а не давление. К таким телам относятся: пластинка, расположенная вдоль потока, крылья, дирижабли и другие тела с хорошей формой обтекания (рис. 21, а). При обдувке же тел, у которых сопротивление зависит, главным образом, от давления (шар, пластинка, перпендикулярная потоку, дирижабль, поставленный поперёк потока, и др.) (рис. 21, б, в), сопротивление в турбулентном потоке может оказаться меньше, чем в ламинарном. При этом падение величины коэфициента сопротивления происходит одновременно с переходом пограничного слоя шара из ламинарного в турбулентное.

На рис. 22, а, б, в, приведён ряд последовательных стадий образования вихрей позади шара, обтекаемого

воздушным потоком. Рис. 22, а, изображает обтекание шара непосредственно после возникновения движения из состояния покоя. В этот момент течение происходит без срыва; спереди и сзади получается повышенное давление, а

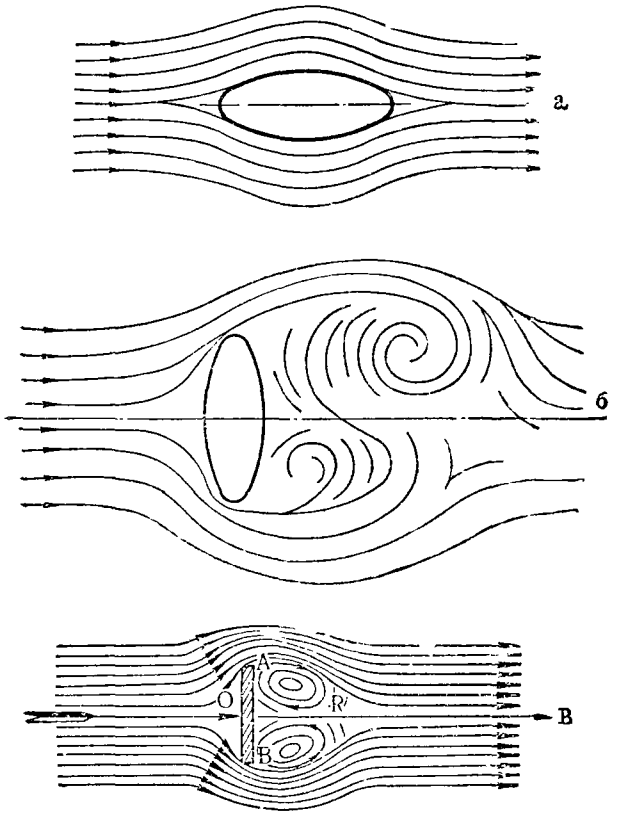
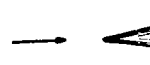
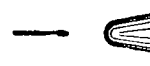
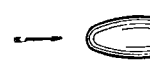
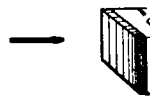
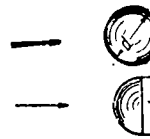
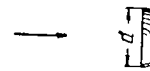
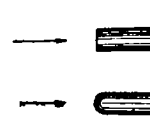
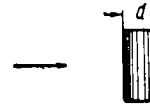


Рис. 21. Образование вихрей позади тел с различным обтеканием их в потоке.

по бокам — отрицательное. В следующий момент пограничный слой начинает течь из зоны с повышенным давлением в зону с пониженным; вследствие этого около миделевого сечения происходит столкновение этого течения со слоем, текущим спереди (рис. 22, б). В результате столкновения поток срывается с поверхности шара в виде вихрей (рис. 22, в); при этом давление за шаром делается

Таблица 2

Коэфициенты лобового сопротивления C_x для некоторых тел

№ по пор.	Название тела	Форма тела и направление потока	Поверхность давления (миделевое сечение)	Отношение сторон поверхности	Коэфициент сопротивления C_x
1	Круглая пластинка		$\frac{\pi d^2}{4}$	—	1,11
2	Конус		$\frac{\pi d^2}{4}$	—	0,44
3	Конус с закруглённой вершиной		$\frac{\pi d^2}{4}$	—	0,22
4	Эллипсоид вращения — дирижабль		$\frac{\pi d^2}{4}$	—	0,044
5	Прямоугольная пластинка		$a \times b$	$\frac{a}{b}$ 1 4 10 ∞	1,1 1,1 1,28 1,83
6	Шар		$\frac{\pi d^2}{4}$	—	0,47
7	Полый полушар		$\frac{\pi d^2}{4}$	—	0,34
8	Цилиндр		$\frac{\pi d^2}{4}$	— —	0,84 0,23
9	Цилиндр		$l \times d$	$\frac{l}{d}$ 1 5 40	0,63 0,74 1,2

отрицательным, что вызывает большое сопротивление; коэфициент сопротивления достигает $C_x = 0{,}48$.

Если обтекание шара происходит при больших числах Рейнольдса, то пограничный слой переходит в турбулентное состояние. В этом случае отрыв пограничного слоя происходит в точке, лежащей на более далёком расстоянии, чем у ламинарного слоя. Благодаря этому перепад давлений получается меньший, и коэфициент лобового сопротивления падает до величины $C_x = 0{,}10$, несмотря на то, что трение о поверхность шара в турбулентном слое более высокое. Сделав на передней стороне шара кольцо из проволоки, можно вызвать турбулентное течение пограничного слоя, что снижает коэфициент сопротивления примерно в два раза.

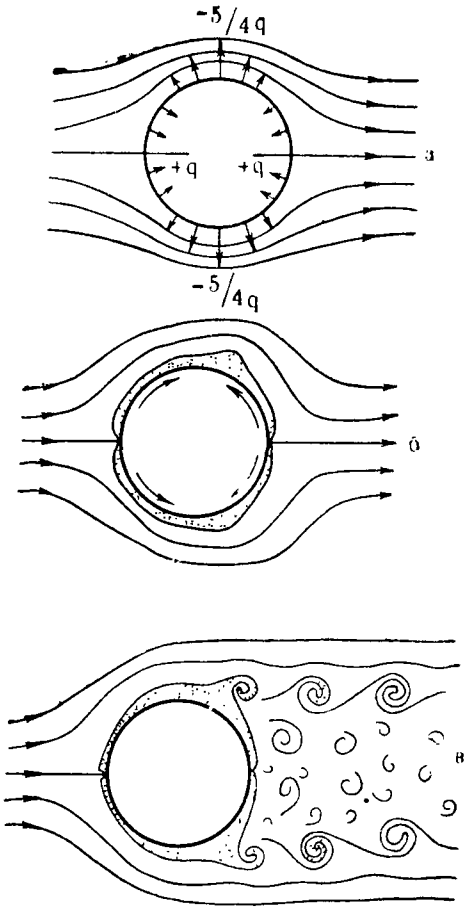


Рис. 22. Образование вихрей позади шара.

В таблице 2 приведены коэфициенты лобового сопротивления C_x для некоторых тел, полученные различными авторами при исследовании обтекания.

ГЛАВА II

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ

§ 9. ОСИ КООРДИНАТ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ КОЭФИЦИЕНТЫ

В экспериментальной аэродинамике пользуются тремя системами координат: земной, поточной и связанной.

В земной системе координат одна из осей, обычно OY_0, направляется по вертикали вверх, две другие, OX_0 и OZ_0, располагаются в горизонтальной плоскости. Этой системой координат пользуются, главным образом, при установке аэродинамических труб и некоторых моделей в них.

В поточной системе координат ось OX направляют по вектору невозмущённой скорости потока V; ось OY — в плоскости симметрии модели; она является осью подъёмной силы; ось OZ (боковая) располагается перпендикулярно к осям OX и OY.

Плоскости, образуемые осями координат, называются: XY — плоскостью потока; XZ — плоскостью скольжения и плоскость YZ — лобовой плоскостью.

При выверке потоков в аэродинамических трубах, поточные оси координат приводят в полное совпадение с земными осями трубы.

Начало координат поточных осей для моделей самолётов и дирижаблей выбирают в точке, где находится центр тяжести у представляемых ими машин; для изолированного крыла — у его передней кромки.

Оси координат, которые считаются во время опытов жёстко соединёнными с моделью, называются связан-

ными осями координат, или разметочными.

Начало этих осей координат помещают обычно в точке, соответствующей центру тяжести натурального самолёта или в какой-либо условной точке. Ось OX_1, называемую продольной осью, направляют в плоскости симметрии модели: у самолёта — параллельно центральной

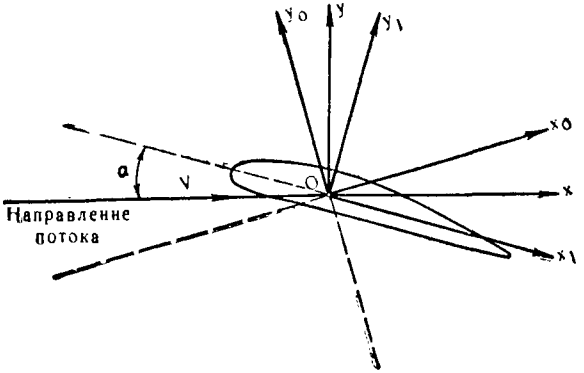


Рис. 23. Системы координат.

хорде верхнего крыла, у дирижабля — параллельно его оси. Ось OY_1 называют нормальной осью и проводят в плоскости симметрии модели перпендикулярно к оси OX_1. Ось OZ называют поперечной осью и направляют перпендикулярно к осям OX_1 и OY_1.

Плоскость X_1Y_1 называют плоскостью симметрии, плоскость X_1Z — главной плоскостью и плоскость Y_1Z — поперечной плоскостью.

Как располагаются все три системы координат относительно модели, показано на рис. 23, где вектор V представляет скорость потока, пунктирная прямая — направление хорды крыла.

При проворачивании крыла около оси OZ будет изменяться угол между вектором скорости потока V и плоскостью крыла X_1Z. Этот угол называют истинным углом атаки и обозначают α.

Силовые и моментные аэродинамические коэфициенты. При решении практических задач переходят от модели к натуре с помощью аэродинамических

коэфициентов. Эти коэфициенты выражаются отвлечёнными числами.

Полную аэродинамическую силу R, действующую на обтекаемсе потоком тело, и соответствующий ей коэфициент C_R для практических приложений удобно разложить на компоненты по поточным осям координат. При разложении получим (рис. 24):

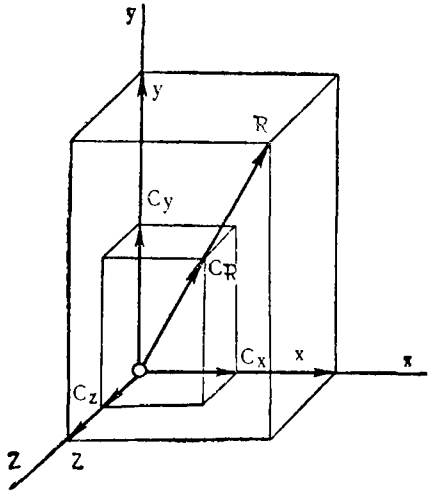


Рис. 24. Разложение коэфициента C_R по поточным осям координат.

Лобовое сопротивление:

$$X = G_x Sq = C_x S \frac{\rho V^2}{2}.$$

Подъёмную силу:

$$Y = C_y Sq = C_y S \frac{\rho V^2}{2}. \qquad (32)$$

Боковую силу:

$$Z = C_z Sq = C_z S \frac{\rho V^2}{2}.$$

Здесь коэфициенты C_x, C_y, C_z означают:

C_x — коэфициент лобового сопротивления,

C_y — коэфициент подъёмной силы,

C_z — коэфициент боковой силы.

Из рис. 24 видим, что сила R и коэфициент C_R являются равнодействующими соответствующих компонентов, т. е.:

$$\left.\begin{aligned} R &= \sqrt{X^2+Y^2+Z^2}\,; \\ C_R &= \sqrt{C_x^2+C_y^2+C_z^2}\,. \end{aligned}\right\} \tag{33}$$

Разлагая также и моменты по осям координат, получим:

Момент крена:

$$M_x = C_{mx} SqL = C_{mx} SL\frac{\rho V^2}{2}\,.$$

Момент рыскания:

$$M_y = C_{my} SqL = C_{my} SL\frac{\rho V^2}{2}\,. \tag{34}$$

Момент тангажа:

$$M_z = C_{mz} SqL = C_{mz} SL\frac{\rho V^2}{2}\,.$$

Равнодействующий или полный момент:

$$\left.\begin{aligned} M &= \sqrt{M_x^2+M_y^2+M_z^2}\,, \\ C_m &= \sqrt{C_{mx}^2+C_{my}^2+C_{zm}^2} \end{aligned}\right\} \tag{35}$$

где C_{mx}, C_{my} и C_{mz} — коэфициенты моментов, являющиеся безразмерными числами.

C_m называется коэфициентом полного аэродинамического момента. Таким образом, основная формула аэродинамики для моментов напишется в следующем виде:

$$M = C_m SL\frac{\rho V^2}{2}\,, \tag{36}$$

где: S — площадь крыльев или другая характерная площадь тела;

L — условная длина.

§ 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФИЦИЕНТОВ. ПОЛЯРА ЛИЛИЕНТАЛЯ

В результате экспериментальных исследований обтекания тел воздушным потоком в аэродинамических трубах получают аэродинамические коэфициенты, выражающиеся следующими формулами:

Коэфициент силы сопротивления:

$$C_x = \frac{X'}{S' \frac{\rho' V'^2}{2}}.$$

Коэфициент подъёмной силы:

$$C_y = \frac{Y'}{S' \frac{\rho' V'^2}{2}}. \qquad (37)$$

Коэфициент боковой силы:

$$C_z = \frac{Z'}{S' \frac{\rho' V'^2}{2}}.$$

Соответственно коэфициенты моментов:

$$C_{mx} = \frac{M'_x}{S'L' \frac{\rho' V'^2}{2}}.$$

$$C_{my} = \frac{M'_y}{S'L' \frac{\rho' V'^2}{2}}. \qquad (38)$$

$$C_{mz} = \frac{M'_z}{S'L' \frac{\rho' V'^2}{2}}.$$

Индексы поставлены у величин, относящихся к модели.

Силы, действующие на ту или иную конструкцию, подсчитывают, пользуясь этими коэфициентами:

Сила сопротивления:

$$X = C_x S \frac{\rho V^2}{2}.$$

Подъёмная сила:

$$Y = C_y S \frac{\rho V^2}{2}. \qquad (39)$$

Боковая сила:

$$Z = C_z S \frac{\rho V^2}{2}.$$

Моменты:

$$M_x = C_{mx} SL \frac{\rho V^2}{2}.$$

$$M_y = C_{my} SL \frac{\rho V^2}{2}. \qquad (40)$$

$$M_z = C_{mz} SL \frac{\rho V^2}{2}.$$

Действие силы на тело произвольной формы обычно определяют с помощью уравнения:

$$P_x = C_x F \frac{\rho V^2}{2}, \qquad (41)$$

где F — поверхность миделевого сечения тела, т. е. проекции площади тела на плоскость, перпендикулярную направлению воздушного потока.

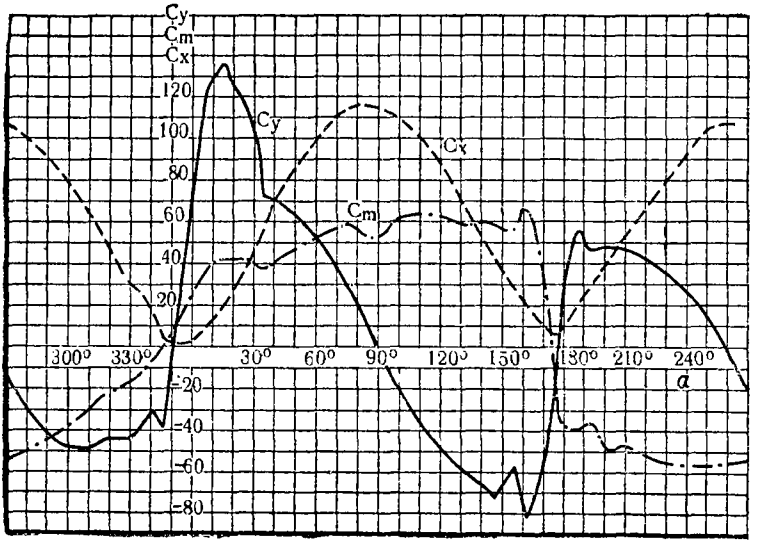


Рис. 25. Характеристики коэфициентов C_y, C_x и C_m крыла, полученные при круговой обдувке.

Как изменяются аэродинамические коэфициенты C_y, C_x и C_m в зависимости от угла атаки α при круговой обдувке профиля крыла конечного размаха, показано на рис. 25.

Поляра Лилиенталя. Кривые, характеризующие аэродинамические свойства крыла вообще, называют аэродинамической характеристикой. Кривая, изображающая зависимость C_y от C_x в прямоугольной системе координат с разметкой на кривой углов атаки, при которых были получены эти коэфициенты, называется кривой, или полярой, Лилиенталя (по имени исследователя, предложившего способ изображения этой зависимости).

Построение поляры производится следующим образом. По характеристикам $C_y = f(\alpha)$ и $C_x = f(\alpha)$ берут для каждого угла атаки α соответствующие им значения C_y и C_x и наносят их в системе прямоугольных координат $C_y - C_x$. У каждой точки надписывают величину угла атаки в градусах (рис. 26). Величина C_x в несколько раз меньше C_y, поэтому принято масштаб для C_x принимать в 5 раз больше, чем для C_y.

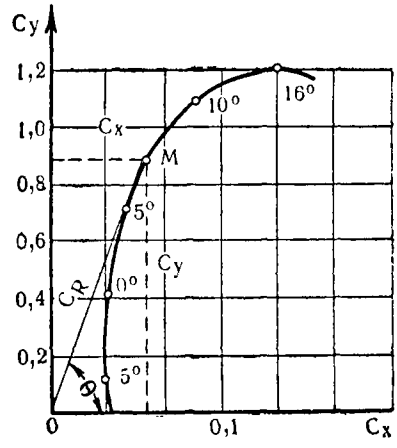


Рис. 26. Поляра Лилиенталя.

Линия, проведённая из начала координат O к любой точке M кривой Лилиенталя, начерченной в одинаковых масштабах C_y и C_x, даст отрезок OM, равный C_R коэфициенту равнодействующей сил подъёмной и сопротивления. Размерные величины сил мы получим из кривой Лилиенталя, умножив её коэфициенты на площадь натуры S и скоростной напор $\frac{\rho V^2}{2}$, а именно:

$$X = C_x S \frac{\rho V^2}{2}; \quad Y = C_y S \frac{\rho V^2}{2}; \quad R = C_R S \frac{\rho V^2}{2}.$$

Вектор C_R составляет с осью абсцисс угол θ, тангенс которого равен

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{C_y}{C_x} = K. \tag{42}$$

Отношение $\frac{C_y}{C_x}$ называют качеством крыла. Обратное отношение:

$$\frac{C_x}{C_y} = \frac{1}{K} = \mu \tag{43}$$

называют обратным качеством крыла. Качество лучших современных крыльев достигает $K = 22$.

Центр давления. Понятие центра давления, а по прежней терминологии — центра парусности, возникло в связи с изучением устойчивости при симметричной продувке тел. Положение центра давления определяется координатой x_1 и находится на пересечении полной аэродинамической силы R с осью OX (рис. 27). Поэтому центром давления называют точку, в которой полная аэродинамическая сила пересекает связанную с телом ось OX. Центр давления выражают безразмерной величиной, как отношение X_1 к хорде крыла или вообще длине тела:

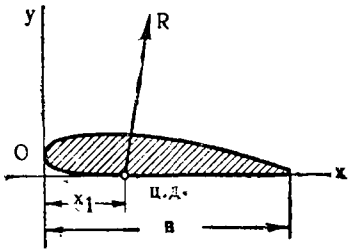


Рис. 27. Определение центра давления.

$$C_g = \frac{X_1}{L}; \tag{44}$$

это отношение называют коэфициентом центра давления.

Для крыла C_g выражают в процентах от хорды крыла b, т. е.:

$$C_g = \frac{X_1}{b} \cdot 100.$$

Если начало координат взято в точке O у носка крыла (рис. 27), то C_y и C_x проходят через начало координат. Полная равнодействующая проходит через центр давления, следовательно, при равновесии момент аэродинамических сил относительно центра давления должен равняться нулю:

$$M = C_m S \frac{\rho V^2}{2} b - C'_y S \frac{\rho V^2}{2} X_1 = 0,$$

откуда

$$C_m^b = C'_y X_1,$$

или

$$\frac{C_m}{C_y} = \frac{X_1}{b} = C_g.$$

Для малых углов атаки до $\alpha = 20°$ $C'_y = C_y$; следовательно, это уравнение можно переписать в другом виде:

$$C_g = \frac{C_m}{C_y}. \qquad (44а)$$

Величины C_m и C_y известны из продувок, следовательно, с помощью их по формуле (44а) можно определить коэфициент C_g.

Коэфициенты момента C_m и центра давления C_g наносят в виде кривых на график с кривой Лилиенталя: C_m как функцию C_y, а C_g, как функцию α, т. е.:

$$C_m = f(C_y); \quad C_g = f(\alpha)$$

§ 11. ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КРЫЛА

Сила сопротивления крыла бесконечного размаха возникает вследствие трения воздуха о поверхность и срыва струй. Величина силы сопротивления зависит от состояния поверхности и формы профиля крыла. Эту силу называют профильным сопротивлением.

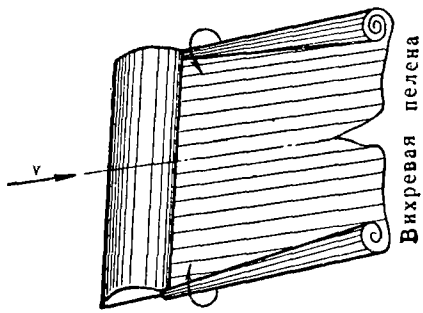


Рис. 28. Вихри, сбегающие с крыла конечного размаха, образуют позади крыла вихревую пелену.

При обтекании крыла конечного размаха, помимо профильных сопротивлений, возникают дополнительные сопротивления, вызванные вихревыми шнурами, сбегающими с крыла. Вдоль размаха крыла проходит вихревая линия или целая система вихревых линий, называемых присоединёнными вихрями. Эти вихри увлекаются потоком и позади крыла образуют вихревую пелену. Эта пелена неустойчива и вскоре после сбегания с крыла сворачивается в два вихревых шнура (рис. 28).

Вследствие пониженного давления над крылом и повышенного под ним, у крыла конечного размаха масса воздуха у торцов крыла будет стремиться вверх, закручиваясь в вихри. Эти вихри, не будучи связаны с крылом

на его концах, подхватываются общим течением потока и вытягиваются в виде вихревых шнуров, идущих в бесконечность (рис. 29). В вязкой жидкости эти шнуры вследствие трения на некотором расстоянии от крыла затухают и являются конечными.

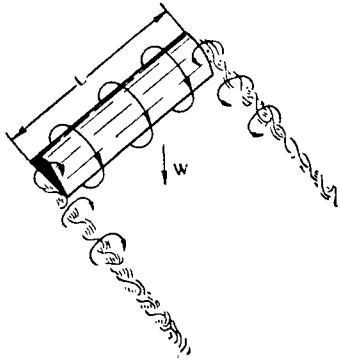


Рис. 29. Вихревые шнуры, сбегающие с концов крыла конечного размаха.

Вихревые шнуры, сбегающие с крыла, вызывают вертикальную скорость W, которая действует на поток и отклоняет его направление в сторону уменьшения угла атаки α на величину $\Delta\alpha$. Этот угол называют углом скоса, а скорость W — скоростью скоса (рис. 30). Подъёмная сила крыла при этом отклоняется на величину угла скоса потока $\Delta\alpha$ от того направления, которое она занимала бы при отсутствии вертикальной скорости W. С изменением направления подъёмной силы возникает дополни-

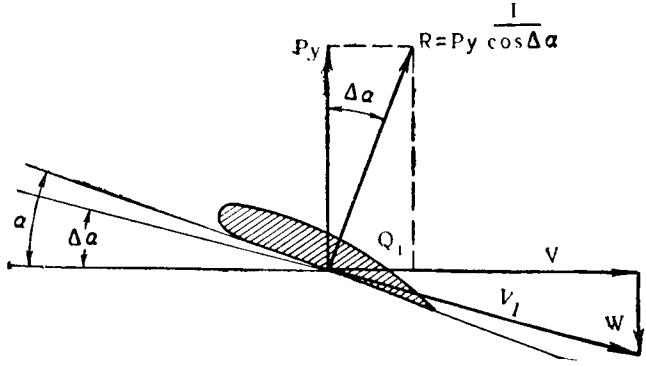


Рис. 30. Графическое изображение силы индуктивного сопротивления.

тельная сила сопротивления Q_i, называемая индуктивным сопротивлением.

Угол скоса представляет небольшую величину, по-

этому результирующую скорость V_1, можно принимать равной скорости потока V, т. е.:

$$V_1 = V,$$

а угол скоса потока можно вычислять в радианах по формуле:

$$\operatorname{tg}\alpha = \Delta\alpha = \frac{W}{V}, \tag{45}$$

принимая, по малости, угол и тангенс его равными.

Из теории индукции известно, что средняя скорость скоса потока определяется с помощью формулы:

$$W = -\frac{C_y}{\pi\lambda} \cdot V, \tag{46}$$

где λ есть отношение длины крыла l к его ширине b, т. е.:

$$\lambda = \frac{l}{b}, \tag{47}$$

и называется относительным размахом крыла или его удлинением.

Подставляя значение W в равенство (45), получим, в радианах:

$$\Delta\alpha = \frac{C_y}{\pi\lambda}, \tag{48}$$

или в градусах:

$$\Delta\alpha^\circ = \frac{360^\circ}{2\pi}\Delta\alpha = 57{,}3\,\Delta\alpha. \tag{49}$$

Следовательно, угол скоса потока у крыла будет иметь величину, в градусах:

$$\Delta\alpha^\circ = 57{,}3\,\Delta\alpha = 57{,}3\frac{C_y}{\pi\lambda} = 18{,}23\frac{C_y}{\lambda}. \tag{50}$$

Отсюда видим, что чем больше λ — удлинение крыла, тем меньше угол скоса потока и тем больше истинный угол атаки α при данном C_y.

Таким образом, если на крыло конечного размаха набегает поток под углом атаки α, то на самом деле истинный угол будет меньше α, т. е.:

$$\alpha_i = \alpha - \Delta\alpha. \tag{51}$$

Для крыла бесконечного размаха λ равно бесконечности и, следовательно, $\Delta\alpha = 0$, т. е.:

$$\alpha_i = \alpha.$$

Величину силы индуктивного сопротивления находим из рис. 30.

$$Q_i = Y \operatorname{tg} \Delta\alpha = Y \Delta\alpha; \tag{52}$$

так как:

$$\Delta\alpha = \frac{C_y}{\pi\lambda},$$

то:

$$Q_i = Y \frac{C_y}{\pi\lambda}, \tag{52а}$$

но

$$Y = C_y S \frac{\rho V^2}{2},$$

следовательно:

$$Q_i = \frac{C_y^2}{\pi\lambda} \cdot S \frac{\rho V^2}{2}. \tag{53}$$

Из уравнения (53) видим, что коэфициент индуктивного сопротивления равен:

$$C_i = \frac{C_y^2}{\pi\lambda}. \tag{54}$$

Таким образом, при набегании воздушного потока на крыло бесконечного размаха, оно испытывает лобовое сопротивление X, которое складывается:

1) из профильного сопротивления X_p, зависящего только от профиля крыла и трения воздуха о поверхность, и 2) индуктивного сопротивления Q_i, зависящего от формы и размеров крыла в плане:

$$X = X_p + Q_i = (C_p + C_i) S \frac{\rho V^2}{2} = C_x S \frac{\rho V^2}{2}.$$

Кривая C_i индуктивного сопротивления на кривой Лилиенталя изобразится в виде параболы с вершиной в начале координат и называется параболой индуктивного сопротивления. Для получения полной картины, характеризующей данный профиль крыла, на эту же диаграмму наносят кривую C_y по α и кривую $K = \frac{C_y}{C_x}$ качества крыла (см. § 13, рис. 35).

§ 12. ТЕОРЕМА Н. Е. ЖУКОВСКОГО О ПОДЪЕМНОЙ СИЛЕ КРЫЛА

При обтекании крыла воздушным потоком, над крылом получается пониженное давление, а под ним повышенное.

Схема распределения давлений над и под крылом показана на рис. 31а.

На основании теоремы Бернулли в случае несжимаемой жидкости это означает, что скорость струек, текущих непосредственно над крылом, будет больше скорости вдали от крыла, а под ним меньше. Если очертить вокруг крыла контур (рис. 31б),то на участке контура над крылом течение скорости будет больше, чем отрицательное течение на участке под крылом. Это указывает на то, что вокруг крыла, дающего подъёмную силу, существует циркуляция скорости. А так как циркуляция

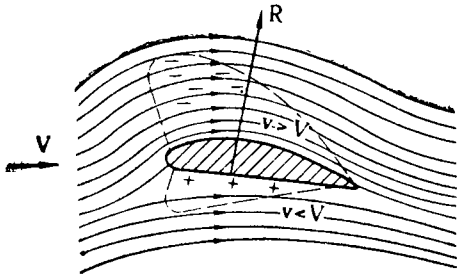


Рис. 31а. Распределение давлений над и под крылом.

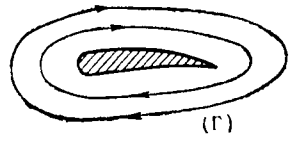


Рис. 31б. Циркуляция скорости вокруг крыла.

скорости существует и вокруг вихревого шнура, то Н. Е. Жуковский и предложил заменять при различных подсчётах крыло пучком вихрей, названных им присоединёнными вихрями.

Формула Н. Е. Жуковского подъёмной силы крыла бесконечного размаха находит широкое применение при лабораторных исследованиях, расчётах винтов и крыльев самолётов, вентиляторов и ветродвигателей.

Она имеет простое выражение:

$$Y = \rho \Gamma V_0 l, \tag{55}$$

где Y — сила, перпендикулярная к скорости V_0 и действующая на отрезок крыла длиною l;

ρ — массовая плотность;

Γ — циркуляция скорости и

V_0 — скорость невозмущённого потока.

Направление силы Y получается по следующему правилу: надо взять вектор скорости и повернуть его на прямой угол в сторону, противоположную циркуляции.

Б. Н. Юрьев предложил следующее доказательство этой теоремы. Заменим крыло присоединённым вихревым шнуром с циркуляцией Γ, равной циркуляции около крыла, и очертим на оси этого вихря цилиндр длиною l и весьма большого по сравнению с размерами крыла радиуса R (рис. 32).

Наложим на скоростное поле, вызываемое этим вихревым шнуром, поступательный поток; тогда суммарный поток для далёких точек будет эквивалентен потоку, обтекающему крыло. Сила, действующая на крыло, равна силе, действующей на выделенный нами цилиндр. Найдём эту силу. Она составится из сил давления, действующих на поверхность этого цилиндра, и из результирующей количеств движения, внесённых извне в тот же цилиндр и вынесенных из него за 1 секунду.

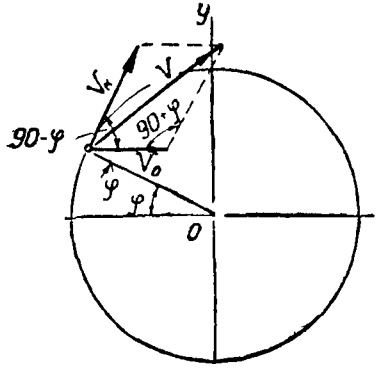


Рис. 32. К теореме Н. Е. Жуковского.

Найдём теперь, какие давления получатся на поверхности цилиндра.

Применяя теорему Бернулли к любой струйке воздуха, пересекающей цилиндр, можно написать следующее уравнение:

$$P_0+\frac{\rho V_0^2}{2}=P+\frac{\rho V^2}{2}\text{, или } P_0-P=\frac{\rho}{2}(V^2-V_0^2)\cdot \quad \text{(a)}$$

Скорость V будет геометрической суммой скорости поступательного потока V_0 и скорости V_k, вызванной вихрем. Скорость V_0 всюду постоянна, а V_k — также постоянна и, будучи направлена по касательной к цилиндру, является переменной по направлению и равна:

$$V_k=\frac{\Gamma}{2\pi R}\cdot$$

Если задавать положение элемента на поверхности цилиндра углом φ, то результирующая скорость будет:

$$V^2=V_0^2+V_k^2-2V_0V_k\cos(90+\varphi);$$

так как

$$\cos(90+\varphi) = -\sin\varphi,$$

то можем написать:

$$V^2 = V_0^2 + V_k^2 + 2V_0V_k\sin\varphi.$$

Подставив значение V^2 в уравнение (а), получим:

$$P_0 - P = \frac{\rho}{2}(V_0^2 + V_k^2 + 2V_0V_k\sin\varphi - V_0^2) =$$

$$= \frac{\rho}{2}(V_k^2 + 2V_0V_k\sin\varphi). \qquad (б)$$

Перейдём к вычислению подъёмной силы, развиваемой элементом цилиндра длиной по образующей l и окружной длиной $Rd\varphi$; его площадь:

$$dS = lRd\varphi.$$

Давление на этот элемент равно $(P_0 - P)$.

Проектируя действующую на этот элемент силу на ось OY, перпендикулярную к скорости V_0, получим:

$$dY_p = (P_0 - P)dS\cos(90 - \varphi) = (P_0 - P)lR\sin\varphi d\varphi,$$

или

$$dY_p = \frac{\rho}{2}(V_k^2 + 2V_0V_k\sin\varphi)lR\sin\varphi d\varphi =$$

$$= \rho lRV_0V_k\sin^2\varphi d\varphi + \frac{\rho}{2}lRV_k^2\sin\varphi d\varphi.$$

Полную подъёмную силу получим, суммируя все элементарные силы, т. е.

$$Y_p = \rho lRV_0V_k\int_0^{2\pi}\sin^2\varphi d\varphi + \frac{\rho}{2}lRV_k^2\int_0^{2\pi}\sin\varphi d\varphi.$$

Первый интеграл равен π, второй нулю.

Следовательно:

$$Y_p = \rho lRV_0V_k\pi.$$

Так как

$$V_k = \frac{\Gamma}{2\pi R},$$

то

$$Y_p = \frac{\rho lV_0\Gamma}{2}.$$

Кроме сил давления, на цилиндр будут ещё действовать импульсивные силы, для учёта которых нужно

найти полное приращение количества движения жидкости в направлении оси OY.

Находим сначала количество движения, внесённое через тот же элемент цилиндра площадью

$$dS = lRd\varphi.$$

Находим секундную массу. Тангенциальная слагающая скорость V_k не будет давать проекции на нормаль к элементу площади; нормальная скорость V_n будет получаться лишь за счёт скорости V_0 и будет равна $V_0 \cos\varphi$. Следовательно, элементарная секундная масса:

$$dm = \rho V_n dS = \rho l R V_0 \cos\varphi d\varphi.$$

Количество движения, несомое этой массой в направлении оси OY, будет равно элементарной импульсивной подъёмной силе dY_m. Слагающая скорости V_0 не будет давать проекций в этом направлении — проекция будет получаться лишь от скорости V_k и будет равна $V_k \cos\varphi$. Следовательно:

$$dY_m = dmV_k \cos\varphi = \rho l R V_0 V_k \cos^2\varphi d\varphi.$$

Полная импульсивная сила получится в результате суммирования всех элементарных сил, т. е.

$$Y_m = \rho l R V_0 V_k \int_0^{2\pi} \cos^2\varphi d\varphi = \rho l R V_0 V_k \pi.$$

Заменяя V_k ее значением $\frac{\Gamma}{2\pi R}$, получим:

$$Y_m = \frac{\rho V_0 l \Gamma}{2}.$$

Полная величина подъёмной силы будет равна:

$$Y = Y_p + Y_m = \rho \Gamma V_0 l. \qquad (55)$$

Мы видим, что половина силы получилась за счёт давлений и половина за счёт импульса, т. е. создания в жидкости количества движения.

Надо заметить, что сила сопротивления в случае такого потока равна нулю. Это видно из того, что скорость у левого и правого элементов относительно оси OY цилиндра будет одинаковой, следовательно и давления будут одинаковы.

Поэтому никакой силы от давления по оси OX мы не получим. Точно также и количества движений у втекающей и уходящей через эти элементы цилиндра жидкости будут в направлении оси OX одинаковыми. Следовательно, сила лобового сопротивления X у крыла в идеальной жидкости равна нулю.

Н. Е. Жуковский так сформулировал свою теорему: подъёмная сила, действующая на крыло бесконечного размаха, равна плотности жидкости, умноженной на циркуляцию, на скорость потока в бесконечности и на длину выделенного куска крыла.

Направление силы получается поворотом вектора скорости на прямой угол в сторону, обратную циркуляции.

Для крыла конечного размаха с вихревыми шнурами позади вывод этой теоремы, как предложил Н. Е. Жуковский, можно сделать приближённым способом [56].

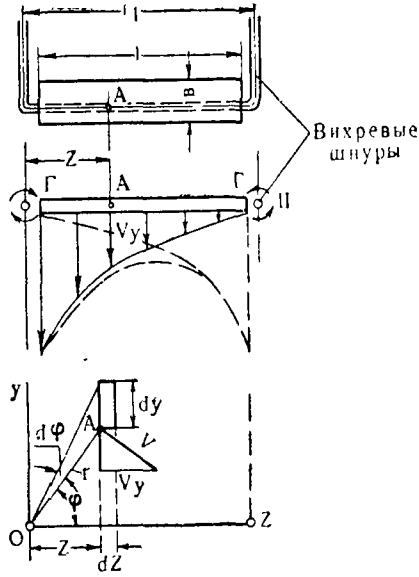


Рис. 33. Индуктивные скорости — от вихрей за крылом.

Проведём далеко за крылом плоскость, перпендикулярную к направлению скорости потока; эта плоскость пересечёт вихревые шнуры (I—II), и мы получим картину, изображённую на рис. 33. Эти вихри вокруг себя создают скорости, которые можно вычислить с помощью формулы (25):

$$V = \frac{\Gamma}{2\pi R}. \qquad (25)$$

Между вихрями жидкость получает от их действия скорости, направленные вниз. Вследствие этого часть жидко-

сти, лежащая между вихрями, получит в этом же направлении приращение количества движения. Что касается части жидкости, лежащей вне вихрей, то относительно её можно показать, что в общем она получает в вертикальном направлении от близлежащего вихря количество движения, равное количеству движения, полученного от дальнего вихря, но направленное в противоположную сторону. Следовательно, общее приращение количества движения для этой части жидкости будет равно нулю. Итак, действие крыла конечного размаха на обтекающий его поток жидкости состоит в том, что часть этой жидкости, заключённая между вихрями, получает в вертикальном направлении приращение количества движения.

Раз некоторая масса воздуха m отбрасывается крылом вниз, то крыло давит на неё сверху вниз, а жидкость на крыло снизу вверх, вызывая подъёмную силу крыла, которая равна приращению количества движения в единицу времени этой отброшенной массы.

Посмотрим, чему равно количество движения, создаваемое одним вихрем в бесконечно узкой полоске с шириною и длиною, равной единице по направлению полёта.

Вертикальная составляющая скорости, вызванной в точке A (рис. 33) левым вихрем, будет равна:

$$V_y = V\cos\varphi = \frac{\Gamma}{2\pi r}\cos\varphi,$$

где φ — угол, обозначенный на рис. 33.

Замечая, что:

$$r = \frac{Z}{\cos\varphi},$$

получаем:

$$V_y = \frac{\Gamma}{2\pi Z}\cdot\cos^2\varphi.$$

Количество движения, имеющееся в параллелепипеде длиной по направлению полёта, равной единице, высотой dy и шириной dz может быть написано в виде:

$$V_y dm = V\rho dZ dy.$$

Здесь dm — масса этого параллелепипеда и
ρ — массовая плотность воздуха.

Из рисунка видно, что:

$$dy = \frac{r d\varphi}{\cos\varphi} = \frac{Z d\varphi}{\cos^2\varphi}.$$

Подставляя это выражение в предыдущую формулу, получаем:

$$V_y dm = \rho \frac{\Gamma}{2\pi} \cdot dZ d\varphi.$$

Обозначим через dM количество движения по всей полоске шириной dZ; тогда:

$$dM = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} V_y dm = \rho \frac{\Gamma}{2\pi} \cdot dZ \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} d\varphi = \frac{1}{2} \rho \Gamma dZ.$$

Это выражение показывает, что dM не зависит от координаты Y. Следовательно, для всех полосок одинаковой ширины dZ количество движения будет одним и тем же. Так как у нас имеются два вихря, то в области между ними их действие суммируется, и количество движения каждой полоски удваивается и равно $\rho \Gamma\, dZ$; снаружи, где вихри действуют в противоположные стороны, количество движения по вертикали равно нулю. Следовательно, для получения полного количества движения нам придется суммировать лишь полоски, лежащие между вихрями.

Итак, находим:

$$2M = \int_0^l 2dM = \rho \Gamma \int_0^l dZ = \rho \Gamma l.$$

Это выражение даёт количество движения по вертикали всей полоски шириною l и длиной, равной единице, по направлению полёта. Подъёмная же сила крыла равна секундному количеству движения. Через рассматриваемую плоскость в секунду будет проходить воздушная колонна длиной, равной не единице, а V. Подставляя V в предыдущее равенство, получим выражение теоремы Н. Е. Жуковского:

$$\rho \Gamma V l = Y.$$

Уравнение связи. При решении практических задач, связанных с вычислением циркуляции скорости вокруг крыла, приходится пользоваться двумя уравнениями: теоретической формулой (55) Н. Е. Жуковского:

$$Y = \Gamma \rho V l,$$

и формулой экспериментальной аэродинамики:

$$Y = C_y S \frac{\rho V^2}{2} = C_y S q. \qquad (32)$$

У прямоугольного крыла $S = bl$, где b — ширина крыла и l — размах. Подставляя значение S в уравнение (32), получим:

$$Y = C_y \frac{\rho V^2}{2} bl.$$

Подъёмная сила, подсчитанная с помощью уравнения (55) (теоретическая), должна быть равна подъёмной силе, полученной по экспериментальной формуле, т. е.:

$$\Gamma \rho V l = C_y \frac{\rho V^2}{2} bl,$$

откуда имеем:

$$\Gamma = \frac{C_y}{2} bV. \qquad (56)$$

Уравнение (56) называют уравнением связи, так как оно даёт связь между экспериментальной величиной C_y и теоретической Γ.

§ 13. ПЕРЕХОД С ОДНОГО РАЗМАХА КРЫЛЬЕВ НА ДРУГОЙ

В практике встречается необходимость перестраивать полученную продувкой в аэродинамической трубе поляру Лилиенталя для крыла с удлинением λ_1 на другую поляру крыла с новым удлинением λ_2 или для крыла с бесконечным размахом.

В аэродинамическом расчёте ветродвигателей пользуются продувками, пересчитанными на бесконечный размах, и в процессе расчёта учитывают индуктивное сопротивление.

Так как характеристики профилей, полученные в аэродинамической трубе, строятся для крыльев конечного размаха, то при использовании их для крыльев ветряка делают пересчёт поляры Лилиенталя с конечного размаха на бесконечный. Этот пересчёт делают графически.

Допустим, мы имеем поляру Лилиенталя для крыла с удлинением $\lambda = 5$, которую нужно перестроить на бесконечный размах $\lambda = \infty$. Так как индуктивное сопротивление крыла с бесконечным размахом равно нулю, то, вычитая индуктивное сопротивление C_i данного крыла из лобо-

вого C_x, мы получим профильное сопротивление C_p. Это вычитание делается с помощью параболы индуктивного сопротивления для $\lambda=5$, построенной в зависимости от C_y по формуле (54). Откладывая на диаграмме (рис. 34) результат вычитания, т. е. профильное сопротивление C_p в зависимости от C_y, мы получим кривую профильного сопротивления. Практически это построение можно делать так: раствором циркуля берут расстояние

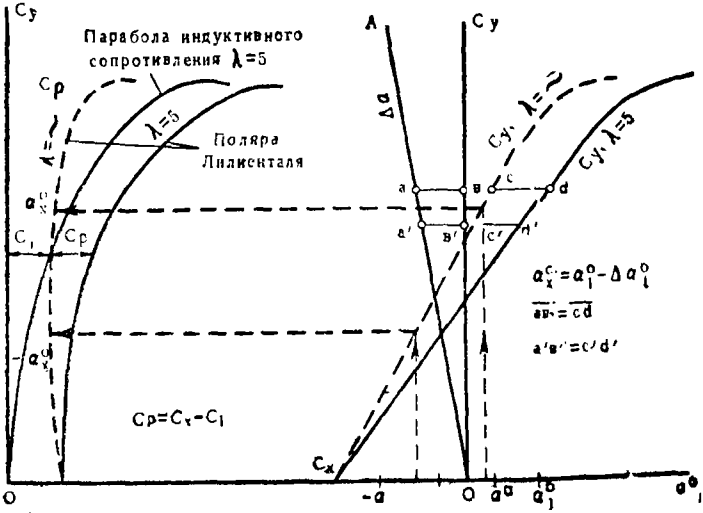


Рис. 34. Перестройка диаграммы Лилиенталя с одного размаха крыла $\lambda=5$ на другой $\lambda=\infty$.

между полярой Лилиенталя $\lambda=5$ и параболой индуктивного сопротивления $\lambda=5$ и сдвигают это расстояние влево до оси ординат. Соединив полученные точки пунктирной кривой (рис. 34, слева), получают характеристику профильного сопротивления, которая одновременно является полярой Лилиенталя для крыла бесконечного размаха. На полученной новой поляре Лилиенталя мы должны произвести разбивку углов атаки α, что и выполняют графически. Рядом с полярой Лилиенталя для бесконечного размаха строят кривую C_y по α для $\lambda=5$ принятого профиля (рис. 34). Далее по формуле скоса потока:

$$\Delta\alpha = 57{,}3\frac{C_y}{\pi\lambda} \qquad (50)$$

наносят на графи права величину скоса потока, который подсчитывают для какого-нибудь одного значения, например, $C_y=1{,}0$.

Скос потока изобразится прямой линией $O—A$, построенной в том же масштабе, в каком отложены углы атаки по оси абсцисс. Далее строят кривую C_y при $\lambda=\infty$, для чего сдвигают каждую величину C_y влево на соответствующий ей отрезок $\overline{ab}$; $\overline{a'b'}$ и т. д., которые соответствуют скосу угла атаки $\Delta\alpha$ (рис. 34). Далее с помощью полученной таким образом кривой C_y по α для $\lambda=\infty$ производят разбивку углов атаки на поляре Лилиенталя, построенной раньше слева. Ход определения углов на кривой Лилиенталя показан пунктирной линией со стрелкой (рис. 37).

При переходе от одного конечного размаха крыла с удлинением λ_1 другому конечному размаху λ_2, кривую C_y по α смещают не на полную величину скоса потока, как при $\lambda=\infty$, а на разность скоса потока в обоих случаях, т. е. на величину:

$$\Delta\alpha_1-\Delta\alpha_2=C_y\left(\frac{1}{\pi\lambda_1}-\frac{1}{\pi\lambda_2}\right)57{,}3. \qquad (57)$$

В этом случае на кривой Лилиенталя вычитают не полное индуктивное сопротивление, а разность индуктивных сопротивлений для крыльев с удлинениями λ_1 и λ_2:

$$C_{i_1}-C_{i_2}=C_y^2\left(\frac{1}{\pi\lambda_1}-\frac{1}{\pi\lambda_2}\right). \qquad (58)$$

Отсюда видно, что пересчёт крыла с одного размаха на другой производится при помощи двух кривых характеристики профиля крыла — кривой Лилиенталя и кривой C_y по α.

В таблице 3 приведены цифровые значения аэродинамических характеристик профилей, которые могут быть использованы для крыльев ветродвигателей. Графическое изображение характеристик этих профилей даётся на рисунке 33 — I, II, III и IV. Ординаты профилей даются в таблице 4 [4]. Тот или иной профиль выбирают в зависимости от конструкции ветроколеса. В табл. 3 и 4 и на рис. 33 № профилей соответствуют № серий испытаний в данной лаборатории.

Так как индуктивное сопротивление крыла при аэродинамическом расчёте ветроколеса учитывается расчёт-

Таблица 3

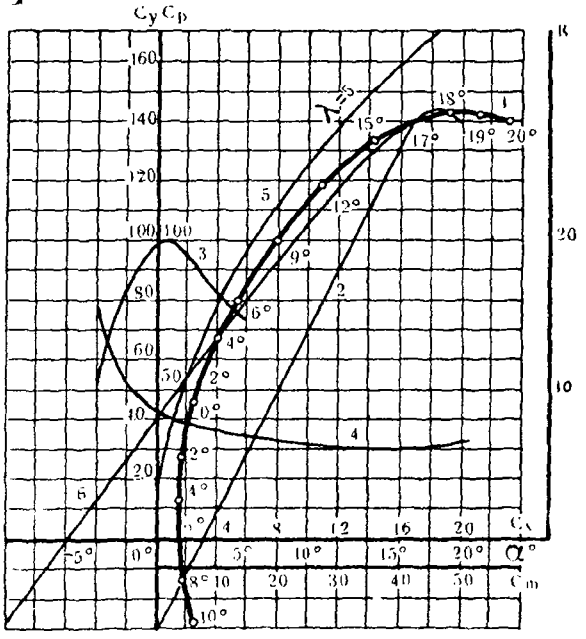
Аэродинамические характеристики профилей крыльев конечного размаха

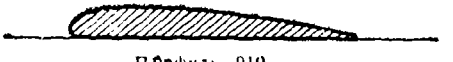
Профиль 909 ЦАГИ				Профиль 910 ЦАГИ				Профиль 730 МАИ				Профиль 795 МАИ			
α	c_y	c_x	c_m	α	c_y	c_x	c_m	α	c_y	c_x	c_m	α	c_y	c_x	c_m
—10	—28,00	2,30	1,00	—10	—82,80	4,00	—1,20	1	2,60	1,02	2,80	—8	—31,20	2,30	0,00
— 8	—13,80	1,70	4,00	— 7	—12,60	1,40	3,40	0	9,40	0,76	4,40	—6	—18,60	1,57	2,64
— 6	0,20	1,30	7,30	— 4	6,30	1,10	8,00	2	25,20	0,98	7,60	—4	—5,60	1,22	5,50
— 4	14,00	1,30	10,70	— 2	21,00	1,20	11,20	4	39,80	1,58	11,00	—2	7,40	1,16	8,60
— 2	26,60	1,54	13,60	0	34,50	1,60	14,40	6	54,20	2,46	14,40	0	20,50	1,34	11,50
0	40,00	2,00	16,80	2	47,40	2,20	17,80	8	68,40	3,74	17,60	2	33,60	1,74	14,60
2	53,00	2,80	20,20	4	60,40	3,20	21,00	10	81,20	5,24	20,40	4	46,46	2,42	17,80
4	65,50	4,00	23,70	6	74,00	4,56	24,40	12	91,00	7,20	22,80	6	60,50	3,44	21,20
6	79,50	5,38	27,20	9	93,0	5,96	29,00	14	98,00	12,18	24,80	8	74,20	4,66	24,40
9	99,50	7,80	32,20	10	—	—	—	16	97,80	21,36	27,80	10	87,40	6,04	27,20
12	118,00	10,82	36,60	12	112,00	9,70	33,75	18	95,80	27,60	—	12	99,20	7,56	29,20
15	133,00	14,20	39,90	15	126,00	13,20	37,20	20	90,00	—	—	14	110,40	9,24	31,38
17	141,00	17,50	42,80	18	130,40	18,80	40,00					16	120,20	11,06	33,20
18	143,00	19,30	43,40	19	129,40	21,20	40,80					18	126,50	13,24	34,60
19	141,60	21,30	43,90	20	127,60	23,90	41,00					20	128,20	16,20	35,46
20	139,20	23,50	44,40	22	122,00	24,40	—					22	125,00	20,06	36,00
				24	115,20	36,80	—					24	119,20	24,20	36,40
				—12	—	8,00	—								
				—14	—47,60	13,70	—10,00								



Профиль 909

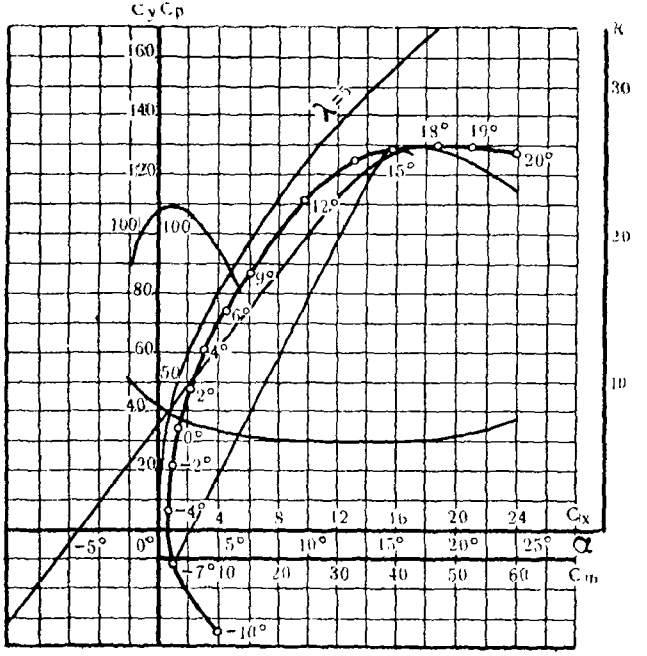
I





Профиль 910

II



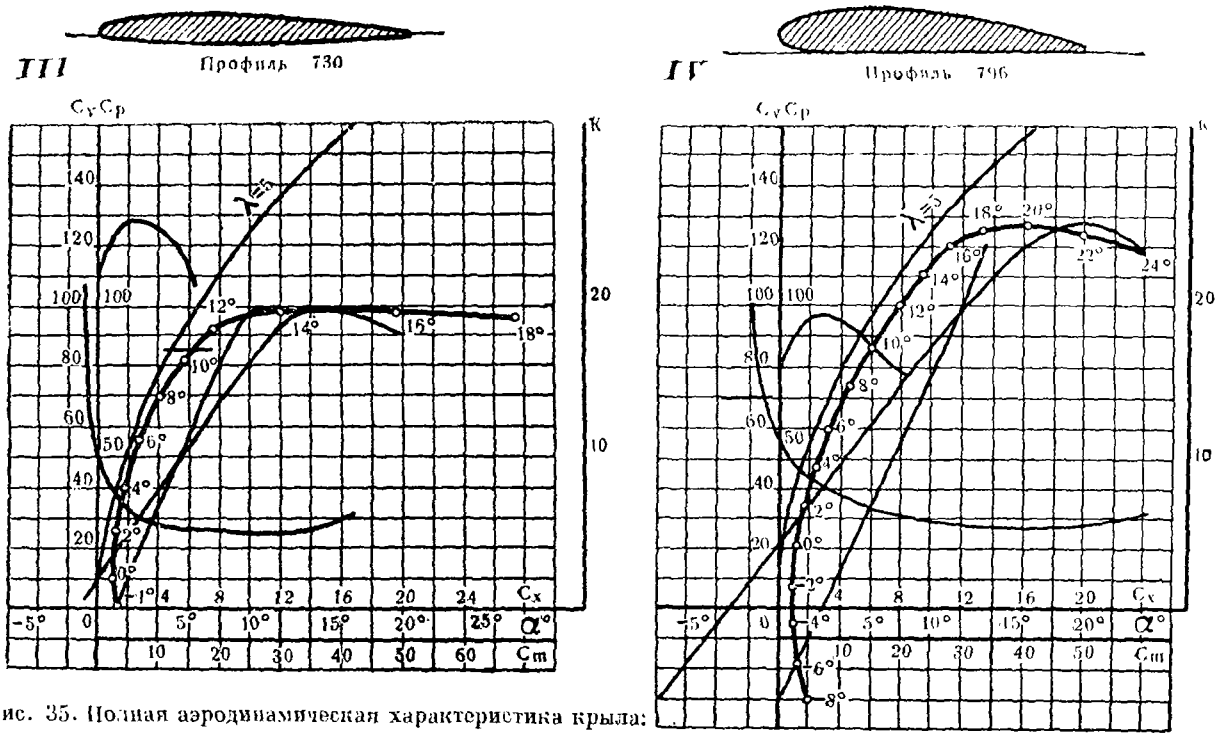


Рис. 35. Полная аэродинамическая характеристика крыла:

1 — кривая Лилиенталя; 2 — кривая моментов C_m; 3 — кривая качества крыла; 4 — кривая центра давления; 5 — парабола индуктивного сопротивления; 6 — кривая C_y по α I — к профилю 909; II — к профилю 910; III — к профилю 730 и IV — к профилю 796

ными формулами, то при использовании выше приведённых профилей для ветроколеса необходимо характеристику выбранного профиля перестроить на характеристику бесконечного размаха. Эту перестройку надо делать согласно рис. 34.

Пример. Сделаем пересчёт характеристики, приведённой на рис. 35—IV профиля 796 с удлинением $\lambda=5$ на бесконечный размах $\lambda=\infty$. Пересчёт делаем, пользуясь изложенным выше методом.

С помощью уравнения (54) подсчитываем C_i для различных значений C_y, величины которых даны в таблице 3.

$$C_i=\frac{C_y^2}{\pi\lambda}=0{,}0637C_y^2.$$

$\alpha=0°$; $C_{i_0}=0{,}0637\cdot 0{,}205^2=0{,}00268$ в масштабе графика $C_i=0{,}200$

$\alpha=2°$; $C_{i_2}=0{,}0637\cdot 0{,}336^2=0{,}00715$ » » » $C_i=0{,}715$

$\alpha=3°$; $C_{i_3}=0{,}0637\cdot 0{,}465^2=0{,}01370$ » » » $C_i=1{,}370$

$\alpha=14°$; $C_{i_{14}}=0{,}0637\cdot 1{,}104^2=0{,}07800$ » » » $C_i=7{,}800$

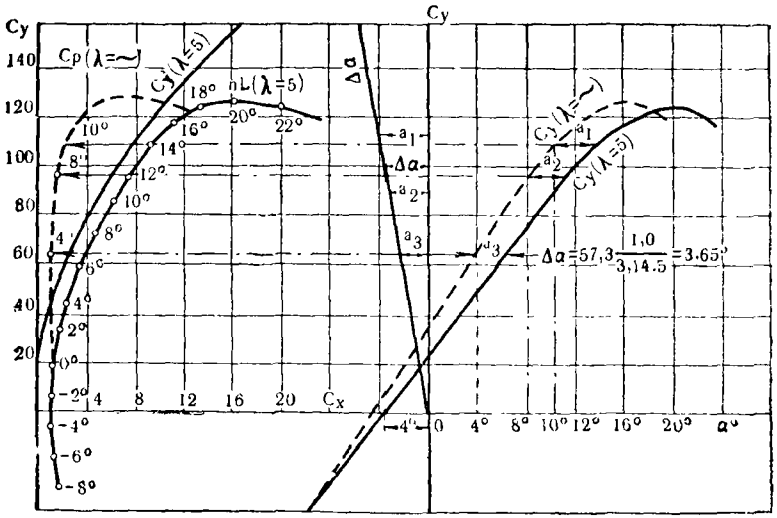


Рис. 36. Графическое построение характеристики крыла бесконечного размаха (пример).

Таблица 4

Ординаты для построения профилей

Абсциссы (в % от длины хорды профиля)	№ профилей							
	I — 909		II — 910		III — 730		IV — 796	
	ординаты (в % от длины хорды)							
	верхняя	нижняя	верхняя	нижняя	верхняя	нижняя	верхняя	нижняя
0	2,95	2,95	2,50	2,50	0	0	3,50	3,50
1,25	5,55	1,11	4,70	1,00	—	—	6,10	1,40
2,5	6,60	0,60	5,63	0,51	2,22	—0,70	7,21	0,76
5,0	8,26	0,20	7,00	0,17	3,19	—1,03	8,86	0,03
7,5	9,50	0,05	8,33	0,05	—	—	10,01	—0,50
10	10,51	0	8,90	—	4,42	—1,43	10,89	—0,87
15	11,86	0	10,5	0	—	—	12,17	—1,38
20	12,60	0	10,66	0	5,65	—1,88	12,96	—1,57
30	13,00	0	11,0	0	6,00	—2,20	13,35	—1,65
40	12,50	0	10,56	0	5,64	—2,21	13,00	—1,67
50	11,30	0	9,53	0	5,25	—2,03	11,95	—1,48
60	9,73	0	8,22	0	4,46	—1,84	10,44	—1,29
70	7,73	0	6,56	0	3,46	—1,55	8,39	—1,04
80	5,43	0	4,60	0	2,34	—1,19	5,95	—0,73
90	2,86	0	2,42	0	1,17	—0,75	3,20	—0,40
95	1,47	0	1,25	0	—	—	1,75	—0,25
100	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0,14	—0,01

Полученные точки для C_i наносим на график рис. 36, слева, и проводим по ним кривую C_i — параболу индуктивного сопротивления. На этот же график наносим кривую Лилиенталя, т. е. C_y и C_x при соответствующих углах α, которые даны на рис. 35—IV. С помощью этих двух кривых строим кривую профильного сопротивления $C_p(\lambda=\infty)$.

Построение точек делаем либо пересчётом с помощью уравнения $C_p=C_x-C_i$, при этом C_x и C_i необходимо брать при соответствующем C_y, либо смещением отрезков на графике, взятых между кривыми C_i и πL раствором циркуля, до оси ординат. Это построение сделано на графике слева пунктирной кривой $C_p(\lambda=\infty)$.

Далее наносим на графике справа кривую $C_y(\lambda=5)$ в зависимости от α, которая дана на рис. 35—IV, и строим угол скоса потока $\Delta\alpha$.

Величина этого угла при $C_y=1{,}0$ равна

$$\Delta\alpha = 57{,}3\frac{C_y}{\pi\lambda} = 57{,}3\,\frac{1{,}0}{3{,}17\cdot 5} = 3{,}65^\circ.$$

Отрезок в масштабе углов на абсциссе для угла $\Delta\alpha=3{,}65^\circ$ равен: $1{,}62\times 3{,}65=5{,}92$ мм. Этот отрезок откладываем на горизонтали от оси C_y влево против $C_y=100$ и через его конец проводим из O наклонную прямую $\Delta\alpha$.

Сдвигая кривую ($\lambda=5$) влево на величину отрезков a_1, a_2, a_3 и т. д., получим кривую $C_y(\lambda=\infty)$, которая показана пунктирной кривой.

Разбивка углов на кривой Лилиенталя, построенной для бесконечного размаха $C_y(\lambda=\infty)$, показана на графике линиями пунктир с точкой.

Пересчёт других характеристик, приведённых на рис. 35 на бесконечный размах крыла, предлагается сделать в порядке упражнений.

ГЛАВА III

СИСТЕМЫ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

§ 14. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ПРИНЦИПУ ИХ РАБОТЫ

Существующие системы ветродвигателей по схеме устройства ветроколеса и его положению в потоке ветра разделяются на три класса.

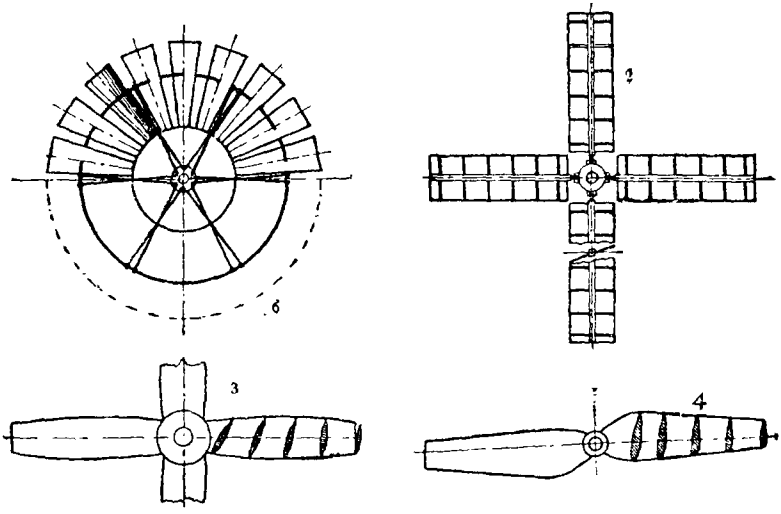


Рис. 37. Схемы ветроколёс крыльчатых ветродвигателей:
I — многолопастное ветроколесо; *II*, *III* и *IV* — малолопастные ветроколёса.

Первый класс включает ветродвигатели, у которых ветровое колесо располагается в вертикальной плоскости; при этом плоскость вращения перпендикулярна

направлению ветра, и, следовательно, ось ветроколеса параллельна потоку. Такие ветродвигатели называются крыльчатыми.

Крыльчатые ветродвигатели, согласно ГОСТ 2656-44, в зависимости от типа ветроколеса и быстроходности, разделяются на три группы (рис. 37).

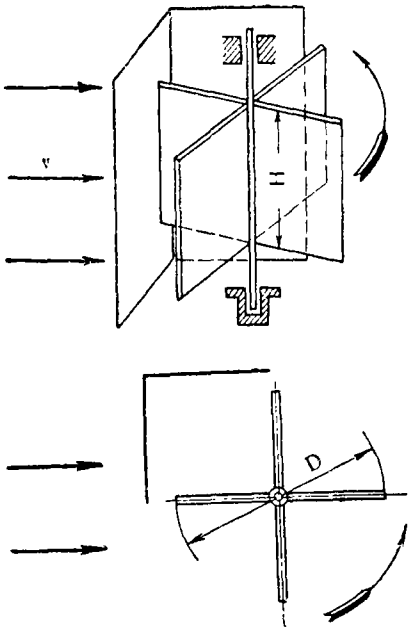


Рис. 38. Схема карусельного ветряка.

Быстроходностью называется отношение окружной скорости конца лопасти к скорости ветра:

$$Z = \frac{\omega R}{V}. \qquad (59)$$

Группа 1 — ветродвигатели многолопастные, тихоходные, с быстроходностью $Z_л \leq 2$.

Группа 2 — ветродвигатели малолопастные, тихоходные, простейшей деревометаллической конструкции, в том числе ветряные мельницы, с быстроходностью $Z_л > 2$.

Группа 3 — ветродвигатели малолопастные, быстроходные, $Z_л \geqslant 3$.

Ко **второму классу** относятся системы ветродвигателей с вертикальной осью вращения ветрового колеса. По конструктивной схеме они разбиваются на группы:

карусельные, у которых нерабочие лопасти либо прикрываются ширмой, либо располагаются ребром против ветра (рис. 38);

роторные ветродвигатели системы Савониуса (рис. 39).

К **третьему классу** относятся ветродвигатели, работающие по принципу водяного мельничного колеса и называемые барабанными. У этих ветродвигателей

ось вращения горизонтальна и перпендикулярна направлению ветра (рис. 40).

Есть и другие системы ветродвигателей, не получившие, однако, практического осуществления и являющиеся лишь предложениями ряда изобретателей.

Применительно к изложенной классификации рассмотрим основные принципы работы сил ветра, преобразуемой ветродвигателями.

Работа поверхности при действии на нее сил ветра. Поток ветра с поперечным сечением F обладает кинетической энергией, определяемой выражением:

$$\frac{mV^2}{2}. \qquad (60)$$

Масса воздуха, протекающая через поперечное сечение F со

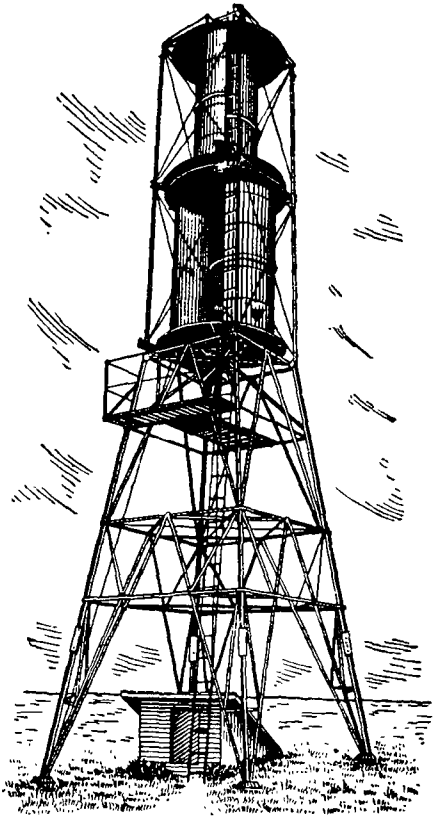


Рис. 39. Роторный ветродвигатель.

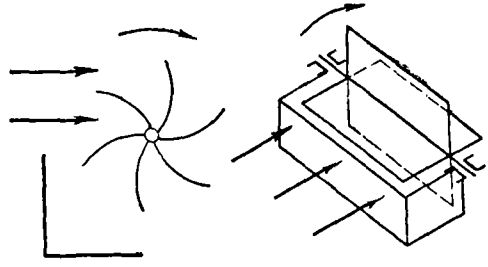


Рис. 40. Схема ветроколеса барабанного типа.

скоростью V, равна:

$$m = \rho FV. \tag{61}$$

Подставив в выражение кинетической энергии ρFV вместо m, получим:

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{\rho FV^3}{2}, \tag{62}$$

откуда следует, что энергия ветра изменяется пропорционально кубу его скорости.

Посмотрим, сколько процентов энергии ветра может превратить в полезную работу поверхность, поставленная перпендикулярно к направлению ветра и перемещающаяся в этом же направлении, что имеет место, например, у ветродвигателей карусельного типа.

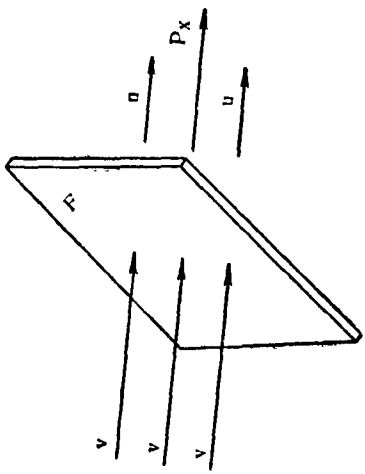


Рис. 41. Действие силы ветра на поверхность.

Секундная работа, или мощность T, определяется произведением силы P на скорость V:

$$T = PV.$$

Одну и ту же работу можно получить либо за счёт большой силы, при малой скорости перемещения рабочей поверхности, либо, наоборот, за счёт малой силы, а следовательно, и малой поверхности, но при соответственно увеличенной скорости её перемещения.

Допустим, мы имеем поверхность F, поставленную перпендикулярно к направлению ветра. Воздушный поток вследствие торможения его поверхностью получит подпор и будет обтекать её и производить давление силой P_x. Вследствие действия этой силы поверхность будет перемещаться в направлении потока с некоторой скоростью U (рис. 41); работа при этом будет равна произведению силы на скорость U, с которой перемещается

поверхность F, т. е.:

$$T = P_x U, \qquad (а)$$

где P_x — сила сопротивления, которая, согласно уравнению (41), равна:

$$P_x = C_x F \frac{\rho}{2} (V - U)^2. \qquad (б)$$

В этом случае ветер набегает на поверхность с относительной скоростью, равной:

$$W = V - U. \qquad (в)$$

Подставив значение P_x из уравнения (б) в уравнение (а), получим:

$$T = C_x F \frac{\rho}{2} (V - U)^2 U. \qquad (г)$$

Энергия ветрового потока, набегающего на эту поверхность, как было определено уравнением (62), равна:

$$\frac{F \rho V^3}{2}.$$

Определим отношение работы, развиваемой движущейся поверхностью и выраженной уравнением (г), к энергии ветрового потока, имеющего поперечное сечение, равное этой поверхности, а именно:

$$\xi = \frac{C_x F \frac{\rho}{2} (V - U)^2 U}{F \frac{\rho V^3}{2}} = C_x (V - U)^2 \frac{U}{V^3}.$$

После преобразований получим:

$$\xi = C_x \left(1 - \frac{U}{V}\right)^2 \frac{U}{V}. \qquad (63)$$

Величину ξ называют коэфициентом использования энергии ветра.

Из уравнения (63) мы видим, что ξ зависит от скорости перемещения поверхности в направлении ветра. При некотором значении скорости U коэфициент ξ получает максимальное значение, которое и определим.

Обозначив отношение $\frac{U}{V}$ через e и подставив в уравнение (63), получим:

$$\xi = C_x (1 - e)^2 e. \qquad (63а)$$

Чтобы найти e, при котором ξ будет максимальным, приравняем первую производную уравнения (63а) нулю:

$$\xi = C_x(1-e)^2 e = C_x e - 2C_x e^2 + C_x e^3.$$

$$\frac{d\xi}{de} = C_x - 4C_x e + 3C_x e^2 = 0.$$

Откуда:

$$3e^2 - 4e + 1 = 0.$$

Решая это уравнение относительно e, получим два корня: $e_1 = {}^1/_3$ и $e_2 = 1$, при $e = 1$ $\xi = 0$. Следовательно, надо принять:

$$e = \frac{U}{V} = {}^1/_3.$$

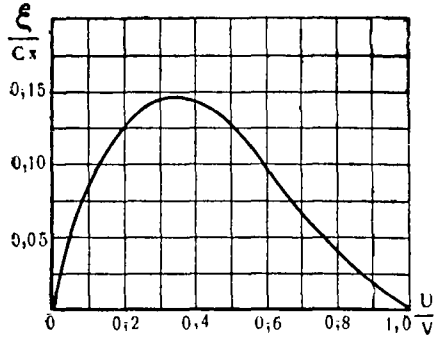


Рис. 42. Характеристика идеального коэфициента использования энергии ветра поверхностью, перемещающейся в направлении ветра.

Таким образом, чтобы получить максимальное ξ, поверхность должна перемещаться со скоростью:

$$U = {}^1/_3 V. \quad (64)$$

Такой же результат получим на основании следующих рассуждений. Если скорость перемещения поверхности равна нулю $U = 0$, то работа ветра также равна нулю. Если $U = V$, т. е. поверхность перемещается со скоростью ветра, работа также будет равна нулю, так как нет силы сопротивления, за счёт которой совершается работа. Отсюда следует, что значение скорости U заключено в пределах между $U = 0$ и $U = V$. Чтобы найти величину скорости U, при которой получается максимум ξ, будем давать различные значения отношению скорости перемещения поверхности к скорости ветра от 0 до 1 и, подставляя эти значения в уравнения (63а), найдём, при каком отношении $\frac{U}{V}$ получается этот максимум.

Перенеся подсчитанные цифры на график, получим характеристическую кривую мощности для поверхности F, работающей силой сопротивления (рис. 42).

Рассматривая кривую, видим, что максимальное значение

$$\frac{\xi}{C_x} = 0{,}148$$

получается, когда скорость перемещения поверхности составляет $^1/_3$ скорости ветра, т. е. когда

$$U = 0{,}33V,$$
$$\xi = 0{,}148\,C_x.$$

Коэфициент лобового сопротивления C_x для поверхностей, поставленных перпендикулярно потоку ветра,

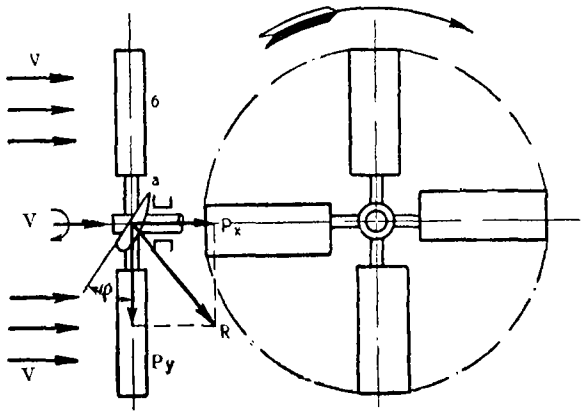


Рис. 43. Конструктивная схема крыльчатого ветроколеса.

согласно таблице 1, равен около 1,30, следовательно, можем написать:

$$\xi_{max} = 0{,}148 \cdot 1{,}30 = 0{,}192,$$

т. е. максимальный коэфициент использования энергии ветра при работе поверхности силой сопротивления не может быть больше:

$$\xi = 0{,}192.$$

Работа ветрового колеса крыльчатого ветродвигателя. Крыльчатые ветроколёса работают за счёт косого удара при движении лопастей перпендикулярно к направлению скорости ветра в противоположность к прямому удару, рассмотренному в предыдущем случае. Устройство такого колеса показано на рис. 43.

На горизонтальном валу закреплены крылья, число которых у современных ветродвигателей бывает от 2 до

24, а вообще может быть и больше 24. Крыло ветроколеса состоит из маха *а* и лопасти *б*, закрепляемой на махе так, что она образует с плоскостью вращения некоторый угол φ. Этот угол называют углом заклинения лопасти (рис. 43). При этом на её элементы набегает воздушный поток с относительной скоростью W под углом α, который называют углом атаки, и дейст-

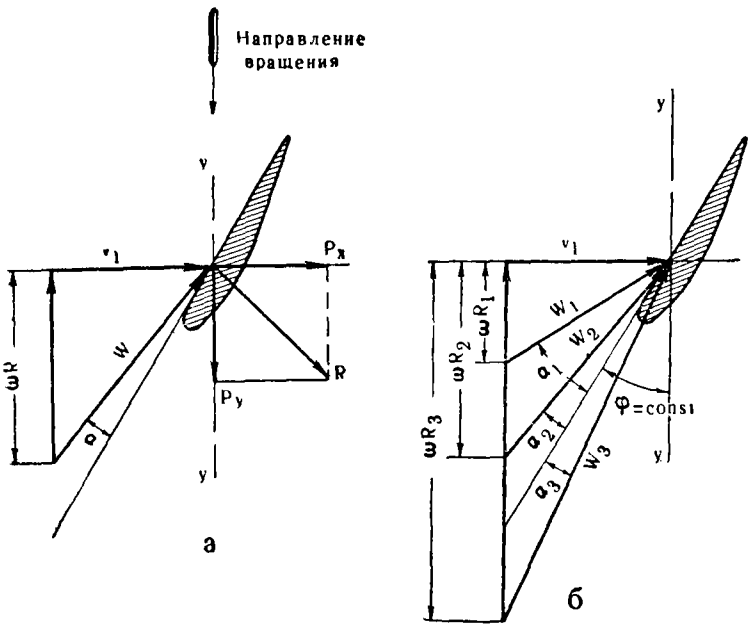


Рис. 44. *а* — схема действия сил воздушного потока на элемент лопасти; *б* — графическое изображение относительного потока, набегающего на элементы лопасти, расположенные на разных радиусах ветроколеса.

вует с силой R. Углы φ и α в значительной мере определяют эффективность крыльев. Силу R раскладывают на силы P_x и P_y (рис. 44а). Силы P_x производят давление в направлении ветра, которое называется лобовым давлением. Силы P_y действуют в плоскости y—y вращения ветроколеса и создают крутящий момент.

Максимальные силы, приводящие колесо во вращение, получаются при некотором значении угла атаки α, т. е. угла наклона относительного потока к поверхности

лопасти. Ввиду того что окружная скорость по длине крыла не одинакова, а возрастает по мере удаления его элементов от оси вращения ветроколеса, относительная скорость W набегания потока на лопасть также возрастает. Вместе с этим убывает угол атаки α, и при некоторой окружной скорости ωR, где ω угловая скорость, этот угол станет отрицательным (рис. 44,б). Следовательно, не все элементы крыла будут иметь максимальную подъёмную силу.

Если мы будем уменьшать угол φ каждого элемента лопасти по мере удаления его от оси вращения так, чтобы наивыгоднейший угол атаки α примерно сохранялся постоянным, то мы получим условие, при котором приблизительно все элементы лопасти будут работать со своей максимальной подъёмной силой. Лопасть с переменным углом заклинения φ получает форму винтовой поверхности.

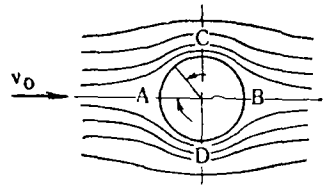


Рис. 45. Схема набегания воздушного потока на цилиндр, находящийся в покое.

Правильные углы заклинения лопасти при хорошем аэродинамическом качестве профиля, а также ширине, соответствующей заданной быстроходности, обеспечивают высокий коэфициент использования энергии ветра. Например, у хорошо выполненных моделей он достигает 46%.

О подъёмной силе вращающегося цилиндра. Кроме описанных двух принципов работы ветра при действии его на поверхность, нельзя не упомянуть о силе, возникающей на цилиндре, вращающемся в воздушном потоке. Работа ветра в этом случае может совершаться за счёт этой силы.

Если поместить цилиндр в потоке идеальной жидкости перпендикулярно его направлению, то струйка, набегающая на цилиндр, разделяется, обтекает цилиндр и снова смыкается за ним. Впереди и позади цилиндра у его поверхности получаются две критические точки A и B, в которых скорости равны нулю (рис. 45), тогда как в точках C и D скорости наибольшие и равны между собой.

Если же цилиндр, помещённый в потоке воздуха, будет вращаться около своей оси, то он будет увлекать

за собой ближайшие к стенкам цилиндра частицы жидкости, течение которых будет совпадать с направлением вращения цилиндра. Итак, мы получаем два потока: один — основной поток, обтекающий цилиндр, другой — вызываемый вращением цилиндра, аналогичный потоку вокруг вихревого шнура. Скорости этого потока убывают по мере удаления от цилиндра (см. § 8).

При вращении цилиндра по часовой стрелке и движении основного потока слева направо, вверху (рис. 46) скорости обоих потоков складываются и дают большую составляющую скорость, в то время как внизу скорости двух потоков вычитаются и дают сравнительно малую составляющую скорость.

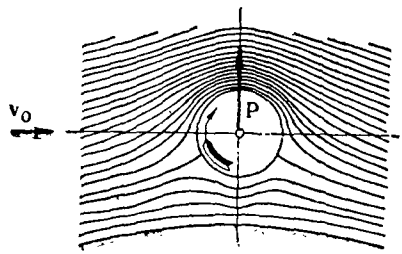


Рис. 46. Схема возникновения подъёмной силы на цилиндре, вращающемся в воздушном потоке.

Рассматривая спектр линий тока вокруг цилиндра (рис. 46), видим, что линии тока над цилиндром располагаются очень тесно; внизу, наоборот, они расположены очень редко. Применяя уравнение Бернулли для всей области течения вне пограничного слоя, получим, что над цилиндром имеет место понижение давления, а внизу повышение. Это явление вызывает силу P, действующую на цилиндр вверх, перпендикулярно потоку.

Величина этой силы, как частный случай теоремы Н. Е. Жуковского (уравнение 55), равна:

$$P = \rho \Gamma V_0 l.$$

Так как подъёмная сила пропорциональна циркуляции Γ, то она в большой степени зависит от отношения окружной скорости цилиндра U к скорости основного потока V_0, т. е. от $\frac{U}{V_0}$.

На рис. 47—48 приведены экспериментальные кривые, показывающие зависимость C_y коэфициента подъёмной силы и C_x коэфициента лобового сопротивления от отношения $\frac{U}{V}$, где U — окружная скорость вращающегося

цилиндра, V — скорость потока; C_y и C_x этих кривых вычислены по формулам:

$$C_y = \frac{P_y}{F\frac{\rho V^2}{2}} \quad \text{и} \quad C_x = \frac{P_x}{F\frac{\rho V^2}{2}},$$

где $F = dl$; d — диаметр цилиндра, l — его длина.

Продуваемые цилиндры на концах имели диски, называемые шайбами. Наличие у цилиндров шайб значительно повышало подъёмную силу.

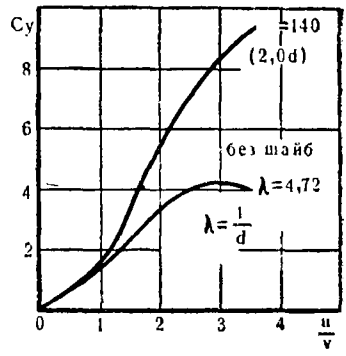


Рис. 47. Характеристика ротора $C_y = f\left(\frac{U}{V}\right)$ по продувкам.

Впервые двигатели с вращающимися цилиндрами вместо лопастей были предложены в 1925 г., однако проведённые опыты не дали положительных результатов.

Так как сила сопротивления цилиндров чрезвычайно велика по сравнению с подъёмной силой, то качество их очень низкое. Из опытов известно, что в лучшем случае качество цилиндров при некотором только одном отношении окружной скорости цилиндра к скорости воздушного потока получает максимальное значение около 7, т. е. в 3 раза меньше, чем у крыла. Но окружная скорость перемещения цилиндров в плоскости вращения ветроколеса изменяется пропорционально его радиусу, следовательно, наивыгоднейшее отношение будет только на одном некотором расстоянии сечения цилиндров от оси ветроколеса. В результ-

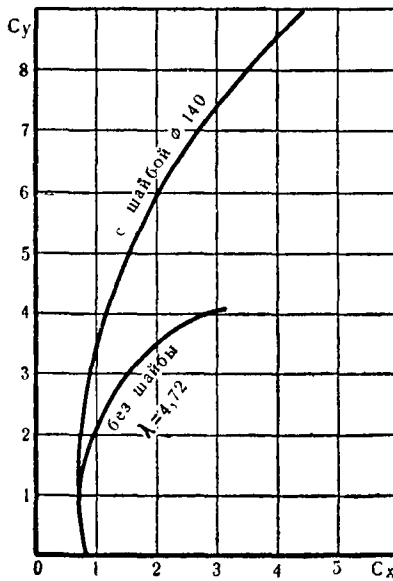


Рис. 48. Поляра ротора к рис. 47.

тате оно в целом не может дать надлежащего эффекта. Между тем конструкция ветроколеса с вращающимися цилиндрами около осей махов крайне сложна по сравнению с крыльчатым ветроколесом.

§ 15. ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Ветродвигатели карусельные и барабанные (второго и третьего классов) отличаются весьма простой схемой работы ветроколеса. У карусельных ветродвигателей воздушный поток, набегая на ветроколесо, давит на лопасти с одной стороны оси вращения, с другой же встречает либо ширму, прикрывающую лопасти, идущие против ветра, либо рёбра лопастей, если они поворотные, вследствие чего давление потока на них оказывается весьма малым. В результате получается сила в плоскости вращения, которая создаёт крутящий момент ветроколеса. Аналогичное явление имеет место и у барабанных ветродвигателей. Однако у карусельных ветряков положение ветроколёса в потоке ветра более выгодно: оно всегда находится в рабочем положении, с какой бы стороны ни дул ветер. У барабанных же ветродвигателей, равно как и у крыльчатых (первый класс), требуется специальное устройство для установки ветроколеса на ветер при каждом изменении его направления.

Основные недостатки карусельных и барабанных ветродвигателей вытекают из самого принципа расположения рабочих поверхностей ветроколеса в потоке ветра, а именно:

1. Так как рабочие лопасти колеса перемещаются в направлении воздушного потока, ветровая нагрузка действует не одновременно на все лопасти, а поочерёдно. В результате каждая лопасть испытывает прерывную нагрузку, величина которой для лопасти, идущей по направлению ветра, равна:

$$P = C_R F \frac{\rho}{2} (V - U)^2,$$

где: C_R — коэфициент силы P, действующей в направлении вращения;

U — скорость перемещения лопастей.

Лопасти противоположной стороны ветроколеса, если они прикрыты ширмой (рис. 38), испытывают сопротив-

ление движению, равное:

$$P_{сопр} = C_x F \frac{\rho U^2}{2}.$$

Если же они идут ребром к ветру:

$$P'_{сопр} = C'_x F_p \frac{\rho (V+U)^2}{2}$$

(здесь F_p — боковая поверхность сопротивления рёбер: C'_x — коэфициент силы сопротивления).

Вращающий момент ветроколеса получается как разность моментов этих сил. В результате коэфициент использования энергии ветра получается весьма низким и при самых благоприятных условиях не превышает 10%, что установлено экспериментальными исследованиями.

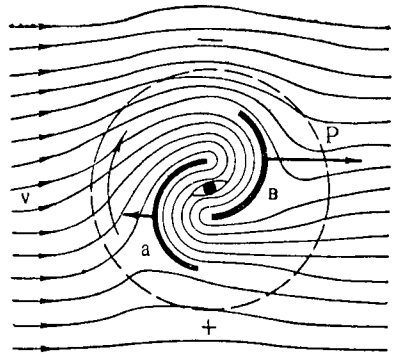


Рис. 49. Схема движения ветрового потока при обтекании ротора Савониуса.

Коэфициент использования энергии ветра карусельными ветродвигателями можно повысить путём усовершенствования поверхностей и комбинацией положения их в потоке ветра. Однако при конструктивном оформлении такой ветряк получается сложнее крыльчатого.

2. Движение поверхностей ветроколеса в направлении ветра не позволяет развить большие обороты, так как поверхности не могут двигаться быстрее ветра.

3. Размеры используемой части воздушного потока (ометаемая поверхность) малы по сравнению с размерами самого колеса, что значительно увеличивает его вес, отнесённый к единице установленной мощности ветродвигателя.

У роторных ветродвигателей системы Савониуса (рис. 39) ветроколесо также вращается в горизонтальной плоскости, но протекание потока через ометаемую поверхность происходит совершенно иначе, чем у карусельного

и барабанного ветряков. В данном случае ветроколесо создаёт меньший подпор воздушному потоку.

Поток ветра, направляясь, как показано на рис. 49, скользит по выпуклой поверхности *a* и действует полной силой на изогнутую поверхность *b*, огибает её, создавая дополнительную силу, вращающую ротор. Тех сопротивлений, которые имели место у карусельных ветряков, в данном случае нет. Поэтому и коэфициент использования энергии ветра ветряков системы Савониуса примерно в два раза выше, чем у карусельных. Продувками модели ротора Савониуса в аэродинамической трубе определён наибольший коэфициент использования энергии ветра $\xi = 18\%$.

Крыльчатые ветродвигатели, как то подтвердили и теория и практика, свободны в значительной мере от перечисленных выше недостатков карусельных и барабанных ветродвигателей.

Хорошие аэродинамические качества крыльчатых ветродвигателей, конструктивная возможность изготовлять их на большую мощность (свыше 1 000 л. с. в одном агрегате), относительно лёгкий вес на единицу мощности — вот основные преимущества ветродвигателей этого класса. Именно поэтому они получили сейчас такое широкое распространение. Заводы СССР и других стран изготавливают теперь исключительно крыльчатые ветродвигатели.

ГЛАВА IV

ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ВЕТРЯКА

Теорию идеального ветряка впервые разработал в 1914 г. В. П. Ветчинкин на основе теории идеального гребного винта. В этой работе он установил понятие коэфициента использования энергии ветра идеальным ветряком.

В 1920 г. проф. Н. Е. Жуковский изложил теорию «Ветряной мельницы НЕЖ», где сделал вывод коэфициента использования энергии ветра идеальным ветряком [7].

Аналогичные теории были разработаны позднее также в нашей стране проф. Г. Х. Сабининым и акад. Г. Ф. Проскура.

Теория идеального ветряка проф. Н. Е. Жуковского носит название классической теории; она устанавливает, что максимальный коэфициент использования энергии ветра идеальным ветряком равен 0,593.

Наиболее полно, с точки зрения практического применения, теория идеального ветряка изложена проф. Г. Х. Сабининым, согласно которой коэфициент использования энергии ветра идеальным ветряком равен 0,687.

Идеальным ветряком называют ветроколесо, у которого:

1) ось вращения параллельна скорости ветра;

2) бесконечно большое число лопастей очень малой ширины;

3) профильное сопротивление крыльев равно нулю, и циркуляция вдоль лопасти постоянна;

4) потерянная скорость воздушного потока на ветроколесе постоянна по всей ометаемой поверхности ветряка;

5)угловая скорость стремится к бесконечности.

§ 16. КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ВЕТРЯКА

Представим равномерный поток ветра, набегающий на идеальное ветроколесо со скоростью V в сечении AA' (рис. 50). В сечении BB' на ветроколесе скорость будет $V_1=V-v_1$, а на некотором расстоянии позади ветряка в сечении CC' скорость будет $V_2=V-v_2$.

При этом вращающееся ветроколесо создаст подпор, вследствие чего скорость потока, по мере приближения к ветряку и некоторое время за ветряком, падает, как

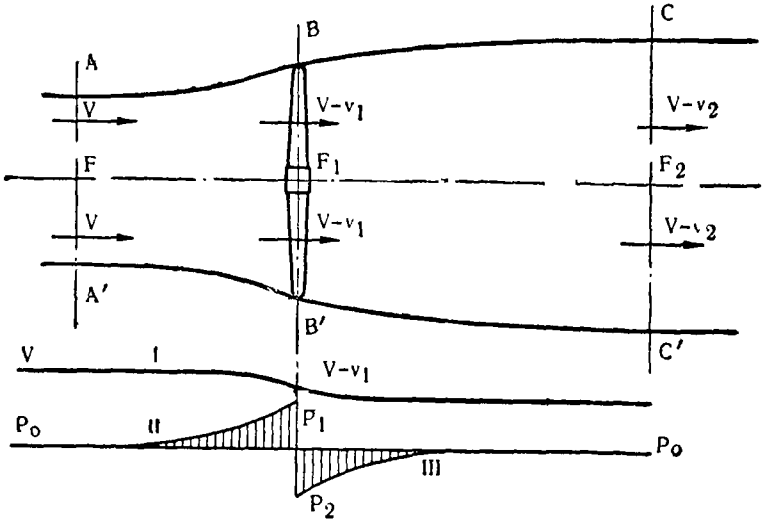


Рис. 50. Характеристика воздушного потока, протекающего через ветроколесо.

показано кривой I на рис. 50. Вместе с этим давление воздуха p, по мере приближения к ветряку, повышается (кривая II), и при прохождении через ометаемую поверхность оно резко падает. За ветряком образуется некоторое разрежение p_0-p_2, которое, по мере удаления от ветряка, ассимтотически приближается к нулю, т. е. восстанавливается нормальное давление (кривая III).

Потерю скорости за идеальным ветряком можно установить при помощи уравнения Бернулли:

$$p_2+\frac{\rho V_2^2}{2}=p_0+\frac{\rho V^2}{2}.$$

Так как $p_2<p_0$, то $V>V_2$.

Кинетическая энергия ветра перед ветряком равна $\frac{mV^2}{2}$, а за ветряком $\frac{m(V-v_2)^2}{2}$. Разность этих энергий затрачена на ветроколесе и, в случае отсутствия потерь, может быть получена как полезная работа:

$$T_1 = \frac{mV^2}{2} - \frac{m(V-v_2)^2}{2}. \qquad (а)$$

Преобразовав правую часть уравнения (а), получим:

$$\frac{m}{2}[V^2-(V-v_2)^2] = \frac{m}{2}(2Vv_2 - v_2^2) = mv_2\left(V - \frac{v_2}{2}\right).$$

Следовательно:

$$T_1 = mv_2\left(V - \frac{v_2}{2}\right). \qquad (б)$$

Энергию T_1, воспринятую ветроколесом, можно выразить как произведение из силы давления ветра P на скорость в плоскости ветряка $(V-v_1)$, т. е.:

$$T_1 = P(V-v_1). \qquad (в)$$

Лобовое давление P равно приращению количества движения струи, проходящей через ометаемую поверхность, т. е.:

$$P = mv_2.$$

Подставляя значение P в уравнение (в), получим

$$T_1 = mv_2(V-v_1). \qquad (г)$$

Сравнивая уравнения (б) и (г) находим, что:

$$mv_2\left(V - \frac{v_2}{2}\right) = mv_2(V-v_1).$$

откуда:

$$v_1 = \frac{v_2}{2}$$

или:

$$v_2 = 2v_1. \qquad (65)$$

Равенство (65) показывают, что потеря скорости воздушного потока происходит не только в сечении ветроколеса, но также и на некотором расстоянии за ветряком, причём полная потеря скорости в два раза больше потери на ветроколесе.

Через ометаемую поверхность F ветроколеса протекает масса воздуха m, количество которой за 1 секунду будет

равно:

$$m = \rho F V. \tag{61}$$

Подставляя значение массы воздуха в выражение кинетической энергии ветра перед ветроколесом, получим:

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{\rho F V V^2}{2} = \frac{\rho F V^3}{2},$$

что совпадает с уравнением (62) в § 14.

Взяв отношение секундной работы, воспринятой идеальным ветроколесом:

$$T_1 = P(V - v_1)$$

к той энергии ветра, которая протекала бы через сечение, равное ометаемой поверхности ветряка:

$$\frac{\rho F V^3}{2},$$

получим идеальный коэфициент использования энергии ветра ξ_i

$$\xi_i = \frac{P(V - v_1)}{F\frac{\rho V^3}{2}}. \tag{66}$$

Преобразуем это уравнение:

$$\frac{P(V - v_1)}{F\frac{\rho V^3}{2}} = 2\frac{P}{F\rho V^2} \cdot \frac{V - v_1}{V}.$$

Выражение $\frac{2P}{F\rho V^2}$ называют коэфициентом нагрузки на ометаемую площадь, или коэфициентом лобового давления, и обозначают буквой B, т. е.:

$$B = \frac{2P}{F\rho V^2}. \tag{67}$$

Подставив в это уравнение $P = \rho F(V - v_1)v_2 = \rho F(V - v_1)2v_1$ и обозначив $\frac{v_1}{V} = e$, после сокращений получим:

$$B = \frac{2\rho F(V - v_1)2v_1}{\rho F V^2} = \frac{4(V - v_1)v_1}{V^2} = 4e(1 - e). \tag{68}$$

Поступая так же с уравнением (66), для ξ_i получим:

$$\xi_i = \frac{F\rho(V - v_1)^2 2v_1}{F\frac{\rho V^3}{2}} = \frac{4(V - v_1)^2 v_1}{V^3} = \frac{4(V - v_1)}{V} \cdot \frac{(V - v_1)}{V} \frac{v_1}{V} =$$

$$= 4e(1 - e)^2. \tag{69}$$

Отношение $\frac{v_1}{V}=e$ называют коэфициентом торможения.

Определим значение e, при котором ξ_i будет иметь максимальную величину. Для этого возьмём первую производную и приравняем её нулю, т. е.:

$$\frac{d\xi_i}{de}=\frac{d}{de}[4e(1-e)^2]=\frac{d}{de}(4e-8e^2+4e^3)=0,$$

или:

$$\frac{d\xi_i}{de}=4-16e+12e^2=0,$$

откуда:

$$3e^2-4e+1=0.$$

Решая это равенство, находим, что ξ принимает максимальное значение, когда $e=\frac{1}{3}$, при этом

$$\xi_i=4\cdot\frac{1}{3}\left(1-\frac{1}{3}\right)^2=\frac{16}{27}=0{,}593.$$

Из уравнения (66) находим B коэфициент нагрузки на ометаемую площадь при максимальном ξ_i:

$$B=4\left(1-\frac{1}{3}\right)\frac{1}{3}=\frac{8}{9}=0{,}888.$$

Таким образом, из классической теории идеального ветряка вытекают следующие основные положения.

1. Максимальный коэфициент использования энергии ветра идеального ветроколеса равен $\xi_i=0{,}593$.

2. Потеря скорости в плоскости ветроколеса равна одной трети скорости ветра:

$$v_1=\frac{1}{3}V.$$

3. Полная потеря скорости ветра за ветроколесом в два раза больше потери скорости в плоскости ветроколеса:

$$v_2=\frac{2}{3}V.$$

Таким образом, скорость ветра за ветроколесом в три раза меньше скорости ветра перед ветроколесом.

4. Коэфициент нагрузки на ометаемую поверхность ветроколеса равен $B=0{,}888$.

Задаваясь коэфициентом торможения $e = \frac{v_1}{V}$ в пределах от 0 до 1 и подсчитывая с помощью уравнений (66) и (68), получим следующие значения коэфициентов ξ_i и B:

$e = \frac{v_1}{V}$	0,1	0,2	0,333	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ξ_i	0,324	0,512	0,593	0,576	0,500	0,384	0,252	0,128	0,036	0
B	0,360	0,640	0,888	0,960	1,000	0,960	0,840	0,640	0,360	0

§ 17. ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ВЕТРЯКА ПРОФ. Г. Х. САБИНИНА

Отличие этой теории от прежних теорий заключается в том, что при определении осевой силы давления потока на ветроколесо импульс сил подсчитывается по вихревому соленоиду в том месте, где он принял уже установившуюся цилиндрическую форму, а не в момент его образования, как принималось прежними теориями. Так как соленоид в цилиндрической части имеет площадь сечения бо́льшую, чем площадь, ометаемая ветроколесом, то осевая сила и коэфициент использования энергии ветра, по теории Г. Х. Сабинина, получаются несколько большими.

Как следствие принятых условий для определения идеального ветряка (§ 16) получаем следующее: осевые скорости постоянны по всему сечению струи, что вытекает из вихревой теории гребного винта Н. Е. Жуковского: циркуляция по любому замкнутому контуру внутри уходящей струи равна нулю, и, следовательно, поток не завихрен и тангенциальные скорости равны нулю. Циркуляция в плоскости вращения ветряка равна нулю, и есть только скачок давления. Концевые потери также равны нулю, так как они обратно пропорциональны числу лопастей и угловой скорости вращения.

Пусть равномерный поток, обладающий скоростью V, набегает на ветряк, как было показано на рис. 50. Проведём через окружность, описываемую концами лопастей, линии тока, образующие бутылеобразную поверхность AA′BB′CC′, которую назовём «ограничивающей поверхностью».

По мере удаления от ветряка, ограничивающая поверхность постепенно переходит в цилиндрическую поверхность. Часть потока, заключённая внутри ограничивающей поверхности, называется рабочим потоком. Ограничивающая поверхность $BB'CC'$, лежащая позади ветряка, представляет собой поверхность раздела, образованную бесконечно тонким вихревым слоем, состоящим из ряда вихревых шнуров бесконечно малой интенсивности, сходящих с концов лопастей и навитых в виде спирали с бесконечно малым шагом на поверхность раздела (рис. 51). Таким образом, поверхность раздела будет представлять собой вихревой соленоид. Вихревой слой соленоида можно себе схематически представить состоящим из ряда вихревых шнуров, диаметр которых равен толщине вихревого слоя. Окружная скорость наружных частиц такого вихря близка к скорости прилегающего к нему незавихренного слоя. Скорости к центру вихря убывают, ибо мы можем представить, что вихрь вращается, как твёрдое тело.

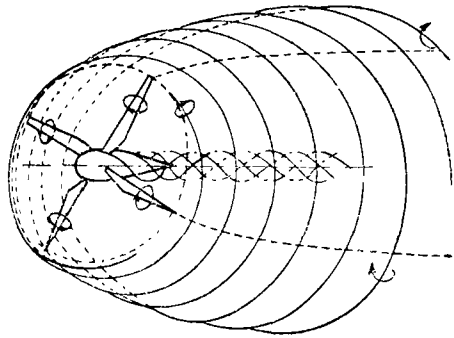


Рис. 51. Образование вихревого соленоида за ветроколесом.

Такой бесконечно тонкий вихревой слой не требует на своё образование энергии, так как его живая сила бесконечно мала вследствие бесконечно малой массы слоя, в то время как максимальные его скорости конечны.

Предполагая, что вихревой соленоид при достаточном удалении от ветряка принимает цилиндрическую форму и в таком виде уходит в бесконечность, получаем, что струи как внутри соленоида, так и вне его идут параллельно и давления во всех точках потока, достаточно удалённых от ветряка, постоянны.

Деформация потока, производимая идеальным ветряком, будет сводиться к наложению скоростей, вызываемых вихревым соленоидом на равномерный поток, причём

скорости, вызванные соленоидом, будут направлены в обратную сторону по отношению к скорости потока.

Приращение количества движения жидкости, производимое ветряком, будет равно количеству движения, вызываемого вновь образуемой цилиндрической частью соленоида.

На рис. 52 приведена схема прохождения воздушного потока через ветроколесо. В сечении $A—A'$, бесконечно далеко перед ветряком, поток имеет скорость V и поверх-

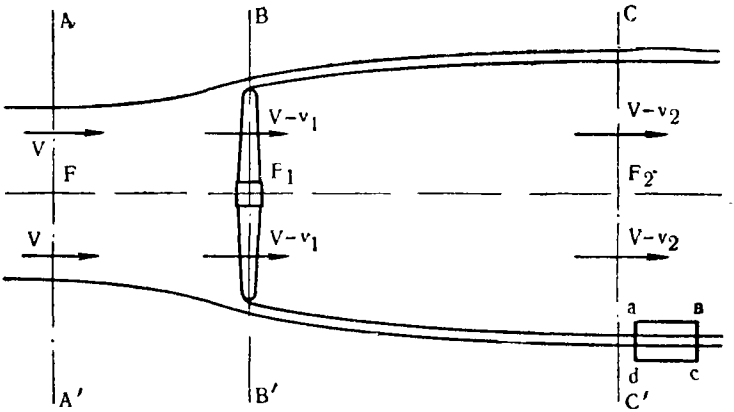


Рис. 52. Схема прохождения воздушного потока через ветроколесо.

ность F. В сечении $B—B'$, в плоскости ветроколеса, осевая скорость потока равна $V—v_1$, где v_1 — скорость, вызываемая вихревым соленоидом на его конце; омётаемая поверхность — F_1.

В сечении $C—C'$, бесконечно далеко за ветряком, скорость в цилиндрической части соленоида составляет $V—v_2$, где v_2 — скорость, вызываемая соленоидом, в достаточном удалении от ветряка. Скорость потока вне цилиндрической части соленоида будет V, так как соленоид во внешнем потоке не вызывает никаких скоростей.

Скорость движения самого бесконечно длинного вихревого соленоида относительно потока проф. Г. Х. Сабинин принимает равной половине скорости, вызванной соленоидом внутри его, именно равной $\frac{v_2}{2}$. Так как соленоид уносится потоком со скоростью V, то, следовательно,

абсолютная его скорость будет $-V-\frac{v_2}{2}$; это будет скорость образования вихревого соленоида.

Определим циркуляцию скорости вихревого соленоида на единицу его длины, для чего опишем прямоугольный контур *abcd* так, чтобы его стороны *ab* и *cd* были параллельны оси струи, а стороны *bc* и *da* перпендикулярны к ней (рис. 52). Обходя контур по направлению часовой стрелки, имеем: циркуляция по стороне *ab*, согласно уравнению (19), будет $\overline{ab}\ (V-v_2)$, так как скорость $V-v_2$ параллельна *ab*. Циркуляция по *cd* будет $\overline{cd}V$; циркуляция по сторонам *bc* и *da* равна нулю, так как эти стороны перпендикулярны к скоростям V и $V-v_2$; циркуляция же в том месте, где эти стороны пересекают вихревой соленоид, также равна нулю, так как вихревой слой бесконечно тонок, а окружная скорость вращения частиц вихревого слоя конечна. Циркуляция по всему контуру будет:

$$\overline{ab}\,(V-v_2)-\overline{cd}V,$$

так как $\overline{ab}=\overline{cd}$,

то циркуляция по контуру *abcd* равна:

$$-\overline{ab}\cdot v_2.$$

Циркуляция на единицу длины соленоида:

$$\Gamma=-\frac{\overline{ab}v_2}{\overline{ab}}=-v_2. \qquad \text{(а)}$$

Подсчитаем импульс силы, потребной для образования вихревого соленоида, для чего воспользуемся следующей теоремой. Импульс силы $P\Delta t$, необходимый для образования вихревого кольца, равен площади вихревого кольца F, умноженной на циркуляцию скорости Γ вокруг вихря и умноженной на плотность жидкости ρ:

$$P\Delta t=\rho F\Gamma. \qquad \text{(б)}$$

Здесь импульс силы направлен по нормали к плоскости вихревого кольца.

Если разбить соленоид на элементарные кольца с протяжением по оси соленоида dz, то на единицу длины соленоида придётся $\frac{1}{dz}$ вихревых колец.

Импульс силы для образования одного вихревого кольца соленоида составляет:

$$\rho F_2 d\Gamma, \qquad (в)$$

где $d\Gamma$ — циркуляция скорости одного кольца;

F_2 — площадь сечения цилиндрической части соленоида.

Так как за время dt длина соленоида увеличивается на величину

$$\left(V - \frac{v_2}{2}\right) dt,$$

то за этот промежуток времени образуется число колец:

$$\left(V - \frac{v_2}{2}\right)\frac{dt}{dz}. \qquad (г)$$

Импульс силы на ветряк за время dt будет численно равен сумме импульсов, необходимых для образования вихревых колец, появившихся в то же время. Эта сумма на основании уравнений (в) и (г) составит:

$$P dt = \rho F_2 d\Gamma \left(V - \frac{v_2}{2}\right)\frac{dt}{dz}. \qquad (д)$$

Перепишем это уравнение в таком виде:

$$P dt = \rho F_2 \frac{d\Gamma}{dz}\left(V - \frac{v_2}{2}\right) dt, \qquad (е)$$

но $\frac{d\Gamma}{dz} = \Gamma$ — циркуляция скорости на единицу длины соленоида, которая, согласно уравнению (а), равна $-v^2$. Поэтому, сокращая уравнение (е) на dt и подставляя в него вместо Γ его значение $-v_2$, получим:

$$P = -\rho F_2 v_2\left(V - \frac{v_2}{2}\right).$$

Преобразуем это уравнение, представив его в виде двух слагаемых:

$$-P = [\rho F_2 (V - v_2)]\, v_2 + \rho F_2 \frac{v_2^2}{2}. \qquad (70)$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках первого члена правой части уравнения, есть масса воздуха, проходящая через ометаемую площадь в единицу времени, а весь первый член, т. е. $[\rho F_2 (V - v_2) v_2$, есть приращение количества движения этой массы, которую обозначим

через m_1. Второй член по своей размерности есть то же приращение количества движения в единицу времени. Он не может быть разбит на два множителя так, чтобы одному множителю соответствовала определённая масса жидкости, а другому некоторая скорость, одинаковая для всех частиц этой массы, так как нам пока неизвестен тот процесс, в котором происходит образование количества движения, имеющего выражение $\rho F_2 \frac{v_2^2}{2}$.

Для удобства дальнейших рассуждений умножим и разделим это выражение, т. е. второй член равенства (70), на v_2:

$$-P = [\rho F_2 (V - v_2)] v_2 + \left[\frac{\rho F_2 \cdot \frac{v_2^2}{2}}{v_2}\right] v_2. \qquad (70а)$$

Дробь, стоящая в квадратных скобках, не может быть сокращена на v_2, так как числитель этой дроби по своей физической сущности представляет интеграл:

$$\rho F_2 \frac{v_2^2}{2} = \int dm v_1,$$

где закон образования функции m и v нам не известен.

Выражение $\frac{\rho F_2 \frac{v_2^2}{2}}{v_2}$ называется присоединённой массой и обозначается через m_2. Заметим, что

$$\rho F_2 (V - v_2) = m_1.$$

После чего уравнение (70а) можно переписать так:

$$-P = (m_1 + m_2) v_2. \qquad (71)$$

Сумма $(m_1 + m_2)$ называется увлечённой массой, а скорость v_2 называется скоростью влечения. Таким образом, уравнение (71) можно формулировать так: лобовое давление, производимое потоком на ветряк, будет равно произведению увлечённой массы на скорость влечения, с обратным знаком. Схема образования присоединённой массы m_2 показана на рис. 53. Частицы воздушного потока, лежавшие в начальный момент в плоскости вращения ветряка

AA и расположенные вне влияния ветряка, за некоторый промежуток времени Δt передвинутся на расстояние $V\Delta t$ и займут положение $A'A'$. Частицы воздуха, лежащие в начальный момент внутри ометаемой площади и представляющие начало струи, прошедшей через ветряк, за время Δt пройдут расстояние $(V-v_2)\Delta t$ и займут положение CC. Вихревой же соленоид в эту минуту будет простираться от ветряка до сечения $вв$, имея длину $\left(V-\frac{v_2}{2}\right)\Delta t$.

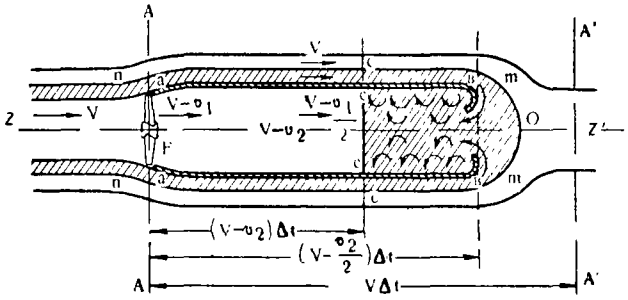


Рис. 53. Образование присоединённой массы.

Таким образом, длина соленоида, образовавшегося за время Δt, будет на $\frac{v_2}{2}\Delta t$ больше длины колонны жидкости, прошедшей через ветряк. Часть соленоида cc — $вв$ будет заполнена воздухом, засосанным соленоидом с конца $вв$. Эта масса воздуха и будет присоединённой массой.

Действительно, приращение количества движения массы за время Δt мы можем выразить так:

$$\rho F_2 \frac{v_2}{2}\Delta t v_2.$$

Отнеся к единице времени, получим:

$$\left[\rho F_2 \frac{v_2}{2}\right] v_2,$$

где выражение в квадратных скобках есть масса воздуха, заключённая в отрезе соленоида cc, $вв$ и v_2 — приращение скорости этой массы, или скорость влечения.

Слой жидкости с кольцеобразным сечением, заключённый между поверхностями $оттсспп$ и $аа$ $вв$, заштрихованный косыми линиями и образующий как бы стенки

бутыли, идёт на образование присоединённой массы. В действительности явление происходит не так просто: соленоид при своём движении будет распадаться на отдельные вихревые кольца, которые постепенно будут гаснуть, но количество движения, вызванное ими, будет сохраняться.

Напишем баланс энергии воздуха, протекающего через ветроколесо за одну секунду. Энергия, подводимая потоком, равна:

$$(m_1 + m_2)\frac{V^2}{2}.$$

Энергия воспринятая ветряком:

$$P(V - v_1).$$

Энергия, уносимая потоком в виде живой силы:

$$(m_1 + m_2)\frac{(V - v_2)^2}{2}.$$

Потери, связанные с образованием присоединённой массы, подсчитанные по скорости влечения [32]:

$$m_2\frac{v_2^2}{2}.$$

Уравнение баланса энергий получает следующий вид:

$$(m_1 + m_2)\frac{V_2}{2} = P(V - v_1) + (m_1 + m_2)\frac{(V - v_2)^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}. \quad \text{(а)}$$

Подставив в уравнение (а) значение $P=(m_1 + m_2)v_2$ и разделив на $(m_1 + m_2)$, получим:

$$V^2 = 2(V - v_1)v_2 + (V - v_2)^2 + \frac{m_2 v_2^2}{m_1 + m_2}. \quad \text{(б)}$$

Исключим из уравнения (б) m_1 и m_2, подставив их значения:

$$m_1 = \rho F_2 (V - v_2) \text{ и } m_2 = \rho F_2 \frac{v_2}{2},$$

$$V^2 = 2(V - v_1)v_2 + (V - v_2)^2 + \frac{\rho F_2 v_2 \cdot v_2^2}{2\left[\rho F_2\left(V - v_2 + \frac{v_2}{2}\right)\right]},$$

или:

$$V^2 = 2(V - v_1)v_2 + (V - v_2)^2 + \frac{v_2 \cdot v_2^2}{2V - v_2}. \quad \text{(в)}$$

Решая уравнение (в) относительно v_2, найдём:

$$v_2 = \frac{2v_1}{1 + \frac{v_1}{V}}. \tag{72}$$

Это первая скоростная зависимость, отличающаяся от аналогичной в классической теории.

Напишем уравнение расхода, предполагая, что на ветряк, стоящий на одном месте, набегает поток со скоростью V (рис. 50):

$$FV = F_1(V - v_1) = F_2(V - v_2),$$

откуда:

$$\frac{F}{F_1} = 1 - \frac{v_1}{V}$$

и

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{V - v_1}{V - v_2} = \frac{1 - \frac{v_1}{V}}{1 - \frac{v_2}{V}}.$$

Подставляя сюда из уравнения (72) значение $\frac{v_2}{V}$, получим:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{1 - \frac{v_1}{V}}{1 - \frac{2\frac{v_1}{V}}{1 + \frac{v_1}{V}}} = \frac{\left(1 - \frac{v_1}{V}\right)\left(1 + \frac{v_1}{V}\right)}{1 + \frac{v_1}{V} - 2\frac{v_1}{V}},$$

или, по сокращении:

$$\frac{F_2}{F_1} = 1 + \frac{v_1}{V}. \tag{73}$$

Складывая выражения (а) и (б), получим:

$$F_1 = \frac{F + F_2}{2}, \tag{74}$$

т. е. ометаемая площадь есть средняя арифметическая из площадей рабочей струи перед и позади ветряка.

Определение величины увлечённой массы $(m_1 + m_2)$ даётся теоремой: увлечённая ветряком или решёткой масса жидкости не зависит от режима ветряка и проницаемости решётки и равна объёму, описываемому в потоке ометаемой площадью, умноженному на плотность жидкости.

Воспользуемся уравнением (71), деля его обе части на v_2, и заменим m_1 и m_2 их значением:

$$m_1 + m_2 = \frac{P}{v_2} = [\rho F_2 (V - v_2)] + \left[\rho F_2 \frac{v_2}{2}\right] = \rho F_2 \left(V - \frac{v_2}{2}\right).$$

Подставляя сюда значение v_2 из уравнения (72) и F_2 из уравнения (73), получим:

$$m_1 + m_2 = \rho F_1 \left(1 + \frac{v_1}{V}\right)\left(V - \frac{v_1}{1 + \frac{v_1}{V}}\right) =$$

$$= \rho F_1 \frac{\left(1 + \frac{v_1}{V}\right)(V + v_1 - v_1)}{1 + \frac{v_1}{V}};$$

по сокращении получаем:

$$m_1 + m_2 = \rho F_1 V = \text{Const.} \tag{75}$$

Лобовое давление на ветряк получаем из уравнения (71), подставив в него значение $m_1 + m_2$ из уравнения (75):

$$P = (m_1 + m_2)\, v_2 = \rho F_1 V v_2. \tag{76}$$

Нагрузка на ометаемую площадь:

$$B' = \frac{P}{F_1 \rho \frac{V^2}{2}} = \frac{\rho F_1 V v_2}{F_1 \rho \frac{V^2}{2}}, \tag{77}$$

или:

$$B' = 2\frac{v_2}{V}.$$

Подставляя сюда v_2 из уравнения (72), получаем:

$$B' = \frac{4\frac{v_1}{V}}{1 + \frac{v_1}{V}},$$

где

$$\frac{v_1}{V} = e,$$

следовательно:

$$B' = 4\frac{e}{1 + e}. \tag{77а}$$

Принимая во внимание уравнение (77), получим лобовое давление P равным:

$$P = \rho \frac{V^2}{2} F_1 B' = \rho \frac{V^2}{2} \cdot F_1 \frac{4e}{1 + e}. \tag{78}$$

Мощность на валу ветряка, согласно уравнению (в § 16), равна:

$$T = P(V - v_1).$$

Подставив сюда значение P из равенства (78), получим:

$$T = \rho F_1 \frac{V^3}{2} \cdot 4e \frac{1-e}{1+e}.$$

Коэфициент использования энергии ветра равен:

$$\xi = \frac{T}{F_1 \rho \frac{V^3}{2}} = \frac{F_1 \rho \frac{V^3}{2} \cdot 4e \frac{1-e}{1+e}}{F_1 \rho \frac{V^3}{2}};$$

по сокращении

$$\xi = 4e \frac{1-e}{1+e}, \tag{79}$$

или

$$\xi = B'(1-e). \tag{79а}$$

Приравняв нулю первую производную выражения (79), получим:

$$\frac{d\xi}{de} = \frac{d}{de}\left[4e \frac{1-e}{1+e}\right] = 4 \frac{(1-2e)(1+e) - (e-e^2)(+1)}{(1+e)^2} = 0,$$

откуда:

$$e = -1 + \sqrt{2} = 0{,}414,$$

т. е. максимум ξ получается, когда

$$e = \frac{v_1}{V} = 0{,}414,$$

а не 0,333, как это было получено в классической теории.

Подставляя значение e в уравнение (79), получим:

$$\xi_{max} = 4 \cdot 0{,}414 \frac{1 - 0{,}414}{1 + 0{,}414} = 0{,}687. \tag{80}$$

При этом нагрузка на ометаемую поверхность составляет:

$$B'_{max} = 4 \frac{0{,}414}{1 + 0{,}414} = 1{,}172. \tag{81}$$

В таблице 5 приведены для сравнения характерные величины идеального ветроколеса, полученные по классической теории Н. Е. Жуковского и по теории Г. Х. Сабинина.

Таблица 5

	Полная потерянная скорость ветра за ветроколесом	Коэффициент нагрузки на ометаемую площадь B^1	Коэффициент торможения воздушного потока $\frac{v_1}{V}$ при ξ_{max}	Нагрузка B при ξ_{max}	Максимальный коэффициент использования энергии ветра ξ_{max}
Классическая теория . . .	$v_2=2v_1$	$4\frac{v_1}{V}\left(1+\frac{v_1}{V}\right)$	0,333	0,888	0,593
Теория Г. Х. Сабинина	$v_2=\frac{2v_1}{1+\frac{v_1}{V}}$	$\frac{4\frac{v_1}{V}}{1+\frac{v_1}{V}}$	0,414	1,172	0,687

Для сравнения обеих теорий на рис. 54 показана зависимость ξ в функции $\frac{v_1}{V}$.

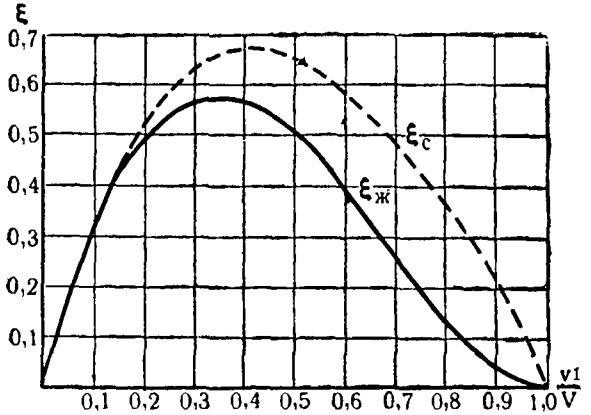


Рис. 54. Изменение коэфициента использования энергии ветра в зависимости от $\frac{v_1}{V}$.

В заключение приведём основные положения классической теории и теории проф. Г. Х. Сабинина.

1. По классической теории потеря скорости ветра за ветряком равна удвоенной потере скорости ветра в

плоскости ветряка, т. е.

$$v_2 = 2v_1.$$

По теории Г. Х. Сабинина, это же уменьшение скорости ветра за ветряком выражается соотношением:

$$v_2 = \frac{2v_1}{1 + \frac{v_1}{V}}.$$

2. Осевое давление по классической теории:

$$P = m_1 v_2,$$

где

$$m_1 = F_1 \rho (V - v_1).$$

По теории проф. Сабинина, кроме массы воздуха, протекающей через ометаемую поверхность ветроколеса, принимается во внимание масса воздуха m_2, засосанная внутрь вихревого соленоида из окружающего его потока. Осевое давление равно:

$$P = (m_1 + m_2) v_2;$$

при этом увлечённая ветряком масса равна:

$$m_1 + m_2 = F_1 \rho V = \text{Const}.$$

Практически нельзя построить ветряк с бесконечно большим числом лопастей, делающим бесконечно большое число оборотов и работающим без потерь, как это было сказано в определении идеального ветряка. В действительности нам приходится иметь дело с реальным ветряком, который имеет конечное число лопастей (от 1 до 24), делает конечное число оборотов и работает с потерями.

ГЛАВА V

ТЕОРИЯ РЕАЛЬНОГО ВЕТРЯКА ПРОФ. Г. Х. САБИНИНА

§ 18. РАБОТА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОКОЛЕСА. ПЕРВОЕ УРАВНЕНИЕ СВЯЗИ

Выделим из лопастей ветроколеса двумя концентрическими окружностями с радиусами r и $r+dr$ кольцевую поверхность $dF = 2\pi r dr$. Это кольцо на крыльях вырежет отрезки длиною dr, которые называются элементарными лопастями (рис. 55). Через все точки обеих окружностей проведём линии тока, образующие две поверхности ABC, $A'B'C'$ бутылеобразной формы (рис. 56). Жидкость, заключённую между этими поверхностями, назовём элементарной кольцевой струёй.

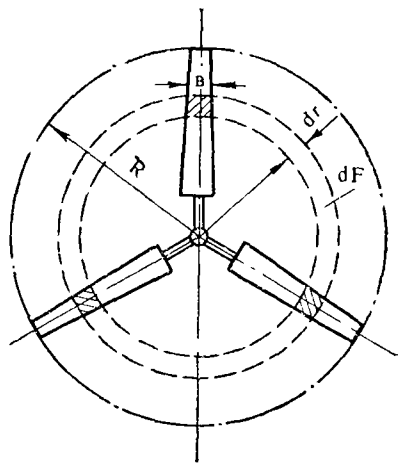


Рис. 55. Выделение элементарных лопастей на ветроколесе.

Сделаем предположение, обычно принимаемое в аналогичных теориях, что разность давлений по обе стороны ветрового колеса, действующая на площадь кольца, получающегося от пересечения ометаемой плоскостью элементарной струи, воспринимается элементарными лопастями.

На основании этого составляем первое уравнение связи:

$$2\pi r dr\,(p_1 - p_2) = i\,(dY \cdot \cos\beta + dX \sin\beta), \qquad (82)$$

где: Y — подъёмная сила крыла, направленная перпендикулярно потоку;

X — сила сопротивления крыла (лобовое сопротивление крыла), направленная по потоку.

β — угол между плоскостью вращения ветроколеса и направлением воздушного потока, набегающего на крыло;

i — число лопастей ветроколеса.

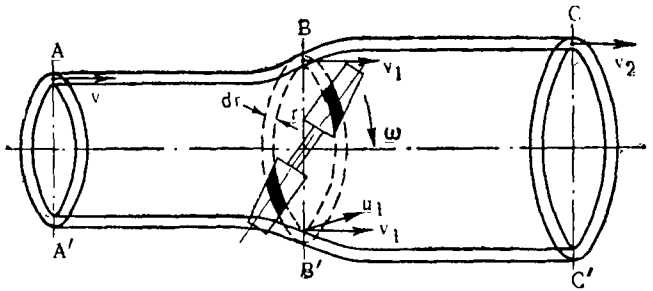


Рис. 56. Элементарная кольцевая струя.

Для определения направления сил, действующих на элементарную лопасть, изобразим её сечение на рисунке 57, где ось Z направлена по оси ветроколеса и ось $x - x$ в плоскости его вращения; V — направление скорости ветра; W — направление скорости относительного потока, набегающего на элемент лопасти.

Разложим силу dR, действующую на элементарную лопасть, на две силы: dX, действующую по потоку, и dY, направленную перпендикулярно потоку. Сила dX вызывает сопротивление элемента крыла; dY вызывает окружное усилие элемента крыла и называется подъёмной силой.

Вследствие вращения ветроколеса в плоскости $x—x$ воздушный поток набегает на ветроколесо не со скоростью ветра V, а с относительной скоростью W, которая слагается геометрически из скорости ветра V и окружной скорости ωr, где ω угловая скорость и r — расстояние элемента лопасти от оси вращения ветроколеса.

Скорость потока, набегающего на элемент лопасти, в относительном движении будет равна:

$$W = \sqrt{V_1^2 + (-\omega r - u_1)^2}, \qquad (83)$$

где $V_1 = V - v_1$ — скорость ветра в плоскости ветряка.

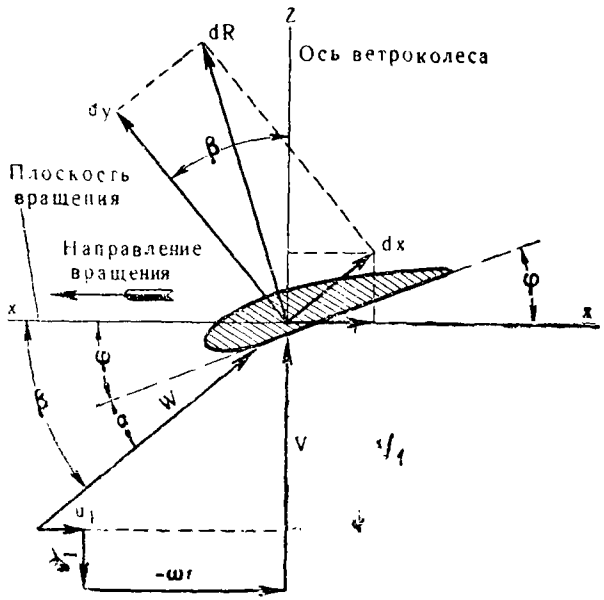


Рис. 57. План скоростей воздушного потока при набегании его на элемент лопасти.

Скорость u_1 получается как реакция от крутящего момента, развиваемого лопастями. Эта скорость имеет направление, обратное моменту; её величина берётся как средняя для всей зоны, в которой работают лопасти. В действительности эта скорость перед ветроколесом равна нулю и непосредственно за ветряком равна u_2. Так как закон изменения этой скорости неизвестен, то, как первое приближение, её принимают равной:

$$u_1 = \frac{u_2}{2}. \qquad (84)$$

Силы dY и dX, согласно уравнению (39) § 10, можно выразить так:

$$dY = C_y b dr \frac{\rho}{2} W^2, \tag{85}$$

$$dX = C_x b dr \frac{\rho}{2} W^2, \tag{86}$$

где b— ширина элемента лопасти по хорде.

Кроме того, на основании уравнения (76) можем написать:

$$p_1 - p_2 = \frac{P}{F_1} = \rho V v_2. \tag{87}$$

Подставляя вместо dY, dX и $p_1 - p_2$ их значения в уравнение (82), получим:

$$2\pi r dr \rho V v_2 = i \left(b dr C_y \frac{\rho}{2} W^2 \cos\beta + b dr C_x \frac{\rho}{2} W^2 \sin\beta \right); \tag{88}$$

после сокращения получим:

$$2\pi r V v_2 = ibC_y \frac{W^2}{2} \cos\beta \left(1 + \frac{C_x}{C_y} \operatorname{tg}\beta\right), \tag{88а}$$

или

$$4\pi r V v_2 = ibC_y W^2 \cos\beta \left(1 + \frac{C_x}{C_y} \operatorname{tg}\beta\right).$$

На основании рис. 57 можно ввести обозначение

$$\operatorname{ctg}\beta = \frac{\omega r + u_1}{V - v_1} = z_u, \tag{89}$$

которое называют числом относительных модулей.

Из уравнения (89) имеем:

$$-\omega r - u_1 = -z_u (V - v_1),$$

или

$$(-\omega r - u_1)^2 = z_u^2 (V - v_1)^2,$$

и, зная, что $V_1 = V - v_1$, уравнение (83) можем переписать так:

$$W = \sqrt{(V - v_1)^2 + z_u^2 (V - v_1)^2} = (V - v_1)\sqrt{1 + z_u^2}. \tag{90}$$

Заменим:

$$\sin\beta = \frac{V - v_1}{W} = \frac{V - v_1}{(V - v_1)\sqrt{1 + z_u^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + z_u^2}}, \tag{91}$$

$$\cos\beta = \frac{\omega r + u_1}{W} = \frac{\omega r + u_1}{(V - v_1)\sqrt{1 + z_u^2}} = \frac{z_u}{\sqrt{1 + z_u^2}}, \qquad (92)$$

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{1}{z_u}, \qquad (93)$$

$\frac{C_x}{C_y} = \mu$ — обратное качество крыла (94)

и подставим их в уравнение (88):

$$4\pi r V v_2 = ibC_y (V - v_1)^2 (1 + z_u^2) \frac{z_u}{\sqrt{1 + z_u^2}} \left(1 + \frac{\mu}{z_u}\right).$$

Вводя в это уравнение $e = \frac{v_1}{V}$ и заменив v_2 его значением из равенства (72), получим:

$$ibC_y = 8\pi r \frac{e}{(1 + e)(1 - e)^2} \cdot \frac{1}{(z_u + \mu)\sqrt{1 + z_u^2}}. \qquad (95)$$

Это уравнение называется уравнением связи; оно связывает ширину лопасти и коэфициент подъёмной силы с деформацией потока, характеризуемой величиной e.

Взяв сумму проекций сил элемента лопасти на касательную к окружности, по которой он движется, получим окружное усилие, развиваемое элементарными лопастями:

$$dQ = ibdr \frac{\rho}{2} W^2 (C_y \sin\beta - C_x \cos\beta).$$

Подставляя сюда значение W, $\sin\beta$ и $\cos\beta$ и вводя $C_x = \mu C_y$, получим:

$$dQ = ibdr \frac{\rho}{2} (V - v_1)^2 (1 + z_u^2) C_y \frac{1 - \mu z_u}{\sqrt{1 + z_u^2}}. \qquad (96)$$

Подставляя сюда значение $ibCy$ из уравнения (95) и сделав сокращения, получим:

$$dQ = 4\pi r \frac{e}{(1 + e)(1 - e)^2} \times$$

$$\times \frac{1}{(z_u + \mu)\sqrt{1 + z_u^2}} dr \rho (V - v_1)^2 \sqrt{1 + z^2} (1 - \mu z_u),$$

$$dQ = 4\pi r dr \rho \frac{e}{1 + e} V^2 \frac{1 - \mu z_u}{z_u + \mu}. \qquad (97)$$

Момент относительно оси ветряка равен:

$$dM = dQr = 4\pi r^2 dr \rho \frac{e}{1+e} V^2 \frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu}. \qquad (98)$$

Секундная работа элементарных лопастей:

$$dT = dM\omega = 4\pi r dr \frac{e}{1+e} \rho V^3 \frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu} z. \qquad (99)$$

Секундная энергия далеко перед ветряком, заключённая в потоке, площадь сечения которого определяется площадью кольца, ометаемого элементарными лопастями, равна:

$$dT_0 = 2\pi r dr \rho \frac{V^3}{2}.$$

Поделив секундную работу элементарных лопастей на эту энергию, получим элементарный коэффициент использования энергии ветра:

$$\xi = \frac{dT}{dT_0} = \frac{4\pi r dr \frac{e}{1+e} \rho V^3 \frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu} \cdot z}{2\pi r dr \rho \frac{V^3}{2}},$$

откуда:

$$\xi = \frac{4e}{1+e} \cdot \frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu} z. \qquad (100)$$

Умножив и разделив выражение (100) на (1—e) получим:

$$\xi = 4e \frac{1-e}{1+e} \cdot \frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu} \cdot \frac{z}{1-e}.$$

Так как выражение $4e \frac{1-e}{1+e}$ представляет идеальный коэфициент использования энергии ветра, то можем написать:

$$\xi = \xi_i \frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu} \cdot \frac{z}{1-e} = \xi_i \eta, \qquad (101)$$

где:

$$\eta = \frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu} \cdot \frac{z}{1-e} \qquad (102)$$

называют относительным коэфициентом полезного действия элементарного ветряка.

При большом числе модулей можно приблизительно считать:

$$\frac{z}{1-e} \cong z_u,$$

и тогда:

$$\eta = \frac{1 - \mu z_u}{1 + \frac{\mu}{z_u}}. \qquad (102a)$$

Напомним, что числом модулей, или быстроходностью ветродвигателя, называют отношение окружной скорости конца лопасти к скорости ветра:

$$Z = \frac{\omega R}{V}. \qquad (59)$$

Число модулей элементов лопастей на радиусе r равно:

$$z = \frac{\omega r}{V}. \qquad (103)$$

Число модулей для любого радиуса r ветряка с известной быстроходностью Z может быть выражено так:

$$z = Z \frac{r}{R}, \qquad (104)$$

где R — радиус ветроколеса.

§ 19. ВТОРОЕ УРАВНЕНИЕ СВЯЗИ

Момент относительно оси ветряка аэродинамических сил, действующих на элементарные лопасти, равен по величине и противоположен по знаку моменту количества движения, получаемого элементарной струёй, увлечённой ветряным колесом. Здесь предполагается, что в этом процессе принимает участие и присоединённая масса, так как в противном случае теорема Гельмгольца о сохранении вихря не была бы выполнена (рис. 13).

Второе уравнение связи выводим из рис. 57.

$$i\,(dY \sin\beta - dX \cos\beta)\, r = d\,(m_1 + m_2)\, 2u_1 r. \qquad (105)$$

Но

$$d(m_1 + m_2) = 2\pi r dr \rho V. \qquad (75)$$

Подставляя значения dY и dX из уравнений (85) и (86), а из уравнения (75) — значение $d\,(m_1 + m_2)$ в уравнение (105), получим:

$$ibdr\,(C_y \sin\beta - C_x \cos\beta)\,\frac{\rho}{2} W^2 r = 2\pi r dr \frac{\rho V}{\kappa} 2u_1 r. \qquad (105a)$$

Заменив в этом уравнении $\sin\beta$ и $\cos\beta$ их значениями из уравнений (91) и (92) и сделав сокращения, получим:

$$ib\left(C_y\frac{1}{\sqrt{1+z_u^2}}-C_x\frac{z_u}{\sqrt{1+z_u^2}}\right)W^2=8\pi rVu_1.$$

Подставляя сюда $\mu=\frac{C_x}{C_y}$ из уравнения (94) и $W^2=(V-v_1)^2\ (1+z^2{}_u)$ из уравнения (90), получим:

$$ibC_y\frac{1-\mu z_u}{\sqrt{1+z_u^2}}(V-v_1)^2(1+z_u^2)=8\pi rVu_1.$$

Из этого равенства находим отношение $\frac{u_1}{V}$, для чего разделим правую и левую части на $8\pi rV^2$ и заменим отношение $\frac{v_1}{V}$ его значением c.

$$\frac{u_1}{V}=\frac{ibC_y}{8\pi r}(1-e)^2(1-\mu z_u)\sqrt{1+z_u^2} \qquad (106)$$

Подставляя из уравнения (95) значение $\frac{ibC_y}{8\pi r}$, получим:

$$\frac{u_1}{V}=\frac{e}{(1+e)(1-e)^2}\cdot\frac{(1-e)^2(1-\mu z_u)\sqrt{1+z_u^2}}{(z_u+\mu)\sqrt{1+z_u^2}}.$$

По сокращении получим:

$$\frac{u_1}{V}=\frac{e}{1+e}\cdot\frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu}. \qquad (107)$$

Преобразуя уравнение (89), находим соотношение между z_u и z:

$$z_u=\frac{\omega r+u_1}{V-v_1}=\frac{\omega r}{V}\cdot\frac{V}{V-v_1}+\frac{u_1}{V}\cdot\frac{V}{V-v_1}=\frac{z}{1-e}+\frac{u_1}{V(1-e)}.$$

Подставим значение $\frac{u_1}{V}$ из уравнения (106):

$$z_u=\frac{z}{1-e}+\frac{e}{1-e^2}\cdot\frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu}; \qquad (108)$$

$$z=z_u(1-e)-\frac{e}{1+e}\cdot\frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu}. \qquad (109)$$

Решаем это уравнение относительно z_u:

$$z_u^2+\mu z_u-\frac{z_u z}{1-e}-\frac{\mu z}{1-e}-\frac{e}{1-e^2}+\frac{e}{1-e^2}\mu z_u=0;$$

$$z_u^2 - z_u\left(\frac{z}{1-e} - \mu - \frac{e}{1-e^2}\mu\right) - \frac{e}{1-e^2} - \mu\frac{z}{1-e} = 0;$$

$$z_u = \frac{1}{2}\left[\frac{z}{1-e} - \mu\left(1 + \frac{e}{1-e^2}\right)\right] \pm$$

$$\pm \sqrt{\frac{1}{4}\left[\frac{z}{1-e} - \mu\left(1 + \frac{e}{1-e^2}\right)\right]^2 + \frac{e}{1+e^2} + \mu\frac{z}{1-e}}. \quad (110)$$

Так как μ обычно имеет малую величину, то, приняв $\mu=0$, уравнения (109) и (110) можно упростить:

$$z = z_u(1-e) - \frac{e}{z_u(1-e)}; \quad (109а)$$

$$z_u = z\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4e}{z^2}\cdot\frac{1-e}{1+e}}}{2(1-e)} = z\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{\xi_i}{z^2}}}{2(1-e)}. \quad (110а)$$

Уравнения (95), (103) и (110) позволяют сделать полный аэродинамический расчёт ветроколеса для заданных ωR и V, а также формы профиля крыла. При этом пользуются диаграммой C_y и C_x, построенной для данного профиля.

Задаваясь e в пределах 0,28 до 0,35 и наиболее выгодным углом атаки, по диаграмме C_y и C_x для данного профиля находят: $\mu = \frac{C_x}{C_y}$.

Подставляя значения z, e и μ в уравнение (110), находят число относительных модулей z_u. Далее, пользуясь уравнением (95), находят суммарную ширину лопастей ib:

$$ib = \frac{8\pi r}{C_y}\cdot\frac{e}{(1+e)(1-e)^2}\cdot\frac{1}{(z_u+\mu)\sqrt{1+z_u^2}} \quad (111)$$

И, наконец, определяют угол заклинения лопасти φ на радиусе r:

$$\varphi = \operatorname{arc}\cdot\operatorname{ctg} z_u - \alpha. \quad (112)$$

C_y находят по диаграмме C_y по α, построенной на основании экспериментальных данных.

§ 20. МОМЕНТ И МОЩНОСТЬ ВСЕГО ВЕТРЯКА

Момент всего ветряка получим, проинтегрировав уравнение (98) в пределах от r_0 до R, где r_0 — расстояние от оси ветряка до начала лопасти и R — расстояние от оси ветряка до конца лопасти:

$$M = \int_{r_0}^{R} dM = \int_{r_0}^{R} 4\pi r^2 \rho \frac{e}{1+e} V^2 \frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu} dr. \qquad (113)$$

Этот момент обычно выражают в отвлечённых величинах и обозначают через $\bar{M}$ с чертой вверху. При этом правую и левую части равенства (113) делят на $\pi R^3 \frac{\rho V^2}{2}$ и вводят обозначение $\bar{r} = \frac{r}{R}$, называемое относительным радиусом:

$$\bar{M} = \frac{M}{\pi R^3 \rho \frac{V^2}{2}} = \int_{\bar{r}_0}^{\bar{R}} 8 \frac{e}{1+e} \cdot \frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu} \bar{r}^2 d\bar{r}. \qquad (114)$$

Уравнение (114) является основным для вычисления характеристики моментов. Им можно пользоваться при переменных значениях e вдоль r, если предположить, что элементарные струи не влияют друг на друга, что практически допустимо при плавных изменениях e.

Для ветряка с постоянным e по радиусу мы можем вынести e за знак интеграла:

$$\bar{M} = 8 \frac{e}{1+e} \int_{\bar{r}_0}^{\bar{R}} \frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu} \bar{r}^2 d\bar{r}. \qquad (115)$$

Этот интеграл можно решить, если пренебречь кручением струи, которое у быстроходных ветряков незначительно.

Следовательно, мы можем принять $u_1 = 0$ и относительное число модулей z_u из уравнения (89) можем выразить так:

$$z_u = \frac{\omega r + u_1}{V - v_1} \simeq \frac{\omega r}{V - v_1} = \frac{\omega r}{V(1-e)} = \frac{z}{1-e}. \qquad (116)$$

Для конца лопасти имеем:

$$Z_u \simeq \frac{\omega R}{V - v_1}. \qquad (117)$$

Разделив уравнение (116) на (117), получим:

$$\frac{r}{R} = \frac{z_u}{Z_u}; \tag{118}$$

$$\frac{dr}{R} = \frac{dz_u}{Z_u}. \tag{119}$$

Сделав ряд преобразований уравнения (115) и пренебрегая малыми величинами μ^2 и $\frac{z_{u_0}^3}{Z_u^3}$, получим:

$$\overline{M} = \frac{4e}{(1+e)Z_u}\left[(1+\mu)\left(1-\frac{r_0^2}{R^2}\right) - 2\lambda\left(\frac{Z_u}{3}+\frac{1-\frac{r_0}{R}}{Z_u}\right)\right]. \tag{120}$$

Подставляя значение z_u из уравнения (116), получим:

$$\overline{M} = \frac{4e}{Z}\cdot\frac{1-e}{1+e}\left[\left(1-\frac{r_0^2}{R^2}\right) - 2\lambda\left(\frac{Z_u}{3}+\frac{1-\frac{r_0}{R}}{Z_u}-\frac{1-\frac{r_0^2}{R^2}}{2}\right)\right]. \tag{121}$$

Мощность, развиваемая ветряком, равна $M\omega$, а так как из уравнения (114) момент равен:

$$M = \overline{M}\pi R^3 \rho\frac{V^2}{2}, \tag{114а}$$

то мощность, развиваемую ветряком, можно написать так:

$$T = M\omega = \overline{M}\pi R^3\rho\frac{V^2}{2}\omega. \tag{122}$$

Подставив сюда $Z = \frac{\omega R}{V}$, вместо $\omega = \frac{ZV}{R}$, получим:

$$T = \overline{M}\pi R^2\rho\frac{V^3}{2}Z. \tag{122а}$$

Заменив $\overline{M}$ его значением из уравнения (121), получим:

$$T = 4\rho\frac{1-e}{1+e}\left[\left(1-\frac{r_0^2}{R^2}\right) - 2\lambda\left(\frac{Z_u}{3}+\frac{1-\frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1-\frac{r_0^2}{R^2}}{2}\right)\right]\pi R^2\rho\frac{V^3}{2}. \tag{123}$$

Разделив мощность ветряка на секундную энергию потока, получим коэфициент использования энергии

ветра:

$$\xi = \frac{T}{\pi R^2 \rho \frac{V^3}{2}} = 4e\,\frac{1-e}{1+e}\left[1 - \frac{r_0^2}{R^2} - \right.$$

$$\left. - 2\mu\left(\frac{Z_\mu}{3} + \frac{1-\frac{r_0}{R}}{Z_\mu} - \frac{1-\frac{r_0^2}{R^2}}{2}\right)\right]. \qquad (124)$$

Так как:

$$4e\,\frac{1-e}{1+e} = \xi_i \quad \text{и} \quad \xi = \xi_i \cdot \eta_i,$$

то:

$$\eta_i = 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - 2\mu\left(\frac{Z_\mu}{3} + \frac{1-\frac{r_0}{R}}{Z_\mu} - \frac{1-\frac{r_0^2}{R^2}}{2}\right). \qquad (125)$$

При выводе этого уравнения не были приняты во внимание потери, происходящие вследствие образования вихрей, сходящих с концов лопастей, а также принято кручение уходящей струи равным нулю, что допустимо у быстроходных ветряков.

Следовательно, коэфициент использования энергии ветра, подсчитанный по формуле (124), будет значительно выше возможного к получению в практике. О поправках на потери будет сказано дальше (§ 21).

§ 21. ПОТЕРИ ВЕТРЯНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Потери ветряных двигателей разделяются на четыре группы [35].

1. Концевые потери, происходящие за счёт образования вихрей, сходящих с концов лопастей. Эти потери определяются на основании теории индуктивного сопротивления. Часть этих потерь была учтена при выводе идеального коэфициента использования энергии ветра ξ_i; неучтенная часть концевых потерь выражается формулой (126):

$$\overline{T_j} \cong \frac{e}{1-e}\left[\frac{8\sqrt{1+\left(\frac{1-e}{Z}\right)^2}}{(1+e)\,iZ} - \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{iZ}{\pi\left(1-\frac{e}{2}\right)}\right)^2}}\right]. \qquad (126)$$

2. Профильные потери, которые вызываются трением струй воздуха о поверхность крыла и зависят только от профиля лопастей.

Мощность, поглощаемая профильным сопротивлением элементарных лопастей длиною dr, на радиусе r ветряка равна:

$$dT_p = iC_p b dr \rho \frac{W^2}{2} W, \qquad (127)$$

где C_p— коэфициент профильного сопротивления, который для крыла бесконечного размаха равен C_x, т. е.:

$$C_p = C_x.$$

Так как $\frac{C_x}{C_y} = \mu$, или $C_x = \mu C_y$, то $C_p = \mu C_y$.

Подставляя значение C_p, равное μC_y и $W = (V - v_1)\sqrt{1 + Z_u^2}$ в уравнение (127), получим:

$$dT_p = ibC_y \mu dr \frac{\rho}{2} (V - v_1)^3 (1 + z_u^2) \sqrt{1 + z_u^2}.$$

Подставляем значение ibC_y из уравнения (95) и делаем преобразования этого уравнения:

$$dT_p = 4\pi r \frac{e}{(1+e)(1-e)^2} \times$$

$$\times \frac{1}{(z_u + \mu)\sqrt{1 + z_u^2}} \mu dr \rho (V - v_1)^3 (1 + z_u^2) \sqrt{1 + z_u^2}$$

$$dT_p = \frac{4\pi r dr e}{(1+e)(1-e)^2} \rho (V - v_1)^3 \frac{1 + z_u^2}{z_u + \mu} \cdot \mu.$$

Подставляем:

$$r = z \frac{V}{\omega};$$

$$dr = \frac{V}{\omega} dz;$$

$$z_u \cong \frac{z}{1-e};$$

и отбрасываем в знаменателе μ, как малую величину, по сравнению с z_u:

$$dT_p \cong 4\pi \frac{V^2}{\omega^2} z dz \frac{e}{(1+e)(1-e)^2} \rho V^3 (1-e)^3 \frac{1 + \frac{z^2}{(1-e)^2}}{\frac{z}{1-e}} \cdot \mu,$$

$$dT_p \cong 4\pi \rho \frac{V^5}{\omega^2} \cdot \frac{e(1-e)^2}{1+e} \mu \left[1 + \frac{z^2}{(1-e)^2}\right] dz.$$

Интегрируя в пределах от 0 до Z получим:

$$T_p \cong 4\pi\rho \frac{V^3}{\omega^2} \cdot \frac{e(1-e)^2}{1+e} \int_0^Z \mu \left[1 + \frac{z^2}{(1-e)^2}\right] dz.$$

Профильные потери там, где уже кончилась лопасть, существуют в виде сопротивления маха, каковое, таким образом, учитывается приблизительно. В результате интегрирования получаем профильные потери всего ветряка:

$$T_p \cong \pi R^2 \frac{\rho V^3}{2} \cdot \frac{4e(1-e)^2}{1+e} \cdot \frac{V^2}{\omega^2 R^2} 2\mu' \left[Z + \frac{Z^3}{3(1-e)^2}\right],$$

где $\mu' = \frac{C_x}{C_y}$ есть средняя величина по всей лопасти. Так как $\frac{4e(1-e)}{1+e} = \xi_i$ и $\frac{V}{\omega R} = \frac{1}{Z}$, то, подставляя значения этих выражений в данное уравнение и разделив его на $\pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \xi_i$, получим окончательную формулу профильных потерь в безразмерном значении:

$$\overline{T} \cong \frac{T_p}{\pi R^2 \frac{\rho V^3}{2} \xi_i} = 2\mu' \left[\frac{1-e}{Z} + \frac{Z}{3(1-e)}\right]. \qquad (128)$$

3. Потери на кручение струи за ветряком равны живой силе тангенциальных скоростей уходящей струи. Величину этих потерь получим, проинтегрировав живую силу от тангенциальных скоростей всех элементарных струй в пределах от r_0 до R, а именно:

$$T_m = \int_{r_0}^{R} (2\pi r dr \rho V) \frac{u_2^2}{2}. \qquad (129)$$

Заменим в данном выражении u_2 его значением, которое равно $2u_1$.

Так как на основании уравнений (106) и (102)

$$\frac{u_1}{V} = \frac{e}{1+e} \cdot \frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu} = \frac{e}{1+e} \cdot \frac{1-\mu z_u}{\left(1+\frac{\mu}{z_u}\right) z_u},$$

$$z_u \cong \frac{z}{1-e} \quad \text{и} \quad \eta_i = \frac{1-\mu z_u}{1+\frac{\mu}{z_u}},$$

получим:

$$u_1 \cong \frac{e}{z} \cdot \frac{1-e}{1+e} \eta V,$$

следовательно:

$$u_2 = 2u_1 \cong 4e \frac{1-e}{1+e} \eta \frac{V}{2z},$$

откуда:

$$u_2 = \frac{V}{2z} \cdot \xi_i \eta,$$

или:

$$u_2 = \frac{V}{2Z} \cdot \frac{R}{r} \xi_i \eta. \qquad (130)$$

Подставляя значение u_2 в уравнение (129), получим:

$$T_m = \int_{r_0}^{R} \pi r dr \rho V^3 \frac{R^2}{r^2} \cdot \frac{\xi_i^2 \eta^2}{4Z^2}.$$

Вынося постоянные за знак интеграла и заменив η некоторым его значением η_1, средним для всего радиуса r, получим:

$$T_m = \pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \cdot \frac{\xi_i^2 \eta_1^2}{2Z^2} \int_{r_0}^{R} \frac{dr}{r} = \pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \cdot \frac{\xi_i^2 \eta_1^2}{2Z^2} \ln \frac{R}{r_0}.$$

Поделив обе части этого равенства на мощность идеального ветряка:

$$T_i = \pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \xi_i,$$

получим отвлечённую величину потерь на кручение струи за ветряком:

$$\overline{T}_m = \frac{\xi_i \eta_1^2}{2Z^2} \ln \frac{R}{r_0}. \qquad (131)$$

4. Потери, происходящие вследствие неполного использования всей ометаемой площади, учитываются отношением:

$$\left(\frac{r_0}{R}\right)^2.$$

Полезную мощность, развиваемую ветряком, получим, вычтя все потери из мощности идеального ветряка:

$$T = T_i \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2}\right) - T_j - T_p - T_m.$$

Разделив на T_i получим:

$$\frac{T}{T_i} = 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - \frac{T_j}{T_i} - \frac{T_p}{T_i} - \frac{T_m}{T_i},$$

откуда:

$$T = T_i\left(1 - \frac{r_0^2}{R^2}\right) - \overline{T}_j - \overline{T}_p - \overline{T}_m. \qquad (132)$$

Разделив правую и левую части этого уравнения на выражение энергии ветра $\pi R^2 \rho \frac{V^3}{2}$, получим коэфициент использования энергии ветра реального ветряка:

$$\xi = \xi_i\left(1 - \frac{r_0^2}{R^2}\right) - \overline{T}_j - \overline{T}_p - \overline{T}_m. \qquad (133)$$

Так как, согласно уравнению (101), $\xi = \xi_i \eta_i$, находим, что относительный коэфициент полезного действия η_i ветряка равен:

$$\eta_i = 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - \overline{T}_j - \overline{T}_p - \overline{T}_m. \qquad (134)$$

§ 22. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ВЕТРОКОЛЕСА

Конструктивная схема 4-лопастного ветроколеса дана на рис. 58. Для расчёта должны быть заданы:

1) мощность N в лош. силах, которую необходимо получить от ветродвигателя;

2) скорость ветра V, при которой ветродвигатель должен развивать эту мощность;

3) число модулей или быстроходность Z ветряка при максимальном коэфициенте использования энергии ветра данного типа ветряка;

4) коэфициент использования энергии ветра ξ.

Расчёт начинают с определения диаметра ветроколеса D, исходя из уравнения мощности ветродвигателя в лош. силах, которую получим, разделив уравнение (62) на 75 и умножив на коэфициент использования энергии ветра ξ, т. е.:

$$N = \frac{\rho F V^3 \xi}{2 \cdot 75}, \qquad (135)$$

где $\rho = 0{,}125 \left[\frac{\text{кг. сек.}^2}{м^4}\right]$ — массовая плотность воздуха принимается при температуре $t = 15°$ C и давлении атмосферы $B_0 = 760$ мм рт. ст.

Подставляя значение $\rho = 0{,}125$ в уравнение (135), получим мощность ветродвигателя, выраженную в зависимости от ометаемой поверхности ветроколеса любой системы для условий $t = 15°$ и $B_0 = 760$ мм рт. ст.

$$N = \frac{\rho F V^3 \xi}{2 \cdot 75} = \frac{0{,}125 \cdot F V^3 \xi}{150} = 0{,}000833\, F V^3 \xi. \qquad (136)$$

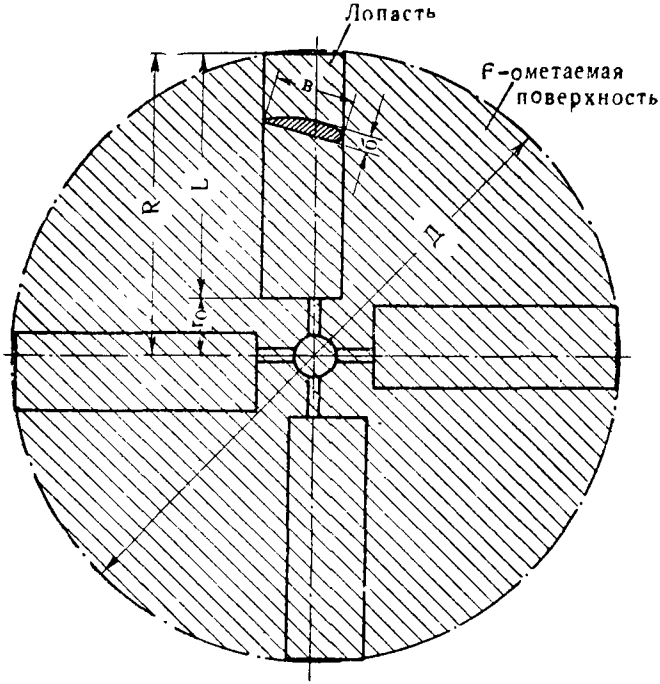


Рис. 58. Схема ветроколеса.

Так как для крыльчатого ветряка ометаемая поверхность F (рис. 58) равна:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} = 0{,}785\, D^2,$$

то можем выразить мощность крыльчатого ветряка в зависимости от его диаметра D.

$$N = 0{,}000833 \cdot 0{,}785\, D^2 V^3 \xi = 0{,}000654\, D^2 V^3 \xi \text{ л. с.} \qquad (137)$$

или

$$N = \frac{D^2 V^3 \xi}{1530}.$$

Мощность ветродвигателя в киловаттах напишется так:

$$N = 0{,}000481\, D^2 V^3 \text{ квт.} \qquad (138)$$

Диаметр ветроколеса заданной мощности в лошадиных силах будет равен:

$$D = \sqrt{\frac{N}{0{,}000654\, V^3}} = \sqrt{\frac{1530\, N}{V^3}}. \qquad (139)$$

Для другой температуры t и давления B мощность надо определить при соответствующей массовой плотности ρ, которая определяется формулой (3).

Внося эту поправку в уравнение мощности, получим:

$$N_x = N \frac{B\,(273+15)}{B_0\,(273+t)} = \frac{NB\,288}{760\,(273+t)},$$

и соответственно диаметр ветроколеса будет равен:

$$D = \sqrt{\frac{1530\, N}{V^3}} \cdot \sqrt{\frac{760\,(273+t)}{B\,280}}. \qquad (139а)$$

Скорость ветра V, при которой ветроколесо должно развивать заданную для расчёта мощность, обычно принимают равной от 8 до 14 м/сек. (см. гл. IX).

Число модулей Z либо задаётся, либо определяется, если заданы обороты n ветроколеса:

$$Z = \frac{\omega R}{V} = \frac{\pi n R}{30 V},$$

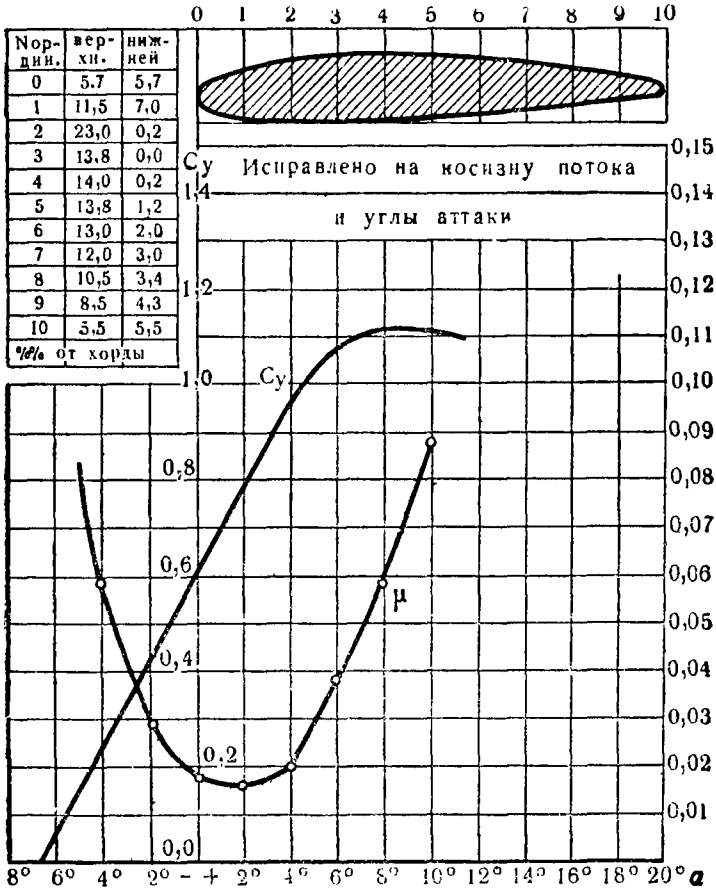
отсюда:

$$n = \frac{30 Z V}{\pi R}. \qquad (140)$$

Далее, на основании конструктивных соображений и опытных данных продувок, выбирают толщину профиля лопасти. На конце лопасти берут профиль толщиной $\delta = 0{,}1\, b$ до $0{,}15\, b$, где b — ширина лопасти. К втулке толщина профиля δ увеличивается, достигая у ветряков с поворотными лопастями около оси маха от $0{,}2\, b$ до $0{,}35\, b$.

Для решения уравнений, определяющих форму лопастей, число их и коэфициент использования энергии ветра, задаются несколькими значениями коэфициента торможения e, например, $e = 0{,}3;\ 0{,}35;\ 0{,}40$, и определяют идеальный коэфициент использования энергии ветра $\xi_i = 4e \frac{1-e}{1+e}$. Затем с помощью уравнений (126),

(128), (131) и (133) определяют ξ и строят кривую зависимости ξ от e и выбирают e, соответствующее ξ_{max}. После этого строят расчётную таблицу 6, где в верхней части таблицы приведены основные формулы расчёта.



Нор-дии.	верх-ней	ниж-ней
0	5.7	5,7
1	11,5	7,0
2	23,0	0,2
3	13,8	0,0
4	14,0	0,2
5	13,8	1,2
6	13,0	2,0
7	12,0	3,0
8	10,5	3,4
9	8,5	4,3
10	5,5	5,5
% от хорды		

Рис. 59. Кривые для определения C_y и μ в зависимости от α.

В графе 1 приведены радиусы сечений лопасти в относительных величинах $\frac{r}{R}$. Каждая горизонтальная строка таблицы с цифрами соответствует данному сечению лопасти на радиусе $\bar{r} = \frac{r}{R}$.

$\xi_i = 4e\ \frac{1-e}{1+e}$	$e=0{,}30 \qquad \xi_i = 0{,}646$
$\xi = \xi_i\left[1-\left(\frac{r_0}{R}\right)^2 - \bar{T}_j - \bar{T}_p - \bar{T}_m\right]$	$\xi = 0{,}646\ (1-0{,}1-0{,}113-0{,}075-0{,}034) = 0{,}476$
$\bar{T}_j \cong \frac{e}{1-e}\left[\frac{8\sqrt{1+\left(\frac{1-e}{z}\right)^2}}{(1+e)\,\pi z} - \frac{1}{\sqrt{1+\left[\frac{\pi z}{\pi\left(1-\frac{e}{2}\right)}\right]^2}}\right]$	$\frac{0{,}3}{1-0{,}3}\left[\frac{8\sqrt{1+\left(\frac{1-0{,}3}{3{,}5}\right)^2}}{(1+0{,}3)\,4\cdot 3{,}5} - \frac{1}{\sqrt{1+\left[\frac{4\cdot 3{,}5}{\pi\,(1-0{,}15)}\right]^2}}\right] = 0{,}113$
$\bar{T}_p \cong 2\mu'\left[\frac{1-e}{z} + \frac{z}{3\,(1-e)}\right]$	$2\cdot 0{,}02\left[\frac{1-0{,}3}{3{,}5} + \frac{3{,}5}{3\,(1-0{,}3)}\right] = 0{,}075$
$\bar{T}_m \cong \frac{\xi_i \pi^2}{2z^2}\ln\frac{R}{r_0}$	$\frac{0{,}646\cdot 0{,}9^2}{2\cdot 3{,}5^2}\cdot 2{,}3\lg\frac{1}{0{,}2} = 0{,}034$
$z = Z\frac{r}{R}$	$z_u = \frac{z}{2\,(1-e)} \times \left[1+\sqrt{1+\frac{\xi_i}{z^2}}\right]$
	$\bar{i}bC_y = \frac{8\pi\frac{r}{R}\cdot\frac{e}{(1+e)\,(1-e)^2}}{(z_u+\mu)\sqrt{1+Z^2_u}}$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{r}{R}$	z	$2(1-e)$	$1+\sqrt{1+\frac{\xi_i}{z^2}}$	Z_u	$8\pi\frac{r}{R}$	$z_u+\mu$	$\frac{e}{(1+e)\,(1-e)^2}$	$\sqrt{1+z_u^2}$	$\bar{i}bC_y$
1	3,5	1,3	2,026	5,46	25,08	5,48	0,614	5,55	0,508
0,8	2,3	1,3	2,042	4,40	20,10	4,42	0,614	4,52	0,618
0,6	2,1	1,3	2,072	3,35	15,08	3,37	0,614	3,50	0,788
0,4	1,4	1,3	2,160	2,33	10,06	2,35	0,614	2,53	1,046
0,2	0,7	1,3	2,540	1,37	5,02	1,39	0,614	1,70	1,304

$D=0,36$; $Z=3,5$; $i=4$ Таблица 6

$e=0,35$ $\xi_i=0,674$	$e=0.40$ $\xi_i=0,687$
$\xi=0,674\,(1-0,04-0,135-0,079-0,036)=0,478$	$\xi=687\,(1-0,04-0,085-0,158-0,036)=0,467$
$\frac{0,35}{1-0,35}\left[\frac{8\sqrt{1+\left(\frac{1-0,35}{3,5}\right)^2}}{(1+0,35)\,4\cdot3,5}-\frac{1}{\sqrt{1+\left[\frac{4\cdot3,5}{\pi\,(1-0,175)}\right]^2}}\right]=0,135$	Аналогично находим $\bar{T}_j=0,158$
$2\cdot0,02\left[\frac{1-0,35}{3,5}+\frac{3,5}{3\,(1-0,35)}\right]=0,079$	Аналогично находим $\bar{T}_p=0,085$
$\frac{0,674\cdot0,9^2}{2\cdot3,5^2}\cdot2,3\lg\frac{1}{0,2}=0,036$	Аналогично находим $T_m=0,036$
$i=\frac{R\,[i\bar{b}C_y]}{b\,C_y}$ $b=\frac{R[i\bar{b}C_y]}{iC_y}$	$\varphi=\operatorname{arc\,ctg} z_u-\alpha$

11	12	13	14	15	16	17
C_y	μ	№ профиля	b	α	$\beta=\operatorname{arc\,ctg} z_u$	$\varphi=\beta-\alpha$
0,654	0,016	Инверсия эллипса толщина	0,035	0°30′	10°23′	9°53′
0,696	0,016	1/5	0,040	0°54′	12°48′	11°54′
0,788	0,017	1/5	0,045	2°06′	16°39′	14°33′
0,942	0,025	1/5	0,050	3°55′	23°20′	19°25′
1,066	0,047	1/5	0,055	6°08′	36°08′	30°00′

В первой строке вверху помещены частные формулы, по которым ведётся расчёт.

В первых графах 2—5 вычисляют $z_{ц}$ с помощью формулы (110а); если желательна большая точность, то надо пользоваться уравнением (110). В графах 6—10 подсчитывают выражение $ib\frac{C_y}{R}$ с помощью формулы (95). В графах 11—14 на основании построенной для данного примера диаграммы значений C_y и μ в функции α (рис. 59) вносят значения C_y, μ и b. В графах 15—17 заносят α и вычисляют угол заклинения лопасти $\varphi=\beta-\alpha$.

После того как выбран профиль, с помощью диаграммы (рис. 59), устанавливают угол атаки, соответствующий наименьшему μ, и находят C_y.

Задаваясь числом лопастей i, находят ширину лопасти b.

$$b=\frac{[i\bar{b}C_y]}{C_y}\bar{R}. \qquad (141)$$

Найдя значение b, вычисляют окончательное значение C_y:

$$C_y=\frac{[i\bar{b}C_y]}{ib}\bar{R}. \qquad (142)$$

По диаграмме (рис. 59) находят μ и α, соответствующие значению C_y, и заносят их в графы 11, 12 и 15 таблицы 6.

Такие же подсчёты проделываются для сечения лопасти $\bar{r}=0{,}2$. В этом сечении в целях прочности маха принимают более толстый профиль с $\frac{\delta}{b}=$ от 0,3 до 0,35. И в этом случае C_y выбирают также большим, так как в противном случае ширина лопасти получит чрезмерно большие размеры. Ширина лопасти у втулки берётся равной:

$$\bar{b}_{0,2}=1{,}3 \text{ до } 2{,}0\bar{b}_1 \qquad (143)$$

Определив ширину лопасти на конце и у втулки, находят ширину лопасти для любого сечения, принимая её форму в виде трапеции:

$$b_k=b_1+\frac{b_{0,2}-b_1}{n-1}(k-1), \qquad (144)$$

где: n — число сечений лопасти;

k — порядковый номер сечения, считая от конца лопасти.

Определив b, находят C_y с помощью уравнения (142), а затем μ и α по графику (рис. 59) и, наконец, φ. Если в результате конструктивной проработки окажется толщина лопасти недостаточной, т. е. мах крыла не помещается в контуре профиля, то, увеличивая толщину, необходимо провести расчёт вновь, начиная с 11-й графы таблицы 6.

В этой таблице приведён для примера расчёт модели 4-лопастного ветроколеса D=0,36 м и с числом модулей Z=3,5.

§ 23. РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОКОЛЕСА

Характеристикой ветряка называют зависимость относительного момента ветроколеса $\overline{M}$ и коэфициента использования энергии ветра ξ от числа модулей Z. Эти характеристики необходимы для выявления основных параметров ветроколеса. Более подробно о них сказано в § 26, 27 и 29; здесь же приводим метод подсчёта теоретической характеристики ветроколеса.

Характеристики вычисляют для каждого сечения лопасти отдельно; пример приводится в таблице 7, где в горизонтальных строках вычисляются характеристики каждого сечения лопасти. В графе 1 выписаны радиусы сечений, в графе 2 — углы заклинения лопасти, в графе 3 — суммарная ширина лопастей в отвлечённом виде, в графе 4 — углы атаки, как независимый аргумент. Для удобства вычислений задаются значениями углов, выраженных в целых градусах. Формулы, с помощью которых производится расчёт, приведены в этой же таблице в соответствующих графах, вверху.

Чтобы получить полную характеристику, надо взять углы α, начиная от угла, при котором C_y весьма мало или равно нулю, и до α=90—φ. Однако не всегда имеются диаграммы C_y и μ испытания профилей для всех углов атаки; в этом случае ограничиваются построением части характеристики, доходя до углов атаки, соответствующих C_y=max. Эта часть характеристики будет как раз рабочей её частью, которая является наиболее интересной.

$$\frac{e}{(1+e)(1-e)^2} = C_y \frac{(z_n+u)\sqrt{1+z_n^2}}{\frac{8\pi r}{ib}}$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\frac{r}{R}$	φ°	$\frac{ib}{r}$	α°	$\beta = \varphi + \alpha$	$z_n = \operatorname{ctg}(\varphi+\alpha)$	u	C_y	$\frac{8\pi r}{ib}$	$z_n + u$	$\sqrt{1+z_n^2}$	$\frac{e}{(1+e)(1-e)^2}$	e
1	11,2	0,67	— 5°	6,2	9,21	0,109	0,150	27,70	9,32	9,26	0,343	0,243
			— 4	7,2	7,91	0,058	0,250		7,97	7,96	0,422	0,279
			— 2	9,2	6,17	0,029	0,440		6,20	6,25	0,482	0,292
			+ 2	13,2	4,26	0,016	0,780		4,42	4,38	0,401	0,270
			6	17,2	3,23	0,037	1,040		3,28	3,39	0,313	0,288
			8	19,2	2,87	0,058	0,110		2,93	3,04	0,262	0,201
0,8	14,1	0,74	— 6°	8,1	7,03	0,292	0,056	27,20	7,33	7,10	0,107	0,096
			— 4	10,1	5,61	0,058	0,250		5,67	5,70	0,296	0,220
			— 2	12,1	4,67	0,029	0,440		4,70	4,77	0,363	0,253
			+ 2	16,1	3,46	0,016	0,780		3,48	3,60	0,359	0,251
			6	20,1	2,73	0,037	1,060		2,77	2,91	0,315	0,230
			8	22,1	2,47	0,058	1,110		2,53	2,66	0,275	0,209
0,6	18,3	0,81	— 6°	12,3	4,59	0,292	0,056	18,64	4,88	4,68	0,068	0,064
			— 4	14,3	3,92	0,058	0,250		3,97	4,04	0,215	0,172
			— 2	16,3	3,42	0,029	0,440		3,44	3,56	0,288	0,216
			+ 2	20,3	2,70	0,016	0,780		2,72	2,88	0,329	0,237
			6	24,3	2,21	0,037	1,060		2,25	2,42	0,311	0,227
			10	28,3	1,85	0,089	1,120		1,94	2,11	0,246	0,161
0,4	23,2	0,89	— 6°	17,2	3,23	0,292	0,056	11,30	2,53	3,38	0,059	0,056
			— 4	19,2	2,87	0,058	0,250		2,93	3,04	0,197	0,160
			— 2	21,2	2,58	0,029	0,440		2,61	2,77	0,281	0,212
			+ 2	25,2	2,12	0,016	0,780		2,14	2,35	0,347	0,245
			6	29,2	1,79	0,037	1,060		1,83	2,05	0,352	0,247
			10	33,2	1,53	0,089	1,120		1,62	1,83	0,295	0,219
0,2	33,9	0,89	— 6°	27,9	1,89	0,292	0,056	5,66	2,19	2,14	0,046	0,045
			— 4	29,9	1,74	0,058	0,250		1,80	2,01	0,160	0,136
			— 2	31,9	1,61	0,029	0,440		1,64	1,90	0,242	0,189
			+ 2	35,9	1,38	0,016	0,780		1,40	1,70	0,329	0,236
			6	39,9	1,20	0,037	1,060		1,23	1,56	0,360	0,252
			10	43,9	1,04	0,089	1,120		1,13	1,44	0,323	0,234

Таблица 7

$D=0{,}36;\quad i=4;\quad Z=3$

$\Delta\overline{M}=\frac{8\overline{r}^2}{\frac{1+e}{e}}\cdot\frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu}$					$z=z_u(1-e)-\frac{1}{z_u\frac{1+e}{e}}$			$Z=\frac{z}{r}$
14	15	16	17	18	19	20	21	22
$8\overline{r}^2$	$\frac{1+e}{e}$	$1-\mu z_u$	$z_u+\mu$	$\Delta\overline{M}$	$z_u(1-e)$	$\frac{1}{z_u\frac{1+e}{e}}$	z	Z
8,00	5,12	—0,004	9,32	—0,0006	6,970	0,021	6,950	6,95
	4,59	0,540	7,97	0,1184	5,700	0,028	5,670	5,67
	4,42	0,821	6,20	0,2400	4,360	0,037	4,320	4,32
	4,70	0,932	4,42	0,3590	3,110	0,050	3,060	3,06
	5,40	0,880	3,28	0,3980	2,500	0,057	2,440	2,44
	5,98	0,833	2,93	0,3810	2,290	0,058	2,230	2,23
5,12	11,44	—1,050	7,33	—0.0640	6,370	0,012	6,360	7,94
	5,55	0,674	5,67	0,1100	4,380	0,032	4,350	5,43
	4,95	0.865	4,70	0,1910	3,485	0,043	3,440	4,30
	4,98	0,945	3,48	0,2800	2,590	0,058	2,530	4,30
	5,34	0,899	2,77	0,3110	2,100	0,069	2,030	2,54
	5,79	0,857	2,53	0,3000	1,954	0,070	1,884	2,36
2,88	16,60	—0,340	4,88	0,0121	4,300	0,013	4,290	7,15
	6,81	0,773	3,97	0,0823	3,240	0,037	3,200	5,33
	5,63	0,901	3,44	0,1340	2,685	0,052	2,633	4,38
	5,21	0,957	2,72	0,1940	2,064	0,071	1,993	3,92
	5,40	0,918	2.25	0,2170	1,705	0,084	1,622	2,70
	6,23	0,835	1,94	0,1990	1,500	0,086	1,414	2,36
1,28	18,9	0,057	3,53	0,0011	3,050	0.016	3,030	7,57
	7,25	0,833	2 93	0,0503	2,415	0,048	2,367	5,92
	5,70	0,925	2,61	0,0795	2,030	0,068	1,962	4,90
	5,09	0,966	2,14	0,1140	1,605	0,092	1,513	3,78
	5,04	0,934	1,83	0.1300	1,347	0,111	1,236	3,09
	5,57	0,864	1,62	0,1230	1,195	0,117	1,078	2,69
0,32	23,50	0,448	2,19	0,0028	1,800	0,023	1,777	8.88
	8,36	0,899	1.80	0.0192	1,504	0,069	1,435	7,18
	6,30	0,953	1,64	0.0295	1,305	0,099	1,206	6,03
	5,23	0,978	1,40	0,0426	1,054	0.138	0,916	4,58
	4,96	0,956	1,23	0,0501	0,895	0,168	0,727	3,63
	5,28	0,907	1,13	0,0487	0,796	0,182	0,614	3,07

Первые три графы содержат исходные данные, характеризующие форму ветряка. В графах 4—8 подсчитываются углы атаки α, углы притекания струй $\varphi+\alpha$, число относительных модулей и величины C_y и μ, которые находят по кривым, построенным для данного профиля. В графах 9—13 вычисляют выражения $\frac{e}{(1+e)(1-e)^2}$ из формулы (95) и определяют величины e. Это делают графически по кривой, выражающей функциональную зависимость $\frac{e}{(1+e)(1-e)^2}$ от e, которую можно построить

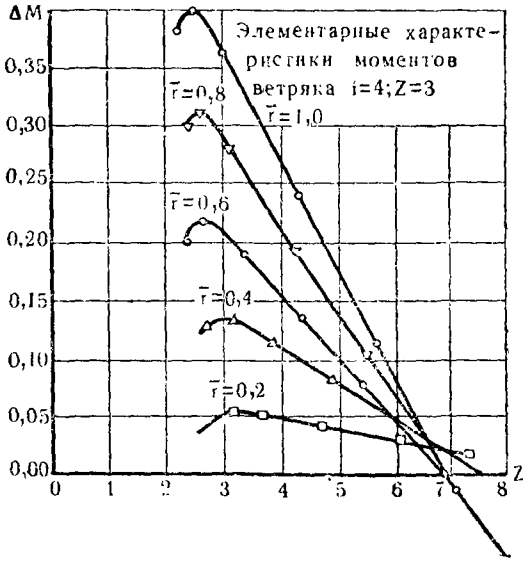


Рис. 60. Характеристика отвлечённых моментов каждого сечения крыла.

по небольшому числу точек. В графах 14—18 вычисляют удельный момент в отвлечённой форме с помощью уравнения:

$$\Delta\bar{M} = 8\frac{e}{1+e}\cdot\frac{1-\mu z_u}{z_u+\mu}\bar{r}^2\Delta\bar{r}. \qquad (145)$$

В последних четырёх графах 19—23 подсчитывают число модулей, отнесённых к концу лопасти.

По данным расчёта строят характеристики отвлечён-

ных моментов каждого сечения (рис. 60); здесь на оси абсцисс отложены числа модулей из графы 22 (табл. 7), а по оси ординат — отвлечённые моменты для каждого элемента лопасти из графы 18.

После этого строят диаграмму распределения моментов вдоль лопасти, для каковой цели на рис. 60 проводят ординату для данного числа модулей, пересечение которой с кривыми даст величины моментов для всех сечений. Перенося эти величины на график (рис. 61), получают величины моментов вдоль лопасти.

Каждая кривая (рис. 61) соответствует определённому числу модулей Z. Таким образом, график (рис. 61) представляет решение интеграла уравнения (115).

Площадь, ограниченная осью абсцисс и кривой моментов, будет равна интегралу, взятому в пределах от $\bar{r}=0{,}2$ до $\bar{r}=1{,}0=R$. Если заменить данную площадь равновеликим прямоугольником, основание которого будет равно $\bar{r}=1$, то высота его, взятая в масштабе ординат, будет выражать величину момента.

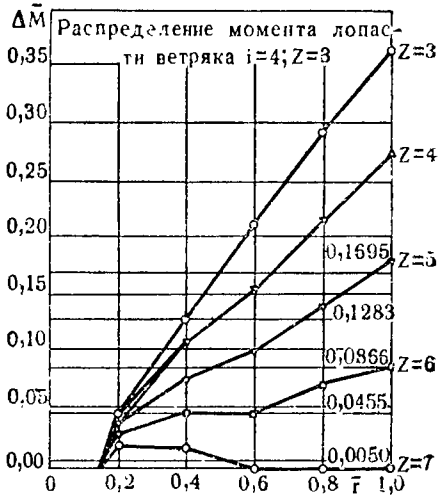


Рис. 61. Изменение отвлеченных моментов вдоль лопасти в зависимости от Z.

Откладывая по оси ординат высоты прямоугольников, взятых на рис. 61, а по оси абсцисс — числа модулей, получим аэродинамическую характеристику всего ветряка, показанную на рис. 62.

Характеристика момента на рис. 62 построена на основании уравнения (115), которое не учитывает концевых потерь. Выражая эти потери через моменты потерь, мы можем их отнять из теоретического момента и исправить характеристику.

Разделив мощность T_j концевых потерь на угловую

скорость, получим момент концевых потерь:

$$M_j = \frac{T_j}{\omega}. \tag{146}$$

Так как

$$T_j = \pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \xi_i \overline{T}_j,$$

то

$$M_j = \overline{T}_j \frac{\pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \xi_i}{\omega}.$$

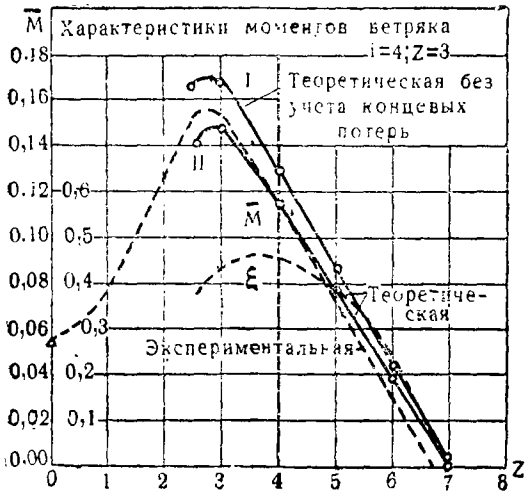


Рис. 62. Расчётная аэродинамическая характеристика всего ветроколеса.

Разделив этот момент на выражение $\pi R^3 \rho \frac{V^2}{2}$, получим его в отвлечённом виде:

$$\overline{M}_j = \frac{M_j}{\pi R^3 \rho \frac{V^2}{2}} = \frac{\overline{T}_j V}{\omega R} = \overline{T}_j \frac{\xi_i}{Z} \tag{147}$$

Подставляя сюда значение T_j из уравнения (126) и ξ_j из уравнения (79), получим:

$$\overline{M}_j = \frac{4e^2}{Z(1+e)} \left[\frac{8 \sqrt{1 + \left(\frac{1-e}{Z}\right)^2}}{(1+e) iZ} - \right.$$

$$\left.-\frac{1}{\sqrt{1+\left[\frac{\lambda Z}{\pi\left(1-\frac{e}{2}\right)}\right]^2}}\right]. \qquad (148)$$

Подсчет $\bar{M}_j$ момента концевых потерь этого ветряка сделан в таблице 8. Откладывая в масштабе момента концевых потерь вниз от кривой *I*, построенной на рис. 62, получим кривую *II* характеристики моментов, которая учитывает концевые потери и является, таким образом, окончательной характеристикой моментов.

Таблица 8

Подсчёт моментов концевых потерь (уравнение 148)

1	2	3	4	5	6	7
Z	e	$\frac{\sqrt[3]{1+\left(\frac{1-e}{Z}\right)^2}}{Z(1+e)}$	$\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\lambda Z}{\pi\left(1-\frac{e}{2}\right)}\right)^2}}$	Графа 3 + графа 4	$\frac{4e^2}{Z(1+e)}$	M_j
2,5	0,23	0,684	0,248	0,426	0,0688	0,0287
3	0,26	0,545	0,222	0,323	0,072	0,0231
4	0,285	0,397	0,165	0,231	0,063	0,0145
5	0,28	0,315	0,134	0,181	0,049	0,0089
6	0,27	0,265	0,112	0,153	0,0363	0,0059
7	0,26	0,228	0,098	0,130	0,0302	0,0040

Умножая значения моментов $\bar{M}$ на соответствующие величины чисел модулей Z, получим коэфициенты использования энергии ветра $\xi = \bar{M}Z$. Эти коэфициенты, будучи нанесены на этот же график, дадут характеристику мощности ветряка, показанную пунктирной кривой (рис. 62).

§ 24. ПРОФИЛИ «ЭСПЕРО» И ПОСТРОЕНИЕ ИХ

Профиль крыла играет важнейшую роль в получении высокой эффективности ветроколеса. Существует многочисленный ряд профилей крыльев, применяемых в практике; среди них занимают большое место профили «Эспero». Этот профиль был разработан в ЦАГИ инж. Б. В. Коростелевым, который и дал ему условное название «Эспero». Серия этих профилей была испытана в аэродинамической трубе ЦАГИ при скоростях воздушного потока около 30 м/сек. Углы атаки принимались от $\alpha = -14^\circ$

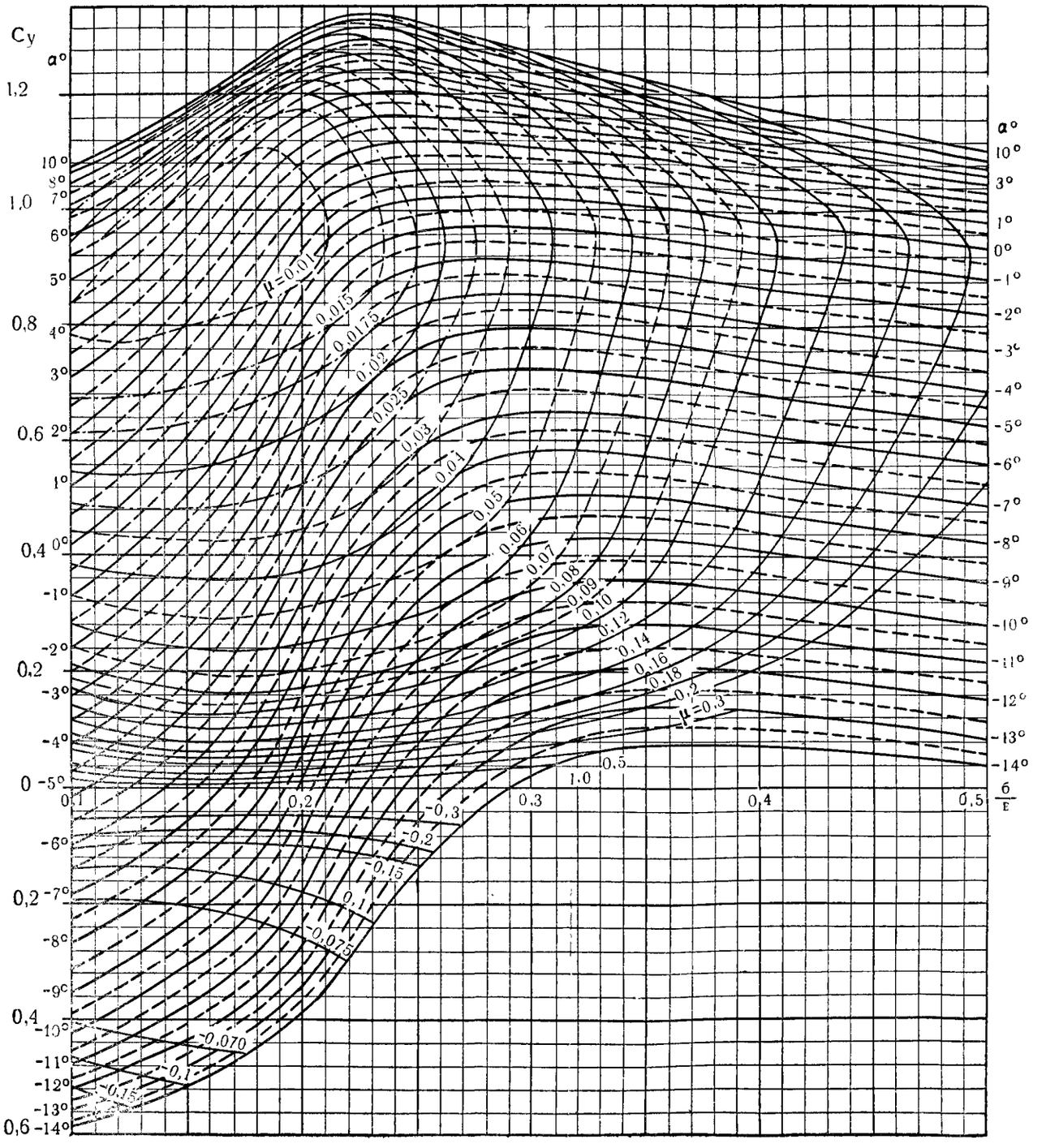


Рис. 63. График для определения C_y и μ крыльев бесконечного размаха с профилем «Эсперо» в зависимости от $\alpha = 14$ до $10°$.

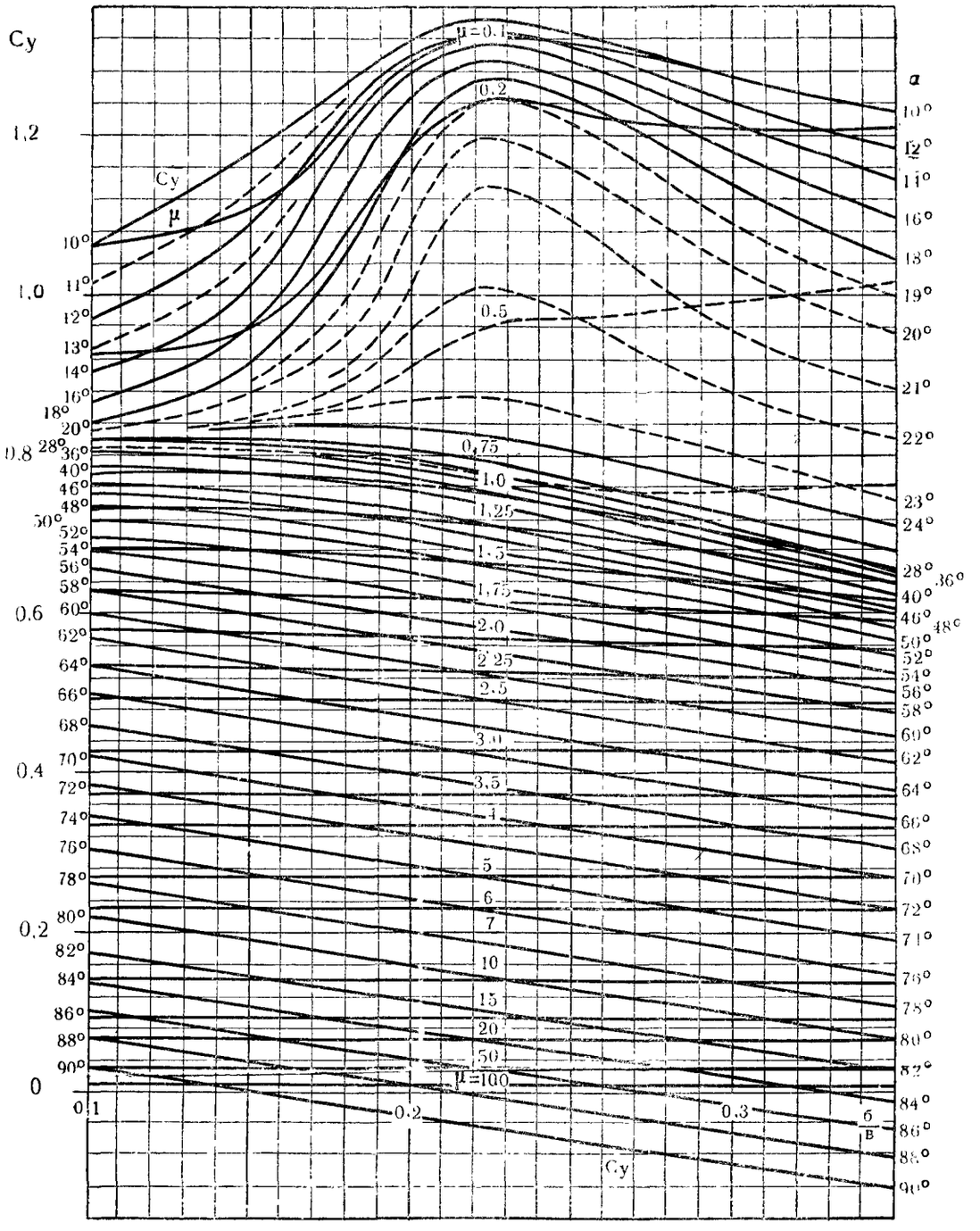


Рис. 64. Графики для определения C_y и μ крыльев бесконечного размаха с профилем «Эспо» в зависимости от α от -10 до $90°$.

до $\alpha = 90°$. Размер дужки 750×150 мм. Полученные результаты пересчитаны на бесконечный размах и представлены в виде графиков, показанных на рис. 63, 64.

На рис. 63 даются величины C_y в функции α —14° до α=10°, а на рис. 64 — для углов α=10° до $\alpha = 90°$. По оси абсцисс отложены толщины профиля в долях хорды, а по оси ординат — коэфициенты подъёмной силы крыла $C_y = \frac{Y}{S\rho\frac{V^2}{2}}$. Каждая толстая кривая соответствует определённому углу атаки α данной серии. Углы α обозначены на концах соответствующих кривых. Более тонкие кривые, пересекающие толстые, представляют кривые при μ=Const, т. е. каждая кривая соответствует данному μ серии.

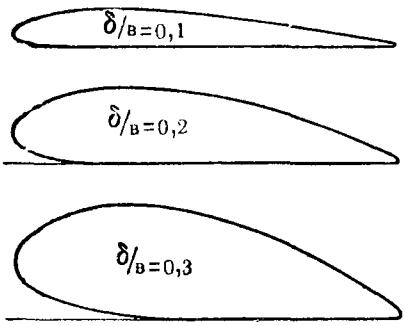


Рис. 65. Профиль «Эсперо» толщиной $\frac{\delta}{b}$=0,1, 0,2 и 0,3.

Значения μ поставлены посредине кривых. Кривые C_y и μ построены для толщины профилей от $\frac{\delta}{b} = 0{,}1$ до 0,5.

Пример 1. Найти C_y и μ для профиля «Эсперо» толщиной 0,21 при угле атаки α=—1°.

Р е ш е н и е. По оси абсцисс находим точку $\frac{\delta}{b} = 0{,}21$, идём от неё по вертикали до пересечения с толстой кривой, обозначенной —1° и отсчитываем по левой шкале величину ординаты; она будет равна C_y=0,827.

Величину μ находим, интерполируя наглаз расстояние точки $\left(\frac{\delta}{b} = 0{,}21;\ C_y = 0{,}827\right)$ от ближайших тонких кривых μ=0,01 и μ=0,015. Искомую μ получаем равной μ=0,012.

При пользовании графиком 64 следует иметь в виду, что область, заключённая между кривыми α=10 и α=28°, даёт значения C_y и μ весьма неточно, так как эта область

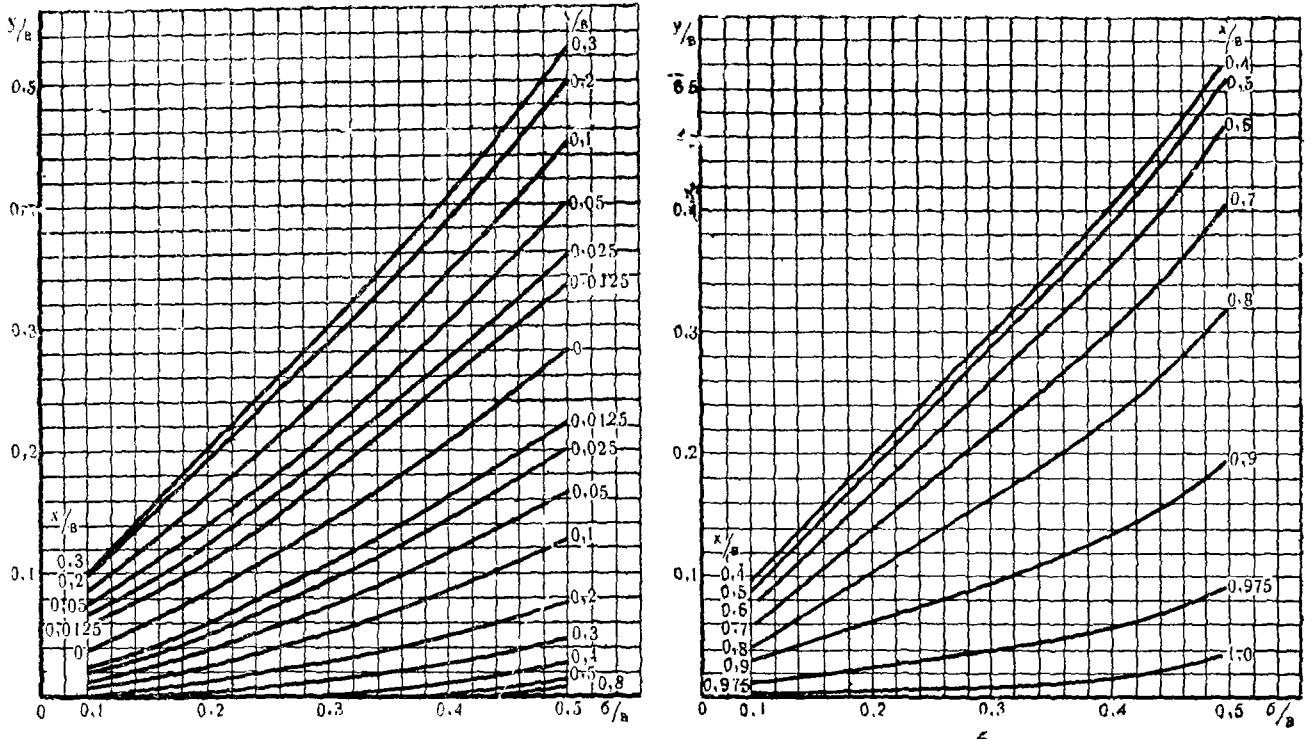


Рис. 66. Графики ординат профиля «Эсперо»: *а* — носик профиля; *б* — хвостик профиля.

соответствует углам атаки, при которых наступает срыв струй и образуются вихри.

На рис. 65 даны профили «Эсперо» толщиною $\frac{\delta}{b}$ с 0,1; 0,2 и 0,3, а на рис. 66 приведены два графика, с помощью которых можно построить профиль «Эсперо» любой тол-

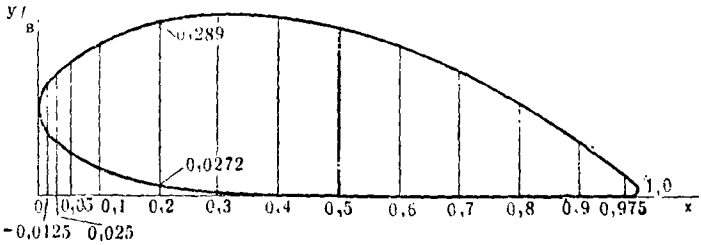


Рис. 67. Построение профиля «Эсперо».

щины. По оси абсцисс отложены толщины профиля, выраженные в долях хорды для абсциссы профиля, обозначенной на концах каждой кривой. Левый график —*а* даёт ординаты головки профиля для абсцисс от 0 до 0,3; правый график —*б* даёт ординаты хвостика для абсцисс от 0,4 до 1,0. Построение профиля делают следующим образом (рис. 67). Строят оси координат и откладывают по оси абсцисс величины абсцисс, получающиеся путём перемножения длины хорды профиля проектируемого крыла на число, стоящее по концам кривой (рис. 66).

Пример 2. Найти ординаты профиля проектируемой лопасти с хордой равной 1 000 мм с толщиною $\frac{\delta}{b}=0{,}3$ для абсцисс 0,2.

Р е ш е н и е. Ищем величины ординат по кривым, на концах которых стоят числа 0,2. Таких кривых на левой диаграмме (рис. 66) две: верхняя, ордината которой даёт величину ординаты спинки профиля, равную 0,289, и нижняя, ордината которой =0,0272, даёт величину ординаты нижней части профиля. Умножая полученные координаты на длину хорды, получим для абсцисс проектируемого профиля $x=0{,}2\cdot 1\ 000=200$ мм и для ординат $y=0{,}289\cdot 1\ 000=289$ мм и $y_1=0{,}0272\cdot 1\ 000=27{,}2$ мм.

Подобным образом определяют остальные координаты и по ним строят точки, которые соединяют при помощи лекала плавной кривой и получают профиль крыла.

ГЛАВА VI

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

§ 25. МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Экспериментальные характеристики ветродвигателей получают либо в аэродинамической трубе, где создаётся искусственный воздушный поток, либо в природных условиях в ветросиловой лаборатории с башней, оборудованной специальными приборами.

На рис. 68 приведена схема аэродинамической трубы диаметром в 1,6 м в одной из лабораторий СССР.

Основными приборами для испытания моделей ветродвигателей в аэродинамической трубе служат:

1) микроманометр спиртовой с трубкой ЦАГИ для измерения скоростного напора воздушного потока в трубе;

2) самописец с хронографом для записи оборотов модели ветроколеса;

3) барометр для определения атмосферного давления;

4) термометр для определения температуры в момент опытов.

Экспериментальные характеристики ветродвигателей получают по инерционному методу Аэродинамического института в Кучино. Этот метод основан на законе инерции вращающихся масс. Чтобы сообщить вращающемуся вокруг своей оси телу известное угловое ускорение, необходимо действие на это тело вращающего момента, величина которого равна моменту инерции тела, в данном случае

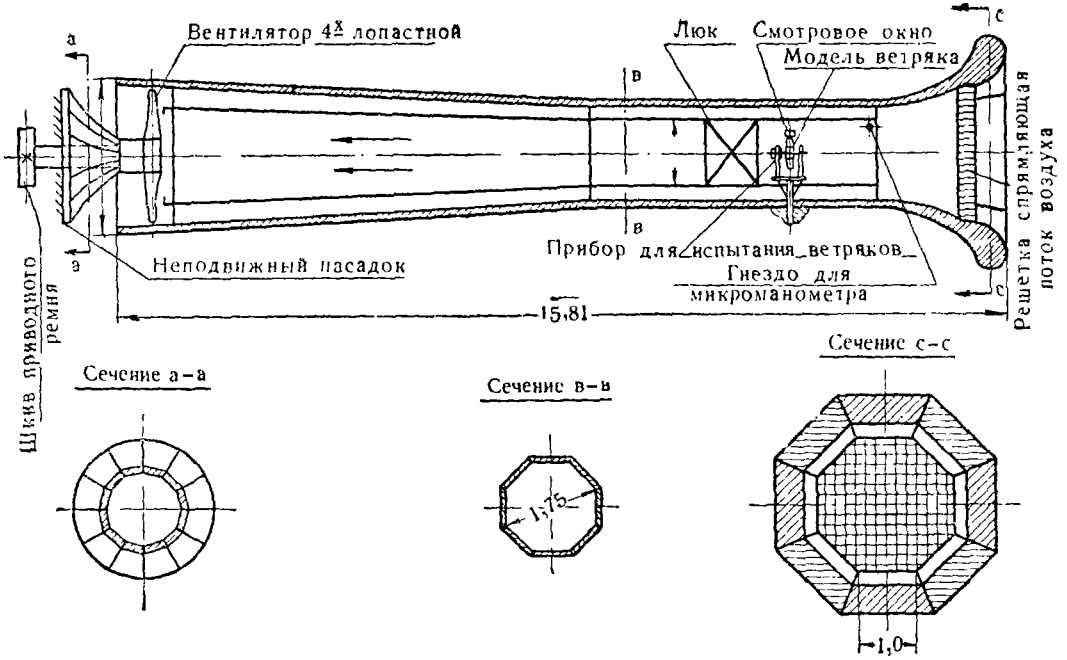


Рис. 68. Схема аэродинамической трубы.

ветрового колеса, относительно оси его вращения, умноженному на угловое ускорение, т. е.:

$$M = I\frac{d\omega}{dt}, \qquad (149)$$

где: M — вращающий момент;
I — момент инерции вращающегося тела;
$\frac{d\omega}{dt}$ — угловое ускорение.

Таким образом, зная угловое ускорение в каждый данный момент времени и момент инерции модели вращающегося ветроколеса, мы можем определить крутящий момент $M=M_{аэр}$ модели, вызванный внешними силами, т. е. воздушным потоком в аэродинамической трубе.

Определив для каждого момента времени значение угловой скорости ω, находят число модулей $Z=\frac{\omega R}{V}$, которое соответствует полученному крутящему моменту ветряка $M_{аэр}$, затем строят характеристики $M_{аэр}=f(Z)$ и $\xi=f(Z)$. Схема испытания ветроколеса в аэродинамической трубе представлена на рис. 69.

Модель ветряка *1* помещают в аэродинамическую трубу *2*, где вентилятором *3* создаётся воздушный поток. На валу модели имеется электрический контакт *9*, который замыкается один раз в течение одного оборота вала с контактом цепи электромагнита *4*, приводящего в действие перо *10* хронографа *6*. Барабан хронографа приводится во вращение от синхронного электромоторчика *7* через трансмиссию *8*. Для записи показаний пользуются закопчённой на керосиновой лампе бумагой, навёрнутой на барабан хронографа *6*. Запись имеет вид белых чёрточек на чёрном фоне. Барабан должен иметь постоянное число оборотов.

Скорость воздушного потока, создаваемого вентилятором, должна быть 10—12 м/сек. Как только в трубе установится равномерный поток, резко оттягивают упор, удерживающий модель ветряка в неподвижном состоянии. Под действием воздушного потока ветряк трогается с места и разбегается с ускорением; после некоторого промежутка времени он достигнет максимальных оборотов, называемых синхронными. При установившемся потоке число оборотов дальше не изменяется.

В момент разбега ветряка два пера *10* и *11* производят на закопчённой бумаге хронографа чёрточки: перо *10*

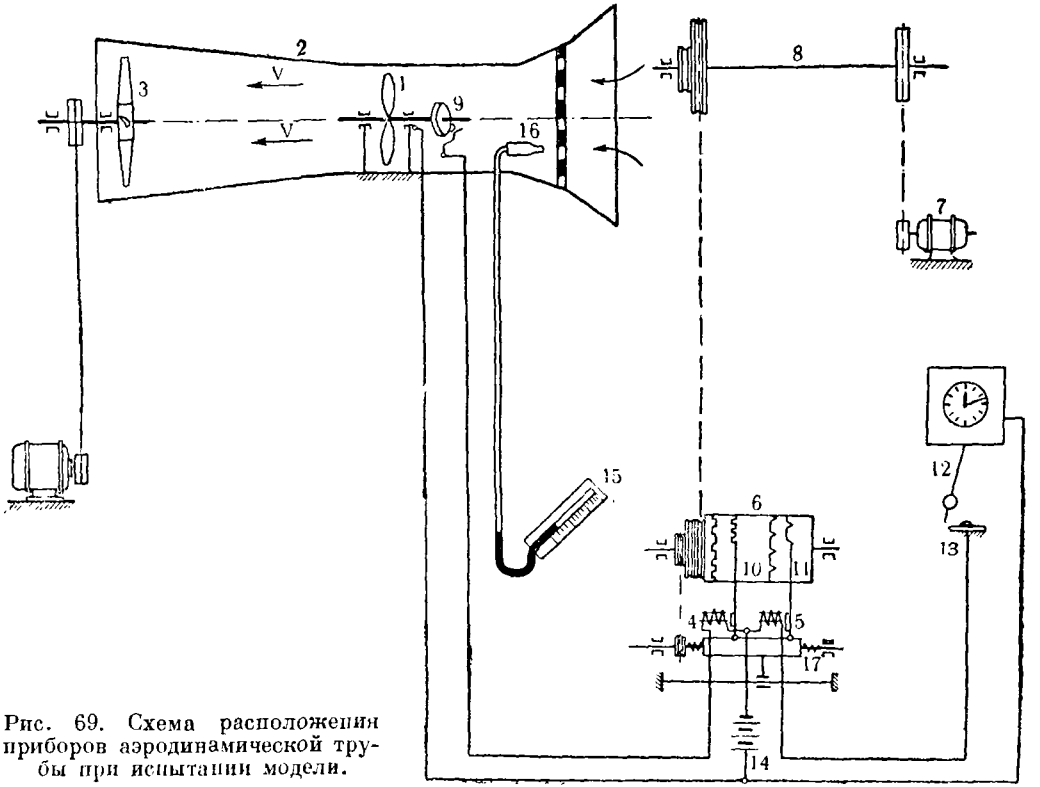


Рис. 69. Схема расположения приборов аэродинамической трубы при испытании модели.

делает отметки после каждого оборота вала модели ветряка, другое перо *11* делает отметки времени через каждую секунду. Это перо связано с часовым механизмом следующим образом: маятник *12* часов, проходя наинизшее положение, касается своим остриём капельки ртути *13* и через контакт замыкает цепь электромагнита *5*, приводящего в действие секундное перо *11*.

Одновременно с этим с помощью микроманометра *15*, присоединённого к трубке *16*, делают замеры скоростного напора воздушного потока в трубе, чтобы затем определить скорость. Каретка с перьями *10* и *11*

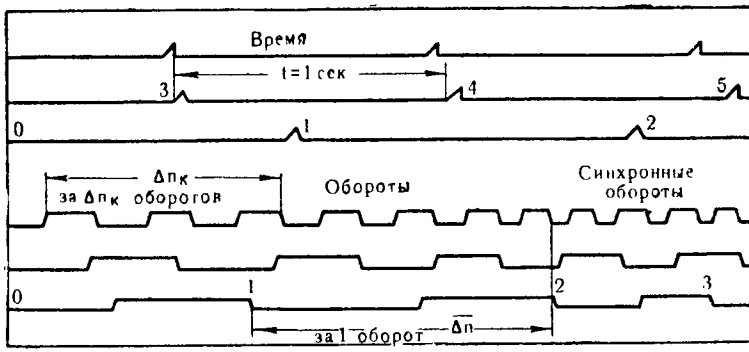


Рис. 70. Схема записи оборотов и времени.

перемещается параллельно оси барабана хронографа винтом *17*. Приборы получают электроток от аккумуляторной батареи *14*.

Опыт останавливают после того, как ветроколесо перейдёт на синхронные обороты, на что требуется не более 15 секунд.

После опыта снимают бумагу с хронографа и погружают её в раствор шеллака, который, высыхая, закрепляет копоть на бумаге и предохраняет запись от стирания. Схема записи показана на рис. 70.

Обработка результатов опыта. На бумаге, снятой с хронографа, находят, через сколько секунд t_p от начала вращения ветряк достиг синхронных оборотов. Секунды на схеме обозначены цифрами: 0, 1, 2, 3, 4, 5 и т. д. вверху. Синхронные обороты характеризуются равными длинами отрезков $\overline{\Delta n}$ записи между двумя смежными

отметками оборотов. На схеме эти отметки обозначены цифрами 0, 1, 2, 3 внизу.

Измерив длины отрезков каждой секунды за время разбега, находят среднюю длину $l_{ср}$, начерченную пером за одну секунду.

$$l_{ср} = \frac{\Sigma l}{t_p},$$

где t_p — число секунд, в течение которых ветряк разбегался.

Для определения угловой скорости разбега модели измеряют длину отрезков Δn между отметками первого, второго, третьего и т. д. до шестого или восьмого оборота. Далее измеряют отрезок сразу двух оборотов, затем трёх и т. д., постепенно увеличивая измеряемый участок Δn за Δn оборотов. Чем меньше разница отрезков двух соседних оборотов, тем ближе обороты подходят к синхронным.

Время Δt_k, в течение которого ветряк делал Δn оборотов на выделенном участке Δn_k, должно быть равно:

$$\Delta t_k = \frac{\Delta n_k}{l_{ср}} \cdot \frac{[мм]}{[мм]},$$

где: k — порядковый номер участка Δn_k, на котором было сделано Δn оборотов (рис. 70);

$l_{ср}$ — длина отрезка, соответствующая 1 сек.

Среднюю угловую скорость, которую развивал ветряк, делая Δn_k оборотов, соответствующих данному Δn_k отрезку, находим по уравнению:

$$\omega_k = \frac{2\pi\Delta n_k}{\Delta t_k} \left[\frac{\text{радиан}}{\text{сек.}}\right]$$

Принято считать, что среднюю угловую скорость ω_k ветряк имеет в середине промежутка времени Δt_k. Следовательно, среднюю угловую скорость ω_k ветряк развивает за время:

$$t_k = \Sigma_{\Delta t}^{k-1} + \frac{\Delta t_k}{2} \text{ [сек.]}$$

Определив значения ω_k и t_k для всех выделенных участков Δn, считая от начала движения и до наступления синхронных оборотов, строят кривую разбега $\omega = f(t)$ (рис. 71).

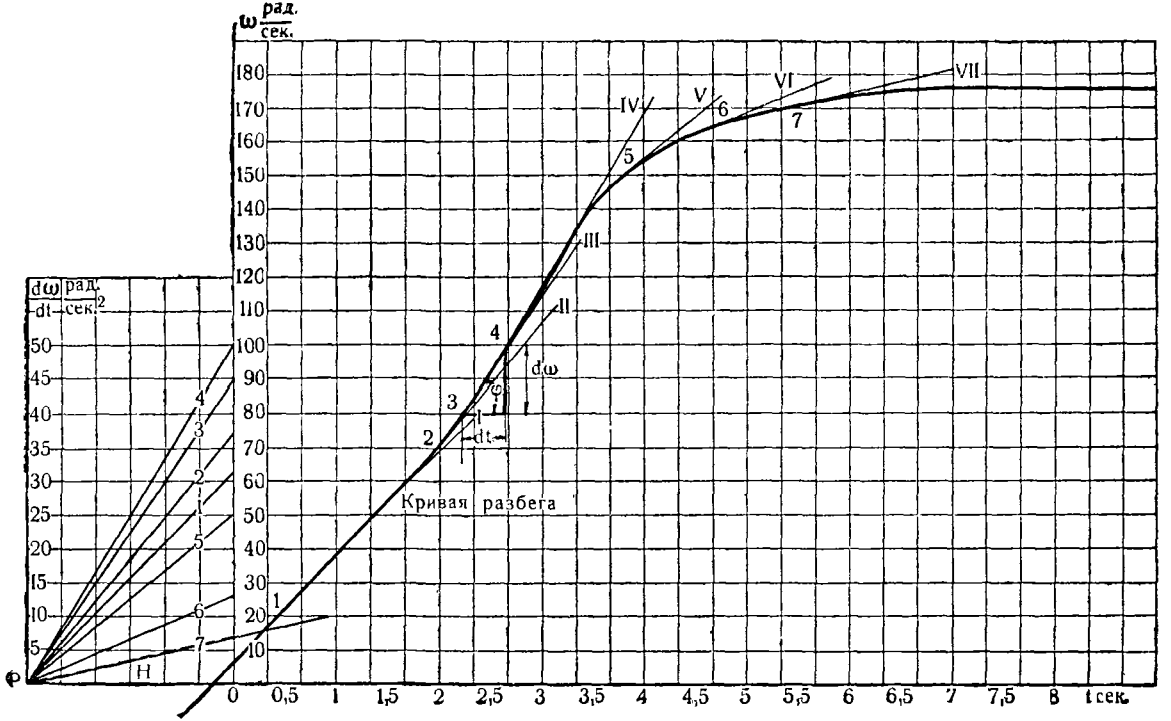


Рис. 71. Кривая разбега модели ветроколеса при продувке её в аэродинамической трубе и построение касательных для определения углового ускорения.

Следует заметить, что вал ветряка до момента первого замыкания контакта *9*, действующего на перо *10*, проходит промежуток времени Δt, величина которого зависит от первоначального взаимного положения вращающегося контакта *9* вала и контакта *13* часового механизма (рис. 69). Поэтому в момент времени $t=0$ (начала координат) угловая скорость может уже иметь некоторое значение, как это показано на рис. 71. Величина угловой скорости за этот промежуток времени определяется на оси ординат ходом левой части кривой разбега, которая должна проходить несколько выше нуля осей координат, не нарушая своего плавного хода.

По кривой разбега имеется возможность графически определить угловое ускорение $\frac{d\omega}{dt}$, соответствующее выбранным значениям времени t и угловой скорости ω. Для удобства подсчёта числа модулей $Z=\frac{\omega R}{V}$ величину $\frac{d\omega}{dt}$ определяют для круглых значений $\omega=10, 20, 30, 40$ и т. д.

Пример графического определения углового ускорения по кривой разбега $\omega=f(t)$ приведён на рис. 71. Выбираем на кривой ряд точек *1, 2,... 7*, через которые проводим касательные *I, II, ... VII*. На продолжении горизонтальной оси влево откладываем отрезок $OP=H$, который называют полюсным расстоянием, а точку P — полюсом. Из точки P проводим лучи *P—1, P—2... P—7*, параллельно проведенным касательным *I, II... VII*. Из графика (рис. 71) видим, что отрезки *01, 02, 03, 04* и т. д. по оси $\bar{\omega}$ будут пропорциональны угловым ускорениям в точках графика *1, 2, ..7*, так как из построения видно, что все они пропорциональны тангенсу углов φ наклона касательных, именно:

$$\overline{01}=H\operatorname{tg}\varphi_1;\quad \overline{02}=H\operatorname{tg}\varphi_2 \qquad \text{и т. д.}$$

Кроме того, истинные угловые ускорения также пропорциональны тангенсам углов наклона касательных на графике угловой скорости.

Поэтому мы можем принять отрезки $\overline{01}$, $\overline{02}$... и т. д. за масштабные значения угловых ускорений в соответствующих точках. Связь между истинной угловой скоростью и масштабной $\bar{\omega}$ определяется зависимостью:

$$\omega=k_\omega\bar{\omega},$$

аналогично

$$t = k_t \bar{t}.$$

Продифференцировав эти выражения, получим:

$$d\omega = k_\omega d\bar{\omega},$$
$$dt = k_t d\bar{t},$$

где $d\bar{\omega}$ элементарное масштабное перемещение, а $d\bar{t}$ — элементарное масштабное время, k_ω и k_t — масштабы угловой скорости и времени.

Так как $\frac{d\omega}{dt} = \operatorname{tg}\varphi$ (рис. 71), то и

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_\omega d\bar{\omega}}{k_t d\bar{t}} = \frac{k_\omega}{k_t} \operatorname{tg}\varphi.$$

Определим масштаб для углового ускорения.

Из построения графика (рис. 71) для масштабного углового ускорения, например, в точке *1*:

$$\frac{d\bar{\omega}}{d\bar{t}} = H \operatorname{tg}\varphi_1, \qquad \text{(а)}$$

так как:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_\omega}{k_t} \operatorname{tg}\varphi \qquad \text{(б)}$$

и

$$\frac{d\omega}{dt} = k_\varepsilon \frac{d\bar{\omega}}{d\bar{t}}, \qquad \text{(в)}$$

то, решая уравнения (а), (б) и (в) относительно k_ε, получим искомый масштаб:

$$k_\varepsilon = \frac{k_\omega}{H k_t}. \qquad \text{(г)}$$

Чтобы перейти к определению аэродинамического момента ветроколеса, необходимо знать его момент инерции относительно оси вращения.

Этот момент определяют на трёхнитяном подвесе по способу, предложенному проф. В. П. Ветчинкиным. Подвес представляет трёхлапчатую симметричную деревянную звёздочку, подвешенную на трёх нитях (рис. 72). Точки прикрепления нитей к звёздочке образуют равносторонний треугольник; таким образом, нити подвеса есть образующие кругового цилиндра с вертикальной осью. В центре звёздочки имеется отверстие, в которое

вставляется вал с закреплённой на нём моделью ветроколеса; ось вала совпадает с осью цилиндра. Надо иметь в виду, что модель после продувки на валу прибора не передвигается и угол $\varphi_{r=1}$ не меняется. Систему подвеса (нити—модель + звёздочка) уподобляют телу, подвешенному на упругом стержне, и осторожно поворачивают звёздочку около её вертикальной оси на малый угол и отпускают. При этом система испытывает колебания около вертикальной оси в горизонтальной плоскости, период которых определяют по формуле:

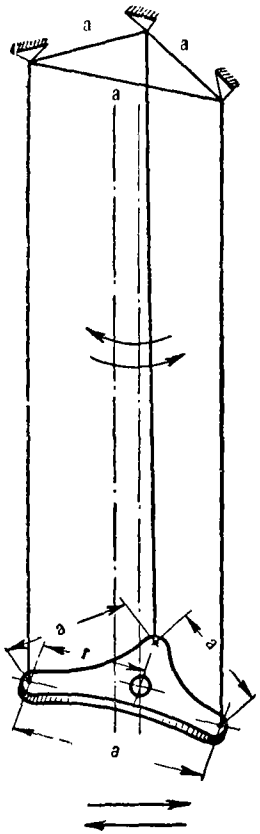


Рис. 72. Трехнитяной подвес.

$$T_в = \frac{\Sigma t_в}{n_в},$$

где $\Sigma t_в$ — время, в течение которого система сделала $n_в$ полных колебаний.

После этого отклоняют систему на малое расстояние в сторону на небольшой угол и отпускают; звёздочка начнёт описывать плоские колебания. Период этих колебаний, аналогично предыдущему, будет равен:

$$T_г = \frac{\Sigma t_г}{n_г}.$$

Получив периоды колебаний, определяют радиус инерции с помощью уравнения:

$$\rho = r\frac{T_в}{T_г},$$

где r — расстояние от центра звёздочки до точки крепления нитей.

Это выражение получено на основании следующего вывода. В. П. Ветчинкин в своей работе «Метод экспериментального определения моментов инерции твёрдых тел при помощи многонитного подвеса» даёт формулу определения периода колебания подвешенной системы для случая, когда все нити расположены на образующих

круглого цилиндра с вертикальной осью, параллельной оси, проходящей через центр тяжести:

$$T_в = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 l}{Mg\,(r^2 - c^2)}}, \qquad (а)$$

где r — радиус цилиндра, образующие которого — нити подвеса длиною l;

c — расстояние между центром тяжести тела и осью цилиндра.

Если центр тяжести тела расположен на оси нитей, то $c = 0$, что имеет место для нашего случая с 3-нитным подвесом, и уравнение (а) принимает вид:

$$T_в = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 l}{Mgr^2}}; \qquad (б)$$

отсюда момент инерции:

$$I_0 = \frac{T_в^2 Mgr^2}{4\pi^2 l}. \qquad (в)$$

Преобразуем в равенстве (в) выражение $\frac{Mgr^2}{4\pi^2 l}$, написав его в следующем виде:

$$\frac{Mgr^2}{4\pi^2 l} = Mr^2 \left(\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}\right)^2.$$

Но выражение в скобках есть единица, делённая на период колебания математического маятника, т. е.:

$$\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}} = \frac{1}{T_г},$$

следовательно

$$\frac{Mgr^2}{4\pi^2 l} = Mr^2 \frac{1}{T_г^2}.$$

Подставив правую часть этого равенства в уравнение (в), получим:

$$I_0 = Mr^2 \frac{T_в^2}{T_г^2}. \qquad (г)$$

Кроме того:

$$I_0 = M\rho^2, \qquad (д)$$

где ρ — радиус инерции.

Из равенств (г) и (д) находим:

$$Mr^2\frac{T_в^2}{T_г^2}=M\rho^2,$$

или

$$r^2\frac{T_в^2}{T_г^2}=\rho^2,$$

следовательно, радиус инерции равен:

$$\rho=r\frac{T_в}{T_г}.$$

Момент инерции системы подвеса равен:

$$I_{мод+зв}=(M+m)\rho^2=(M+m)\left(r\frac{T_в}{T_г}\right)^2,$$

где: M — масса модели;
m — масса звёздочки;
r — 0,0801 м для звёздочки аэродинамической лаборатории в Кучино.

Момент инерции модели должен быть равен моменту инерции системы подвеса с моделью за вычетом момента инерции звёздочки, т. е.:

$$I_{мод}=I_{мод+зв}-I_{зв}.$$

$I_{зв}$ для аэродинамической лаборатории в Кучино известен и равен:

$$I_{зв}=0{,}0000269 \text{ кг. м. сек}^2.$$

Так как относительный аэродинамический момент ветряка, согласно уравнению (114), равен:

$$\overline{M}=\frac{M_{аэр}}{\pi R^3\rho\frac{V^2}{2}},\quad M_{аэр}=I\frac{d\omega}{dt},$$

то:

$$\overline{M}=\frac{I_{мод}\frac{d\omega}{dt}}{\pi R^3\frac{\rho V^2}{2}}=\overline{I}\frac{d\omega}{dt},$$

где $\overline{I}=\frac{I_{мод}}{\pi R^3\frac{\rho V^2}{2}}$ — относительный момент инерции модели ветряка.

Перемножив все значения $\frac{d\omega}{dt}$ на величину $\overline{I}$, получим ряд значений относительного аэродинамического момента $\overline{M}$.

При определении скорости воздушного потока на основании показаний микроманометра необходимо принять во внимание атмосферное давление и температуру воздуха, а также поправочные коэфициенты микроманометра:

$$V = \sqrt{\frac{2L\frac{\Delta C_n}{\Delta b}C\zeta}{\rho_0}}, \qquad (150)$$

где: C — поправочный коэфициент данного микроманометра=0,106;

ρ_0=0,132 — массовая плотность воздуха при 0° и 760 мм давления атмосферы;

ΔC_n — поправочный коэфициент на спирт;

Δb — поправочный коэфициент на температуру и атмосферное давление:

$$\Delta b = \frac{273\,B}{760\,T};$$

ζ — коэфициент трубки микроманометра = 1,02;

L — высота жидкости в микроманометре сверх нулевого её положения;

$$L = L' - L_0,$$

где: L'— высота столба жидкости микроманометра в момент разбега:

L_0 — высота столба жидкости в микроманометре до создания напора.

Определив скорость воздушного потока, находят число модулей Z для каждой заданной ω, соответствующей ускорению $\frac{d\omega}{dt}$, найденному по графику 71:

$$Z = \frac{\omega R}{V}.$$

Имея $\overline{M}$ и соответствующие ему Z, легко построить характеристику $\overline{M}=f(z)$ и далее, пользуясь равенством $\xi=\overline{M}Z$, построить характеристику:

$$\xi = f(Z).$$

Испытания производят двукратно и для построения характеристики данной модели принимают средние величины из двух определений.

§ 26. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Кривые зависимости отвлечённого момента и коэфициент использования энергии ветра от числа модулей называют аэродинамической характеристикой ветродвигателя.

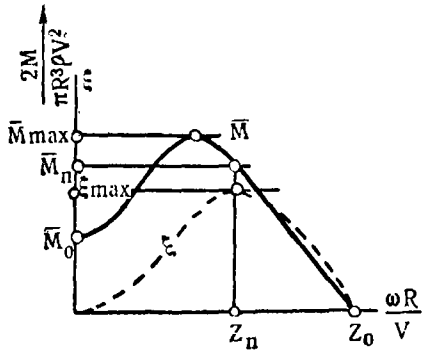


Рис. 73. Построение аэродинамической характеристики ветроколеса.

Основными величинами, характеризующими ветряк с аэродинамической точки зрения, по определению Г. Х. Сабинина, являются (рис. 73):

Z_n—нормальная скорость или нормальное число модулей, при котором $\xi = max$. Величина Z_n находится на оси абсцисс, против точки касания горизонтальной прямой с характеристикой ξ.

$\bar{M}_n$— нормальный относительный крутящий момент, развиваемый ветряком при нормальном числе модулей.

$\bar{M}_0$— начальный относительный момент или момент трогания с места; при этом $Z=0$.

$\bar{M}_{max}$—максимальный относительный момент, который может развить ветряк. Отношение $\frac{\bar{M}_{max}}{\bar{M}_n}$ называют перегрузкой ветряка.

Z_0 — синхронная скорость есть то число модулей, при котором $\bar{M}=0$.

Аэродинамические характеристики ветроколеса изменяются в зависимости от числа и формы лопастей, а также положения лопасти в потоке ветра.

Изменение характеристики ветроколеса при разных углах φ заклинения винтовой лопасти можно видеть на

Форма крыльев также сильно влияет на величину ξ. Обтекаемый профиль крыльев ветроколеса повышает ξ в большей мере, чем переменный угол заклинения.

На рис. 76 приведена характеристика четырёхлопастного ветряка, имеющего плоские лопасти с обтекаемым профилем при постоянном угле заклинения $\varphi=14°$, полученная продувкой модели в аэродинамической трубе. Сравнивая эту характеристику с характеристикой четы-

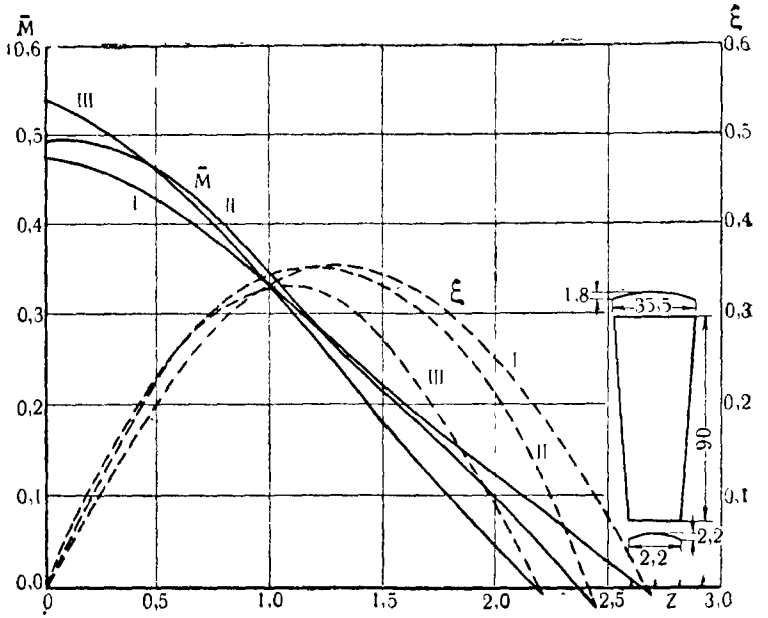


Рис. 74. Аэродинамическая характеристика 18-лопастного ветроколеса.

Таблица (к рисунку 74)

Название параметров	Опыты		
	I	II	III
Максимальный коэфициент использования энергии ветра ξ	0,35	0,35	0,33
Число модулей Z_n	1,30	1,20	1,05
Начальный крутящий момент $\overline{M}_0$.	0,48	0,50	0,54
Синхронная быстроходность Z_0 . .	2,60	2,40	2,10

рис. 74, где приведена характеристика модели 18-лопастного ветроколеса, полученная при трёх опытах со следующими углами φ заклинения лопастей:

№ опыта	Расстояние от оси $\bar{r}=\frac{r}{R}$		
	1.0	0,75	0,33
I	17°	26°	45°
II	20°	29°	48°
III	25°	34°	53°

Модель ветроколеса имела $\frac{r_0}{R}=0{,}33$ и $\frac{b_1}{b_2}=0{,}62$.

Сплошными линиями на рис. 74 изображены кривые $\overline{M}$, а пунктирными — кривые ξ, для трёх опытов, соответственно I, II и III.

Наилучшие показатели характеристики получены с меньшими углами заклинения (см. кривые $\overline{M}$ и ξ рис. 74 и таблицу).

Влияние формы крыла на характеристику ветроколеса показано кривыми на рис. 75, полученными в аэродинамической трубе для двух моделей ветроколеса 4-крылой ветряной мельницы. I модель имела плоские лопасти с постоянной шириною $b=0{,}283\ R$ и с постоянным углом заклинения:

$$\varphi=14^\circ;\ \text{при этом}\ \frac{r_0}{R}=0{,}2;$$

II модель с винтовыми лопастями, ширина их $b=0{,}357\ R=$ =Const, углы заклинения приведены в следующей таблице.

Сплошными линиями на рис. 75 изображены кривые $\overline{M}$, а пунктирными — кривые ξ.

I ветроколесо даёт максимальный коэфициент использования энергии ветра $\xi=0{,}17$; II ветроколесо даёт $\xi=0{,}316$.

Следовательно, лопасти с переменным углом заклинения и с изогнутым профилем имеют ξ почти вдвое больший, чем плоские лопасти ветряной мельницы с постоянным углом заклинения.

рёхлопастной ветряной мельницы, у которой лопасти также имеют постоянный угол заклинения $\varphi=14°$ (см. кривые *I* на рис. 75), находим, что коэфициент использования энергии ветра ветроколеса с обтекаемым

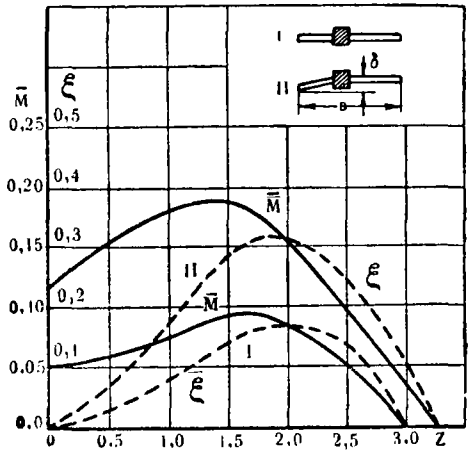


Рис. 75. Характеристика 4-лопастных ветроколёс:
I — с плоскими лопастями при угле заклинения $\varphi=14° = \text{Const}$;
II — с винтовыми лопастями.

Таблица (к рисунку 75)

Обозначения	Расстояние от оси $\bar{r}=\frac{r}{R}$				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Углы φ	29°15″	25°57″	22°23″	18°11″	15°15″
Стрелы прогиба $\frac{\delta}{b}$	0,0535	0,0367	0,0268	0,0214	0,0168

профилем крыльев в 2,3 раза выше, чем у такого же ветряка, но с лопастями в виде пластин, закреплённых на толстом махе.

Испытания моделей ветроколеса крестьянской мельницы с тремя различными профилями крыльев показали, что крыло этой мельницы с обтекаемым профилем, хотя бы с одной лишь задней стороны, повышает $\bar{\xi}$ почти в два раза (рис. 77). Объясняется это тем, что, чем лучше обте-

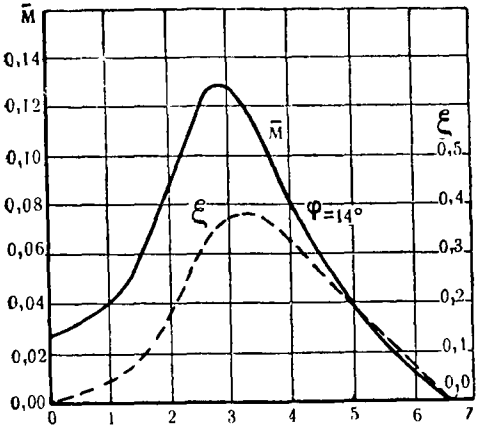


Рис. 76. Характеристика 4-лопастного ветроколеса с обтекаемыми плоскими лопастями. Угол заклинения $\varphi = 14° = \text{Const}$.

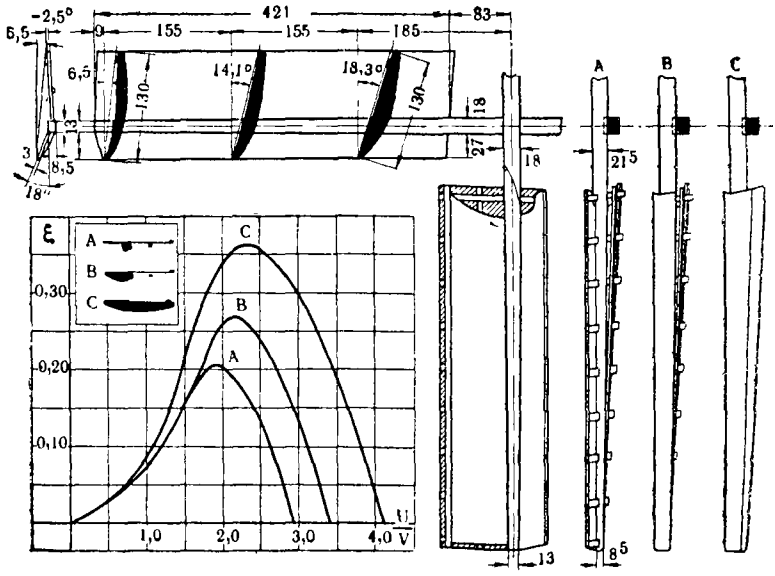


Рис. 77. Характеристика ветроколеса крестьянской ветряной мельницы с различными профилями лопастей крыла:

A — с плоскими лопастями; *B* — с обтекаемым носком; *C* — с обтекаемой спинкой лопасти.

каемость тела, тем меньше силы сопротивления, которые затормаживают вращение ветроколеса. Кроме того, хорошая обтекаемость крыла с задней стороны позволяет потоку в этой части протекать с более высокими скоростями без завихрений, вызывая более высокую подъёмную силу.

Установим далее влияние на характеристику числа лопастей и коэфициента заполнения k_3. Этот коэфициент представляет отношение площади лопастей к ометаемой поверхности ветроколеса. Обозначив коэфициент заполнения через k_3, площадь лопастей через S, ометаемую поверхность через F, получим:

$$k_3 = \frac{S}{F}.$$

Г. Х. Сабинин произвёл экспериментальные исследования четырёх моделей с различным числом лопастей и с различными коэфициентами заполнения ометаемых поверхностей, а именно:

Число лопастей	2	3	4	6
Коэфициент заполнения k_3	0,096	0,15	0,208	0,295

Профили испытанных лопастей показаны на рис. 80. Экспериментальные характеристики для этих ветряков приведены на рис. 78 и 79.

Рассматривая полученные характеристики, видим, что число лопастей очень мало влияет на коэфициент использования энергии ветра. Заметно некоторое повышение ξ лишь у шестилопастного ветряка. Однако это повышение нельзя отнести за счёт большого числа лопастей. Этому повышению могли быть причиной другие обстоятельства, которые трудно учесть в экспериментируемой модели. Отсюда следует, что мощность ветродвигателя не зависит от числа лопастей ветроколеса; она зависит только от диаметра ветроколеса, формы лопастей и положения их в потоке ветра. Изменение числа лопастей сильно отражается на быстроходности и начальном моменте ветроколеса. Например, согласно рис. 78, шестилопастный ветряк обладает нормальной быстроходностью $Z_n = 2{,}7$ и начальным моментом $\overline{M_0} = 0{,}067$, а двухлопастный имеет быстроходность $Z_n =$

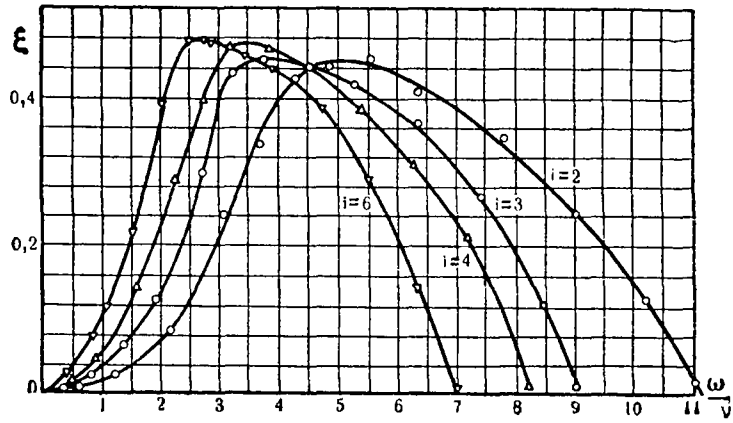


Рис. 78. Характеристика ветроколёс с различным числом лопастей.

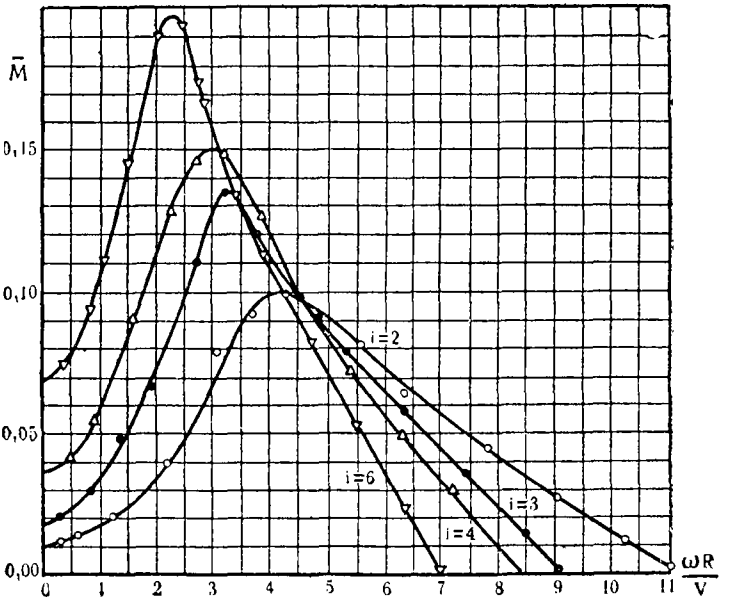


Рис. 79. Характеристика моментов ветроколёс с различным числом лопастей.

$=5$ (рис. 79) и $\overline{M}_0=0{,}01$. Таким образом, шестилопастный ветряк имеет быстроходность почти в 2,5 раза меньше, а начальный момент в 6,7 раза больше, чем эти же величины у двухлопастного ветроколеса. Если мы сравним приёмистость этих ветряков, которая представляет отношение начального момента к нормальному $\frac{\overline{M}_0}{\overline{M}_n}$, то получим у шестилопастного $\frac{\overline{M}_0}{\overline{M}_n}=\frac{0{,}067}{0{,}18}=0{,}37$, а у двухлопастного $\frac{\overline{M}_0}{\overline{M}_n}=\frac{0{,}01}{0{,}09}=0{,}11$. Таким образом, приёмистость у шестилопастного ветряка в 3,3 раза больше, чем у двухлопастного.

Ещё более отличается начальный момент многолопастных ветродвигателей от начального момента малолопастных. Например, у 18-лопастного ветряка $\overline{M}_0\cong 0{,}5$, у двухлопастного $\overline{M}_0=0{,}01$, т. е. в 50 раз меньше, чем у многолопастного. Зная аэродинамические характеристики и влияние различных факторов на основные величины их, мы можем правильно решать вопросы при разработке конструкции ветроколеса для определённых условий работы ветродвигателя. Например, для работы с генератором, который трогается с места с малым моментом, а работает с большим числом оборотов, лучше соответствует малолопастный ветряк, отличающийся большою быстроходностью и малым моментом трогания. Для работы же с поршневым насосом, нагружающим двигатель большим моментом при трогании с места и требующим малых оборотов, лучше соответствует многолопастный ветряк.

§ 27. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Проверка теории ветродвигателей была проведена проф. Г. Х. Сабининым [36]. Предварительно был проведён аэродинамический расчёт серии ветряков с числом лопастей $i=2, 3, 4$ и 6 по классической теории и по теории Г. Х. Сабинина. Модели были спроектированы с профилем лопастей «Эсперо» с увеличивающейся толщиной лопасти от конца ко втулке от $\frac{\delta}{b}=0{,}12$ до $\frac{\delta}{b}=0{,}24$. Коэфициент торможения для 2-лопастного ветряка был

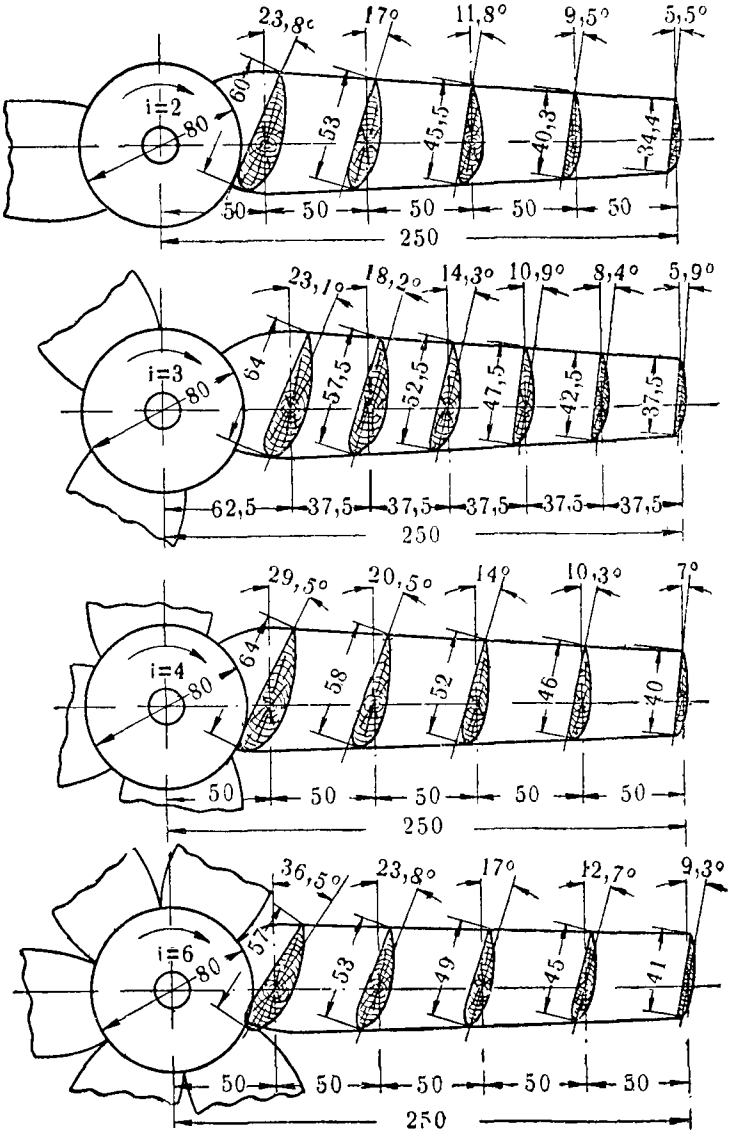


Рис. 80. Модели ветроколёс с различным числом лопастей.

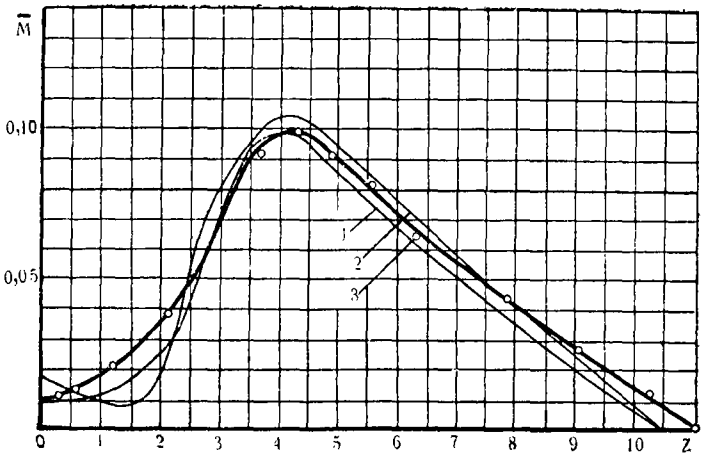


Рис. 81. Характеристики моментов теоретические и экспериментальные для 2-лопастной модели ветроколеса.

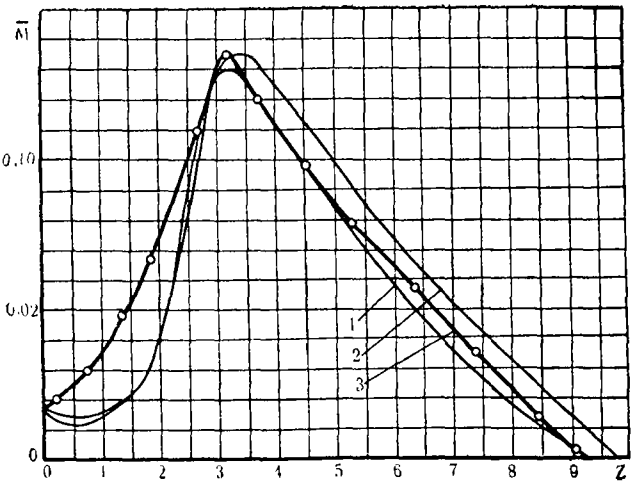


Рис. 82. Характеристики моментов для 3-лопастной модели ветроколеса.

принят $\frac{v_1}{V}=0{,}3$, для остальных $\frac{v_1}{V}=0{,}25$. Для каждого элемента по длине лопасти было принято $\frac{v_1}{V}=\text{Const}$. Конструкция моделей и размеры их приведены на рис. 80. В результате продувок моделей были получены характеристики, приведённые на рис. 81, 82, 83 и 84, где толстые линии *3* представляют опытные характеристи-

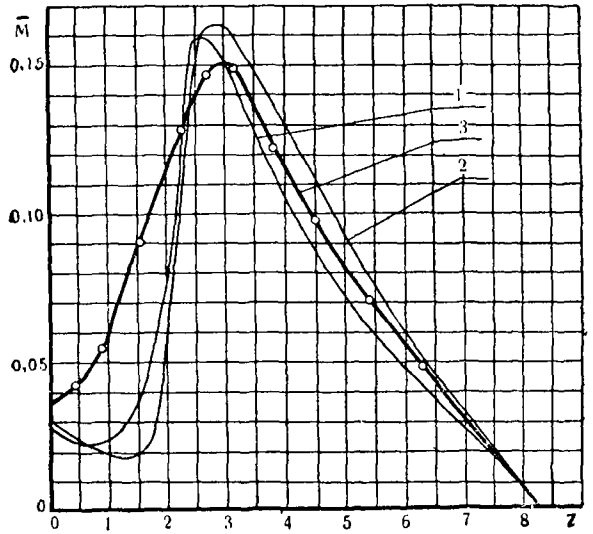


Рис. 83. Характеристики моментов для 4-лопастной модели ветроколеса.

ки моментов, тонкие *1* получены расчётом по классической теории и тонкие *2* получены расчётом по теории Г. Х. Сабинина.

При рассмотрении приведённых характеристик видим, что кривые, полученные по теории Г. Х. Сабинина, во всех случаях при $\frac{\omega R}{V}\gtrless 4$, т. е. в правой части графика идут выше экспериментальных, а кривые, полученные по классической теории, идут ниже, за исключением двухлопастного ветряка, у которого при числе модулей, близком к синхронным, обе теоретические кривые идут ниже экспериментальной.

Далее замечаем, что теоретические характеристики как по теории Г. Х. Сабинина, так и по классической теории

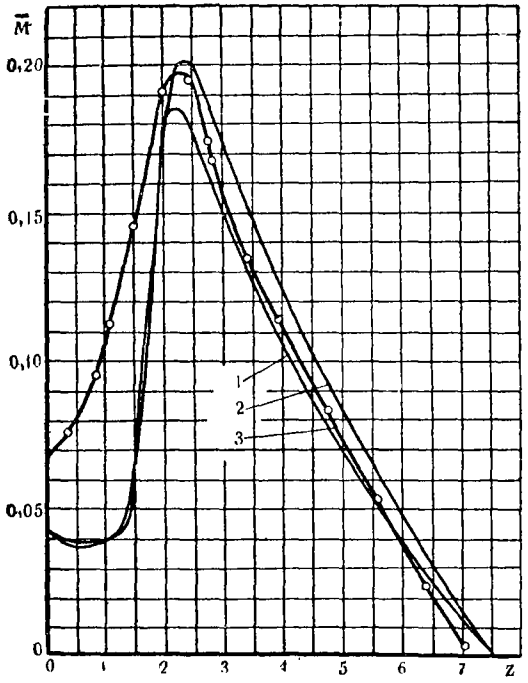


Рис. 84. Характеристики моментов для 6-лопастной модели ветроколеса.

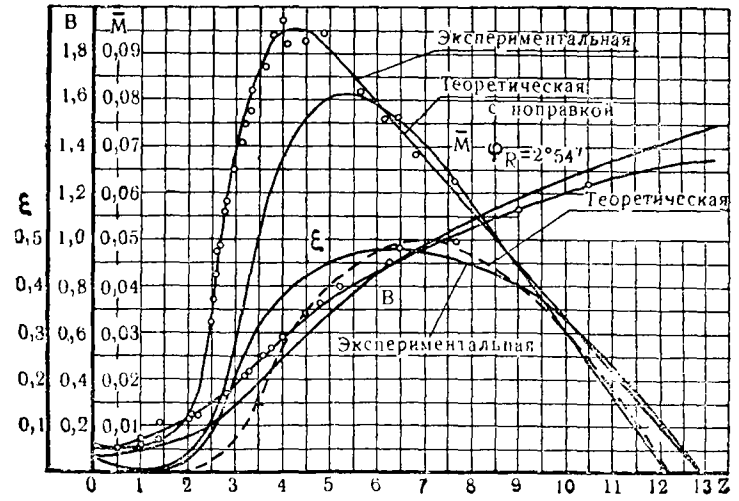


Рис. 85. Экспериментальная и теоретическая характеристика ветряка D=2,5 м; Z_n =7; i=3.

расходятся с экспериментальной весьма незначительно. Опытная кривая при $\frac{\omega R}{V} > 4$ является как бы средней кривой, проведённой между кривыми, рассчитанными по этим двум теориям.

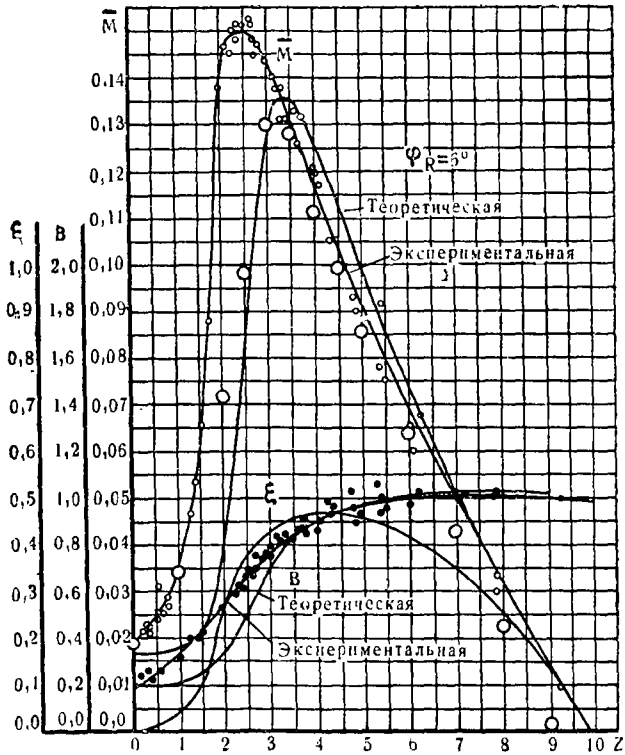


Рис. 86. Экспериментальная и теоретическая характеристика ветряка $D=2{,}2$; $Z_n=4{,}5$; $i=3$.

Рассматривая кривые при $\frac{\omega R}{V} < 4$, т. е. в левой части графика, видим совершенно иную картину. Обе теоретические кривые почти совпадают, но при этом идут значительно ниже опытной.

Аналогичные опыты были проведены в аэродинамической трубе $D=6$ м с двумя моделями ветряков более крупных размеров: одна модель трёхлопастного ветроколеса

имела $D=2{,}2$ м и $Z_л=4{,}5$; другая — тоже трёхлопастная, но с узкими лопастями и более быстроходная, имела $D=2{,}5$ м и $Z_л=7$. Эти опыты интересны тем, что, помимо характеристики моментов, были получены опытные характеристики осевого давления потока на ветроколесо. Экспериментальные и теоретические характеристики этих ветряков приведены на рис. 85 и 86, где тонкие кривые получены расчётом по теории Г. Х. Сабинина, а толстые с точками получены экспериментом. На рис. 86 нанесены кружки экспериментальной характеристики модели $D=0{,}5$, копию которой представляет модель $D=2{,}2$ м. Эти точки показывают, что экспериментальные характеристики обеих моделей в правой части расходятся очень незначительно и близко подходят к теоретической, в верхней и в левой части графика кривые сильно расходятся. То же самое замечаем и с кривыми коэфициентов B, характеризующих осевое давление. $B=\frac{2P}{\pi R^2\rho V^2}$, где P— сила осевого давления; эту величину, кроме того, называют лобовым давлением, а B — коэфициентом нагрузки. Интерес этих опытов заключается в том, что они подтверждают правильность как теории Г. Х. Сабинина, так и классической теории. Расхождения эксперимента с опытом на отдельных участках характеристик не могут вызывать сомнений в правильности этих теорий, так как эти расхождения настолько незначительны, что практически ими можно пренебречь.

ГЛАВА VII

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Экспериментальные испытания реальных ветроколёс на башне в естественном ветровом потоке ценны и необходимы, потому что получаемые при этом результаты в наибольшей мере отражают работу ветродвигателей в эксплоатации. Воздушный поток в аэродинамической трубе действует на модель с постоянной по величине и направлению скоростью, в то время как ветровой поток, набегающий на ветроколесо в реальных условиях, изменяется и по скорости и по направлению. Кроме того, ветроколёса имеют различные детали на крыльях, поставленные с целью регулирования числа оборотов, и крепления, которые не всегда можно выполнить на модели.

§ 28. ОБОРУДОВАНИЕ БАШНИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Испытание ветродвигателей в природных условиях производится на башнях, оборудованных специальными приборами и приспособлениями.

На рис. 87 показана верхняя часть опытной башни Ветросиловой лаборатории ЦАГИ, с расположением оси ветроколеса на высоте в 45 м [52].

Подобные опытные башни имеют ветродвигатель, состоящий из головки ферменной конструкции, а также различное электросиловое, измерительное и регистрирующее оборудование.

На рис. 88 показана схема электрического оборудования опытной башни. Динамомашина D постоянного тока мощностью от 1,75 до 4,75 квт при 900 до 1 275 об/мин.

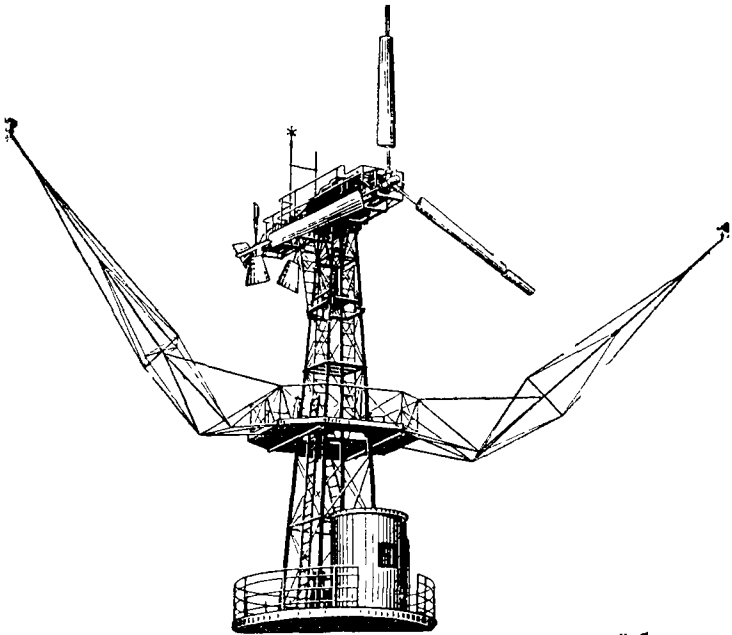


Рис. 87. Общий вид верхней части экспериментальной башни.

при напряжении 230 вольт имеет дополнительные полюса с независимым возбуждением и с противокомпаундной обмоткой *K*, которая может быть переключена на компаундную. Мотор-генератор мощностью 5,5 квт, при 1 425 об/мин., состоит из динамомашины постоянного тока с независимым возбуждением 230 вольт и из 3-фазного асинхронного мотора 220 вольт, присоединённого к электросети. Ветродвигатель *B* приводит в движение динамо *D*. Получаемый электроток через распределительный щит идёт в мотор мотор-генератора *M*. Эта машина работает, как мотор, и приводит в движение асинхронный

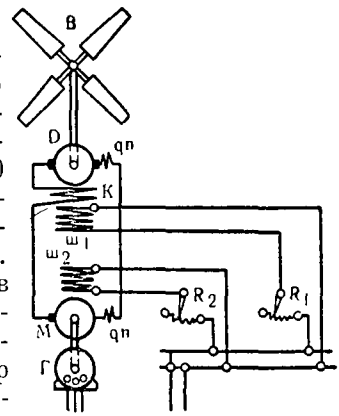


Рис. 88. Схема электрического оборудования.

генератор $Г$, который и отдаёт ток в сеть. Такая схема позволяет регулировать мощность и число оборотов ветроколеса в пределах от нуля до любых значений. Регулирование производится реостатами возбуждения динамо ветряка R_1 и мотор мотор-генератора R_2.

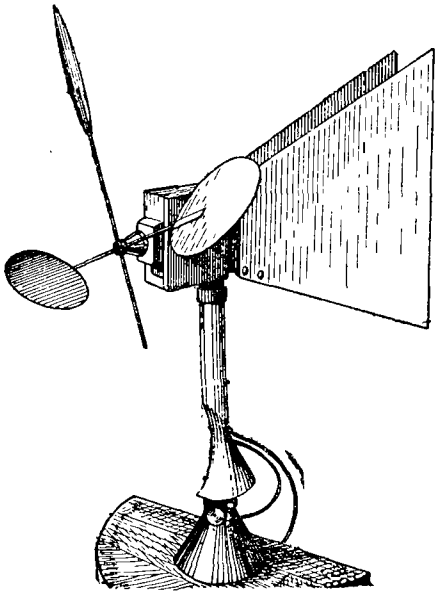


Рис. 89. Электроанемометр системы проф. Сабинина.

Измерительная аппаратура экспериментальной башни подобрана с таким расчётом, чтобы получить полную аэродинамическую характеристику ветряка. При испытаниях требуется измерять: мгновенные и средние скорости ветра, крутящие моменты и число оборотов ветряка.

Скорости ветра измеряются с помощью двух электроанемометров системы проф. Сабинина, построенных на принципе динамомашины постоянного тока (рис. 89). Запись скоростей производится на самопишущем вольтметре. Во избежание влияния ветроколеса на показания анемометров они устанавливаются на мачтах в плоскости ветроколеса, на расстоянии 20 м друг от друга, по обе стороны оси ветроколеса на равном расстоянии.

Схема измерения скорости ветра двумя электроанемометрами показана на рис. 90. Оба прибора последовательно включены на один самописец. Контрольное показание самописец пишет при снятых у электроанемометров лопастях. Вольтметр V служит для определения напряжения аккумулятора. При выключении вольтметра V и при положении переключателя на клемме P оба анемометра будут передавать суммарную электродвижущую силу на самописец.

Измерение скорости ветра в двух точках даёт более надёжные результаты. Так как энергия ветра пропорциональна кубу его скорости, то и ошибка в определении мощности возрастёт в этой же степени. Для большей точности следовало бы замерять скорость ветра не в двух, а во многих точках, однако замер чрезвычайно сложен.

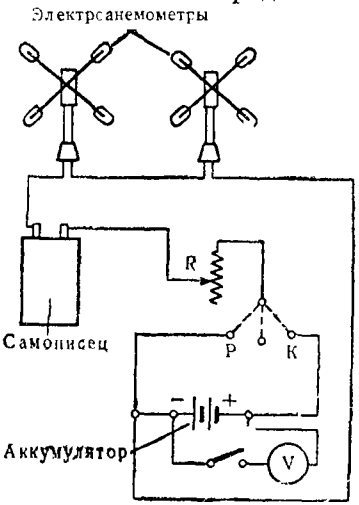


Рис. 90. Схема измерения скорости ветра двумя электроанемометрами.

Для измерения крутящего момента применён электродинамометр (рис. 91). Статор динамо и картер представляют одно целое и могут вращаться в подшипниках. На картере укреплён палец, который шайбами соединён с пружинами P_1 и P_2. Кроме того, к динамометру на стойках прикреплена щёточка C, скользящая по обмотке реостата реометра R_1. Под действием магнитного поля статор стремится опрокинуться и пальцем сжимает пружину либо P_1 либо P_2, в зависимости от того, в какую сторону отклонится статор. В этот момент щёточка C перемещается по реометру R_1, к которому через зажимы a и b проведён ток от батареи A. Миллиамперметр B с самописцем одной клеммой присоединён к клемме реостата a, другой через регулирующий реостат R_2 и переключатель E к щётке C. При установке переключателя на клемму *1* самописец покажет некоторое напряжение. Чем больше будет сжатие пружины, тем больше

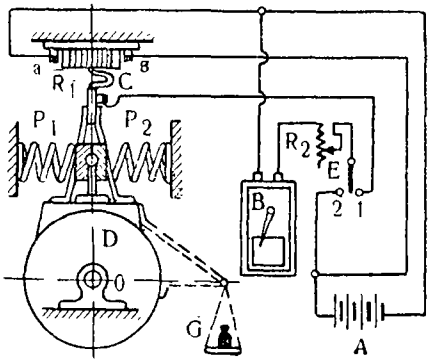


Рис. 91. Схема электродинамометра.

отклонится щёточка, тем большее показание будет на самописце. Установку переключателя на клемму *2* делают для проверки контрольного показания самописца и цепи.

Для смягчения ударов и получения более плавных записей самописца, к статору пристроен масляный демпфер с перепускным вентилем. Тарировка пружины P_1 и P_2 производится с помощью весовой чашки, подвешенной к рычагу, закреплённому на статоре. Плечо рычага равно 1,385 м, вес гирь — от 1 кг до 45 кг.

Число оборотов ветроколеса записывается с помощью тахометрической машины, схема которой дана на рис. 92.

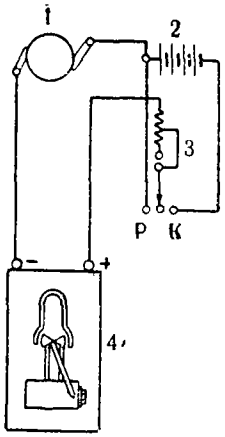


Рис. 92. Схема тахометрической машины.

Тахометрическая машина *1* ремённой передачей соединена через один из промежуточных валов редуктора с валом ветряка. Самописец *4* регистрирует обороты. Батарея *2* и реостат *3* служат для контрольных проверок.

Таким образом, при испытаниях производятся записи скоростей ветра, крутящих моментов и числа оборотов одновременно на самописцах электроанемометра, электродинамометра и тахометрической машины.

Обработка записей трёх наблюдаемых величин ведётся за каждую минуту. Средние значения показаний приборов определяют с помощью планиметра и вносят в бланки с рабочими формулами, по которым и подсчитывают искомые величины $\overline{M}$ и ξ. Эта обработка даёт одну точку характеристики.

При больших колебаниях вращения ветряка за минуту для крутящего момента вводится поправка на приращение живой силы вращающихся масс, определяемая по формуле:

$$\Delta\overline{M} = \frac{I_в}{2t} \cdot \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega}, \qquad (151)$$

где: $I_в$ — момент инерции ветроколеса;

ω_1 и ω_2 — угловые скорости вращения в начале и конце данной минуты;

ω — средняя угловая скорость ветряка за ту же минуту;
t — время опыта в минутах.

Приращение момента $\Delta \overline{M}$ есть средний момент аэродинамических сил за минуту, потраченный на увеличение живой силы вращающегося ветроколеса.

При обработке наблюдений и подсчёте характеристики учитывают барометрическое давление и температуру, от которых зависит массовая плотность воздуха.

§ 29. СООТВЕТСТВИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ И ЕГО МОДЕЛЕЙ

Проверка теоретической характеристики ветродвигателя делается путём испытания ветроколеса в природных условиях и его модели в аэродинамической трубе. Сравнивая теоретическую характеристику ветродвигателя с экспериментальными, выявляют степень расхождения этих характеристик.

Правильно рассчитанное ветроколесо при точных испытаниях должно давать экспериментальные характеристики, близкие к теоретическим.

Расхождение между этими характеристиками может быть вызвано в первую очередь тем, что ветроколесо, работающее в природных условиях, отличается от модели, испытываемой в аэродинамической трубе. На крыльях реального ветряка имеются различные устройства для регулирования числа оборотов и мощности, а также выступают крепления, обеспечивающие прочность ветродвигателя; обычно эти детали не воспроизводятся на моделях.

Одно из таких сравнительных испытаний проведено в ЦАГИ. Было построено 3-лопастное ветроколесо диаметром $D = 8$ м с числом модулей $Z_n = 4,5$ и с углом заклинения $\varphi = 6°$ на внешнем конце лопасти.

Профиль крыла был рассчитан для шести сечений с расположением их по винтовой линии и без каких бы то ни было органов управления на лопасти.

Конструкция крыла показана на рис. 93, и на рис. 94 даны его совмещённые сечения; они дают картину положения сечений лопасти относительно друг друга.

В нижеследующей таблице 9 приведены основные данные аэродинамического расчёта ветряка (расчёт произведён по теории Г. Х. Сабинина).

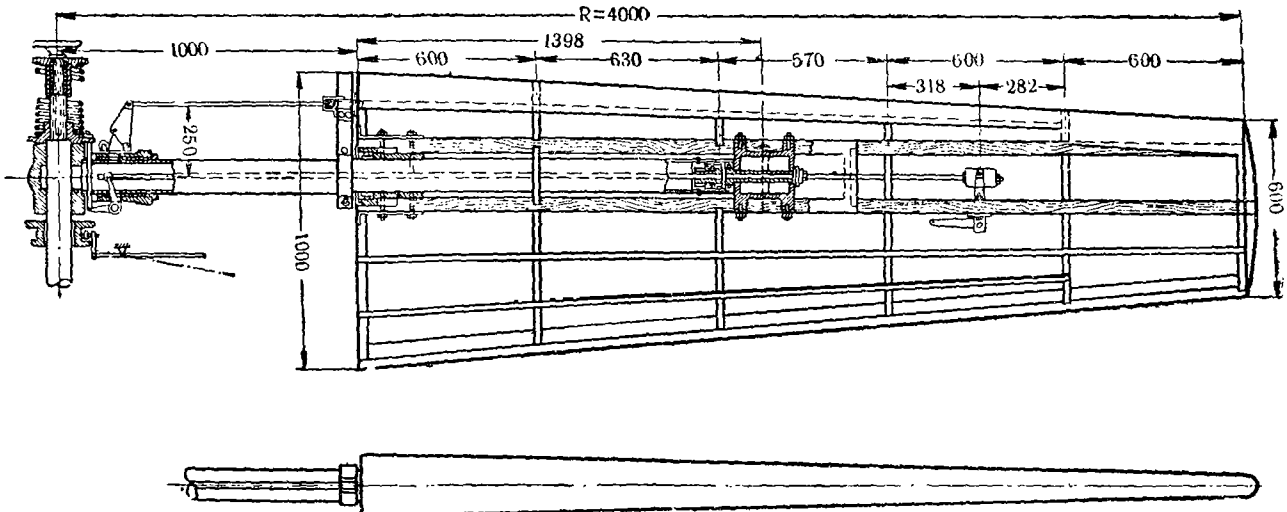


Рис. 93. Конструкция крыла экспериментального ветроколеса $D=8$ м, $Z_n=4{,}5$, $i=3$, $\frac{m}{b}=0{,}35$.

Таблица 9

$\frac{r}{r}$	Z	α^0	φ^0	$в$ м	Профиль «Эпперс» $\frac{s}{b}$	C_y	μ	$\frac{m}{b}$
1,0	4,50	2°15′	5°55′	0,60	0,12	0,698	0,0137	0,35
0,85	3,82	1°05′	8°26′	0,68	0,15	0,744	0,014	0,35
0,7	3,15	0°23′	11°05′	0,76	0,17	0,765	0,013	0,35
0,55	2,47	0°33′	14°17′	0,84	0,19	0,854	0,01	0,35
0,4	1,80	0°45′	18°05′	0,92	0,21	0,988	0,01	0,35
0,25	1,12	4°15′	23°05′	1,00	0,22	1,208	0,021	0,35

Аэродинамическая характеристика этого ветряка, полученная при испытании в природных условиях, показана на рис. 95.

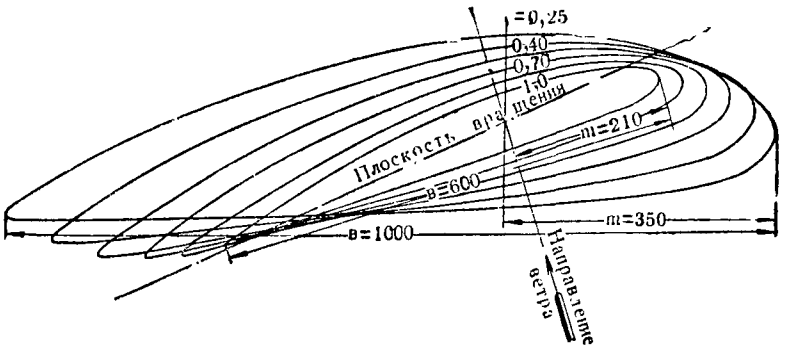


Рис. 94. Совмещение сечений лопасти крыла, показанного на рисунке 93.

Кроме того, было проведено испытание модели этого ветряка в аэродинамической трубе. Модель представляла полное подобие с ветряком D=8 м, испытанным в природных условиях.

Характеристики, полученные расчётом и испытанием ветряка в природных условиях и его модели в аэродинамической трубе, приведены на рис. 96, где *I* — теоретическая (пунктир); *II* — толстая сплошная, получена в аэродинамической трубе, и *III* — тонкая, получена при испытании ветроколеса в природных условиях.

Сопоставление кривых показывает достаточно хорошее совпадение теоретической и модельной характеристик и натуры. Теория дала $\xi_{max} = 0{,}497$; испытание модели в аэродинамической трубе дало $\xi_{max} = 0{,}47$ и в природных

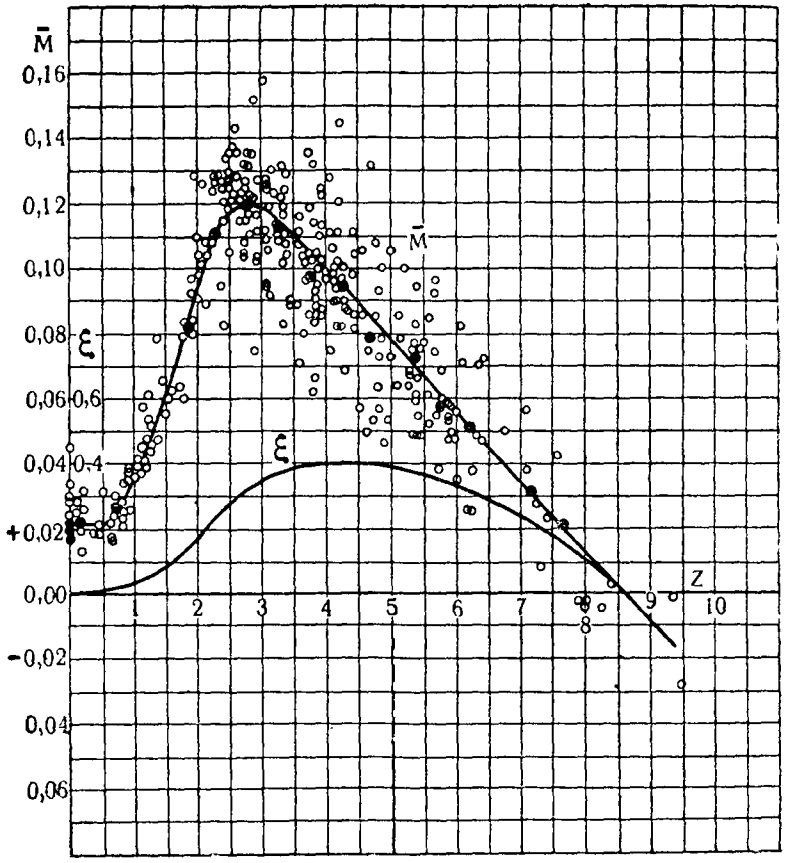


Рис. 95. Экспериментальные характеристики ветроколеса к рисунку 93.

условиях получено $\xi_{max} = 0{,}40$. Расхождения, как видим, невелики, что подтверждает правильность метода аэродинамического расчёта по данной теории.

Чтобы выяснить влияние угла заклинения φ на характеристику, были проведены испытания при разных углах

φ лопасти этого ветряка в природных условиях. Полученные характеристики в зависимости от угла заклинения лопасти φ показаны на рис. 97.

Метод испытания ветродвигателей в сельскохозяйственной эксплоатации несколько отличается от испытания ветродвигателей в лабораторных условиях. В хозяйственных условиях обычно проводят испытания

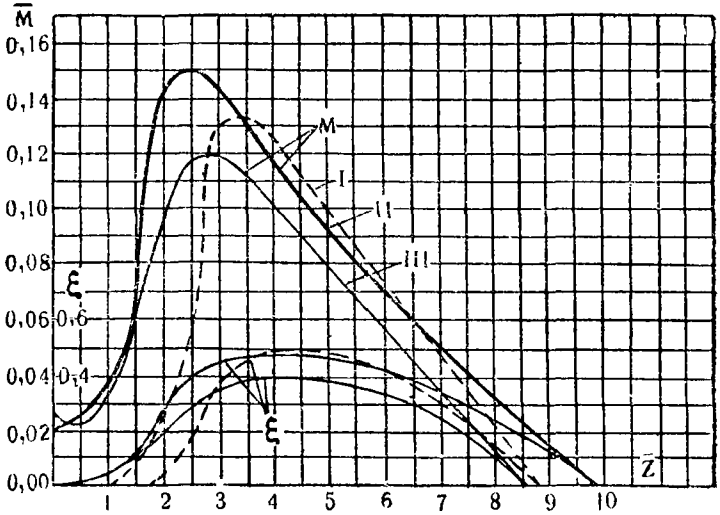


Рис. 96. Характеристики ветроколеса $D=8$ м; $Z_n=4{,}5$; $i=3$: *I* — теоретическая; *II* — по продувкам в аэродинамической трубе; *III* — по испытаниям в природных условиях.

целого ветросилового агрегата на определённом виде работы. В задачу этих испытаний входит получение характеристик сельскохозяйственных машин в зависимости от оборотов и отыскание наивыгоднейшего режима ветросилового агрегата на одном виде работы.

В результате испытаний необходимо разработать руководящие указания по эксплоатации данной машины с ветродвигателем.

В программу испытаний должно входить:

1) обследование условий хозяйственной эксплоатации ветроустановки;

2) составление её технической характеристики;

3) подготовка ветросилового агрегата к испытаниям соответственно местным условиям;

4) испытание ветроустановки с определением:

а) характеристики ветродвигателя при работе с тормозом ленточным или колодочным, если позволяют местные условия,

б) скоростей ветра, при которых ветродвигатель начинает работать, регулироваться и останавливается,

в) потерь на трение у ветродвигателя и в передаче к рабочим машинам,

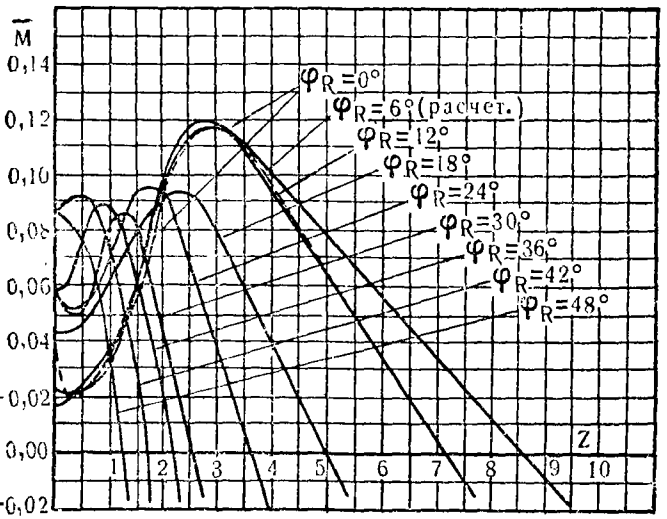


Рис. 97. Характеристики ветроколеса $D=8$ м, $Z_B=4{,}5$, $i=3$, испытанного при разных углах заклинения лопасти.

г) производительности ветросилового агрегата в зависимости от скорости ветра и оборотов ветроколеса,

д) характеристики рабочей машины, приключённой к ветродвигателю.

Результаты испытаний заносятся в протоколы, составляются сводные таблицы и строятся характеристики работы ветроустановки, на основании которых делаются выводы о целесообразности применения ветродвигателя для работы с данной машиной.

Подробности эксплоатационных испытаний ветроустановок изложены в книге автора «Методика испытания ветродвигателей, работающих с центробежными насосами и с сельскохозяйственными машинами», 1939 г.

ГЛАВА VIII

УСТАНОВ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ВЕТЕР

Ветер постоянно меняет своё направление, главным образом, в горизонтальной плоскости. Ветродвигатель наиболее эффективно работает в тот момент, когда скорость ветра направлена перпендикулярно к плоскости вращения ветроколеса. Таким образом возникает необходимость тем или иным способом заставить ветроколесо следовать за всеми изменениями направления воздушного потока.

Эти движения, сообразно направлению ветра, называются установом ветродвигателей на ветер.

У простейших ветродвигателей (кустарных) установ на ветер ветроколеса делают вручную, у более совершенных (заводского производства) ветроколесо устанавливается на ветер автоматически.

Ручной установ на ветер осуществляется либо обыкновенным рычагом, закрепляемым на поворотной части мельницы, либо с помощью зубчатой передачи. Более подробно этот вопрос освещён в главе о ветряных мельницах (§ 58 и 61).

Автоматический установ на ветер осуществляется следующими четырьмя способами: 1) хвостом, действующим аналогично флюгеру; 2) небольшими ветрячками, называемыми виндрозами и действующими на поворотную часть ветряка через зубчатую передачу; 3) расположением ветроколеса позади башни ветряка по принципу установа на ветер хвостом; 4) установ на ветер электромотором. Все эти способы установа на ветер применяются в практике.

§ 30. УСТАНОВ ПРИ ПОМОЩИ ХВОСТА

У маломощных ветродвигателей, до 15 л. с., ветроколесо устанавливается на ветер с помощью хвоста, который действует, как флюгер.

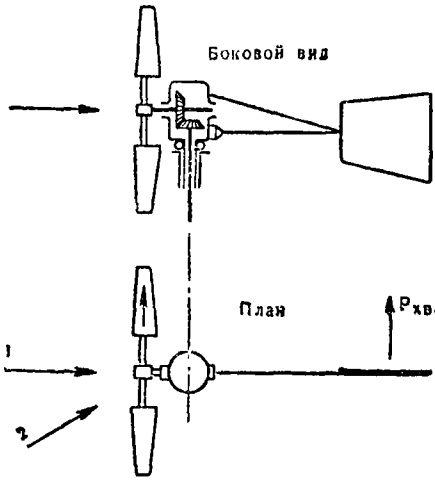


Рис. 98. Схема установа ветроколеса на ветер при помощи хвоста.

Когда ветер направлен перпендикулярно ветроколесу (направление *1* на рис. 98), на поверхности хвоста не возникает сил, которые отклоняли бы его в ту или другую сторону. Как только ветер изменится (направление *2* на рис. 98), на поверхности хвоста возникает боковая сила $P_{хв}$, которая поворачивает его, а вместе с ним и головку ветродвигателя около вертикальной оси. Этот поворот продолжается до тех пор, пока хвост станет параллельно, а плоскость вращения ветроколеса перпендикулярно направлению ветра.

На поворачивающуюся около вертикальной оси систему действуют следующие силы (рис. 99 и 100):

1) сила на поверхности хвоста при отклонениях ветра до $\gamma = \pm 20°$ равна:

$$P_{хв} = C_R F_x \frac{\rho V^2}{2} \left(\frac{1-e}{1+e}\right)^2, \qquad (152)$$

где $\left(\frac{1-e}{1+e}\right)^2$ — коэфициент, учитывающий потерю скорости воздушного потока за ветроколесом;

2) аэродинамические силы на ветроколесе:

$$Y = \bar{y}\pi R^2 \rho \frac{V^2}{2}, \qquad (153)$$

$$X = \bar{x}\pi R^2 \rho \frac{V^2}{2}, \qquad (154)$$

где: R — радиус ветроколеса;

$\bar{y}$ и $\bar{x}$ — коэфициенты аэродинамических сил, которые устанавливаются опытным путём при продувке всего вет-

роколеса. Эти коэфициенты аналогичны коэфициентам C_y и C_x, которые получают продувкой лопасти.

На рис. 101 и 102 даны графики изменения $\bar{y}$ и $\bar{x}$ для многолопастного и малолопастного ветроколёс, а на рис.

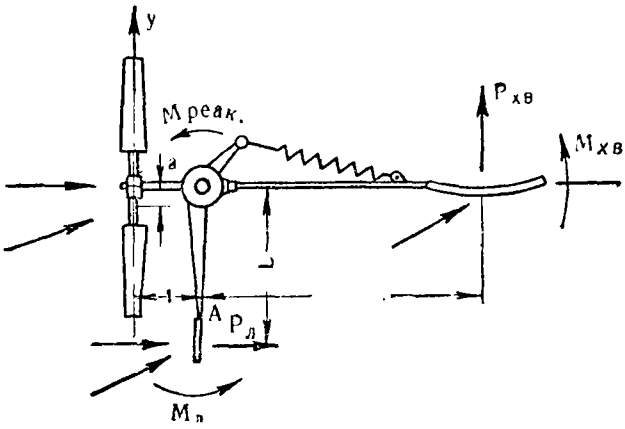


Рис. 99. Схема действия сил на ветряк, имеющий боковую лопату.

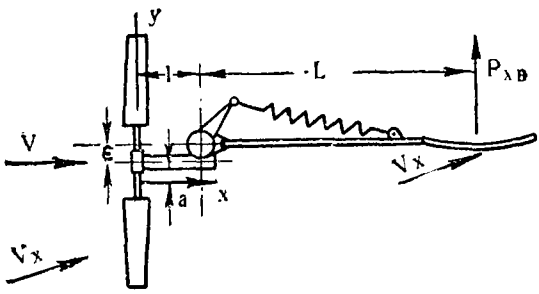


Рис. 100. Схема действия сил на ветряк, ось которого смещена относительно вертикальной оси башни.

103 и 104 даны графики для определения точек приложения сил X, направленных параллельно оси вращения ветроколеса. Эти кривые построены на основании экспериментальных исследований в аэродинамической трубе, проведённых И. В. Смирновым, и могут служить руководством при подсчёте аэродинамических сил на ветроколесе.

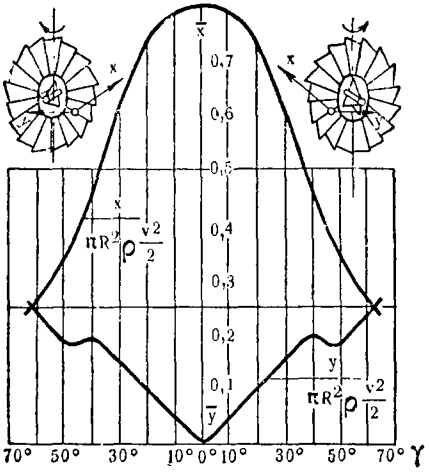


Рис. 101. Кривые коэфициентов Y и X аэродинамических сил, действующих на многолопастное ветроколесо в зависимости от угла поворота ветряка от нормального положения M = Const, n = =624 об/мин, Z_n=1,4.

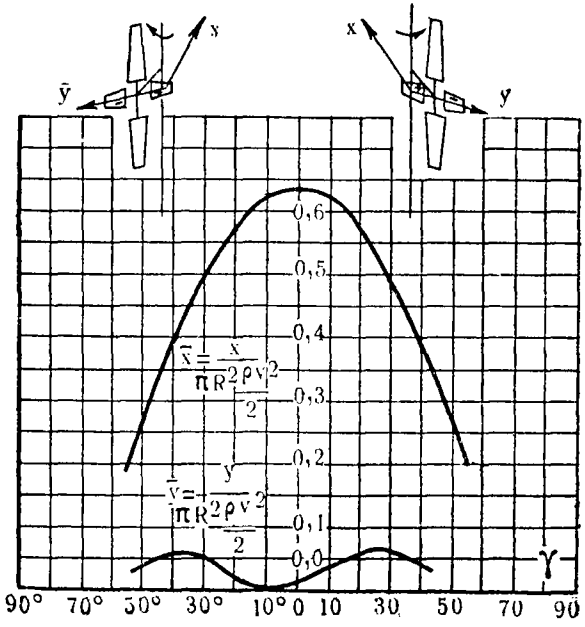


Рис. 102. Кривые коэфициентов $\overline{Y}$ и $\overline{X}$ аэродинамических сил модели 4-лопастного ветряка «Сюр» без хвоста с нагрузкой в зависимости от угла поворота ветряка от нормального положения к ветру; n=1 860 об/мин., Z_n=5.

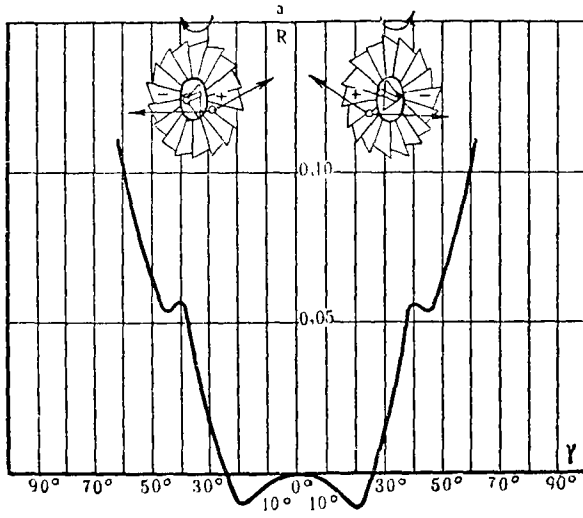


Рис. 103. Кривые центров давления $\bar{a} = \frac{a}{R}$ 18-лопастного ветряка к рисунку 101.

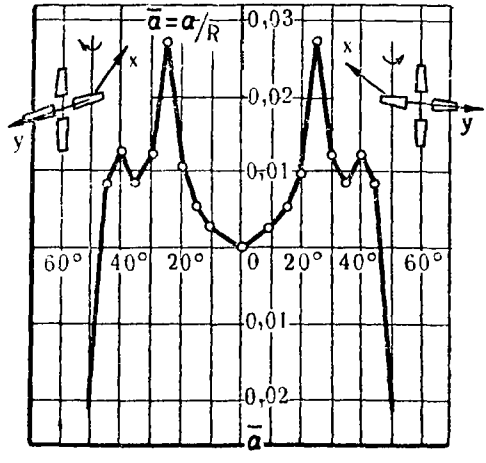


Рис. 104. Кривые центров давления $\bar{a} = \frac{a}{R}$ 4-лопастного ветряка «Сюр» без хвоста с нагрузкой в зависимости от угла γ. Обороты модели $n=1860=\text{Const}$; $Z=5$; к рисунку 102.

Сила на поверхности, закреплённой сбоку позади ветроколеса с целью регулирования (о регулировании см. § 33, рис. 119), равна:

$$P_л = C_R F_л \frac{\rho V^2}{2}. \qquad (155)$$

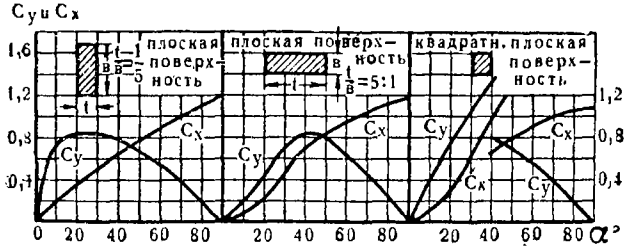


Рис. 105. Изменение коэфициентов C_y и C_x пластинок в зависимости от угла α.

В уравнениях (152) и (155) C_R — коэфициент силы сопротивления, которая является равнодействующей сил подъёмной и сопротивления, возникающих на поверхности при действии на неё потока под некоторым углом α.

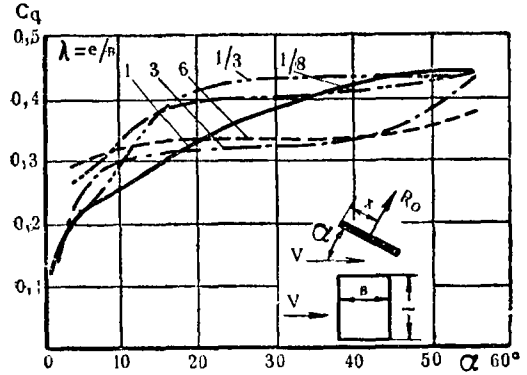


Рис. 106. Кривые центра давления плоских пластинок по Эйфелю.

Величина коэфициента равнодействующей силы равна:

$$C_R = \sqrt{C_y^2 + C_x^2}. \qquad (156)$$

Коэфициенты C_y и C_x для пластинок можно брать по кривым рис. 105.

При решении уравнений (152) и (155) мы принимаем направление равнодействующих сил сопротивления $P_{хв}$ и $P_л$ перпендикулярным к поверхности, что не совсем верно. Равнодействующая сила сопротивления поверхности, наклонной под углом $\alpha°$ к потоку, составляет некоторый угол $0°$ с перпендикуляром. Этот угол, однако, настолько мал, что практически можно считать равнодействующую силу нормальной к поверхности. (При углах $\alpha \geqslant 10°$ угол отклонения равнодействующей R не превышает $0 = 1°$).

Далее нужно заметить, что точка приложения этой силы изменяется с изменением угла атаки. Положение её на поверхности определяется с помощью уравнения (44а) и рис. 106, где приведены кривые изменения центра давления для пластинок с различными отношениями l длины пластинки к её хорде $b\left(\lambda = \frac{l}{b} = 1;\ 3;\ 6;\ 1/3;\ 1/6\right)$.

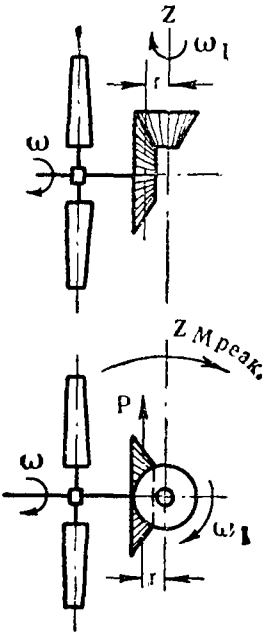


Рис. 107. Схема действия реактивного момента передачи.

Силы $P_{хв}$, Y, X и $P_л$, выражаемые уравнениями (152), (153), (154) и (155), создают относительно вертикальной оси моменты, удерживающие систему в равновесии:

$$M_{хв} = P_{хв} L. \tag{157}$$

$$\left.\begin{aligned} M_л &= P_л L' \\ M_y &= Yl \\ M_x &= Xa \end{aligned}\right\} \text{ (по рис. 99)} \tag{158}$$

$$M_x = X(\varepsilon \pm a) \text{ (по рис. 100)}, \tag{159}$$

где: a — расстояние центра давления от оси вращения ветроколеса; берется с $+$ при положении центра давления справа оси вращения ветроколеса и с $-$, если он занимает положение слева оси ветроколеса;

ε — величина смещения оси ветроколеса относительно оси башни (рис. 100);

L и L' — расстояние от оси поворота головки до центра давления поверхности соответственно хвоста и лопаты.

У ветродвигателей с вертикальным вращающимся валом весьма существенное влияние на положение ветроколеса относительно направления ветра оказывает момент реактивной силы зубьев шестерни вертикального вала. Этот момент называют реактивным моментом. Он стремится повернуть головку ветродвигателя относительно вертикальной оси (рис. 107).

Окружное усилие ведущей шестерни вызывает реактивную силу P_p, действующую на плече r относительно вертикальной оси. Эта сила создаёт крутящий момент всей головки, имеющей возможность повернуться около вертикальной оси. Величина реактивного момента определяется с помощью уравнения:

$$M_p = 716{,}2\frac{N}{n} \text{ кгм}, \qquad (160)$$

где: N — мощность ветродвигателя в л. с.;

n — число оборотов в минуту вертикального вала при данной мощности.

Из уравнения (160) видим, что реактивный момент равен крутящему моменту вала ветродвигателя.

Наша система будет в равновесии, когда сумма моментов действующих на неё сил относительно вертикальной оси Z—Z равна нулю, т. е:

$$\Sigma M_{zz} = M_{хв} + M_л - M_y + M_x - M_p = 0$$

для схемы, показанной на рис. 99, и

$$\Sigma M_{zz} = M_{хв} - M_y + M_x = 0$$

для схемы, показанной на рис. 100.

Из этих уравнений получаем моменты хвоста для систем, показанных на рис. 99 и 100.

$$M_{хв} = M_y + M_p - M_л - M_x, \qquad (161)$$

$$M_{хв} = M_y - M_x. \qquad (162)$$

Силы, вызывающие эти моменты, даются уравнениями (152), (153), (154) и (155).

Как влияет положение системы в потоке ветра на величину моментов, вызываемых действием ветра на поверх-

ность хвоста и ветроколесо, можно проследить по экспериментальным кривым, полученным И. В. Смирновым.

На рис. 108 даны экспериментальные кривые моментов для случая, когда ветроколесо не изменяет первоначального положения, т. е. хвост жёстко связан с головкой ветряка.

На рис. 109 и 110 показаны кривые относительных моментов для ветродвигателей, регулирующихся по системе «Эклипс» с лопатой и без неё (о регулировании см. § 33).

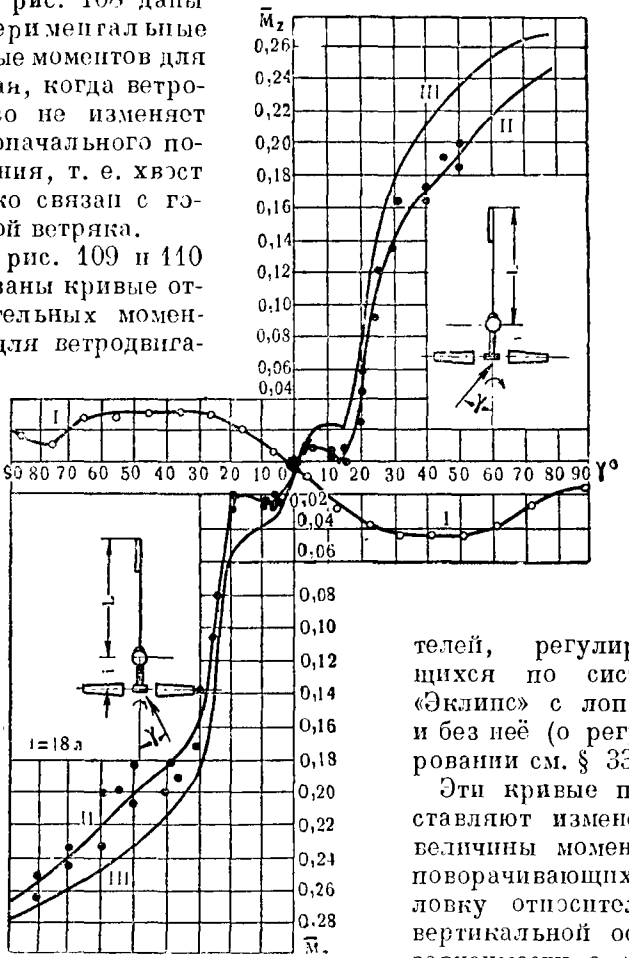


Рис. 108. Кривые моментов сил, действующих на систему ветряка при изменениях направления ветра.

Эти кривые представляют изменение величины моментов, поворачивающих головку относительно вертикальной оси в зависимости от угла γ между осью вращения ветроколеса и направлением ветра.

Относительным (безразмерным) моментом $\bar{M}_z$ называют отношение размерного момента M_z, найденного экспериментом, к ометаемой поверхности ветроколеса πR^2, к

радиусу ветроколеса R и к скоростному напору $\frac{\rho V^2}{2}$, т. е.:

$$\overline{M}_z = \frac{M_z}{\pi R^3 \frac{\rho V^2}{2}}, \qquad (163)$$

где: M_z — размерная величина момента в кгм;
R — радиус ветроколеса в м.

Из уравнения (163) размерный момент равен:

$$M_z = \overline{M}_z \pi R^3 \rho \frac{V^2}{2}. \qquad (164)$$

Кривые моментов, показанные на рис. 108, 109 и 110, получены для моделей со следующим отношением конструктивных размеров системы:

Вылет ветроколеса	$\frac{l}{D} = 0{,}125$ для кривых рис. 108
То же	$\frac{l}{D} = 0{,}167$ для кривых рис 109 и 110
Вылет поверхности хвоста, считая от оси поворота до внешнего конца поверхности	$\frac{L}{D} = 1{,}0$ для всех кривых
Эксцентриситет между осью вращения ветроколеса и осью поворота головки	$\frac{\varepsilon}{D} = 0$ для кривых рис. 108
Эксцентриситет между осью вращения ветроколеса и осью поворота головки	$\frac{\varepsilon}{D} = 0{,}04$ для кривых рис. 110
Отношение поверхности хвоста f к ометаемой поверхности ветроколеса F	$\frac{f}{F} = 0{,}129$ для всех кривых

На рис. 108 и 110 кривая I представляет аэродинамический момент $\overline{M}_z$ ветроколеса, кривая II — суммарный момент $\overline{M}$ ветроколеса и хвоста, и кривая III — момент одного хвоста (в зависимости от угла γ между направлением ветра и осью вращения ветроколеса). На рис. 109 дана кривая суммарного момента M_z ветроколеса, хвоста и боковой лопаты с квадратной поверхностью (стороны квадрата 0, 177 D).

Сопоставляя кривые рис. 108 с кривыми рис. 109 и 110, замечаем, что в наиболее благоприятных условиях находится ветроколесо по отношению к ветру, когда ветродвигатель не имеет дополнительных устройств, преду-

сматривающих отклонение ветроколеса с целью регулирования (рис. 108). В этом случае при отклонении ветра на незначительный угол уже имеется момент, позволяющий сейчас же повернуть систему и поставить ветроколесо против ветра (см. кривую *III*).

При наличии же поверхности или эксцентриситета между вертикальной осью и осью ветроколеса появляется момент,

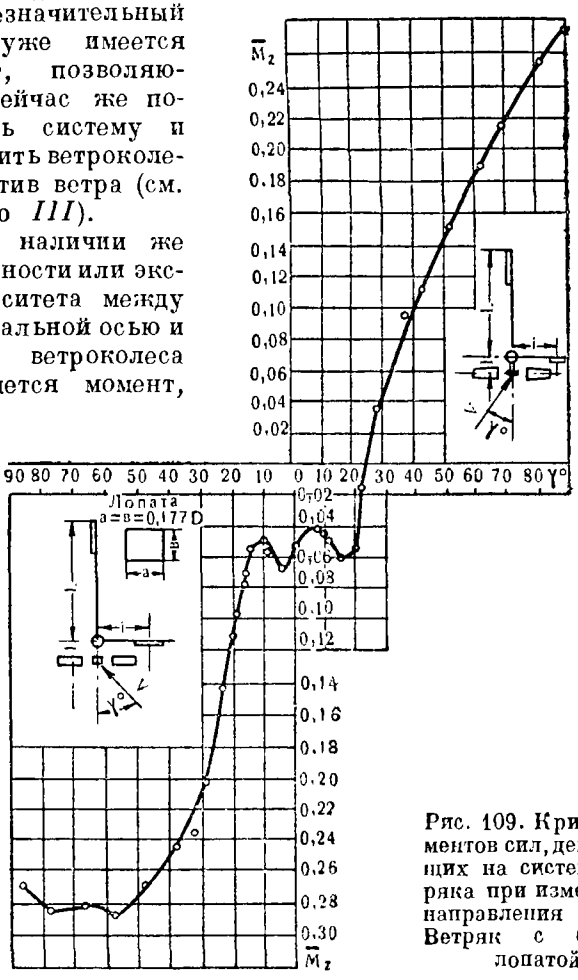


Рис. 109. Кривые моментов сил, действующих на систему ветряка при изменениях направления ветра. Ветряк с боковой лопатой.

который отклоняет ветроколесо от прямого воздействия на него ветра. В этом случае суммарная кривая *II* моментов не проходит через 0 начала координат (рис. 109 и 110). При угле $\gamma = 0$ имеется отрицательный момент, который отклоняет ветроколесо. И только при угле

$\gamma = 20°$ суммарный момент становится положительным (рис. 110) и система приобретает устойчивое положение.

Для компенсации отрицательного момента делают поверхность хвоста в виде дужки с выпуклостью в сторону направления регулирующей поверхности или эксцентриситета. Такой хвост позволяет до некоторой степени компенсировать отрицательный момент и уменьшить

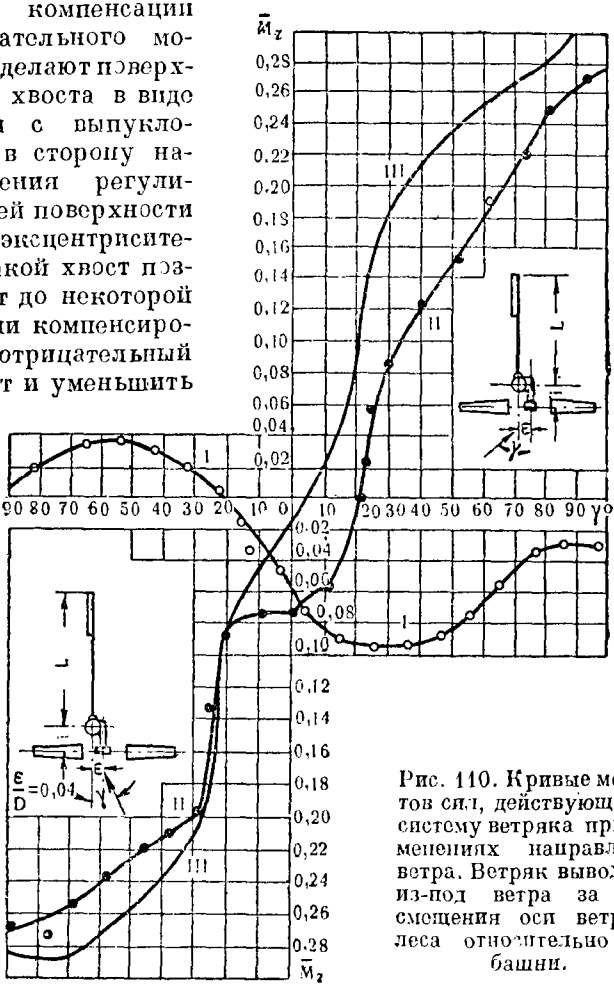


Рис. 110. Кривые моментов сил, действующих на систему ветряка при изменениях направления ветра. Ветряк выводится из-под ветра за счёт смещения оси ветроколеса относительно оси башни.

угол отклонения ветроколеса. С этой же целью в практике делают отклонение хвоста на некоторый угол φ (от 5° до 6°) от направления оси ветроколеса в противоположную сторону направления регулирующей поверхности или эксцентриситета (рис. 111).

Заметим, что это мероприятие компенсирует также реактивный момент M_p, который имеет место у ветродвигателей с вращающимся вертикальным валом.

Отличительной особенностью установа ветроколеса на ветер хвостом является то, что хвост быстро реагирует на все изменения направления ветра. Таким образом, обеспе-

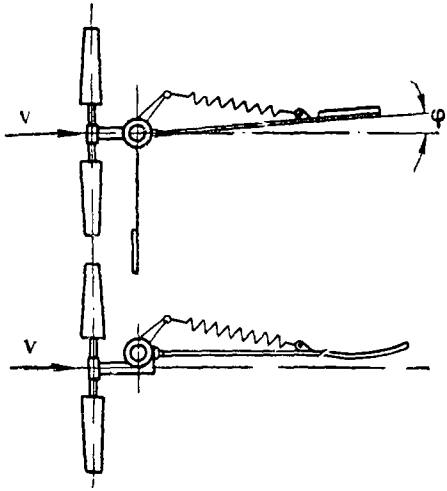


Рис. 111. Перекос хвоста относительно направления ветра с целью компенсации моментов от боковой лопаты и ветроколеса.

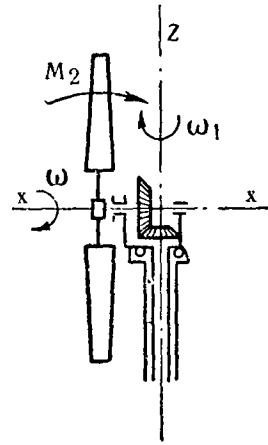


Рис. 112. Схема действия гироскопического момента на ветроколесо.

чивается возможность ветроколесу в процессе работы более длительное время находиться под прямым воздействием воздушного потока. Это имеет чрезвычайно важное значение, так как ветродвигатель может развить полную мощность лишь в том случае, когда поток ветра направлен перпендикулярно плоскости вращения ветроколеса.

Но вместе с тем быстрое реагирование хвоста на все изменения направления ветра имеет и отрицательную сторону. При повороте головки ветродвигателя на крыльях ветроколеса, во время его вращения возникают гироскопические силы. Последние создают изгибающий момент, называемый в практике ветроиспользования гироскопическим моментом [34]. Этот момент изгибает махи крыльев и ось ветроколеса (рис. 112).

Момент, изгибающий мах крыла, в течение одного оборота становится два раза равным нулю, когда мах принимает горизонтальное положение, и получает два раза максимальное значение, когда мах принимает вертикальное положение (рис. 113). При этом величина его равна:

$$\left.\begin{aligned} M_Y &= 2I\omega\omega_1 \text{ — относительно оси } Y \\ \text{и} \\ M_Z &= I\omega\omega_1 \text{ — относительно оси } Z, \end{aligned}\right\} \quad (165)$$

где: I — момент инерции крыла относительно оси вращения ветроколеса:

ω — угловая скорость ветроколеса;

ω_1 — угловая скорость вращения всей системы относительно вертикальной оси.

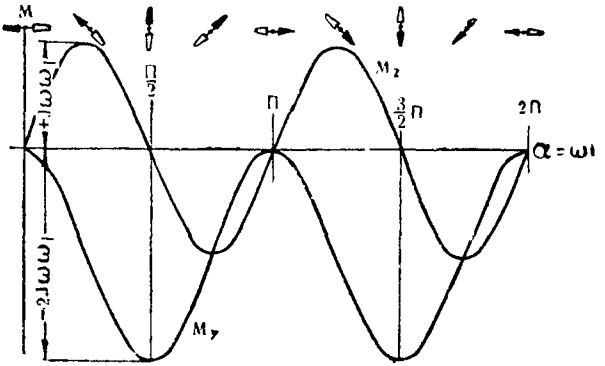


Рис. 113. Характеристика гироскопического момента двухлопастного ветроколеса.

Более подробно о гироскопических моментах см. § 43.

Величина ω_1 зависит от длины хвоста. Если исходить из принципа работы поверхности, то максимальную работу эта поверхность совершает, когда она перемещается со скоростью $U = \frac{1}{3}V$. Так как поверхность хвоста перемещается по окружности с радиусом, равным длине хвоста L, которая берётся от вертикальной оси до центра парусности, то можем написать;

$$U = \frac{2\pi nL}{60} = \frac{\pi n}{30}L = \frac{1}{3}\cdot V;$$

здесь $\frac{\pi n}{30} = \omega_1$, следовательно: $\omega_1 L = \frac{1}{3}\cdot V$, откуда

$$\omega_1 = \frac{1}{3}\cdot\frac{V}{L}. \quad (166)$$

§ 31. УСТАНОВ ВИНДРОЗАМИ

Схема установа виндрозами приведена на рис. 114. На некотором вылете позади ветроколеса устанавливают два ветрячка, называемые виндрозами, плоскость вращения которых перпендикулярна плоскости вращения ветроколеса и параллельна направлению ветра. Как только ветер изменит своё направление (стрелки V_x на рис. 114), сейчас же начнут вращаться виндрозы. Крутящий момент виндроз воспринимается передачей, состоящей из конических и цилиндрических шестерён. Цилиндрическая шестерня последней пары находится в зацеплении с большим зубчатым колесом, жёстко насаженным на венце башни. При вращении виндроз, шестерня катится по неподвижному зубчатому колесу, увлекая всю систему головки и поворачивая её в горизонтальной плоскости.

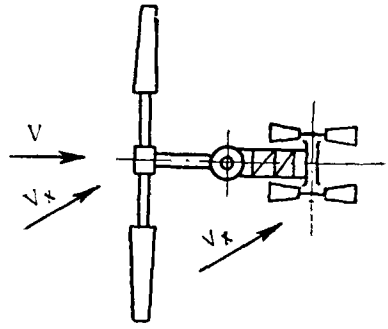


Рис. 114. Схема установа ветроколеса на ветер виндрозами.

Это перемещение продолжается до тех пор, пока остановятся виндрозы, что произойдёт лишь после того, как они станут параллельно потоку, следовательно, ветроколесо в этот момент будет стоять перпендикулярно направлению ветра.

Если при установе на ветер хвостом скорость поворота системы около вертикальной оси в случаях шквалов угрожает быстроходному ветродвигателю поломкой, то при виндрозах она менее вероятна. Это обусловлено возможностью выбора любого передаточного числа между виндрозами и шестернёй на башне. Следовательно, угловая скорость отклонения ветряка ω_1, входящая множителем в уравнение (165), зависит от выбора передачи, а не от случайных порывов ветра.

Установ на ветер виндрозами применяется у некоторых ветродвигателей, мощность которых выше 15 л. с.

Угловая скорость поворота системы около вертикальной оси определяется уравнением:

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{i}, \qquad (167)$$

где: i — передаточное число трансмиссии от виндроз к зубчатой шестерне, закреплённой на верхнем венце башни; ω_0 — угловая скорость виндроз, величина которой определяется уравнением:

$$\omega_0 = \frac{2Z_0V}{D}, \qquad (168)$$

где Z_0 — синхронное число модулей виндроз; эту величину принимают по опытным характеристикам (рис. 115); для других условий характеристики виндроз приведены в § 42 на рис. 184;

D — диаметр виндроз;

V — скорость ветра.

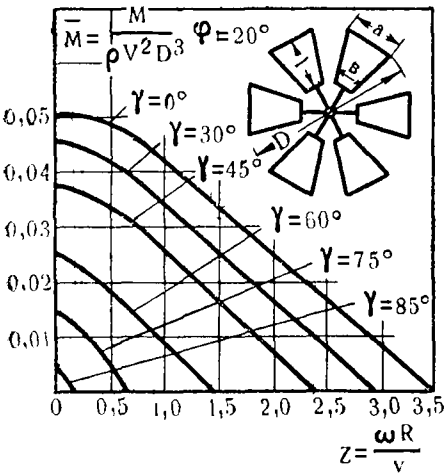


Рис. 115. Характеристика крутящих моментов виндроз для разных углов направления ветра к плоскости вращения.

Диаметр виндроз принимается от 0,15 до 0,2 диаметра ветроколеса. Размеры лопастей виндроз берутся в зависимости от диаметра виндроз D, а именно:

ширина на внешнем конце $a = \frac{D}{3}$,

ширина на внутреннем конце $b = \frac{D}{6}$,

длина $l = \frac{D}{3}$.

Число лопастей у виндроз обычно 4, 6 и более.

Пользуясь характеристиками рис. 115 и уравнениями (167) и (168), можно подобрать передачу так, что гироскопический момент не будет опасным для прочности конструкции ветродвигателя. Приближенно ω_1 принимают равной около 0,05.

§ 32. УСТАНОВ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ВЕТРОКОЛЕСА ЗА БАШНЕЙ

Если расположить ветроколесо позади башни на достаточно большом вылете, то на систему будет действовать аэродинамический момент, характеристика которого показана кривыми на рис. 108 и 110. Действием этого мо-

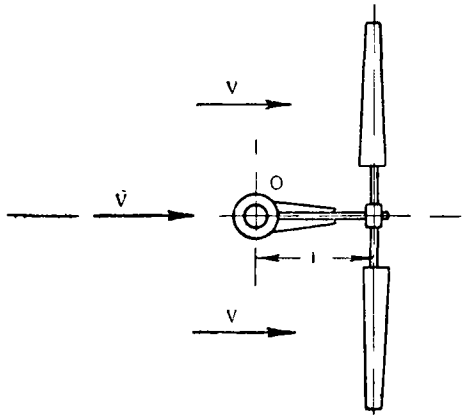


Рис. 116. Установ на ветер расположением ветроколеса за башней.

мента ветроколесо будет само устанавливаться позади башни в направлении ветра, так как само ветроколесо будет играть роль флюгера (рис. 116).

Так как величина этого момента, показанного кривыми *1* на рис. 108 и 110, зависит от отношения $\frac{l}{D}$, то для 18-лопастных ветродвигателей, очевидно, можно будет воспользоваться этой кривой для нахождения необходимого аэродинамического момента, устанавливающего ветроколесо в направлении ветра.

Обозначим относительный момент, известный из эксперимента, через $\overline{M}_z$ и соответствующее ему отношение $\frac{l}{D}$ через a; момент, который необходим, чтобы удерживать ветроколесо по ветру, обозначим через $\overline{M}'_z$ и соответственно $\frac{l'}{D'} = a'$; тогда:

$$\frac{\overline{M}'_z}{\overline{M}_z} = \frac{a'}{a},$$

или

$$\overline{M}'_z = \overline{M}_z \frac{a'}{a}. \qquad (169)$$

Следовательно, необходимый аэродинамический момент (размерный) можем определить приближённо по уравнению:

$$M'_z = \overline{M}_z \frac{a'}{a} \pi R^3 \rho \frac{V^2}{2}. \qquad (170)$$

За отсутствием таких же кривых M_z для быстроходных ветродвигателей можно воспользоваться экспериментальными кривыми аэродинамических сил X и Y, показанных на рис. 102. Подсчитав силу Y с помощью уравнения (153) и умножив её на вылет ветроколеса l, получим аэродинамический момент, необходимый для удержания ветроколеса в направлении ветра:

$$M_{a\,p} = Y \cdot l = \overline{y} \pi R^2 \rho \frac{V^2}{2} l. \qquad (171)$$

Этот конструктивно простой способ установа на ветер имеет серьёзные недостатки, а именно:

1) так как вылет ветроколеса, которое в данном случае играет роль поверхности хвоста, в несколько раз меньше выноса хвостовой поверхности от вертикальной оси, то, на основании уравнения (166), угловая скорость ω_1 поворота головки будет в несколько раз больше угловой скорости при повороте головки хвостом; следовательно, гироскопический момент будет в несколько раз больше, чем у ветродвигателей, устанавливающихся хвостом;

2) центр тяжести поворачивающейся системы смещён на одну сторону относительно вертикальной оси, что будет вызывать перегрузку подшипников в опорах.

У ветродвигателей мощностью в 100 л. с. и выше, применяемых на ветроэлектростанциях, установ на ветер обычно осуществляется электромотором. Как только направление ветра получает некоторый угол относительно оси вращения ветроколеса, контактное приспособление включает электромотор, который приводит в движение трансмиссию, поворачивающую систему около вертикальной оси. В тот момент, когда ветроколесо становится перпендикулярно направлению ветра, контакт автоматически выключает электромотор. Передача от электромотора к шестерне, закреплённой на башне, осуществляется так же, как в установе виндрозами.

ГЛАВА IX

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧИСЛА ОБОРОТОВ И МОЩНОСТИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Непостоянство энергии ветра чрезвычайно усложняет технику использования этой энергии. Если скорость ветра изменяется в течение минуты в 2—3 раза, то энергия при этом изменяется в 8—27 раз. По записям анемографов известны случаи, когда скорость ветра изменялась в течение одной минуты больше чем в 4 раза, значит энергия ветра изменялась больше чем в 64 раза. Вместе с тем некоторые рабочие машины, приключаемые к ветродвигателю, требуют определённой мощности и числа оборотов, которые должны оставаться постоянными во всё время работы этих машин. Для выполнения этого требования ветродвигатель должен регулироваться, т. е. иметь при заданной мощности постоянное число оборотов, независимо от скорости ветра.

Преобразовывая ветровую энергию в механическую, казалось бы естественным стремиться к полному использованию ветра, протекающего через ветроколесо. Если можно было бы при помощи ветродвигателя воспринять полную мощность ветра при всех возможных его скоростях, вплоть до бурь, мы получили бы наиболее высокую годовую выработку. Однако в этом случае пришлось бы построить такой прочный ветродвигатель, который мог бы выдержать нагрузку при максимальной скорости ветра, встречающейся в данном районе. Вес такого ветряка был бы огромным, между тем как длительность его работы с максимальной нагрузкой была бы крайне ничтожной, что следует из данных о повторяемости ветра (см. главу XII, § 46). Кроме того, энергия нужна потребителю повседневно и приблизительно в одинаковом

количестве. Следовательно, тот максимум энергии, который способна дать ветроустановка в короткий промежуток времени, может оказаться вообще ненужным. Наконец, рабочая машина, подобранная к ветродвигателю по его максимальной мощности, при малых скоростях ветра будет иметь очень низкий коэфициент полезного действия. Поэтому расчётную скорость ветра для начала регулирования и обеспечения прочности частей рабочего механизма выбирают в соответствии со среднегодовыми скоростями ветра. В практике принимается для определения мощности ветродвигателя расчётная скорость ветра $V_y = 8$ м/сек. для районов со среднегодовыми скоростями до 5 м/сек., $V_y = 10$ м/сек. для районов со среднегодовыми скоростями ветра до 7 м/сек. и, наконец, $V_y = 14$ м/сек. для районов со среднегодовыми скоростями ветра выше 7 м/сек.

Мощность ветродвигателя, определённую при скоростях ветра V_y, называют установленной мощностью N_y. Она является оптимальной для районов с данной среднегодовой скоростью ветра.

Регулирование ветродвигателей заключается в изменении положения ветроколеса или его лопастей в потоке ветра с тем, чтобы получить мощность и обороты приблизительно постоянными.

Существующие способы регулирования применяемых в практике ветродвигателей в зависимости от характера воздействия регулирующего механизма на работу ветроколеса можно подразделить на две основные группы.

К первой группе относятся системы регулирования, у которых основным регулирующим механизмом является центробежный регулятор, выполненный в том или ином виде. В этом случае некоторые системы регулирования могут быть с двусторонним воздействием внешних сил на изменение положения лопасти или ветроколеса в воздушном потоке: с одной стороны — центробежные силы регулирующих грузов, с другой — сила ветра.

У ветродвигателей с такого рода регулированием в процессе работы при возрастании силы ветра увеличиваются обороты ветроколеса, отчего сейчас же увеличиваются и центробежные силы регулирующих грузов, которые изменяют положение лопастей. Вследствие этого подъёмная сила понижается, а затем обороты убывают до своего нормального значения.

При этом действие силы ветра на лопасть в зависимости от конструкции регулирования может либо складываться с центробежными силами регулирующих грузов, либо вычитаться, так как точка приложения равнодействующей силы ветра (центр давления) на лопасти может оказаться либо справа, либо слева от оси поворота лопасти.

Ко второй группе относятся системы регулирования, у которых изменение положения лопастей или всего ветроколеса осуществляется под действием силы ветра.

Правильно установить все силы, действующие в данной системе регулирования, и входит в задачу конструктора. В зависимости от того, как разрешит он эту задачу, получится то или иное качество регулирования.

§ 33. РЕГУЛИРОВАНИЕ ВЫВОДОМ ВЕТРОКОЛЕСА ИЗ-ПОД ВЕТРА

Этот способ регулирования наиболее прост и обусловлен тем, что при косом набегании ветра на ветроколесо через него протекает меньшее количество воздуха. Кроме того, из-за изменения при повороте угла атаки на крыльях изменяется подъёмная сила. Оба эти фактора и позволяют ограничивать мощность ветродвигателя при скоростях ветра выше 8 м/сек.

В простейших типах ветродвигателей, как-то: козловые и шатровые ветряные мельницы, вывод ветроколеса делается вручную; у более совершенных современных ветродвигателей — автоматически, с помощью регулирующих устройств.

Автоматическое регулирование выводом ветроколеса из-под ветра применяется у многолопастных маломощных ветродвигателей. Регулирование по этой системе совершается двумя способами: во-первых, с помощью боковой поверхности — так называемой лопаты, укрепляемой на головке ветродвигателя за ветряным колесом с правой или левой стороны его оси вращения; во-вторых, размещением оси вращения ветроколеса на некотором расстоянии (50—100 мм) вправо или влево от вертикальной оси поворота головки ветряного двигателя.

Схема регулирования давлением ветра на боковую лопату показана на рис. 117.

Во втором случае отклонение ветроколеса происходит благодаря моменту лобового давления ветра на колесо

относительно вертикальной оси; плечо момента равно ε (рис. 118) при $\gamma=0$.

На рис. 117 и 118 в положении *I* ветряк находится в работе при скорости ветра меньше 8 м/сек.; в положении *II* — во время регулирования при скорости ветра больше 8 м/сек., и в положение *III* ветряк становится при скорости ветра выше 12 м/сек. и при этом останавливается.

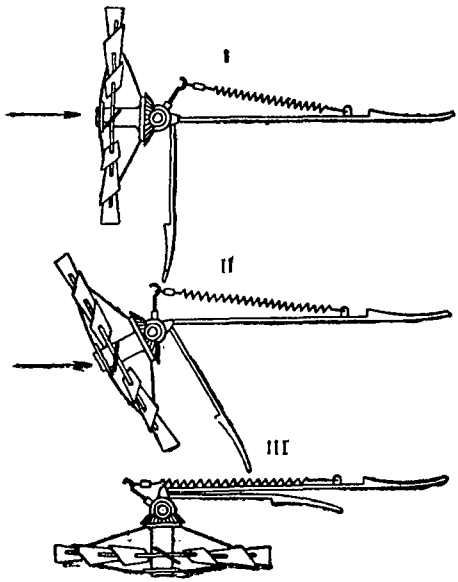


Рис. 117. Схема регулирования выводом ветроколеса из-под ветра с помощью боковой лопаты.

В рассмотренной системе регулирования сила ветра, действующая по одну сторону вертикальной оси, уравновешивается пружиной, прикрепляемой одним концом к хвосту ветряка, а другим к рычагу, укреплённому на его головке.

Регулирование выводом ветроколеса из-под ветра, благодаря своей простоте, нашло широкое применение у многолопастных маломощных ветродвигателей, применяемых, главным образом, для подъёма воды в сельском хозяйстве.

Рассмотрим действие сил в данной системе регулирования.

На ветроколесо, расположенное перпендикулярно направлению ветра, действуют моменты относительно вертикальной оси системы.

У ветродвигателей с вертикальным вращающимся валом и с боковой лопатой этот момент, согласно уравнению (158), равен:

$$M_л = P_л L - M_{реак}. \qquad (а)$$

Если отклонение ветроколеса осуществляется за счёт

эксцентриситета ε, то момент, согласно уравнению (158), равен:

$$M_x = X\varepsilon. \qquad (б)$$

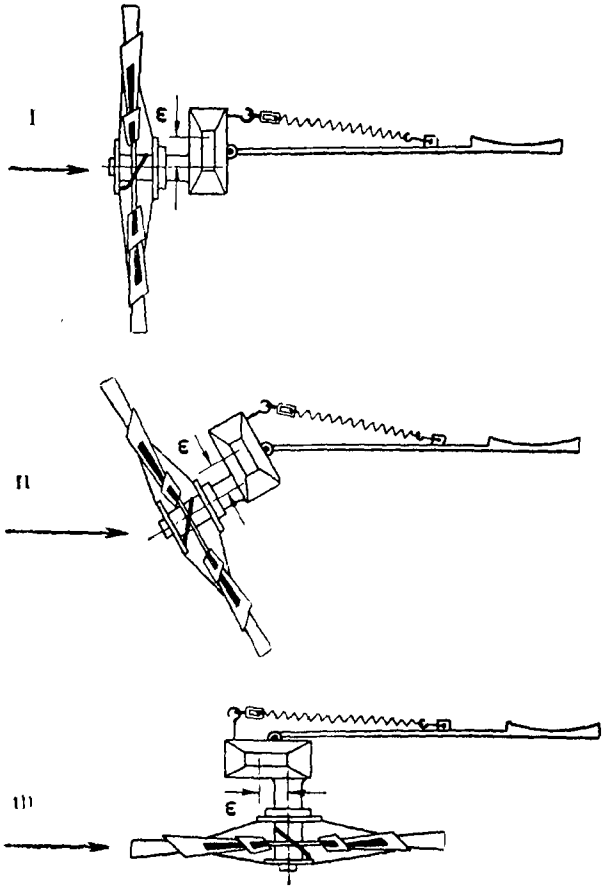


Рис. 118. Схема регулирования выводом ветроколеса из-под ветра за счёт смещения оси ветроколеса относительно оси башни.

Если же ветроколесо находится под некоторым углом γ по отношению к направлению ветра, то на систему действуют следующие силы (рис. 119 и 120): сила X, перпендикулярная к плоскости, и сила Y, действующая в плоскости ветроколеса. Эти силы, а также сила на боковой лопате

при регулировании создают момент относительно вертикальной оси поворота головки, величина которого равна:

$$M_{аэр} = Yl + PL' \pm Xa - M_{реак}; \quad (в)$$

$$M_{аэр} = Yl + X(\varepsilon \pm a). \quad (г)$$

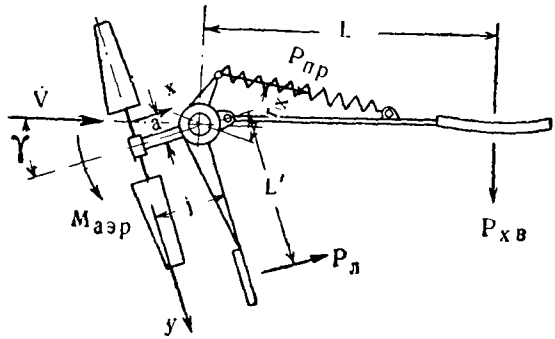


Рис. 119. Схема действия сил ветра на систему ветродвигателя, регулирующегося с помощью боковой лопаты.

Усилие пружины $P_{пр}$ с плечом относительно оси системы r_x уравновешивает этот момент. При этом имеется в виду, что поверхность хвоста рассчитана так, что все эти силы

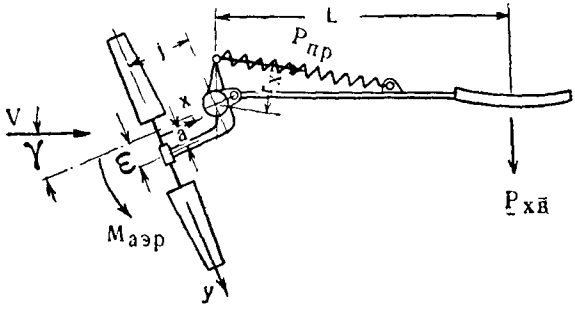


Рис. 120. Схема действия сил на систему ветродвигателя, регулирующегося выводом ветроколеса из-под ветра за счёт смещения оси ветроколеса относительно оси башни.

не могут вывести хвост из положения, параллельно ветру, т. е.:

$$P_{хв}L = Yl + PL' \pm Xa - M_{реак}; \quad (д)$$

$$P_{хв}L = Yl + X(\varepsilon \pm a). \quad (е)$$

В приведённых уравнениях перед a надо ставить плюс, когда центр парусности переходит в сторону лопаты или эксцентриситета, и минус, когда он переходит на противоположную от лопаты сторону.

В процессе регулирования система под действием рассмотренных сил несколько поворачивается относительно оси башни и тем самым подставляет хвост под угол, больший, чем до регулирования. Благодаря этому и создаётся равновесие всех сил, фиксирующих для каждой скорости ветра то или другое положение системы в воздушном потоке.

Пружина должна быть рассчитана так, чтобы момент от её усилия, действующего с плечом r_x, был равен моменту от аэродинамических сил, действующих на ветроколесо и лопату, а именно:

$$M_{пр} = M_{а.р}.$$

В уравнениях в, г, д, е расстояние a центра парусности до оси ветроколеса определяется из соотношения $\frac{a}{R} = \bar{a}$, $a = \bar{a}R$, где $\bar{a}$ принимается для многолопастных ветроколёс по рис. 103, а для малолопастных ветроколёс по рис. 104, причём знак минус ставится для значений $\frac{a}{R}$, лежащих выше оси абсцисс, и плюс, когда $\frac{a}{R}$ ниже оси абсцисс. Это объясняется тем, что при переходе центра парусности влево от оси вращения ветроколеса плечо силы X убывает, при переходе же центра парусности вправо плечо увеличивается на величину a. Это относится к тому случаю, когда ось ветроколеса смещена вправо относительно оси башни. Например, для многолопастных ветроколёс, когда $\gamma < 27°$, отношение $\frac{a}{R}$ должно браться с плюсом, а при больших углах γ кривая проходит над осью абсцисс, следовательно, в этом случае $\frac{a}{R}$ нужно брать с минусом. Это значит, что при больших углах γ центр парусности перемещается на другую сторону оси вращения ветроколеса, т. е. влево от его оси. Силы X и Y берутся по графикам рис. 101 и 102 справа.

Силы X, Y и $P_д$ изменяются пропорционально квадрату скорости ветра и коэфициентов $\bar{x}$, $\bar{y}$, C_y и C_x, определяемых по графикам рис. 101, 102 и 105.

Характеристики ветроколеса при различных углах γ отклонения его оси вращения от направления ветра, скорость которого не изменяется [33]. На рис. 121 приведены кривые изменения коэфициента использования энер-

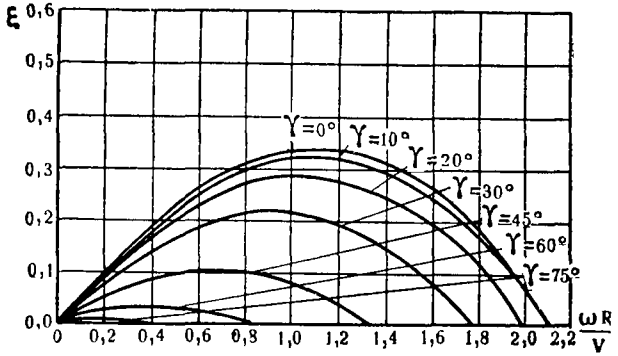


Рис. 121. Характеристика 18-лопастного ветроколеса в зависимости от угла γ отклонения оси вращения от направления ветра.

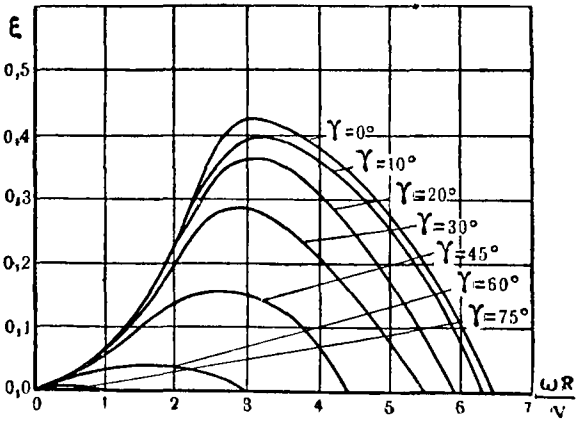


Рис. 122. Характеристика 4-лопастного ветряка в зависимости от угла γ отклонения оси ветряка от направления ветра.

гии ветра ξ в зависимости от Z при разных углах тихоходного 18-лопастного ветряка, а на рис. 122 — кривые быстроходного 4-лопастного ветряка. Кривые показывают, что коэфициент использования энергии ветра ξ

при углах γ от 0 до 20° падает незначительно, при углах же выше 20° он резко убывает. Изменение ξ в зависимости от угла γ отклонения ветроколеса от направления ветра показано на рис. 123, где проведены кривые через точки, построенные для отношения ξ к $\xi_{\gamma=0}$ четырёх моделей ветроколёс: 18-лопастного, 4-крылой мельницы, 4-лопастного и 2-лопастного.

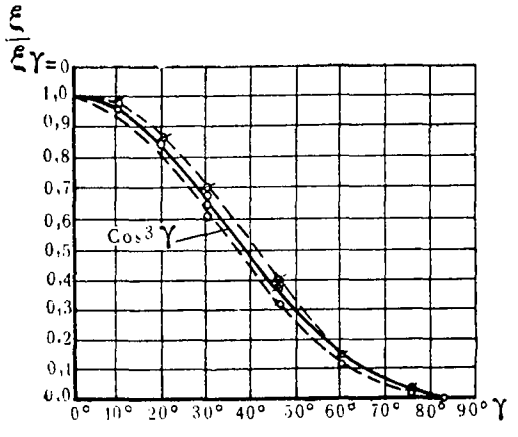


Рис. 123. Характеристика $\frac{\xi}{\xi_{\gamma=0}}$ в зависимости от углов ветроколеса.

Для практических целей вполне допустимо считать, что мощность ветряка при выходе его из-под ветра изменяется пропорционально кубу косинуса угла отклонения ветроколеса от направления ветра, т. е.: $\xi = \xi_{\gamma=0} \cos^3 \gamma$, что видно из кривой $\cos^3 \gamma$ на рис. 123.

Обозначим $\xi_{\gamma=0} = \xi_n$; $N_{\gamma=0} = N_n$ и т. д.; тогда $N = f(\gamma)$ будет равно:

$$N = N_n \cos^3 \gamma. \qquad (172)$$

Изменение скорости вращения ветроколеса показано на графике рис. 124. Кривая *I* относится к 18-лопастному ветряку; *II* — к 4-крылой мельнице; *III* — к 4-лопастному колесу и *IV* — к 2-лопастному. Кривая $\cos \gamma$ почти совпадает с кривой зависимости синхронной скорости

этих же ветряков от угла γ , т. е. можно считать:

$$\frac{Z_0}{Z_{0n}} = \cos\gamma,$$

или

$$Z_0 = Z_{0n}\cos\gamma.$$

При постоянной скорости ветра Z изменяется пропорционально угловой скорости ветроколеса, т. е.:

$$\omega = \omega_n \cos\gamma,$$

откуда:

$$n = n_n \cos\gamma.$$

Следовательно, синхронные обороты ветроколеса изменяются пропорционально cosγ при V=Const.

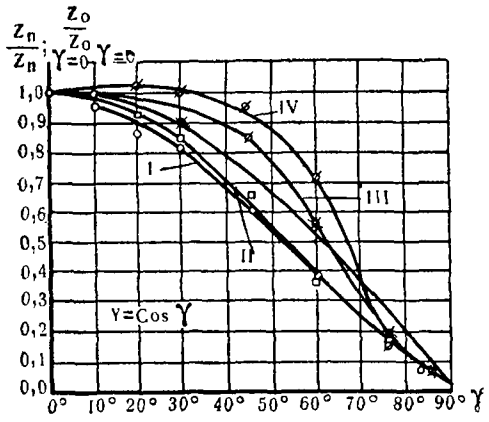


Рис. 124. Характеристика нормальной и синхронной скорости вращения ветроколёс.

В практических расчётах регулирования выводом ветроколеса из-под ветра важно знать, на какой угол γ должно отклониться ветроколесо при увеличении скорости ветра, чтобы сохранить обороты и мощность, развиваемые им при скорости ветра, принятой в расчёте регулирования постоянными, т. е. важно знать зависимость, связывающую углы и скорости ветра, при которых обороты и мощность будут постоянными. Из уравнений (135) и (172) имеем:

$$N = N_n \frac{V^3}{V_n^3},$$

$$N = N_n \cos^3\gamma,$$

откуда:

$$\cos\gamma = \frac{V_n}{V}. \qquad (173)$$

Задаваясь скоростью ветра V_n, при которой ветродвигатель должен начать выходить из-под ветра, и рабочими

скоростями ветра $V > V_n$, находим косинусы углов, а затем и углы, соответствующие этим скоростям. Подсчитав ряд точек и нанеся их на график (рис. 125), получим кривые углов, на которые должно отклоняться ветроколесо при скоростях ветра $V > V_n$, чтобы сохранить N и ω

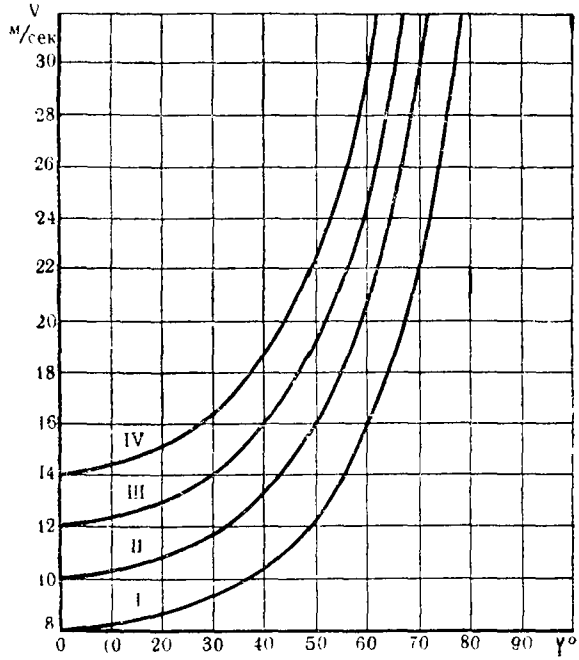


Рис. 125. Кривые изменения углов в зависимости от скорости ветра, при которых должны быть N=Const и ω=Const.

постоянными. Кривая *I* подсчитана для V_n=8 м/сек.; *II* — для V_n=10 м/сек.; *III*—12 м/сек. и *IV* — 14 м/сек. Эти кривые относятся к любым ветроколесам.

Проще определяются углы γ графически (рис. 126). На прямой *OB* отложим в масштабе скорости ветра V_n, V_1, V_2 и т. д.; далее радиусом V_n опишем дугу *CD*; из концов отрезков V_1, V_2, V_3 и т. д. проводим касательные. Каждый радиус, проведённый из *O* перпендикулярно к соответствующей касательной, будет отклонён от прямой *OB* на угол γ, который необходим, чтобы иметь постоян-

ные обороты и мощность ветроколеса при разных скоростях ветра $V > V_n$.

Из построения рис. 126 имеем:

$$V_n = V_1 \cos\gamma_1 = V_2 \cos\gamma_2 \text{ и т. д.},$$

откуда следует:

$$\cos\gamma = \frac{V_n}{V},$$

что и было получено выше — уравнение (173).

В конечном счёте расчёт регулирования выводом ветроколеса из-под ветра сводится к тому, чтобы найти за-

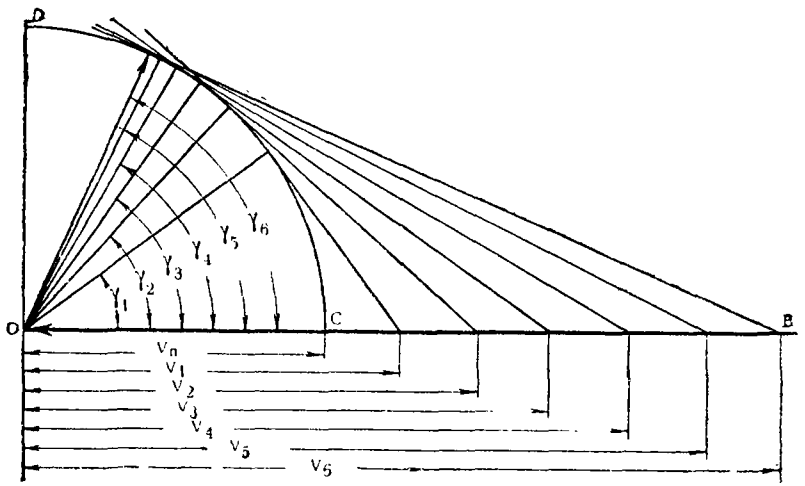


Рис. 126. Графическое определение углов γ.

висимость изменения момента пружины, обеспечивающей положение ветроколеса к направлению ветра под тем углом γ, который соответствует данной мощности $N = \text{Const}$ и $\omega = \text{Const}$. Для этого строим сначала кривые аэродинамических моментов в зависимости от γ для разных скоростей ветра (рис. 127) по уравнениям:

$$M_{аэр} = Yl + Pl' \pm Xa - M_{реак} \qquad \text{(а)}$$

для ветряка, отклоняющегося за счёт боковой лопаты, и

$$M_{аэр} = Yl + X(\varepsilon \pm a) \qquad \text{(б)}$$

для ветряка, отклоняющегося за счёт эксцентриситета ε.

Далее, пользуясь этим графиком и кривыми $V=f(\gamma)$ (рис. 125), наносим на рис. 127 точки, соответствующие данной скорости ветра и углу γ, которые должны находиться на кривых аэродинамических моментов при данной скорости ветра против соответствующих углов γ (рис. 125). Соединив найденные точки линией, получим кривую

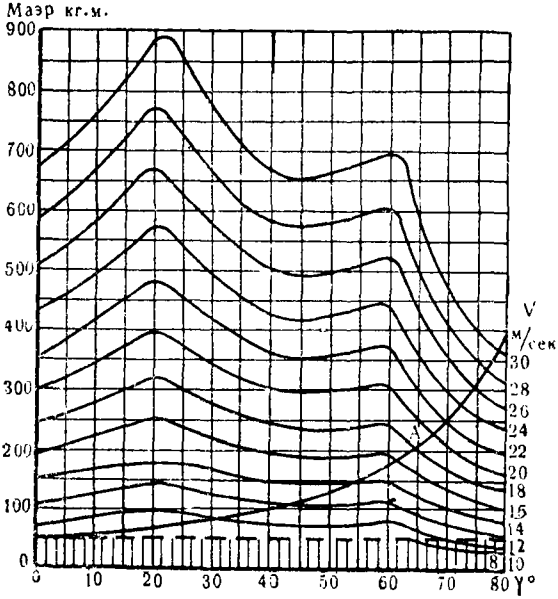


Рис. 127. Кривые аэродинамических моментов ветродвигателя ТВ-8.

A, которая показывает, как должен изменяться момент пружины при различных положениях ветроколеса относительно направления ветра. Вертикальная штриховка внизу показывает величину реактивного момента $M_{реак}=\text{Const}$.

График рис. 127 построен для ветродвигателя ТВ-8; им можно пользоваться при расчёте регулирования ветродвигателей такого же типа и мощности. Для другого типа ветряка должен строиться по изложенному способу свой график.

Для безотказного действия системы регулирования выводом ветроколеса из-под ветра необходимо, чтобы трение в опорах было как можно меньше. Трение в опорах

влияет на регулирование в том смысле, что ветроколесо запаздывает выйти из-под ветра при возрастании его скорости и возвратиться на ветер при снижении скорости ветра. Чем больше трение в опорах, тем грубее регулирование. Регулирование выводом ветроколеса из-под ветра у быстроходных ветродвигателей является неудобным, так как оно повышает действие гироскопического момента. Дело в том, что во время регулирования по этой системе головка с ветроколесом находится в постоянном движении около вертикальной оси, с одной стороны, за счёт работы хвоста, с другой — за счёт отклонения ветроколеса соответственно условию данного регулирования. Эти два движения, совпадая по направлению, будут давать в результате большую угловую скорость ω_1. Так как в уравнение (165) гироскопического момента входит ещё угловая скорость ветроколеса, которая у быстроходных ветродвигателей также велика, то в результате гироскопический момент может оказаться опасным для прочности ветродвигателя. Вот почему это регулирование в практике применяют, главным образом, у тихоходных многолопастных ветродвигателей. Если же и встречаются быстроходные ветродвигатели с этим регулированием, то как исключение, ввиду простоты устройства этой системы.

§ 34. РЕГУЛИРОВАНИЕ УМЕНЬШЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ КРЫЛЬЕВ

Этот способ регулирования применяется в старых шатровых ветряных мельницах. При слабом ветре крылья работают всей своей поверхностью; если же ветер усиливается настолько, что число оборотов ветроколеса начинает сильно возрастать, уменьшают поверхность лопастей. У простейших кустарных крыльев это уменьшение делают вручную путём снятия с крыла некоторой части досок, составляющих его поверхность. У парусных крыльев свёртывают вручную парус, которым обтянута решётка крыла. Понятно, такой способ регулирования крайне несовершенен и в то же время сопряжён с большими трудностями.

При быстром изменении скорости ветра трудно успеть во-время произвести необходимые операции, и ветряк может быть сломан прежде, чем будет уменьшена поверхность крыльев.

В более новых конструкциях ветряных мельниц, регулирующихся по рассматриваемому принципу, поверхности крыльев изготовляются из створок либо долевых, ли-

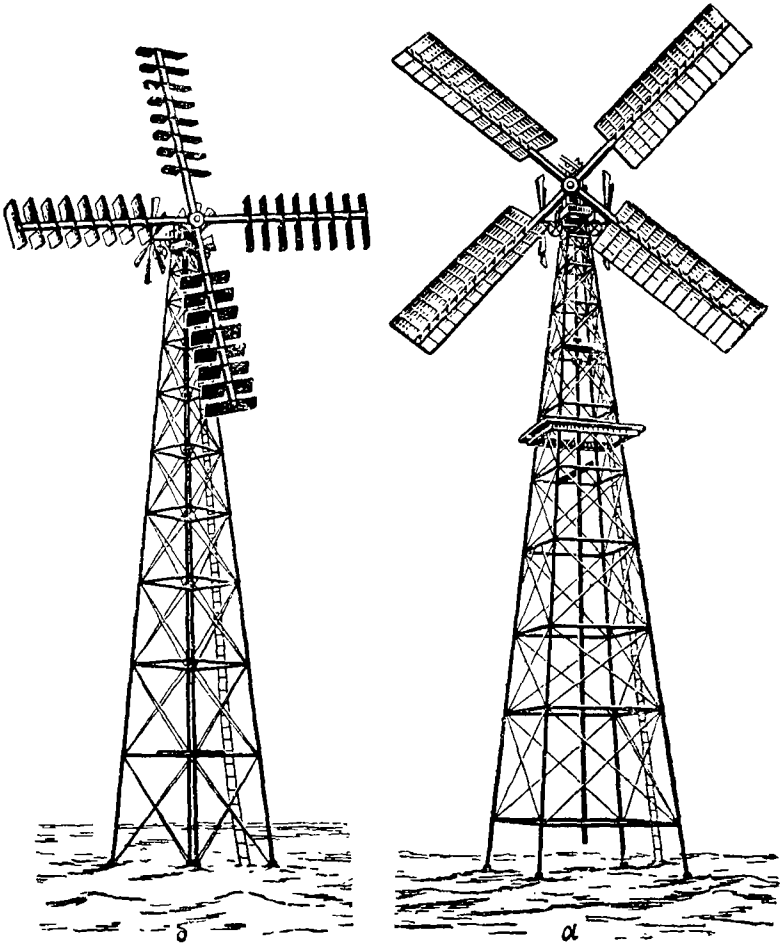


Рис. 128. Ветродвигатель, регулирующийся уменьшением поверхности крыльев.

бо поперечных, имеющих вид жалюзи. Когда ветроколесо начинает развивать обороты выше, чем нужно для его нормальной работы, открываются створки или жалюзи, и в рабочей поверхности крыльев образуются отверстия,

отчего действие силы ветра на крылья уменьшается и сейчас же обороты колеса убывают. Створки, а также жалюзи открываются вручную шарнирным механизмом, а у более совершенных — автоматически, центробежными грузами, помещаемыми на крыльях, или при помощи специального центробежного регулятора.

На рис. 128 показан ветродвигатель с автоматическим регулированием: *а* — ветродвигатель до регулирования, *б* — с открытыми жалюзи во время остановки. Установ на ветер осуществляется виндрозами.

Основной недостаток этого регулирования заключается в том, что крылу с жалюзи нельзя придать обтекаемый профиль; это приводит к большому сопротивлению и обусловливает низкий коэфициент использования энергии ветра. Кроме того, многочисленные шарниры, на которых вращаются жалюзи, усложняют изготовление крыла. У современных ветродвигателей это регулирование не применяется.

§ 35. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОВОРОТОМ ЛОПАСТИ ИЛИ ЧАСТИ ЕЕ ОКОЛО ОСИ МАХА

С изменением наклона лопасти по отношению к ветру меняется подъёмная сила, а следовательно, и её составляющая, действующая в направлении вращения ветроколеса. Эта закономерность положена в основу регулирования поворотом лопасти или части её около оси маха.

Поворот лопастей около оси маха совершается двумя способами. Во-первых, непосредственным действием ветра на крыло, которое, будучи свободно насажено на оси маха, проходящей у носка крыла, отклоняется давлением ветра и, удерживаясь посредством груза в равновесии, допускает возможность регулирования оборотов. Во-вторых, поворот лопасти осуществляется действием центробежных сил, развиваемых либо нормальным центробежным регулятором, либо грузами, помещаемыми на крыльях колеса. В момент увеличения оборотов колеса грузы действием центробежных сил перемещаются вдоль оси махов и приводят в движение тяги, соединённые шарнирным механизмом с лопастями и поворачивающие их в направлении, уменьшающем угол атаки. Вслед за этим сейчас же уменьшается подъёмная сила на крыльях, а следовательно, понижаются крутящий момент и обороты

ветроколеса. Во время регулирования поддерживается равновесие между регулирующей пружиной и центробежной силой грузов.

Проф. Г. Х. Сабинин предложил систему регулирования, при которой поворот лопасти совершается действием силы ветра на открылок, закрепляемый на оси у задней кромки крыла. Этот открылок называется стабилизатором, а регулирование — стабилизаторным (рис. 129). Н. В. Красовский дополнил это регулирование тягой, пропущенной по центру маховой трубы.

Процесс регулирования протекает следующим образом. В нерабочем состоянии лопасть *1* и стабилизатор *2* стоят по линии направления ветра (положение *I*, рис. 130). При запуске ветродвигателя в работу освобождается затянутая до этого пружина *3*, которая, действуя через рычаг *4* и тягу *5*, поворачивает стабилизатор *2* на некоторый угол относительно хорды крыла (положение *II*, рис. 130) и тем самым ставит его под некоторый угол к направлению ветра. В результате этого на поверхности стабилизатора возникает подъёмная сила, которая поворачивает крыло относительно оси маха, с моментом:

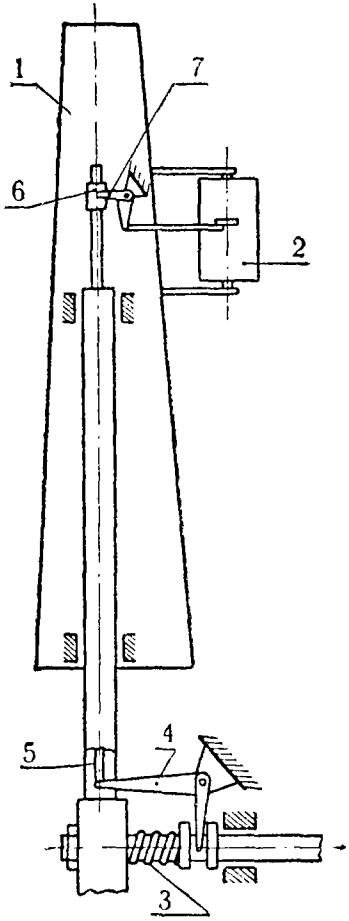


Рис. 129. Схема регулирования поворотом лопасти около оси маха с помощью стабилизатора:

1 — лопасть; *2* — стабилизатор; *3* — пружина; *4* — рычаг; *5* — тяга.

$$M_{ст} = C_y f \frac{\rho V^2}{2} r, \qquad (174)$$

где: f — поверхность стабилизатора в м;

r — расстояние центра парусности стабилизатора от оси маха;

C_r — коэфициент подъёмной силы.

Лопасть под действием этого момента будет поворачиваться около оси маха до тех пор, пока не наступит равновесие между моментами от аэродинамических сил, действующих на поверхность стабилизатора и лопасть крыла; при этом хорда лопасти будет составлять с на-

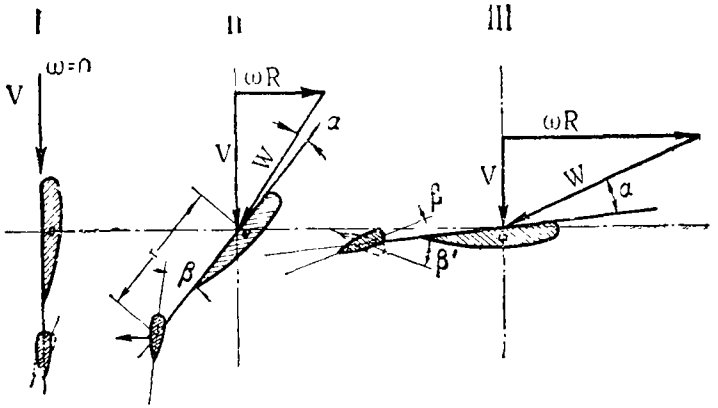


Рис. 130. Положения крыла при регулировании стабилизаторами.

правлением относительного потока некоторый угол α. На лопастях сейчас же возникнут подъёмные силы, которые приведут ветроколесо во вращение (положение *III*, рис. 130). Воздушный поток в этом случае будет набегать на крыло и стабилизатор с относительной скоростью W, которая равна:

$$W = \sqrt{V^2 + \omega^2 r^2}.$$

При этом вследствие увеличения угла β относительного потока момент стабилизатора увеличится и лопасть повернётся ещё, пока не наступит снова равновесие между аэродинамическими силами на крыле и стабилизаторе, а угол α не станет равным первоначальному. Таким образом, лопасть будет сохранять постоянный угол атаки с направлением потока при постоянном угле поворота стабилизатора β на всех режимах работы ветродвигателя

$\left(Z=\frac{\omega R}{V}\right)$ до предела регулирования; при этом стабилизатор будет лежать в плоскости лопасти.

При увеличении оборотов выше расчётных под действием центробежных сил груз *6* переместится по оси крыла и рычагом *7* повернёт стабилизатор *2* на другой угол β' (положение *III*). Вместе с этим будет нарушено имевшееся до этого равновесие между моментами стабилизатора и лопасти, т. е. момент стабилизатора станет несколько больше момента лопасти относительно оси

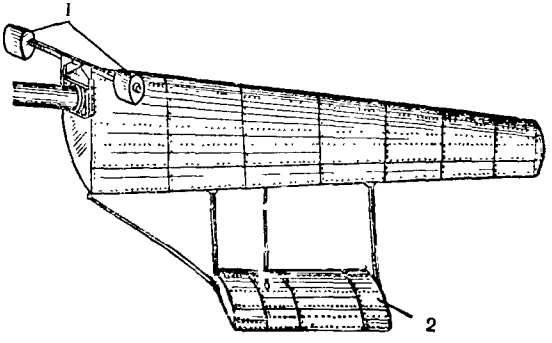


Рис. 131. Крыло со стабилизатором и компенсирующими грузами:

1 — компенсирующие грузы; *2* — стабилизатор.

маха и, следовательно, лопасть повернётся в обратную сторону, уменьшив угол атаки α. При этом сейчас же уменьшится подъёмная сила крыла и ветроколесо сбавит число оборотов до величины, несколько меньшей первоначального значения.

Кроме момента от аэродинамических сил, действующих на лопасть относительно оси маха, при движении ветроколеса возникают центробежные силы масс лопасти и стабилизатора. Составляющие этих сил также дают момент относительно оси маха при всех положениях крыла, кроме положения, совпадающего или с плоскостью вращения ветроколеса или с плоскостью, ей перпендикулярной. Этот момент препятствует повороту лопасти за счёт аэродинамических сил. Поэтому для компенсации моментов от массовых сил, впереди носка крыла закрепляют соответственно рассчитанные дополнительные грузы *1* (рис. 131). Центробежные силы этих грузов создают

момент относительно оси маха, обратный моменту массовых сил лопасти и стабилизатора, обеспечивая и статическое и динамическое равновесие крыла относительно его оси вращения.

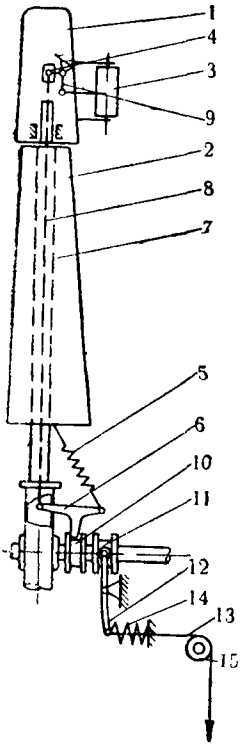


Рис. 132. Схема стабилизаторного регулирования поворотом конца лопасти:

1 — поворотная часть лопасти; *2* — жёсткая часть лопасти; *3* — стабилизатор; *4* — центробежный груз; *5* — пружинарегулирования;*6*— рычаг регулирования; *7* — труба маха крыла; *8* — тяга останова и регулирования; *9*— рычаг стабилизатора; *10* — муфта кинематической связи; *11* — муфта отводки; *12* — рычаг пуска и останова; *13* — трос пуска и останова; *14* — пружина; *15* — ролик.

В позднейших конструкциях это регулирование изменено тем, что поворачивающейся сделана не вся лопасть, а только часть на внешнем конце крыла. Это позволило значительно уменьшить центробежные грузы, регулирующие пружины и стабилизатор, и вместо двух компенсирующих грузов, расположенных вне крыла, поставить один груз в носке поворотной части лопасти. Принцип же изложенного регулирования сохраняется.

Схема стабилизаторного регулирования с поворотом конца лопасти показана на рис. 132. В этой схеме регулирования крыло закреплено на махе жёстко, под определённым углом заклинения, и во время регулирования может поворачиваться только часть лопасти на конце крыла, примерно на одной трети до одной четверти длины радиуса. И та и другая схема регулирования дают хорошую равномерность оборотов ветроколеса

Экспериментальные исследования и практика эксплоатации ветродвигателей со стабилизаторным регулированием показывают, что отклонения числа оборотов в сторону увеличения или уменьшения от нормального не превосходят $\pm 2{,}5$—$3{,}0\%$.

На рис. 133 дана характеристика оборотов стабилизаторного регулирования, записанная при испытании ветродвигателя. Кривая *А* показы-

вает, как изменялась скорость ветра V за исследуемый промежуток времени, а кривая $Б$ — как изменялись в то же время обороты ветродвигателя. Несмотря на большие скачки в скорости ветра, обороты колеблются очень незначительно; кривая $Б$ близка к горизонтальной прямой, что свидетельствует о высокой чувствительности данной системы регулирования.

Большая равномерность хода ветродвигателей со стабилизаторным регулированием позволяет применять их

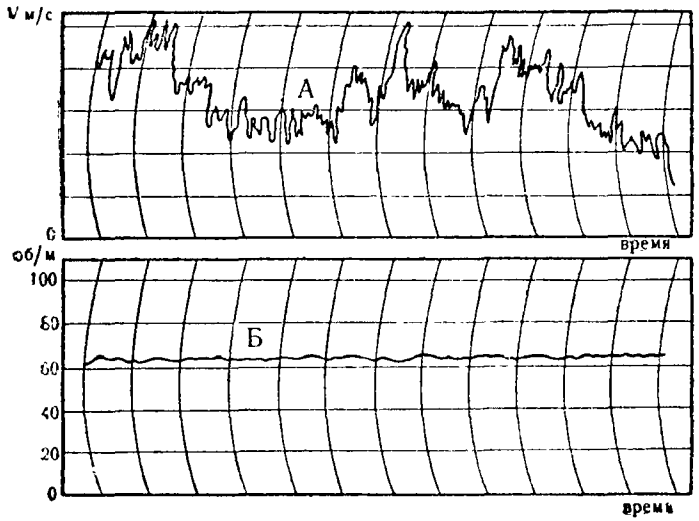


Рис. 133. Характеристика оборотов ветроколеса со стабилизаторным регулированием.

для приведения в движение машин, требующих постоянства оборотов, в частности, для вращения электрогенераторов переменного тока.

Необходимым условием хорошего действия регулирования поворотом лопастей около оси маха является точная установка их по относительному потоку. Для этого все силы, действующие на лопасть, кроме аэродинамических, должны быть уравновешены. Силы веса уравновешиваются размещением центра тяжести крыла на оси вращения его, что может быть достигнуто добавочными контргрузами. Но этим достигается статическое равновесие, во время же работы должно быть достигнуто и

динамическое равновесие, так как, помимо сил тяжести, на крыло ещё действуют центробежные силы.

Рассмотрим метод расчёта проф. Г. Х. Сабинина динамического равновесия лопасти [31].

Пусть плоское крыло, могущее свободно вращаться на оси OZ, совпадающей с геометрической осью маха, вращается на валу XX' с угловой скоростью ω (рис. 134). Возьмём точку A на крыле с массой m и найдём момент центробежной силы относительно оси OZ, получаемой от вращения вала XX'. Опустим из точки A перпендикуляр AD на OZ и другой перпендикуляр AC на плоскость XOZ. Соединив C и D, получим прямой угол ACD. Обозначим через Q проекцию центробежной силы R на направление AC; тогда момент центробежной силы относительно оси OZ выразится так:

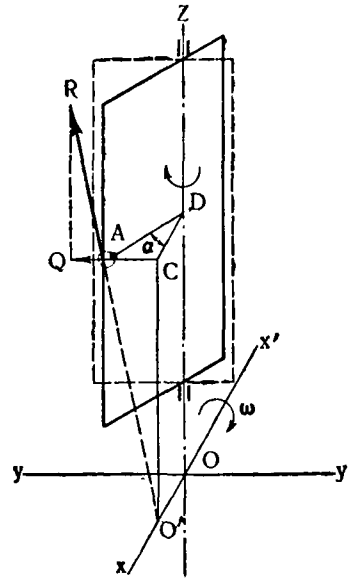


Рис. 134. Силы, действующие на поворотную лопасть.

$$M = Q\bar{C}D. \qquad (а)$$

Так как треугольники AQR и $O'AC$ подобны, то мы можем написать:

$$\frac{Q}{R} = \frac{AC}{AO'}; \qquad (б)$$

но:

$$R = m\omega^2 AO' \qquad (в)$$

и:

$$AC = AD \sin\alpha, \qquad (г)$$

$$CD = AD \cos\alpha, \qquad (д)$$

где α — угол, образованный AD и CD.

Подставляя значения Q и CD из (б), (в), (г) и (д) в (а), получим после сокращений:

$$dM = dm\omega^2 AD^2 \sin\alpha \cos\alpha; \qquad (е)$$

здесь AD расстояние точки A от оси OZ. Предполагая лопасть достаточно тонкой и плоской, мы можем считать угол α постоянным для всех точек лопасти. Момент центробежных сил, поворачивающих лопасть, будет равен:

$$M = \omega^2 \sin\alpha \cos\alpha \int A\overline{D}^2 dm, \qquad (ж)$$

но:

$$\int A\overline{D}^2 dm = I, \qquad (з)$$

где I — момент инерции лопасти относительно оси OZ.

Следовательно:

$$M = I\omega^2 \sin\alpha \cos\alpha, \qquad (и)$$

или:

$$M = I\omega^2 \frac{\sin 2\alpha}{2}. \qquad (175)$$

Этот момент стремится повернуть лопасть по направлению стрелки так, чтобы лопасть стала перпендикулярно к валу, как показано пунктиром на рис. 134. Моменты превращаются в нуль при $\alpha=0°$ и при $\alpha=90°$, причём первое положение является неустойчивым. Максимальное значение момент получает при $\alpha=45°$ и $\sin 2\alpha=1$, следовательно:

$$M_{max} = \frac{1}{2} I\omega^2. \qquad (176)$$

Отсюда видим: чтобы получить возможно меньшее динамическое неравновесие, необходимо, по возможности, стремиться к уменьшению момента инерции I крыла относительно оси маха.

У ветродвигателей, регулирующихся поворотом лопасти под действием стабилизаторов, момент инерции слагается из момента инерции крыла $I_{кр}$ и момента инерции стабилизатора с его креплениями $I_{ст}$:

$$I = I_{кр} + I_{ст}. \qquad (177)$$

Момент инерции стабилизатора доходит до 75% от полного момента инерции крыла. Поэтому необходимо стремиться к уменьшению именно момента инерции стабилизатора. Этого можно достигнуть за счёт уменьшения веса стабилизатора и его креплений. Для того же, чтобы получить динамическое равновесие лопасти относительно оси маха, устанавливаются, как было сказано раньше,

компенсирующие грузы впереди носка крыла (рис. 131). У ветродвигателей, регулирующихся поворотом конца лопасти с помощью стабилизатора, для динамического равновесия ставят грузик, который заделывают в носке поворотной части лопасти.

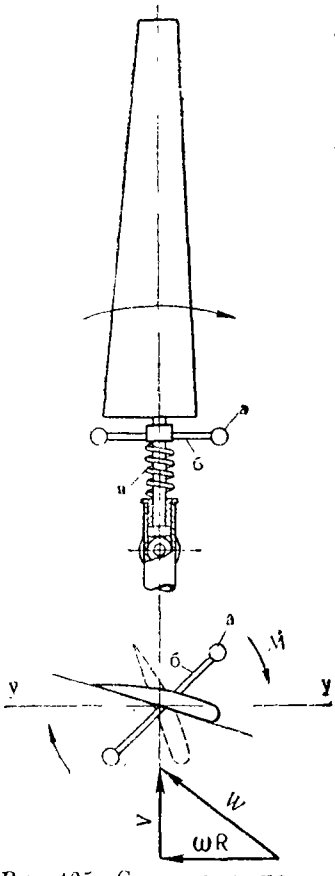


Рис. 135. Схема регулирования В. С. Шаманина.

Если принять вес компенсирующих грузов немного больше веса, необходимого для полной компенсации, то можно получить перекомпенсацию. При этом лопасть будет стремиться повернуться в том же направлении, в каком она должна поворачиваться под действием регулятора, в данном случае стабилизатора.

Эффект перекомпенсации использован инженером В. С. Шаманиным, который предложил регулирование, основанное на принципе динамического неравновесия поворотного крыла или части его. Для того чтобы лопасть могла поворачиваться в сторону, обратную действию момента динамических сил лопасти, он предложил штангу с компенсирующими грузами перенести на ось поворота лопасти (рис. 135). Центробежные грузы *а*, расположенные по концам штанги *б*, при вращении ветроколеса, под действием центробежных сил стремятся стать в плоскость *у—у*. При этом возникает момент, поворачивающий лопасть в сторону, показанную стрелкой *М*.

Величина этого момента определяется уравнением (175).

Чтобы получить регулирующий эффект, достаточно иметь момент инерции компенсирующих грузов на 30% выше момента инерции лопасти, т. е.:

$$I_{гр} = 1{,}3\, I_{лоп}.$$

В качестве регулирующего фактора автор книги предложил использовать силы инерции лопасти, поворачивающие её в плоскость вращения ветроколеса. Величина момента этих сил может быть определена с помощью уравнения (175).

Когда лопасть расположена под углом φ_1 к плоскости вращения ветроколеса, на ней возникает подъёмная сила

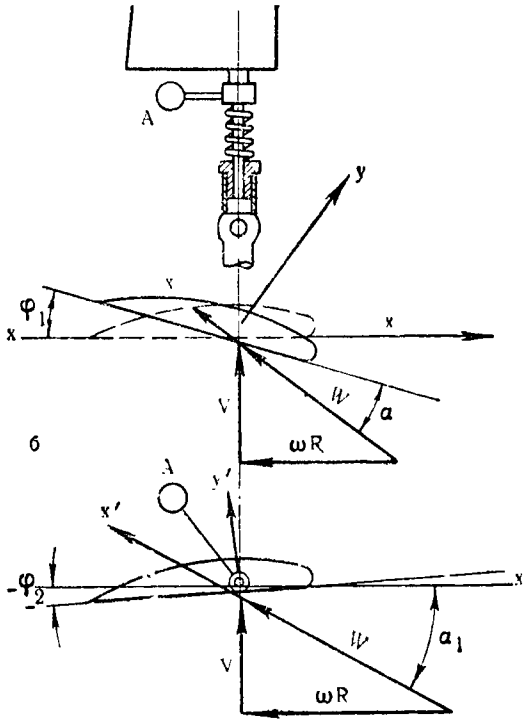


Рис. 136. Инерционное регулирование Е. М. Фатеева.

Y, проекция которой на плоскость X—X направлена в сторону вращения ветроколеса (рис. 136,а). Проекция этой силы будет убывать по мере уменьшения угла φ_1, и когда лопасть займёт положение, показанное пунктиром, проекция силы Y будет минимальной. Чтобы продолжить отклонение лопасти до занятия ею положения с отрицательным углом φ_2 (рис. 136,б), необходимо добавить грузик A с массой m, расположенной на плече r. Момент

инерции этой массы будет поворачивать лопасть в том же направлении, в каком она поворачивалась до положения, показанного на рис. (136,а) пунктиром. В результате слагающая подъёмной силы Y' будет действовать в обратную сторону, вызывая торможение ветроколеса.

При нормальных оборотах лопасть устанавливается под углом φ к плоскости вращения ветроколеса с помощью пружины.

Первая экспериментальная проверка этого регулирования была проведена на полигоне ВИМЭ, которая показала, что это регулирование может быть применено так же, как и другие аналогичные системы. Недостатком этого регулирования является высокое лобовое давление, так как при регулировании лопасть устанавливается не ребром к ветру, а плоскостью.

§ 36. РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫМ ТОРМОЗОМ

При вращении ветроколеса, на его лопастях возникает подъёмная сила и сила сопротивления. Одна из составляющих подъёмной силы вращает ветроколесо, а сила сопротивления тормозит это вращение. Если при помощи того или иного устройства возможно так изменить силу сопротивления, чтобы она препятствовала увеличению оборотов ветроколеса, то такое тормозящее устройство и можно использовать как регулятор.



Рис. 137. Схема регулирования воздушным тормозом системы Биляу.

Схема регулирования воздушным тормозом показана на рис. 137. На лопастях ветроколеса закреплены поворачивающиеся клапаны, которые при нормальных оборотах ветродвигателя держатся параллельно направлению окружной скорости ветроколеса и почти не оказывают сопротивления движению. В этом нормальном положении клапаны удерживаются пружиной. При увеличении оборотов

центробежные силы поворачивают его перпендикулярно направлению вращения. В этом положении клапаны, перемещаясь с большой окружной скоростью, увеличивают сопротивление настолько, что избыточный крутящий момент ветроколеса преодолевается сопротивлением и ветроколесо затормаживается.

Эти же клапаны можно поставить на лопасти и в другом месте. Например, инж. С. Б. Перли у ветродвигателя своей конструкции разместил их на концах лопастей.

Автор книги предложил конструкцию воздушного тормоза в виде биплана или триплана, разбив общую поверхность на ряд открылков. Это позволило применить воздушный тормоз на крыльях большого размера $D=16$ (рис. 297).

ГЛАВА X

КОНСТРУКЦИИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Конструкции современных крыльчатых ветродвигателей приобретали ту или иную форму в соответствии с техническими требованиями, вытекающими из условий эксплоатации их в сельскохозяйственном производстве. Так, например, для подъёма воды с помощью ветродвигателя из скважин глубиной в 100 м и более, широко применяется поршневой насос одностороннего действия, характеризующийся большим моментом при трогании в начале работы и малым числом ходов поршня. В соответствии с этими особенностями и была создана конструкция многолопастного тихоходного ветродвигателя, обладающего большим моментом трогания и малой быстроходностью (рис. 74) и вполне отвечающего техническим требованиям водоподъёма из глубоких скважин поршневым насосом.

С развитием механизации производственных процессов в сельском хозяйстве потребовалась двигательная сила не только для помола и водоснабжения, но и для подготовки кормов, орошения огородных культур, электрификации хозяйственных и бытовых нужд, распиловки лесоматериалов и т. п. Рабочие машины этих процессов производства требуют больших оборотов и не нуждаются в большом моменте трогания, так как они начинают работать вхолостую. Для удовлетворения новых технических требований были созданы конструкции быстроходных ветродвигателей, удобные в работе с машинами, требующими большие числа оборотов.

Ветродвигатели быстроходного типа малолопастные обладают малым начальным моментом (рис. 79), поэтому они более удобны для работы с теми машинами, которые отличаются большими оборотами и малым моментом

трогания, как-то: генераторы, центробежные насосы и т. п.

В соответствии с основными техническими требованиями производственных процессов в сельском хозяйстве, выработаны вообще два типа ветродвигателей — быстроходный и тихоходный, но разных типоразмеров, конструкций передаточных механизмов и способов регулирования. Согласно ГОСТ 2656, ветродвигатели разделяются на три группы. К первой группе относятся многолопастные, с диаметром ветроколеса 3,5 и 8 м; ко второй группе — малолопастные, с числом модулей Z_n от 2 до 3, с диаметром ветроколеса от 8 до 16 м (ветряные мельницы). и к третьей группе — быстроходные, с числом модулей Z_n от 4,5 до 7,5, с диаметром ветроколеса 1,5; 3; 5; 10; 12 и 18 м.

Типы ветродвигателей отечественного производства разрабатывались в Центральном аэрогидродинамическом институте и Центральном ветро-энергетическом институте, а позднее во Всесоюзном научно-исследовательском институте механизации и электрификации сельского хозяйства (ВИМЭ), во Всесоюзном институте сельскохозяйственного машиностроения (ВИСХОМ) и в Украинском научно-исследовательском институте механизации сельского хозяйства.

Многолопастные тихоходные ветродвигатели выпускались под марками ТВ-5 (тихоходный ветродвигатель с диаметром ветроколеса 5 м) и ТВ-8, быстроходные — под марками ВИМЭ Д-12, ВИСХОМ Д-3,5, ВИМЭ-ГУСМП Д-18 (ВИМЭ и Главное управление Северного морского пути). УНДИМ Д-10 и др.

§ 37. МНОГОЛОПАСТНЫЕ ВЕТРОДВИГАТЕЛИ

Многолопастный ветродвигатель ТВ-5 (рис. 138) предназначается для работы только с поршневым насосом.

Ветроколесо имеет диаметр 5 м и состоит из 24 лопастей с переменным углом заклинения вдоль лопасти. Хорда лопасти у внутреннего конца составляет с плоскостью вращения угол в 45°, а у внешнего — в 17°.

Головка ветродвигателя (рис. 139) представляет литой чугунный картер, в котором смонтирован кривошипный механизм. Кривошип допускает устанавливать штангу насоса на ход 300 и 400 мм, для чего на больших зубча-

тых колёсах сделаны два отверстия под палец шатуна: одно — на радиусе в 150 мм, другое — на радиусе в 200 мм.

Установ на ветер осуществляется хвостом, который построен в виде треугольной фермы из углового железа и

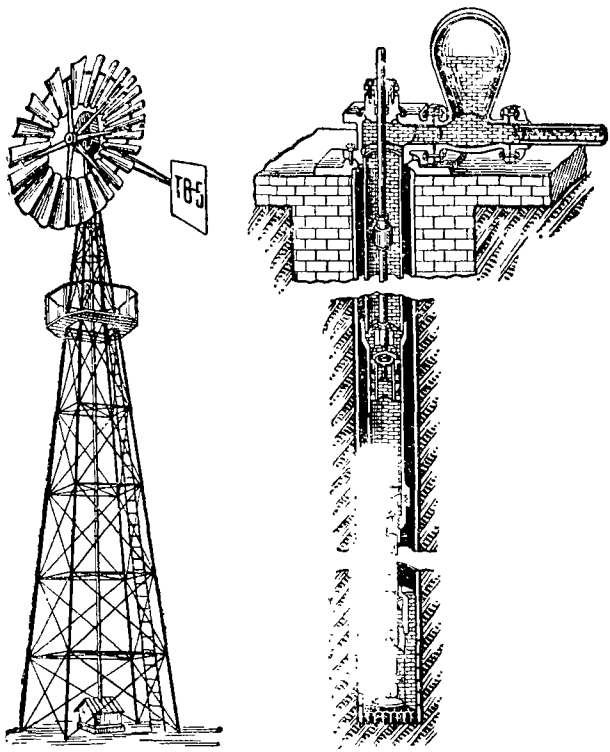


Рис. 138. Многолопастный ветродвигатель ТВ-5.

трапециевидного оперения размером 2,82 м^2 из листового оцинкованного железа. Поверхность хвоста имеет вогнутость в сторону регулирующей пружины, что сделано с целью компенсации аэродинамического момента ветроколеса, возникающего вследствие смещения оси вращения ветроколеса относительно вертикальной оси поворота головки.

Ветродвигатель устанавливается на четырёхногой стальной башне высотой около 15 м. У основания башни ставится

лебёдка с конным приводом, приводящая в движение поршневой насос в безветрие.

Регулирование ветродвигателя осуществляется выводом ветроколеса из-под ветра (рис. 118). Ветродвигатель запускается в работу и останавливается снизу с помощью ручной лебёдки, закреплённой на ноге башни. Трос от лебёдки протянут вверх и присоединён к муфте останова *13* (рис. 139), перемещающейся продольно по опорной трубе *14*. На муфте *13* надето кольцо *15*, которое может поворачиваться относительно муфты и вместе с ней переме-

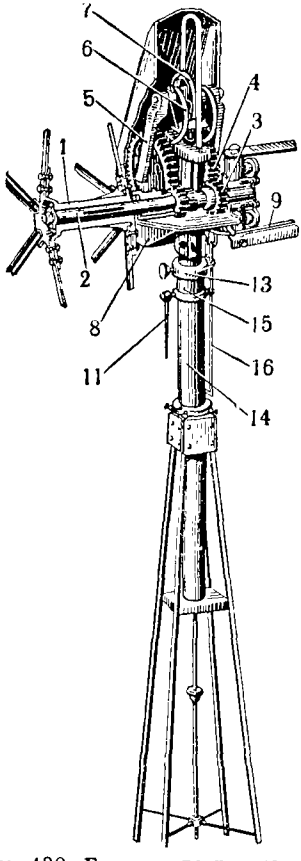


Рис. 139. Головка ветродвигателя ТВ-5:

1 — ступица ветроколеса; *2* — вал ветроколеса; *3* — ведущие шестерёнки; *4* — большие шестерни с кривошипным механизмом; *5* — шатуны; *6* — ролик; *7* — направляющая дуга для ролика; *8* — картер; *9* — ферма хвостов; *10* — кронштейн для пружины регулирования; *11* — трос; *12* — буфер; *13* — муфта останова; *14* — опорная труба; *15* — кольцо муфты останова; *16* — кронштейн.

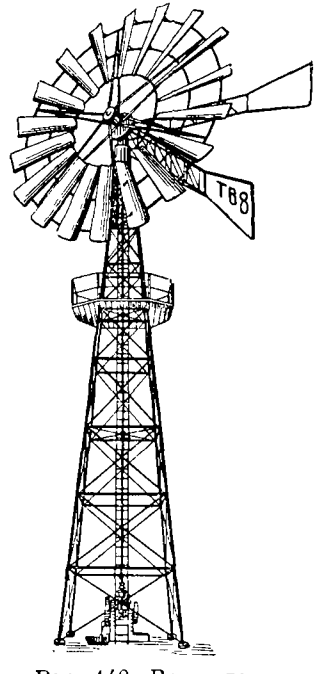


Рис. 140. Ветродвигатель ТВ-8.

щаться продольно. Кольцо имеет сбоку прорезь, в которую входит кронштейн *16* из круглого железа, закреплённая на головке ветродвигателя. Головка при поворотах вокруг вертикальной оси поворачивает направляющей скобой и кольцо, в то время как муфта *13* не вращается, благодаря шпонке, приваренной к стенке опорной трубы *14*.

Мощность ветродвигателя при скорости ветра 8 м/сек. равна 2,5 л. с.; обороты ветроколеса при полной нагрузке 40 об/мин. Производительность при подъёме воды с напором 10 м составляет до 10 м³ в час при скорости ветра 8 м/сек.

Многолопастный ветродвигатель ТВ-8 предназначается для работы с сельскохозяйственными машинами в животноводческих хозяйствах колхозов и совхозов.

Общий вид этого ветродвигателя представлен на рис. 140.

Ветроколесо диаметром 8 м имеет 18 лопастей из оцинкованного листового железа толщиной 1,25 мм, закреплённых на трёх ободах, связанных между собой шестью спицами из углового железа 45×45 мм. Лопасти установлены с переменным углом заклинения, а именно: у внешнего обода угол между хордой лопасти и плоскостью вращения ветроколеса равен 22°, а у внутреннего этот угол равен 47°. Длина лопасти 2 450 мм, ширина на внешнем кольце 674 мм, на внутреннем 410 мм. Спицы закреплены на фланцах ступицы ветроколеса двумя болтами каждая.

Головка ветродвигателя (рис. 141) имеет фигурную вытянутую по вертикали чугунную отливку *5*, в стенку которой впрессована ось *2* под углом в 6,5° к горизонту. Этот наклон сделан для того, чтобы приблизить ветроколесо к башне, не допустив задевания лопастями её ног. На этой оси посажены два конических роликовых подшипника, и на них надета ступица ветроколеса. К заднему фланцу ступицы прикреплён болтами обод конического зубчатого колеса *3*, которое находится в зацеплении с конической шестерёнкой *4*, посаженной на вертикальном валу *12* двигателя. Число зубьев большого колеса $Z_1=63$, у шестерёнки $Z_2=17$. Нижним основанием головка надета на трубу *6*, которая свободно поворачивается в двух опорах. В верхней опоре *7* она поворачивается на шариках, уложенных на самоустанавливающейся сферической

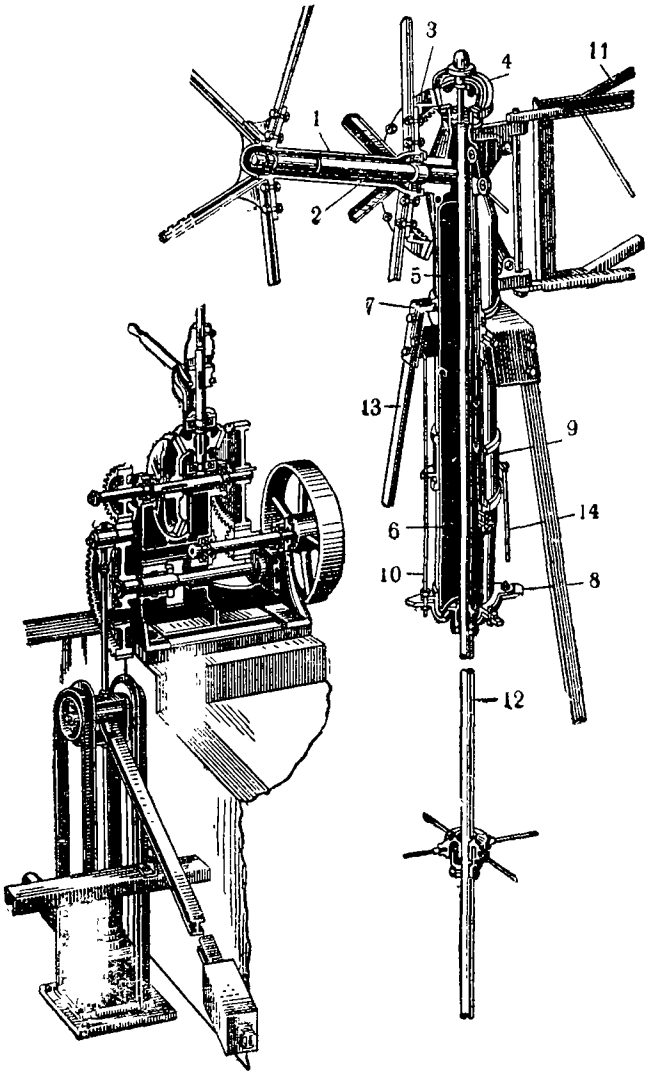


Рис. 141. Головка ветродвигателя ТВ-8:

1 — ступица ветроколеса; *2* — ось ветроколеса; *3* — коническое зубчатое колесо; *4* — коническая шестерня; *5* — конус головки; *6* — опорная труба; *7* — верхняя опора головки; *8* — нижняя опора головки; *9*— муфта останова; *10*— направляющая для муфты *9*; *11* — ферма хвоста; *12* — вертикальный вал; *13*—башня; *14* — трос останова.

пяте. Чугунный корпус нижней опоры *8* закреплён растяжками к ногам башни. Сквозь него по центру проходит точёный конец опорной трубы, которая с насаженной на неё головкой свободно поворачивается в опорах, что происходит при пуске, останове и регулировании ветродвигателя.

Хвост для установа ветродвигателя на ветер состоит из фермы *11* длиною в 7 370 мм. Конец этой фермы имеет форму трапеции, на которой закреплена поверхность из оцинкованного железа. Площадь поверхности $f_{хв}$ равна 4,85 м², что составляет $\frac{f_{хв}}{F} = 0{,}097$, где F — ометаемая поверхность ветроколеса.

Ветродвигатель смонтирован на металлической ферменной конструкции башне *13* высотой в 14,85 м. У основания башни установлена лебёдка (рис. 141 слева), которая воспринимает работу вертикального вала и передаёт её либо на поршневой насос, либо на сельскохозяйственные машины — соломорезку, жмыходробилку, корнерезку, зернодробилку, жёрнов и т. п.

Этой же лебёдкой при отсутствии ветра можно приводить в движение поршневой насос от конного привода или от трактора; при этом вертикальный вал двигателя отключается от лебёдки разъединением кулачковых муфт, надетых на верхний и нижний отсеки вертикального вала.

Ветродвигатель регулируется выводом ветроколеса из-под ветра с помощью боковой лопаты (рис. 117). Поверхность лопаты равна 1,95 м², что составляет 3,9% от ометаемой поверхности ветроколеса.

Останов и пуск ветродвигателя осуществляется снизу ручной лебёдкой, которая закреплена на ноге башни у её основания. Трос *14*, идущий от лебёдки вверх, присоединён двумя концами к муфте *9*, продольно перемещающейся по опорной трубе. На муфте имеется лапка с вырезом, в который входит железный прут *10*, закреплённый одним концом у верхней опоры, другим у нижней. Этот прут служит направляющей муфты при её перемещении вверх и вниз.

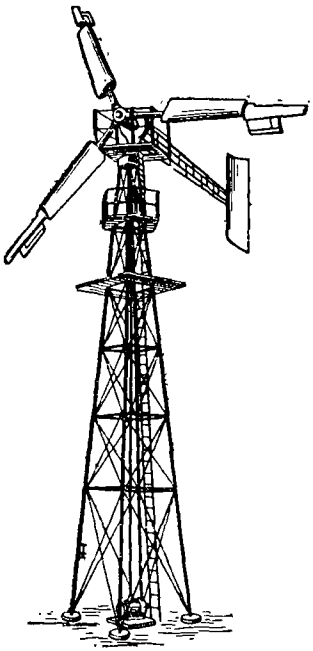
Верхний конец троса останова закреплён на хвосте и от него через два ролика проходит внутрь опорной трубы, где присоединён к тяге, которая на нижнем конце имеет выступ, пропущенный в продольный прорез опор-

ной трубы. Этот выступ вне трубы подхватывает основание муфты, надетой на опорную трубу. Таким образом достигается связь подвижной головки ветродвигателя с механизмом останова, имеющим возможность перемещаться только поступательно вдоль опорной трубы.

Мощность ветродвигателя при скорости ветра 8 м/сек. равна 6,5 л. с. на валу ветроколеса при числе его оборотов с полной нагрузкой 25 об/мин.

§ 38. БЫСТРОХОДНЫЕ (МАЛОЛОПАСТНЫЕ) ВЕТРОДВИГАТЕЛИ

Ветродвигатель ВИМЭ Д-12 (рис. 142) имеет трёхлопастное ветроколесо диаметром в 12 м. Лопасти крыльев обтекаемого профиля из дерева и металла закреплены на стальных трубах махов.



Головка ветродвигателя (рис. 143) имеет фигурной формы картер из чугунного литья, в котором помещены опоры горизонтального вала *2*, а также пара конических зубчатых шестерёнок *3—4*, передающих вращение ветроколеса *1* вертикальному валу *5*. Картер головки закреплён на опорной трубе *6*, которая поворачивается около вертикальной оси в двух опорах: верхней *7* — роликовой и нижней *8* — шариковой.

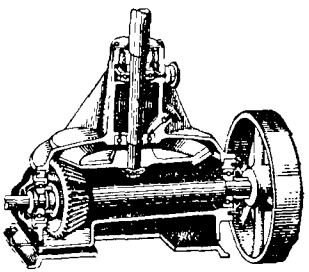


Рис. 142. Быстроходный ветродвигатель ВИМЭ Д-12.

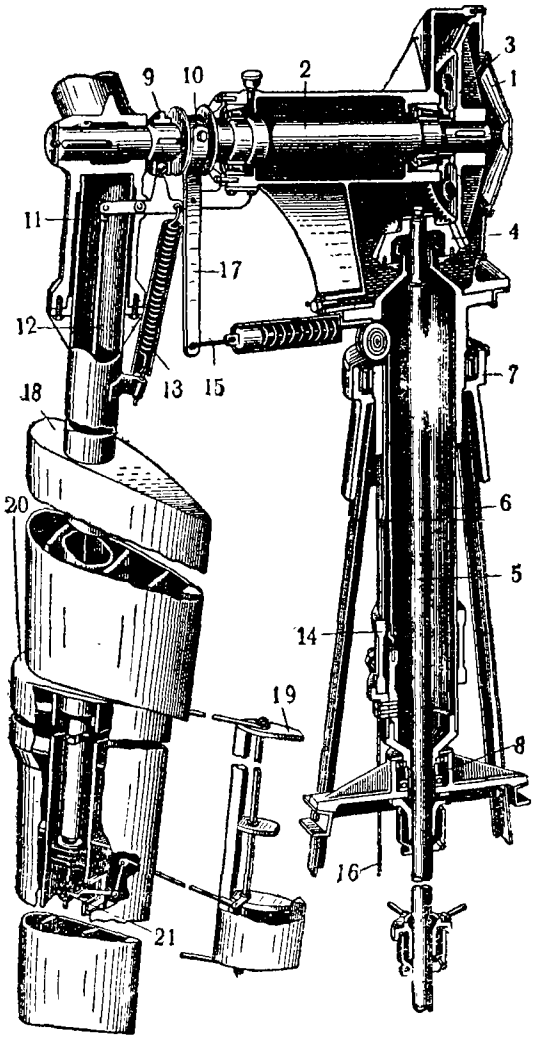


Рис. 143. Головка ветродвигателя ВИМЭ Д-12:

1 — картер головки; *2* — вал ветроколеса; *3* — коническое колесо; *4* — коническая шестерня; *5*—вертикальный вал; *6* — опорная труба; *7* — верхняя опора; *8* — нижняя опора; *9* — муфта останова; *10* — вторая муфта останова; *11* — рычаг останова и регулирования; *12* — тяга останова и регулирования; *13* — пружина регулирования; *14* — муфта пуска и останова; *15*— тяга для приведения в действие муфты *9*; *16* — трос останова; *17* — рычаг пуска и останова ветродвигателя; *18* — жёсткая часть лопасти; *19* — стабилизатор; *20* — поворотная часть крыла; *21* — центробежный груз.

Смазка верхней передачи заливается в картер головки до определённого уровня.

Для останова и пуска ветродвигателя служит лебёдка с винтом, смонтированная на ноге башни. От винта протянут трос *16* к муфте *14* останова. При затяжке троса винтом рычаг отводки *17* перемещает на горизонтальном валу муфту *10*, которая действует на муфту *9* кинематической связи. Эта муфта посредством коленчатых рычагов *11* и тяг *12*, проходящих внутрь махов, действует на стабилизаторы *19*, устанавливая их на большой отрицательный угол. Благодаря этому на поворотной части лопасти *20* возникает отрицательный момент, передающийся главному валу. Этот момент уравновешивает положительный момент жёстко закреплённой части лопасти *18*, и ветряк останавливается.

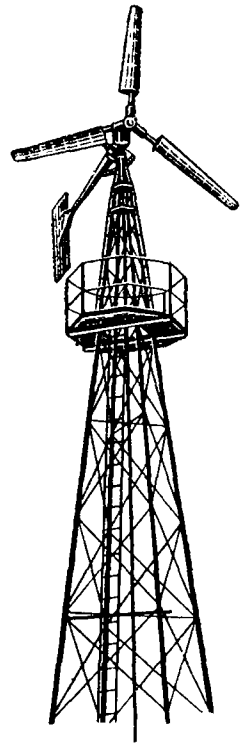


Рис. 144. Быстроходный ветродвигатель ВИМЭ Д-5.

При запуске ветродвигателя трос *16* освобождают, и стабилизаторы действием пружин *13* и тяги *12* с рычажным механизмом автоматически устанавливаются под некоторый угол атаки, заданный при монтаже для определённого режима работы установки. Действием ветра стабилизаторы начинают перемещаться относительно осей махов, устанавливая концы лопастей в рабочее положение. При ветре скоростью около 4 м/сек. ветряк начинает работать.

Благодаря тому что ветродвигатели этой конструкции работают почти с постоянным числом оборотов, они пригодны и для небольших ветроэлектростанций. В равной степени их можно использовать и для приведения во вращение станков в мастерских МТС, а также различных сельскохозяйственных машин и центробежных насосов при орошении.

Ветродвигатель ВИМЭ Д-12 при скорости ветра

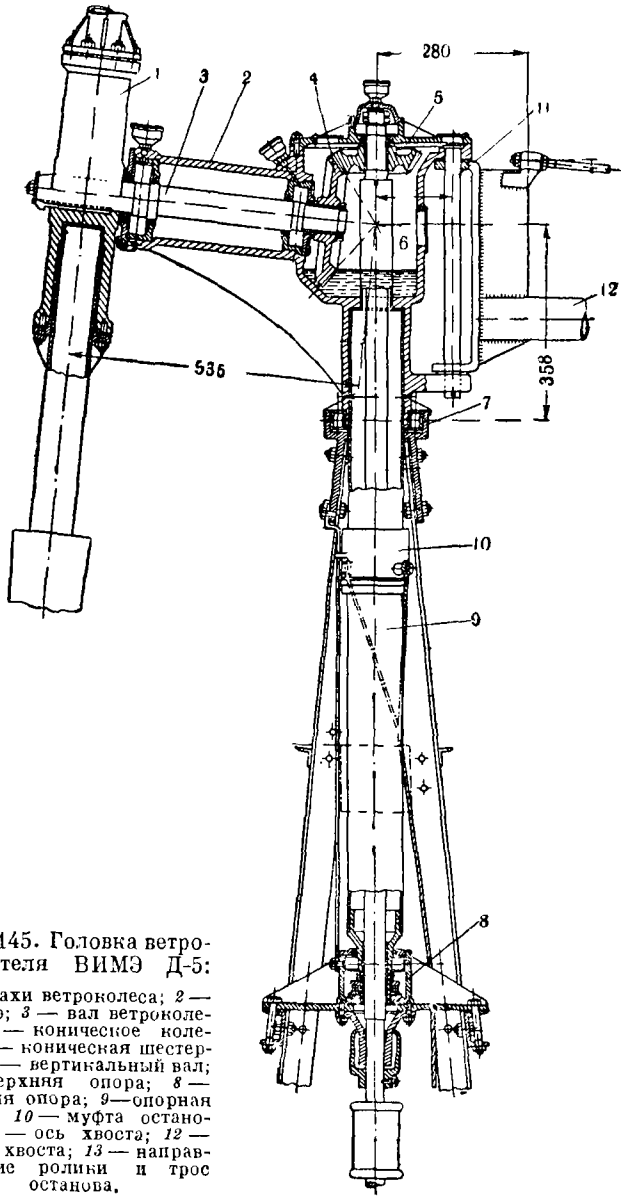


Рис. 145. Головка ветродвигателя ВИМЭ Д-5:

1 — махи ветроколеса; *2* — картер; *3* — вал ветроколеса; *4* — коническое колесо; *5* — коническая шестерня; *6* — вертикальный вал; *7* — верхняя опора; *8* — нижняя опора; *9*—опорная труба; *10* — муфта останова; *11* — ось хвоста; *12* — труба хвоста; *13* — направляющие ролики и трос останова.

8 м/сек. может развивать мощность около 15 л. с. на валу ветроколеса. Нормальное число оборотов ветроколеса составляет 55—60 об/мин.

Ветродвигатель ВИМЭ Д-5 имеет 3-лопастное ветроколесо диаметром 5 м (рис. 144). Вращение ветроколеса

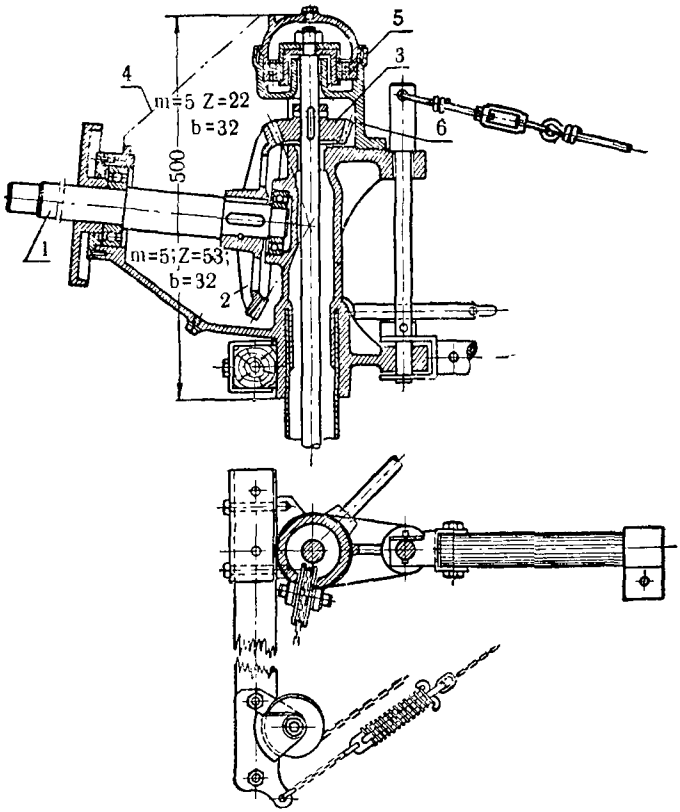


Рис. 146. Головка ветродвигателя ПД-5:

1 — вал ветроколеса; *2* — коническое колесо; *3* — коническая шестерня; *4* — картер головки; *5* — шарикоподшипник вертикального вала; *6* — верхняя опора.

через пару конических зубчатых шестерён передаётся вертикальному валу, присоединённому у основания башни к редуктору. Регулирование осуществляется поворотом всей лопасти около оси маха. Мощность ветродвигателя при скорости ветра 8 м/сек. равна 2,7 л. с. на валу

ветроколеса. Нормальное число оборотов ветроколеса n=180 об/мин. Конструкция головки (рис. 145) имеет тоже литой картер, как у ветродвигателя ВИМЭ Д-12, отличающийся лишь тем, что крышка картера сделана вверху и в ней размещена опора верхнего подшипника вертикального вала.

Редуктор, смонтированный у основания башни, имеет два шкива, от которых можно приводить в работу центробежный насос или маломощные сельскохозяйственные машины, а также генератор.

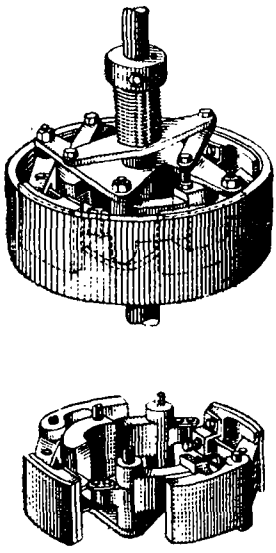


Рис. 147. Центробежная муфта к ветродвигателю ПД-5 инж. С. Б. Перли.

Ветродвигатель ПД-5. Этот ветродвигатель предназначен для работы с поршневым насосом. Двухлопастное ветроколесо дерево-металлической конструкции вращает главный вал, имеющий две опоры с шарикоподшипниками (рис. 146). Вращение ветроколеса передаётся через пару конических колёс вертикальному валу. Передаточное отношение оборотов ветроколеса к оборотам вертикального вала 1 : 2,5. Регулирование осуществляется помощью боковой лопаты и клапанами, помещёнными на концах лопастей ветроколеса. Клапаны работают как воздушные тормоза и предохраняют ветроколесо от разноса при сбросе нагрузки.

Внизу, на верхнем отсеке вертикального вала устанавливается центробежная муфта (рис. 147), которая при определённых числах оборотов включает нижний отсек вала, соединённого с приводной лебёдкой, имеющей червячную передачу. Кривошипный механизм лебёдки приводит в поступательное движение коромысло, соединённое со штангой насоса. Эта ветроустановка является опытной для выявления возможности работы быстроходного ветродвигателя с поршневым насосом.

Ветродвигатель начинает работать вхолостую, поэтому он может трогаться с места при малых скоростях ветра.

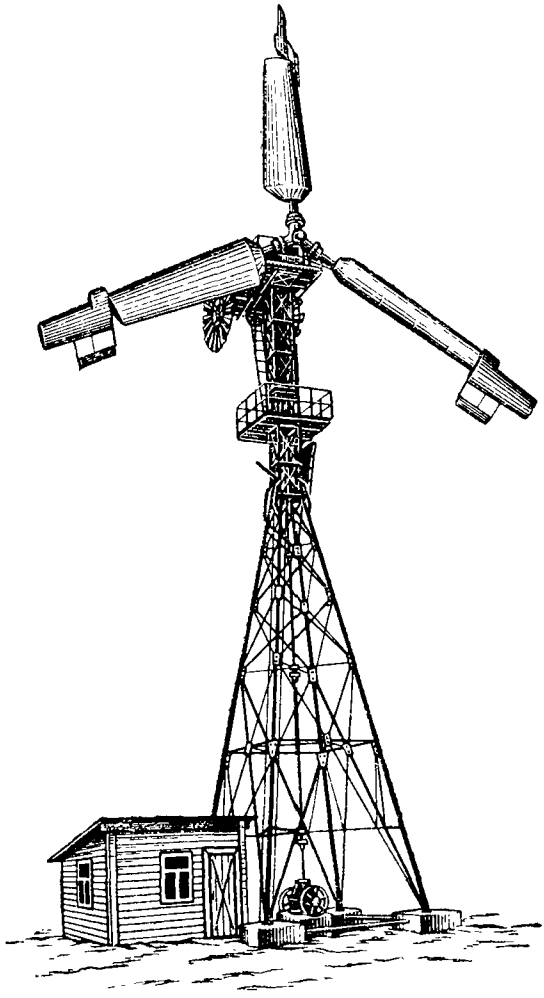


Рис. 148. Ветродвигатель ВИМЭ-ГУСМП Д-18.

Ветродвигатель ВИМЭ-ГУСМП Д-18 быстроходный представляет цельнометаллическую конструкцию с башней высотою в 19 м (рис. 148).

Ветроколесо диаметром 18 м имеет три крыла с лопастями обтекаемой формы (рис. 149). Регулирование оборотов ветроколеса осуществляется по системе

проф. Г. Х. Сабинина и Н. В. Красовского поворотом концевой части крыла, составляющей $^1/_4$ от длины крыла.

Головка ветродвигателя состоит из металлической рамы, на которой помещаются редуктор с передаточным от-

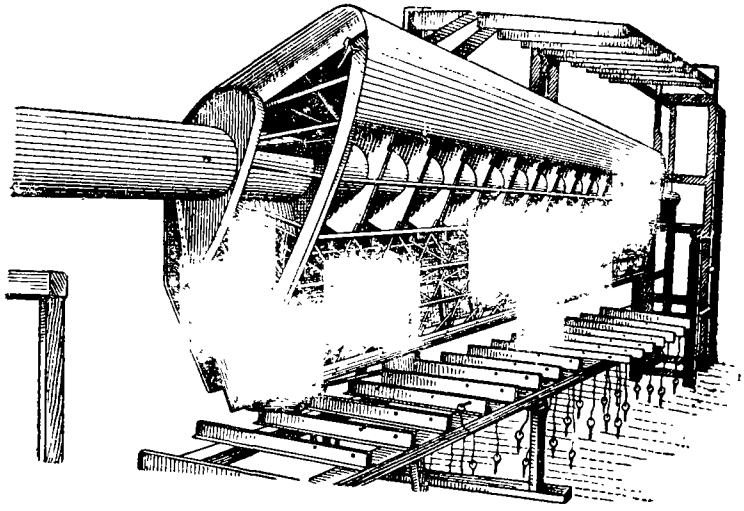


Рис. 149. Крыло с частично спятой обшивой.

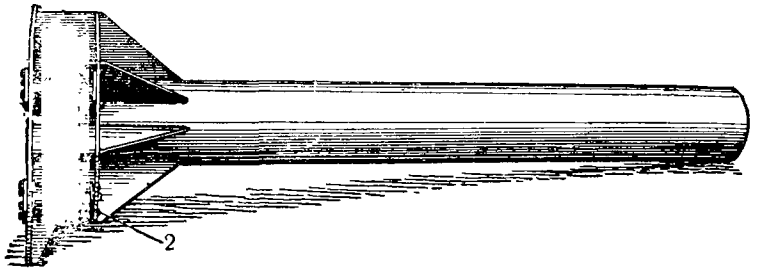


Рис. 150. Опорная труба:
1 — опора под раму головки; *2* — ролики.

ношением 1 : 3, механический колодочный тормоз и механизм установа на ветер с помощью ручного штурвала и виндроз. Головка укрепляется на опорной трубе 325 × 9 мм (рис. 150), которая поворачивается на роликах в ободе, закреплённом на верхнем поясе башни; нижний конец

трубы поворачивается в опоре с шариковым подпятником.

Пуск и останов ветродвигателя производится, так же как и у ветродвигателя ВИМЭ Д-12, ручной лебёдкой, которая закреплена на ноге у основания башни.

Виндрозы, устанавливающие ветроколесо по ветру, представляют собой два 18-лопастных ветровых колеса диаметром 2,7 м. Лопасти виндроз делаются из сосновых

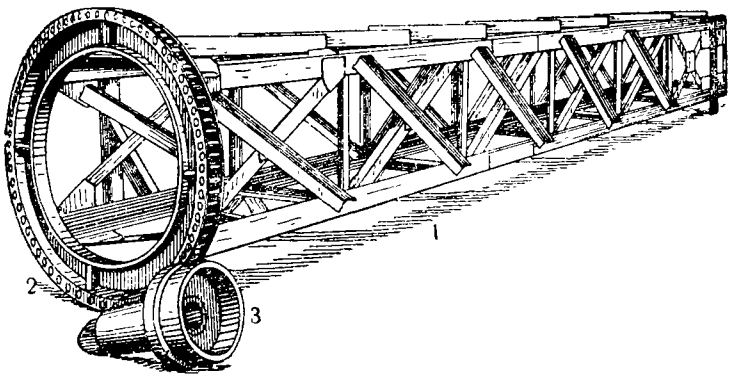


Рис. 151. Призматическая часть башни:

1 — ферма; *2* — обод с цевочной шестернёй; *3* — штырь к опорной трубе, показанной на рисунке 150.

досок толщиною 10 мм. Вращение от вала виндроз передаётся через коническое зацепление к осевому горизонтальному валу и далее через червячную передачу к цевочному ободу, закреплённому на верхнем поясе башни. Полное передаточное отношение равно 1 : 500.

Башня ветродвигателя имеет высоту около 19 м и состоит из нижней клёпаной пирамидальной части со стороной квадрата у основания 4,8 м и верхней призматической цельносварной конструкции со стороной квадрата 0,735 м (рис. 151). Башня построена из углового железа $100 \times 100 \times 14$ мм и $60 \times 60 \times 8$ мм.

Вертикальный вал имеет диаметр 70 мм и вращается в трёх сферических шарикоподшипниках, смонтированных по центру башни на горизонтальных растяжках. Внизу вертикальный вал приключён к редуктору (рис. 152) с передаточным отношением 1 : 3. На горизонтальном валу редуктора насажено два шкива, по 800 мм в диаметре, от

которых можно приводить в движение генератор и трансмиссию для передачи движения комплексу машин.

Ноги башни заделываются на глубину 2,4 м в фундамент из бутовой кладки.

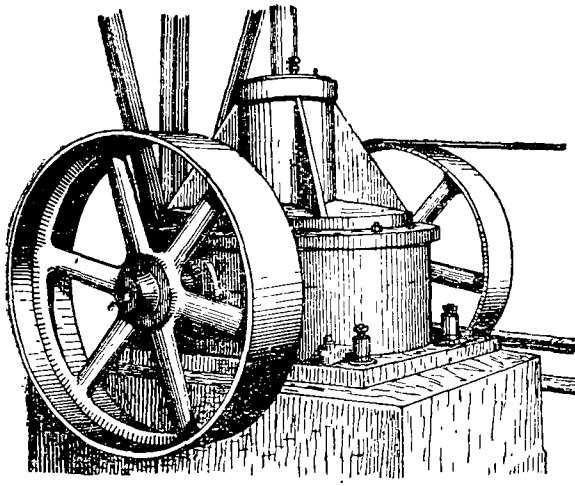


Рис. 152. Редуктор к ветродвигателю Д-18.

Техническая характеристика

Мощность ветродвигателя при скорости ветра 8 м/сек	38 л. с.
Нормальное число оборотов ветроколеса	42 об/мин.
Обороты шкива редуктора	378 »
Веса отдельных узлов ветродвигателя:	
ветроколесо	2 250 кг
головка, регулирование, механизмы останова и поворота на ветер	3 025 »
башня	4 825 »
редуктор с вертикальным валом	2 400 »
Общий вес	12 500 »

Ветродвигатель системы Уфимцева — Ветчинкина Д-10 (рис. 153). Аэродинамический расчёт произведён на основании вихревой теории Н. Е. Жуковского под руководством проф. В. П. Ветчинкина; электрооборудование и автоматика разработаны А. Г. Уфимцевым.

Отличительной особенностью конструкции ветродвигателя является малый вес на 1 киловатт мощности. Вет-

роколесо имеет три лопасти дерево-металлической конструкции с аэродинамическим профилем, подобным крылу аэропланного типа, с дужкой инверсии параболы, предложенной Н. Е. Жуковским и С. А. Чаплыгиным. Лопасти жёстко закреплены на трубчатых махах, которые свободно поворачиваются в шарикоподшипниках, закреплённых на специальном тройнике, надетом на горизонтальный вал ветродвигателя.

Регулирование мощности осуществляется поворотом лопастей около оси махов в направлении ветра. Для этого махи проходят вблизи носка лопасти так, что центр парусности смещён относительно оси поворота крыла к задней кромке.

Вращение ветроколеса передаётся вертикальному валу через пару конических зубчаток, с передаточным отношением 1:3,5. Внизу на вертикальном валу надет большой деревянный шкив, от которого посредством ремня с натяжным роликом передаётся вращение электродинамо с передаточным отношением 1 : 10. На валу динамо насажен шкив со свободным ходом так, что он может отставать при вращении вала генератора другой движущей силой.

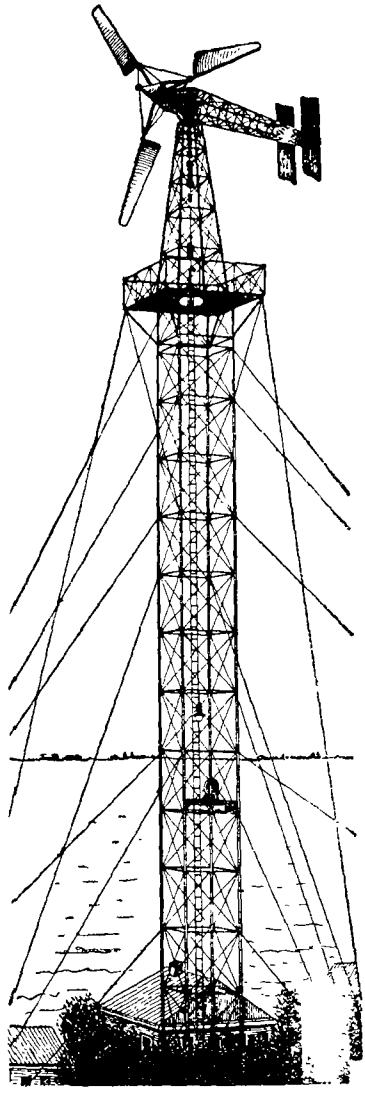


Рис. 153. Ветродвигатель системы Уфимцева — Ветчинкина Д-10.

Это вызвано тем, что вал генератора служит продолжением вала инерционного аккумулятора системы А. Г. Уфимцева. При снижении числа оборотов ветродвигателя инерционный аккумулятор, благодаря данной схеме передачи, вращает 2—3 минуты генератор; отставание ветродвигателя при этом на работе аккумулятора не отражается. Таким образом, это устройство позволяет сглаживать число оборотов генератора в короткие промежутки времени при пульсирующем характере ветра.

Динамо имеет номинальную мощность 3,5 квт при 1 750 об/мин. на 220 вольт, 17 ампер. При увеличении скорости ветра напряжение удавалось поднять до 350 вольт.

Благодаря наличию инерционного аккумулятора, устраняющего быстрые переходы от одного режима работы установки к другому, возможно производить регулирование работы ветроэлектростанции вручную одним из трёх способов, а именно: 1) изменением угла атаки лопастей ручной лебёдкой останова; 2) уменьшением или увеличением тока возбуждения в магнитах шунтовым реостатом; 3) увеличением или уменьшением нагрузки станции приключением дополнительных ламп и моторов.

Установ на ветер ветроколеса осуществляется хвостом ферменной конструкции, на конце которого установлено бипланное оперение (поэтому такой хвост и называется бипланным).

Оперение хвоста изогнуто по некоторой дужке с целью компенсировать реактивный момент вертикального вала, возникающий на зацеплении верхней передачи. Без этого ветряк не мог бы стоять точно по ветру во время его работы. К тому же изогнутая поверхность имеет большую прочность.

Башня высотой 40 м имеет ферменную конструкцию с одинаковым квадратным сечением по всей высоте; в вертикальном положении она удерживается растяжками.

Ветродвигатель ЦАГИ Д-18. Проект этого ветродвигателя (рис. 154) разработан под руководством проф. В. П. Ветчинкина по системе ветродвигателя Уфимцева — Ветчинкина Д-10.

Отличительными особенностями ветродвигателя ЦАГИ Д-18 являются: 1) приключение к вертикальному валу ветродвигателя инерционного аккумулятора буферного типа ёмкостью до 10 минут; 2) значительная высота баш-

ни — 40 м; 3) регулирование поворотом лопасти по системе Уфимцева.

Ветроколесо имеет три лопасти, поворачивающиеся на осях махов, оси которых проходят в носке крыла так, что равнодействующая сил воздушного потока, проходя ближе к центральной оси лопасти, создаёт момент относительно оси маха. Этот момент поворачивает лопасть ребром к ветру, чему противодействует груз, подвешенный

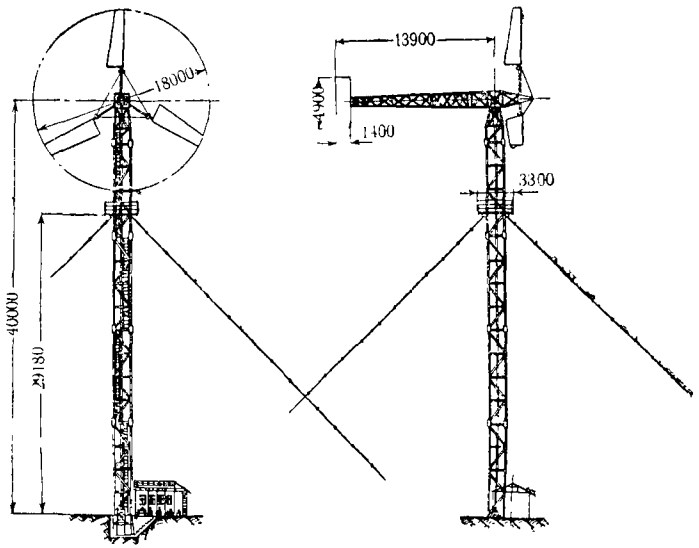


Рис. 154. Ветродвигатель ЦАГИ Д-18 системы проф. Ветчинкина.

к системе рычагов механизма регулирования. При остановленном ветряке груз приподнимают, и крылья свободно устанавливаются носком к ветру, как флюгер, что обусловливает незначительные нагрузки на остановленное ветроколесо.

Инерционный аккумулятор (рис. 155) построен по той же схеме, как и у ветродвигателя Уфимцева — Ветчинкина, описанного выше, и отличается от него лишь весом. Диск аккумулятора весит около 1,25 т; число оборотов 2 500—3 500 в минуту.

С целью уменьшения сопротивления воздуха диск помещён во вращающийся кожух. Эта мера уменьшает сопротивление примерно в $3^1/_2$ раза.

Башня цельнометаллическая, сварной конструкции, высотой 40 м. При столь высокой башне ветродвигатель может работать больше часов в году, чем при низкой башне.

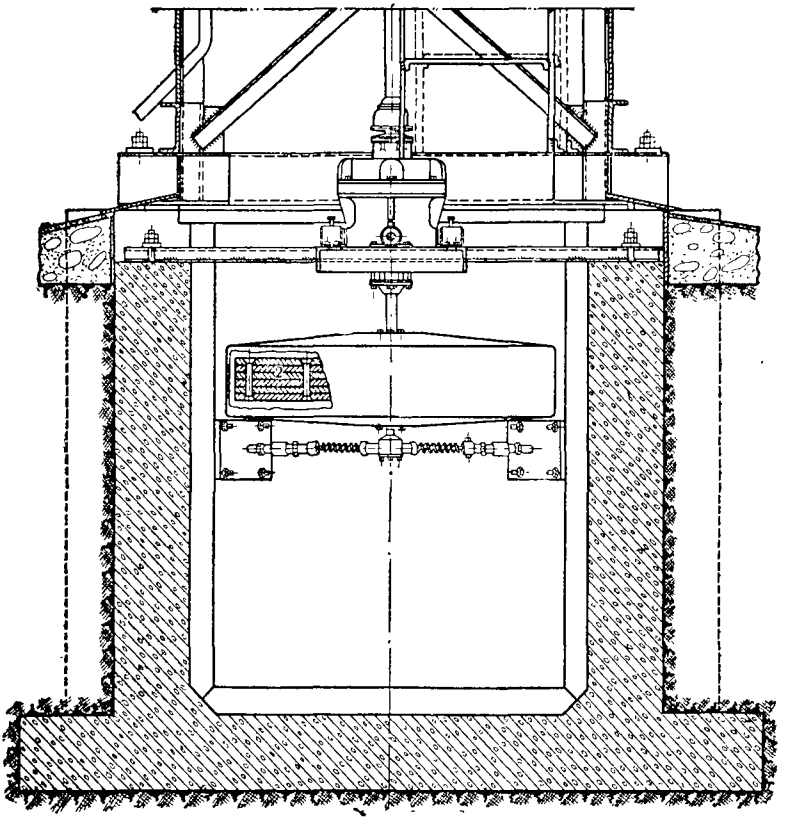


Рис. 155. Инерционный аккумулятор к ветродвигателю ЦАГИ Д-18.

Установ на ветер осуществляется трипланным хвостом, что сделано с целью уменьшения угловой скорости поворота хвоста при боковых порывах ветра.

Вес частей ветродвигателя: башня — 7,5 т, головка ветродвигателя — 3,5 т, инерционный аккумулятор — 1,5 т, общий вес — 12,5 т.

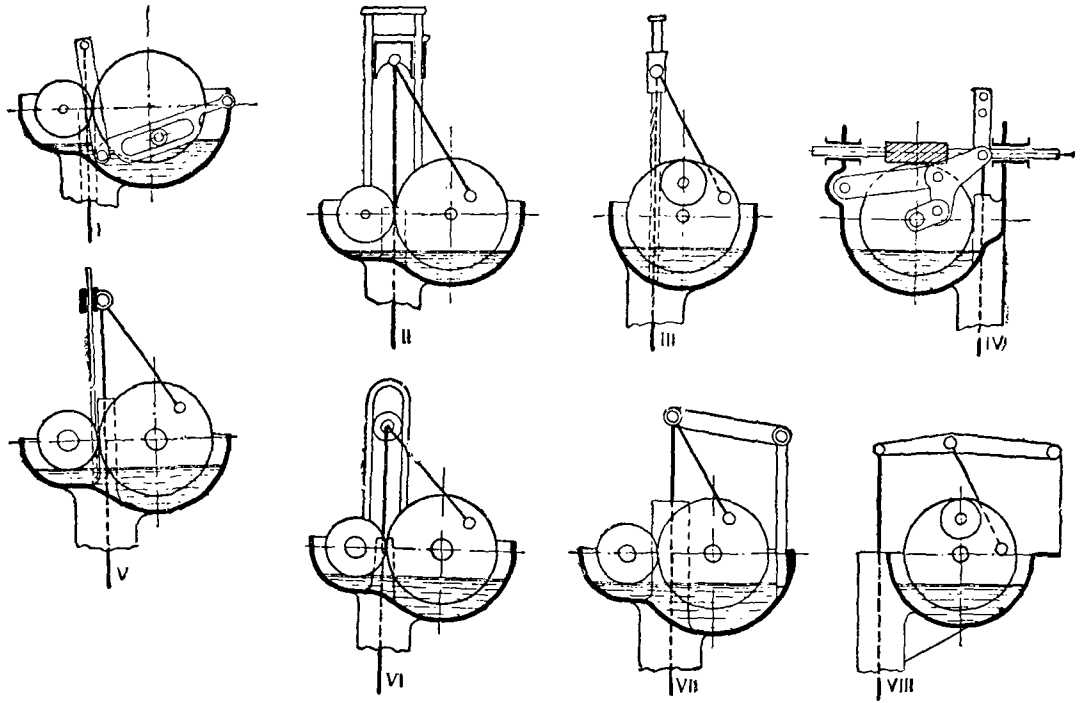
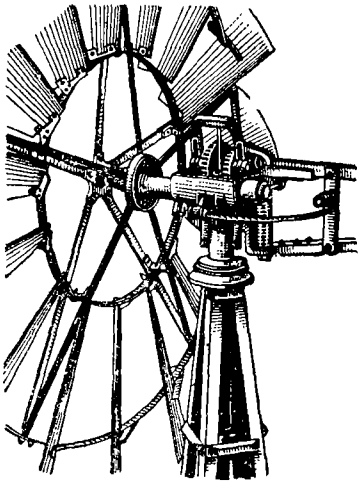


Рис. 156. Схемы передаточных механизмов ветродвигателей, работающих с поршневыми насосами.

При разработке проектов ветродвигателей основное внимание должно быть уделено конструкции ветроколеса и передаточного механизма. Наибольшим разнообразием конструктивных схем отличаются передаточные механизмы для работы ветродвигателя на поршневой насос.



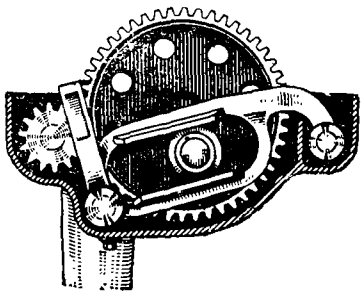


Рис. 157. Общий вид головки ветродвигателя «АСЕ».

На рис. 156 показаны восемь схем типовых передаточных механизмов, преобразующих вращательное движение ветроколеса в поступательное движение штанги насоса. Передачи запроектированы так, чтобы число рабочих частей их было наименьшим и чтобы во всех трущихся частях механизма получилось жидкостное трение, обеспечивающее малые потери энергии и уменьшение износа трущихся частей.

На рис. 157 показан общий вид головки ветродвигателя «АСЕ» с открытым передаточным механизмом, выполненным по схеме *I* (рис. 156).

Передаточный механизм по схеме *II* (рис. 156) выполняется у ветродвигателей «Фриман» (рис. 158). Зубчатые шестерёнки здесь также работают в масляной ванне; направляющие шатунного механизма смазываются маслом, которое захватывается из картера при сжатии пружин, навитых на направляющих.

На рис. 159 дана головка с передаточным механизмом ветродвигателя «Стовер». Передаточный механизм двигателя выполнен по схеме *III* (рис. 156); для смазки направляющих служит плунжерный насос, выполненный

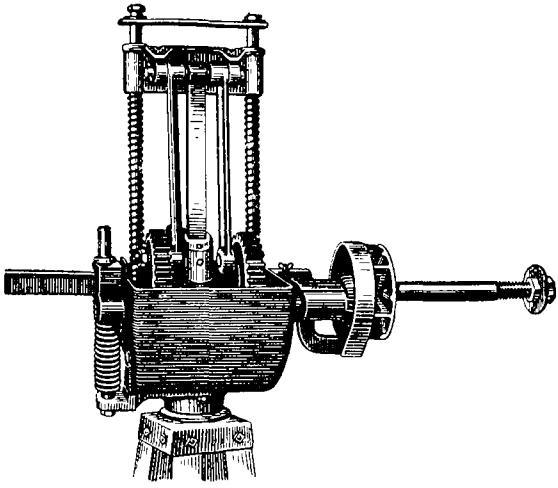


Рис. 158. Головка ветродвигателя «Фриман».

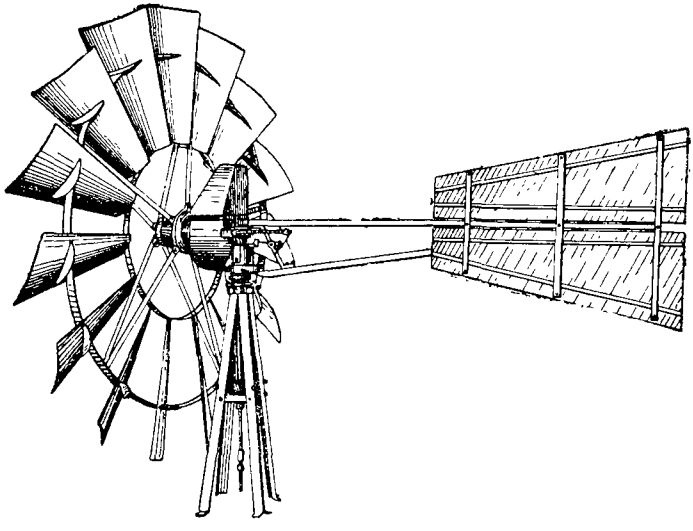


Рис. 159. Общий вид головки ветродвигателя «Стовер».

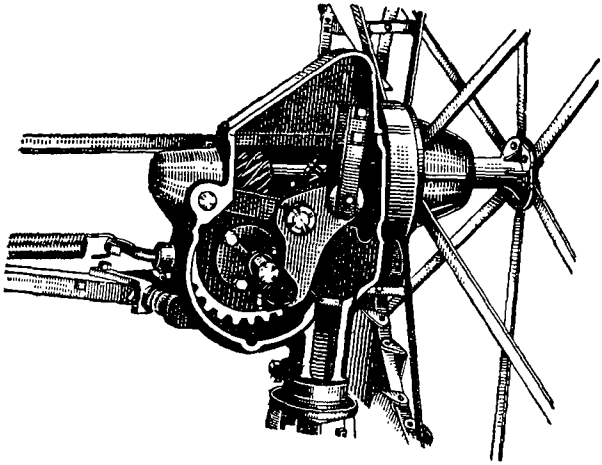


Рис. 160. Головка ветродвигателя «Фербенкс».

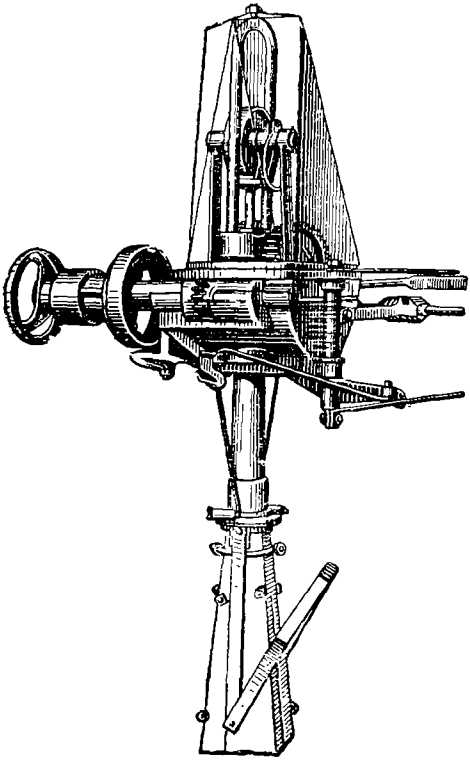


Рис. 161. Головка ветродвигателя «Аэромотор».

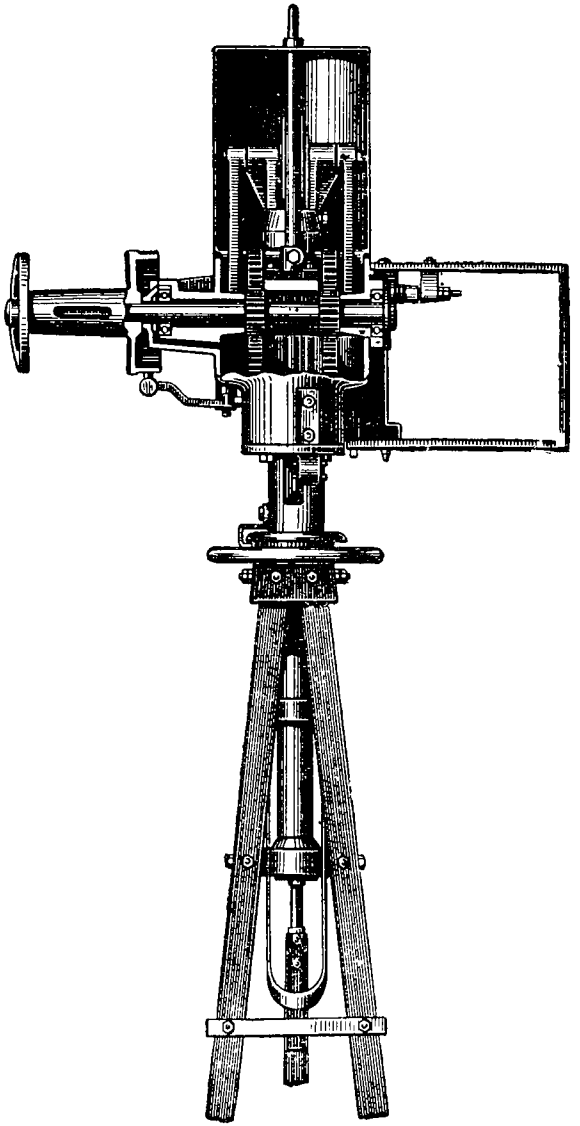


Рис. 162. Головка ветродвигателя «Геркулес».

в одной из направляющих. Масло забирается насосом из масляной ванны картера. Ветродвигатель имеет роликовые подшипники и автоматическую смазку.

Передаточный механизм компактной конструкции ветродвигателей «Фербенкс» выполняется по схеме *IV* (рис. 156). На валу ветроколеса (рис. 160) насажен червяк, находящийся в зацеплении с червячным колесом, на ободе которого смонтирован шатунный механизм.

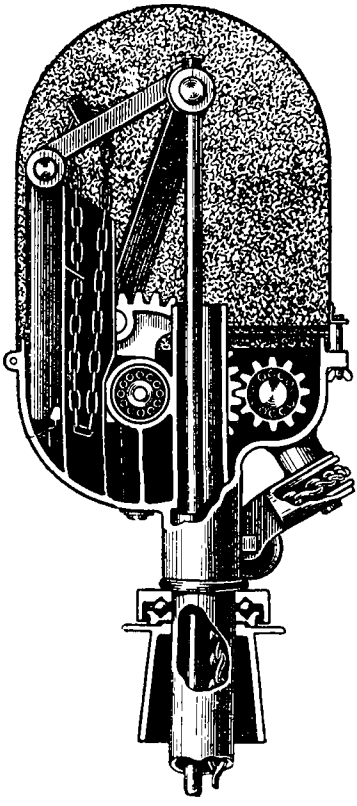


Рис. 163. Головка ветродвигателя «Гигант».

Передаточный механизм многолопастных ветродвигателей «Аэромотор» выполняется по схеме *VI* (рис. 156). По этой же схеме изготовляется кривошипный механизм многолопастных ветродвигателей «Геркулес» и «Климакс» в Англии. Устройство головки ветродвигателя «Аэромотор» показано на рис. 161, а «Геркулес» — на рис. 162. Отличие их заключается лишь в механизме пуска и останова. У первого этот механизм состоит из ряда рычагов, соединённых с муфтой, поворачивающейся на опорной трубе и перемещающейся на ней продольно (рис. 161), у второго вместо рычагов имеются два направляющих ролика, через которые перекинута цепь, закреплённая верхним концом к хвосту, а нижним, проходящим внутри опорной трубы, к муфте, которая может скользить по опорной трубе только вверх и вниз (рис. 162).

Весьма проста конструкция передаточного механизма у ветродвигателей «Гигант» (рис. 163). Поступательное

движение штанге насоса сообщается шатуном, присоединённым к коромыслу, у которого один конец соединён шарнирно с неподвижной опорой (схема *VII*, рис. 156).

Ветродвигатель «ИЗИ» имеет передаточный механизм с внутренним зацеплением зубчатой передачи (схема *VIII*, рис. 156). Общий вид головки этого двигателя и цилиндрическая передача с внутренним зацеплением показаны на рис. 164.

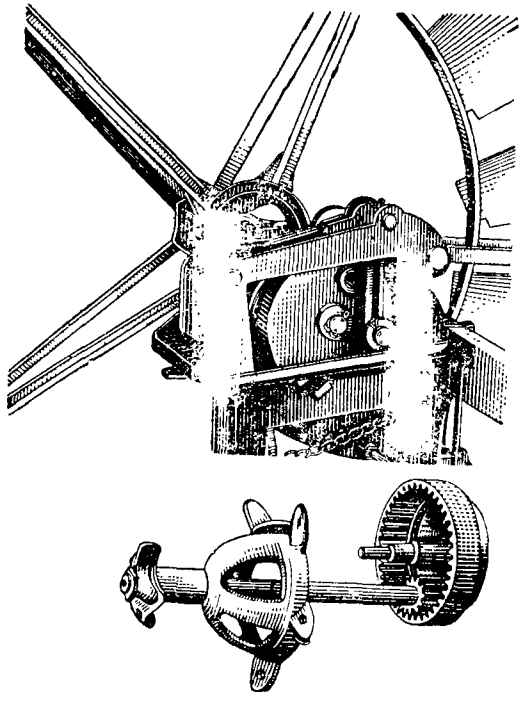


Рис. 164. Головка ветродвигателя «ИЗИ» и передаточный механизм.

Среди быстроходных ветродвигателей для электроустановок, отметим шестилопастные ветродвигатели с диаметром ветроколеса от 5 до 12,5 м датской фирмы «Агрико» (рис. 165). Крылья этих ветродвигателей имеют махи из стальных труб. Регулирование достигается поворотом лопастей крыльев около оси махов. Все шесть лопастей кинематически связаны между собой так, что поворот их в процессе регулирования происходит одновременно.

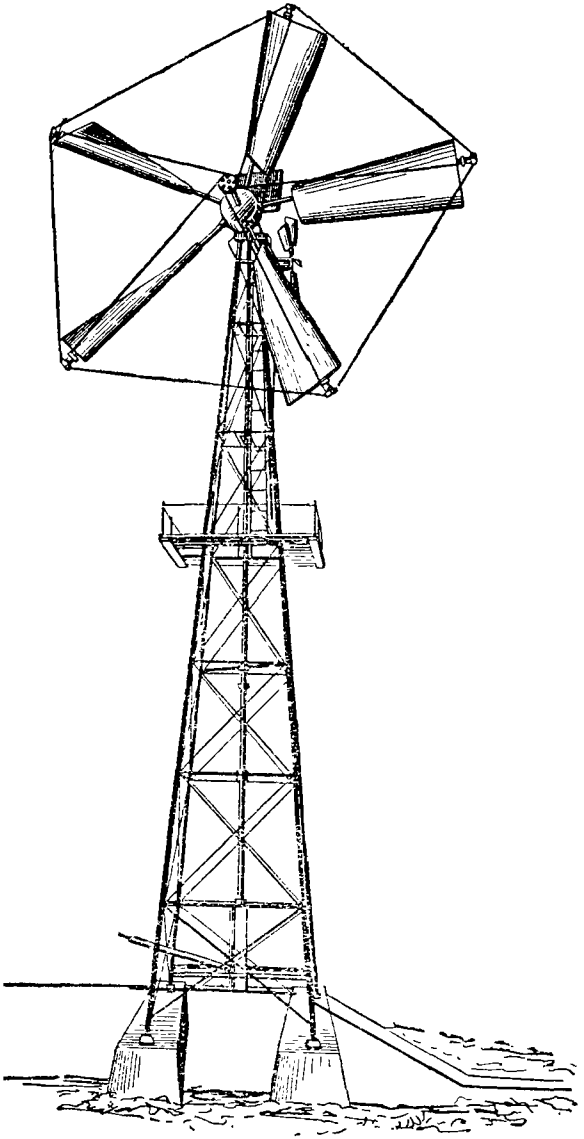


Рис. 165. Ветродвигатель «Агрико».

Для небольших ветроэлектроустановок американская фирма «Роралайт» выпускает модель «1000» с трёхлопастным ветроколесом диаметром 3,45 м. Ограничение оборотов производится поворотом лопасти с помощью центробежного регулятора, смонтированного на валу ветроколеса (рис. 166). Мощность — 1 квт при 300 об/мин.

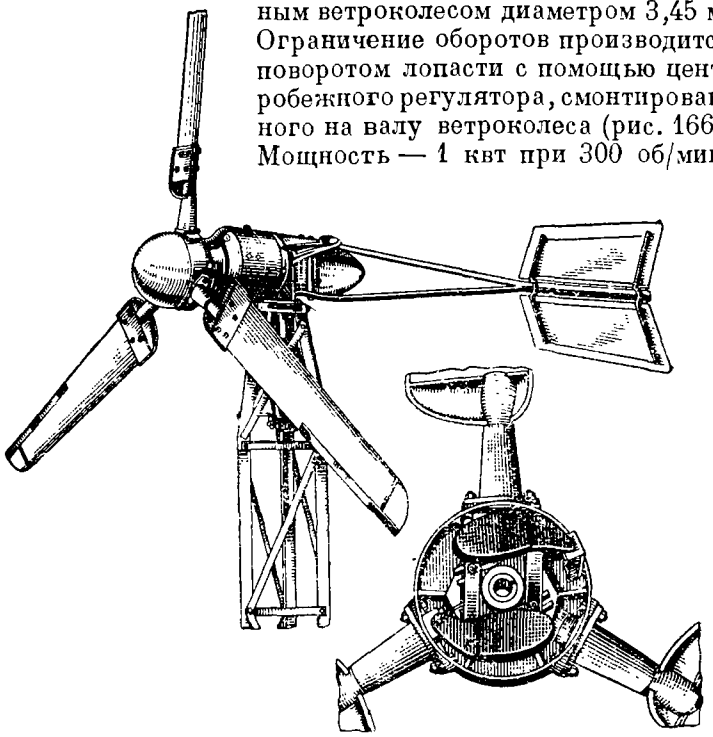


Рис. 166. Ветроэлектрический двигатель «Роралайт».

Четырёхполюсный шунтовой генератор 1 квт, при 32—40 вольтах, с максимальным числом оборотов 1 200 об/мин, размещён позади ветроколеса.

§ 39. ВЕСА ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Основным моментом при разработке конструкции ветродвигателя является вопрос создания такого ветродвигателя, который, при высоких эксплоатационных качествах, отличался бы наименьшим весом. Это требование вытекает из необходимости экономии металла, а также экономии транспортных средств по перевозке излишне тяжёлых ветродвигателей на места их эксплоатации. Ветродвигатели вообще чрезвычайно металлоёмки. Вес быстро-

ходных ветродвигателей в среднем равен от 300 до 400 кг на 1 л. с., а тихоходных — от 500 до 800 кг на 1 л. с.

В таблице 10 приведены веса ветродвигателей советского и заграничного производства.

В этой таблице отметим значения графы 10 весов двигателей, отнесённых к единице ометаемой поверхности ветроколеса. Оказывается, что многолопастные ветро-

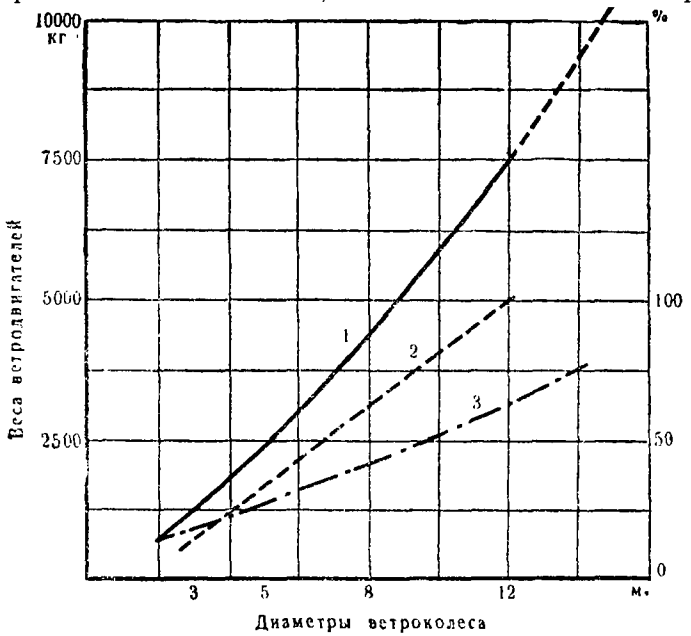


Рис. 167. Кривые общего веса ветродвигателей:
1 — вес тихоходных ветродвигателей; *2* — вес быстроходных ветродвигателей; *3* — кривая превышения веса тихоходных ветродвигателей над весом быстроходных в %.

двигатели, относящиеся к разряду тихоходных, почти в два раза тяжелее малолопастных быстроходных.

На рис. 167 и 168 даны кривые для сравнения весов ветродвигателей отечественного производства. На рис. 167 даны веса тихоходных и быстроходных ветродвигателей с учётом веса башен, а на рис. 168 даны кривые весов ветродвигателей без учёта веса башен. Эти кривые показывают, что тихоходные ветродвигатели тяжелее быстроходных от 30 до 65% с учётом веса башен и от 80 до 120% без учёта веса башен.

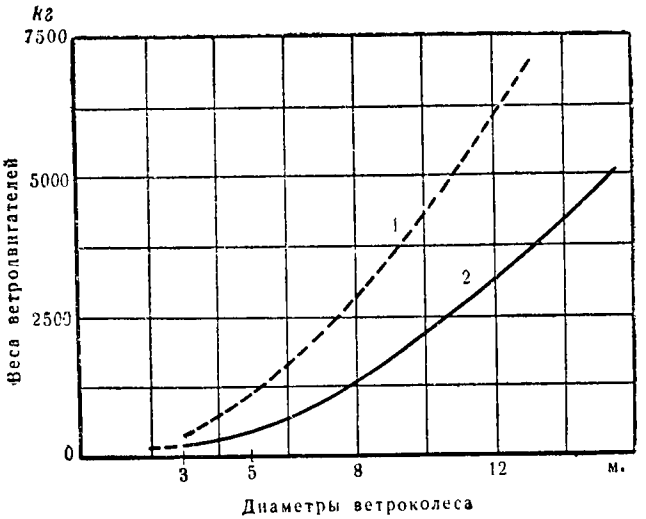


Рис. 168. Кривые веса ветродвигателей без башни:
1 — вес тихоходных ветродвигателей; *2* — вес быстроходных ветродвигателей.

На рис. 169 построена кривая изменения относительного веса для быстроходных ветродвигателей ВИМЭ Д-5, ВИМЭ Д-12, ВИМЭ Д-3 и ЦВЭИ Д-50 с одинаковыми аэродинамическими параметрами, построенных и проектируемых для постройки на заводах СССР.

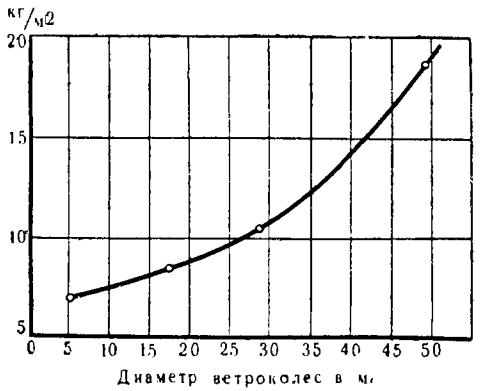


Рис. 169. Характеристика веса ветроколёс на один кв. метр ометаемой площади быстроходных ветродвигателей.

Наименование ветродвигателей	Диаметр ветроколеса (в м)	Число лопастей	Ометаемая поверхность (в м²)
1	2	3	4
Производство СССР			
Многолопастный ТВ-5	5	18	19,6
» ТВ-8	8	18	50,3
Быстроходный ВИМЭ Д-12	12	3	113,0
» ВИМЭ Д-5	5	3	19,6
» ВИМЭ Д-30	30	3	707
» ВИМЭ Д-3, крылья из авиационного материала	3	3	7,07
Быстроходный ЦВЭИ Д-12	12	3	113
Крымский ЦАГИ Д-30	30	3	707
Сверхмощный ЦВЭИ Д-50 (проект)	50	3	1 960
Роторный ЦВЭИ $F=13$ Д=2 м Н=6,5	Размах ротора	2+2	13
Ветродвигатель А. Г. Уфимцева и В. П. Ветчинкина	10	3	78,5
Ветродвигатель ПД-3 (из дюраля)	3	2	7,07
Многолопастные заграничного производства			
«Самсон» (США)	3,05	18	7,3
	4,9	24	18,8
«Стовер»	3,05	18	7,3
«Стар» (США)	4,3	18	14,5
«Аэромотор» (США)	3,05	18	7,3
	4,9	18	18,8
«Геркулес» (Англия)	3,05	18	— 7,3
	4,9	18	—18,8
	5,5	18	23,7

Таблица 10

ветродвигателей

Вес отдельных частей ветродвигателей (в кг)				Вес ветродвигателя без башни (в кг)	Вес двигателя, отнесённый к единице ометаемой поверхности (в кг)	Вес башни (в кг)	Высота башни (в м)
Ветроколесо	Хвост	Головка	Редуктор				
5	6	7	8	9	10	11	12
344	92	535	320	1 291	66	1 198	15
820	160	590	380	1 950	38,8	1 900	15
796	195	1 220	236+вал 308	2 755	24,3	1 682	16
135	65	165	210	575	29,4	1 300	15
7 526	—	10 125	7 949	25 600	36,2	16 134	24
7	2,4	35	—	44,4	6,25	15,3	4
1 129	794	1 021	—	2 944	26,0	2 553	12
—	—	—	—	33 900	48	15 170	25
37317	—	73 000	Входит в вес головки	108 000	55	52 000	50
850	—	—	—	850	65	1 763	13,5
420	250	960	Верт. вал 328	1 958	25	—	40
9	4	13	—	26	2,7	Труба 14	4
—	—	—	—	267	35,6	—	—
—	—	—	—	1 010	54	—	—
—	—	—	—	252	34,5	—	—
—	—	—	—	772	53,0	—	—
—	—	—	—	262	36,0	495	16,2
—	—	—	—	950	50,5	1 090	16,2
—	—	—	—	254	35	640	15,2
—	—	—	—	920	49	980	15,2
—	—	—	—	1 000	42	1 040	15,2

Отсюда видим, что удельный вес ветродвигателей, т. е. вес, отнесённый к единице ометаемой ветроколесом поверхности, сильно растёт с увеличением диаметра ветроколеса. Это указывает на то, что не следует слишком увлекаться большими размерами ветродвигателей.

На рис. 170 построены кривые веса в зависимости от диаметра ветроколеса заграничных ветродвигателей многолопастных:

I — для английского ветродвигателя «Геркулес»;
II — для американского ветродвигателя «Самсон»;
III — для американского ветродвигателя «Аэромотор»;

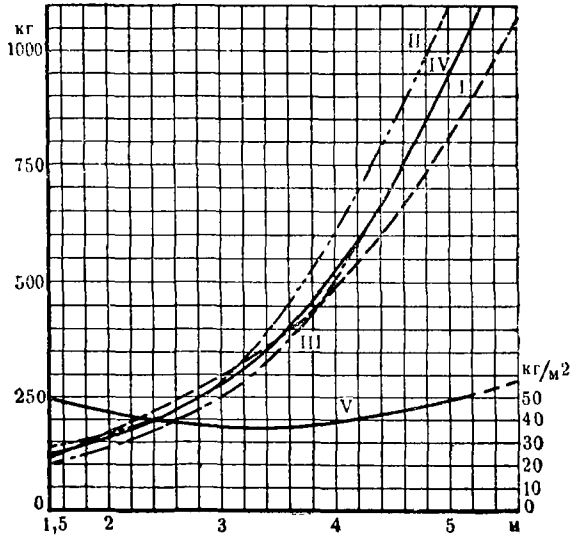


Рис. 170. Характеристика весов ветродвигателей.

IV — кривая среднего веса ветродвигателя в зависимости от диаметра ветроколеса, построенная, исходя из кривых I, II и III;

V — кривая среднего веса ветродвигателя, приходящаяся на 1 м² ометаемой поверхности ветроколеса.

Последняя кривая показывает, что минимальным относительным весом обладают многолопастные ветродвигатели с диаметром от 3 до 3,5 м.

ГЛАВА XI

РАСЧЁТ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ

Расчёт на прочность механизма или сооружения определяется величинами нагрузок и допускаемыми напряжениями. Излагаемые ниже приёмы дают возможность установить величины нагрузок, нормирование же напряжений применительно к расчёту ветродвигателей, из-за малого опыта по этому вопросу, в настоящий момент ещё крайне затруднительно.

§ 40. ВЕТРОВЫЕ НАГРУЗКИ НА КРЫЛЬЯ И РАСЧЁТ ИХ НА ПРОЧНОСТЬ

Нагрузка на элементарную площадку лопасти шириною b и длиною dr, согласно уравнению (85), равна:

$$dP = C_y b dr \rho \frac{W^2}{2},$$

где: C_y — коэфициент подъёмной силы крыла;
ρ — массовая плотность воздуха;
W — относительная скорость воздушного потока, набегающего на элемент лопасти;
r — расстояние элемента лопасти от оси вращения ветроколеса.

Относительная скорость воздушного потока:

$$W = \sqrt{\omega^2 r^2 + V^2},$$

где: ωr — окружная скорость элемента лопасти:
V — скорость ветра.

Следовательно:

$$dP = C_y b dr \frac{\rho}{2} (\omega^2 r^2 + V^2). \qquad \text{(а)}$$

Принимая $C_y b$ постоянными по длине крыла и интегрируя, получим полную нагрузку на крыло:

$$P = C_y b \frac{\rho}{2} \int_{r_0}^{R} (\omega^2 r^2 + V^2)\, dr =$$

$$= C_y b \frac{\rho}{2} \left[\frac{\omega^2}{3} (R^3 - r_0^3) + V^2 (R - r_0) \right]. \qquad (б)$$

Вынося за скобку $(R—r_0)$, получим:

$$P = C_y \frac{\rho}{2} b (R - r_0) \left[\omega^2 \frac{R^2 + R r_0 + r_0^2}{3} + V^2 \right]. \qquad (в)$$

Вводим обозначения:

$b (R - r_0) = S$ — площадь лопасти,

$$\frac{R^2 + R r_0 + r_0^2}{3} = r_m^2 \text{ условный радиус крыла.} \qquad (178)$$

Подставляя S и r_m в уравнение (в), получим полную нагрузку на крыло:

$$P = C_y \frac{\rho}{2} S (\omega^2 r_m^2 + V^2). \qquad (179)$$

В моменты порывов ветра с большими скоростями, к которым ветроколесо не сразу может приспособиться, крылья могут быть перегружены. Отношение возможной максимальной нагрузки крыла P_{max}, возникающей при порывах ветра, к рабочей нагрузке при расчётной скорости ветра P_p называется коэфициентом перегрузки.

$$n = \frac{P_{max}}{P_p}. \qquad (180)$$

Обозначим скорость ветра при порыве через V_n и напишем уравнения нагрузки на крыло при V и V_n:

$$P = C_y S \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V^2), \qquad (179)$$

$$P_{max} = C_{yn} S \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V_n^2), \qquad (179а)$$

где C_{yn}— коэфициент подъёмной силы при порыве ветра.

Взяв отношение уравнений (179а) к (179), получим выражение коэфициента перегрузки в следующем виде:

$$n = \frac{P_{max}}{P} = \frac{C_{yn} (\omega^2 r_m + V_n^2)}{C_y (\omega\, r_m^2 + V^2)}.$$

Так как силы P и P_{max} подсчитываются при максимальном значении $C_y = C_{yn}$, то можем принять:

$\frac{C_{yn}}{C_y} = 1$; следовательно:

$$n = \frac{\omega^2 r_m^2 + V_n^2}{\omega^2 r_m^2 + V^2}. \qquad (г)$$

Обозначим:

$$k = \frac{V_n}{V^2}$$

и $Z_m = \frac{\omega r_m}{V}$ —условное число модулей при $r = r_m$.

Подставив эти значения в равенство (г) и разделив числитель и знаменатель правой части на V^2, получим:

$$n = \frac{\frac{\omega^2 r_m^2}{V^2} + \frac{V_n^2}{V^2}}{\frac{\omega^2 r_m^2}{V^2} + \frac{V^2}{V^2}} = \frac{Z_m^2 + k^2}{Z_m^2 + 1}; \qquad (181)$$

при этом в уравнении (179) необходимо C_y принимать максимальным.

Для определения усилий на подшипники, а также на башни необходимо знать $P_л$ полное лобовое давление на ветроколесо. Величину этого давления получим, умножив уравнение (179) на число лопастей i и на коэфициент перегрузки n, т. е.:

$$P_л = C_y S \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V^2)\, in. \qquad (182)$$

Максимальная нагрузка на крыло:

$$P_{max} = \frac{P_л}{i}. \qquad (183)$$

Рассмотрим два случая работы ветроколеса: 1) под нагрузкой и 2) без нагрузки. В обоих случаях направление ветра перпендикулярно плоскости вращения ветроколеса.

Случай I. Ветряк под нагрузкой. Уравнение давления на лопасть:

$$P = C_y S \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V^2), \qquad (179)$$

где C_y — максимальный коэфициент подъёмной силы, значения которого указаны в нижеприведённой таблице для многолопастных ветряков:

$\frac{b}{f}=\frac{\text{Ширина лопасти}}{\text{высота дужки}}$	8	10	14	16	20	25	60	∞
C_y Максимальные значения . .	1,56	1,46	1,36	1,26	1,12	0,98	0,80	0,74

C_y для быстроходного ветряка с профилем «Эспero» принимаем по графику (рис. 171), который даётся для C_y, полученных при угле атаки α=10. Для других профи-

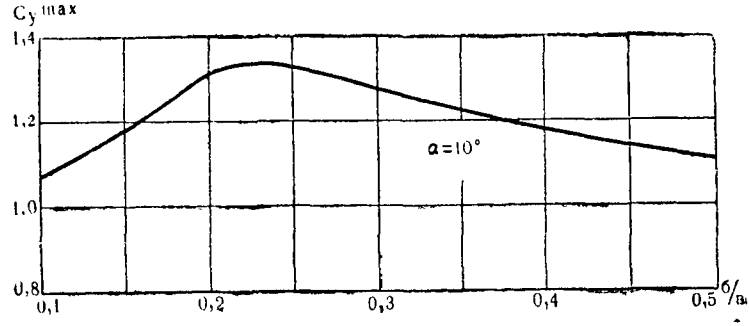


Рис. 171. График C_y в зависимости от $\frac{\delta}{в}$ для профилей «Эспero»

лей C_y надо выбирать по их продувкам. Характеристики некоторых профилей были приведены на рис. 35 I, II. III и IV в главе II.

Случай II. Ветроколесо стоит плоскостью вращения перпендикулярно потоку ветра при рабочей скорости V: нагрузка рабочей машины отключена:

$$P_{max}=\frac{X}{i}, \tag{184}$$

где: X — лобовое давление на ветроколесо по продувкам в Кучинской аэродинамической трубе;

i — число лопастей.

$$X=\bar{x}\pi R^2\rho\frac{V^2}{2}. \tag{154}$$

Значения $\bar{x}$ — коэфициента лобового давления, когда ветряк без нагрузки:

Многолопастное ветроколесо с цилиндрической дужкой $\bar{x}=0,642$
Четырёхлопастное колесо «Сюр» с аэродинамическим профилем . . . . . $\bar{x}=0,412$

Пример 1. Определить лобовое давление и нагрузку на крыло ветродвигателя при скорости ветра

$$V=10 \text{ м/сек.}$$

Ветроколесо имеет: диаметр $D=16$ м; $r_0=0,1\ D=1,6$ м; ширина лопасти на ближайшем к центру ветроколеса сечении $b_1=1,8$ м и на внешнем конце $b_2=0,8$ м; $\frac{\delta}{b}=0,15$. Число модулей $Z_n=3$ и число лопастей $i=4$.

Лобовое давление по уравнению (182) равно:

$$P_л=C_y\frac{\rho}{2}S(\omega^2r_m^2+V^2)in.$$

$C_y=1,2$ — максимальный коэфициент подъёмной силы находим по графику рис. 171 при $\frac{\delta}{b}=0,15$.

$\rho=0,125$ — массовая плотность воздуха при 15° и 760 мм рт. ст.

$S=\frac{1,8+0,8}{2}(8-1,6)=8,3$ м²— площадь лопасти.

$\omega=\frac{Z_nV}{R}=\frac{3\cdot10}{8}=3,75$ — угловая скорость ветроколеса.

$r_m=\sqrt{\frac{R^2+Rr_0+r_0^2}{3}}=\sqrt{\frac{8^2+8\cdot1,6+1,6^2}{3}}=5,14$ — условный радиус крыла.

$$n=\frac{Z_m^2+k^2}{Z_m^2+1}=\frac{1,93^2+1,5^2}{1,93^2+1}=\frac{5,97}{4,72}=1,26.$$

Здесь

$$k=\frac{V_n}{V}=1,5;$$

$$Z_m=\frac{\omega r_m}{V}=\frac{3,75\cdot5,14}{10}=1,93.$$

Подставляя цифровые значения в уравнение (182), получим:

$$P_л=1,2\cdot\frac{0,125}{2}\cdot8,3(3,75^2\cdot5,14^2+10^2)\cdot1,26\cdot4=1\,990 \text{ кг.}$$

Нагрузку на крыло находим по уравнению (183):

$$P_{max} = \frac{P_л}{4} = \frac{1\,990}{4} = 498 \text{ кг}.$$

Распределение ветровой нагрузки по крылу. Нагрузка по длине лопасти распределяется пропорционально расстояниям сечений лопасти от оси вращения ветроколеса. Принято эту нагрузку представлять графически в виде наклонной прямой под некоторым углом к оси маха. Нагрузка по хорде крыла распределяется по треугольнику (рис. 172).

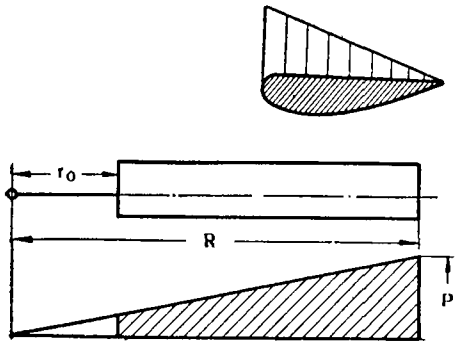


Рис. 172. Нагрузка по длине и хорде лопасти.

Нагрузку на лопасть определим по методу А. И. Макаревского, который представляет её в виде объёма трёхгранной усечённой пирамиды, обращённой своей вершиной к центру ветроколеса (рис. 173).

Объём такой пирамиды равен:

$$V = \frac{h}{3}(f + F + \sqrt{fF});$$

согласно обозначениям рис. 173, имеем:

$h = R - r_0$ — высота пирамиды;

$f = \frac{b_1 x}{2}$ — основание пирамиды, ближайшее к центру ветроколеса;

$F = \frac{b_2 x \frac{R}{r_0}}{2}$ — основание пирамиды, удалённое от центра.

Подставляя эти выражения, получим:

$$V = \frac{R - r_0}{3}\left(\frac{b_1 x}{2} + \frac{b_2 x \frac{R}{r_0}}{2} + \sqrt{\frac{b_1 x}{2} \cdot \frac{b_2 x \frac{R}{r_0}}{2}}\right) =$$

$$= \frac{x(R - r_0)}{6}\left(b_1 + b_2 \frac{R}{r_0} + \sqrt{b_1 b_2 \frac{R}{r_0}}\right).$$

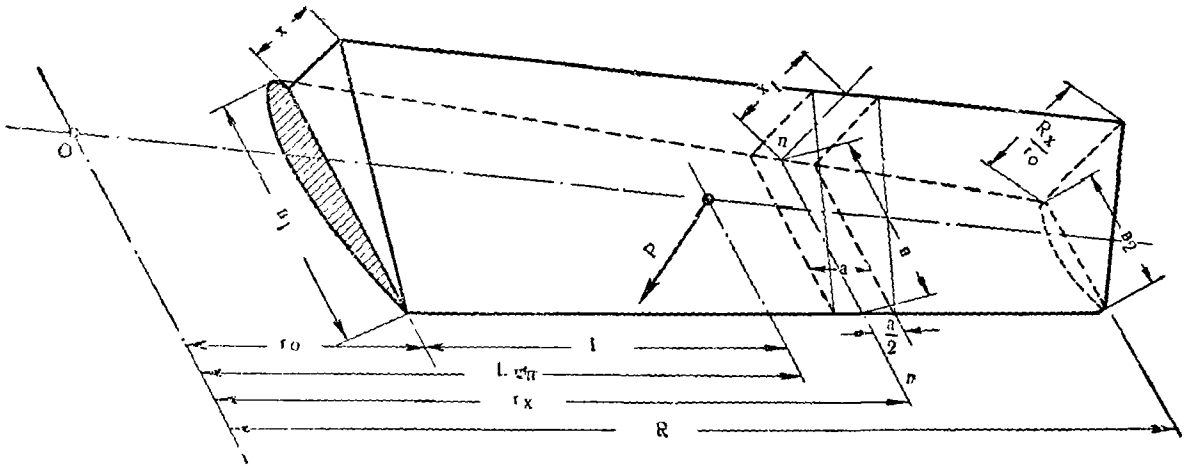


Рис. 173. Объемная нагрузка на лопасть.

Заменим в подкоренном выражении b_1 его значением, полученным из соотношения:

$$\frac{b_1}{b_2} = \frac{r_0}{R},$$

откуда $b_1 = b_2 \frac{r_0}{R}$.

Подставляя под корень, получим:

$$V = \frac{x(R - r_0)}{6}\left(b_1 + b_2 \frac{R}{r_0} + \sqrt{b_2 \frac{r_0}{R} \cdot b_2 \frac{R}{r_0}}\right) =$$
$$= \frac{x(R - r_0)}{6}\left[b_1 + b_2\left(\frac{R}{r_0} + 1\right)\right].$$

Принимая ординату $x=1$ м, получим:

$$V = \frac{R - r_0}{6}\left[b_1 + b_2\left(\frac{R}{r_0} + 1\right)\right] \text{ м}^3. \qquad (185)$$

Если же рассматривать объём нагрузки в виде призматоида с двумя параллельными гранями, то для такого объёма можно применить формулу:

$$V = \frac{h}{6}(f + F + 4M),$$

где, согласно рис. 173, имеем:

$h = R - r_0$ — высота призматоида;

$f = \frac{b_1 x}{2}$ — площадь первого основания призматоида;

$F = \frac{b_2 x}{2} \cdot \frac{R}{r_0}$ — площадь второго основания, параллельного первому;

$M = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot \frac{x + x\frac{R}{r_0}}{2} \cdot \frac{1}{2}$ — площадь среднего сечения, проходящего на одинаковом расстоянии от параллельных оснований.

Подставляя значения h, f, F и M в уравнение объёма призматоида, получим:

$$V = \frac{R - r_0}{6}\left(\frac{b_1 x}{2} + \frac{b_2 x \frac{R}{r_0}}{2} + 4\frac{b_1 + b_2}{2} \cdot \frac{x + x\frac{R}{r_0}}{2} \cdot \frac{1}{2}\right).$$

После преобразования этого уравнения при $x=1$ получим:

$$V = \frac{R - r_0}{6}\left[b_1\left(1 + \frac{R}{2r_0}\right) + b_2\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r_0}\right)\right]. \qquad (186)$$

Уравнение (185) рекомендуется для крыльев с трапециевидной формой лопасти, сужающейся к центру ветроколеса, которые применяются у многолопастных ветродвигателей. Уравнение (186) более подходит для крыльев с трапециевидной формой лопасти, уширяющейся к центру ветроколеса, которые применяются у быстроходных ветродвигателей.

Удельная нагрузка. Отношение нагрузки на крыло к объёмной нагрузке называют удельной нагрузкой, величина которой равна:

$$p = \frac{P_{max}}{V} = \frac{P_{max}}{\frac{R - r_0}{6}\left[b_1 + b_2\left(\frac{R}{r_0} + 1\right)\right]} \text{ кг/м}^3 \qquad (187)$$

для лопастей, сужающихся к центру, и

$$p = \frac{P_{max}}{V} = \frac{P_{max}}{\frac{R - r_0}{6}\left[b_1\left(1 + \frac{R}{2r_0}\right) + b_2\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r_0}\right)\right]} \text{ кг/м}^3 \qquad (188)$$

для лопастей, уширяющихся к центру.

Положение центра парусности или равнодействующей нагрузки P, применяя обозначения рис. 173, находим следующим образом.

Хорда какого-либо сечения на расстоянии l от основания лопасти выразится равенством:

$$b_l = b_1 - \frac{(b_1 - b_2)}{(R - r_0)} \cdot l. \qquad (а)$$

Наибольшая нагрузка у носика лопасти в этом же сечении равна:

$$x_1 = x\left(1 + \frac{l}{r_0}\right). \qquad (б)$$

Элементарный объём нагрузки

$$dV = \frac{b_l \cdot x_1}{2} dl = \frac{x}{2}\left(b_1 - \frac{b_1 - b_2}{R - r_0} \cdot l\right)\left(1 + \frac{l}{r_0}\right) dl. \qquad (в)$$

Напишем общее выражение для положения центра парусности:

$$L_{цп} = r_0 + \frac{\int_0^{R - r_0} dV l}{V},$$

где V — вся объёмная нагрузка на крыло.

Решив интеграл и разделив результат на V, известный из уравнения (186), получим $L_{цп}$.

$$\int_0^{R-r_0} dV l = \int_0^{R-r_0} \frac{b_l x_1}{2}\, dl \cdot l =$$

$$= \int_0^{R-r_0} \frac{x}{2}\left(b_1 - \frac{b_1-b_2}{R-r_0}\cdot l\right)\left(1+\frac{l}{r_0}\right) l \cdot dl =$$

$$= \frac{x}{2}\left[b_1 \frac{(R-r_0)^2}{2} + \left(\frac{b_1}{r_0} - \frac{b_1-b_2}{R-r_0}\right)\frac{(R-r_0)^3}{3} - \frac{(b_1-b_2)}{(R-r_0)r_0}\cdot\frac{(R-r_0)^4}{4} = \right.$$

$$= \frac{x}{2}(R-r_0)^2\left[\frac{b_1}{2} + \frac{b_1}{3r_0}(R-r_0) - \frac{b_1-b_2}{3} - \frac{b_1-b_2}{4r_0}(R-r_0)\right] =$$

$$= \frac{x}{2}\cdot\frac{(R-r_0)^2}{12}\left[b_1 + b_2 + b_1\frac{R}{r_0} + 3b_2\frac{R}{r_0}\right].$$

Разделив это выражение на правую часть уравнения (186) и принимая $x=1$, получим:

$L'_{цп}$ от основания лопасти:

$$L'_{цп} = \frac{R-r_0}{2}\,\frac{\left(b_1 + b_2 + \frac{b_1 R}{r_0} + 3b_2\frac{R}{r_0}\right)}{\left(2b_1 + b_2 + b_1\frac{R}{r_0} + 2b_2\frac{R}{r_0}\right)}. \qquad (189)$$

Прибавив сюда r_0, получим $L_{цп}$ от оси вращения ветроколеса:

$$L_{цп} = r_0 + \frac{(R-r_0)}{2}\,\frac{\left(b_1 + b_2 + b_1\frac{R}{r_0} + 3b_2\frac{R}{r_0}\right)}{\left(2b_1 + b_2 + b_1\frac{R}{r_0} + 2b_2\frac{R}{r_0}\right)}. \qquad (190)$$

Обычно крыло имеет размер по радиусу $r_0 = 0{,}2\,R$ почти для всех крыльев, а по ширине $b_2 \cong \frac{1}{2}\,b_1$ — у быстроходных; $b_2 = b_1$ — у крыльев ветряных мельниц и $b_2 \cong 2b_1$ — у многолопастных ветродвигателей. Подставляя эти значения в уравнения (186) и (190), получим простые выражения для быстрого подсчёта объёмной нагрузки V и $L_{цп}$ положения центра парусности разных крыльев.

Для быстроходных крыльев с узким концом лопасти:

$$V = 0{,}833 R b_1 \qquad (а)$$

$$L_{цп} = 0{,}648 R. \qquad (б)$$

Для многолопастных:

$$V = 1{,}74Rb_1, \quad \text{(в)}$$
$$L_{цп} = 0{,}724R. \quad \text{(г)}$$

Для крыльев ветряных мельниц:

$$V = 1{,}2Rb_1, \quad \text{(д)}$$
$$L_{цп} = 0{,}688R. \quad \text{(е)}$$

Нагрузка на нервюру крыла. Принимаем расстояние между нервюрами равным a, следовательно, нагрузка на этом расстоянии распределяется на две нервюры так, что одна её часть на расстоянии $\frac{a}{2}$ относится к одной нервюре, другая часть на участке $\frac{a}{2}$ — к другой. Величину нагрузки на нервюру найдём, умножив удельную нагрузку [см. уравнения (187) и (188)] на объём ΔV аэродинамической нагрузки, приходящейся на нервюру. Определим объём ΔV интегрированием:

$$dV = \frac{1}{2} b \cdot x \cdot dr_x = \frac{1}{2}\left(b_1 - \frac{b_1 - b_2}{R - r_0}\right)(r_x - r_0)\frac{r_x}{r_0} \cdot dr_x =$$
$$= \frac{1}{2r_0(R - r_0)}(b_1 R - b_1 r_0 - b_1 r_x + b_1 r_0 + b_2 r_x - b_2 r_0) r_x dr_x =$$
$$= \frac{1}{2r_0(R - r_0)}[(b_1 R - b_2 r_0) \cdot r_x - (b_1 - b_2) r_x^2]\, dr_x.$$

Если обозначим расстояние от центра ветроколеса до нервюры через r_x, то искомый объём найдём в пределах: от $r_x - \frac{a}{2}$ до $r_x + \frac{a}{2}$, а именно:

$$\Delta V = \int_{r_x - \frac{a}{2}}^{r_x + \frac{a}{2}} dV;$$

Подставив сюда значение dV и проделав интегрирование, получим объём нагрузки, приходящийся на одну нервюру:

$$\Delta V = \frac{a}{2r_0(R - r_0)}\left[(b_1 R - b_2 r_0) r_x - (b_1 - b_2)\left(r_x^2 + \frac{a^2}{12}\right)\right] \text{м}^3.$$

Умножив удельную нагрузку p на этот объём, получим нагрузку, приходящуюся на одну нервюру:

$$Q_x = p \cdot \Delta V = \frac{Pa}{2r_0 (R - r_0)} \left[(b_1 R - b_2 r_0) r_x - \right.$$
$$\left. - (b_1 - b_2) \left(r_x^2 + \frac{a^2}{12} \right) \right] \text{ кг}, \qquad (191)$$

где: a — расстояние между нервюрами;
r_x — расстояние нервюры от оси ветроколеса;
b_1 — ширина лопасти на конце, обращённом к центру ветроколеса;
b_2 — ширина лопасти на внешнем конце;
p — удельная нагрузка на лопасть, уширяющуюся к центру ветроколеса [уравнение (188)].

Лопасти, уширяющиеся к внешней окружности, применяются только у многолопастных ветроколёс малых диаметров и нервюр обычно не имеют.

Пример 2. Определить нагрузку на нервюру крыла предыдущего примера 1, если расстояние нервюры от оси ветроколеса $r_x = 5$ м; расстояние между нервюрами $a = 0{,}6$ м.

$r_0 = 1{,}6$ м; $R = 8$ м; $b_1 = 1{,}8$ м; $b_2 = 0{,}8$ м (рис. 173).

Решение. Нагрузка на крыло, согласно примеру 1, равна $P_{max} = 498$ кг.

Находим объём нагрузки на крыло по уравнению (186):

$$V = \frac{R - r_0}{6} \left[b_1 \left(1 + \frac{R}{2r_0} \right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r_0} \right) \right] =$$
$$= \frac{8 - 1.6}{6} \left[1{,}8 \left(1 + \frac{8}{2 \cdot 1{,}6} \right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{8}{1{,}6} \right) \right] = 11{,}5 \text{ м}^3.$$

Удельную нагрузку p находим согласно уравнению (188):

$$p = \frac{P_{max}}{\frac{R - r_0}{6} \left[b_1 \left(1 + \frac{R}{2r_0} \right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r_0} \right) \right]} = \frac{498}{11{,}5} = 43{,}5 \text{ кг/м}^3.$$

Нагрузка на нервюру крыла, расположенную на расстоянии $r_x = 5$ м от оси ветроколеса, согласно уравнению (191), будет равна:

$$Q_x = \frac{p \cdot a}{2r_0 (R - r_0)} \left[(b_1 R - b_2 r_0) r_x - (b_1 - b_2) \left(r_x^2 + \frac{a^2}{12} \right) \right] =$$

$$= \frac{43{,}5 \cdot 0{,}6}{2 \cdot 1{,}6 (8 - 1{,}6)} \left[(1{,}8 \cdot 8 - 0{,}8 \cdot 1{,}6) 5 - \right.$$

$$\left. - (1{,}8 - 0{,}8) \left(5^2 + \frac{0{,}6^2}{12} \right) \right] = 51{,}7 \text{ кг}.$$

Нагрузка на жёстко закреплённую часть крыла при регулировании поворотом конца лопасти.

Жёстко закреплённая часть крыла испытывает наибольшую нагрузку в бурю. Поэтому при определении нагрузки на эту часть крыла принимают максимальную скорость ветра $V_{бур}$ равной для районов со среднегодовой скоростью ветра

до 5,5 м/сек . . . . . 40 м/сек.
от 5,5 до 7 м/сек. . . . . 50 м/сек.
и выше 7 м/сек. . . . . 60 м/сек.

Лобовое давление на жёсткую часть лопасти, по уравнению (179), равно:

$$P_{ж} = C_y S_{ж} \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V_{бур}^2),$$

где: $C_y = 1{,}28$ — коэфициент подъёмной силы;

$S_{ж}$ — площадь жёсткой части лопасти;

r_m — условный радиус крыла, определяется с помощью уравнения (178), где R надо считать от центра ветроколеса до конца жёсткой части лопасти.

Нагрузка на поворотную часть лопасти. При работе ветродвигателя в бурю крутящий момент поворотной части лопасти $M_{пов}$ действует в обратную сторону и уравновешивает избыточный момент $M_{изб}$, развиваемый жёсткой частью лопасти $M_{ж}$, т. е.:

$$M_{изб} = M_{пов} = M_{уст} - M_{ж},$$

где $M_{уст}$ — момент, развиваемый лопастью при установленной мощности ветродвигателя [см. уравн. (193)].

Отсюда усилие, приложенное к поворотной части лопасти, будет равно:

где:
$$P_{пов} = \frac{M_{уст} - M_{ж}}{R_x}, \qquad (192)$$

$$M_{уст} = \frac{75 \cdot N_{уст}}{\omega}; \qquad (193)$$

$$M_{ж} = \frac{75 \cdot N_{ж}}{\omega}; \qquad (194)$$

R_x — расстояние точки приложения силы $P_{нов}$ от оси вращения ветроколеса.

Мощность ветроколеса, имеющего диаметр $D_{ж}$ в пределах окружности, проходящей по концам жёсткой части лопастей, согласно уравнению (137), равна:

$$N_{ж} = 0{,}000654\, D_{ж}^2 V_{бур}^3 \xi_{бур}; \qquad (137а)$$

здесь $\xi_{бур}$ надо определить, исходя из числа модулей, по аэродинамической характеристике данного ветроколеса.

$$Z_{бур} = \frac{\omega R_{ж}}{V_{бур}},$$

где

$$R_{ж} = \frac{D_{ж}}{2}.$$

По данному $Z_{бур}$ находим $\xi_{бур}$ по характеристике и подставляем в уравнение (137а). Нормальную мощность $N_{уст}$ находим при ξ_{max}. Имея цифровые значения $N_{ж}$ и $N_{уст}$, находим $M_{ж}$ и $M_{уст}$ и, наконец, $P_{нов}$ [см. уравнения (192), (193) и (194)].

Определив давление $P_{нов}$ на поворотную часть лопасти, находим C_y с помощью уравнения (179):

$$C_y = \frac{2P_{нов}}{S_{нов} \rho (\omega^2 r_m^2 + V^2)}. \qquad (195)$$

Получив C_y для определённого отношения $\frac{\delta}{b}$, находим по графику (рис. 63) угол атаки α, который, надо ожидать, будет отрицательным.

Нагрузка на стабилизатор поворотной лопасти равна:

$$Q_{ст} = C_y \frac{\rho}{2} S_{ст} (\omega^2 r_{ст}^2 + V^2), \qquad (193)$$

где C_y — максимальный коэфициент подъёмной силы.

$C_y = 0{,}9$ при $\frac{\delta}{b} = 0{,}17$;

$S_{ст}$ — площадь стабилизатора;

ω — угловая скорость ветроколеса;

$r_{ст}$ — радиус стабилизатора, равный расстоянию от центра парусности стабилизатора до оси вала ветроколеса;

V — рабочая скорость ветра в м/сек., при которой двигатель развивает полную мощность.

Распределение нагрузки по длине поворотной части крыла равномерное, по хорде — треугольником.

Нагрузка на мах. При расчёте на прочность маха рассматриваются два случая нагружения.

Случай 1. Ось маха занимает горизонтальное положение; O и D — опоры маха; E и K — опоры крыла (рис. 174).

Мах подвергается действию момента весовых сил M_g, момента аэродинамических сил M_a и растяжению от центробежных сил C:

$$M_g = G(L_{цт} - l),$$

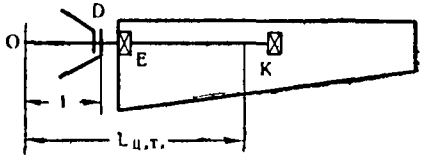


Рис. 174. Схема крыла к расчёту маха при горизонтальном его положении.

где G — вес крыла, определяемый по его чертежу;

$L_{цт}$ — расстояние центра тяжести крыла от оси вращения; принимаемое $L_{цт} = 0{,}48\,R$;

l — расстояние от оси вращения до опасного сечения; $l = 0{,}2$ до $0{,}25$ R.

Момент в опасном сечении равен:

$$M_g = G \cdot (0{,}48R - 0{,}25R) = G\,0{,}23R. \qquad (197)$$

$$M_a = P_{max}(L_{цп} - l),$$

где: $L_{цп}$ — расстояние центра парусности крыла от оси вращения ветроколеса;

P_{max} — нагрузка на крыло, которая определяется с помощью уравнений (182) и (183); расчётный момент:

$$M = \sqrt{M_g^2 + M_a^2}; \qquad (198)$$

центробежная сила:

$$C = m\omega^2 r = \frac{G}{9{,}81}\,\omega^2 L_{цт} =$$

$$= \frac{G}{9{,}81}\,\omega^2\,0{,}48R = 0{,}049 G_{кр}\omega^2 R. \qquad (199)$$

Напряжение в опасном сечении маха:

$$k = \frac{M}{W} + \frac{C}{F}, \qquad (200)$$

где: F — площадь сечения маха;

M — суммарный момент, изгибающий мах.

Случай 2. Ось маха занимает вертикальное положение; крыло опущено вниз.

Мах подвергается действию: 1) момента аэродинамических сил M_a; 2) момента от гироскопических сил $M_г$; 3) момента центробежных сил $M_{цс}$ и 4) весовых сил крыла G.

$$M_a = P_{max}(L_{цп} - l)$$

$$M_г = \left[\int_l^R dmr^2 - l\int_l^R dmr\right] 2\omega\omega_1, \qquad (201)$$

где разность интегралов в квадратных скобках равна:

I — моменту инерции лопасти относительно оси вращения ветроколеса;

ω — угловая скорость вращения крыла;

ω_1 — угловая скорость поворота головки с ветроколесом относительно оси башни.

Следовательно:

$$M_г = I 2\omega\omega_1. \qquad (201а)$$

Напряжение в опасном сечении маха:

$$k = \frac{M_a + M_г}{W} + \frac{C + G}{F}. \qquad (202)$$

При расчете лонжеронов крыла гироскопический момент их не учитывается, так как масса самих лонжеронов представляет собой очень небольшую величину. При расчёте маха гироскопическим моментом пренебрегать нельзя, так как этот момент определяется всей массой крыла (лонжероны, первюры, опоры, регулирующие грузы и т. д.).

К напряжению в опасном сечении маха необходимо добавить напряжение, возникающее за счёт момента центробежных сил. Величину этого момента находим с помощью уравнения (175):

$$M_{цс} = I_{кр}\frac{\omega^2 \sin 2\varphi}{2},$$

где $I_{кр}$ — момент инерции крыла со стабилизатором относительно оси маха;

φ — угол заклинения.

Соотношения моментов инерции лопасти и стабилизатора приблизительно равны.

$$I_{ст} = 0{,}75\, I_{кр}; \quad I_л = 0{,}25\, I_{кр}.$$

Расчёт на прочность крыльев со стабилизаторами выполняется в следующем порядке.

Во-первых, подсчитывают расчётную нагрузку на крыло по уравнению (179);

во-вторых, рассчитывают на прочность мах по уравнению (202) и

в-третьих, на основе полученных размеров маха устанавливают $\frac{\delta}{b}$ профиля, исходя из условий размещения в нём маха, после чего ведут построение крыла; вычерчивают его совмещённые сечения и располагают в нём лонжероны.

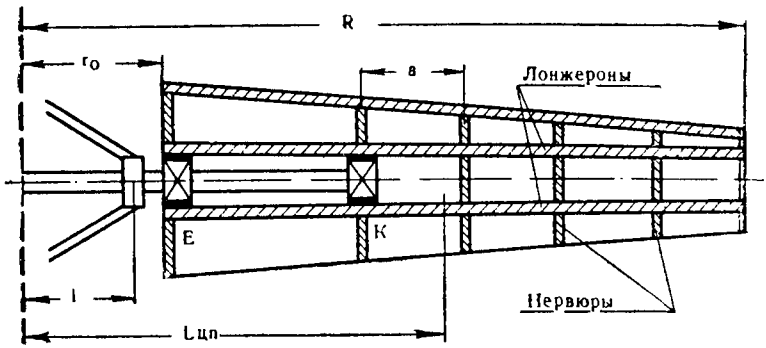


Рис. 175. Схема двухлонжеронного крыла.

Получив конструктивную форму крыла, приступают к расчёту лонжеронов.

Приведём расчёт для двухлонжеронного крыла (рис. 175 и 176). Ветровая нагрузка на лопасть вызывает силы P_1 и P_2, приходящиеся на лонжероны:

$$P_1 = \frac{Q_x}{t}\left(m + \frac{t}{2} - \frac{1}{3}b\right); \quad P_2 = \frac{Q_x}{t}\left[\frac{1}{3}b - \left(m - \frac{t}{2}\right)\right].$$

Эти формулы построены согласно рис. 176. Силу Q_x — нагрузку на нервюру, определяют с помощью уравнения (191).

Лонжероны рассчитываются как консольные балки на двух опорах E и K (рис. 175). Сосредоточенные силы P_1 и P_2 приложены в местах крепления нервюр (рис. 176).

Расчёт стабилизатора. Нагрузка на стабилизатор быстроходных ветродвигателей определяется по уравнению:

$$Q = C_{y\,max} f_{cm} \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_{cm}^2 + V_p^2).$$

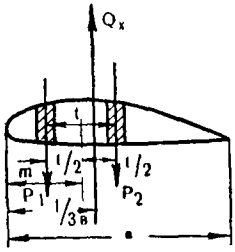


Рис. 176. Сечение двухлонжеронного крыла.

Эта нагрузка, распределяясь равномерно по длине лонжерона и в виде треугольника по его хорде, изгибает лонжерон моментом:

$$M_u = \frac{Q l_{cm}}{8}, \qquad (203)$$

где l_{cm} — длина стабилизатора (рис. 177).

Кроме того, на лонжерон стабилизатора действует крутящий момент M_t, возникающий вследствие смещения центра парусности относительно оси лонжерона.

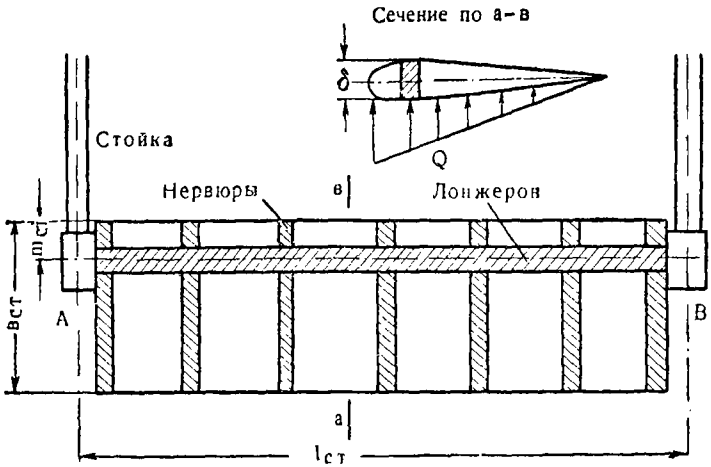


Рис. 177. Нагрузка на стабилизатор.

Так как нагрузка по хорде распределяется в виде треугольника, то центр парусности находится на расстоянии $^1/_3$ хорды от носка стабилизатора, следовательно:

$$M_t = Q \left(\frac{1}{3} b_{cm} - m_{cm} \right), \qquad (204)$$

где b_{cm} и m_{cm} даны на рис. 177.

При отношении допускаемых напряжений изгиба $k_{из}$ и k_t кручения $\frac{k_{из}}{k_t} \cong 1{,}3$, полное напряжение на кручение лонжерона равно:

$$\sigma = 0{,}35\sigma_{из} + 0{,}65\sqrt{\sigma_{из}^2 + 4\sigma_t^2}, \qquad (205)$$

где

$$\sigma_{из} = \frac{M_{из}}{W_{из}} \text{ и } \sigma_t = \frac{M_t}{W_t}; \quad W_{из} \text{ и } W_t \text{—моменты}$$

изгиба и кручения. Нагрузка на нервюру стабилизатора равна:

$$Q_n = \frac{Q}{n-1}, \qquad (206)$$

где n — число нервюр.

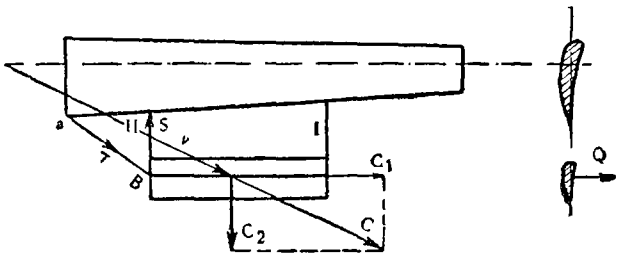


Рис. 178. Действие сил на стабилизатор.

Нервюра рассчитывается на изгиб, как балка с заделанными концами. Изгибающий момент:

$$M_n = Q_n\left(\frac{1}{3}\, b_{cm} - m_{cm}\right). \qquad (207)$$

Стойки стабилизатора подвергаются изгибу от силы Q и центробежной силы C (рис. 178). При этом стойка I подвергается изгибу аэродинамической силой $\frac{Q}{2}$ и растяжению — силой $\frac{C_2}{2}$.

Стойка II. Подвергается изгибу от силы $\frac{Q}{2}$, сжатию силой S, полученной от разложения силы C_1, на направление оттяжки aB и стойки II, и растяжению силой $\frac{C_2}{2}$ (рис. 178).

Оттяжка aB рассчитывается на растяжение силой T, которую получим как составляющую при разложении силы C_1 на направление стойки II и оттяжки aB.

Нагрузка на крыло ветродвигателя быстроходного типа без регулирования, работающего параллельно на сеть, определяется, исходя из его рабочей характеристики.

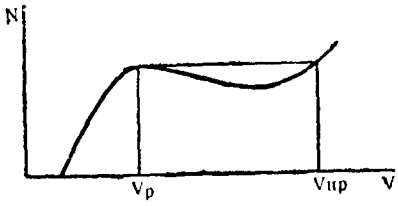


Рис. 179. Характеристика ветряка, работающего без регулирования.

Рабочая характеристика ветряка $Z=6$ и выше при условии n=Const; $N=f(V)$ дана на рис. 179, где: V_p — скорость ветра, при которой ветроколесо работает с максимальной мощностью;

$V_{пр}$ — предельная скорость ветра, после которой двигатель останавливается.

Расчётные случаи для крыла.

а) Двигатель работает при скорости ветра $V_{пр}$. Нагрузка на крыло:

$$P = C_{y\,max}\frac{\rho}{2}S\,(\omega^2 r_m^2 + V_{пр}^2); \qquad (208)$$

при этом лобовое давление будет равно:

$$P_л = C_{y\,max}\frac{\rho}{2}S\,(\omega^2 r_m^2 + V_{пр}^2)\,in. \qquad (209)$$

$C_{y\,max}$ берётся по кривой (рис. 171).

Нагрузка по длине крыла распределяется согласно рис. 173.

б) Двигатель остановлен. Буревая скорость ветра:

$$V_б = 40 - 50 \text{ м/сек.}$$

Нагрузка на крыло:

$$P_б = 0{,}08\,SV_б^2. \qquad (210)$$

Нагрузка по длине крыла распределяется пропорционально хордам. Нагрузка по хорде распределяется равномерно.

§ 41. ВЕТРОВАЯ НАГРУЗКА НА ХВОСТ И БОКОВУЮ ЛОПАТУ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Складывающийся хвост (рис. 180) необходимо рассчитывать, исходя из усилия пружины, размеры которой устанавливаются, как изложено в главе VIII о регулировании (§ 33).

Проведя перпендикуляр r_x из точки поворота хвоста на направление силы $P_{пр}$ пружины, можем написать равенства:

$$P_{пр} r_x = P_{хв} \cdot b; \quad (211)$$

$$P_{хв} = \frac{P_{пр} r_x}{b} = \frac{M_{пр\,max}}{b}. \quad (212)$$

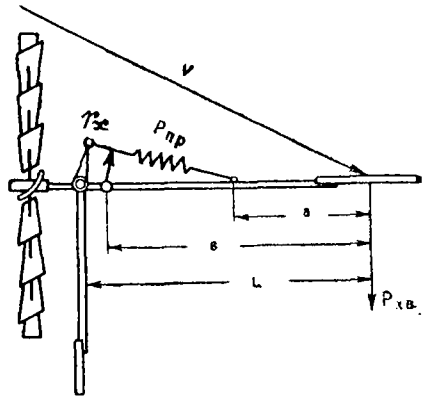


Рис. 180. Нагрузка на хвост, закреплённый шарнирно с пружиной.

Напряжение в хвостовом стержне от силы $P_{хв}$:

$$k = \frac{P_{хв} a}{W} \quad (213)$$

(r_x, a и b см. рис. 180).

Напряжение от веса хвостового оперения G:

$$k_1 = \frac{Gb}{W}.$$

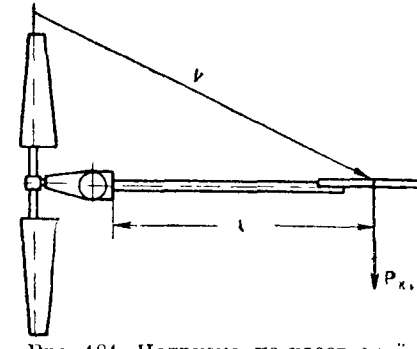


Рис. 181. Нагрузка на хвост с жёстким креплением к головке ветряка.

Боковая лопата регулирования. $M_{пр} = M_{лоп}$; $k = \frac{M_{лоп}}{W}$. Площадь боковой лопаты регулирования обычно берётся в пределах от 0,01 до 0,03 F; где F — ометаемая поверхность ветроколеса.

Хвост нескладывающийся (жёсткий) (рис. 181) необходимо рассчитывать на боковую силу, определяемую уравнением:

$$P_{хв} = C_y f \frac{\rho V^2}{2}, \quad (214)$$

где $C_y = 1{,}0$ до $1{,}2$;

f — площадь хвоста в м², принимаемая на основании статистических данных $f \cong 0{,}03$ до $0{,}06F$, где F — ометаемая поверхность ветроколеса.

Напряжение от аэродинамической силы $P_{хв}$:

$$k = \frac{M_{хв}}{W} = \frac{P_{хв}L}{W}. \qquad (215)$$

Напряжение от веса оперения хвоста G:

$$k_1 = \frac{GL}{W}. \qquad (216)$$

§ 42. РАСЧЁТ ГОЛОВКИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ

Ферма головки. Для расчёта фермы головки необходимо знать следующие действующие нагрузки (рис. 182).

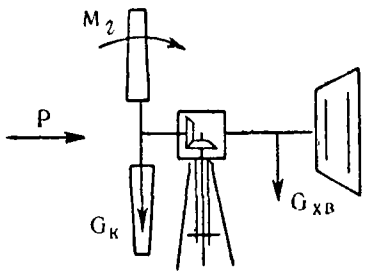


Рис. 182. Нагрузка на головку ветродвигателя.

1. Лобовое давление P на ветроколесо, которое может быть подсчитано для стабилизаторных ветряков по уравнению (182), а для ветряков без регулирования с помощью уравнения (209).

2. Весовые нагрузки, действующие на ферму, а именно: G_k вес ветрового колеса и $G_{хв}$ вес хвоста.

3. Момент от гироскопических сил всего ветроколеса $M_г = I_0\omega\omega_1$ (§ 43) для ветряка с количеством лопастей больше двух: $M_г = 2I_0\omega\omega_1$ для двухлопастного ветряка.

Горизонтальный вал подвергается действию:

а) крутящего момента $M_к = 716{,}20 = \frac{N}{n}$ кгм;

б) изгибающего момента от веса ветроколеса и

в) момента гироскопических сил всего ветроколеса.

Определение сил трения в опорах головки при установе ветроколеса на ветер виндрозами. Составляем уравнение суммы моментов и проекций сил согласно обозначениям, приведённым на рис. 183. При этом для определения реакций B_1 и B_2 получаем равенства:

$$-G_1a - B_1h_1 + Ph + G_2b = 0;$$
$$P + B_2 - B_1 = 0.$$

Откуда:

$$B_1 = \frac{Ph + G_2 b - G_1 a}{h_1}, \qquad (217)$$

или

$$B_2 = B_1 - P,$$

$$B_2 = \frac{Ph + G_2 b - Ga}{h_1} - P. \qquad (218)$$

Моменты трения от сил G — веса головки, B_1 и B_2. Обозначим:

M_1— момент трения от веса головки;

M_2— момент трения от сил B_1 и B_2;

$$M_1 = \mu G r_2; \quad M_2 = \mu (B_1 r_1 + B_2 r_2);$$

$$M_1 + M_2 = M_{тр.\,гол.}$$

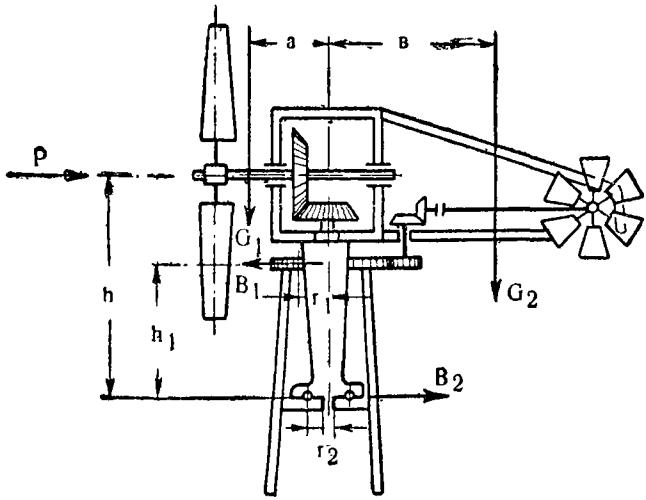


Рис. 183. Схема головки для определения сил трения.

Виндрозы и их основные размеры определяют по характеристикам для ветрячков (рис. 184). Характеристики указывают, что наиболее выгодны ветрячки с трапециодальными лопастями с углом заклинения:

$$\varphi = 20° \text{ и } 30°.$$

Момент трения в подшипниках виндроз:

$$M_3 = \mu' G_в \frac{d}{2},$$

где: $\mu' = 0{,}10$ — коэфициент трения металла по металлу;

$G_в$ — вес виндроз;

d — диаметр вала виндроз.

Эти моменты трения при установе ветроколеса на ветер должны быть преодолены аэродинамическим моментом виндроз, который находим с помощью характеристик (рис. 184).

Момент, развиваемый виндрозами, равен:

$$M_в = \overline{M}_в \rho (0{,}4V_0)^2 D^3, \qquad (219)$$

где: $\overline{M}_в$ берём по характеристике (рис. 184), при угле $\gamma = 75°$ и $Z = 0$;

$\rho = 0{,}125$ — массовая плотность воздуха;

V_0 — средняя годовая скорость ветра данного района;

0,4 — коэфициент, который учитывает понижение скорости ветра за ветроколесом;

D — диаметр виндроз.

По сокращении имеем: для одной виндрозы:

$$M_в = 0{,}02\, \overline{M}_в V_0^2 D^3. \qquad (220)$$

Передаточное число виндроз:

$$i = \frac{M_{тр.\,гол}}{\eta (M_в - M_з)}. \qquad (221)$$

Для двух виндроз:

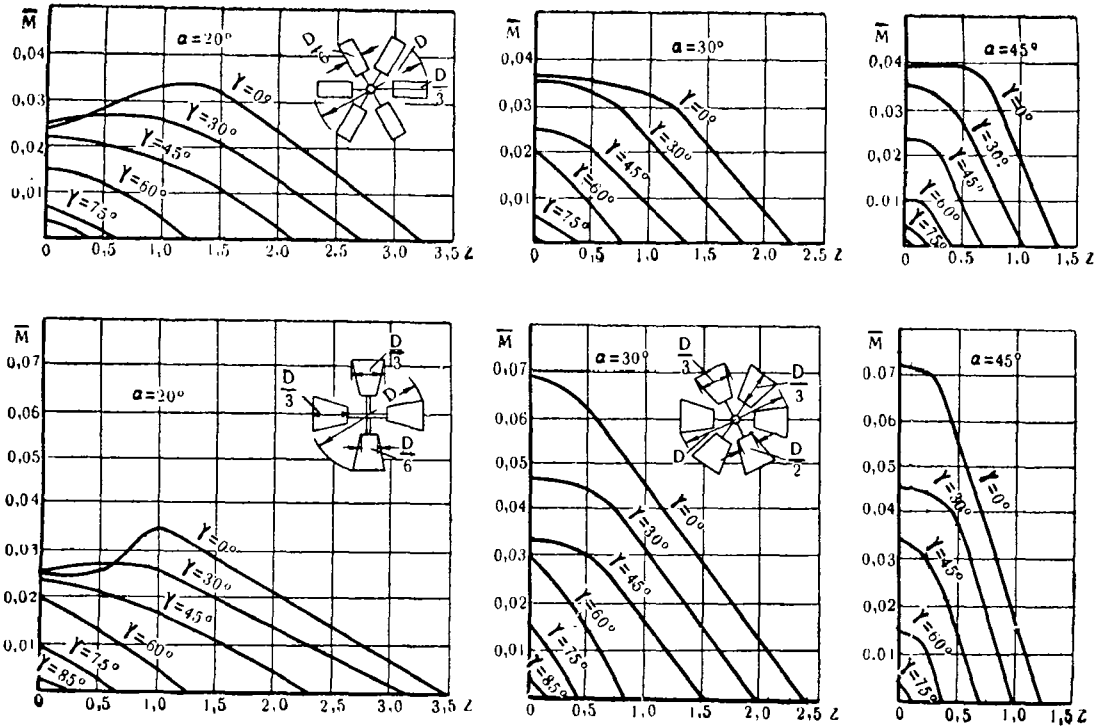
$$i = \frac{M_{тр.\,гол}}{2\eta (M_в - M_з)}, \qquad (222)$$

где η берётся равным 0,9 для конических и цилиндрических передач и 0,45 — для червячных передач. Передача должна соответствовать ω_1 (см. § 43).

§ 43. ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ МОМЕНТ ВЕТРОКОЛЕСА

Во время поворота головки около оси башни $z'—z'$ (рис. 185) на крыльях вращающегося ветрового колеса возникают, помимо аэродинамических сил, центробежные силы и силы гироскопические. Взяв точку A с массой m на лопасти, напишем выражения этих сил:

$Q = m\omega^2 r$ — центробежная сила, возникающая вследствие вращения ветроколеса около своей оси;


M̄
α=20°
α=30°
α=45°
γ=0°
γ=30°
γ=45°
γ=60°
γ=75°
γ=85°
D/3
D/6
D/2
D
z

$Q=m\omega_1^2 l$ — центробежная сила, возникающая при повороте головки около оси $z'—z'$. Сила от поворотного ускорения Кориолисса:

$$P=2m\omega_1 U\sin\beta_1,$$

где l — расстояние точки A от оси $z'—z'$. Сила Q_1 направлена от оси $z'—z'$ параллельно l; $U=\omega r$ — относительная скорость, в данном случае равная окружной скорости вращения точки A вокруг оси $X—X$. Направление силы P перпендикулярно относительной скорости U и оси вращения всей системы $z'—z'$. Угол β_1 составлен скоростью U и осью $z'—z'$. Эти силы вызывают относительно осей OX, OY и OZ моменты M_x, M_y и M_z.

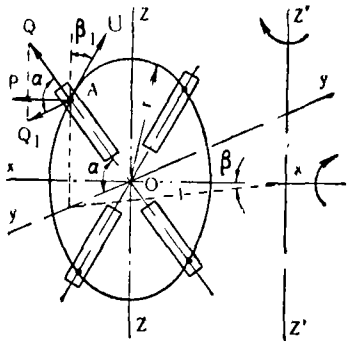


Рис. 185. Действие гироскопического момента на ветроколёса.

Полный момент, ломающий мах у втулки, равен [34]

$$M_z=2I\omega\omega_1\sin\omega t, \quad (223)$$

где I — момент инерции крыла относительно оси OX.

Расчётный момент, изгибающий мах (максимальный), когда мах стоит вертикально:

$$M_z=2I\omega\omega_1. \quad (224)$$

Вал изгибается гироскопическим моментом всего ветроколеса. Он получается суммированием моментов от всех махов (для лопастей трёх и больше)

$$M_y=I_0\omega\omega_1, \quad (225)$$

где I_0 — момент инерции всего ветрового колеса относительно оси OX.

Для двухлопастного ветряка

$$M_y=2I_0\omega\omega_1. \quad (226)$$

Угловую скорость ω находим с помощью уравнений:

$$\omega=\frac{\pi n}{30},$$

где n — число оборотов ветряного колеса в минуту.

Головка ветродвигателя поворачивается с угловой скоростью, равной:

$$\omega_1 = \frac{Z_0 V}{iR_0}, \tag{227}$$

где:

$Z_0 = \frac{\omega_0 R_0}{V}$ — синхронное число модулей виндроз (228)
находим по характеристике рис. 184;

i — передаточное число трансмиссии от виндроз к шестерне на башне;

R_0 — радиус виндроз;

ω_0 — угловая скорость виндроз.

На основании уравнений (224) и (227) момент, изгибающий мах, равен:

$$M = 4I \frac{V Z_0 \omega}{Di}. \tag{229}$$

Напряжение в махе

$$\sigma = \frac{M100}{W} = \frac{42IVZ_0 n}{WDi} \text{ (кг/см}^2\text{)}, \tag{230}$$

где: W — момент сопротивления маха у втулки;

D — диаметр виндроз;

V — скорость ветра в м/сек.;

Z_0 — число синхронных модулей виндроз.

Напряжение на валу многолопастного ветряка

$$\sigma = \frac{21 I_0 V Z_0 n}{WDi} \text{ кг/см}^2. \tag{231}$$

Определение угловой скорости поворота ω_1 ветряка относительно оси башни. При повороте виндрозами угловая скорость ω_1 определяется при следующих условиях:

а) скорость ветра 20 м/сек.;

б) направление перпендикулярно к плоскости вращения виндрозы ($\gamma = 0$);

в) виндрозы считать работающими на синхронном числе модулей:

$$\omega_0 = \frac{2Z_0 V}{D}, \tag{232}$$

где Z_0 — синхронное число модулей берётся из продувок (рис. 184);

V — скорость ветра берётся равной 20 м/сек. в лоб;

D — диаметр виндрозы.

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{i},$$

где i — передаточное число трансмиссии от ветрячков к шестерне на башне.

Размер виндрозы на прочность делают при тех же условиях, при которых было определено значение ω_1.

§ 44. БАШНИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Ветродвигатель состоит из двух основных частей: головки ветродвигателя со всеми механизмами и башни, на которой монтируется головка.

Башни у крыльчатых ветродвигателей играют чрезвычайно важную роль: они позволяют выносить ветроколесо на любую высоту, что требуется условиями рельефа местности. Различного рода препятствия на поверхности земли нарушают прямолинейное движение воздушного потока, вызывая вихри. Башня позволяет вынести ветроколесо за пределы этих вихрей.

Так как мощность ветродвигателя изменяется пропорционально кубу скорости ветра, т. е. $N = N_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^3$, то, принимая во внимание уравнение (248) (§ 46), можем написать уравнение мощности ветродвигателя в функции высоты:

$$N = N_0 \left(\frac{H}{H_0}\right)^{0,6}, \qquad (233)$$

где: N_0 — мощность на высоте H_0;
N — мощность на высоте H.

Приблизительная характеристика мощности ветродвигателя в зависимости от высоты положения ветроколеса от земли дана на рис. 186а.

Однако, при выборе высоты башни, необходимо принимать во внимание ещё технические возможности и условия эксплоатации ветроустановки.

Минимальная высота башни должна быть равной (рис. 186б)

$$H = h + c + R, \qquad (234)$$

где: h — высота препятствий вблизи ветроустановки;
c — расстояние от верхушки препятствий до нижней точки окружности ометаемой поверхности принимается от 1,5 до 2 м;
R — радиус ветрового колеса.

Раствор ног башни высотою больше 10 м

$$B = 0{,}22H \text{ до } 0.25H.$$

Для башен ниже 10 м $B = 0{,}30\ H$ м.

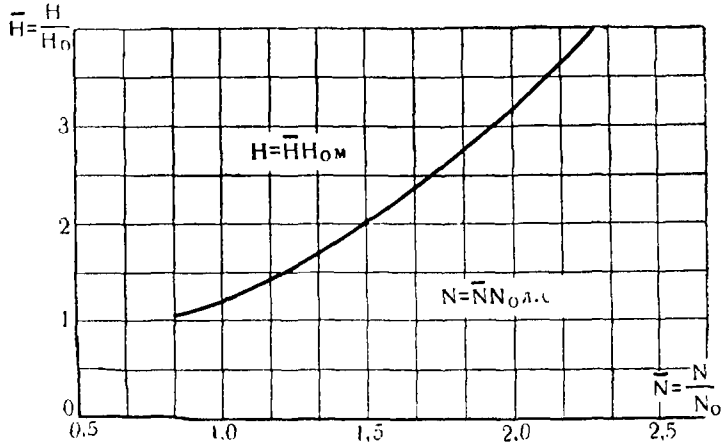


Рис. 186а. Характеристика мощности ветродвигателя в зависимости от высоты его башни.

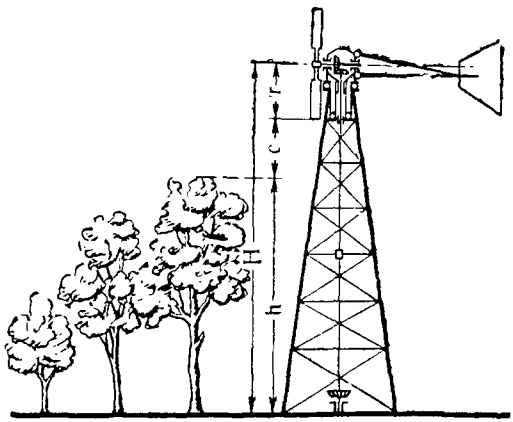


Рис. 186б. Определение высоты башни.

Расстояние между соседними ветродвигателями с одинаковыми высотами башен и диаметрами ветровых колёс принимается равным $15D$, где D — диаметр ветроколеса.

Конструктивные схемы башен ветродвигателей показаны на рис. 187 и 188.

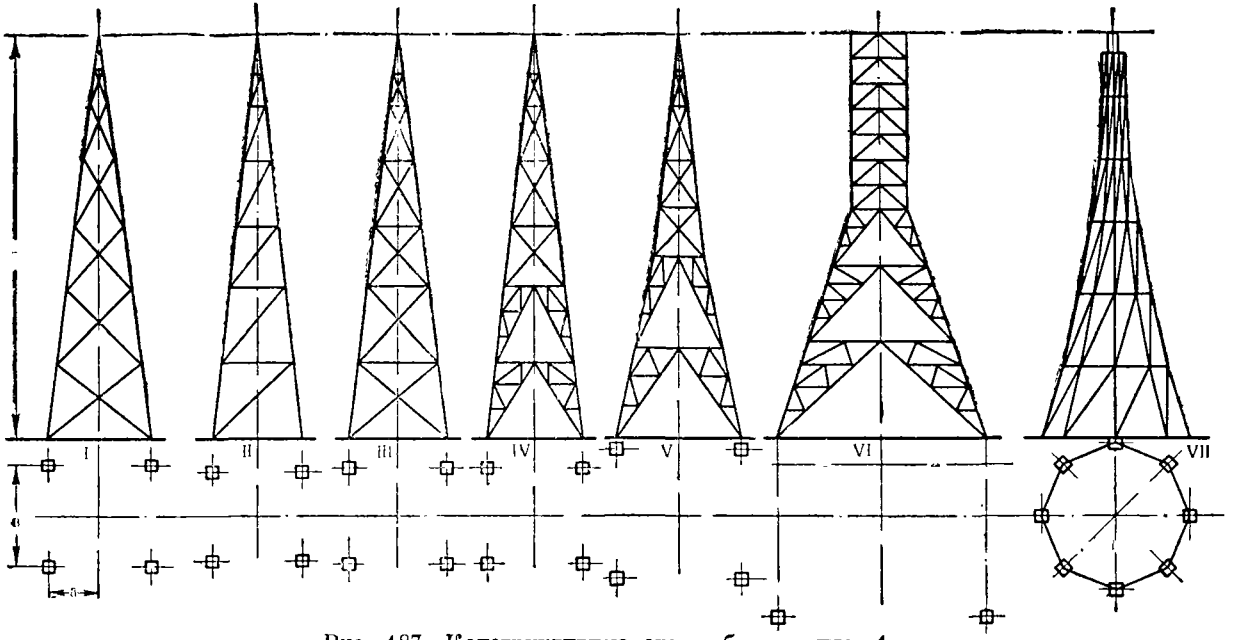


Рис. 187. Конструктивные схемы башен типа *А*.

I—*VIII* — относятся к типу *A*,
IX — относится к типу *B*,
X—*XI* — относится к типу *C*.

Первые три схемы башен типа *A* обычно применяются у ветродвигателей мощностью до 10 л. с.; другие схемы

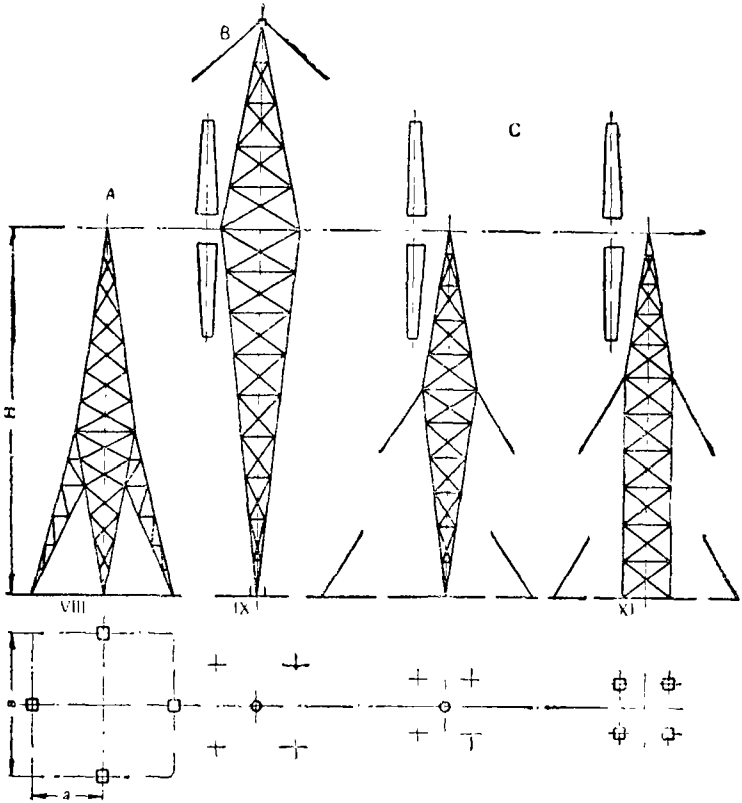


Рис. 188. Конструктивные схемы башен типа *A*, *B* и *C*.

башен этого типа применяются у ветродвигателей большей мощности. Башни по схемам типа *B* и *C* применяются в случаях конструкций башни с растяжками. Соотношение весов этих башен приведено на графике рис. 189, где даются кривые отношения весов башен в зависимости от $\frac{H}{R}$:

$\frac{G_{IX}}{G_A}$ — отношение веса башни типа IX поворотной к весу любой из башен группы A — неповоротной;
$\frac{G_{XI}}{G_A}$ — отношение веса башен группы C к весу башен группы A;
$\frac{G_X}{G_A}$ — отношение веса башен типа X — поворотной к весу башен группы A.

Эти кривые показывают, что с увеличением относительной высоты $\frac{H}{R}$ вес башен поворотных значительно меньше

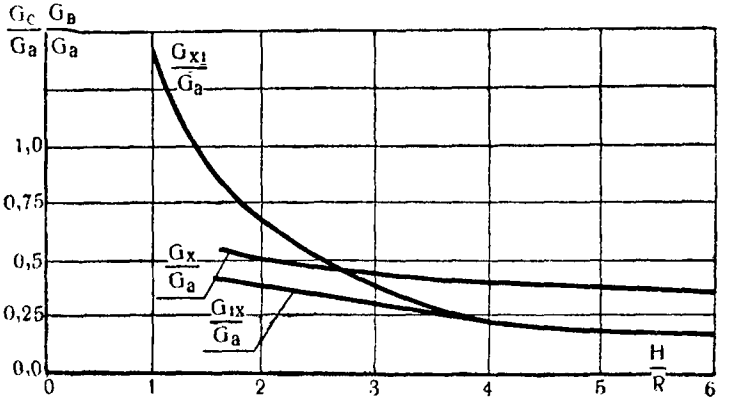


Рис. 189. График относительных весов башен.

веса башен группы A. Башни с растяжками также имеют меньший вес, чем башни группы A. Однако в эксплоатации башни группы A удобнее и более надёжны.

Предварительный вес башен типа A, выполненных по схемам I, II, III и IV, можно подсчитывать с помощью уравнения, составленного автором на основании статистических данных по металлическим башням этого типа, а именно:

$$G = (16{,}5HR^2 + 0{,}723H^3 + 5{,}3R^3)\frac{K}{10}, \qquad (235)$$

где: H — высота башни в м;
R — радиус ветрового колеса в м;
K — коэфициент, учитывающий вес конструкции, берётся, в зависимости от D и H, по графику (рис. 190).

Здесь выражение $16{,}5\,HR^2$ учитывает изгибающий момент от действия силы ветра на головку ветряка; выраже-

ние 0,723 H^3 — изгибающий момент от давления ветра на башню и выражение 5,3 R^3 — момент от веса хвоста.

Если ветрик выводится из-под ветра лопатой, то в уравнение (235) вместо выражения 5,3 R^3 необходимо поставить 6,4 R^3.

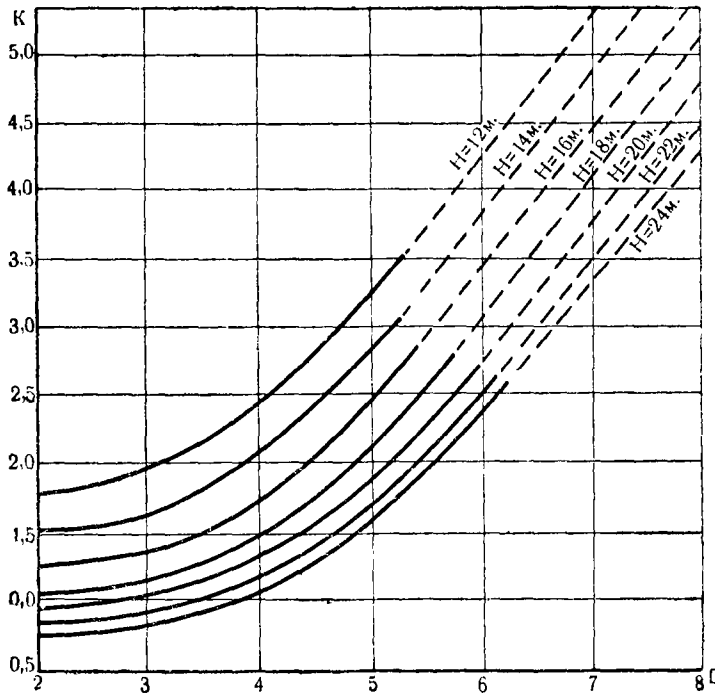


Рис. 190. График коэфициента K для определения предварительного веса башни.

Пример. Определить вес башни высотой $H = 15$ м многолопастного ветродвигателя $D=5$ м.

По графику (рис. 190) находим значение $k=2{,}6$; подставляя значения других величин в уравнение (235), получим вес башни:

$$G = (16{,}5 \cdot 15 \cdot 2{,}5^2 + 0{,}723 \cdot 15^3 + 5{,}3 \cdot 2{,}5^3)\,\frac{2{,}6}{10} = 1\,050 \text{ кг}.$$

Ветровые нагрузки на башни ветродвигателей определяются по уравнению, полученному в ЦАГИ эксперимен-

тально для моделей, показанных на рис. 191:

$$P = R_x \left(\frac{H}{H_{мод}}\right)^2 V^2, \qquad (236)$$

где: $V = 40$ м/сек. для районов со среднегодовой скоростью ветра до 5,5 м/сек.;

R_x — коэфициент лобового давления, берётся по таблице 11;

H — натуральная высота башни в м;

$H_{мод}$ — высота модели башни в м.

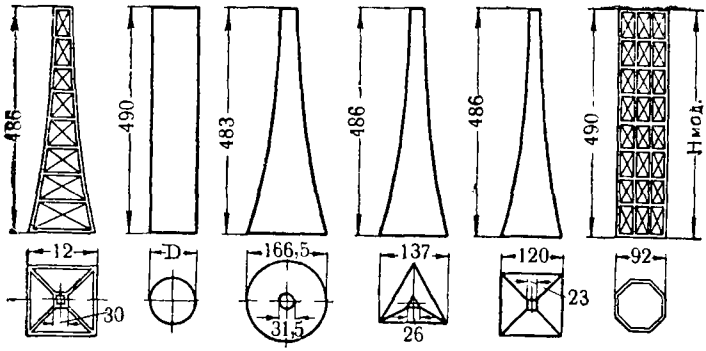


Рис. 191. Типы моделей башен, продутых в аэродинамической трубе.

Таблица 11

Название модели (рис. 191)	Коэфициент лобового давления R_x	Расстояние точки приложения равнодействующей от основания $\frac{x}{H}$ (в %)
Четырёхногая ферменная . . .	0,00085	42,8
Цилиндрическая сплошная . .	0,00105	—
Коническая сплошная	0,0013	41,2
Трёхгранная сплошная, расположенная ребром к ветру . .	0,0017	32,1
Трёхгранная сплошная, располагаемая гранью к ветру . .	0,0029	28,5
Четырёхгранная сплошная, располагаемая ребром или гранью к ветру	0,0024	29,8
Цилиндрическая ферменная . .	0,0014	49,4

Принимая $V=40$ м/сек. и $H_{мод}=0{,}486$ м и подставляя эти значения в уравнение (236), получим:

$$P=6\,770R_xH^2. \qquad (237)$$

Для четырёхногой ферменной башни $R_x=0{,}00085$, и

$$P=5{,}75\,H^2 \text{ кг}. \qquad (238)$$

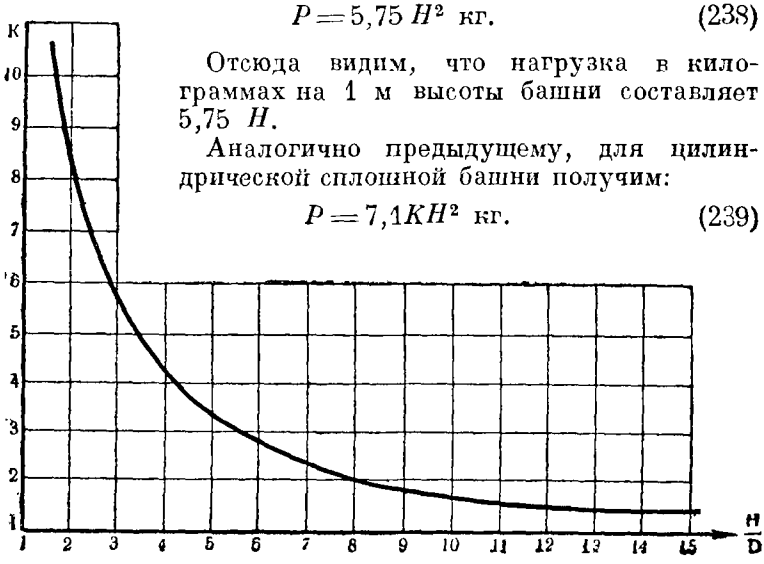


Рис. 192. Зависимость коэфициента K цилиндрических башен от отношения высоты к диаметру башни.

Отсюда видим, что нагрузка в килограммах на 1 м высоты башни составляет $5{,}75\ H$.

Аналогично предыдущему, для цилиндрической сплошной башни получим:

$$P=7{,}1KH^2 \text{ кг}. \qquad (239)$$

K — поправочный коэфициент для цилиндрических сплошных башен, определяемый по графику рис. 192, в зависимости от $\frac{H}{D}$, где D — диаметр цилиндрической башни.

Для расчёта башен необходимо определить лобовое давление на ветроколесо. На основании экспериментальных данных имеем следующие формулы ветровых нагрузок на многолопастное колесо (рис. 193):

$$P_x=\bar{x}F\rho\frac{V^2}{2}; \qquad (240)$$

$$P_y=\bar{y}F\rho\frac{V^2}{2}. \qquad (241)$$

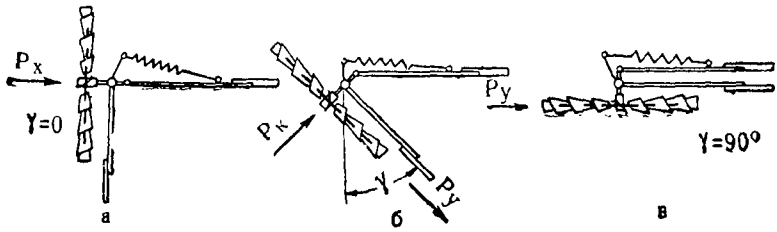


Рис. 193. Лобовое давление при различных положениях ветроколеса.

$\bar{x}$ и $\bar{y}$ — коэфициенты нагрузки, полученные экспериментально, приведены в таблице 12;

Таблица 12

Значения $\bar{x}$ и $\bar{y}$ для многолопастных ветродвигателей

Характер работы	Коэфициент нагрузки от ветра	Угол поворота γ ветрового колеса				
		0	10°	20°	30°	40°
Работа вхолостую	$\bar{x}$	0,625	0,610	0,575	0,510	0,374
	$\bar{y}$	0,000	0,075	0,130	0,180	0,220
С нагрузкой рабочей машины	$\bar{x}$	0,780	0,760	0,730	0,625	0,475
	$\bar{y}$	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200

Характер работы	Коэфициент нагрузки от ветра	Угол поворота γ ветрового колеса				
		50°	60°	70°	80°	90°
Работа вхолостую	$\bar{x}$	0,250	0,150	0,078	0,060	—
	$\bar{y}$	0,225	0,220	0,180	0,150	0,140
С нагрузкой рабочей машины	$\bar{x}$	0,350	0,275	0,180	0,100	—
	$\bar{y}$	0,180	0,240	0,260	—	—

ρ — массовая плотность воздуха (при барометрическом давлении 760 мм рт. ст. и 15°С ρ=0,125);

$F=\pi R^2$ — ометаемая поверхность ветрового колеса;

V — скорость ветра в м/сек., принимается, в зависимости от угла γ, равной от 8 до 30 м/сек. по кривой (рис. 125).

Пример. Определить силы P_x и P_y, действующие на ветроколесо $D=5$ м многолопастного типа при работе с нагрузкой, если $V=10$ м/сек., регулирование по кривой I, рис. 125. По рис. 125, ветроколесо при скорости ветра 10 м/сек. должно отклониться на угол $\gamma=40°$. В таблице 12 в графе $\gamma=40°$ в нижних двух строчках находим: $x=0{,}475$; $y=0{,}20$. Подставляя цифровые значения данных величин в уравнения (240) и (241), получаем:

$$P_x = xF\frac{\rho V^2}{2} = 0{,}475\frac{\pi 5^2}{4}\cdot\frac{0{,}125\cdot 10^2}{2} = 59 \text{ кг}.$$

$$P_y = yF\frac{\rho V^2}{2} = 0{,}20\frac{\pi 5^2}{4}\cdot\frac{0{,}125\cdot 10^2}{2} = 24{,}6 \text{ кг}.$$

При определении лобового давления у быстроходных ветродвигателей необходимо пользоваться уравнением (182), так как в данном случае имеется в виду, что воздушный поток набегает на ветроколесо перпендикулярно плоскости вращения ветроколеса.

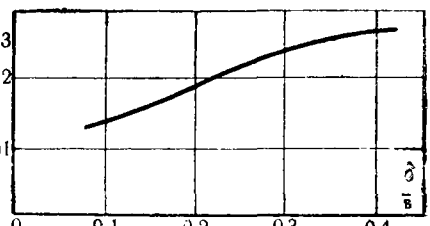


Рис. 194. Значения коэфициентов C_x в зависимости от $\frac{\delta}{в}$

Силы P_x у малолопастных быстроходных ветродвигателей, а P_x и P_y у многолопастных ветродвигателей, регулирующихся выводом ветроколеса из-под ветра, создают изгибающие башню моменты относительно её основания, или пояса, где закреплены растяжки у башен типа X и XI (рис. 188).

Ветровые нагрузки на башни под стабилизаторные ветродвигатели определяются следующим путём.

1) Лобовое давление на крылья и головку:

$$P = iC_xS\frac{\rho}{2}V_б^2 + 0{,}08FV_б^2. \qquad (242)$$

C_x — аэродинамический коэфициент крыла при угле атаки, соответствующем $C_y=0$ (рис. 194);

$V_б$ — буревая скорость ветра (40 м/сек.);

F — площадь миделя головки в м².

2) Давление ветра на ферму башни, согласно формуле (237), равно:

$$P_б = 4{,}25 R_x H^2 V_б^2 \qquad (243)$$

(относится ко всей башне). Действие $^2/_3 P_б$ принимается на переднюю грань башни; действие $^1/_3 P_б$ приходится на заднюю грань башни.

По высоте башни нагрузка принимается равномерной. H — высота башни; $V_б = 40$ м/сек; R_x — для четырёхгранной башни $= 0{,}00085$, для цилиндрической башни $= 0{,}0014$.

3) Момент от гироскопических сил. Максимальный гироскопический момент относительно оси y—y для трёхлопастных ветродвигателей и многолопастных, согласно уравнению (225):

$$M_y = I_0 \omega \omega_1.$$

Для двухлопастных ветродвигателей, согласно уравнению (226):

$$M_г = 2 I_0 \omega \omega_1.$$

Расчётный суммарный момент:

$$M = M_a + M_г,$$

где M_a — момент от аэродинамических сил на ветроколесе.

Момент от весовых сил двигателя, получающийся от несбалансированности частей головки относительно оси башни (рис. 195):

$$M_д = Rl.$$

Башня испытывает весовые нагрузки:

а) вес ветродвигателя:

$$Q = Q_{вк} + Q_{хв} + Q_{пер.},$$

где: $Q_{вк}$ — вес ветроколеса;

$Q_{хв}$ — вес хвоста;

$Q_{пер}$ — вес верхней передачи с картером;

б) собственный вес башни $Q_б$.

Фундамент под башню ветродвигателя должен удовлетворять следующим основным условиям: 1) он должен иметь достаточную прочность с учётом статических и

динамических нагрузок; 2) фундамент не должен давать значительной осадки, в особенности неравномерной, которая может вызвать перекос сооружения. Осадки наиболее возможны при сооружении фундаментов ног башни на песках малой и средней плотности. Для устранения перекоса башни необходимо стремиться к тому, чтобы центр тяжести всей массы фундаментов ног башни находился на одной вертикали.

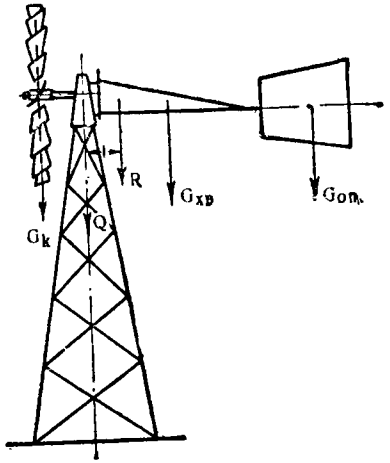


Рис. 195. Весовые нагрузки на башню.

Допускаемые удельные давления слабых грунтов (глина и суглинок в пластичном состоянии, супесь средней плотности и пылеватый песок, насыщенный водой, а также грунты с прослойками ила или торфа) составляют до 1,5 кг/см². Для этих же грунтов средней плотности допускаемая удельная нагрузка должна приниматься от 1,5 до 3,5 кг/см², а для прочных грунтов от 3,5 до 6 кг/см².

При определении допускаемых давлений на различные грунты необходимо пользоваться ОСТ 90004-38 (табл. 13).

Глубина заложения фундаментов берётся больше глубины промерзания в данном районе на 0,1 до 0,25 м. Меньший предел соответствует влажным песчаным грунтам, больший — глинистым водонепроницаемым.

Глубина промерзания в европейской части СССР принимается:

для северного и восточного районов	. . . . .	2,0 м
» северо-западного района	. . . . .	1,6 »
» центрального »	. . . . .	1,5 »
» западного »	. . . . .	1,3 »
» южного »	. . . . .	1,1 »

Фундаменты под ноги башни выкладываются из кирпича или камня на цементном растворе. Изгибающие

Таблица 13

Допускаемые давления (в кг/см²) на грунты основания при глубине заложения подошвы фундамента на 2 м ниже дневной поверхности

Наименование грунта	Плотный	Средний
I. Песчаные и гравелистые грунты		
1. Супесь сухая	2,5	2,0
2. » влажная	2,0	1,5
3. Пылеватый песок сухой	2,5	2,0
4. » » влажный	2,0	1,5
5. Мелкий песок сухой	3,0	2,0
6. » » влажный	2,5	1,5
7. Песок средней крупности независимо от влажности	3,5	2,5
8. Песок крупный и гравелистый независимо от влажности	4,5	3,5
9. Гравий и галька независимо от влажности	6,0	5,0
II. Глинистые грунты	В твёрдом состоянии	В пластичном состоянии
1. Глина	6,0—2,5	2,5—1,0
2. Суглинок	4,0—2,5	2,5—1,0

нагрузки от лобового давления ветра на башню и ветродвигатель дают у основания момент $M = P_л H + PH_б$, где H и $H_б$ — расстояния точек приложения сил от основания фундамента (рис. 196).

Сжимающие силы: вес ветродвигателя и башни Q; вес фундамента $G_ф$. Максимальные усилия по ногам имеют место при ветре по диагонали башни; при этом имеем равенство:

$$M = P_м \cdot 1{,}4\,B,$$

откуда

$$P_м = \frac{M}{1{,}4B},$$

где $1{,}4B$ — расстояние между фундаментами по диагонали.

На переднюю ногу расчётное усилие равно:

$$P_1 = \frac{Q}{4} + G_ф - P_м; \qquad (244)$$

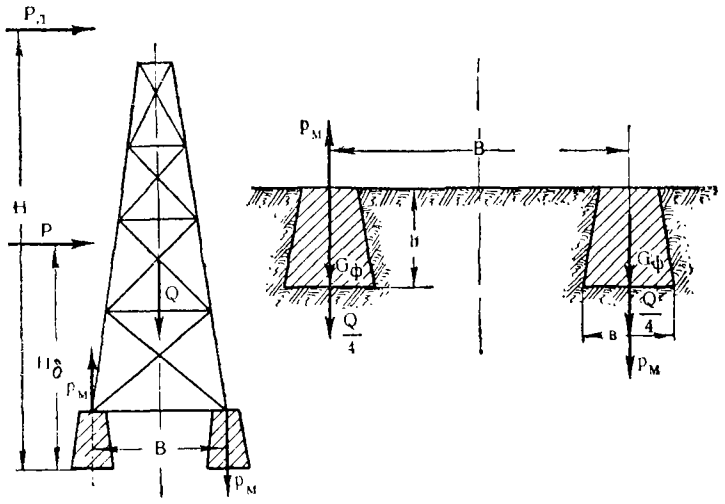


Рис. 196. Фундаменты под ноги башен.

на заднюю ногу:

$$P_2 = \frac{Q}{4} + G_ф + P_м. \qquad (244а)$$

Задаваясь площадью подошвы фундамента F в см², определяют давление на грунт:

$$k = \frac{P_2}{F} \text{ кг/см}^2.$$

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ВЕТРОСИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ

ГЛАВА XII

ВЕТЕР КАК ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

§ 45. ПОНЯТИЕ О ПРОИСХОЖДЕНИИ ВЕТРА

Основной причиной возникновения ветра является неравномерное нагревание солнцем земной поверхности.

Допустим, что, вследствие неравномерного нагревания солнечными лучами, горизонтальная поверхность земли на участке *АБ* нагрелась больше, чем на участке *БВ* (рис. 197). Вместе с этим и воздух, соприкасающийся с землёй, над участком *АБ* нагреется больше, чем над участком *БВ*. При этом воздушный столб над участком *АБ* расширится, а над участком *БВ* сожмётся. Одновременно с этим на некотором уровне *СД* давление на участке *СЕ* станет больше прежнего, а на участке *ЕД* меньше. Поэтому воздух потечёт в направлении *СЕД*. На уровне же *АБВ*, т. е. на земной поверхности, вследствие происходящего перемещения воздуха, над участком *АБ* давление уменьшится; давление же над более холодным участком *БВ* будет больше. Поэтому внизу воздух потечёт от участка *БВ* к участку *АБ*, т. е. в направлении, обратном перемещению вверху. В результате получается циркуляция воздуха, показанная на рис. 197 стрелками.

Неравномерное распределение тепла между различными областями Земли обусловливает циркуляционное движение воздуха земной атмосферы.

Земная поверхность неоднородна: суша, океаны, горы, леса обусловливают различное нагревание поверхности под одной и той же широтой. Вращение Земли также вызывает отклонения воздушных течений. Все эти причины осложняют общую циркуляцию атмосферы. Возникает ряд отдельных циркуляций, в той или иной степени связанных друг с другом.

На экваторе у земной поверхности лежит зона затишья со слабыми переменными ветрами. В верхних слоях над

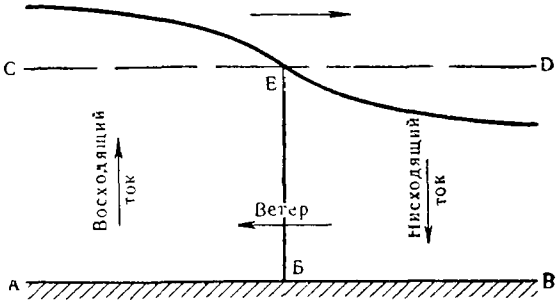


Рис. 197. Схема образования воздушных течений.

этой зоной дуют восточные ветры значительной силы. На север и на юг от зоны затишья расположены зоны пассатов, которые вследствие вращения Земли с запада на восток имеют отклонение к западу. Таким образом, в северном полушарии постоянные ветры приходят с северо-востока, в южном с юго-востока, как показано на схеме рис. 198. Пассаты простираются примерно до 30° северной и южной широт и отличаются равномерностью воздушных течений по направлению и скорости. Средняя скорость юго-восточных пассатов северного полушария у поверхности земли достигает 6—8 м/сек. Эти ветры вблизи больших континентов нарушаются сильными годовыми колебаниями температуры и давления над материками. Высота слоя пассатов простирается от 1 до 4 км. Выше над пассатами находится слой переменных ветров, а над этим слоем находится зона антипассатов, дующих в направлении, противоположном направлению

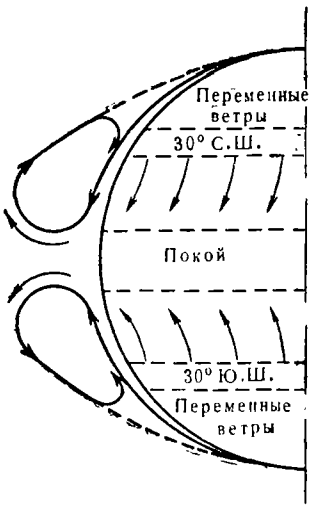


Рис. 198. Схема общей циркуляции земной атмосферы.

пассатов. Высота слоя антипассатов меняется от 4 до 8 км, в зависимости от времени года и от места.

В субтропических широтах в поясах высокого давления зоны пассатов сменяются штилевыми областями. К северу и югу от этих областей приблизительно до 70° на всех высотах дуют ветры между западным и юго-западным румбами в северном полушарии и между западным и северо-западным — в южном полушарии. В этих широтах, кроме того, в атмосфере непрерывно возникают и затухают вихревые движения, усложняющие простую схему общей циркуляции атмосферы, показанную на рис. 198.

Местные ветры. Особые местные условия рельефа земной поверхности (моря, горы и т. п.) вызывают местные ветры.

Бризы. Вследствие изменения температур днём и ночью возникают береговые морские ветры, которые называются бризами.

Днём при солнечной погоде суша нагревается сильнее, чем поверхность моря, поэтому нагретый воздух становится менее плотным и поднимается вверх. Вместе с этим более холодный морской воздух устремляется на сушу, образуя морской береговой ветер. Поднимающийся над сушей воздух течёт в верхнем слое в сторону моря и на некотором расстоянии от берега опускается вниз.

Таким образом возникает циркуляция воздуха с направлением внизу — на берег моря, вверху — от суши к морю. Ночью над сушей воздух охлаждается сильнее, чем над морем, поэтому направление циркуляции изменяется: внизу воздух течёт на море, а вверху с моря на сушу. Зона распространения бриза около 40 км в сторону моря и 40 км в сторону суши. Высота распространения бризов в наших широтах достигает от 200 до 300 м. В тропических странах бризы наблюдаются почти в течение всего года, а в умеренном поясе только летом, при жаркой погоде. У нас бризы можно наблюдать летом у берегов Чёрного и Каспийского морей.

Муссоны. Годовые изменения температуры в береговых районах больших морей и океанов также вызывают циркуляцию, аналогичную бризам, но с годовым периодом. Эта циркуляция, более крупного размера, чем бризы, называется м у с с о н а м и. Возникают муссоны по следующим причинам. Летом континент нагревается

сильнее, чем окружающие его моря и океаны; благодаря этому над континентом образуется пониженное давление, и воздух внизу устремляется к континенту от океанов, а вверху наоборот, течёт от континентов к окружающим океанам. Эти ветры носят название морских муссонов. Зимой континенты значительно холоднее, чем поверхность моря; над ними образуется область повышенного давления; вследствие этого нижние слои воздуха направляются от континента к океанам, а в верхних слоях — наоборот, от океанов к континентам. Эти ветры называются материковыми муссонами.

Сильные муссоны можно наблюдать на южном побережье Азии — в Индийском океане и Аравийском море, где летом они имеют юго-западное направление, а зимой — северо-восточное. У восточных берегов Азии также наблюдаются муссоны. Зимою дуют суровые северо-западные материковые ветры; летом юго-восточные и южные морские влажные ветры. Эти ветры значительно влияют на климат Дальневосточного края.

§ 46. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ВЕТЕР С ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТОРОНЫ

Скорость ветра и её измерение. Скоростью ветра называют расстояние в метрах, проходимое массой воздуха в течение одной секунды. Скорость ветра постоянно меняется по величине и направлению. Причиной этих изменений является неравномерное нагревание земной поверхности и неровности рельефа местности.

Скорость ветра является важнейшей характеристикой технических свойств ветра. Измеряется скорость ветра с помощью особых приборов, называемых анемометрами. Существуют различные типы приборов, с помощью которых определяют скорость и направление ветра. Все эти приборы по способу определения величин можно разделить на две группы:

1) приборы, показывающие или записывающие мгновенные скорости и направление ветра;

2) приборы, показывающие или записывающие скорость и направление ветра за некоторый промежуток времени.

Флюгер Вильда показывает мгновенные скорости и направление ветра. Этим прибором пользуются многие

метеорологические станции. Общий вид его показан на рис. 199.

Флюгер имеет металлическую доску, подвешенную на оси, перпендикулярной указателю направления ветра так, что при поворотах флюгера она всё время располагается плоскостью к направлению ветра, который отклоняет её на некоторый угол. Величина этого угла зависит от скорости ветра. При отклонениях доска проходит мимо сектора *б* с восемью штифтами за № с 1 по 8, указывающими величину скорости ветра в данный момент. Для флюгера с доской, имеющей размер 150×300 мм и вес 200 г, величина скорости ветра, соответствующая каждому номеру штифта, приведена в табл. 14.

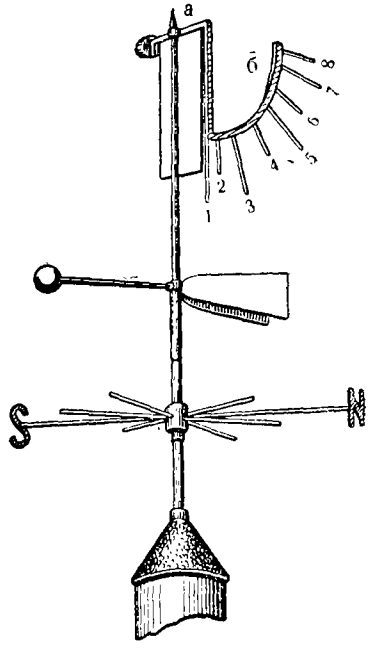


Рис. 199. Флюгер Вильда.

Кроме того, скорости ветра по показаниям флюгера Вильда с доской в 200 г можно определить с помощью следующих равенств, справедливых для отклонений доски до 7 штифта:

$$V = 2N_д - 1 \qquad (а)$$

$$V = 2(N - 1), \qquad (б)$$

Таблица 14

Определение скорости ветра по флюгеру Вильда с доской в 200 г

№ штифтов	1	1–2	2	2–3	3	3–4	4	4–5	5	5–6	6	6–7	7	7–8	8	Выше 8
Скорости ветра в м/сек.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	17	20	Выше 20

где: $N_н$ — номер нижнего штифта из двух, между которыми качается доска в момент наблюдения;

N — номер штифта, около которого качается доска в момент наблюдения.

Уравнения (а) и (б) предложены автором для пользования, когда нет под руками переводной таблицы.

Флюгер с доской в 200 г устанавливается в районах с небольшими скоростями ветра. Там же, где скорости бывают значительные, применяется флюгер с доской весом 800 г, для которой даётся таблица 15.

Таблица 15

Определение скорости ветра по флюгеру Вильда с доской в 800 г

№ штифтов	1	1–2	2	2–3	3	3–4	4	4–5	5	5–6	6	6–7	7	7–8	8	8 и выше
Скорости ветра в м/сек.	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	28	34	40	40 и выше

Преимущество флюгера Вильда состоит в том, что он, благодаря простоте конструкции, дёшев в изготовлении и отличается долговечностью.

Обычно показания флюгерных наблюдений снимаются 3 или 4 раза в сутки. При сопоставлении полученных показаний, записанных через каждый час, с обычными 3- или 4-кратными наблюдениями, найдено, что последние дают достаточно надёжные данные для предварительных расчётов. Например:

$$V_3 = 0{,}93\, V_{24},$$
$$V_4 = 0{,}99\, V_{24},$$

где V_3, V_4 и V_{24} — соответственно средние скорости ветра, полученные по записям показаний флюгера Вильда три, четыре и двадцать четыре раза в сутки.

Отсюда видим, что записи 4 раза в сутки дают среднесуточную скорость ветра с погрешностью в 1% против среднесуточной скорости ветра, полученной на основании записей 24 раза в сутки.

Наблюдения мгновенных скоростей ветра на различных метстанциях могут быть далеко не точными, так как записи наблюдений над скоростью ветра в данном случае

полностью зависят от наблюдателя, который, по инструкции, должен оценивать скорость ветра по среднему положению доски флюгера за 2 минуты.

Анемометры. Более точно средние скорости ветра можно определить анемометром. Главной частью этого прибора является ветрянка, состоящая из крестовины с полушариями на её концах. Ветер встречает с одной стороны оси вращения выпуклости, с другой — вогнутости полушарий. Неодинаковые формы поверхностей вызывают разность давлений по обе стороны вертикальной оси крестовины, вследствие чего она вращается; при этом полушария испытывают следующее давление ветра:

$$P_1 = C_1 \frac{F\rho}{2}(V+U)^2, \qquad (а)$$

$$P_2 = C_2 \frac{F\rho}{2}(V-U)^2, \qquad (б)$$

где: P_1 и P_2 — давление ветра соответственно на выпуклый полушар, идущий против ветра и вогнутый в направлении ветра;

C_1 и C_2 — коэфициенты сопротивления полушарий;

ρ — массовая плотность воздуха;

F — проекция поверхности полушара на плоскость, перпендикулярную направлению движения;

V — скорость ветра;

U — окружная скорость перемещения полушарий.

Так как трение при вращении оси крестовины с полушариями, в сравнении с действующими силами, незначительно, то правые части уравнений (а) и (б) можно приравнять:

$$C_1 \frac{F\rho}{2}(V+U)^2 = C_2 \frac{F\rho}{2}(V-U)^2. \qquad (в)$$

По сокращении имеем:

$$C_1(V+U)^2 = C_2(V-U)^2, \qquad (г)$$

или:

$$C_1\left(1+\frac{U}{V}\right)^2 = C_2\left(1-\frac{U}{V}\right)^2. \qquad (д)$$

Подставляя в это уравнение значения коэфициентов сопротивлений, полученных опытным путём, $C_1=0{,}34$ и $C_2=1{,}32$, находим, что окружная скорость полушарий будет составлять приблизительно $^1/_3$ от скорости ветра, т. е.:

$$U \cong \frac{1}{3}V. \qquad (245)$$

Выражение (д) показывает, что отношение линейной скорости ветра не зависит от плотности воздуха и, следовательно, число оборотов крестовины с полушариями пропорционально скорости ветра.

Эта простая зависимость позволяет легко определить передаточный механизм анемометра. Нужно заметить, однако, что $U = \frac{1}{3} V$ получено из того предположения, что отношение $\frac{C_1}{C_2} = \text{Const}$ на всём пути перемещения двух диаметрально противоположных полушарий анемометра. В действительности отношение $\frac{U}{V}$ несколько изменяется с изменением скорости ветра V. Однако эти изменения настолько незначительны, что практически ими можно пренебречь.

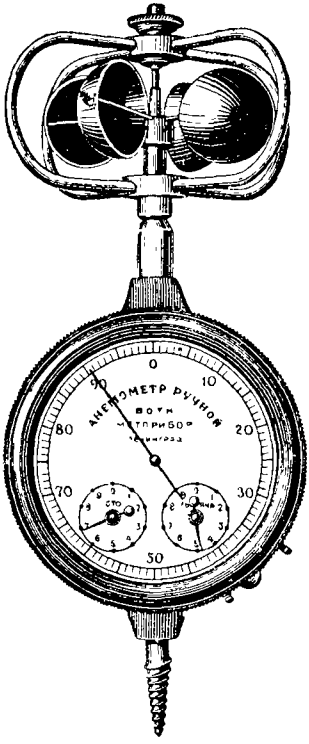


Рис. 200. Анемометр завода «Метприбор».

Наиболее распространённым является ручной анемометр завода «Метприбор» (рис. 200), состоящий из крестовины с чашками-полушариями на её концах и коробки со счётчиком, указывающим, какой путь в метрах проходит воздушный поток за данный промежуток времени. Отсчёт времени делают по секундомеру или с помощью часов, имеющих секундную стрелку. Пустив одновременно в действие счётчик анемометра и секундомер или заметив в этот момент время на часах, по истечении желаемого промежутка времени останавливают одновременно действие счётчика анемометра и секундомера или замечают время окончания наблюдения по часам. Цифры на циферблате анемометра покажут число метров, на которое за время наблюдения переместился воздушный поток. Разделив это число на истекшее время на-

блюдения в секундах, получим значение средней скорости ветра в метрах в секунду за промежуток времени наблюдения.

При замерах скорости ветра необходимо устанавливать циферблат анемометра под углом 45° к потоку ветра, что чрезвычайно важно делать при тарировке этого прибора. Исследования проф. Г. Х. Сабинина и И. В. Смирнова в Кучинской аэродинамической трубе установили изме-

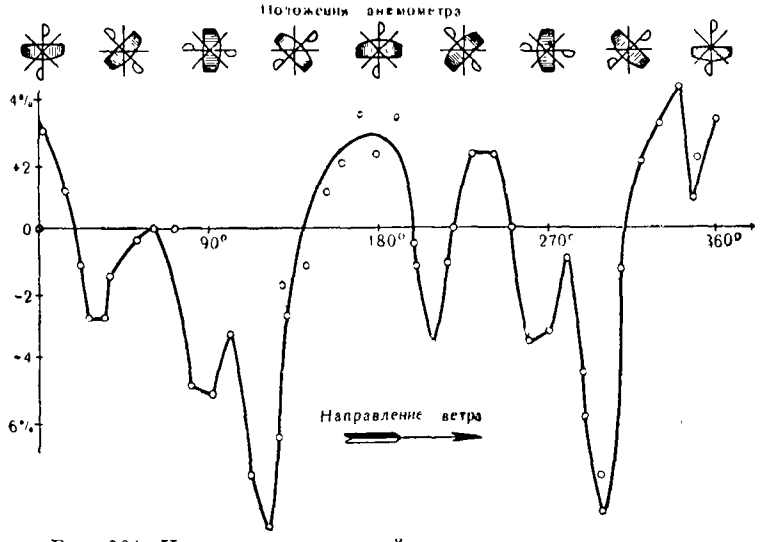


Рис. 201. Изменение показаний анемометра в зависимости от различных положений его в потоке ветра.

нение его показаний, в зависимости от положения анемометра к потоку, от + 4,4 до —9,4%, что видно из рис. 201.

Анемометры перед их применением должны тарироваться. В результате получают таблицы или графики для перевода скоростей ветра, полученных по показанию анемометра, на действительные скорости ветра, определяемые при тарировке по другому точному и проверенному прибору.

Для мгновенных отсчётов скорости ветра применяют электроанемометр. Крестовина с полушариями вращает маленькую электродинамо. Выработанный ею электрический ток передаётся вольтметру, шкала которого имеет

деления, непосредственно указывающие величину скорости ветра в данный момент.

Анемографы. Анемометр, показания которого фиксируются самописцем, называют анемографом. Это наиболее удобный прибор для регистрации скоростей ветра; если он хорошо протарирован, то записанные им величины скоростей, естественно, будут более точными, чем определяемые наглаз.

Существует два типа электроанемометров с самописцами: 1) анемометр с электродинамкой, у которого самопишущий прибор действует в зависимости от напряжения тока, и 2) контактный анемометр и самописец к нему, питающийся от электроаккумулятора. В первом случае запись получается очень наглядной в виде непрерывной кривой линии и во втором — в виде прямой линии с чёрточками.

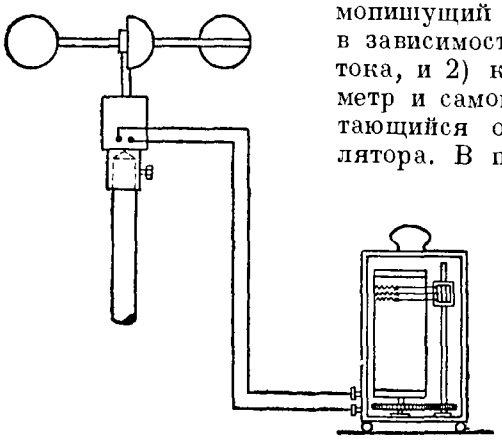


Рис. 202. Контактный анемометр с самописцем.

Контактный анемометр с самописцем показан на рис. 202. На бумаге, надетой на барабан самописца, видна линия с поперечными чёрточками, написанными пером самописца в момент контактов. Каждое расстояние между двумя чёрточками у этого самописца соответствует определённому пути S, пройдённому ветром. Если отрезок линии в l мм соответствует t секундам, то, подсчитав число n промежутков между чёрточками на линии в l мм, легко определить среднюю скорость ветра за t секунд:

$$V = \frac{Sn}{t} \text{ м/сек.}$$

Более точное определение скорости воздушного потока можно сделать трубкой Пито. Эта трубка устанавливается открытым концом флюгера против ветра. Скоростной напор ветрового потока оказывает давление

на воздух, находящийся в канале трубки. Схема трубки Пито показана на рис. 203. Она состоит из двух трубок: внутренней — тонкой с открытым передним концом, в отверстие которого воздушный поток оказывает давление, и внешней — толстой, образующей замкнутое воздушное пространство, соединённое с атмосферой боковыми отверстиями в передней части трубки. Задний конец тонкой трубки через резиновый шланг или непосредственно (в зависимости от конструкции прибора) присоединяется к трубке жидкостного манометра, другой конец которой соединяется с воздушным пространством толстой трубки. Давление воздушного потока по тонкой трубке передаётся жидкости, помещённой в U-образную трубку манометра, благодаря чему уровни жидкости в этой трубке устанавливаются на разных высотах. Для этой цели обычно применяется подкрашенный спирт. По разности высот между уровнями жидкости определяют давление воздушного потока и с помощью уравнения Бернулли находят скорость ветра в данный момент.

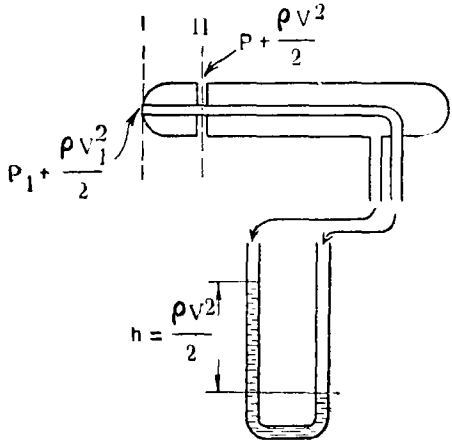


Рис. 203. Трубка Пито.

В сечении I (рис. 203) давление воздуха в тонкой трубке равно p_1 и скорость V_1 ; в сечении II имеем давление p и скорость V.

Следовательно, для этих двух сечений уравнение Бернулли напишется так:

$$p+\frac{\rho V^2}{2}=p_1+\frac{\rho V_1^2}{2}. \qquad (а)$$

Так как скорость в тонкой трубке равна нулю ($V_1=0$), то можем написать:

$$p_1=p+\frac{\rho V^2}{2}, \qquad (б)$$

или:

$$p_1 - p = \frac{\rho V^2}{2}. \qquad (в)$$

Но эта разность давления вызывает разность положения уровней жидкости в трубке манометра. Следовательно, можем написать:

$$\frac{\rho V^2}{2} = h\gamma. \qquad (г)$$

Отсюда получаем:

$$V = \sqrt{\frac{2h\gamma}{\rho}}, \qquad (246)$$

где: ρ — массовая плотность воздуха;
h — высота столба жидкости в мм;
γ — удельный вес жидкости в манометре;

Зависимость между массовой плотностью воздуха ρ, температурой t и барометрическим давлением даётся уравнением (3) (см. 1-ю главу).

Заменив ρ в уравнении (246) его значением из равенства (3), получим:

$$V = \sqrt{\frac{2h\gamma}{0{,}0474\,\frac{B}{273+t}}} = \sqrt{\frac{42{,}2h\gamma\,(273+t)}{B}} =$$

$$= 6{,}5\sqrt{\frac{h\gamma\,(273+t)}{B}}.$$

Удельный вес воды $\gamma_в = 1$, а спирта $= 0{,}79$. Выражая h в миллиметрах водяного столба и подставляя цифровые значения удельного веса, получим:

для водяного манометра:

$$V = 6{,}5\sqrt{\frac{h\,(273+t)}{B}};$$

для спиртового:

$$V = 6{,}5\sqrt{\frac{0{,}79h\,(273+t)}{B}}.$$

Для нормальных условий $t = 15$ °C; $B = 760$ мм рт. столба. Подставив эти значения, получим простые выражения:

для водяного манометра:

$$V = 4\sqrt{h}; \qquad (247)$$

для спиртового манометра:

$$V = 3{,}56\sqrt{h}. \qquad (247а)$$

Анеморумбограф. Прибор, записывающий не только скорости ветра, но и его направление, называется анеморумбографом. Запись этого прибора даёт наглядное представление о характерных особенностях изменения скорости и направления ветра.

Общий вид приёмной части анеморумбографа показан на рис. 204, где *1* — червячная передача с контактом для отметок скорости ветра; *2* — коробка с электрическим устройством, воспринимающим направления ветра. Отметки по электропроводам передаются на самописец, устанавливаемый в помещении метстанции.

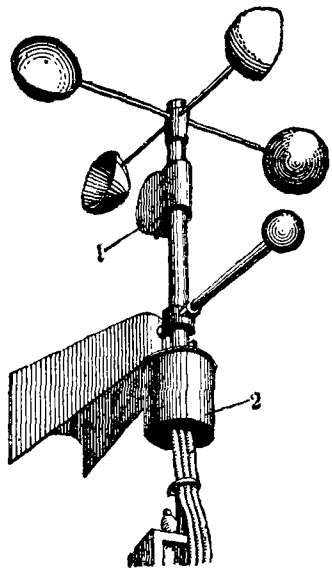


Рис. 204. Анеморумбограф.

Микроманометр. При малых скоростях воздушного потока, замеряемых с помощью трубки Пито, высота h в нормальном манометре слишком мала, что затрудняет точный отсчёт. Более чувствительным прибором для трубки Пито является микроманометр [26].

На рис. 205 дана схема наиболее распространённого микроманометра с наклонной трубкой. В новейших конструкциях возможно изменять наклон трубки, что удобно для изменения чувствительности микроманометра в зависимости от условий опыта.

В закрытый сосуд A, соединённый шлангом B с трубкой Пито, наливают обычно спирт. При разности давлений — скоростного напора со стороны трубки Пито и статического давления со стороны открытой наклонной трубки C, уровень в трубке займёт некоторое положение выше уровня в сосуде A на высоту h. Измерив l длину столба жидкости в наклонной трубке при известных угле α наклона трубки и удельном весе γ жидкости, получим:

$$h = l \sin \alpha \gamma. \qquad \text{(а)}$$

Наклон трубки в микроманометрах этого типа делают так, чтобы $\sin\alpha$ представлял правильную дробь: $\frac{1}{2}$; $\frac{1}{4}$ и т. д.

Пример. При наклоне трубки $\sin\alpha=\frac{1}{10}$ и перемещении мениска в наклонной трубке на величину $l=5$ мм и удельном весе спирта равном $\gamma=0{,}8$, получим:
$h=5\cdot\frac{1}{10}\cdot 08=0{,}4$ мм водяного столба.

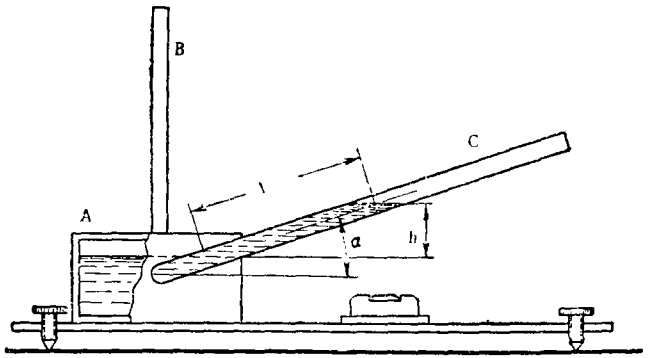


Рис. 205. Схема микроманометра.

Так как мы привели высоту спиртового столба к водяному, то полученное значение h можно подставить в выражение (247); при этом получим скорость:

$$V=4\sqrt{0{,}4}=4\cdot 0{,}63=2{,}53\ \text{м/сек}.$$

Среднемесячные и среднегодовые скорости ветра. Средней скоростью ветра называют среднюю арифметическую величину, составленную из нескольких наблюдённых скоростей за данный промежуток времени. Например, в течение часа через каждые 10 минут было произведено 6 замеров скоростей ветра, следовательно, средняя скорость ветра за этот промежуток времени будет равна:

$$V_{ср}=\frac{\Sigma V}{6}.$$

Этот метод подсчёта средней скорости ветра даёт приблизительную величину. Более точно среднюю скорость ветра можно получить с помощью анемометра. Средняя

скорость ветра по анемометру определяется делением числа метров, показываемых анемометром, на время в секундах, в течение которого работал анемометр. Например, в начале наблюдения стрелки счётчика анемометра указывали число 425 м; по истечении 1 часа действия анемометр показал число 18 784 м. Следовательно, средняя часовая скорость ветра в этот час была:

$$V_{ср\ час} = \frac{18\,784 - 452}{3\,600} = \frac{18\,382}{3\,600} = 5{,}1 \text{ м/сек.}$$

Если мы просуммируем средние часовые скорости ветра, наблюдаемые в течение каждого часа суток, и разделим на 24, то получим среднюю суточную скорость ветра, а именно:

$$V_{ср.\ сут.} = \frac{\Sigma V_{ср.\ час}}{24}.$$

Аналогично для определения средней годовой скорости ветра имеем выражение:

$$V_0 = \frac{\Sigma V_{ср\ мес.}}{12}.$$

На основании записей средних суточных скоростей ветра, производимых метстанциями в течение ряда лет, составляются таблицы среднемесячных и среднегодовых скоростей ветра. Эти таблицы представляют большой практический интерес не только для ветротехники, но и для других отраслей народного хозяйства.

По данным метстанций за многолетний период наблюдений можно сделать общие выводы о распределении средних скоростей ветра. Суточный ход скоростей ветра характеризуется тем, что максимальные скорости обычно наблюдаются в середине дня, от 11 час. до 15 час., с максимумом в 13 час. дня. Годовой ход среднемесячных скоростей ветра для большинства районов СССР характеризуется минимумом в летние месяцы и максимумом весной и осенью.

Для Северного Урала и Северной Сибири, наоборот, максимальные скорости ветра приходятся на лето.

В течение суток летом в равнинных местностях скорости ветра наиболее сильны днем и наименее сильны ночью; в нагорных же местностях — наоборот: ночные скорости ветра сильнее дневных. Зимою скорости ветра одинаковы ночью и днем.

Как правило, районы, расположенные у побережья морей, отличаются наиболее сильными ветрами, как например, побережья Северного Ледовитого и Тихого океанов, Чёрного и Каспийского морей, озёр Байкал, Балхаш.

На континенте районами со сравнительно большими скоростями ветра являются наши полузасушливые области юго-востока европейской части СССР.

Наименьшими скоростями ветра отличаются районы Центральной части Якутии. Сравнительно слабые скорости ветра наблюдаются также в северо-восточных районах европейской части СССР, где сказывается влияние лесных массивов. Наибольшие скорости ветра наблюдаются в центральных районах среднеазиатской части СССР.

По среднегодовым скоростям ветра обычно принято судить о возможном количестве энергии ветра, протекающей в том или ином районе в течение года. Нужно заметить, однако, что среднегодовые скорости ветра, будучи одинаковыми для каких-либо районов, расположенных более или менее на далёком расстоянии друг от друга, могут давать совершенно различные количества энергии. Объясняется это тем, что среднегодовые скорости ветра — среднеарифметические величины чисел в первой степени, в то время как энергия ветра — сумма кубов этих чисел. Ряд чисел с небольшим колебанием их величин дают меньшую сумму кубов этих чисел, чем ряд чисел с резким колебанием их величин, но дающим в первой степени ту же сумму, что и первый ряд.

Влияние препятствий на скорость ветра. Часть воздушного потока при обтекании препятствий из прямолинейного движения переходит в беспорядочное, вихревое. Воздушные струи, непосредственно обтекающие края препятствий, срываются с них и закручиваются в вихри, которые уносятся в направлении воздушного потока. На месте унесённых появляются новые вихри и т. д. Это вихреобразование, происходя на гранях препятствия, далеко за ним постепенно затухает и совершенно прекращается на расстоянии приблизительно пятнадцатикратной высоты препятствия.

Исследованиями в аэродинамической трубе установлено, что скорость воздушного потока при прохождении его над крышей дома значительно повышается, следова-

тельно, анемометр, помещённый вблизи конька крыши здания, если последнее стоит на совершенно открытом месте, будет давать для данного района преувеличенные значения скорости ветра. Скорость воздушного потока позади препятствия убывает не только на уровне самого препятствия, но даже на несколько большей высоте.

Полученные в Кучинской аэродинамической трубе данные о движении воздушного потока около моделей отдельных домов, а также группы их, приведены на рис. 206. Из рисунка видно, что анемометр, поставленный вблизи зданий, не будет давать истинных скоростей ветра.

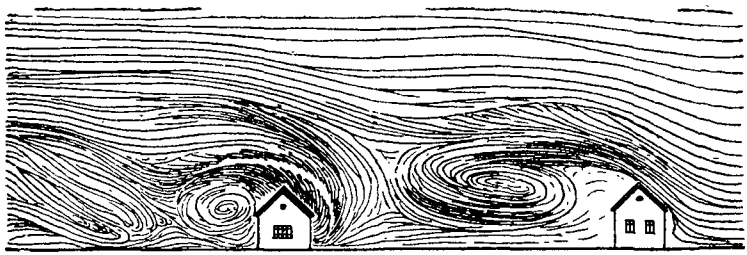


Рис. 206. Аэродинамический спектр вокруг моделей домов.

Подстилающая поверхность и рельеф местности оказывают очень большое влияние на скорость ветра. Анеморазводками установлено, что на высоте 10—20 м в равнинной степи скорость ветра изменяется в зависимости от рельефа местности. Скорость ветра над вершинами открыто расположенных хребтов с правильными, хорошо обтекаемыми склонами без резкого изменения рельефа, увеличивается в 1,5—2 раза. Если возвышенность не представляет правильного склона или рельеф искажён обрывом, оврагом и т. п., то скорости ветра обычно малы.

Возвышенности с крутыми, обрывистыми, каменистыми склонами обусловливают весьма низкие скорости ветра; здесь решающее влияние принадлежит восходящим и нисходящим потокам.

Рельеф местности создаёт так называемые местные ветры. Если воздушный поток встречает отдельно стоящую вершину, то он при некоторых условиях может обойти её, направляясь по долине, а не

над её гребнем. В случае движения ветра между двумя возвышенностями его скорость значительно возрастает. В долине между возвышенностями образуется род коридора, в который с силой устремляется воздушный поток. Таким образом, создаются местные ветры, достигающие иногда большой силы при сравнительно малых скоростях ветра в соседних открытых участках. Скорость ветра также повышается при обтекании холмов, имеющих более или менее правильное очертание поверхности.

Анеморазведки. Большинство метстанций производят записи скоростей ветра по показаниям флюгера Вильда и только три раза в день: в 7, 13 и 21 час по местному времени; точность этих данных недостаточна для серьёзных технических расчётов. Поэтому в тех случаях, когда требуются более полные сведения о ветровых ресурсах какого-либо района, посылают туда экспедицию для анемометрических разведок. При этих разведках изучают структуру ветра одновременными наблюдениями скорости и направления ветра на нескольких пунктах выбранного района.

Анемометрическими разведками устанавливаются: 1) степень однородности воздушного потока, 2) влияние рельефа и разных препятствий данного района на скорость и направление ветра, 3) зависимость скорости и направления ветра от высоты над пунктами различной конфигурации. Кроме того, параллельные наблюдения в различных точках данного района и на соседней метеорологической станции позволяют находить переводные коэфициенты для приблизительного определения среднего ветрового режима на каждом из пунктов разведки исходя из таких же средних данных о скоростях других метстанций.

Данные анемометрических разведок служат основанием к выбору места для постройки ветросиловых установок, а также других сооружений, служба которых в той или иной степени связана с ветровым режимом данной местности, как, например: метеорологические станции, аэродромы, базы дирижаблей, новые города и т. п.

Интересные сведения получены, например, анемометрической разведкой в горных районах Крыма. Наблюдения производились с помощью анемометра с полушариями, укреплёнными на шестах длиной в 4 м. Продолжительность отсчётов по анемометрам была 30 и 60 минут.

В течение 45 дней было произведено 1 400 отдельных наблюдений; при этом выявлено следующее.

Скорость ветра по долинам, сравнительно с общим потоком, значительно падает. Там, где долина теряет свои крутые склоны, затухающее влияние исчезает, и ветры достигают почти нормальных скоростей. В долине реки поток ветра, направленный поперёк долины, теряет скорость от 50 до 60%.

В нагорной пересечённой местности высокие скорости ветра наблюдались на наиболее обтекаемых ветровым потоком вершинах, имеющих правильные очертания; вершины с большими каменистыми обрывами склонов ослабляют ветры.

Районы высоких плато обладают наибольшими скоростями ветра; при этом увеличение скорости против нормального потока достигает 100%. Пункты на возвышенностях с облесёнными склонами имеют пониженные скорости ветра, несмотря на более высокое положение их по отношению к центральным плато.

Повторяемость ветра. Повторяемостью ветра называют сумму часов, в течение которых в каком-либо определённом пункте в разное время дул ветер с одинаковой скоростью.

Повторяемость является основной величиной, характеризующей ветер с энергетической стороны. Ввиду непостоянства ветра, изучение его повторяемости представляет весьма трудную задачу. Этим вопросом наука занимается очень давно. На основании длительных исследований ряд учёных дали математические зависимости, которые позволяют с той или иной точностью находить теоретическую величину повторяемости ветра в данном районе. Ещё в 1889 г. проф. Срезневский вывел математическую зависимость, которая даёт для Ленинграда относительно близкое совпадение теоретической повторяемости ветра с фактической.

М. М. Поморцев впервые установил зависимость, которая даёт повторяемости ветров, близкие к действительным, в районах со среднегодовыми скоростями, не превышающими 5 м/сек. Он пришёл к заключению о показательном характере этой зависимости, приводящейся к виду нормальной кривой вероятности Гаусса:

$$\tau = \frac{dt}{dV} = A \cdot e^{-B(V-V_0)^2},$$

где параметры A и B можно определить либо способом наименьших квадратов по фактическим наблюдениям для целых значений V_0, либо по теоретической зависимости, вытекающей из предположения Поморцева о применимости к данному случаю закона Гаусса.

$$A = \frac{\sqrt{B}}{\sqrt{\pi}} = \frac{\sqrt{n-1}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\Sigma (V - V_0)^2}} \; ; \quad B = \frac{n-1}{\Sigma (V - V_0)^3} .$$

V — скорости ветра;
V_0 — средняя скорость ветра за рассматриваемый период времени;
n — число слагаемых.

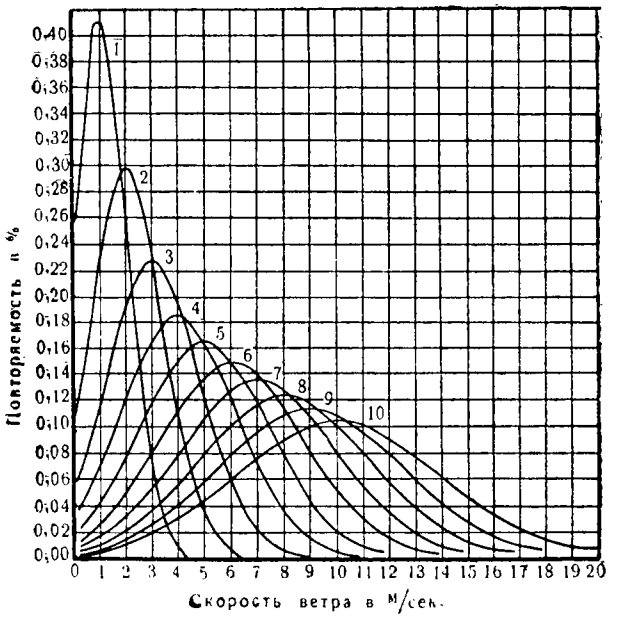


Рис. 207. Кривые повторяемости ветров по М. Поморцеву.

Кривые повторяемости ветров по Поморцеву приведены на рис. 207, а в таблице 16 дана повторяемость в часах [27].

Более поздние теоретические данные о повторяемости ветра предложены Гулленом.

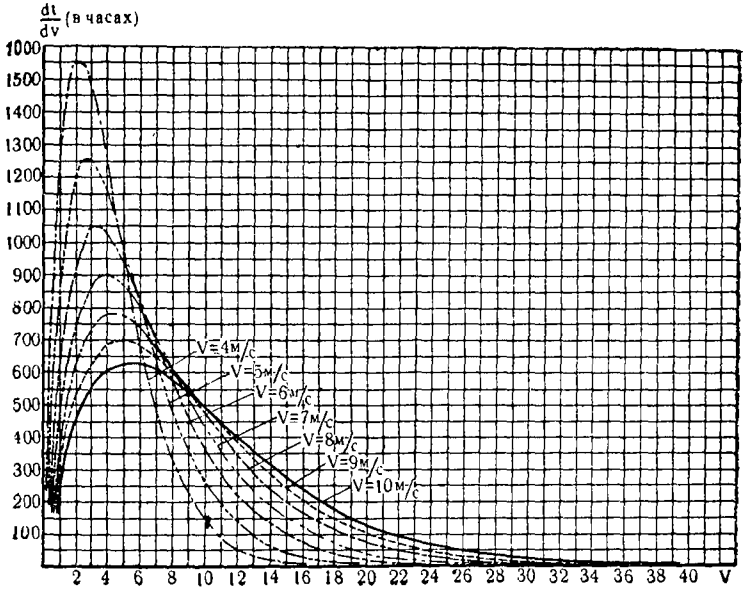


Рис. 208. Кривые повторяемости ветров по Гуллену.

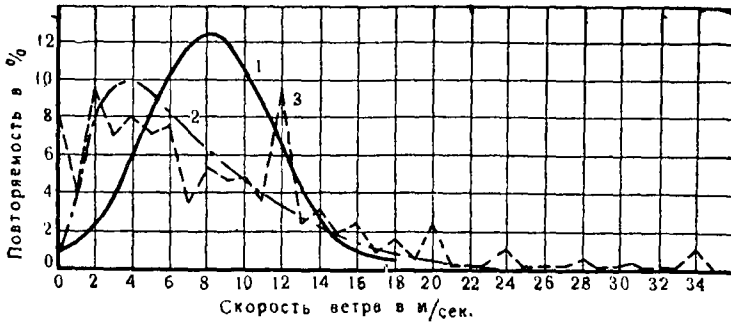


Рис. 209. Сравнение кривых повторяемости по Поморцеву и Гуллену с действительными повторяемостями в природе:
1 — повторяемость по Поморцеву; *2* — по Гуллену; *3* — по записям.

Кривые повторяемости ветров по Гуллену в обработке С. Л. Розентул приведены на рис. 208; в таблице 17 даётся повторяемость соответственно этим кривым в часах.

Для сравнения теоретических повторяемостей с повторяемостями ветров, наблюдаемыми в природе, на рис. 209

и 210 даются кривые повторяемости по Гуллену, Поморцеву и по фактическим данным.

Рассмотрение этих кривых приводит к заключению, что для определения повторяемости различных скоростей ветра вполне возможно пользоваться кривыми и таблицами Гуллена и М. М. Поморцева. Кривыми Гуллена надлежит пользоваться при определении повторяемости скоростей ветра для районов со средними скоростями от

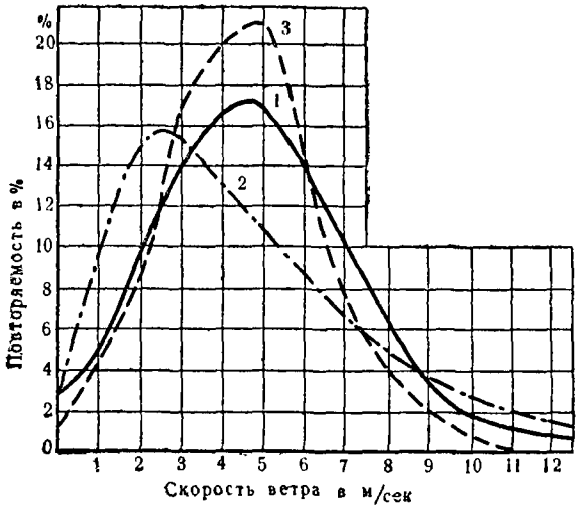


Рис. 210. Сравнение кривых повторяемости по Гуллену и Поморцеву с действительными повторяемостями для Москвы:

1 — повторяемость по Поморцеву; *2* — по Гуллену; *3* — по записям.

6 м/сек. и выше, кривые же Поморцева дадут более точные значения повторяемости для районов со средними скоростями ветра меньше 6 м/сек.

Изменение скорости ветра с высотой. Различные препятствия на земной поверхности сильно влияют на скорость и направление воздушных течений. Это влияние по мере увеличения высоты над земной поверхностью уменьшается и на некоторой высоте оно почти пропадает.

На рис. 211 приведены графики изменения скорости ветра, записанные специальным прибором, установленным на воздушном змее, в Аэрологической обсерватории в СССР. Кривая *а* показывает изменение скорости ветра

Таблица 16

Повторяемость ветра по М. М. Поморцеву

Скорости ветра (в м/сек.)	Среднегодовые скорости ветра (в м/сек.)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Часы повторяемости ветра									
0 . . .	2 230	876	500	307	175	87	52	44	18	0
1 . . .	3 600	2 020	1 030	630	376	228	149	88	62	18
2 . . .	2 190	2 590	1 700	1 070	684	420	262	187	140	70
3 . . .	653	2 020	1 990	1 445	1 003	700	462	334	228	180
4 . . .	87	873	1 710	1 610	1 310	963	700	492	350	280
5 . . .	—	330	1 050	1 445	1 445	1 210	930	685	500	394
6 . . .	—	51	525	1 070	1 310	1 320	1 100	876	700	520
7 . . .	—	—	193	640	1 050	1 228	1 180	1 030	840	684
8 . . .	—	—	62	315	700	1 000	1 120	1 100	960	788
9 . . .	—	—	—	152	376	700	963	1 033	1 000	876
10 . . .	—	—	—	52	183	438	720	886	960	896
11 . . .	—	—	—	26	70	262	500	700	850	876
12 . . .	—	—	—	—	52	131	312	516	700	796
13 . . .	—	—	—	—	26	52	170	350	520	688
14 . . .	—	—	—	—	—	26	70	220	368	520
15 . . .	—	—	—	—	—	—	36	115	250	420
16 . . .	—	—	—	—	—	—	18	61	157	290
17 . . .	—	—	—	—	—	—	16	26	87	193
18 . . .	—	—	—	—	—	—	—	17	52	131
19 . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	18	79
20 . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	61

за короткие промежутки времени на высоте 250 м, а кривая *б* — скорости ветра за эти же промежутки времени вблизи поверхности земли. Из этих графиков видно, что течение воздушных потоков в верхних слоях атмосферы происходит с меньшими пульсациями, чем внизу, вблизи земной поверхности. Наблюдения изменений скорости ветра с высотой над различными видами подстилающих поверхностей показывают, что наибольшее снижение скорости ветра близ поверхности земли вызывается городской застройкой, хотя бы и на равнине. Когда же подстилающей поверхностью является открытая равнина, замечается снижение скорости ветра вблизи поверхности земли. Меньший градиент снижения скорости ветра наблюдается над выпуклой поверхностью с плавным

Таблица 17

Повторность ветра по Гуллену

Скорости ветра (в м сек)	Среднегодовые скорости ветра (в м сек.)						
	4	5	6	7	8	9	10
	Часы повторяемости ветра						
До ½	365	245	172	130	103	83	65
1	1 200	850	630	475	400	300	250
2	1 540	1 200	930	750	620	520	450
3	1 450	1 250	1 040	870	736	620	550
4	1 220	1 150	1 020	900	775	680	605
5	930	950	930	860	770	700	630
6	660	780	810	780	740	670	620
7	470	630	680	700	675	650	600
8	330	480	650	600	600	600	570
9	220	350	450	520	530	550	540
10	150	260	360	480	475	490	490
11	90	200	280	350	410	440	450
12	50	140	220	280	345	380	400
13	36	100	170	230	290	330	360
14	20	60	140	190	240	280	320
15	17	40	100	150	200	240	280
16	10	30	70	125	170	200	240
17	—	22	60	100	140	175	210
18	—	13	40	75	120	150	180
19	—	10	30	58	99	130	150
20	—	—	20	36	75	110	130
21	—	—	18	27	60	85	110
22	—	—	15	22	50	75	100
23	—	—	10	17	35	60	80
24	—	—	5	15	25	50	70
25	—	—	—	10	22	40	60
26	—	—	—	6	18	35	50
27	—	—	—	4	15	30	40
28	—	—	—	—	12	22	32
29	—	—	—	—	10	18	28
30	—	—	—	—	—	12	22
31	—	—	—	—	—	10	17
32	—	—	—	—	—	9	15
33	—	—	—	—	—	7	14
34	—	—	—	—	—	6	10
35	—	—	—	—	—	3	6
36	—	—	—	—	—	—	5
37	—	—	—	—	—	—	4
38	—	—	—	—	—	—	3
39	—	—	—	—	—	—	2
40	—	—	—	—	—	—	2

очертанием рельефа; здесь наблюдается даже некоторое повышение скорости ветра близ поверхности. Например, у Новороссийска на Мархотском перевале наблюдается увеличение скорости ветра вблизи поверхности земли до $1^1/_2$ раза против общего потока, протекающего над поверхностью земли. На рис. 212 даются кривые,

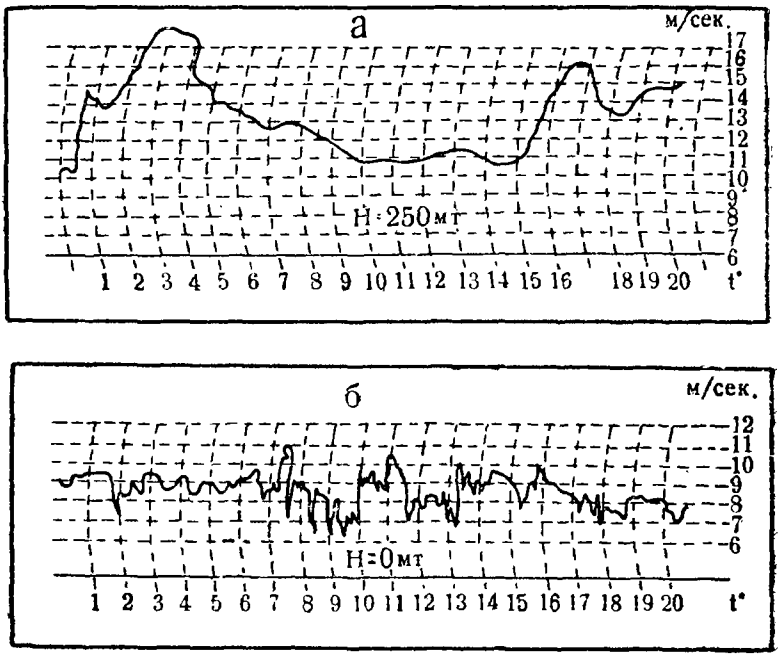


Рис. 211. Характеристики ветра: *а* — на высоте 250 м; *б* — на поверхности земли.

по наблюдениям Аэрологической обсерватории в СССР, значений скорости ветра зимой и летом, откуда видно, что в слоях выше 1 000 м наблюдается слабое изменение скорости ветра с высотой, при этом на высоте более 500 м скорость ветра даже уменьшается с увеличением высоты. Это явление, повидимому, следует поставить в связь с тем обстоятельством, что в тихие дни, при достаточно интенсивном нагревании солнцем земной поверхности, у земли создаются воздушные течения местного характера, по типу бризов, увеличивающие в

дневные часы общее движение воздуха. При слабых скоростях общей циркуляции, естественно, такие местные ветры могут заметно усилить ветер вблизи земной поверхности. При усилении ветра общей циркуляции влияние местного ветра затушёвывается и на первый план высту-

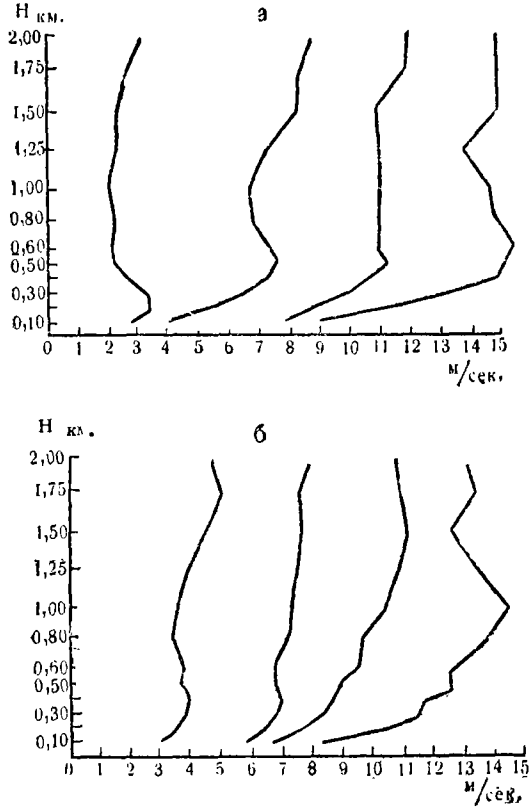


Рис. 212. Характеристика изменения скорости ветра по высоте: *а* — зимой в 1 час; *б* — летом в 13 часов.

пают явления общего порядка [23]. В более низких слоях, от земной поверхности и до 500 м, наблюдается резкое повышение скорости ветра по мере удаления от земли. Сравнение хода скоростей в зимнее и летнее время показывает, что изменение скорости ветра с высотой летом

значительно меньше, чем зимой, что объясняется меньшими значениями вертикального температурного градиента в зимнее время сравнительно с летним.

На основании данных наблюдения скоростей ветра по высоте некоторыми исследователями выведены обобщающие формулы для определения скорости ветра по высоте.

Из них наиболее простая зависимость для высоты от 5 м и выше имеет следующее выражение:

$$V = V_0 \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\frac{1}{5}}, \qquad (248)$$

где: V_0 и h_0 — соответственно скорость и высота, замеренные вблизи земли;

V — скорость, определяемая для высоты h.

Недостатком этой формулы является то, что она не учитывает влияния подстилающей поверхности на скорость ветра, а также турбулентности потока вблизи поверхности земли. Д. Л. Лайхтман учёл влияние этих факторов и, допуская, что на некоторой высоте h_0 скорость ветра $V=0$, получил следующую формулу:

$$V = V_1 \frac{\ln \frac{h}{h_0}}{\ln \frac{h_1}{h_0}},$$

где V — искомая скорость ветра на высоте h; V_1 — известная скорость ветра на высоте h_1; h_0 — высота, на которой скорость ветра равна 0. Обычно h_0 рассматривается как мера шероховатости подстилающей поверхности; её величина равна 6,7 см при свекловичном поле; 3,2 см при поле с низкой травой и 0,5 см, если подстилающую поверхность представляет снежный покров.

Сравнение этого уравнения с результатами непосредственных наблюдений, включающих приземный слой воздуха, начиная от нескольких сантиметров, подтвердило применимость уравнения для расчёта изменения скорости ветра с высотой при адиабатическом градиенте (Лайхтман, Профиль ветра и обмен в приземном слое атмосферы. Известия Академии наук СССР, т. VIII, № 1, 1944).

Изменение скорости ветра в слое от 1 до 5 м над поверхностью земли по наблюдениям Рыкачева за 1917 г., приведённым в сборнике «Естественные производитель-

ные силы России», том 1, часть 1, характеризуется следующими средними величинами (в м/сек.):

Подстилающая поверхность	Высота (в м)				
	1	2	3	4	5
Снежный покров	4,31	5,25	5,48	5,50	5,60
Снежный покров сошёл (апрель-май)	4,65	5,50	5,80	5,95	6,00
Среднее значение скорости за весь промежуток времени с 8/II по 24/V 1917 г.	4,88	5,85	6,23	6,40	5,6

Ветры нижних слоёв следуют рельефу местности. Встречающиеся при этом неровности вызывают вихри, неблагоприятные для работы ветродвигателей. Неустойчивость ветра как по скорости, так и по направлению простирается в высоту около 80 м над землёй.

§ 47. ЭНЕРГИЯ ВЕТРА

Согласно уравнению (62), § 14, энергия ветра изменяется пропорционально кубу его скорости:

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{F\rho V^3}{2}.$$

Практический интерес представляет вопрос, какое количество энергии ветра вообще возможно использовать современными техническими средствами. Исчерпывающего ответа на этот вопрос современная ветротехника ещё не дала. Непостоянство скорости ветра по времени и высоте, отсутствие опыта эксплоатации групп ветроустановок, а также отдельных мощных ветродвигателей свыше 200 л. с. не позволяют определить величину энергии ветра, возможную к практическому использованию.

Приведём, однако, теоретические соображения по этому вопросу.

Распределяя ветродвигатели на поверхности суши в шахматном порядке на расстоянии пятнадцатикратной величины диаметра ветроколеса, Н. В. Красовский находит, что с 1 кв. км земной поверхности можно получить следующее количество ветровой энергии (см. табл. 18).

При этом суммарная установленная мощность по СССР может составить 10 701 млн. квт со средней годовой отдачей энергии в 18 281 млрд. квтч [18].

Таблица 18

Среднегодовые скорости ветра (в м/сек.)	3	4	5	6	7	8	9	10
Установленная мощность в квт генераторов, работающих от ветродвигателей на 1 кв. км	297	435	618	790	1 100	1 480	1 880	2 400
Годовая выработка в тысячах квтч, получаемая с 1 кв. км	445	680	1 060	1 550	2 220	3 040	3 950	5 120

Приближённый теоретический подсчёт энергии ветра. Придерживаясь шахматного распределения ветряков на поверхности земли, подсчитаем количество энергии ветра на 1 кв. км. Площадь поверхности под один ветряк должна быть равна:

$$F = 0{,}785\,Д^2, \qquad (а)$$

где: $Д = 15\,D$ — диаметр круга площади под один ветряк;

D — диаметр ветроколеса.

Наиболее плотно расположатся ветряки, если принять площадь под каждый ветряк в виде правильного шестиугольника. Площадь такого шестиугольника будет равна:

$$F_ш = 0{,}87\,Д^2 = 0.87\,(15D)^2 = 196\,D^2. \qquad (б)$$

Разделив 1 кв. км на $196\,D^2$, получим количество ветродвигателей, которые возможно разместить на 1 кв. км, а именно:

$$n = \frac{1\,000^2}{196D^2} = \frac{5\,100}{D^2}. \qquad (249)$$

Мощность каждого ветродвигателя равна [§ 22, уравнение (137)]:

$$N = 0{,}000654\,D^2V^3\xi \text{ л. с.}$$

Умножая это выражение на $\frac{5\,100}{D^2}$, получим установленную мощность на 1 кв. км:

$$N_{уст} = 0{,}000654D^2V^3\xi \cdot \frac{5\,100}{D^2} = 3{,}34V^3\xi \text{ л. с.}, \qquad (250)$$

или

$$N_{уст} = 2{,}46\, V^3 \xi \text{ квт.} \qquad (250а)$$

При $\xi = 0{,}30$ получим простое выражение установленной мощности:

$$N_{уст} = V^3_{уст} \text{ л. с.,} \qquad (251)$$

где $V_{уст}$=скорость ветра, при которой считают установленную или номинальную мощность ветродвигателя (см. главу IX).

Для определения годовой выработки ветродвигателя необходимо знать его характеристику и повторяемость ветра в районе ветроустановки.

По характеристике возможно определить коэфициент использования ветровой энергии при разных скоростях ветра. По кривой повторяемости можно определить число часов работы ветродвигателя в течение года при каждой скорости ветра.

Имея эти данные, подсчёт годовой выработки можно произвести с помощью уравнения:

$$\Sigma N = 0{,}000654 D^2 \eta \Sigma V^3 \xi t_p, \qquad (252)$$

где: D — диаметр ветроколеса;
η — механический коэфициент полезного действия ветродвигателя;
V — скорости ветра, при которых ветродвигатель может работать;
ξ — коэфициент использования энергии ветра;
t_p — число часов повторяемости каждой скорости ветра.

Коэфициент ξ при работе с центробежными насосами. генераторами, жерновами и некоторыми сельскохозяйственными машинами можно принимать постоянным, а при работе с поршневыми насосами переменным.

При подсчёте числа часов повторяемости ветра до V_y, при которой начинается ограничение мощности ветродвигателя, необходимо к числу часов t_y повторяемости скорости ветра равной V_y прибавить все часы t. повторяемости скоростей выше t_y, т. е.:

$$t_p = t_y + t.$$

С помощью уравнения

$$N = 0{,}000654 D^2 V^3 \xi \eta$$

подсчитывается мощность ветродвигателя при скоростях ветра 3; 4; 5; 6; 7 и 8 м/сек., если V_y=8 м/сек. (скорость ветра 3 м/сек. принимается в расчёт лишь для ветронасосных установок). Из таблицы 16 или 17 повторяемости ветров известно, сколько часов в году дует ветер с каждой из этих скоростей. Следовательно, умножив мощность ветродвигателя на число часов повторяемости данных скоростей и просуммировав произведения, мы получим годовую выработку ветродвигателя. При этом величины коэфициента использования энергии ветра и к. п. д. должны приниматься из характеристики ветродвигателя, работающего с определённой машиной [45].

В таблице 19 подсчитана годовая выработка в л. с. ч. условного ветродвигателя с диаметром ветроколеса D=1 м при разных среднегодовых скоростях ветра. Мощность подсчитана на валу ветроколеса, где: η=1,0 при ξ=0,30=Const.

Таблица 19

Среднегодовые скорости ветра (в м сек.)	3	4	5	6	7	8	9
Годовая выработка ветродвигателя D=1 м (в л. с. ч.).	87	196	314	435	544	628	692

Так как мощности ветродвигателей пропорциональны квадратам диаметра ветроколеса, то выработку для других его размеров можно подсчитать при любой среднегодовой скорости ветра с помощью уравнения:

$$\Sigma N = \frac{D'}{D_0^2}\Sigma N_0 = \frac{D^2}{1^2}\Sigma N_0 = D^2 \Sigma N_0, \qquad (253)$$

где ΣN_0 — приведены в таблице 19 для среднегодовых скоростей ветра от 3 до 9 м/сек.

§ 48. АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВЕТРА

Периоды колебания энергии ветра бывают секундные, минутные, часовые, месячные и даже годовые.

На рис. 213 приведена для примера анемографическая запись скоростей ветра за 20 секунд на высоте в 190 м.

Из графика видим, что изменение скорости ветра за промежуток времени до 2 секунд достигают 10 м/сек. Например, с 13-й до 15-й и с 20-й до 21-й секунд скорость ветра изменилась с 5 до 15 м/сек., т. е. увеличилась в 3 раза. Следовательно, энергия ветра в этот момент увеличилась в 27 раз. Эти колебания энергии сглаживаются различными регулирующими устройствами ветродвигателей. Непостоянство же ветра по времени, с частыми штилями от 1 до 5 дней, требует сооружения аккумулирующих устройств, позволяющих запасать энергию на

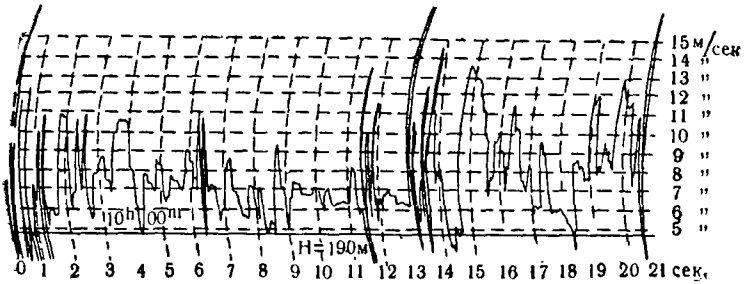


Рис. 213. Анемографическая запись скорости ветра за 20 сек. на высоте 190 м.

период штилевых дней. В данный момент этот вопрос представляет чрезвычайно сложную задачу в практике ветроиспользования.

Типы аккумуляторов. Изменения скоростей ветра по величине и по времени обусловливают применение в практике как буферных, так и ёмкостных аккумуляторов энергии.

Буферные аккумуляторы способны запасать и отдавать потребителю накопленную энергию в короткие промежутки времени, исчисляемые секундами, минутами и до одного часа.

Емкостные аккумуляторы способны запасать и отдавать потребителю накопленную энергию в течение продолжительного времени — от 1 до нескольких часов.

По принципу действия применяемые в ветротехнике аккумуляторы можно подразделить на следующие типы: 1) механические, 2) электрические, 3) гидравлические, 4) тепловые, 5) пневматические и 6) водородные.

Механические аккумуляторы запасают избыток энергии и отдают при её недостатке с помощью механизмов, как-то:

маховика, пружины, подъёмника и т. д. Эти механизмы отдают накопленную энергию рабочей машине либо сейчас же, как маховик, либо в определённые моменты времени, как пружина.

Из существующих механических аккумуляторов известен аккумулятор Уфимцева — Ветчинкина. Этот аккумулятор состоит из стального диска с осью, подвешенной на шарикоподшипниках; диск заключён в герметически закрывающийся кожух. Ось диска через специальную муфту приключена к генератору и является продолжением оси последнего. Этот генератор приводится в движение от вертикального вала ветродвигателя посредством ремённой передачи. Муфта, приключающая ось диска к оси генератора, построена так, что при увеличении оборотов, что бывает в момент возрастания скорости ветра, диск накопляет живую силу подобно маховику паровой машины. Как только ветер упадёт и снизятся обороты ветродвигателя, диск продолжает вращаться с теми оборотами, которые он развивал в этот момент, и муфтой вращает генератор уже за счёт той энергии, которую он накопил в момент возрастания скорости ветра. Таким образом, генератор работает то непосредственно от ветродвигателя, то от инерционного аккумулятора. Частота переключений муфты зависит от длительности порывов ветра. В результате ветроустановка даёт до некоторой степени ровную энергию, несмотря на пульсирующий характер ветра. Это есть тип буферного инерционного аккумулятора.

Схема работы ветродвигателя с инерционным аккумулятором приведена дальше, на рис. 215.

Наименьшим весом на единицу запасаемой инерционным аккумулятором энергии обладает диск равного сопротивления. Вес диска на 1 л. с. равен:

$$q = \frac{2\,100}{\sigma} \text{ кг/л. с. ч.}, \qquad (254)$$

где σ — напряжение на разрыв в кг/мм^2.

Ниже даётся таблица 20 приблизительных весов и основных данных инерционных аккумуляторов, составленная проф. В. П. Ветчинкиным.

Основным недостатком инерционных аккумуляторов является потеря на трение воздуха. Что же касается потерь на трение в подшипниках, то, при хорошем их выполнении и правильной смазке, эти потери представляют очень малый процент от потерь на трение воздуха.

Таблица 20

1. Название показателей	Кольцо с диском вместо спиц	Диск постоянной толщины (без отверстий в середине)	Диск равного сопротивления
2. Теоретический вес ротора кг/л. с. ч.	$\frac{5\,700}{\sigma}$	$\frac{4\,700}{\sigma}$	$\frac{2\,850}{\sigma}$
3. Полный вес аккумулятора (с кожухом, валом и подшипниками) кг/л. с. ч.	$\frac{8\,000}{\sigma}$	$\frac{6\,000}{\sigma}$	$\frac{4\,000}{\sigma}$
4. Материал ротора	Железо	Сталь обычная	Сталь высокосортная
5. Напряжение ротора кг/мм^2	16	40	80
6. Окружная скорость м/сек.	140	350	700
7. Вес аккумулятора на 1 квтч запасаемой энергии кг/квтч	500	150	50

С целью снижения потерь на трение воздуха, заключают вращающийся диск в герметически закрывающийся кожух, в котором делается некоторое разрежение. Этот способ был применён изобретателем Уфимцевым для построенной им ветроустановки в г. Курске.

К механическим аккумуляторам относятся также упругие аккумуляторы, в которых для запасания энергии используются упругие свойства тел. Примером простейшего буферного аккумулятора являются резиновые амортизаторы, применяемые в авиации для шасси самолётов.

Электрические аккумуляторы — устройства, позволяющие накоплять и сохранять электрическую энергию в виде постоянного тока для расходования её по графику потребления. Элемент электрического аккумулятора состоит из сосуда, наполненного разведённой серной кислотой, и опущенных в него электродов — свинцовых пластинок.

Число ампер-часов, которое аккумулятор может отдавать в сеть, называют ёмкостью аккумулятора. Ёмкость зависит от числа и размеров пластин каждого элемента и от силы разрядного тока при одинаковых размерах пластин. Опыт показывает, что чем медленнее происходит разрядка, тем ёмкость аккумулятора оказывается больше, т. е. тем большее число ампер-часов может он развить, пока напряжение каждого элемента не упадёт с 2,05 до 1,8 вольт. Например, если аккумуляторная батарея способна при разрядке давать 70 ампер в течение 3 часов, то она обладает при этом ёмкостью в 210 ампер-часов. При силе тока этой же батареи только в 28 ампер, для её разрядки потребуется не 3, а 10 часов, т. е. её ёмкость при этих условиях возрастает до $28 \times 10 = 280$ ампер-часов.

Коэфициентом полезного действия аккумулятора называют отношение работы, получаемой при полной разрядке, к работе, затраченной при заряде. Величина этого коэфициента колеблется в пределах от 70 до 80%.

Электрические аккумуляторы работают только на постоянном токе. Поэтому в сетях переменного тока перед зарядкой переменный ток преобразовывают в постоянный, а при разрядке постоянный ток аккумулятора трансформируется в переменный ток сети. Такая двойная трансформация снижает коэфициент полезного действия аккумуляторной батареи и увеличивает капитальные затраты установки.

Гидроаккумуляторы. Гидроаккумулятор представляет силовую установку, где энергия ветра или другая какая-либо энергия преобразуется в потенциальную энергию в виде поднятой на некоторую высоту воды, которая при своём обратном падении может совершать работу. Схема ветроустановки с гидроаккумулятором показана на рис. 214. Ветродвигатель расположен в наиболее высокой точке, в открытом для ветра месте и работает на генератор. Машинное здание 2 гидроаккумулятора расположено

вблизи источника воды *3* — реки, пруда или озера. Получаемый от ветроэлектроустановки электрический ток, передаваемый по линии 7, приводит в движение электродвигатель с центробежным насосом, подающим воду по трубопроводу в напорный бассейн *5*. При отсутствии ветра вода по этому же трубопроводу поступает в

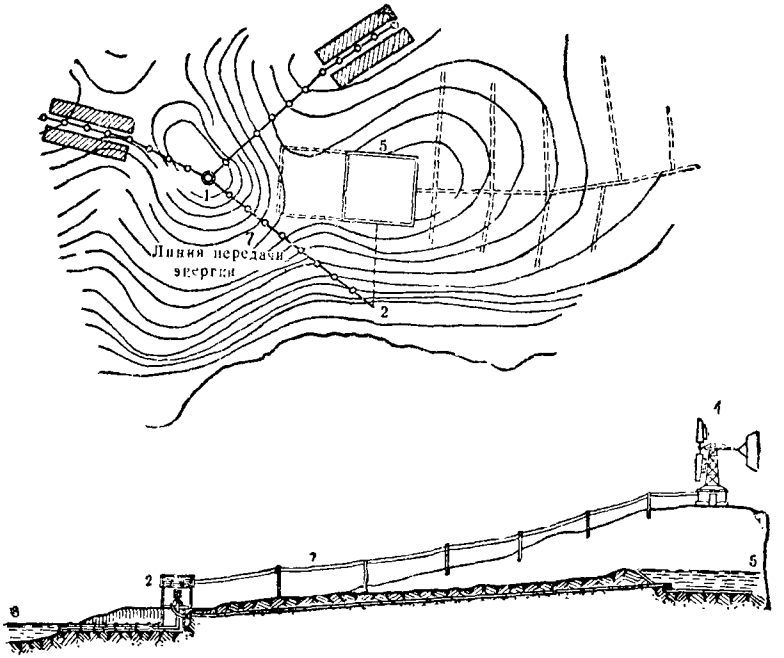


Рис. 214. Схема ветроустановки с гидроаккумулятором.

турбину, которая приводит в движение генератор. При достаточном количестве воды, она может быть пущена в оросительную систему [16].

Количество воды, потребное на 1 л. с. ч. запасаемой энергии, определяем исходя из уравнения мощности гидротурбины:

$$N = \frac{QH\eta 1\,000}{75 \cdot 3\,600} = 1,$$

откуда:

$$1\,000QH\eta = 75 \cdot 3\,600 \text{ кгм.}$$

Из этого выражения имеем:

$$Q = \frac{75 \cdot 3\,600}{H\eta \cdot 1\,000} = \frac{270}{H\eta} \text{ м}^3/\text{л. с. ч.}, \qquad (255)$$

где:

H — высота от нижнего уровня до верхнего уровня воды в бассейне в м;

η — коэфициент полезного действия гидроаккумулятора;

Q — количество воды в куб. метрах.

Коэфициент полезного действия гидроаккумуляторной установки определяется как произведение к. п. д. агрегатов установки, а именно:

$$\eta = \eta_{пер} \cdot \eta_{нас} \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{турб} \cdot \eta_{басс}; \qquad (256)$$

принимая: $\eta_{пер}$=0,95—к. п. д. передачи от двигателя к насосу,

$\eta_{нас}$=0,8—к. п. д. насоса,

$\eta_{тр}$=0,9—к. п. д. трубопровода,

$\eta_{турб}$=0,85—к. п. д. турбины,

$\eta_{басс}$ =0,9—к. п. д. бассейна (испарение, просачивание)

и подставляя цифровые значения в уравнение (256), получим:

$$\eta = 0{,}95 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}9 = 0{,}525.$$

Подставляя η =0,525 в уравнение (255), получим объём воды на 1 л. с. ч.

$$Q = \frac{270}{H \cdot 0{,}525} = \frac{515}{H} \text{ м}^3/\text{л. с. ч.} \qquad (255а)$$

Наиболее сорьёзным сооружением гидроаккумуляторной установки является напорный бассейн для запаса воды.

При напоре H=10 м на 1 л. с. ч. требуется ёмкость бассейна в 51,5 м³. Таким образом, гидроаккумулятор с установленной мощностью N_y=10 л. с. на 10 часов работы должен иметь бассейн ёмкостью:

$$W = \frac{515}{H} \cdot N_y \; t = \frac{515}{10} \cdot 10 \cdot 10 = 5\,150 \text{ м}^3.$$

Столь большой бассейн невыгодно строить при ветроустановке малой мощности. Поэтому для постройки гидроаккумуляторной установки нужно подыскивать естественные водоёмы, расположенные на необходимой высоте. Может также оказаться целесообразным устройство запруд в оврагах и балках.

Тепловые аккумуляторы — сооружение, в котором энергия ветра превращается в тепло, запасаемое либо в виде горячей воды для подогрева помещений, либо в виде пара, используемого в паровой машине или турбине или для отопления.

Теплоаккумулятор, предназначенный для отопительных целей, строится по следующей схеме. В периоды, когда мощность ветроустановки превышает нагрузку, необходимую для потребителей, избыток электроэнергии направляется в электрокотлы, в которых вода нагревается до парообразования, а затем используется в отопительных системах. Опыт применения теплового аккумулятора для отопления был осуществлён Г. А. Уфимцевым на ветроэлектростанции в г. Курске.

Аккумуляторы сжатого воздуха используют упругие свойства воздуха. Компрессированный воздух запасается под большим давлением в баллонах или резервуарах. Таким образом кинетическая энергия ветра с помощью ветрокомпрессорной установки может быть превращена в потенциальную энергию сжатого воздуха, которую можно использовать для работы либо машин-орудий, либо воздушных турбин. Работа расширения воздуха в двигателе составляет не более 60% от работы, затраченной на сжатие этого воздуха в компрессоре. Вес аккумулятора сжатого воздуха, независимо от степени его сжатия, равен около 18 кг на 1 кг воздуха.

Водородный аккумулятор. Г. А. Уфимцев в 1918 г. предложил аккумулировать энергию ветра путём электрического разложения воды на кислород и водород. Кислород идёт для промышленных целей, а водород для сжигания в двигателе внутреннего сгорания. Так как водород можно запасать в баллонах, то представляется возможность аккумулировать энергию в виде горючего водорода, который, по мере необходимости, должен быть израсходован на работу теплового двигателя. Схема такой ветроводородной установки показана на рис. 215.

Ветродвигатель приводит в движение инерционный аккумулятор *а*, насаженный на ось *б*. Электроток поступает в аккумуляторную батарею *в* и в электролизер *г*, где происходит процесс разложения воды на кислород и водород. Кислород собирается в резервуаре *д* и может быть использован для различных целей. Водород запасается в резервуаре *е*, откуда расходуется на работу теп-

лового двигателя *ж*, приводящего в движение генератор

Этот агрегат запускается в работу для покрытия избыточной нагрузки. Для примера на этом же рисунке даётся суточный график нагрузки ветроэлектростанции. Как изменяется эта нагрузка, показано кривой *И—И*. Суточный приход энергии за счёт работы ветродвигателя показан кривой *К*. Расход энергии за время с 15 до 21 часа покрывается за счёт электрической аккумуляторной батареи.

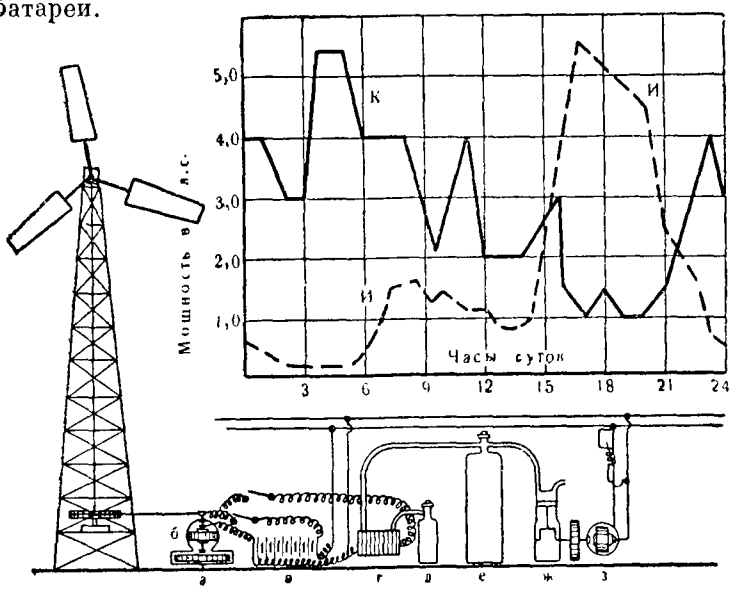


Рис. 215. Схема водородной установки Уфимцева.

Резервный водородный двигатель *ж* с генератором пускаются в работу автоматически всякий раз, как только истощится запас заряда аккумуляторной батареи до определённого предела её напряжения.

Автоматический пуск осуществляется током, пропускаемым через динамо двигателя. Генератор в этом случае обращается в мотор, раскручивающий резервный двигатель при его запуске. Каких-либо практических данных по этому вопросу сейчас еще нет. Поэтому трудно пока говорить о перспективах аккумулирования энергии за счёт получения водорода.

ГЛАВА XIII

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОСИЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

Конструкции ветродвигателей разрабатываются применительно к условиям работы тех или иных сельскохозяйственных машин. График потребления энергии и характеристика рабочих машин и являются условиями, определяющими тип ветродвигателя.

В настоящее время мы располагаем вообще двумя типами ветродвигателей: тихоходными — многолопастными и быстроходными — малолопастными. Коэфициенты использования энергии ветра ветродвигателями обоих типов, за исключением роторных, почти одинаковы, но моменты трогания с места при пуске в работу значительно отличаются друг от друга. Чем выше быстроходность ветродвигателя, тем меньше относительный момент.

На рис. 216 приведены аэродинамические характеристики основных типов ветродвигателей, где в верхней части графика даны характеристики коэфициентов использования энергии ветра $\xi = f(Z)$, а в нижней — характеристики относительных моментов $\overline{M} = f(Z)$.

Кривые рис. 216 показывают изменение основных величин характеристки ветродвигателя: начальный и рабочий моменты, быстроходность ветроколеса Z_n с нагрузкой и синхронную Z_0 — без нагрузки. Эти величины позволяют правильно сделать выбор типа ветродвигателя для работы с определённой машиной и выявить преимущества того или иного типа ветродвигателя сравнением основных параметров аэродинамических характеристик. Например, сравнивая коэфициенты использования энергии ветра ξ, находим, что крыльчатые ветродвигатели более эффективны, чем роторные. Сравнивая же начальные моменты M_0, видим, что крыльчатые малолопастные вет-

родвигатели отличаются большой быстроходностью и очень малым начальным моментом; многолопастные крыльчатые ветродвигатели, а также роторные отличаются большим начальным моментом, но очень малой быстроходностью, что и нужно знать при выборе типа ветродвигателя.

При проектировании ветросиловой установки приходится отыскивать наивыгоднейший рабочий режим ветро-

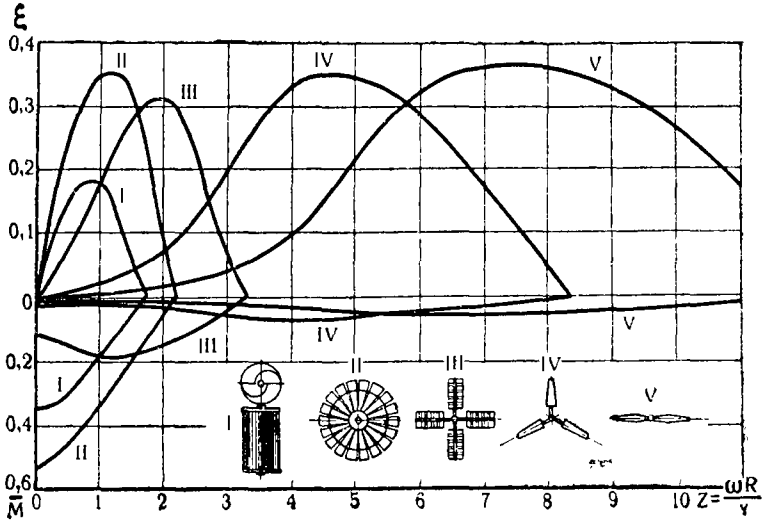


Рис. 216. Аэродинамические характеристики ветроколёс различных систем.

силового агрегата для определённого вида работы и хода ветров в данном районе. Чтобы правильно решить эту задачу, необходимо знать не только аэродинамические, но и рабочие характеристики ветродвигателей, а также характеристики приводимых ими в движение рабочих машин.

§ 49. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ПОРШНЕВЫХ НАСОСОВ

Рабочей характеристикой ветродвигателя называют зависимость мощности ветродвигателя при данной скорости ветра от числа оборотов ветроколеса:

$$N = f(n).$$

Эти характеристики строятся на основании аэродинамической характеристики $\xi = f(Z)$ путём её пересчёта на рабочую $N = f(n)$.

Из аэродинамической характеристики выписывают в ряд значения быстроходности $Z_1\ Z_2$ и т. д. и соответствующие им коэфициенты использования энергии ветра.

По уравнению (140) определяют число оборотов ветроколеса при скоростях ветра 3, 4, 5, 6 м/сек. и т. д.

$$n = \frac{30ZV}{\pi R}.$$

Далее, по уравнению (137)

$$N = 0{,}000654D^2V^3\xi$$

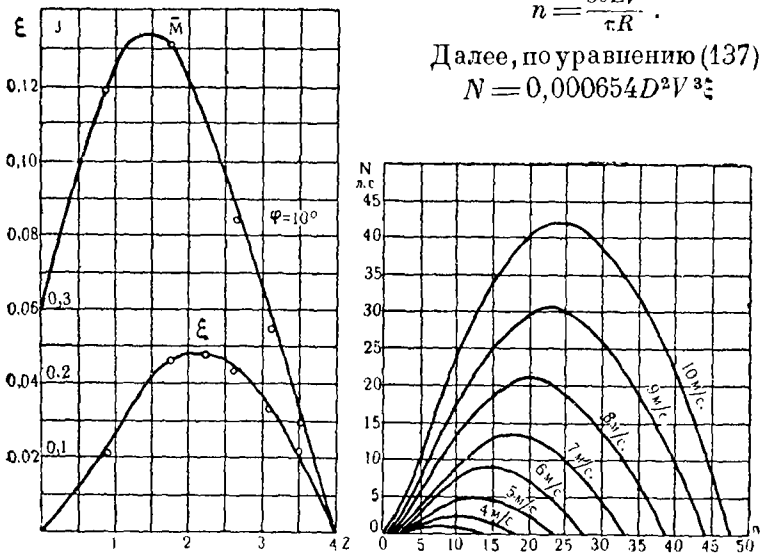


Рис. 217. Аэродинамическая и рабочая характеристика ветродвигателя ВИМЭ Д-16.

подсчитывают мощности ветродвигателя для тех же скоростей ветра и соответствующих им Z, ξ и n; результат подсчётов заносят в таблицу, по которой затем и строится график рабочей характеристики.

Пример. На рис. 217 слева дана аэродинамическая характеристика $\xi = f(Z)$ ветроколеса для ветряных мельниц ВИМЭ Д-16 улучшенного типа. Произведём пересчёт этой характеристики на рабочую характеристику $N = f(n)$, как указано выше; результаты подсчётов сводим в таблицу 21, где V — в м/сек., n — об/мин., N — л. с. на валу ветроколеса.

Таблица 21

Быстроходность ветроколеса или число модулей Z		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Коэфициент использования энергии ветра ξ . . .		0,050	0,125	0,20	0,245	0,230	0,175	0,110	0,020
$V=3$ . . .	n	1,80	3,60	5,40	7,20	9,00	10,80	12,60	14,40
	N	0,26	0,56	0,90	1,11	1,04	0,79	0,50	0,05
$V=4$ . . .	n	2,40	4,80	7,60	9,60	12,00	14,40	16,80	19,20
	N	0,53	1,34	2,14	2,62	2,47	1,87	1,19	0,12
$V=5$ . . .	n	3,00	6,00	9,00	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00
	N	1,06	2,66	4,24	5,20	4,90	3,70	2,36	0,24
$V=6$ . . .	n	3,60	7,20	10,80	14,40	18,00	21,60	25,20	28,80
	N	1,83	4,60	7,35	9,00	8,50	6,40	4,10	0,41
$V=7$ . . .	n	4,20	8,40	12,60	16,80	21,00	25,20	29,40	32,60
	N	2,90	7,30	11,70	14,30	13,50	10,20	6,50	0,66
$V=8$ . . .	n	4,80	9,60	14,40	19,20	24,00	28,80	33,60	38,20
	N	4,32	14,30	17,50	21,40	20,20	15,20	9,70	0,98
$V=9$ . . .	n	5,40	10,80	16,20	21,60	27,00	32,40	37,80	43,00
	N	6,15	20,40	25,00	30,50	28,80	21,60	13,70	1,38
$V=10$ . .	n	6,00	12,00	18,00	24,00	30,00	36,00	42,00	48,00
	N	8,40	28,00	34,20	42,00	39,40	29,80	18,80	1,89

По данным таблицы 21 строим кривые мощности ветродвигателя для каждой рабочей скорости ветра в зависимости от числа оборотов ветродвигателя (рис. 217, справа).

Рассматривая эти кривые, замечаем, что ветродвигатель развивает максимальную мощность, соответствующую каждой скорости ветра, только при определённых оборотах ветроколеса. Этими характеристиками удобно пользоваться при подборе рабочих машин к ветродвигателю.

Подобрать рабочую машину к ветродвигателю значительно сложнее, чем к тепловому двигателю. Тепловой двигатель работает почти с постоянными мощностью и оборотами, поэтому подбор сводится к определению по каталогу соответствующей мощности рабочей машины и её оборотов. Ветродвигатель же имеет переменные и

обороты и мощность. Задача подбора рабочей машины к ветродвигателю заключается в том, чтобы подобрать такое передаточное отношение оборотов ветродвигателя к оборотам машины, при котором агрегат мог бы работать наиболее продолжительное время с максимальными коэфициентами использования энергии ветра. По характеристикам ветродвигателя и рабочей машины можно легко определить, при каком передаточном отношении агрегат будет работать с наивыгоднейшим режимом. Этот режим мы получим в том случае, если характеристика рабочей ма-

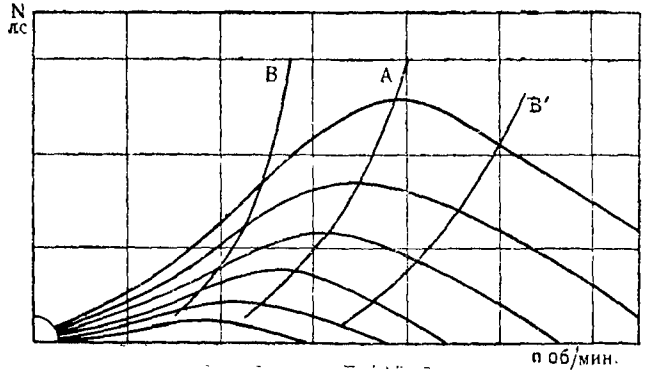


Рис. 218. Рабочая характеристика ветросилового агрегата с различными режимами работы.

шины при наложении её на характеристику ветродвигателя будет проходить через вершины характеристик ветродвигателя, как показано кривой A на рис. 218. Кривые B и B' характеризуют невыгодный режим, так как в этом случае затрачиваемая мощность на работу машины меньше мощности ветродвигателя, которую он развивает при каждой скорости ветра. Кривая B, кроме того, характеризует неустойчивый режим. В этом случае мощность рабочей машины с увеличением оборотов возрастает быстрее, чем мощность ветродвигателя; поэтому нагрузка будет тормозить ветродвигатель в каждый момент при увеличении или уменьшении оборотов с изменениями скорости ветра.

Необходимая мощность N для подъёма воды насосом определяется уравнением:

$$N = \frac{QH}{75\eta}, \qquad (257)$$

где: Q — производительность, расход или подача воды насосом в литрах в секунду;

H — напор в м.

η — полный к. п. д. насоса, который составляется из механического к. п. д. $\eta_м$ насоса, учитывающего механические потери на трение поршня о стенки цилиндра, штанги в подшипниках, в шарнирах и т. п.; $\eta_г$ — гидравлического к. п. д. насоса, учитывающего степень совершенства насоса в гидравлическом отношении, т. е. учитывающего потери напора при протекании расхода по насосу, и, наконец, η_0 — объёмного к. п. д. насоса.

$$\eta = \eta_м \eta_г \eta_0. \tag{258}$$

Для жидкостей, удельный вес которых отличен от удельного веса воды, необходимо в уравнение (257) вводить множитель γ — удельный вес данной жидкости. Производительность насоса простого действия определяется уравнением

$$Q = hf\eta_0 \frac{n}{60}, \tag{259}$$

где: h — ход поршня насоса в дм;

$f = \frac{\pi d^2}{4}$ — площадь сечения поршня насоса в кв. дм;

η_0 — объёмный коэфициент полезного действия или коэфициент наполнения; величина его колеблется в пределах от 0,9 до 0,95;

n — число двойных ходов поршня насоса или оборотов в минуту кривошипа насоса;

H — полный напор в м, с которым работает насос или манометрический напор.

Величина H складывается из статического или геометрического напора, обозначаемого $H_{ст}$ и суммы всех потерь напора Σh_r во всасывающей и нагнетательных трубах.

$$H = H_{ст} + \Sigma h_r \text{ м}. \tag{260}$$

Подставив в уравнение (257) значение Q теоретической производительности насоса, получим:

$$N = \frac{hfnH\eta_0}{75 \cdot 60} = \frac{0{,}785 d^2 hHn\eta_0}{75 \cdot 60 \cdot \eta}. \tag{261}$$

В этом уравнении hf являются постоянными. Приняв напор H также постоянным и обозначив эти величины в уравнении (261) через C, получим:

$$N = Cn. \qquad (262)$$

Это уравнение показывает, что мощность, затрачиваемая на работу поршневого насоса при определённых величинах хода поршня h и напора H без учёта потерь напора при движении воды в трубопроводе, изменяется

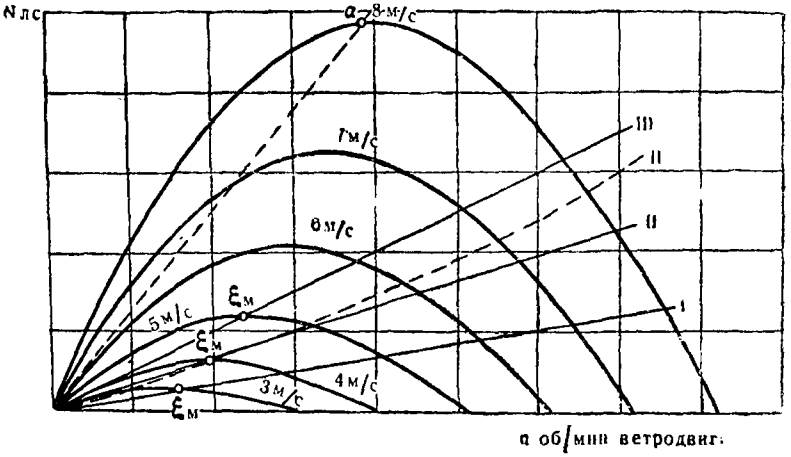


Рис. 219. Совмещённая характеристика ветродвигателя и поршневых насосов разных мощностей.

прямо пропорционально числу ходов n поршня или оборотов кривошипа. Отсюда видим, что характеристика мощности насоса, построенная по n, получается в виде прямой линии, проходящей через начало координат под некоторым углом к осям.

Совмещение рабочих характеристик поршневого насоса и ветродвигателя. При проектировании ветронасосного агрегата необходимо установить ту мощность ветродвигателя, на которую должен быть приключён насос. Если приключить поршневой насос на максимальную мощность ветродвигателя, которую он развивает при скорости ветра 8 м/сек., то характеристика такого насоса (рис. 219, пунктирная прямая), наложенная на характеристику ветродвигателя, будет пересекать её в точке a. Эта прямая не

пересечёт характеристики ветродвигателя при скоростях ветра менее 6 м/сек., следовательно, при этих скоростях ветродвигатель будет стоять из-за перегрузки. Между тем из таблиц повторяемости ветров нам известно, что наибольшее число часов в году бывают ветры со скоростями от 3 до 6 м/сек. Таким образом насос, рассчитанный на полную мощность ветродвигателя, не позволит ему работать бо́льшую часть года. Хозяйству же нужна вода повседневно, поэтому ветродвигатель должен работать на тех скоростях ветра, которые наиболее часто повторяются. Из таблицы 16 повторяемости ветров находим, что наиболее часто повторяются ветры со скоростями, равными среднегодовым скоростям. Следовательно, подобрав насос на ту мощность, которую ветродвигатель развивает при скорости ветра, равной среднегодовой, мы дадим возможность ветродвигателю работать на широком диапазоне скоростей ветра и более равномерно обеспечивать хозяйство водою. Это значит, если среднегодовая скорость ветра в данном районе равна 3 м/сек., то характеристика насоса должна пересекать вершину кривой мощности ветродвигателя при скорости ветра 3 м/сек., как показано лучом *I* на рис. 219. Если в районе среднегодовая скорость ветра 4 м/сек., то характеристика насоса должна пойти по лучу *II*, и, наконец, если среднегодовая скорость ветра равна 5 м/сек., то характеристика насоса должна пойти по лучу *III*.

Следует иметь в виду, что при учёте потерь в трубопроводе, которые изменяются пропорционально $\frac{V^2}{2g}$, прямые *I*, *II* и *III* получат вид некоторой пологой кривой, показанной пунктиром для луча *II*.

Определение производительности и размеров насоса. Допустим, что для среднегодовых скоростей ветра данного района наивыгоднейший режим работы ветронасосного агрегата будет протекать при характеристике насоса, показанной лучом *III* на рис. 219. Точка пересечения луча с вершиной кривой мощности при скорости ветра 5 м/сек. определяет мощность ветродвигателя, равную мощности, поглощаемой насосом. Следовательно, мы можем из уравнения (257) определить производительность насоса:

$$Q = \frac{75N\eta}{H} \text{ л/сек.} \qquad (263)$$

Кроме того, производительность насоса простого действия Q при известных: диаметре поршня d, его хода h и оборотах кривошипа n, можно выразить уравнением:

$$Q = 0{,}785\, d^2 h \frac{\tau_0 n}{60} \text{ л/сек.} \qquad (264)$$

Из уравнений (263) и (264) имеем:

$$\frac{75N\eta}{H} = 0{,}785\, d^2 h \frac{\tau_0 n}{60},$$

откуда

$$d = 75{,}6 \sqrt{\frac{N\eta}{Hhn\tau_0}}. \qquad (265)$$

Общий механический коэфициент полезного действия поршневых насосов, работающих от ветродвигателя, можно принимать в среднем равным $\eta = 0{,}60$, а объёмный $\tau_0 = 0{,}95$. Подставляя их значения в уравнение (265), получим:

$$d \cong 60 \sqrt{\frac{N}{Hhn}} \text{ дм}, \qquad (265а)$$

где: H — полный напор в метрах;

n — число двойных ходов поршня насоса или обороты в минуту кривошипного механизма;

h — ход поршня в дм;

N — мощность ветродвигателя в л. с., которая определяется по уравнению:

$$N = 0{,}000\,654 D^2 V^3 \xi;$$

скорость ветра V принимается та, при которой агрегат работает с максимальным коэфициентом использования энергии ветра (рис. 219).

По уравнению (265) определяют диаметр поршня насоса; при этом напор H подсчитывают исходя из планового и высотного расположения насосной установки, точек потребления воды, длины трубопровода и его частей, вызывающих местные потери напора. Ходом поршня h задаются исходя из конструктивных условий, а также средней скорости движения поршня v, которая колеблется от 0,2 до 1,0 м/сек. Средняя скорость поршня насоса определяется по уравнению:

$$v = \frac{2hn}{60} = \frac{hn}{30} \text{ м/сек.}, \qquad (266)$$

где h — ход поршня в метрах.

При решении уравнения (265) обороты насоса берутся по рабочей характеристике, построенной, согласно рис. 219, против точек пересечения характеристик насоса с вершинами кривых мощностей ветродвигателя.

Чтобы характеристики, показанные на рис. 219, для данного насоса не изменялись при изменениях статического напора, необходимо соответственно изменить ход поршня так, чтобы произведения хода поршня h на напор H оставались постоянными для данного диаметра поршня насоса, т. е.:

$$hH = h_1 H_1 = \text{Const}. \qquad (267)$$

Это правило вытекает из основного уравнения мощности (261). Обозначив $\frac{0,785\eta_0 n}{75\eta 60}$ через C, получим:

$$N = Cd^2 hH,$$

и для другого напора:

$$N = Cd^2 h_1 H_1,$$

откуда и получаем равенство (267).

Чтобы характеристика насоса не изменялась при изменении диаметра поршня, необходимо соответственно изменить h и H для данной характеристики, т. е. должно быть:

$$hHd^2 = h_1 H_1 d_1^2 = \text{Const}. \qquad (268)$$

Совмещение характеристик моментов ветродвигателя и поршневого насоса. Подсчитывая выработку ветронасосной установки, необходимо знать, при какой скорости ветра ветродвигатель трогается и при какой останавливается. Наиболее просто этот вопрос решается совмещением характеристики моментов нагрузки поршневого насоса с характеристикой моментов ветродвигателя, построенной для разных скоростей ветра.

Характеристика относительных моментов $\overline{M}$ ветроколеса в зависимости от быстроходности Z показана на рис. 216. Эта характеристика пересчитывается на характеристику размерных моментов M по методу, изложенному выше (стр. 346), при этом моменты определяем по уравнению:

$$M = \overline{M}\pi R^3 \frac{\rho V^2}{2},$$

где R — радиус ветроколеса.

Таблица 22

Быстроходность Z		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Относительный момент $\overline{M}$		0,060	0,100	0,125	0,139	0,122	0,092	0,058	0,0314	0,005
Скорость ветра м/сек. $V=3$ . .	n	0	3,60	7,20	10,80	14,40	18,00	21,6	25,2	28,80
	M	6,85	11,40	14,30	15,80	13,90	10,50	6,60	3,50	0,57
$V=4$ . .	n	0	4,80	9,60	15,20	19,20	24,00	28,80	33,60	38,40
	M	12,10	20,20	25,30	28,10	24,70	18,50	11,70	6,34	1,01
$V=5$ . .	n	0	6,00	12,00	18,00	24,00	30,00	36,00	42,00	48,00
	M	19,00	31,60	39,60	44,00	38,60	29,10	18,30	9,95	1,58
$V=6$ . .	n	0	7,20	14,40	21,60	28,80	36,00	43,20	50,40	57,6
	M	27,30	45,40	56,70	63,00	45,40	41,80	26,40	14,30	22,80
$V=7$ . .	n	0	8,40	16,80	25,20	33,40	42,00	50,40	58,8	66,60
	M	37,1	61,80	77,00	86,00	75,50	56,80	35,80	19,40	3,10
$V=8$ . .	n	0	9,60	19,20	28,80	38,40	48,00	59,60	67,20	76,40
	M	48,50	80,60	101,00	112,00	98,50	74,20	46,80	25,40	4,04

В таблице 22 даётся общий пример пересчёта относительного момента $\overline{M}$ на размерный момент M кгм для 4-лопастного ветроколеса диаметром 8 м.

По этой таблице построен график (рис. 220), которым можно пользоваться при сравнении моментов ветроколеса $D=8$ м и машины соответствующей мощности.

Момент поршневого насоса одинарного действия за время полного оборота кривошипного механизма изме-

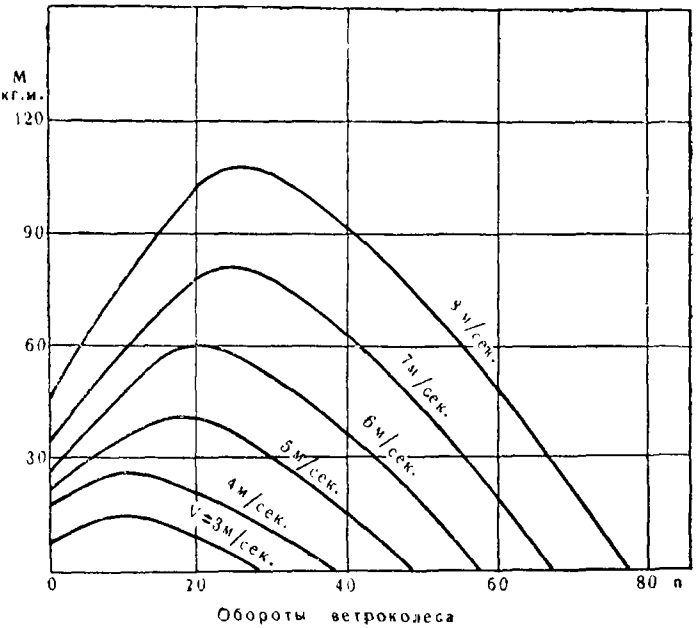


Рис. 220. Характеристика размерных моментов ветроколеса ВИМЭ Д-8.

няется пропорционально синусу угла поворота кривошипа (рис. 221).

$$M_н = Pr \sin \varphi \frac{i}{\eta}, \qquad (269)$$

где: P — сила, действующая на штангу;

$r=\frac{h}{2}$ — радиус кривошипа;

φ — угол поворота кривошипа, изменяющийся при рабочем ходе от 0 до π;

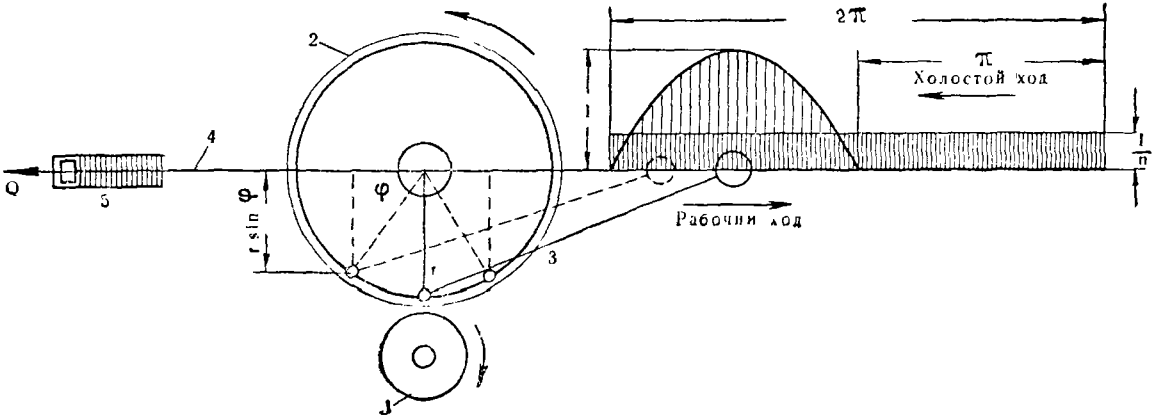


Рис. 221. Характеристика момента на кривошипе поршневого насоса:
1 — шестерня на валу ветроколеса; *2* — шестерня кривошипного механизма; *3* — шатун; *4* — штанга насоса; *5* — насос.

i — передаточное отношение между кривошипом и ветроколесом;

η — полный к. п. д. насоса, определяемый по уравнению (258).

Приняв $P=1$, $r=1$, $i=1$ и $\eta=1$, получим выражение для построения относительной характеристики момента нагрузки:

$$\overline{M}_н = \sin\varphi. \tag{270}$$

Наибольшей величины момент достигает, когда радиус кривошипа и штанга насоса составляют угол $\varphi=90°$. В этом случае $\sin\varphi=1$, следовательно, $\overline{M}_{max}=1$, а при углах $\varphi=180°$ и $\varphi=0$ момент нагрузки равен нулю.

В процессе работы ветроколесо преодолевает средний момент нагрузки, величина которого может быть определена делением площади, ограниченной кривой синусоиды за 1 рабочий ход на путь пальца кривошипа при рабочем и холостом ходе, т. е. на 2π.

При изменении угла φ от 0 до π моментная площадь будет равна:

$$M_F = \int_0^{\pi} \sin\varphi d\varphi = 2. \tag{271}$$

Величина же относительного среднего момента будет равна:

$$\overline{M}_{ср} = \frac{M_F}{2\pi} = \frac{2}{2\pi} = \frac{1}{\pi}.$$

На рис. 221 этот момент показан заштрихованной площадкой.

Умножив $\overline{M}=1$ и $\overline{M}_{ср}=\frac{1}{\pi}$ на величины, входящие в равенство (269) размерного момента нагрузки, получим:

$$M_{max} = Pri\frac{1}{\eta}, \tag{272}$$

$$M_{ср} = Pri\frac{1}{\eta\pi}, \tag{273}$$

где:

$$P = \frac{\pi d \cdot H}{4 \cdot 10} \tag{274}$$

усилие по штанге насоса за счёт столба воды;

d — диаметр поршня в см;
H — напор в м;
η — полный к. п. д. насоса [см. уравнение (258)].

Подставляя значение P в уравнения (272) и (273), получим:

$$M_{max} = \frac{\pi d^2 H r i}{4 \cdot 10 \eta} = \frac{\pi d^2 H h i}{4 \cdot 10 \cdot 2 \eta} = 0{,}0392 d^2 h H \frac{i}{\eta} \text{ кгм}, \quad (272а)$$

$$M_{ср} = \frac{\pi d^2 H r i}{4 \cdot 10 \eta \pi} = \frac{d^2 h H i}{4 \cdot 10 \cdot 2 \eta} = 0{,}0125 d^2 h H \frac{i}{\eta}, \quad (273а)$$

здесь d — в см; h — в метрах.

Максимальный момент преодолевается моментом ветроколеса при трогании, если напорный трубопровод наполнен водой, а средний момент преодолевается рабочим моментом ветроколеса. При совмещении характеристик моментов ветроколеса и насоса, характеристика среднего момента представится в виде прямой, параллельной оси абсцисс. Максимальный момент будет при оборотах, равных нулю, т. е. при трогании ветроколеса с места.

Какой тип ветродвигателя, тихоходный или быстроходный, будет лучше работать с поршневым насосом, можно установить при сравнении характеристик этих двигателей. На рис. 222 приведены кривые рабочих моментов: сплошные — многолопастного тихоходного ветряка и пунктирные — трёхлопастного, быстроходного. Момент поршневого насоса, приключаемого к тихоходному ветряку, показан верхней прямой *1*, и к быстроходному нижней прямой *2*, параллельной горизонтальной оси. Из рисунка видим, что в начале работы момент тихоходного ветряка, как показывают сплошные кривые, выше рабочего момента насоса. Момент быстроходного ветряка при трогании, как показывают пунктирные кривые, в несколько раз меньше момента поршневого насоса. Вследствие этого:

1) тихоходный ветряк будет начинать работать при значительно меньших скоростях ветра, чем быстроходный, и

2) так как поршневой насос требует малого числа качаний, то передачу от ветроколеса к кривошипу насоса проще осуществить у тихоходного ветряка, а не у быстроходного.

Быстроходный ветродвигатель теоретически может работать с поршневым насосом, если обсрудовать его:

1) центробежной муфтой, допускающей разбег ветроколеса вхолостую и приключающей поршневой насос,

когда момент центробежных сил муфты будет в состоянии преодолеть начальный момент поршневого насоса;

2) редуктором с большим передаточным отношением для снижения оборотов кривошипного механизма.

Определение потерь напора в трубопроводе. Характеристики *I*, *II* и *III* на рис. 219 построены без учёта потерь напора в трубопроводе в предположении, что насос работает с малым числом ходов на короткий трубопровод

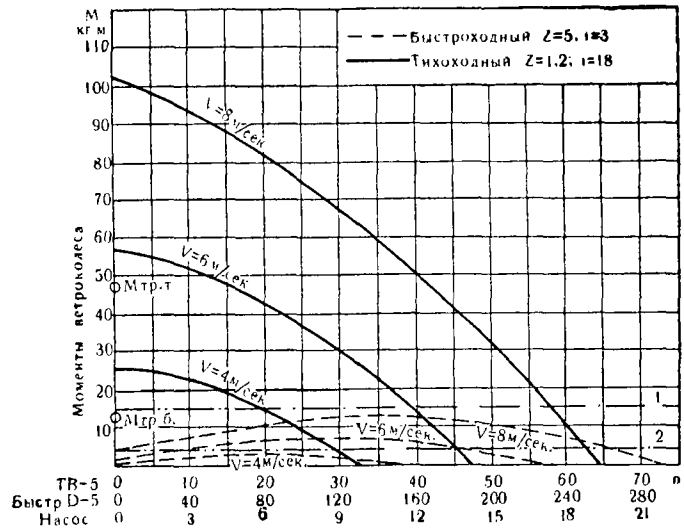


Рис. 222. Сравнение характеристик моментов тихоходного и быстроходного ветродвигателей.

(до 30 м), с малым количеством колен и без задвижек на линии трубопровода. Если же насос будет работать на длинный трубопровод, то эти потери могут сильно повлиять на характеристику насоса.

Потери напора определяются следующим образом:

$$\Sigma h_{\text{т}} = \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \zeta\right) \frac{v^2}{2g}, \qquad (275)$$

где: $\lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$ — потери в метрах в нагнетательных и всасывающих трубах;

$\zeta \frac{v^2}{2g}$ — местные потери в коленах, клапанах, переходах и т. п.;

l — длина трубопровода;
d — диаметр труб;
v — скорость движения воды в трубах;
λ — коэфициент, зависящий от диаметра труб, шероховатости их стенок и скорости движения в них воды.

Величины этого коэфициента в зависимости от диаметра железных труб приведены в таблице 23, которая подсчитана по данным Дарси, Куттера и Маннинга. Этой таблицей можно пользоваться для приблизительных подсчётов потерь в трубах. При этом графа величин λ по Дарси более подходит к новым трубам с гладкими стенками; λ по Куттеру более подходит к трубам с сильно шероховатыми стенками с коэфициентом шероховатости $K=0.25$ и, наконец, данные по Маннингу, который принимает коэфициент шероховатости $n=0{,}012$, более подходят к трубам, имеющим стенки меньшей шероховатости [24].

Для более точных подсчётов потерь в трубах можно пользоваться формулой Ланга

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{1{,}7}{\sqrt{Re}}, \qquad (276)$$

где λ_0 для гладких труб надо брать равным от 0,01 до 0,012, а для шероховатых труб чугунных и железных $\lambda_0=0{,}02$.

Re — число Рейнольдса определяется по формуле (29), в которой вместо l надо поставить d, т. е. $Re=\frac{Vd}{\nu}$, где коэфициент кинематической вязкости для воды равен $\nu=1\cdot10^{-6}$ при $t=20°C$.

Таблица 23

Коэфициенты λ по Дарси, Куттеру и Маннингу

Диаметр труб мм d	λ по Дарси	λ по Куттеру при $K=0{,}25$	λ по Маннингу при $n=0{,}012$
40	0,0325	0,0962	0,0524
50	0,0300	0,0820	0,0488
75	0,0266	0,0625	0,0425
100	0,0250	0,0523	0,0386
125	0,0240	0,0458	0,0359
150	0,0233	0,0412	0,0338
175	0,0229	0,0378	0,0321
200	0,0224	0,0352	0,0307
225	0,0222	0,0331	0,0295
250	0,0220	0,0314	0,0285
300	0,0216	0,0287	0,0268

При определении коэфициента ζ местных потерь можно пользоваться приближёнными данными, приведёнными в таблице 24.

Таблица 24

Средние данные ζ местных потерь напора [24]

Наименование местного препятствия	Коэфициент сопротивления
Вход в трубу без скругления кромки входного отверстия	$\zeta_{вх}=0{,}50$
То же, но при хорошо скруглённой кромке	$\zeta_{вх}=0{,}10$
Выход из трубы в бак больших размеров	$\zeta_{вых}=1{,}00$
Резкий поворот трубы без переходного закругления при угле поворота около 90°	$\zeta_{пов}=1{,}25—1{,}50$
Колено на трубе с углом в 90° при радиусе колена $R_к \geqslant 2d$, где d—диаметр трубы	$\zeta_к=0{,}50$
Тоже при оптимальном соотношении $R_к \leqslant (3—7)\,d$	$\zeta_к=0{,}30$
Задвижка на круглой трубе при среднем открытии	$\zeta_з=2{,}00$
Открытая задвижка на круглой трубе	$\zeta_з=0{,}10$
Кран (по Бахметеву)	$\zeta_{кр}=5—7$
Вход в заборную водопроводную трубу (предохранительная сетка с запорным клапаном)	$\zeta_{заб}=5—10$

Как изменяются потери напора в клапане и сетке в зависимости от скорости движения воды в трубах разных диаметров, показано на графике рис. 223. Этим графиком можно пользоваться для определения потерь напора в клапане и сетке данного трубопровода.

Характеристика насоса строится в зависимости от оборотов, поэтому и подсчёт потерь напора необходимо произвести для различных оборотов. Для решения уравнения (275) необходимо в первую очередь определить расход Q в зависимости от числа ходов поршня насоса.

Производительность насоса равна:

$$Q=\frac{75N\eta}{H},$$

где N — мощность, развиваемая ветродвигателем при скорости ветра от 3 до 4 м/сек.

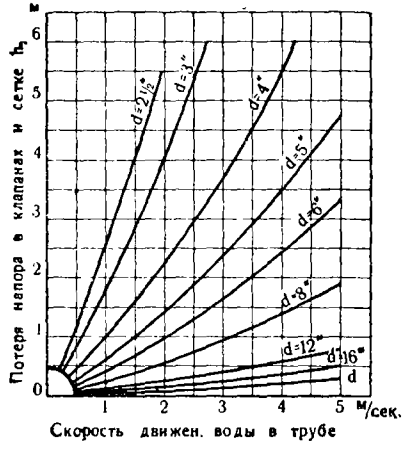


Рис. 223. График для определения потерь в клапанах и сетке.

На рабочей характеристике (рис. 219) эта мощность определяется точкой пересечения луча I или II с вершиной кривой мощности ветродвигателя.

При подсчёте производительности Q задаются статическим напором H.

Так как производительность насоса изменяется прямо пропорционально оборотам его кривошипа, то производительность при других оборотах будет равна

$$Q_1 = Q\,\frac{n_1}{n};\quad Q_2 = Q\,\frac{n_2}{n},$$

где Q и n без индексов относятся к мощности насоса в точке, где его характеристика пересекает вершину кривой мощности ветродвигателя.

С увеличением оборотов потери растут, величину их определяем по уравнению (275).

Вводя эти потери в уравнение (261) мощности, затрачиваемой на работу насоса, при других оборотах n_1, получим:

$$N_1 = \frac{0{,}785 d^2 h \tau_0 n_1 (H + \Sigma h_r)}{75 \cdot \eta \cdot 60}. \qquad (261а)$$

На основании уравнений (261) и (261а) получаем:

$$N_1 = N\frac{n_1 (H + \Sigma h_r)}{nH} = N\,\frac{n_1}{n}\left(1 + \frac{\Sigma h_r}{H}\right). \qquad (277)$$

По этому уравнению надо определять точки для кривой мощности насоса в зависимости от оборотов его кривошипного механизма.

Чем больше статический напор, тем меньше отношение $\frac{\Sigma h_r}{H}$, входящее слагаемым в множитель уравнения (277)

мощности насоса. При малых же оборотах кривошипа средняя скорость поршня также мала, следовательно, мала и скорость движения жидкости в трубах, которая обусловливает потери напора, так что кривая характеристики насоса будет приближаться к прямой. На практике, с целью упрощения расчётов, характеристики поршневых насосов принимаются в виде прямых линий, при этом принимается постоянный напор с учётом потерь при нормальных оборотах кривошипа.

Метод изменения характеристики поршневого насоса в соответствии с характеристикой ветродвигателя. Рассматривая совмещённую характеристику ветронасосного агрегата (рис. 219), видим, что лучи *I*, *II* и *III* характеристики насоса пересекают кривые характеристик мощности ветродвигателя в точках максимальной мощности только при одной скорости, соответствующей определённым оборотам, в то время как при других, более высоких скоростях ветра эти лучи пересекают ветви кривых в точках меньших мощностей. Это указывает на то, что поршневой насос не может полностью загружать ветродвигатель соответственно развиваемой им мощности при каждой скорости ветра. Объясняется это тем, что мощность ветряка изменяется пропорционально кубу скорости ветра, в то время как мощность поршневого насоса изменяется пропорционально первой степени числа оборотов кривошипного механизма.

Проведём через вершины характеристик мощности ветродвигателя кривую *A*, соответствующую, очевидно, наибольшему коэфициенту ξ использования энергии ветра (рис. 218). Кривая показывает, как должна изменяться мощность рабочей машины, в нашем случае поршневого насоса, с изменением оборотов, чтобы агрегат мог работать с максимальным ξ.

Посмотрим, нельзя ли заставить работать поршневой насос так, чтобы потребляемая им мощность изменялась по кривой *A* (рис. 218).

Обозначим в уравнении (261) постоянные величины для данного насоса через *C*, исключив из постоянных ход поршня и обороты; тогда мощность можно выразить проще:

$$N = Ch_x n.$$

Изменяя в этом равенстве h или n соответственно изменению мощности ветродвигателя, т. е. пропорционально

кубу скорости ветра, мы можем получить не прямую линию характеристики мощности насоса, а кривую — кубическую параболу. Эта кривая, будучи совмещена с характеристикой ветродвигателя, пройдёт через вершины кривых мощностей ветродвигателя, как показано на рис. 218 и, следовательно, для данной скорости ветра можем написать:

$$N = Chn \tag{278}$$

и другой скорости ветра:

$$N_x = Ch_x n_x. \tag{278а}$$

Взяв отношение этих уравнений, получим:

$$\frac{N_x}{N} = \frac{h_x n_x}{hn},$$

откуда:

$$h_x = h \frac{N_x}{N} \frac{n}{n_x},$$

где N_x, h_x и n_x — мощность, ход и обороты кривошипа насоса при иных скоростях ветра.

Так как:

$$\frac{N_x}{N} = \frac{V_x^3}{V^3},$$

можем написать:

$$h_x = h \frac{V_x^3}{V^3} \cdot \frac{n}{n_x}. \tag{279}$$

Это уравнение показывает, что если изменять ход поршня насоса прямо пропорционально кубу скоростей ветра и обратно пропорционально числу ходов поршня, то можно получить характеристику мощности насоса, соответствующую работе ветродвигателя с максимальным коэфициентом использования энергии ветра.

Оставляя в уравнениях

$$N = Chn \text{ и } N_x = Ch_x n_x$$

ход поршня постоянным, можем написать:

$$\frac{N_x}{N} = \frac{n_x}{n},$$

откуда:

$$N_x = N \frac{n_x}{n},$$

или:

$$n_x = n\frac{N_x}{N} = n\frac{V_x^3}{V^3}. \qquad (280)$$

Отсюда следует, что характеристику насоса, соответствующую характеристике ветродвигателя, можно получить также изменением числа ходов поршня насоса прямо пропорционально кубу скоростей ветра.

Таким образом, имеется два приёма, с помощью которых можно заставить ветродвигатель работать с поршневым насосом при максимальных значениях коэфициента использования энергии ветра:

1) изменение длины хода поршня насоса должно быть пропорционально кубу скоростей ветра и обратно пропорционально числу ходов поршня насоса [уравнение 279)];

2) изменение числа ходов поршня насоса должно быть прямо пропорционально кубу скоростей ветра [уравнение (280)].

Испытания ветродвигателя с приспособлением, изменяющим ход поршня, были проведены б. ЦВЭИ в 1935 г. Полученная опытом характеристика очень близко подходит к теоретической. Однако это приспособление не было доведено до практического применения.

§ 50. РАБОТА ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАСОСАМИ

Основным преимуществом центробежных насосов перед поршневыми является отсутствие поршня с быстро изнашивающимися манжетами, высокая производительность при малых габаритных размерах насоса и бо́льшая долговечность в эксплоатации.

Однако работа ветродвигателя на центробежный насос имеет некоторые отрицательные стороны: центробежный насос работает с высоким коэфициентом полезного действия лишь при определённых оборотах, ветродвигатель же работает с переменными оборотами, и так как диапазон оборотов центробежного насоса, при которых он подаёт воду с высоким коэфициентом полезного действия, невелик, а обороты ветродвигателя с нагрузкой при изменении скоростей ветра от 3 до 8 м/сек. могут изменяться почти вдвое, то подача насоса при неточном подборе его

к ветродвигателю может осуществляться эффективно лишь в небольшом диапазоне рабочих скоростей ветра. Поэтому, для правильного подбора центробежного насоса к ветродвигателю, необходимо знать характеристики этих машин, построенные в зависимости от числа оборотов.

Метод пересчёта обычных характеристик центробежных насосов $H-Q$, $N-Q$ при $n=$Const на характеристики в зависимости от n при $H=$Const. Обычно характеристики

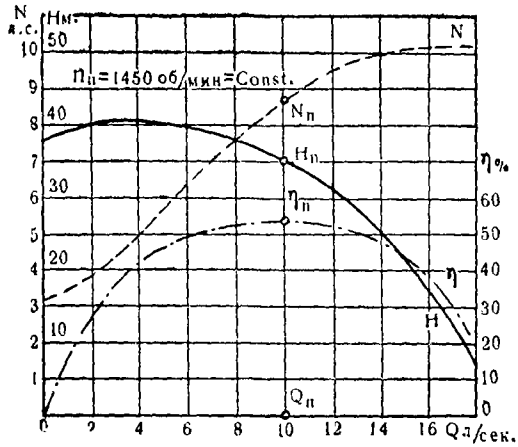


Рис. 224. Характеристика $H-Q$ и $N-Q$ при $n=$Const центробежного насоса.

центробежных насосов строятся в зависимости от подачи (расхода) Q, откладываемой на горизонтальной оси графика; на вертикальной оси откладываются мощность N, напор H и коэфициент полезного действия η (рис. 224). Такой формой характеристики при $n=$Const, для подбора насоса к ветродвигателю нельзя непосредственно воспользоваться. Поэтому, чтобы установить соответствие режима работы центробежного насоса работе ветродвигателя, необходимо данную характеристику перестроить в зависимости от числа оборотов n *.

Пересчёт характеристик $H-Q$ центробежного насоса на характеристики в зависимости от числа оборотов осно-

* Способ пересчёта предложен инж. С. С. Рудневым.

вывается на законе динамического подобия, устанавливающего зависимость Q, H и N от числа оборотов n, а именно:

1) расходы относятся как обороты,
2) напоры относятся как квадраты оборотов и
3) мощности относятся как кубы оборотов, т. е.:

$$\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{n_1}{n_2}=\sqrt{\frac{H_1}{H_2}}, \tag{281}$$

$$\frac{H_1}{H_2}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \tag{282}$$

$$\frac{N_1}{N_2}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3, \tag{283}$$

где Q, H, N и n — соответственно расход, напор, мощность и число оборотов насоса.

Для того чтобы упростить пересчёт характеристик на другой режим, приходится допускать, что напор с изменением оборотов остаётся постоянным, т. е. насос работает на короткий трубопровод. Между тем увеличение напора может достигать 10% от статического даже при коротком трубопроводе.

Изменение напора при работе центробежного насоса показано на рис. 225, где Q_x — расход; ордината a показывает величину статического напора; отрезок H_r даёт приращение напора за счёт потерь в трубопроводе. Кривая H—Q показывает изменение напора в зависимости от расхода Q и называется характеристикой трубопровода.

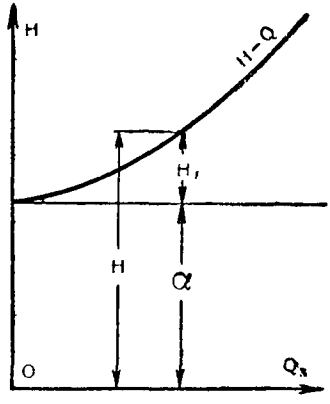


Рис. 225. Характеристика трубопровода.

При пересчётах, кроме того, принимают коэфициент полезного действия насоса η постоянным, что при практических расчётах можно допустить, так как он изменяется незначительно. Рассматривая, например, кривую изменения коэфициента полезного действия (рис. 226), видим, что, в пределах n=900—1 300 η=77—78%, т. е.

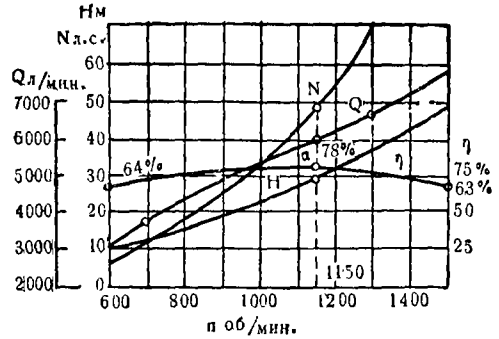


Рис. 226. Характеристика центробежного насоса в зависимости от его числа оборотов.

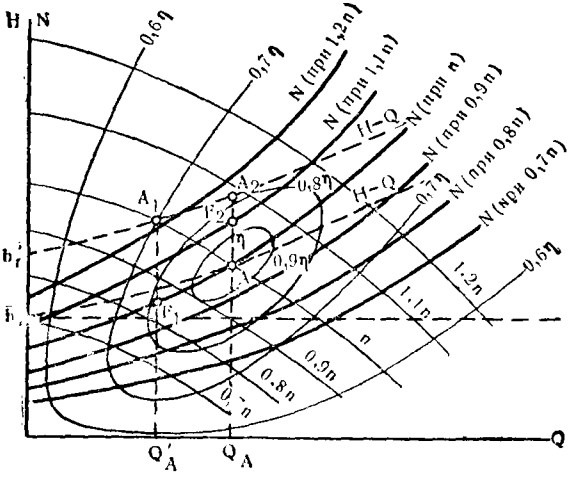


Рис. 227. Универсальная характеристика центробежных насосов.

коэфициент полезного действия почти постоянен и только при 600 и 1 500 об/мин. он падает до 64—63%.

В каких пределах изменяется коэфициент полезного действия центробежного насоса с изменением оборотов и других величин характеристики удобно проследить по универсальной характеристике центробежного насоса (рис. 227). На этой характеристике даются зависимости $H—Q$ и $N—Q$ для $0{,}7n$, $0{,}8n$, $0{,}9n$, $1{,}1n$ и $1{,}2\ n$. Кривые одинаковых к. п. д. насоса имеют форму вытяну-

тых кривых, замкнутых внизу и замыкающихся также при достаточном продолжении вверху.

Универсальная характеристика насоса позволяет установить наивыгоднейшие Q, H, η, а также определить значение этих величин, если какая-либо одна из них является заданной.

Например, при $h_т$=Const (см. горизонтальную пунктирную линию) и работе насоса при n оборотах, рабочей точкой при характеристике трубопровода H—Q будет точка A. При этом насос потребляет мощность $N_e=N_A$ и создаёт напор H_A при расходе Q_A и к. п. д. $\eta=\eta_{max}$. Если условия системы изменятся, например, $h_т$ возрастёт до $h'_т$, то при работе насоса с постоянными оборотами рабочая точка A переместится в A_1, а расход будет $Q'_A<Q_A$, затрачиваемая мощность $N_e=N'_E<N_A$, создаваемый напор H'_A при к. п. д. насоса 0,7 η. Чтобы сохранить у насоса прежний расход, он должен работать с оборотами 1,09 n, бо́льшими, чем n. При этом рабочей точкой будет A_2 и соответственно напор H''_A. Затрачиваемая мощность насоса, соответствующая оборотам 1,09 n, будет почти равна N'_A и к. п. д. насоса около 0,79 η. Универсальная характеристика показывает, что работа насоса при переменных условиях в области хороших к. п. д. возможна при изменении числа оборотов [51].

Таким образом, имея эту характеристику для определённого типа центробежных насосов можно быстро установить основные величины характеристики насоса для различных режимов его работы.

При отсутствии универсальной характеристики насоса, характеристики для других режимов определяют расчётом.

Исходя из соотношений (281)—(284), напишем уравнения пересчёта нормальной характеристики при n_n=Const на характеристику с переменным n при постоянном напоре H_n=Const, удобную для подбора насоса к ветродвигателю, а именно:

откуда

$$\frac{n_x}{n_n}=\sqrt{\frac{H_n}{H}},$$

$$n_x=n_n\sqrt{\frac{H_n}{H}}; \qquad (284)$$

$$\frac{Q_x}{Q}=\frac{n_x}{n_n}=\sqrt{\frac{H_n}{H}},$$

откуда

$$Q_x = Q\sqrt{\frac{H_n}{H}}; \qquad (285)$$

$$\frac{N_x}{N} = \left(\frac{n_x}{n_n}\right)^3 = \sqrt{\left(\frac{H_n}{H}\right)^3},$$

откуда

$$N_x = N\sqrt{\left(\frac{H_n}{H}\right)^3}, \qquad (286)$$

где n_x, Q_x, N_x — переменные величины при H_n=Const.

Решая эти уравнения относительно величин с индексом x, мы можем произвести пересчёт нормальной характеристики H—Q (известную по заводскому каталогу или по данным испытаний) и построить кривые Q_x, N_x, η_x в зависимости от n_x при H_n=Const.

Для примера пересчитаем характеристику центробежного насоса, показанную на рис. 224 при n_n=Const, на характеристику при переменных оборотах.

Для первой точки по уравнениям (284)—(286) находим:

$$n_x = n_n\sqrt{\frac{H_n}{H}} = 1450\sqrt{\frac{35,3}{38,4}} = 1450 \cdot 0,096 = 1390 \text{ об/мин.}$$

$$N_x = N\left(\frac{n_x}{n_n}\right)^3 3,10\left(\frac{1390}{1450}\right)^3 = 2,74 \text{ л. с.}$$

Другие величины расчёта сведены в табл. 25.

Таблица 25

Характеристика центробежного насоса

№ точки	Известные величины из характеристики H—Q N—Q при n_n = 1450=Const (рис. 224)				Подсчитанные величины характеристики при n переменном и H_n =Const		
	Q л/сек.	H м	N л. с	η %	n_x об/мин.	Q_x л/сек.	N_x л. с.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	38,4	3,10	0	1 390	0	2,74
2	2	40,1	3,85	27,8	1 360	1,88	3,19
3	4	40,6	5,05	42,9	1 350	3,73	4,08
4	6	39,6	6,35	49,9	1 370	5,67	5,35
5	8	37,9	7,60	53,2	1 398	7,72	6,82
6	10	35,3	8,70	54,2	1 450	10,00	8,70
7	12	31,4	9,55	52,6	1 536	12,72	11,38
8	14	25,8	9,95	48,4	1 690	16,35	15,88
9	16	18,2	10,10	38,5	2 018	22,26	27,20

По данным таблицы 25 на графике рис. 228 построены кривые центробежного насоса в зависимости от числа оборотов n при H_n=35,3 м =Const, как это было принято в расчёте.

При пересчёте нормальных характеристик на другой режим весьма удобно пользоваться безразмерными характеристиками насосов с различными коэфициентами быстроходности.

Напомним, что быстроходностью, или удельным числом оборотов насоса, называется число оборотов такого нового колеса, которое во всех деталях геометрически по-

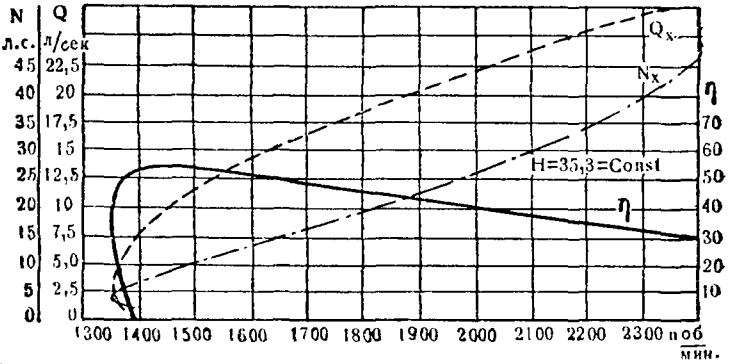


Рис. 228. Пересчитанная характеристика центробежного насоса в зависимости от n при H=Const.

добно рассматриваемому колесу насоса. Размеры нового колеса подобраны так, что при высоте в 1 м и полезной мощности 1 л. с. величина подачи равна 75 л/сек.

Быстроходность выражается уравнением:

$$n_s = 3{,}65\, n \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}, \qquad (287)$$

где: n об/мин. — число оборотов данного центробежного насоса;

Q — м³/сек. его подача (для насосов с двусторонним всасыванием необходимо Q разделить на 2);

H — напор в м, приходящийся на одну ступень; следовательно, если насос имеет несколько ступеней (колёс), то создаваемый им напор необходимо разделить на число ступеней.

Величины H, Q и n, подставляемые в уравнение (287), относятся к наивыгоднейшему режиму работы насоса. Выражения относительных величин мы получим, разделив правые и левые части уравнений (284)—(286), а также равенство $\eta_x=\eta$ соответственно на n_n, Q_n, N_n и η_n, т. е.:

$$\frac{n_x}{n_n}=\sqrt{\frac{H_n}{H}}; \tag{288}$$

$$\frac{Q_x}{Q_n}=\frac{Q}{Q_n}\sqrt{\frac{H_n}{H}}; \tag{289}$$

$$\frac{N_x}{N_n}=\frac{N}{N_n}\left(\frac{H_n}{H}\right)^{3/2}; \tag{290}$$

$$\frac{\eta_x}{\eta_n}=\frac{\eta}{\eta_n}.$$

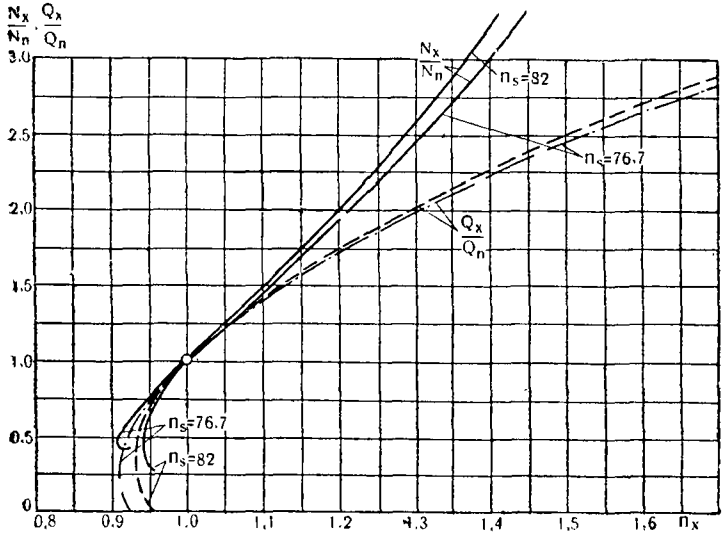


Рис. 229. Безразмерные характеристики $\frac{N_x}{N_n}$ и $\frac{Q_x}{Q_n}$ в зависимости от $\frac{n_x}{n_n}$ для насосов с разными быстроходностями.

Величины, стоящие в правых частях этих формул, определяют по нормальным характеристикам насосов H—Q, а затем строят характеристики в относительных величинах при H_n=Const, в зависимости от $\frac{n_x}{n}$. На рис. 229 даны

кривые безразмерных характеристик мощности и расхода для двух насосов с быстроходностью 82,0 и 76,7, а в таблицах 26 и 27 приведены цифровые значения относительных величин для этих характеристик.

В этих таблицах даны безразмерные значения характеристик H—Q и N—Q при n_n=Const (четыре графы слева) и безразмерные значения характеристик, пересчитанные по уравнениям (288), (289), (290) для переменных оборотов при $H=H_n$=Const (три графы справа под литерами B, C и D); графа A для $\frac{\eta}{\eta_n}$ относится как к правой, так и к левой частям таблицы.

Таблица 26

Безразмерная характеристика насоса с быстроходностью n_s=82,0

Безразмерная характеристика $H-Q$ $N-Q$ при n_n = =Const			Безразмерная характеристика при n переменном и $H=H_n$=Const			
			A	B	C	D
$\frac{Q}{Q_n}$	$\frac{H}{H_n}$	$\frac{N}{N_n}$	$\frac{\eta}{\eta_n}=\frac{\eta_x}{\eta_n}$	$\frac{Q_x}{Q_n}=\frac{Q}{Q_n}\sqrt{\frac{H_n}{H}}$	$\frac{n_x}{n_n}=\sqrt{\frac{H_n}{H}}$	$\frac{N_x}{N_n}=\frac{N}{N_n}\left(\frac{H_n}{H}\right)^{3/2}$
1	2	3	4	5	6	7
0,0	1,087	0,356	0	0	0,951	0,315
0,2	1,136	0,4425	0,513	0,188	0,939	0,366
0,4	1,150	0,580	0,7915	0,373	0,933	0,470
0,6	1,122	0,730	0,921	0,567	0,945	0,615
0,8	1,074	0,874	0,982	0,772	0,965	0,784
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1,2	0,889	1,098	0,970	1,272	1,060	1,380

Аналогичные таблицы должны быть подсчитаны для ряда насосов с разными быстроходностями. Эти таблицы будут полезны в расчётной практике.

Чтобы показать, как пользоваться безразмерными характеристиками, сделаем в качестве примера пересчёт характеристики (рис. 224) на другое число оборотов и соответствующие ему наивыгоднейшие H, Q и N.

С помощью уравнений (284)—(286) находим основные величины нового режима: H'_n, Q'_n, N'_n при n'_n=Const.

Например, для напора H'_n=22 м значения других величин наивыгоднейшего режима насоса, характеристика

Таблица 27

Безразмерные характеристики насоса с быстроходностью $n_s=76{,}7$

Безразмерная характеристика $H-Q$, $N-Q$ при $n_n=\text{Const}$			Безразмерная характеристика при n переменном и $H=H_n=\text{Const}$			
			A	B	C	D
$\frac{Q}{Q_n}$	$\frac{H}{H_n}$	$\frac{N}{N_n}$	$\frac{\eta}{\eta_n}=\frac{\eta_x}{\eta_n}$	$\frac{Q_\tau}{Q_n}=\frac{Q}{Q_n}\sqrt{\frac{H_n}{H}}$	$\frac{n_x}{n_n}=\sqrt{\frac{H_n}{H}}$	$\frac{N_x}{N_n}=\frac{N}{N_n}\left(\frac{H_n}{H}\right)^{3/2}$
1	2	3	4	5	6	7
0	1,180	0,521	0	0	0,920	0,405
0,333	1,221	0,689	0,586	0,303	0,908	0,516
0,555	1,200	0,800	0,834	0,508	0,913	0,608
0,777	1,122	0,905	0,963	0,734	0,943	0,758
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1,111	0,931	1,045	0,992	1,153	1,037	1,165
1,333	0,779	1,120	0,928	1,513	1,133	1,630

которого дана на рис. 224, будут равны:

$$n'_n = 1\,450\sqrt{\frac{22}{35{,}3}} = 1\,450\cdot 0{,}792 = 1\,150 \text{ об/мин.};$$

$$Q'_n = 10\cdot\sqrt{\frac{22}{35{,}3}} = 10\cdot 0792 = 7{,}92 \text{ л/сек.};$$

$$N'_n = 8{,}7\left(\frac{1\,150}{1\,450}\right)^3 = 8{,}7\cdot(0{,}792)^3 = 8{,}7\cdot 0{,}492 = 4{,}27 \text{ л. с.}$$

Умножая полученные значения на соответствующие отношения, приведённые для данного насоса в табл. 26 (см. графы слева), мы получим нормальную характеристику $H—Q$, $N—Q$, при новом числе оборотов $n'_n=\text{Const}$. А умножая эти же значения на соответствующие отношения табл. 26 справа, получим характеристику данного насоса при переменном n и постоянном $H=H'_n=\text{Const}$, необходимую для условий работы ветродвигателя с этим насосом.

Результаты подсчётов приведены в табл. 28.

Сравним полученные характеристики с характеристиками, показанными на рис. 224 и 228. Для этого нанесём точки из табл. 28 левой части на рис. 224, а точки правой части табл. 28 на рис. 228; в результате получим графики, показанные на рис. 230 и 231, которые дают наглядное

Таблица 28

Пересчёт безразмерной характеристики (табл. 26) **на размерную**

№ точек	Характеристика при $n=1\,150=\text{Const}$ (получена пересчётом)			к.п.д насоса	Характеристика насоса при переменном n и постоянном H'_n (получена пересчётом)		
	Q л/сек.	H м	N л. с.	η %	Q л/сек.	$n_т$ об/мин.	N_x л. с.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	23,9	1,52	0	0	1 100	1,35
2	1,584	25,0	1,89	27,8	1,49	1 079	1,56
3	3,17	25,3	2,48	42,9	2,96	1 070	2,01
4	4,75	24,6	3,12	49,9	4,5	1 085	2,63
6	6,35	23,7	3,73	53,2	6,12	1 110	3,35
11	7,92	22,0	4,27	54,2	7,92	1 150	4,27
13	9,52	19,55	4,69	52,6	10,10	1 220	5,60

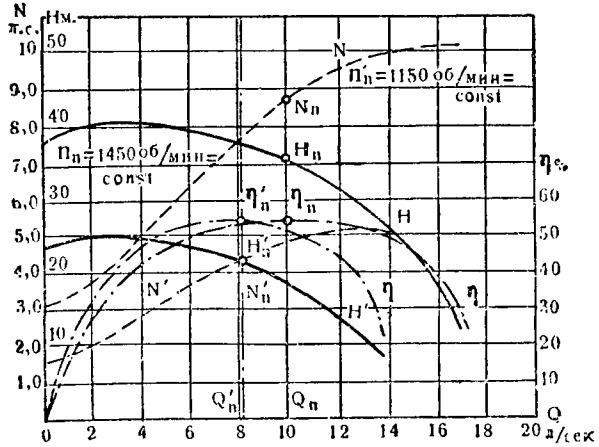


Рис. 230. Характеристики $H-Q$; $N-Q$; $\eta-Q$ для двух режимов $n=1\,450$ об/мин. и $n=1\,150$ об/мин. центробежного насоса.

представление об изменении характеристики центробежного насоса с изменением параметров наивыгоднейшего режима.

Из этих рисунков видно, что форма кривых сохранилась, наивыгоднейшие же значения сместились влево (см. точки $Q'_п$, $N'_п$ и $\eta_п$ на вертикали рис. 230 и 231).

На основании изложенного порядок пересчёта нормальных характеристик насоса при n=Const на характеристики в зависимости от числа оборотов при H_n=Const или H'_n=Const можно кратко формулировать так.

1. По каталогу или ГОСТ 2545-46 находят основные величины наивыгоднейшего режима (см. рис. 239 а и б).

2. По уравнению (287) или графику 239 определяют коэфициент быстроходности n_s и по нему подбирают безразмерную характеристику, построенную по форме таблицы 26 или 27, с приблизительно таким же коэфициентом быстроходности.

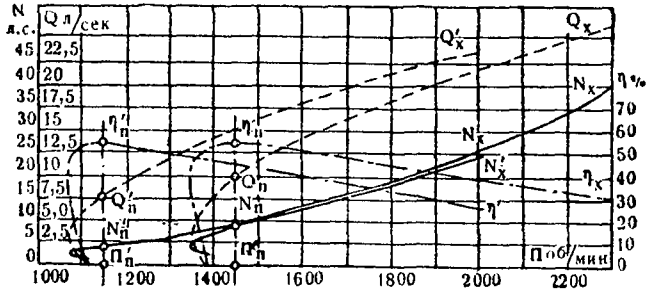


Рис. 231. Пересчитанные характеристики центробежного насоса в зависимости от n при H_n=35,3 м=Const и H = 22 м=Const.

3. Основные величины η_n, Q_n, n_n и N_n умножают на цифровые значения относительных величин, приведённых в таблице под литерами $ABCD$ для насоса с такой же быстроходностью и находят размерные значения N_x, Q_x, H_x и η_x характеристики при переменном n и постоянном напоре H.

4. Если основные величины Q_n, H_n, N_n и n_n из каталога или характеристики H—Q не соответствуют условиям предполагаемой работы насоса, то эти величины с помощью уравнений (284), (285) и (286) пересчитываются на новый режим, исходя из напора H'_n, с которым предполагается работа насоса. При этом получают n'_n, Q'_n и N'_n; $\eta'_n = \eta_n$. Подсчёт переменных n'_x, Q'_x, N'_x и η'_x делают с помощью таблиц безразмерных величин, а именно:

$$\eta_x = \eta_n A; \qquad \text{(а)}$$

$$Q_x = Q_n B; \quad (б)$$
$$n_x = n_n C; \quad (в)$$
$$N_x = N_n D. \quad (г)$$

Цифровые значения $ABCD$ даны в правой части этих таблиц.

Пример пересчёта характеристики центробежного насоса на характеристику в функции оборотов [50].

Допустим, что для ветродвигателя ВИМЭ Д-12 мы подобрали центробежный насос, характеризующийся следующими данными:

$Q_n = 30$ м³/час $= 0{,}00834$ м³/сек.;
$N_n = 4{,}6$ л. с.;
$n = 1\,450$ об/мин.;
$H_n = 24$ м;
$\eta_n = 0{,}60$;
$d = 80$ мм;
$k = 2$ ступени.

Быстроходность насоса, согласно уравнению (287), равна:

$$n_s = 3{,}65 \cdot 1\,450 \frac{\sqrt{0{,}00834}}{\left(\frac{24}{2}\right)^{3/4}} = 3{,}65 \cdot 1\,450 \frac{0{,}0915}{6{,}45} = 75{,}1.$$

Подсчитанная быстроходность $n_s = 75{,}1$ близко подходит к быстроходности насоса, безразмерная характеристика которого приведена в таблице 27. С помощью этой таблицы делаем пересчёт.

Например, вторая строка таблицы 27 дает:

$\eta_x = \eta_n A = 0{,}60 \times 0{,}586 = 0{,}95$;
$Q_x = Q_n B = 30 \times 0{,}303 = 9{,}1$ м³;
$n_x = n_n C = 1\,450 \times 0{,}908 = 1\,410$ об/мин.;
$N_x = N_n D = 4{,}6 \times 0{,}516 = 2{,}38$ л. с. и т. д.

Результаты подсчётов изображаем графически на рис. 232.

Совмещённые характеристики этого насоса и ветродвигателя ВИМЭ Д-12 показаны на рис. 233, где ход определения мощности N производительности Q и к. п. д. показан прямой (пунктир с точкой).

Характеристики ветронасосного агрегата при разных напорах. Поскольку в практике возможна работа ветро-

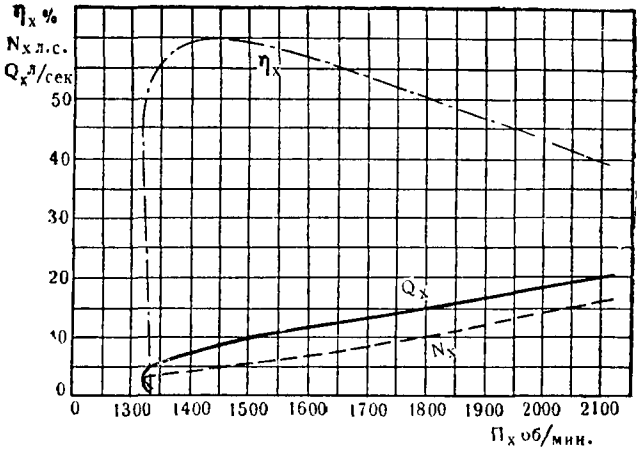


Рис. 232. Пересчитанная характеристика центробежного насоса в зависимости от n при $H=24$ м =Const.

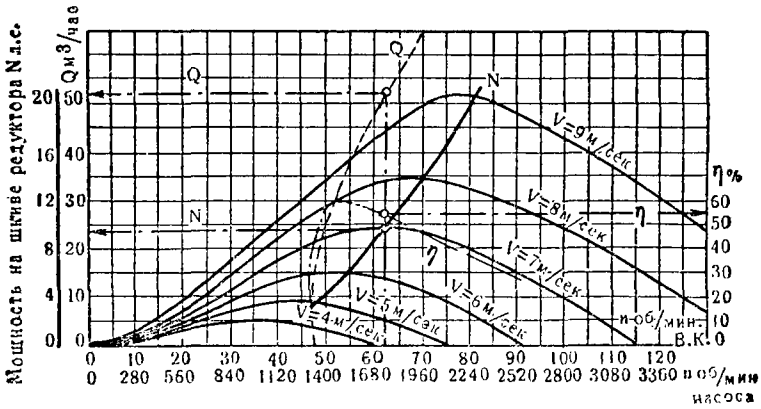


Рис. 233. Совмещённые характеристики ветродвигателя ВИМЭ Д-12 и центробежного насоса.

насосного агрегата при других напорах H, например, при изменении уровня воды источника (половодье) и т. п., бывает полезно знать, как будут работать подобранные насосы при этих новых условиях, т. е. других режимах. Это позволит установить пределы напоров H, в которых ещё будет возможна эффективная работа данного ветронасосного агрегата.

Выявить эти пределы можно с помощью универсальной характеристики данного насоса, либо по характеристике насоса, перестроенной на другие напоры. Этот пересчёт делаем так, как было показано выше, с той лишь разницей, что в этом случае мы принимаем для пересчёта не тот напор H_n, который даётся в каталоге для данного насоса, а задаёмся новым напором H'_n и с помощью уравнений (281)—(283) находим основные величины n'_n, Q'_n и N'_n (см. таблицу 29).

Таблица 29

Основные величины характеристики центробежного насоса при разных напорах H'_n

1	2	3	4	5	6	7
Напор при разных режимах H'_n м	6	12	18	24	30	36
Мощность N'_n л. с. . .	0,575	1,62	2,98	4,6	6,42	8,41
Производительность Q'_n м³/час	4,16	5.9	7,2	8,33	9,30	10,2
Число оборотов n'_n об/мин.	725,6	1 025	1 255	1 450	1 620	1 775

В 5 й графе дан нормальный режим этого насоса.

Далее по таблицам 26, 27 или аналогичным им, находим значения параметров для построения размерных характеристик в зависимости от числа оборотов: $\eta_x = \eta_n A$; $Q_x = Q'_n B$; $n_x = n'_n C$; $N_x = N'_n D$.

Результаты подсчётов изображены на рис. 234, где дана характеристика ветродвигателя ВИМЭ Д-12 с нанесёнными на неё характеристиками насоса при разных напорах.

Кривые мощности насоса при разных напорах сходятся в общий пучок, проходящий через вершины кривых мощности ветродвигателя. Следовательно, коэфициент использования энергии ветра при работе ветронасосного агрегата практически можно принимать постоянным и равным максимальному. Далее замечаем, что изменение напора,

т. е. переход на новый рабочий режим ветронасосного агрегата не требует изменения передаточного числа между ветроколесом и насосом. Изменение напора сказывается лишь на начале подачи воды насосом. Чем меньше напор, тем при меньшей скорости ветра насос (при данном передаточном числе) начинает подавать воду. Характеристика начала подачи воды на этих графиках показана внизу пунктирной кривой [50].

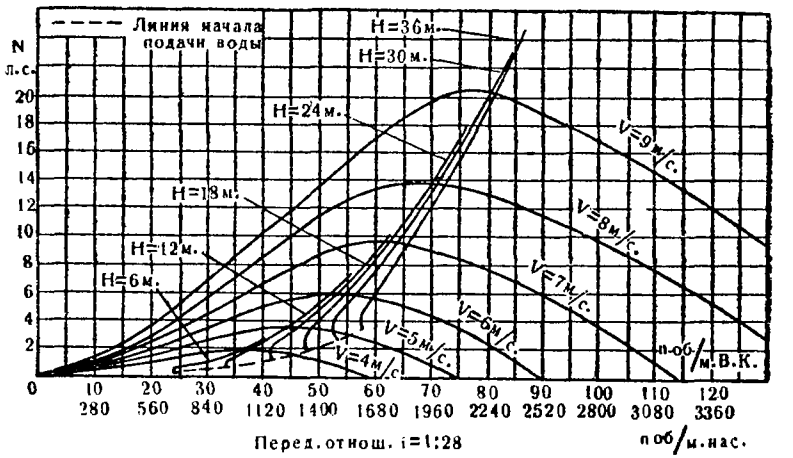


Рис. 234. Совмещённые характеристики ветродвигателя ВИМЭ Д-12 и центробежного насоса при разных напорах.

Для мощных ветронасосных установок, поднимающих воду на малую высоту (до 5 м) удобны пропеллерные насосы, отличающиеся высокой производительностью. Кроме того, невысокие числа оборотов этих насосов позволяют более просто решить задачу при построении редуктора для механического привода. На рис. 235 приведена безразмерная характеристика пропеллерного насоса N_n=183 л. с., H_n=4 м, Q_n=2,6 м³/сек., n_n=500 об/мин., η_n=0,76. Эта характеристика в размерных величинах показана на рис. 236.

Характеристика ветронасосного агрегата при разных передаточных числах. При рассмотрении характеристики рис. 234 мы видим, что, подобрав правильное передаточное число между ветроколесом и насосом, можно получить наивыгоднейшее положение характеристики насоса при

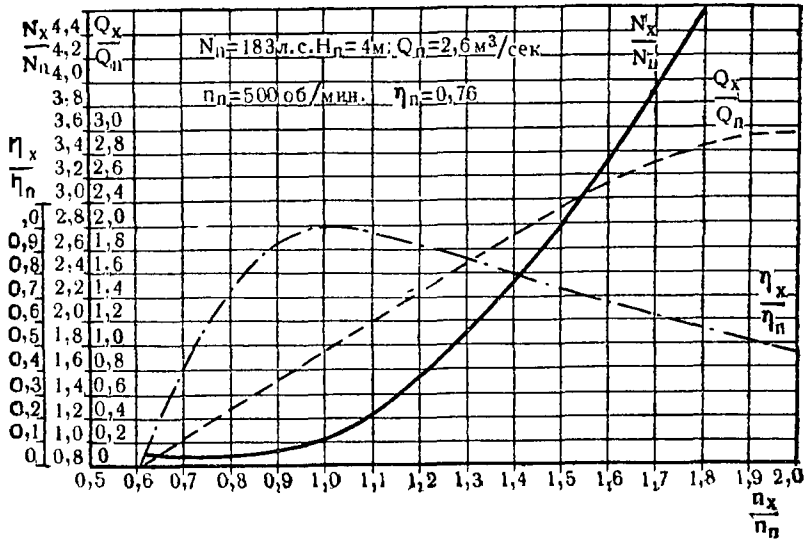


Рис. 235. Безразмерная характеристика пропеллерного насоса $N=183$ л. с., $n=500$ об/мин., $Q=2{,}6$ м³/сек., $H=4$ м; $\eta=0{,}76$.

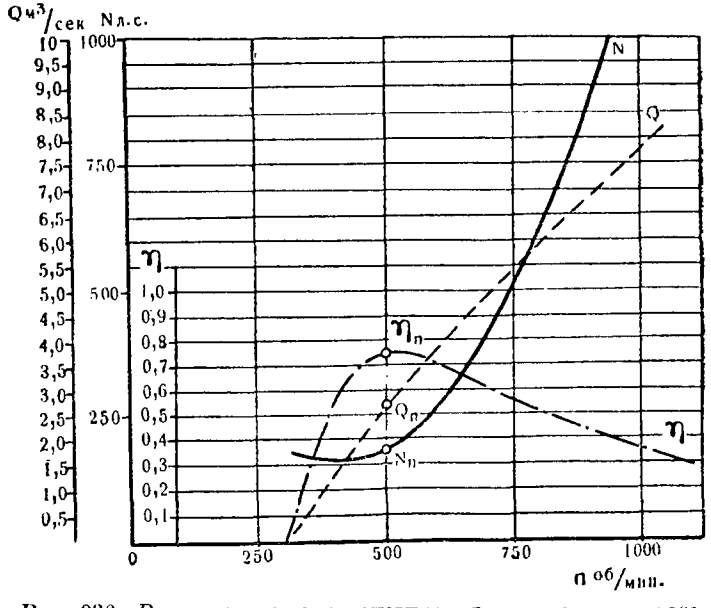


Рис. 236. Размерная характеристика пропеллерного насоса $N=183$ л. с.; $n=500$ об/мин.

разных напорах, не изменяя передачи. Посмотрим, как будет накладываться характеристика насоса на характеристику ветродвигателя при разных передаточных числах. Наложим характеристику рис. 232 на характеристику ветродвигателя ВИМЭ Д-12 при передаточных числах от ветроколеса к насосу, равных 1 : 20; 1 : 25; 1 : 30; 1 : 35 и 1 : 40. Положение этой характеристики при указанных передаточных числах показано на рис. 237. Из неё видно, что при малом передаточном числе подача воды начинается при более высоких скоростях ветра (см. характе-

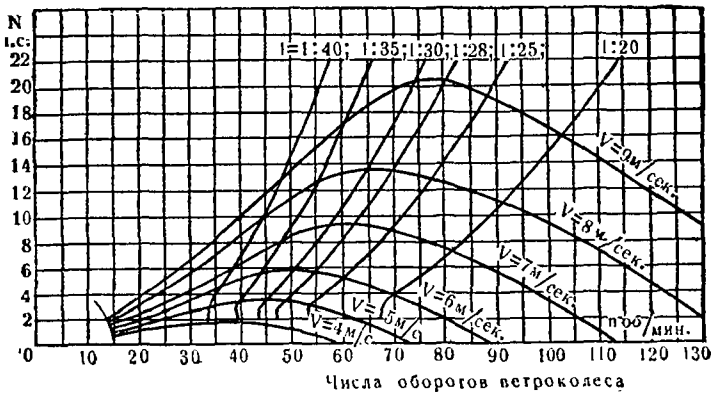


Рис. 237. Совмещённые характеристики ветродвигателя ВИМЭ Д-12 и центробежного насоса при разных передаточных отношениях.

ристику i=1 : 20). Следовательно, наиболее часто повторяющиеся скорости ветра от 4 до 5 м/сек. в этом случае не могут быть использованы. Если же мы заставим работать насос на большем передаточном отношении (см. характеристику при i=1 : 40), то его мощность с возрастанием числа оборотов соответственно скорости ветра изменяется быстрее, чем мощность ветродвигателя; характеристика мощности насоса выходит за пределы кривых мощности ветродвигателя. В этом случае работа ветроустановки будет неустойчива, и агрегат будет работать с низким ξ. Характеристики при передаточных числах 1 : 30 и 1 : 28 занимают наивыгоднейшее положение. При этом замечаем, что пределы наивыгоднейшего передаточного числа незначительны, что необходимо учитывать при его определении.

Метод подбора центробежных насосов к ветродвигателям. Выше было показано, что коэфициент полезного действия центробежного насоса с переводом его на другой режим работы изменяется весьма незначительно. Это позволяет использовать центробежные насосы, нормальная мощность которых по каталогу в несколько раз превышает мощность ветродвигателя.

Подбирая нужное передаточное число, мы можем дать насосу любое число оборотов, в то время как данные каталога относятся к числам оборотов электромоторов, т. е. 2 900; 2 000; 1 450; 960 и т. д. об/мин.

При подборе центробежного насоса к ветродвигателю, в первую очередь приходится решать вопрос о режиме работы насоса. Этот режим обусловливается тем напором, который насосу фактически придётся развивать. Зная этот напор, с помощью уравнений (281), (282) и (283) легко определить основные величины Q'_n, N'_n и n'_n нового режима насосов разных размеров. Далее приходится решать второй вопрос: какова должна быть соответственно действительному напору мощность насоса, с которым будет работать ветродвигатель? Иначе говоря: к какой скорости ветра нужно относить мощность ветродвигателя соответственно данному напору H'_n, чтобы получить наивыгоднейший режим работы всего ветронасосного агрегата?

Так как коэфициент полезного действия при отклонении от нормального режима его оборотов n в сторону уменьшения быстро падает до нуля (рис. 232), то необходимо подбирать к ветродвигателю насос так, чтобы его наивыгоднейшие минимальные обороты соответствовали скоростям ветра, при которых получается максимум годовой энергии, протекающей через ветроколесо.

Из уравнения (252), в котором все величины, кроме выражения $V^3 t_p$, являются постоянными, достаточно подсчитать $V^3 t_p$ для каждой рабочей скорости ветра и повторяемости её t_p из таблицы М. М. Поморцева, чтобы выявить, при какой скорости ветра получается максимум годовой выработки. Этот подсчёт сделан для среднегодовых скоростей ветра V_0 от 3 до 6 м/сек. Результат подсчёта приведён на графике рис. 238. Оказывается, что для каждой среднегодовой скорости ветра V_0 имеется такая скорость V_y (см. скорость на горизонтальной шкале против точек

пересечения пунктирной кривой с кривыми V^3t_p), при которой получается максимальная годовая производительность ветроустановки. Эта наивыгоднейшая скорость

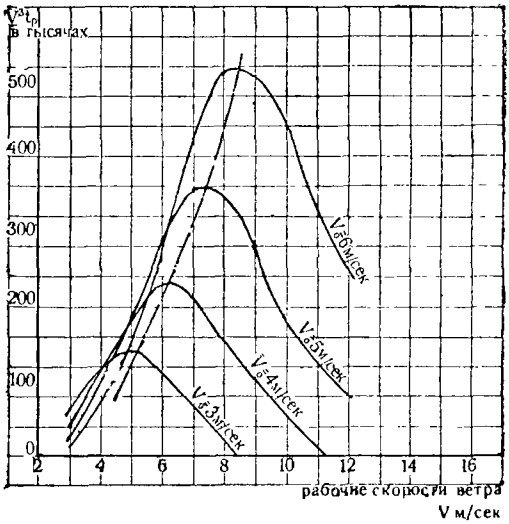


Рис. 238. График для определения оптимальной скорости ветра.

ветра приблизительно в 1,5—1,67 раза больше V_0, а именно:

$V_0 = 3$	4	5	6
$V_y = 6$	6,5	7,5	8,5
$\frac{V_y}{V_0} = 1{,}67$	1,62	1,5	1,42

Среднее

$$\frac{V_y}{V_0} = 1{,}55,$$

откуда:

$$V_y = 1{,}55V_0. \qquad (291)$$

Подобрав режим работы насоса, соответствующий этой скорости ветра, мы получим наивыгоднейшее условие работы ветронасосного агрегата.

Например, при среднегодовой скорости ветра V_0=3м/сек. максимальная выработка получается при рабочих ско-

ростях ветра $V_y \geqslant 5$ м/сек. Следовательно, нормальная мощность центробежного насоса не должна значительно расходиться с мощностью ветродвигателя, которую он развивает при скорости ветра $V_y = 5$ м/сек., т. е.:

$$N_n = N_в = 0{,}000654 D^2 V_y^3 \xi \eta.$$

Для *ТВ*-8 при $\xi = 0{,}35$, $\eta = 0{,}65$ имеем:

$$N_n = N_в = 0{,}000654 \cdot 8^2 \cdot 5^3 \cdot 0{,}35 \cdot 0{,}65 = 1{,}19 \text{ л. с.}$$

В районе же со среднегодовой скоростью ветра $V_0 = 5$ м/сек. нормальная мощность насоса, работающего с *ТВ*-8, должна быть определена при скорости ветра

$$V_y = 1{,}5 \cdot 5 = 7{,}5 \text{ м/сек.}$$

$$N_n = N_в \cong 0{,}000654 \cdot 8^2 \cdot 7{,}5^3 \cdot 0{,}35 \cdot 0{,}65 = 3{,}94 \text{ л. с.}$$

При выборе центробежного насоса необходимо пользоваться ГОСТ 2545-46, где приведены характеристики различных типов центробежных насосов. Очень удобно пользоваться графиками, приложенными к данному стандарту (рис. 239 а и б), где очерчены границы производительности Q и напора H при $n = \text{Const}$. Область Q и H каждого насоса очерчена, и внутри этой области поставлена марка насоса и его нормальные обороты в минуту.

Марка (обозначение) насоса состоит из:

а) буквы — тип насоса;

б) цифры перед буквой — диаметр входного патрубка в мм, уменьшённый в 25 раз и округлённый;

в) цифры после тире — коэфициент быстроходности, уменьшённый в 10 раз и округлённый;

г) цифры после знака умножения в многоступенчатых насосах — число ступеней.

Типы насосов обозначены буквами:

«К» — одноступенчатые с рабочим колесом одностороннего входа, консольные;

«Д» — одноступенчатые, с рабочим колесом двустороннего входа;

«М» — многоступенчатые, с горизонтальным разъёмом корпуса и с рабочими колёсами одностороннего входа;

«МД» — многоступенчатые с горизонтальным разъёмом корпуса, с первым рабочим колесом двустороннего входа и с остальными рабочими колёсами одностороннего входа;

«МС» —многоступенчатые секционные, с рабочими колёсами одностороннего входа;

«Пр» — одноступенчатые пропеллерные насосы.

Полный напор, с которым фактически работает центробежный насос на месте установки, необходимо определять по уравнению:

$$H = M + V + \frac{v_н^2 - v_в^2}{2g}, \qquad (292)$$

где: M и V — показания манометра и вакуумметра, приведённые к оси насоса в метрах столба жидкости;

$v_н$ и $v_в$ — скорости в напорном и во всасывающем патрубках насоса в местах присоединения манометра и вакуумметра в м/сек.

Пример. Пользуясь графиком рис. 239а, подобрать насос для работы с напором до 10 м и производительностью до 20 м³/час.

Обращаясь к графику рис. 239а, находим внизу в левом углу контур поля рекомендуемых пределов напора H и производительности Q насоса, марка которого —2К-13-2900 дана в контуре поля. Это — консольный одноступенчатый насос с диаметром всасывающего патрубка 50 мм, коэфициентом быстроходности n_s=130, нормальное число оборотов $n_н$=2 900 об/мин. Он может работать с хорошим к. п. д. в пределах напоров от 6 до 15 м и производительностью от 3 до 6,5 л/сек. Наивыгоднейший режим насоса отмечен толстой вертикальной линией. При этом режиме H= 11 м и Q=5,5 л/сек. По таблице ГОСТ 2545-46 к. п. д. этого насоса равен η=0,62. При этом мощность, потребная на работу насоса, должна быть равна:

$$N_н = \frac{5{,}5 \cdot 11}{75 \cdot 0{,}62} = 1{,}3 \text{ л. с.}$$

Для производительности — 4,5 л/сек. при напоре H=70 м требуется насос с другой характеристикой.

По графику рисунка 239а этим условиям соответствует насос под маркой $2^1/_2$МС 8×4—2900. Это 4-ступенчатый насос с диаметром всасывающего патрубка 62,5 мм; n_s=83, $n_н$=2 900 об/мин. По таблице ГОСТ 2545-46 η=0,55. Мощность, потребная на работу этого насоса, равна:

$$N_н = \frac{4{,}5 \cdot 70}{75 \cdot 0{,}55} = 7{,}65 \text{ л. с.}$$

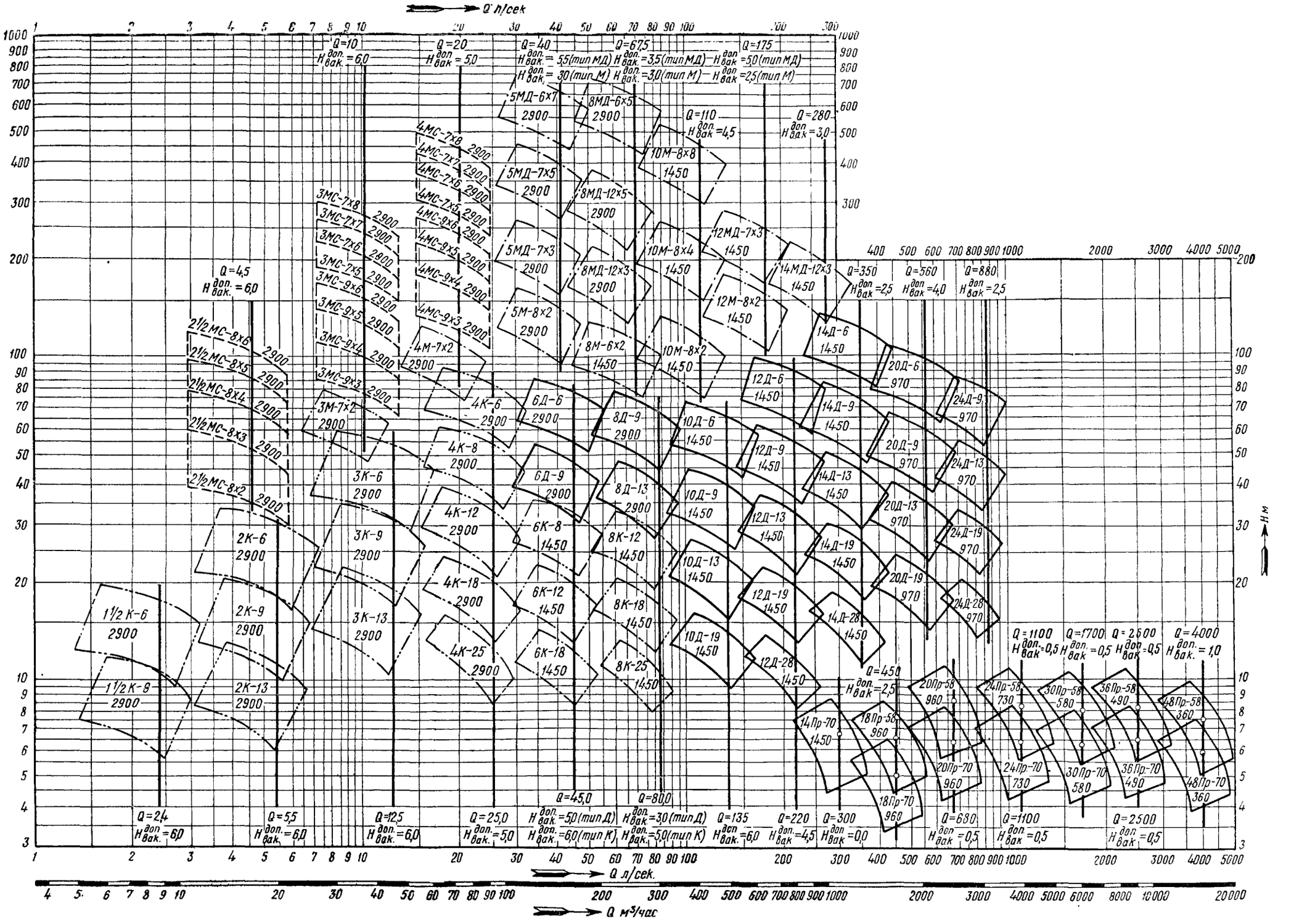


Рис. 239а. Графики для определения характеристик центробежных насосов типа «К», «Д», «М», «МД» и «Пр».

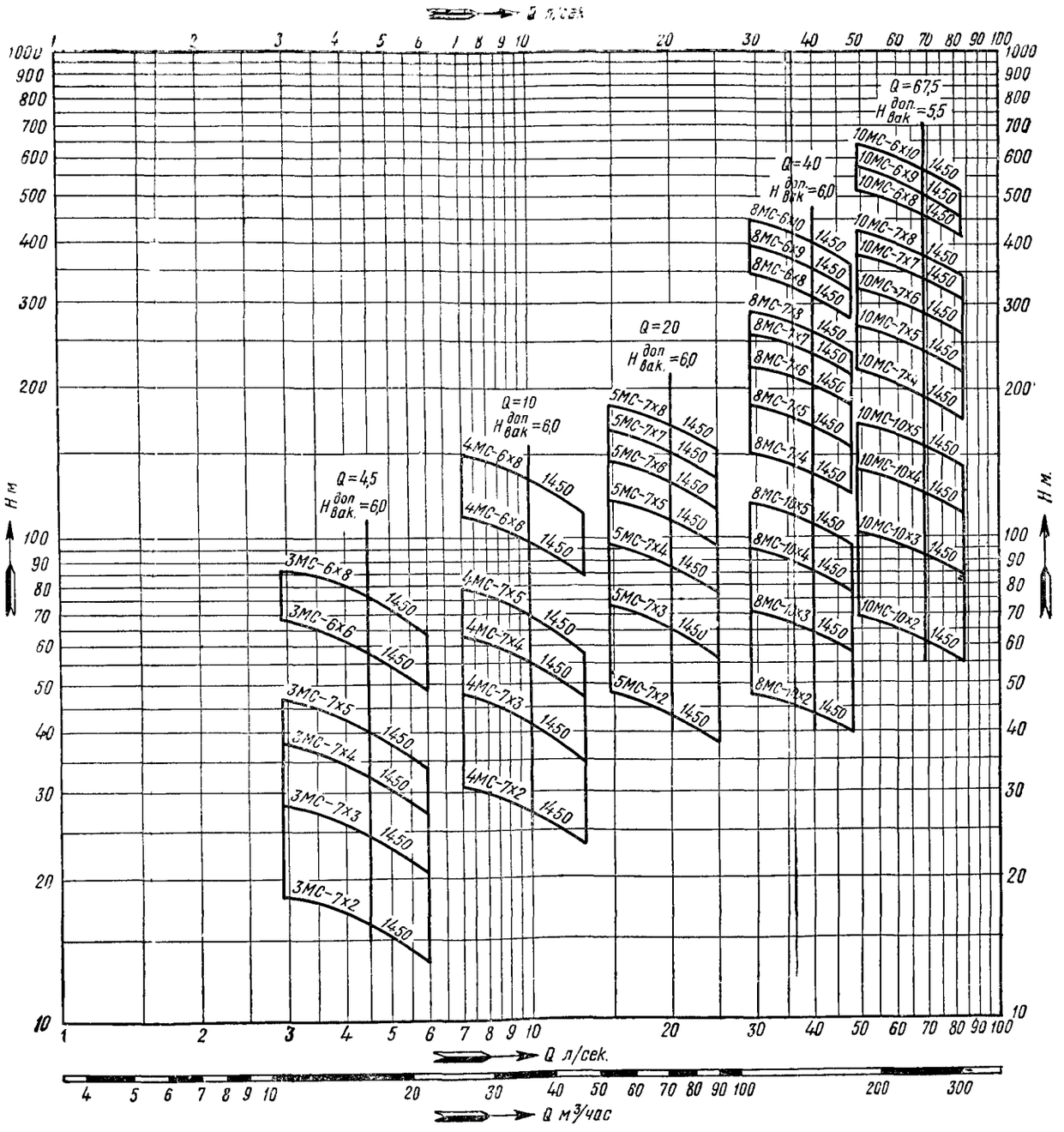


Рис. 239б. График для определения характеристик центробежных насосов типа «МС».

О заливке центробежного насоса, работающего с ветродвигателем. Одной из главнейших операций при пуске центробежного насоса в работу является заливка его водою и удаление из камеры насоса воздуха, в противном случае подача воды не начнётся.

Центробежный насос с электромотором или нефтедвигателем работает при постоянном числе оборотов, поэтому насос заливают лишь при его пуске. При этих условиях даже ручная заливка не представляет большого труда. Иначе работает насос с ветродвигателем. В первом случае постоянные обороты удерживаются в течение всего периода действия насоса, во втором — насос работает с переменными оборотами, убывающими в некоторые моменты до нуля, соответственно изменению скорости ветра. Подача же воды может начинаться лишь при определённых минимальных оборотах.

Так как момент трогания насоса весьма мал, то ветродвигатель будет вращать насос без подачи при всех ветрах ниже 4—5 м/сек. И если скорость ветра не повысится до 4—5 м/сек. в течение, скажем, 3—4 часов, то вода из насоса может уйти. Наблюдающий же за ветроустановкой, видя вращение ветроколеса, может не догадаться, что вода не подаётся из-за отсутствия её в насосе. Он может предполагать, что вода не подаётся насосом вследствие недостаточного числа оборотов. Поэтому ручной способ не может вполне обеспечить заливку центробежного насоса, работающего с ветродвигателем. В этом случае необходимо: либо монтировать насос ниже уровня источника воды так, чтобы он всегда был залит (см. схему рис. 240 а), либо оборудовать установку автоматической заливкой хотя бы так, как показано на рис. 240 б.

В последнем случае во время работы насоса вода из напорной трубы *А* по отводу *Б* частично поступает в бак *В* с поплавковым запором *Г*. Как только бак наполнится, поплавок закроет отвод. При утечке воды из насоса и всасывающей трубы вода из бака по трубке *Д* потечёт во всасывающую трубу и заполнит её и насос. На трубке *Д* поставлен обратный клапан *К*, который не допускает воду в бак при работе насоса. Вентиль *Ж* всё время открыт и закрывается лишь на случай длительной остановки насоса. Объём бака зависит от ёмкости всасывающей трубы и кожуха насоса, а также от величины потерь воды через приёмный клапан. Нужно полагать, что бак

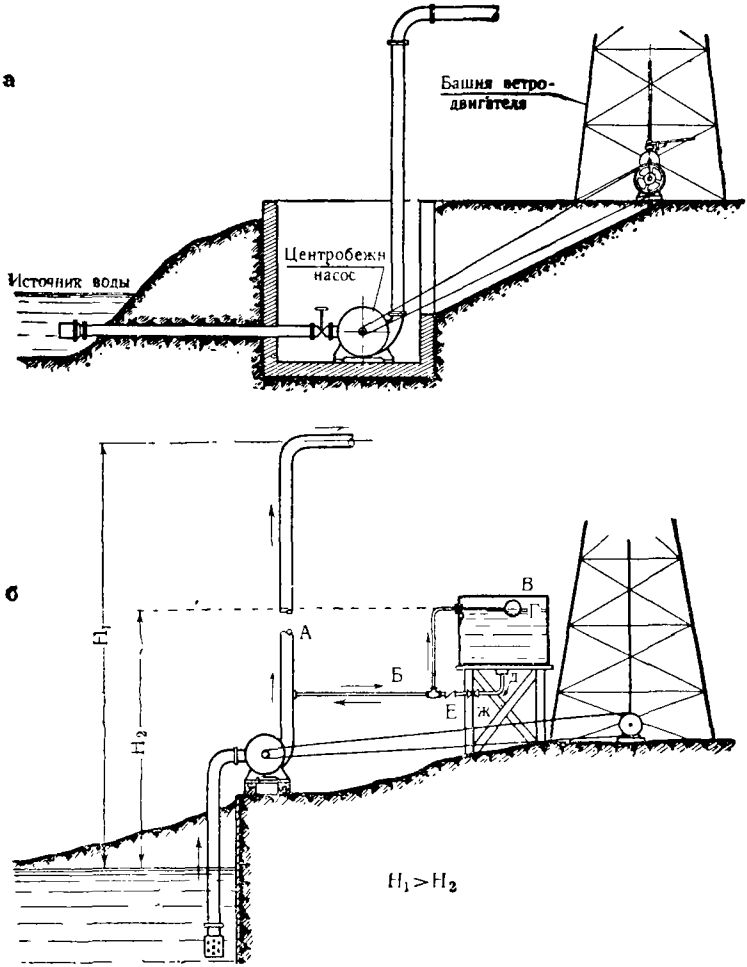


Рис. 240. а) Схема расположения насоса ниже уровня источника воды. б) Схема автоматической заливки центробежного насоса.

ёмкостью в 0,5 м³ обеспечит заливку, если только насос не простоит более суток.

Кроме того, насос будет под постоянной заливкой и в том случае, если к ветродвигателю присоединить вспомогательный поршневой насос по схеме, показанной на рис. 241. В этом случае, как только тронется ветродвигатель,

поршневой насос начнёт подавать воду и заполнит насос. Эта же схема работы ветронасосного агрегата выгодна и с другой стороны. Центробежный насос начинает подавать воду при скоростях ветра от 4 до 5 м/сек., а при меньших скоростях ветродвигатель вращает насос без подачи воды. При работе же ветродвигателя с дополнительным поршневым насосом подача воды будет происходить, как только он начнёт вращаться, следовательно, поток воды будет беспрерывным даже при скорости ветра 3 м/сек. Мощность поршневого насоса не должна быть выше той мощности, при которой центробежный насос начинает подавать воду.

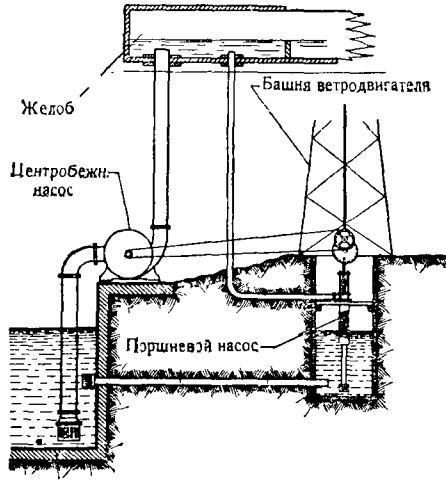


Рис. 241. Схема параллельной работы центробежного и поршневого насосов.

Сделав приспособление для автоматического включения в работу центробежного насоса при определённых числах оборотов ветроколеса, можно избежать напрасной затраты энергии на вращение центробежного насоса при малых скоростях ветра.

§ 51. РАБОТА ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ЖЕРНОВЫМИ ПОСТАВАМИ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ МАШИНАМИ

Применение ветродвигателей для работы с сельскохозяйственными машинами имеет большое значение для совхозов и колхозов. Помол, подготовка кормов, обработка зерна, обработка древесины и т. п. могут выполняться в любое время суток, когда есть ветер, что определяет гибкий график нагрузки.

Характеристика жёрнова. Крутящий момент, создаваемый двигателем, должен преодолеть момент сил трения жёрнова, который производит растирание зерна в муку.

Силы трения между рабочими поверхностями жерновов создают момент $M_{ж}$, который представляет сумму элементарных моментов dM, вызываемых кольцевыми площадками dF, расположенными на разных расстояниях r от оси вращения жёрнова (рис. 242).

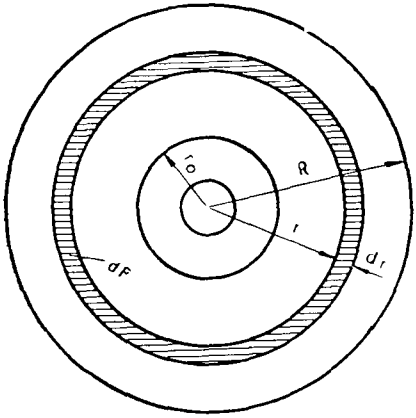


Рис. 242. Элементарная площадка рабочей поверхности жернова.

Элементарная кольцевая площадка равна:

$$dF = 2\pi r dr.$$

Момент сил трения по этой кольцевой площадке можно выразить так:

$$dM = p dF r = p 2\pi r dr \cdot r,$$

откуда

$$dM = p 2\pi r^2 dr,$$

где: p — сила сопротивления единицы рабочей поверхности жёрнова. При получении муки для хлебопечения и полной мощности жёрнова:

$$p \cong 500 \text{ кг/м}^2.$$

Взяв сумму моментов кольцевых площадок по рабочей поверхности жёрнова, получим полный момент сопротивления данной рабочей машины, а именно:

$$M = \int_{r_0}^{R} p 2\pi r^2 dr = p 2\pi \int_{r_0}^{R} r^2 dr = p 2\pi \left(\frac{R^3}{3} - \frac{r_0^3}{3} \right) =$$

$$= \frac{2}{3} p\pi (R^3 - r_0^3). \qquad (293)$$

Здесь: R — радиус жернова по внешней окружности; r_0 — радиус двора жёрнова, где ещё нет размола, а происходит только подвод зерна к мелющему поясу.

В этом уравнении неизвестна сила p, которая зависит от остроты жёрнова, твёрдости обрабатываемого материала и количества пропускаемого зерна.

Зная рабочий момент жёрнова, мы можем определить необходимую мощность для его вращения:

$$N = \frac{M\omega}{75 \cdot \eta},$$

где: η — механический к. п. д. передачи;
ω — угловая скорость вращения жёрнова.

Подставляя в уравнение (293) значения момента и угловой скорости $\omega = \frac{\pi n}{30}$, где n — число оборотов в минуту, получим:

$$N = \frac{2p\pi (R^3 - r_0^3)}{3 \cdot 75 \cdot 30\eta} = 0{,}00294\, p\, \frac{n}{\eta} (R^3 - r_0^3). \qquad (294)$$

Для определённых размеров камня и рода зерна все величины правой части уравнения (294) постоянны, кроме оборотов n. Обозначив постоянные величины через A, получим:

$$N = An.$$

Это уравнение показывает, что теоретическая мощность жёрнова и подобных ему сельскохозяйственных машин изменяется прямо пропорционально оборотам жёрнова. Следовательно, характеристика теоретической мощности графически должна представляться в виде прямой линии, проходящей через начало координат под некоторым углом к оси абсцисс.

Практическая же характеристика сильно отличается от прямой. Вместе с изменением подачи зерна меняется сила сопротивления рабочей поверхности жёрнова. Кроме того, эта сила может изменяться за счёт изменения давления между рабочими поверхностями жерновов. В простейших поставах это давление создаётся собственным весом жёрнова; у мельничных поставов типа «фермер» — специальной пружиной. Таким образом, изменяя подачу зерна и степень его дробления, можно изменять характеристику в желаемом направлении. Это позволяет заставить работать сельскохозяйственную машину по характеристике, оптимальной для её работы с ветродвигателем.

Особенности работы ветровых агрегатов требуют построения характеристик рабочих машин в зависимости от оборотов. Одни из этих характеристик можно построить теоретически (поршневые и центробежные насосы,

генераторы), другие — лишь на основании экспериментальных данных (жернова, соломорезки, дробилки, зерноочистительные машины и т. п.). Эти характеристики помогают определить наивыгоднейший режим ветросилового агрегата и сделать расчёт передачи в соответствии с этим режимом.

Например, к существующим жерновам разных размеров в каталогах даются только их максимальные параметры. Следовательно, каждый жёрнов должен иметь свой двигатель; это было бы правильно, и агрегат в этом случае работал бы наиболее эффективно. Однако в практике колхозного мукомолья приходится делать ряд отступлений от подобного подбора агрегата.

Если нормальная мощность ветродвигателя меньше номинальной мощности жёрнова, то требуется отыскать либо скорость ветра, при которой ветродвигатель может развивать требуемую мощность, либо по характеристике жёрнова найти те обороты, при которых мощность жёрнова равна мощности ветродвигателя.

Пример. Жёрнов $^6/_4$ аршина — 1 067 мм в диаметре требует при полной нагрузке мощность N=16,8 л. с.; обороты жёрнова при этом равны 176 об/мин. При какой скорости ветра, ветродвигатель Д-12, дающий при V=8 м/сек. 28 оборотов в минуту и мощность 12 л. с., может развить мощность 16,8 л. с.? Эту скорость находим из соотношения:

$$\frac{N_1}{N_2}=\frac{V_1^3}{V_2^3},\ \text{откуда:}\ V_1=V_2\sqrt[3]{\frac{N_1}{N_2}},$$

$$V_1=8\cdot\sqrt[3]{\frac{16{,}8}{12}}=8\sqrt[3]{1{,}4}=8\cdot 1{,}12=9\ \text{м/сек.}$$

Число оборотов ветродвигателя при скорости ветра 9 м/сек., можно найти из соотношения:

$$\frac{n_1}{n_2}=\frac{V_1}{V_2},$$

откуда:

$$n_1=28\,\frac{9}{8}=32\ \text{об/мин.}$$

Следовательно, передаточное отношение оборотов жёрнова к оборотам ветроколеса должно быть равно:

$$i=\frac{n_{эс}}{n_в}=\frac{176}{32}=5{,}5.$$

Если же задачу эту решать с помощью характеристики жёрнова $N=f(n)$ (рис. 243), то легко видеть, что мощности 12 л. с. соответствует 150 оборотов жёрнова в минуту. Разделив 150 оборотов на число оборотов ветроколеса, которые он развивает при мощности 12 л. с., получим общее передаточное отношение:

$$i=\frac{150}{28}=5{,}4.$$

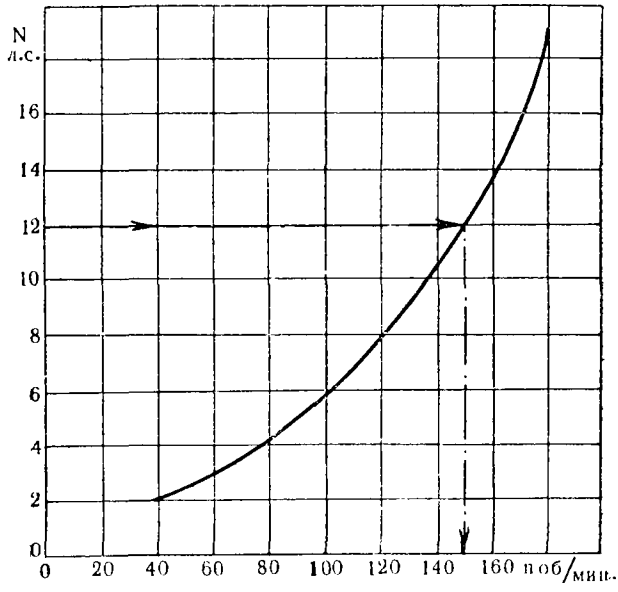


Рис. 243. Характеристика жёрнова в зависимости от оборотов.

На рис. 244 дана разработанная автором номограмма, по которой легко найти общие передаточные отношения оборотов разных жерновов к оборотам ветродвигателей различных мощностей.

Верхняя часть номограммы содержит приблизительные характеристики жерновов (мощность в зависимости от оборотов), построенные на основании записей производительности по оборотам, которые затем были пересчитаны на характеристику мощности по оборотам. Нижняя

часть диаграммы имеет лучи для ветродвигателей, мощность и обороты которых известны, а именно: ВИМЭ Д-8— N=5,3 л. с. при n=40 об/мин., Д-10—N=8 л. с. при n=32 об/мин., Д-12— N=12 л. с. при n=28 об/мин. и

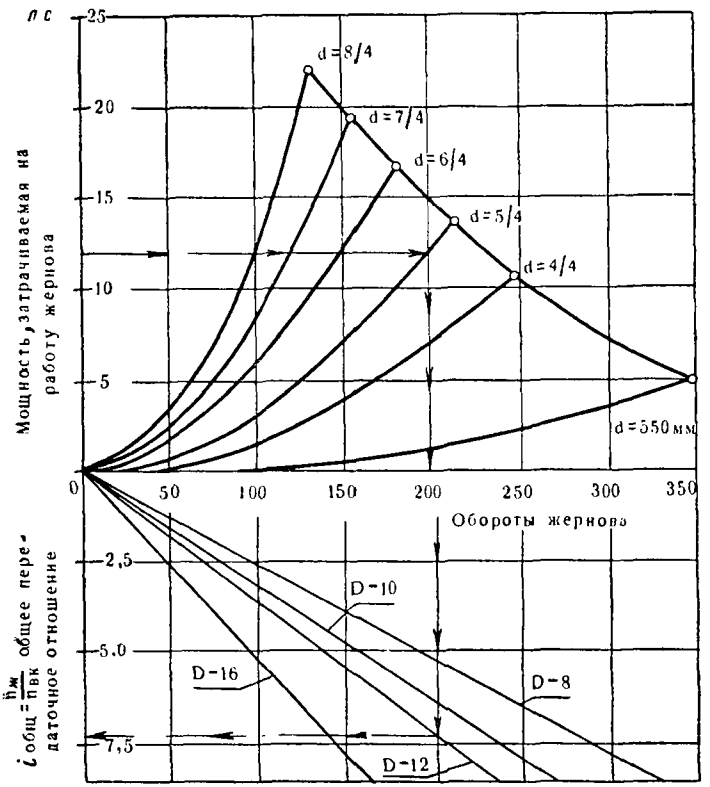


Рис. 244. Номограмма Е. М. Фатеева для подбора жерновов к ветродвигателям.

Д-16—N=20 л. с. при n=20 об/мин. Для ветродвигателей с другими характеристиками можно пользоваться только верхней частью номограммы.

Пример. Ветродвигатель ВИМЭ Д-8 с жёрновом D=550 мм обеспечивает полную мощность жёрнова при его максимальных оборотах 350 об/мин. Следовательно, в

данном случае общее передаточное отношение будет равно:

$$i = \frac{n_{ж}}{n_{в}} = \frac{350}{40} = 8{,}75.$$

Если же к этому ветродвигателю приключить жёрнов $^{6}/_{4}$, то необходимо передачу сделать так, чтобы он мог делать только 100 оборотов при полной мощности ветродвигателя, что получаем, проводя линию от шкалы мощности в 5,3 л. с. до пересечения с кривой характеристики жёрнова $^{6}/_{4}$, затем вниз до пересечения с лучом *D*-8:

$$i = 2{,}5.$$

Таким образом, ветродвигатель может давать помол с любым жёрновом, нужно только правильно рассчитать передачу. Если же мощность, необходимая для работы жёрнова, будет меньше мощности, развиваемой ветродвигателем, то последний будет недогружен, следовательно, на высоких скоростях ветра ветродвигатель будет работать с низким коэфициентом использования энергии ветра.

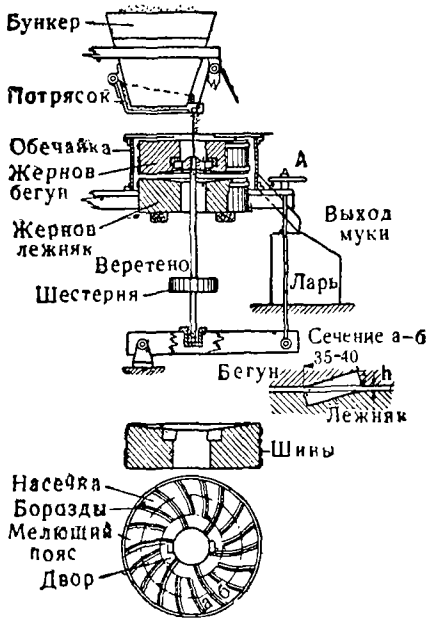


Рис. 245. Жерновой постав, регулируемый вручную.

Способ регулирования жёрнова. Регулирование работы жёрнова заключается в изменении высоты щели *h* между рабочими поверхностями жерновов бегуна и лежняка (рис. 245). У обычных ветряных мельниц это делают вручную штурвалом *A*, что вполне допустимо для старых систем ветряных мельниц, так как они мало чувствительны к резким колебаниям скорости ветра и мельник может успевать налаживать технологический процесс по скорости ветра. Однако у ветродвигателей быстроходных,

имеющих лёгкие крылья, чувствительные к слабым порывам ветра, эту операцию проделывать очень трудно: мельник почти всё время будет вынужден стоять у постава и регулировать жёрнов. Эти трудности можно устранить с автоматическим регулированием, которое применяют у более совершенных ветряных мельниц. Разбивка рабочей поверхности жерновов на пояса и наковка борозд рабочей поверхности показана на рис. 245, внизу.

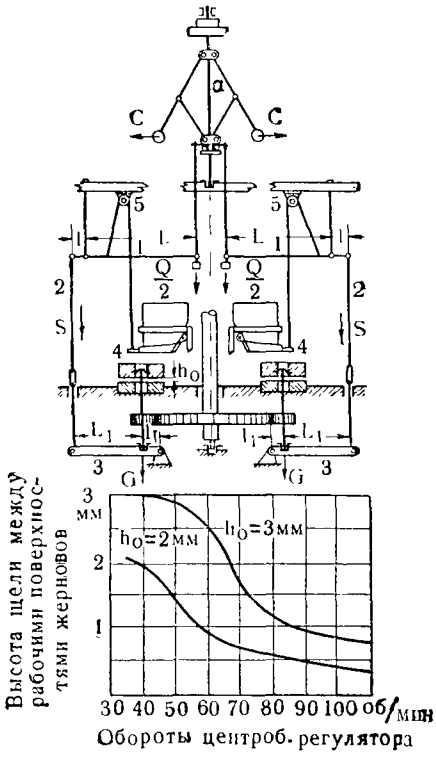


Рис. 246. Схема автоматического регулирования жерновов.

На рис. 246 приведена схема автоматического регулирования двухпоставной ветряной мельницы, испытанной автором. Действие центробежного регулятора, установленного на балке перед поставами, через коромысла *1—1* и тяги *2—2* передаются рычагам *3—3*, на которые опираются подпятниковые подшипники веретён жерновов. При увеличении оборотов центробежные грузы *C* расходятся и поднимают муфту вверх, а вместе с нею длинные концы *L* коромысел *1—1*. В этот момент короткие внешние концы *l* опускаются; одновременно опускаются веретёна с жерновами; высота щели *h* между жерновами при этом сокращается, а поступление зерна увеличивается, что достигается увеличением наклона потрясков *4—4*, которые шнурками, перекинутыми через блоки *5—5*, соединены с коромыслами *1—1*.

Соотношение между угловой скоростью вращения ре-

гулятора и углом α отклонения рычагов с центробежными грузами даётся уравнением Н. Е. Жуковского:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{OM\cos\alpha}\left(1+\frac{Q}{P}\cdot\frac{OD}{OM}\right)}, \qquad (295)$$

где: ω — угловая скорость вращения регулятора;

$g = 9{,}81$ м/сек^2 — ускорение земного притяжения.

Другие обозначения даны на рис. 247.

С помощью этого уравнения легко определить в каждый момент высоту щели h между рабочими поверхностями жерновов в зависимости от скорости ветра.

Высота щели h изменяется пропорционально ходу муфты H регулятора. Так как ход муфты H изменяется пропорционально $\cos\alpha$, то, задаваясь максимальной начальной высотой щели между жерновами равной h_0, получим изменение высоты щели в виде:

$$h = h_0\cos\alpha. \qquad (296)$$

$\cos\alpha$ находим из уравнения (295).

$$\cos\alpha = \frac{g}{\omega^2 OM}\cdot\left(1+\frac{Q}{P}\cdot\frac{OD}{OM}\right). \qquad (297)$$

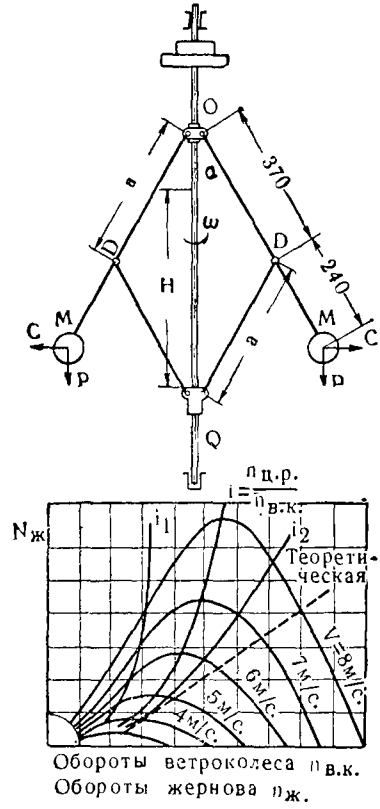


Рис. 247. Центробежный регулятор и влияние его на характеристику жёрнова.

Все величины этого уравнения, кроме ω, известны из конструкции регулятора. Для крыльев с известной характеристикой ω является также известной для каждой скорости ветра. Таким образом, полный расчёт регулятора для ветряных мельниц можно сделать с помощью уравнений (295), (296) и (297).

При определении величин, входящих в уравнение (297), необходимо пользоваться размерами системы регулирования, устанавливаемыми исходя из конструктивных соображений. Согласно обозначениям, показанным на рис. 246, имеем:

$$\frac{Q}{2} \cdot L = Sl;\ Gl = S\,(L_1 + l_1),$$

откуда:

$$Q = 2\,\frac{Gl^2}{L\,(L_1 + l_1)}\,. \qquad (298)$$

Пример. Для жернова $^6/_4$ весом G=700 кг и при размерах плеч рычагов (рис. 246): l=0,12 м; l_1=0,10 м; L=1,5 м; L_1=1,3 м, величина Q будет равна:

$$Q = 2\,\frac{700 \cdot 0{,}12^2}{1{,}5\,(1{,}3 + 0{,}1)} = 9{,}6 \text{ кг}.$$

Центробежные грузы M берутся весом P от 5 до 8 кг каждый.

Подставляя эти значения в равенство (297) при конструктивных размерах центробежного регулятора к ветряной мельнице ВИМЭ Д-16 (рис. 247), получим $\cos\alpha$ для разных оборотов ветроколеса и соответствующие им щели между рабочими поверхностями жерновов $^6/_4$.

Расчёт приведён в таблице 30.

Зависимость высоты щели h от оборотов приведена на рис. 246, внизу.

Это простое автоматическое устройство не только может регулировать работу жёрнова, но и исправлять рабочий режим ветромельничного агрегата, т. е. давать такую характеристику жёрнова, которая будет проходить через вершины кривых мощности ветродвигателя.

Из предыдущего нам известно, что теоретическая характеристика жёрнова в функции оборотов изменяется по прямой под некоторым углом к горизонтальной оси, кривую же мы получаем за счёт изменения нагрузки вручную, и, чем больше эта нагрузка, тем круче поднимается кривая.

При наличии же центробежного регулятора характер наклона кривой получается за счёт изменения нагрузки автоматически, в зависимости от величины передаточного отношения между оборотами ветроколеса и регулятора. Чем больше передаточное отношение, тем круче будет подниматься кривая мощности жёрнова.

Таблица 30

Определение высоты щели h между рабочими поверхностями жерновов ветряной мельницы ВИМЭ Д-16

Наименование расчётных параметров	Скорости ветра (в м сек.)						
	4	5	6	7	8	9	10
Обороты ветроколеса	13	17	20	23	26	29	32
Обороты вертикального вала	39	51	60	69	78	87	96
Обороты центробежного регулятора	39	51	60	69	78	87	96
Угловая скорость центробежного регулятора $\omega=\frac{\pi n}{30}$	4,1	5,3	6,25	7,2	8,8	9,1	10
$\cos\alpha=$ $=\frac{9,81}{\omega^2 OM}\left(1+\frac{Q}{P}\cdot\frac{OD}{OM}\right)$ ($OD=0,37$ м; $OM=0,61$ м)	—	0,99	0,71	0,535	0,36	0,33	0,278
$h=h_0\cos\alpha$ при							
$h_0=3$ мм	3,0	2,96	2,14	1,6	1,08	1,0	0,83
$h_0=2$ мм	2,0	1,48	1,07	0,8	0,54	0,5	0,41

Устанавливая различные передаточные отношения между ветроколесом и регулятором, получим ряд кривых, одна из которых будет проходить через вершины кривых мощности ветродвигателя, как показано кривой i на рис. 247, внизу. Отсюда видим, что при правильном передаточном отношении i центробежного регулятора и ветроколеса жёрнов будет работать на наивыгоднейшем режиме, если правильно подобрана передача между ветроколесом и жёрновом.

Напомним, что, как при ручном способе регулирования, так и при автоматическом, при определении передаточного отношения между оборотами ветроколеса и жёрнова, необходимо руководствоваться номограммой, данной на рис. 244.

Работа ветродвигателя ТВ-8 с зернодробилкой ЗД. Зернодробилка-плющилка ЗД (рис. 248) используется в животноводческих хозяйствах для дробления или плющения зерна на корм скоту. Рифлёные вальцы машины дробят

зерно при вращении ведущего вальца со скоростью 133—150 об/мин. При выключении из передачи машины одной пары шестерёнок оба вальца работают с одинаковыми оборотами, равными 400—450 об мин., и машина в этом случае работает как плющилка.

Опытные эксплоатационные характеристики зернодробилки показаны на рис. 249. Производительность в зави-

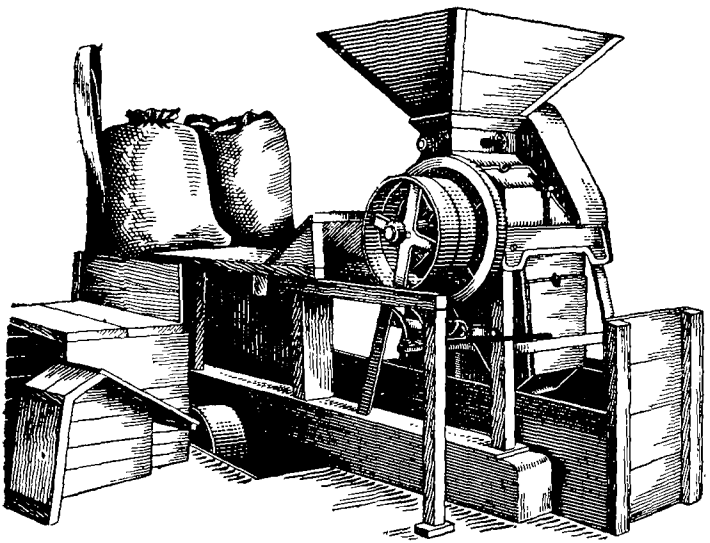


Рис. 248. Зернодробилка-плющилка ЗД.

симости от скорости ветра и оборотов получена при переменной подаче зерна, что обусловило наивыгоднейшую работу ветросилового агрегата.

В таблице 31 приведена производительность этой машины на дробление и плющение с указанием качества продукта и удельной производительности, т. е. производительности, отнесённой к 1 л. с. ч.

Полную производительность, приведённую в таблице 31, зернодробилка-плющилка давала при скорости ветра 8 м/сек. При этом её обороты были равны от 390 до 400 в минуту.

Работа ветродвигателя ВИМЭ Д-12 с «Фермером» № 2. «Фермер» № 2 (рис. 250) имеет большое распространение для грубого помола в животноводческих хозяйствах.

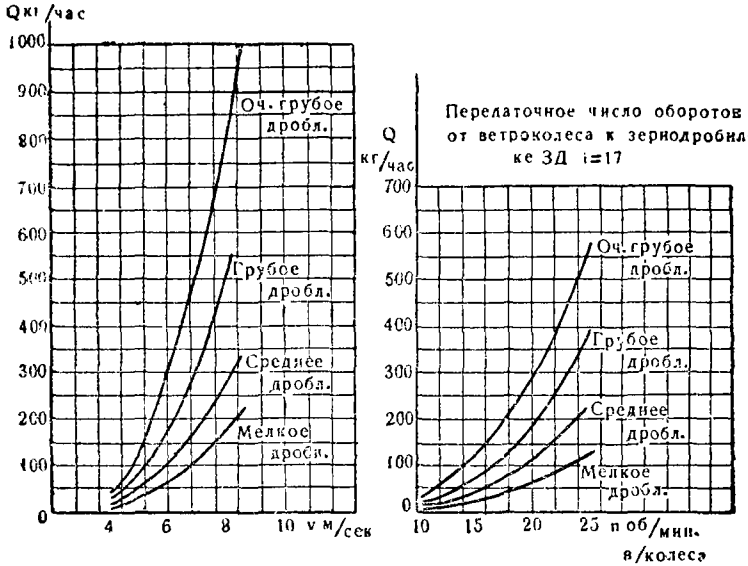


Рис. 249. Характеристика производительности зернодробилки в зависимости от скорости ветра и оборотов ветроколеса.

Таблица 31

Производительность зернодробилки ЗД, работающей с ветродвигателем ТВ-8

Характеристика дробления ячменя		Дробление		Плющение	
Название	При наличии в помоле частиц по весу более 5% с диаметром частиц (в мм)	Производительность (кг/час при V=8 (м/сек.)	Удельная производительность (кг/л.с.ч.)	Производительность (кг/час)	Удельная производительность (кг/л.с.ч.)
Тонкое дробление . . .	0,5 и 1,0	175	35	—	—
Среднее дробление . . .	0,5 и 1,5	310	62	—	—
Грубое дробление и плющение . . .	1,0 и 1,5 / 2,0	500	100	825	117
Очень грубое дробление .	2,0 и 2,5 / 3,0	800	160	1 700	238

В результате обработки материалов испытания ветродвигателя с «Фермером №2», были получены характеристики производительности агрегата, приведённые на рис. 251 и 252, где слева даны кривые производительности разной тонкости помола в зависимости от скорости ветра, а справа — в зависимости от оборотов ветроколеса.

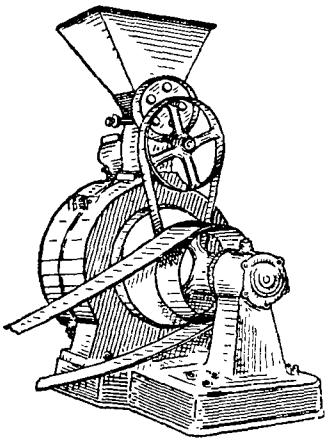


Рис. 250. Мельничный постав «Фермер № 2».

Так как стабилизаторное регулирование ветродвигателя обеспечивает постоянство оборотов при любых скоростях ветра, превышающих 8 м/сек., то с увеличением скорости ветра нагрузку можно увеличивать так, что кривая пойдёт по вертикали, перегружая ветродвигатель без изменения оборотов в сторону их увеличения, что не позволяет на глаз установить, насколько перегружен ветродвигатель. Поэтому при скоростях ветра выше 8 м/сек., не следует увеличивать нагрузку больше той, которая соответствует мощности ветродвигателя при скорости ветра от 8 до 9 м/сек.

Производительность агрегата в зависимости от крупности помола приведена в таблице 32.

Таблица 32

Производительность ветродвигателя ВИМЭ Д-12 с «Фермером» № 2

Характеристика помола		Производительность (кг/час) при V=8 м/сек.	Удельная производительность (кг/л. с. ч.)
Название помола	Диаметр частиц (в мм) при наличии их в помоле по весу более 50%		
Тонкий помол	0,5 до 1	320	24,5
Средний помол	0,5; 1,0 до 1,5	600	46,0
Грубый помол	1,0; 1,5 до 2,0	910	70,0
Очень грубый помол .	2,0; 2,5 до 3,0	1 400	107,0

Рабочие характеристики ветродвигателя и соломорезки. Испытания соломорезки системы «Голиаф» показывают, что мощность и производительность машины зависят от многих факторов, а именно: влажности соломы, длины резки, остроты ножей и т. п. Влияние этих факторов на характеристику машины изображено графически на рис. 253 и 254.

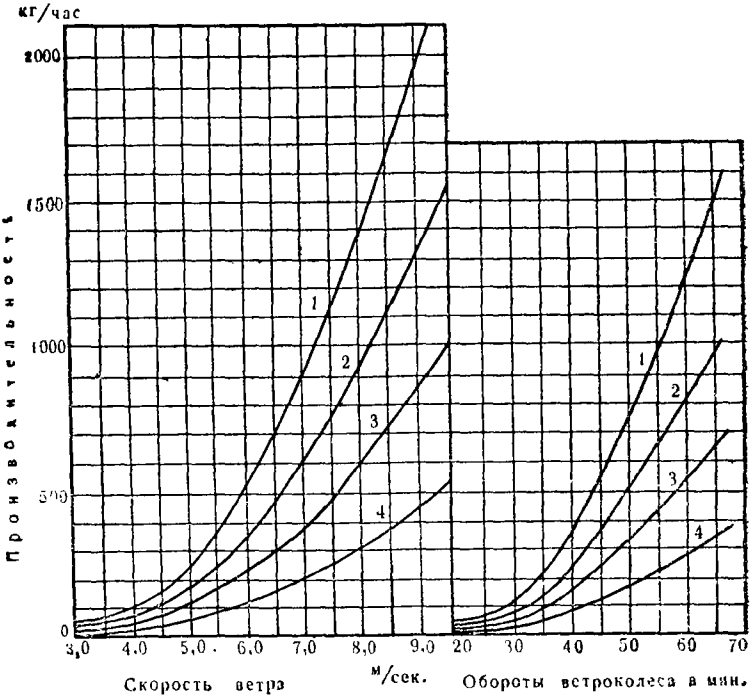


Рис. 251. Характеристики производительности ветродвигателя ВИМЭ Д-12 с фермером при разной тонкости помола в зависимости от скорости ветра:

1 — очень грубый помол; *2* — грубый помол; *3* — средний помол; *4* — тонкий помол.

Рис. 252. Характеристики производительности ветродвигателя ВИМЭ Д-12 с фермером в зависимости от оборотов. Название кривых дано под рисунком 251.

Характеристика мощности в функции оборотов представляется в виде прямой; наложив её на характеристику ветродвигателя, мы получим такой же невыгодный режим, как и при работе ветродвигателя с поршневым насосом,

а именно: ветродвигатель может работать с максимальным ξ лишь на малых скоростях ветра. Однако, если для повышения эффективности ветронасосного агрегата, работающего с поршневым насосом, требуется механизм сложной конструкции, то в данном случае, чтобы изменить характеристику в лучшую сторону, никакого механизма не требуется.

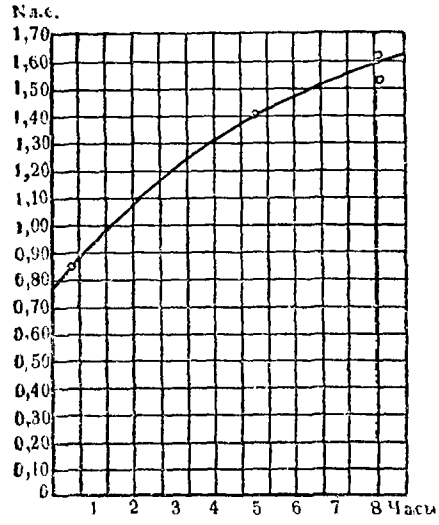


Рис. 253. Расход мощности на соломорезку в зависимости от времени работы с момента заточки ножей.

Так как загрузка перерабатываемого материала у соломорезки производится вручную, то при малых скоростях ветра можно подавать меньшее количество соломы; при этом уменьшится затрачиваемая работа соломорезки, и, следовательно, ветродвигатель будет в состоянии преодолевать нагрузку. По мере увеличения скорости ветра загрузку соломы

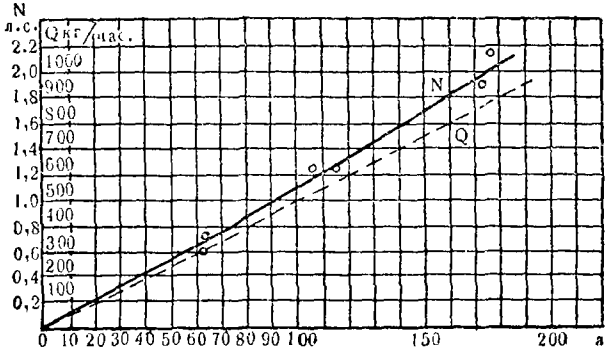


Рис. 254. Расход мощности на работу соломорезки в зависимости от оборотов и производительность (свежая ржаная солома).

можно увеличить. Таким образом, на диапазоне скоростей ветра от 4 до 8 м/сек. мы получим характеристику машины, проходящую через точки максимальных мощностей ветродвигателя, т. е. мы получим такую же характеристику, как и для жёрнова, показанную на рис. 247, внизу.

Вообще же кривые характеристик соломорезки, корнерезки, пилы и т. п. не имеют определённой формы, которую можно было бы получить расчётом. Объясняется это тем, что основные параметры: обороты и производительность, характеризующие работу подобных машин, не так строго связаны друг с другом, как, например, обороты насоса и его производительность.

У большинства этих машин подача перерабатываемого материала осуществляется вручную, а производительность зависит от подачи. Поэтому естественно, что соответствие производительности данной мощности двигателя будет зависеть от индивидуальных навыков обслуживающего персонала.

Другим фактором, сильно влияющим на характеристику сельскохозяйственной машины, является рабочий инструмент, производящий переработку материала, у соломорезки — ножи, у мельничного постава — острота рабочей поверхности жёрнова, у пилы — зубья и т. д. Качество этих инструментов изменяется с течением времени, следовательно, изменяется и качество их работы, а вместе с этим и потребная мощность на их движение.

Например, затрачиваемая мощность соломорезки «Голиаф» за 8 часов работы после заточки ножей возрастает вдвое (см. рис. 253). С острыми ножами затрачиваемая мощность составляла 0,8 л. с., а в конце восьмого часа работы потребляемая мощность возросла до 1,6 л. с. при одной и той же производительности.

Подбор сельскохозяйственных машин к ветродвигателю. Исходными данными при подборе сельскохозяйственных машин к ветродвигателю являются их мощность N и число оборотов n. Нормальная мощность машины должна соответствовать той мощности ветродвигателя, при которой он в районе с определённой среднегодовой скоростью ветра даёт максимальную выработку в течение года. Поэтому и при подборе машин мы должны руководствоваться графиком, приведённым на рис. 238, который указывает, при каких скоростях ветра V_y ветродвигатель даёт

в году максимальную выработку в районе с определённой среднегодовой скоростью ветра V_0.

В таблице 33 приведены мощности на валу ветроколеса ветродвигателей ВИМЭ Д-5; ТВ-8 и ВИМЭ Д-12 для скоростей ветра V_y, которые подсчитаны с помощью уравнения (291) и округлены. В этой же таблице даны те мощности рабочих машин, при которых они, будучи приключены к ветродвигателю, могут дать наибольшую годовую выработку при данной среднегодовой скорости ветра. Для определения передаточного отношения оборотов машины к оборотам ветроколеса приведены также числа оборотов ветродвигателей соответственно мощности.

Мощность сельскохозяйственных машин определена из соотношения:

$$N_м = N\eta,$$

где η принят равным 0,65 — механический к. п. д.

Таблица 33

Мощности ветродвигателей при оптимальных скоростях ветра V_y в зависимости от среднегодовой скорости ветра V_0

Название параметров	Среднегодовые скорости ветра V_0 м/сек.			
	3	4	5	6
	Оптимальные скорости ветра V_y			
	5	6	8	9
ВИМЭ Д-5 быстроходный				
Мощность на валу ветроколеса N (л. с.)	0,5	1,2	2,2	2,7
Мощность машины, которая соответствует данной мощности ветродвигателя (л. с.)	0,32	0,73	1,5	1,75
Число оборотов ветроколеса	130	150	190	200
ТВ-8 тихоходный				
Мощность ветродвигателя (л. с.)	1,2	3,0	5,8	7,0
Мощность машин (л. с.)	0,78	2,0	3,8	4,5
Число оборотов ветроколеса	16	20	22	25
ВИМЭ Д-12 быстроходный				
Мощность ветродвигателя (л. с.)	2,5	6,1	12,0	14
Мощность машин (л. с.)	1,6	4,0	7,8	9,5
Число оборотов ветроколеса	40	50	60	70

Таблица 33 позволяет установить, с каким ветродвигателем будет выгодна работа той или иной сельскохозяйственной машины, если известна её нормальная мощность, а также определить передаточное отношение оборотов ветроколеса к оборотам машины, если последние также известны.

Пример 1. Определить, с каким ветродвигателем наиболее выгодно будет работать корнерезка мощностью $N=0{,}75$ л. с. при $n=80$ об/мин., и определить передаточное отношение.

Обращаясь к таблице 33. находим, что эта машина может работать в районе со среднегодовой скоростью ветра $V_0=4$ м/сек. с ветродвигателем ВИМЭ Д-5, причём передаточное отношение оборотов ветроколеса к оборотам машины равно:

$$i=\frac{n_в}{n_м}=\frac{150}{80}=1{,}9.$$

В районе со среднегодовой скоростью ветра $V_0=3$ м/сек. эту машину присоединять к ветродвигателю ВИМЭ Д-5 нерационально, так как она будет работать малое количество часов в году. Будет более выгодно при $V_0=3$ м/сек. эту машину присоединить к ТВ-8. Передаточное отношение в этом случае должно быть:

$$i=\frac{16}{80}=0{,}2.$$

Пример 2. Определить тип ветродвигателя, который будет полностью загружен жмыходробилкой, нормальная мощность которой равна 5 л. с. По таблице 33 находим, что эта мощность соответствует мощности ветродвигателя ТВ-8, при V_0=от 5 до 6 м/сек. Эта же машина может давать удовлетворительную загрузку и ветродвигателю ВИМЭ Д-12, установленному при $V_0=4$ и 5 м/сек.

При работе ветродвигателя на несколько сельскохозяйственных машин не обязательно, чтобы мощность машины соответствовала максимуму годовой выработки ветродвигателя, так как в этом случае ветродвигатель может работать одновременно на несколько машин.

Итак, при подборе мощности машины к ветродвигателю, необходимо обращать внимание не только на тип ветродвигателя, но и на ту среднегодовую скорость ветра, при которой ему придётся работать. Одна и та же машина при разных среднегодовых скоростях ветра требует разных размеров ветродвигателей.

ГЛАВА XIV

ВЕТРОНАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ

Для подъёма воды из колодцев, скважин и открытых водоёмов ветродвигатели находят весьма широкое применение как в СССР, так и за границей.

Ветронасосные установки в зависимости от назначения разделяются на:

1) ветронасосные установки для водоснабжения; они поднимают воду для питьевых и хозяйственных нужд;

2) ветрооросительные установки, поднимающие воду для орошения земельных участков;

3) ветронасосные установки для откачки воды с осушаемых заболоченных или затапливаемых высокими водами участков.

§ 52. ВЕТРОНАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Основными элементами, составляющими ветронасосную установку, являются:

1) ветродвигатель, конструктивно приспособленный для работы с поршневым либо с центробежным насосом, архимедовым винтом и др.;

2) насосное оборудование, состоящее из насоса, всасывающего и нагнетательного трубопроводов и различных приспособлений, обеспечивающих правильную и наиболее эффективную работу насосного устройства (воздушный колпак, балансир, приспособления для заливки и спуска воды и т. п.);

3) водоём или бак для запаса воды на безветренные дни;

4) сеть распределительных трубопроводов, подающих воду к местам её потребления.

Для проектирования ветронасосной установки необ-

ходимо знать количество потребной воды для нужд данного хозяйства, характер источника и его дебит и, наконец, рельеф местности и ветровой режим, где предполагается постройка ветронасосной установки.

Конструктивная схема наиболее распространённой ветронасосной установки для водоснабжения животноводческих хозяйств показана на рис. 255.

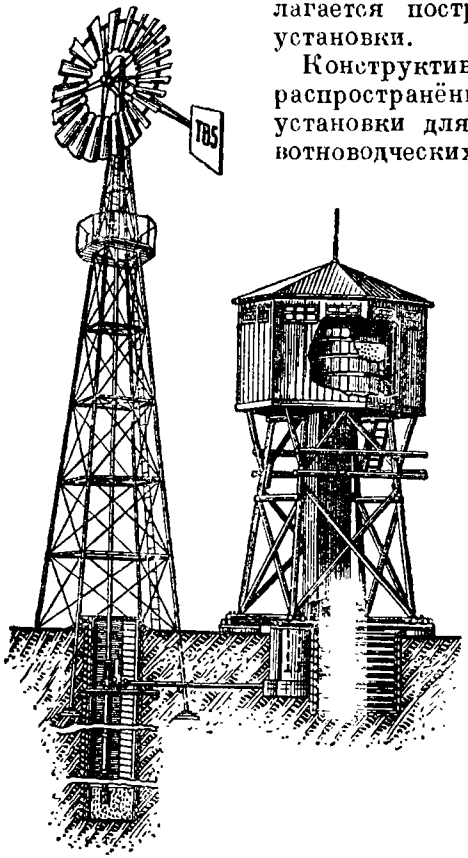


Рис. 255. Конструктивная схема ветронасосной установки.

Глубокое залегание воды в колодцах или скважинах требует поршневого насоса для подъёма её на поверхность, а подъём воды из открытых водоёмов или мелких колодцев, но с большим дебитом удобнее производить центробежным насосом. В первом случае требуется многолопастный тихоходный ветродвигатель, отличающийся большим моментом трогания и малыми оборотами, во втором случае требуется малолопастный быстроходный ветродвигатель, отличающийся большими оборотами и малым моментом трогания.

Ветровой режим и рельеф местности обусловливают систему регулирования ветросилового агрегата и характер оборудования (водозабор, сеть трубопроводов, привод и т. п.).

Суточный расход, а также дебит источника воды определяют мощность ветронасосной установки.

Ветронасосный агрегат должен быть подобран так, чтобы приток воды данного источника мог покрывать расход. Недостаток воды в источнике нарушает нормальную работу ветродвигателя и может послужить причиной засорения скважины засосанным песком. Расход воды Q должен быть равен или меньше дебита источника $Q_д$ т. е.:

$$Q \leqslant Q_д . \qquad (299)$$

Таким образом, получаем следующее правило:

а) при подборе ветронасосного агрегата к источнику с ограниченным дебитом следует устанавливать мощность агрегата исходя из величины дебита источника воды, и при недостатке её, для полного обеспечения хозяйства, надо предусматривать другие источники воды, где и устанавливать другие ветронасосные агрегаты;

б) при подборе ветронасосного агрегата к источнику воды с неограниченным дебитом следует устанавливать мощность агрегата исходя из потребного количества воды для данного хозяйства.

Из открытых водоёмов, обладающих большим дебитом, обычно поднимают воду для производственных и оросительных целей. Из колодцев и скважин с ограниченным дебитом обычно поднимают воду только для питьевых нужд. Источники воды последнего типа наиболее распространены в степных районах. Их отличительная особенность — малый дебит, от 0,2 до 2,0 м³/час. Однако в некоторых районах нашего Союза встречаются скважины с очень высоким дебитом, достигающим 30 м³/час. Из таких скважин можно поднимать воду не только для питья, но и для орошения.

Количество воды, которое ветронасосная установка должна подать за сутки, с учётом запаса воды на 1—2 дня безветрия, определяется по существующим нормам водопотребления q литров в сутки. Умножая норму на одного потребителя на их число n и суммируя, получим суточный расход воды Q:

$$Q = \Sigma qn. \qquad (300)$$

Например, по нормам Министерства сельского хозяйства СССР суточный расход воды для животных, включая водопой, приготовление кормов и санитарно-гигиенические мероприятия, определяется следующими цифрами в таблице 34.

Таблица 34

Расход воды на животных [15]

Животные	Суточный расход воды на 1 голову (в литрах)	
	при внутреннем водопроводе	без водопровода
Дойная корова	75—90	60
Телята до 6 месяцев	20	15
Телята от 6 до 18 месяцев	24	20
Сухостойная корова	45	35
Бык-производитель	60	50
Вол рабочий	60	60
Лошадь рабочая	60	50
Жеребёнок от 6 до 12 месяцев	40	30
Свиноматка с поросятами до 2 месяцев (летом)	75	54
То же, зимой	64	38
Поросята от 2 до 6 месяцев (летом)	17	12
То же, зимой	14	9
Откормочные свиньи 9 месяцев	35	20
Хряк	59	40
Овца	12	8
Овца с ягнёнком	15	10
Коза	15	10
Кролик	3	2
Курица	1,5	0,75

Распределение расхода воды в течение суток показано на графике (рис. 256) водопотребления в скотном дворе при наличии автопоилок.

Чтобы обеспечить потребителей водой полностью, используя энергию ветра, мощность ветронасосной установки должна быть рассчитана не на суточную подачу воды, а на то количество, которое обеспечило бы потребителей в дни ветра и в штилевые дни. Ветроустановка при ветряных днях должна обеспечивать суточный расход воды и запасти её на последующий период затишья, длительность которого можно принимать от 1 до 2 дней.

Периодом затишья называются дни со средней скоростью ветра 2 м/сек. и ниже, с продолжительностью один день и более.

Допустим, что для данного района за некоторый промежуток времени колебание среднесуточных скоростей

ветра происходило, как показано на графике рис. 257, где заштрихованные площадки дают картину колебания скоростей ветра, τ число дней с ветрами, средняя скорость

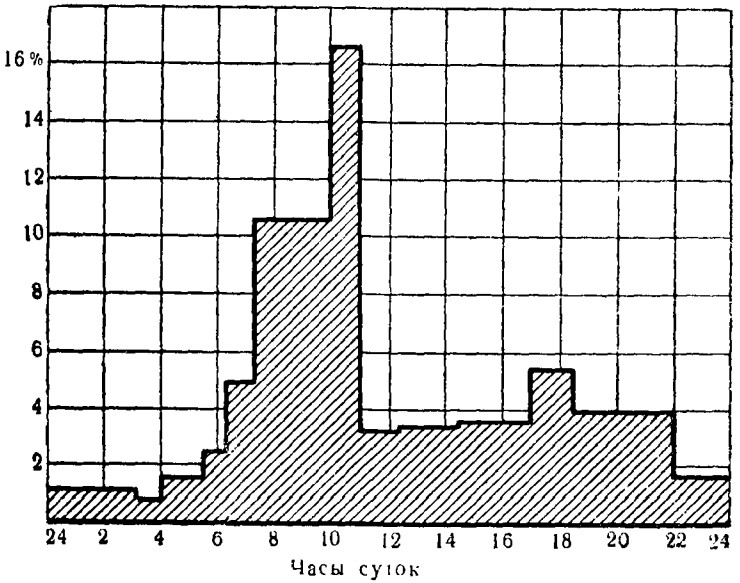


Рис. 256. Суточный график расхода воды для животных.

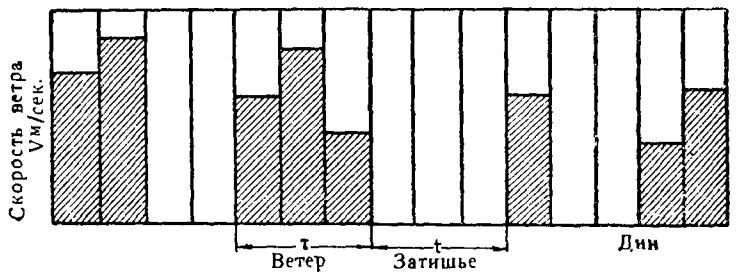


Рис. 257. График возможного колебания среднесуточных скоростей ветра.

которых была выше 2 м/сек. между двумя смежными периодами затишья, t — число дней периода затишья.

Такой график вполне возможен, так как последовательность и продолжительность периодов затишья не

подчиняются определённой закономерности. Есть районы, где периоды затишья имеют продолжительность от двух до трёх дней, но здесь же могут быть случаи, когда в течение целого месяца средняя скорость ветра не превышает 2 м/сек. Явление это редкое, но оно бывает.

По графику на рис. 257, мы должны подать воду ветронасосной установкой в количестве, обеспечивающем потребителей при наиболее невыгодном ветровом режиме, когда период штилевых дней t наиболее продолжителен, а число ветряных дней τ является наименьшим. При этом количество запасаемой в водоёме воды должно определяться следующим образом.

Ветроустановка должна обеспечить суточное потребление воды или суточный расход Q м³/сутки; кроме того, за период ветряных дней накачать воду в запас на время штилевых дней; величина этого запаса определится выражением:

$$\frac{Qt}{\tau}. \qquad (301)$$

Таким образом, если не предусматривать расхода воды на покрытие пиков графика водопотребления, то полное количество воды, на которое должна быть рассчитана мощность ветронасосной установки, равно:

$$Q_1 = Q + \frac{Qt}{\tau} = Q\left(1 + \frac{t}{\tau}\right). \qquad (302)$$

Если же потребление воды в течение суток происходит с большим колебанием, то установка за τ ветряных дней должна ещё подать воду в запас, который примем условно равным суточному потреблению, следовательно, за один день надо запасти: $\frac{Q}{\tau}$.

В этом случае полное количество воды составит:

$$Q'_1 = Q + \frac{Qt}{\tau} + \frac{Q}{\tau} = \frac{Q}{\tau}(\tau + t + 1). \qquad (303)$$

Мощность ветронасосного агрегата. Мощность ветронасосного агрегата для подачи суточного расхода воды определяется уравнением:

$$N = \frac{Q \cdot H \cdot 1\,000}{75 \cdot 3\,600 \cdot t_{p\eta}}, \qquad (304)$$

где: Q — суточный расход воды в м^3;
t_p — число часов работы ветродвигателя за сутки;
H — напор в м, который определяется с учётом потерь напора;
η — коэфициент полезного действия насоса.

Если же агрегат должен, кроме того, подать воду в запас, которая будет расходоваться в штилевые дни, то мощность, согласно уравнениям (302) и (303) выразится:

$$N_1 = N\left(1 + \frac{t}{\tau}\right), \qquad (305)$$

или, с учётом неравномерности потребления:

$$N'_1 = \frac{N}{\tau}(\tau + t + 1). \qquad (306)$$

Вместе с этим объём баков должен соответствовать тому объёму воды, который подаёт ветроустановка сверх суточного расхода.

Если количество подаваемой воды определено с помощью уравнения (302), то объём баков должен быть равен:

$$W = \left(Q + \frac{Qt}{\tau}\right)\tau - Q\tau,$$

откуда

$$W = Qt. \qquad (307)$$

Если в баки должна быть подана вода и на покрытие пик графика расхода воды, согласно уравнению (303), то объём должен быть равен:

$$W' = \left(Q + \frac{Qt}{\tau} + \frac{Q}{\tau}\right)\tau - Q\tau,$$

откуда

$$W' = Q + Qt = Q(t + 1). \qquad (308)$$

Нужно подчеркнуть однако, что ветронасосная установка, обеспечивающая потребителя водою полностью за счёт энергии ветра, в районах с большими периодами затишья практически не выгодна.

Допустим, что в районе, где намечается постройка ветронасосной установки, продолжительность периода затишья в среднем равна 5 дням, а число ветряных дней между двумя периодами затишья $\tau = 2$ дням. Определяя

необходимую мощность с помощью уравнений (305) и (306), получаем:

$$N_1 = N\left(1 + \frac{5}{2}\right) = 3{,}5N.$$

$$N_1' = \frac{N}{2}(1 + 2 + 5) = 4N.$$

Таким образом, для пятидневного штиля, которому предшествовало два дня с ветрами, мощность ветронасосной установки должна быть в 3,5 раза больше той, которая требуется для подъёма воды на одни сутки, и в 4 раза больше при условии пикового графика потребления.

Баки для запаса воды при этих условиях должны иметь ёмкость:

$$W = Qt = 5Q.$$

$$W' = Q(t + 1) = Q(5 + 1) = 6Q.$$

Как же будет работать ветроустановка, если после двух ветряных дней последует штиль, допустим, в 2 дня. В этом случае потребовалась бы мощность:

$$N_1 = N\left(1 + \frac{2}{2}\right) = 2N.$$

$$N_1' = \frac{N}{2}(1 + 2 + 2) = 2{,}5N.$$

Рассмотренные примеры показывают, что ветроустановка, рассчитанная на 5 штилевых дней, будет простаивать при штилях, длящихся менее 5 дней, и не обеспечит потребителя водой, если будет рассчитана на меньшее число штилевых дней. Отсюда делаем вывод, что практически вообще нецелесообразно в районах со слабыми скоростями ветра рассчитывать ветронасосную установку на полное обеспечение потребителя водою только за счёт энергии ветра.

Очевидно, ветронасосная установка полностью может обеспечить потребителя водою только в тех районах, где период затишья не превышает 2 или 3 дней и с ветрами между ними не менее 1—2 дней.

Более надёжно будет работать ветронасосная установка с резервным двигателем, не ветровым. Подходящим резервным двигателем при ветронасосной установке в сельских условиях является конный привод.

В этом случае и баки для запаса воды потребуются значительно меньших размеров, не более суточного расхода воды.

§ 53. ВОДОРАЗБОРНЫЕ БАКИ И ВОДОНАПОРНЫЕ БАШНИ ПРИ ВЕТРОНАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ

Работа ветронасосной установки без резервуара или бака для запаса воды невозможна. При отсутствии бака ветродвигатель должен работать лишь в момент её расхода, что бывает с перерывами; с прекращением расхода воды ветроустановка должна быть остановлена, а затем, при возобновлении, снова запущена в работу. Но, чтобы запустить ветряк, нагруженный поршневым насосом, необходимо наличие ветра со скоростью не менее 4 м/сек., тогда как он мог работать при 3 м/сек. Начальный нагрузочный момент примерно в 3 раза выше момента рабочего. Таким образом, прерывность работы ветроустановки, вследствие отсутствия бака или запаса воды, будет служить причиной частых простоев ветродвигателя не только в моменты, когда вода не требуется, но и тогда, когда она нужна. Такая установка практически будет мало полезной.

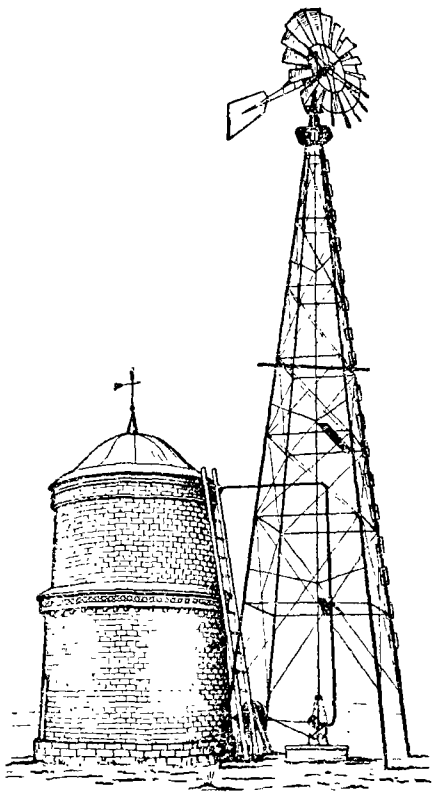


Рис. 258. Ветроустановка с металлическим баком на 20 м³ в кирпичной кладке.

Водоразборный бак — основной элемент ветронасосной установки. Запасая в баке воду на штилевые дни, можно аккумулировать энергию ветра. Благодаря этому сокращаются простои ветроустановки, а вместе с этим удешевляется выработка, что окупает с лихвой затраты на

постройку водоразборного бака. Суточный расход воды протекает, как показано на рис. 256, с значительными колебаниями; так, например, расход воды от 12 ч. до 14 ч. дня значительно выше расхода от 6 до 10 ч. утра. Этот максимальный расход в короткий промежуток времени ветроустановка, естественно, обеспечить не может. Наличие же воды, запасённой в баке, позволяет покрыть этот пиковый расход, независимо от того, работает в данный момент ветроустановка или нет.

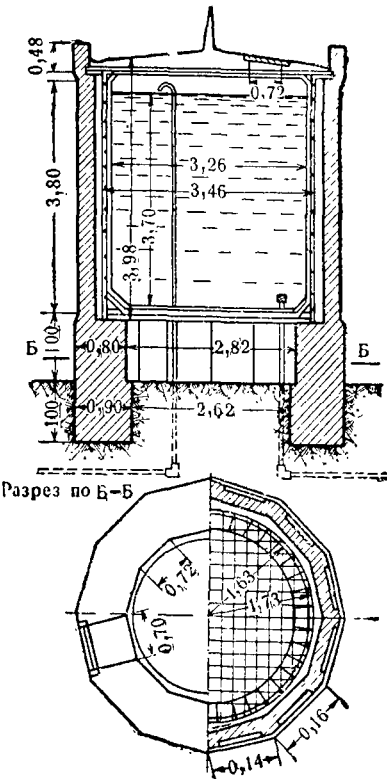


Рис. 259. Железобетонный резервуар на 30 м³.

Приведём некоторые примеры конструкций резервуаров и баков при ветронасосных установках. На рис. 258 показана ветронасосная установка с баком ёмкостью в 20 м³. Цилиндрический бак из листового железа имеет в диаметре около 2,5 м и около 2,8 м высоты. Он заделан в кирпичной кладке на высоте в 2 м. Кирпичные стены предохраняют воду от замерзания зимою.

Большое распространение имеют железобетонные резервуары, конструкция которых показана на рис. 259. На постройку такого резервуара ёмкостью в 30 м³ требуется цемента около 8 т и железа около 600 кг; они отличаются значительной долговечностью. Конструирование и расчёты железобетонных резервуаров изложены, например, в книге Б. А. Шебуева «Железобетонные резервуары, бункеры и силосы», Москва, 1935 г.

Каменные резервуары долговечны и могут быть

построены в сельских условиях. Конструкция резервуара из бутовой кладки на цементном растворе, ёмкостью в 50 м³, показана на рис. 260. Диаметр цилиндра бака равен 3,75 м, толщина стен 0,6 м. Такая толщина стен обеспечивает прочность бака и предохраняет воду от замерзания при морозах до 40° С при температуре поступающей воды +2° С в течение 20 часов её спокойного состояния. При установке каменных резервуаров в северных и северо-восточных районах Союза ССР, где продолжительное время могут быть морозы в 40°С, стенки бака должны быть на зиму утеплены. Для этого снаружи устраивают выступы, на которых можно закреплять обшивку, а в промежутки между стенкой и обшивкой засыпать или закладывать утепляющий материал. В этом случае вода в баке при морозе в 40° может понизиться до +1° лишь за двое суток. Наиболее ответственной частью является днище бака. Его делают со значительным запасом прочности. Под баком предусматривается помещение для монтажа трубопроводов и арматуры, следовательно, дно несёт всю нагрузку от воды и опирается на фундамент по периметру окружности.

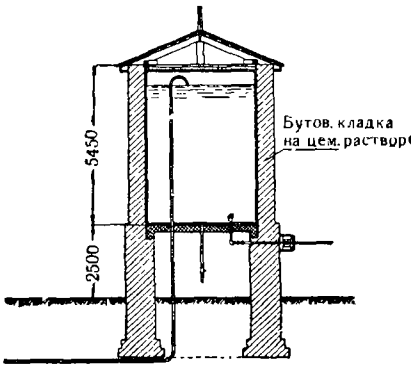


Рис. 260. Резервуар из каменной кладки.

Серьёзным недостатком резервуаров из каменной кладки без утепления является опасность образования трещин вследствие замерзания воды, насыщающей кладку стен. Поэтому цементная штукатурка внутренних стен резервуаров должна быть выполнена с особой тщательностью.

Водонапорные башни. Поднятую ветронасосной установкой воду часто требуется подавать в возвышенные точки местности либо в точки, расположенные на далёком расстоянии. В этом случае резервуары и баки для запаса воды устанавливают на башнях, откуда вода самотёком по распределительной сети труб поступает к потребителям.

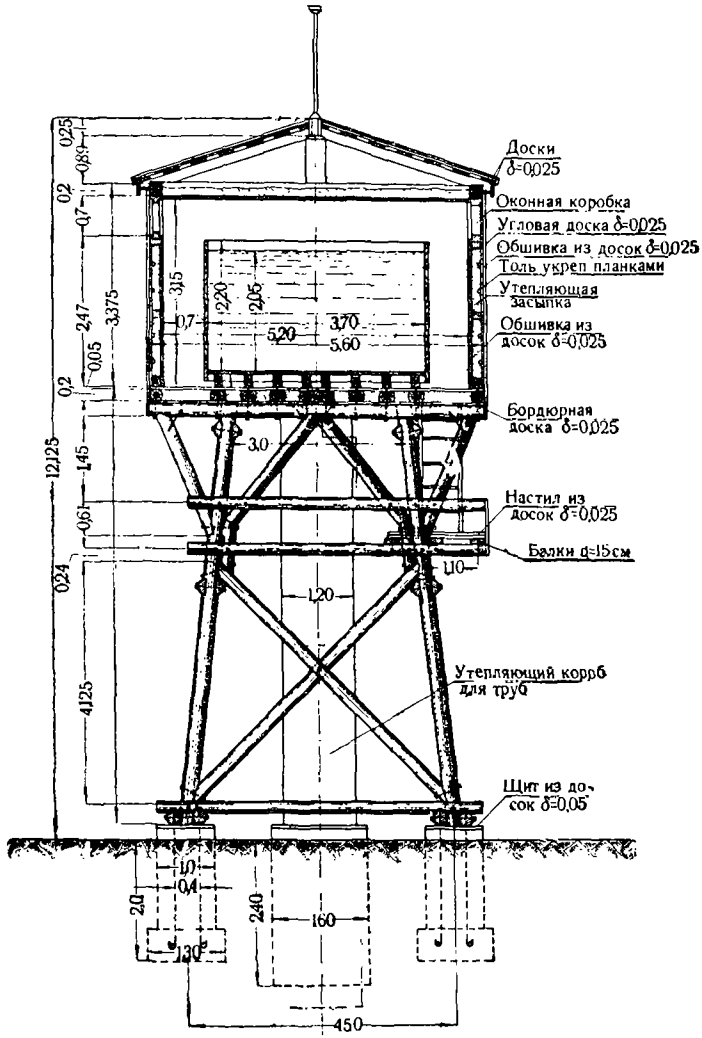


Рис. 261. Водонапорная башня конструкции ВИМЭ.

В лесных районах северной и средней полосы европейской части СССР и в Сибири наиболее доступны к постройке водонапорные башни из дерева. Высота этих башен определяется в зависимости от потерь напора в распределительной сети и высоты расположения точек потребления воды. Если предусматривается также и подача воды

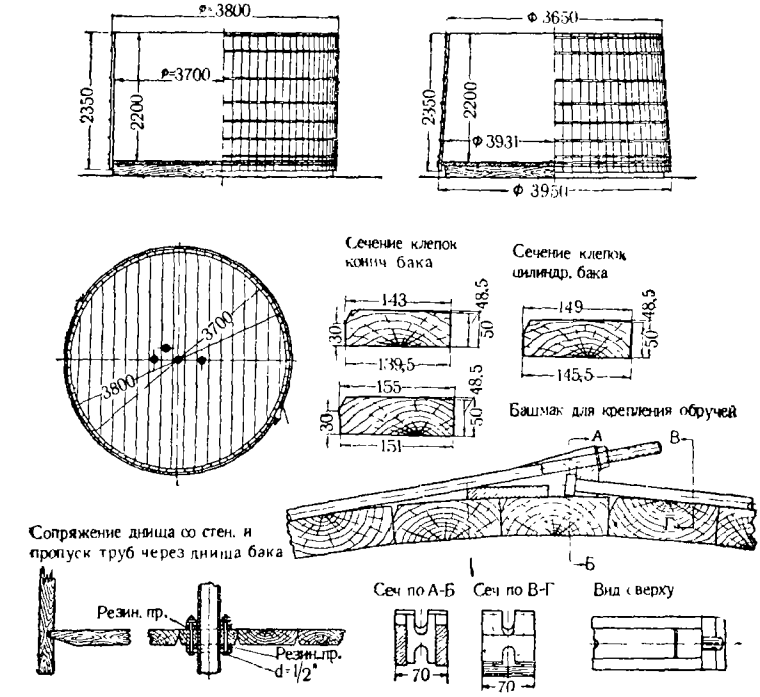


Рис. 262. Деревянные баки цилиндрический и конический.

из водонапорной башни для тушения пожаров, то высота её берётся равной от 12 до 18 м. Если же предусматривается подача воды только для питьевых нужд, то высота водонапорной башни принимается равной от 8 до 10 м.

В качестве примера на рис. 261 представлен общий вид конструкций деревянной водонапорной башни. На подобных башнях чаще всего устанавливаются деревянные баки. Пример деревянного цилиндрического бака внут-

ренним диаметром 3,7 м, общей высотой в 2,35 м и высотой наполнения в 1,85 м показан на рис. 262. Бак собирается из досок толщиной 5 см и стягивается обручами из круглого железа диаметром 16 мм.

Если бак скрепляется набивными обручами, то ему придаётся коническая форма, как показано на рис. 262, справа.

Для предохранения воды от замерзания бак помещён в будку каркасной конструкции с двойной обшивкой и с

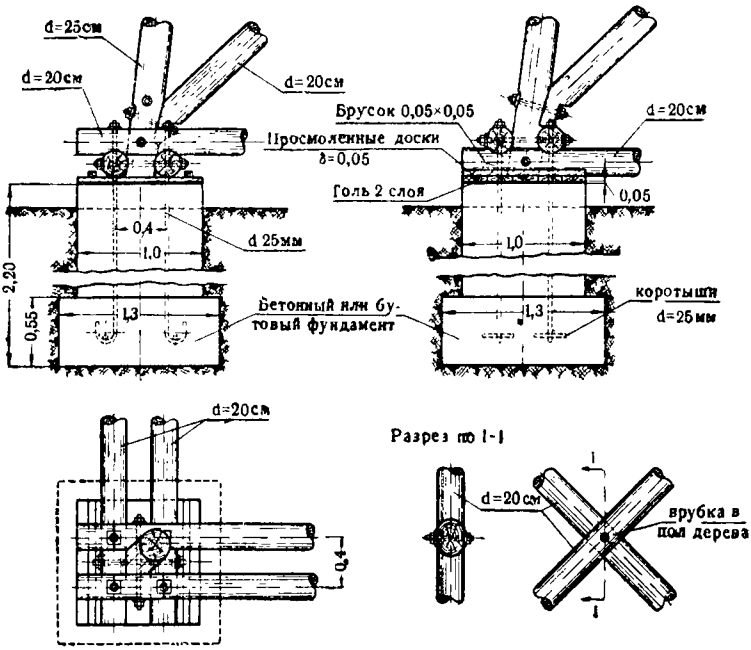


Рис. 263. Фундамент под ноги водонапорной башни.

засыпкой утеплителем из опилок или из других дешёвых теплоизоляционных материалов.

Все деревянные элементы основной несущей конструкции башни соединяются врубками и болтами. Внизу ноги башни опираются на фундаменты из бутовых или бетонных массивов и прикреплены к ним анкерными болтами, проходящими сквозь связи, состоящие из двух брёвен для каждой пары ног (рис. 263).

Верхняя площадка башни имеет досчатый настил и подшивку, между которыми засыпан утепляющий слой, защищающий бак от холода снизу. По оси башни от пола будки до колодца проходит короб, состоящий из каркаса с двойной обшивкой, между стен которой помещена утепляющая засыпка. Короб служит для утепления подводящего и отводящего трубопроводов. Трубопровод с вентилями для переключения направления воды в бак или непосредственно к потребителю смонтирован в бревенчатом колодце у основания башни под коробом.

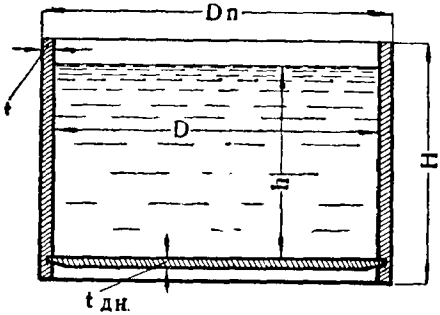


Рис. 264. Основные размеры деревянных баков.

Ориентировочная потребность в материалах для деревянных баков, показанных на рис. 263, разных объёмов, приведена в таблице 35 (см. также рис. 264). Таблица составлена по данным лаборатории ветроиспользования ВИМЭ.

Таблица 35

Ориентировочная потребность в материалах для деревянных баков

Полезный объём ($м^3$)	Внутренний диаметр (м)	Высота бака (м)	Толщина стенок (см)	Толщина днища (см)	Количество обручей на стенке	Диаметр обручей (мм)	Общий вес металла	Потребный объём пиломатериала
	D	H	t	$t_{дн}$	шт.	d	кг	$м^3$
10	2,94	1,82	4,0	4,0	8	12	131,8	1,49
15	3,38	2,04	4,5	4,5	6	16	187,7	2,15
20	3,70	2,20	5,0	5,0	7	16	225,9	2,74
25	3,86	2,47	5,5	5,5	9	16	284,8	3,65
30	4,10	2,61	6,0	6,0	8	19	376,3	4,40
35	4,34	2,74	6,0	6,0	9	19	438,3	4,91
40	4,52	2,83	6,5	6,5	9	19	494,6	5,93
50	4,88	3,03	7,0	7,0	9	22	646,6	7,16
60	5,18	3,20	8,0	8,0	10	22	804,8	9,11

§ 54. ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВЕТРОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Массовое распространение ветронасосных установок в СССР относится к 1936 г., когда для подъёма воды было построено в различных областях около 1 300 установок

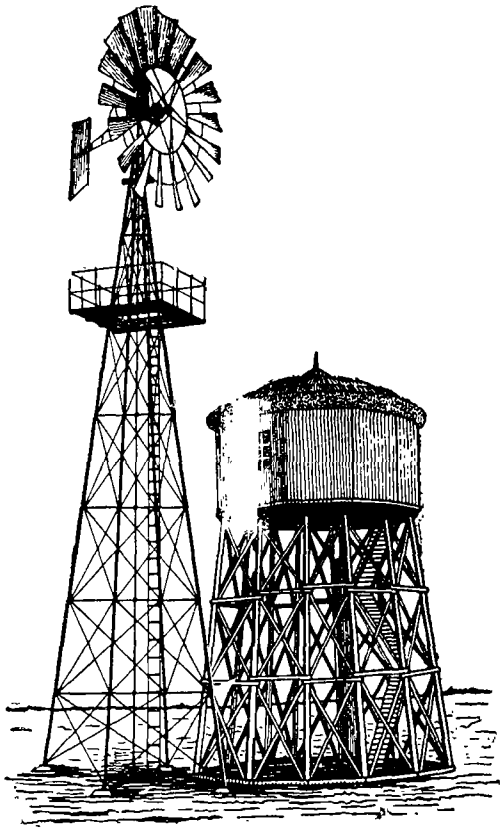


Рис. 265. Ветронасосная установка с ветродвигателем ТВ-5.

с ветродвигателями ТВ-5 и ТВ-8. Охарактеризуем подробнее эти две наиболее распространённые установки.

Ветронасосная установка с ветродвигателем ТВ-5. Ветронасосная установка с ветродвигателем ТВ-5 (рис. 265) является одной из наиболее распространённых в СССР

установок. По своей мощности она отвечает очень многим колхозным и совхозным хозяйствам.

Ветроустановка ТВ-5 имеет распространение, главным образом, в степных районах для обеспечения водою скота в поле. Эти ветронасосные установки целесообразно также строить в животноводческих хозяйствах при расположении источников воды на сравнительно далёком расстоянии от скотного двора. Производительность этой установки с поршневым насосом подсчитана с помощью уравнения (264) и характеристики, построенной согласно рис. 219, при условии, что характеристика насоса проходит по лучу *I*. Результат подсчёта приведён в таблице 36.

Таблица 36

Производительность ветронасосной установки ТВ-5 с поршневым насосом $d=3^3/_4''$

Общий напор (м)	Скорости ветра (м/сек)					
	3	4	5	6	7	8 и более
	Литры в час					
10	2121	4000	5600	7200	9000	10250
20	1060	2000	2800	3600	4500	5125
30	710	1330	1860	2400	3000	3400
40	530	1000	1400	1800	2250	2560
50	425	800	1120	1440	1800	2040
60	355	670	930	1200	1500	1710
70	303	570	800	1030	1285	1460
80	266	500	700	900	1125	1280

Капитальные расходы на ветронасосную установку типа ТВ-5 слагаются из следующих затрат:

1. Ветродвигатель с насосным оборудованием . . . k_1
2. Бак для запаса воды с утеплённой будкой . . . k_2
3. Устройство оголовка и фундамента под ветродвигатель . . . . . k_3
4. Сборка и подъём ветродвигателя . . . . . k_4

Сумма капиталовложений равна

$$K=\Sigma k.$$

Эксплоатационные годовые расходы составляются из следующих элементов:

1. Амортизация строительной части

$$z_1 = 0{,}054\ k_2.$$

2. Амортизация оборудования

$$z_2 = 0{,}07\,(k_1 + k_2).$$

3. Текущий ремонт бака

$$z_3 = 0{,}02\ k_2.$$

4. Текущий ремонт оборудования

$$z_4 = 0{,}05\,(k_1 + k_4).$$

5. Обслуживание ветроустановки . . . z_5
6. Смазка и обтирочный материал. . . z_6

Сумма годовых расходов равна: Σz

Стоимость 1 м³ поднятой воды получим, разделив годовые эксплоатационные расходы на количество воды, поднятой в течение года

$$C = \frac{\Sigma z}{Q_z}\ \text{руб/м}^3; \qquad C' = \frac{\Sigma z}{Q_z'}\ \text{и т. д.},$$

где:

Σz является величиной постоянной, а годовая производительность (Q_z) изменяется с изменением среднегодовой скорости ветра.

Следовательно, можем написать:

$$\frac{C'}{C} = \frac{Q_z}{Q_z'},$$

отнеся стоимость C к среднегодовой скорости ветра 3 м/сек. и напору H=10 м, находим для других среднегодовых скоростей ветра и напоров стоимости в относительных величинах (см. таблицу 37).

Стоимость в рублях получим умножением $C = \frac{\Sigma z}{Qz}$, подсчитанной для среднегодовой скорости ветра 3 м/сек. и напора H=10 м, на отвлечённые значения таблицы 37.

Ветроустановка ТВ-8 для водоснабжения и помола. Работа ветродвигателя на водоснабжение и помол представляет один из наиболее рациональных способов использования энергии ветра.

Необходимая работа на водоснабжение колхозов средних размеров не может полностью загрузить ветродвигатель ТВ-8; остаётся свыше 60% неиспользованной

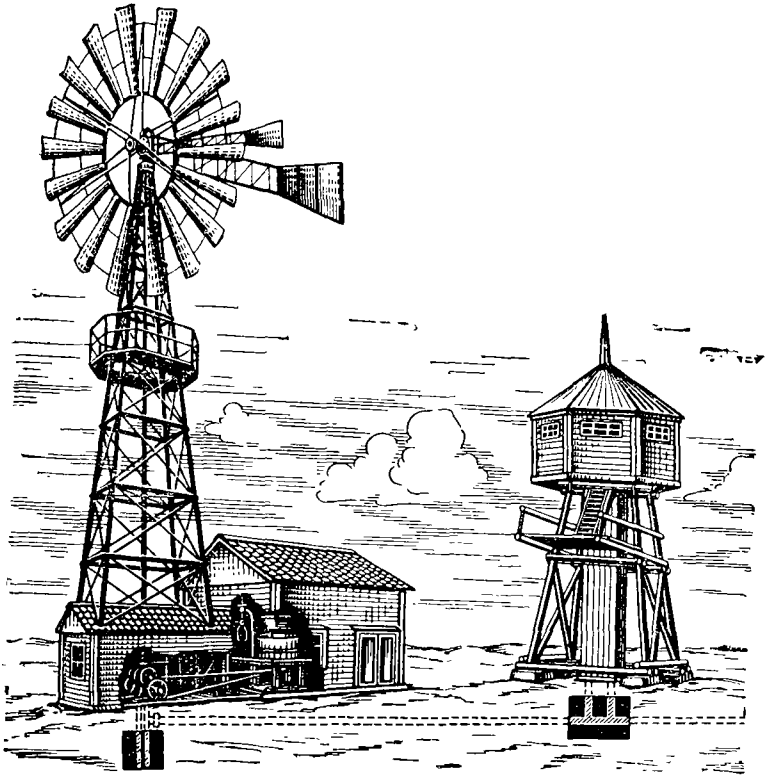


Рис. 266. Ветроустановка ТВ-8 для водоснабжения и помола.

Таблица 37

Относительные величины стоимости 1 м³ поднятой воды в зависимости от среднегодовых скоростей ветра и напора

Общий напор (в м)	Среднегодовые скорости ветра (м/сек.)			
	3	4	5	6
10	1	0,62	0,46	0,37
20	2	1,24	0,92	0,74
30	3	1,86	1,38	1,11
40	4	2,48	1,84	1,48
50	5	3,10	2,30	1,85
60	6	3,70	2,76	2,22
70	7	4,35	3,22	2,58
80	8	4,95	3,70	2,96

годовой мощности. Этот избыток, с целью снижения стоимости единицы выработки, необходимо использовать на каком-либо другом виде работы, для которого территориальное расположение ветроустановки не существенно. Помол является именно тем видом работ, который можно производить на колхозной усадьбе. Поэтому ветроустановку ТВ-8 для колхозного водоснабжения целесообразно делать с пристройкой мельницы. Общий вид такой ветроустановки показан на рис. 266. Ветродвигатель приводит в движение поршневой насос, диаметр которого устанавливается в зависимости от напора, и мельничный постав с жёрновом диаметром в 550 или 710 мм. Вода подаётся в бак ёмкостью в 20 м³, установленный на деревянной башне высотой около 8 м. Помещение для мельничного постава размером 6×6×3,5 м представляет постройку простейшего типа; стены рубленые или каркасные, а в южных степных районах саманные.

При работе ветродвигателя на поршневой насос с характеристикой, проходящей по лучу *1* (рис. 219), производительность получится согласно табл. 38.

Таблица 38

Производительность ветронасосной установки ТВ-8 с поршневым насосом

Общий напор (м)	Скорости ветра (м/сек.)					
	3	4	5	6	7	8 и более
	Литры в час					
10	7 030	13 100	20 000	25 400	29 000	33 400
20	3 500	6 550	10 000	12 700	14 500	16 700
30	2 340	4 350	6 700	8 500	9 700	11 100
40	1 750	3 260	5 000	6 340	7 250	8 350
50	1 400	2 620	4 000	5 080	5 800	6 680
60	1 170	2 180	3 340	4 230	4 820	5 570
70	1 000	1 870	2 860	3 640	4 140	4 770
80	880	1 630	2 500	3 180	3 630	4 180

Ветроустановка ТВ-8 для работы по приготовлению кормов. Ветродвигатель ТВ-8 может дать энергию с избытком для работы кормоприготовительных машин на 160 голов рогатого скота, 175 лошадей, 150 свиней и около 50 овец.

Ветродвигатель работает на трансмиссию (рис. 267), от которой посредством ременной передачи приводятся в движение жмыходробилка и зернодробилка, расположенные в отдельном помещении по одну сторону оси трансмиссии, и корнерезка с корнемойкой, расположенные также в отдельном помещении по другую сторону оси трансмиссии. Другие сельскохозяйственные машины расположены в отдельном помещении и приводятся в движение через контрпривод. Соломорезка устанавливается

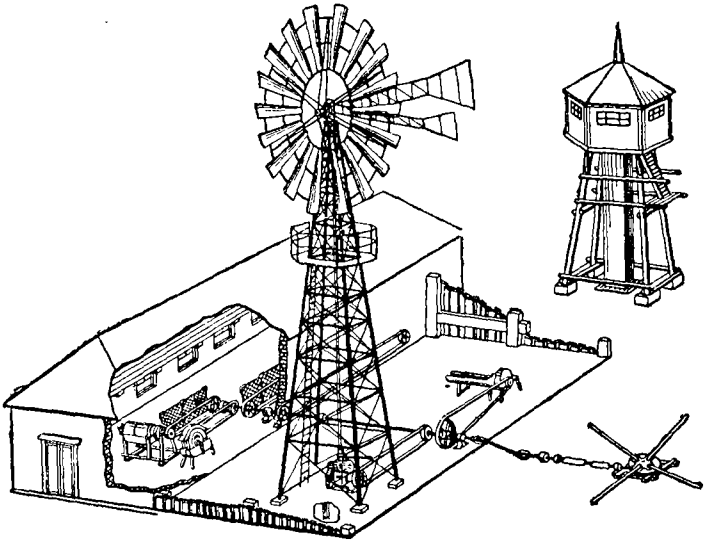


Рис. 267. Ветроустановка ТВ-8 для работы на кормоцех.

вне здания под навесом, где проходит часть трансмиссии, к которой присоединён посредством шарниров Гука вал конного привода. Последний устанавливается в качестве резерва для работы на корнерезку и корнемойку в дни безветрия, так как резку корнеплодов в запас делать нельзя ввиду их возможной порчи. Для подачи воды непосредственно в стойла к автопоилкам построена водонапорная башня с баком до 20 м³.

Количество энергии, потребное для цеха приготовления кормов, без помола зерна, составляет 4 940 л. с. ч. Между тем ветродвигатель ТВ-8 может дать в течение года в районе со среднегодовой скоростью ветра $V_0 = 4$ м/сек.

до 8 620 и в районах с V_0=6 м/сек. до 19 200 л. с.ч. Так как избыточная мощность ветродвигателя при его работе на кормоцех будет накопляться, главным образом, за счёт ночных часов суток, то, очевидно, эту мощность наиболее удобно будет использовать на помол. Поэтому к кормоцеху необходимо пристраивать мельницу с поставом диаметром в 550 или 710 мм.

Таблица 39

Характеристика работы ветроустановки ТВ-8 в животноводческом хозяйстве

Название продуктов переработки	Колич. потребного продукта (тонн)	Колич. потреб. энергии (л. с. ч.)	Расход энергии на переработку каждого рода продукта в % от всей энергии, которую может дать ветродвигатель в зависимости от среднегодовых скоростей ветра V_0		
			4 м/сек.	5 м/сек.	6 м/сек.
Дробление зерна	158,4	2 642	30,60	19,30	13,80
Дробление жмыха	185,8	920	10,70	6,80	4,80
Резка корнеплодов и мойка их	283,5	380	4,40	2,78	1,98
Резка соломы . .	75,7	340	3,90	2,50	1,76
Подъём воды . .	2 920	658	7,50	4,75	3,40
Итого . .		4 940	57,10%	36,13%	25,74%
Помол зерна за счет неиспользованной энергии на кормоцех при V_0= =4 м/сек. . . .	98	3 680	42,90	—	—
То же при V_0= =5 м/сек. . . .	238	8 889	—	63,87	—
То же при V_0= =6 м/сек. . . .	390	14 464	—	—	74,26
Итого . .	—	—	100%	100%	100%

Ветродвигатель может работать одновременно на кормоцех и на поршневой насос, если напор не превышает 50 м. При работе ветродвигателя на мельничный постав трансмиссия и поршневой насос должны быть отключены.

При сильном ветре, от 7 м/сек. и выше, в дополнение к мельничному поставу можно приключить поршневой насос.

Какое количество помола может дать в зависимости от среднегодовых скоростей ветра ветроустановка ТВ-8, работающая в основном на кормоцех среднего животноводческого хозяйства, видно из таблицы 39.

Из этой таблицы мы видим, что помол зерна при ветроустановке, работающей на несколько машин, не вполне загружающих ветродвигатель в течение суток, выполняет роль аккумулятора ветровой энергии, запасаемой в виде готовой продукции—муки.

§ 55. ОПЫТ ЭКСПЛОАТАЦИИ ВЕТРОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Ветроустановки, правильно смонтированные и имеющие надлежащий уход, работают долговечно и с высокой производительностью.

Например, в колхозе «Соцстройка», Пластуновского района, Краснодарского края, ветроустановка ТВ-8, работающая на молочнотоварной ферме, имеющей 250 голов крупного скота, способствовала повышению удоя коров на 25% и дала экономию на рабочей силе 21 000 рублей.

Совхоз № 612 в станице Донской, Краснодарского края, с установкой трёх ветродвигателей ТВ-8 для водоснабжения и подготовки кормов на 3 000 голов скота имеет ежегодную экономию на сокращении расходов по рабочей силе до 32 400 рублей. Примерно, такая же экономия получена и в других колхозах и совхозах, установивших в своих хозяйствах ветродвигатели [46].

На рис. 268 показана ветронасосная установка с ветродвигателем ТВ-5, построенная в колхозе села Лески, Киевской области, на стоянке полевой бригады. Эта ветроустановка, благодаря правильной эксплоатации, работает эффективно в течение ряда лет. Ветродвигатель с поршневым насосом $3^{3}/_{4}''$ при ходе поршня 400 мм поднимает воду из колодца в бак ёмкостью в 19,5 м³. Колодец имеет глубину 51 м; из них 24 м составляет бетонная шахта и 27 м скважина. Высота столба воды равна 25,5 м, высота подъёма — 30 м, считая от динамического уровня. В длительные периоды ветрового затишья вода под-

нимается конным приводом на две лошади. Вал конного привода непосредственно соединён с валом лебёдки шарниром Гука. Ход поршня насоса при работе от лебёдки — 200 мм.



Рис. 268. Ветронасосная установка ТВ-5 в селе Лески, Киевской области.

Вода расходуется на питьевые нужды около 700 колхозников, работающих в полевых бригадах, а также для водопоя 260 голов скота. Кроме того, один месяц в весенний период производится расход воды на поливку огорода (подкормка).

До постройки колодца и ветронасосной установки на подвозе воды к потребителям ежедневно было занято 22 лошади. После постройки ветронасосной установки для доставки воды потребителям стало хватать семи лошадей.

Ветросиловая лаборатория ВИМЭ в течение года вела наблюдения на этой установке. Производительность

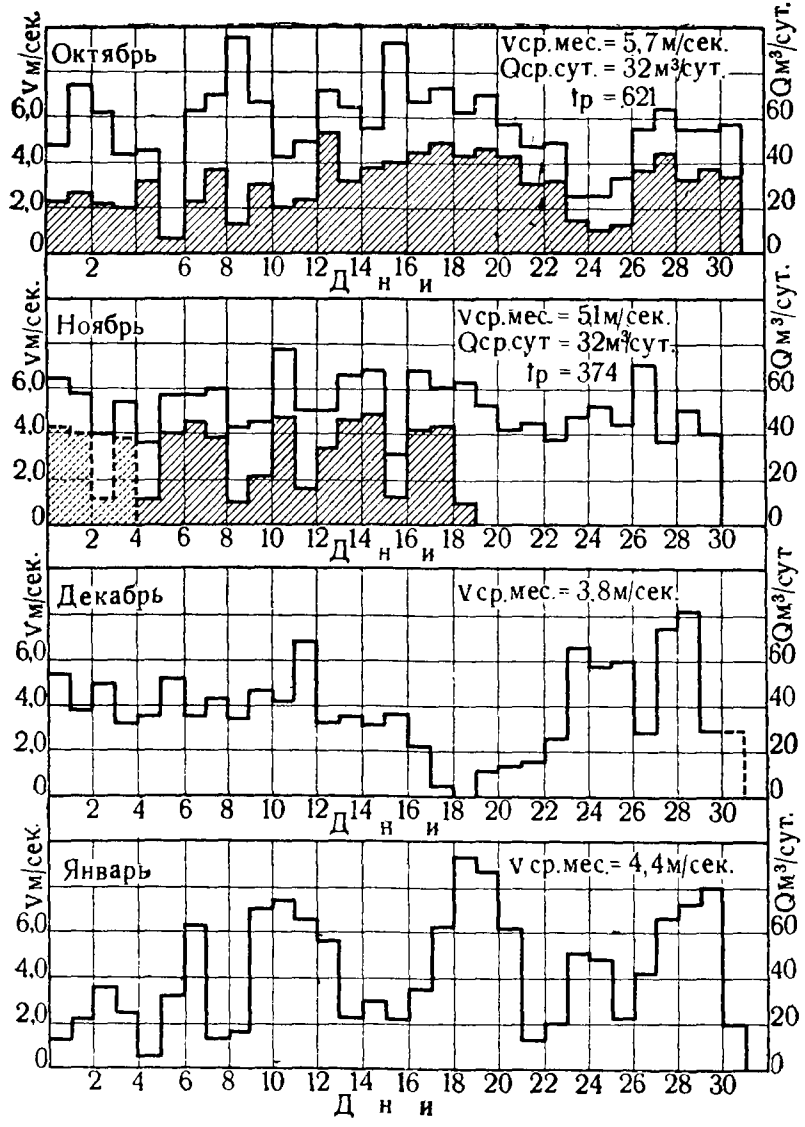


Рис. 269. График годовой работы ветронасосной установки ТВ-5, показанной на рисунке 268.

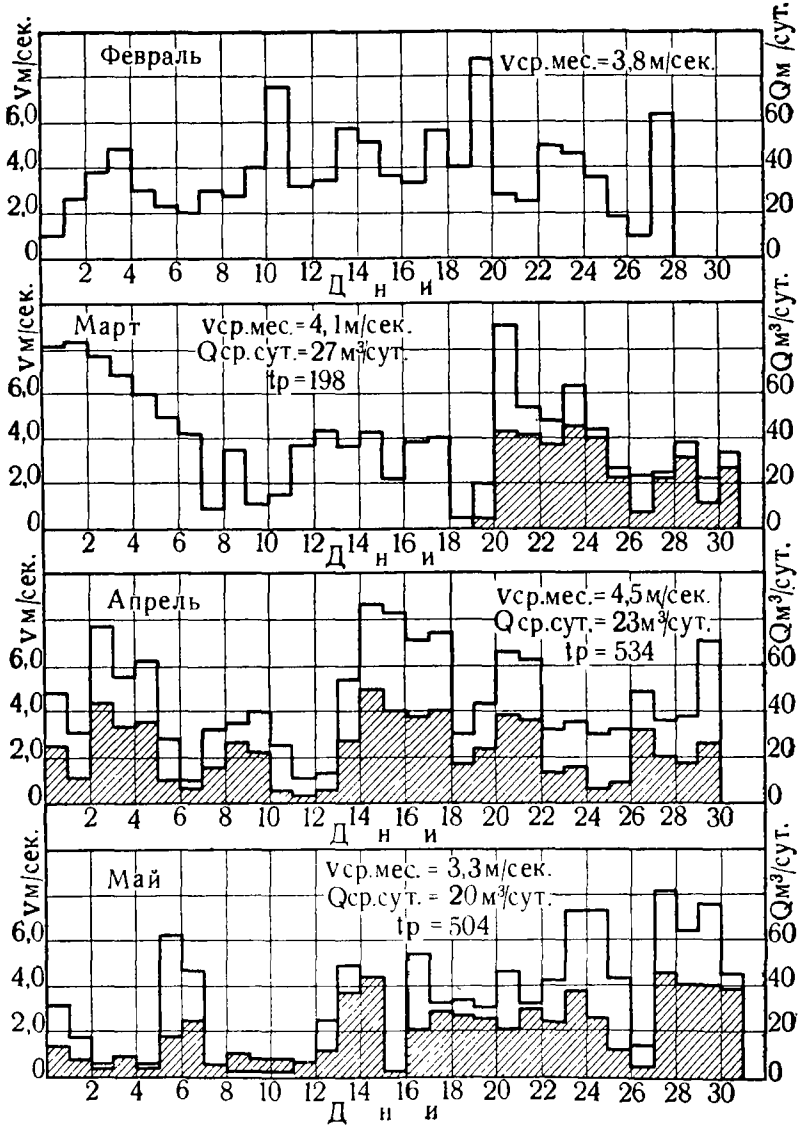


Рис. 269. График годовой работы ветронасосной установки ТВ-5, показанной на рисунке 268 (продолжение).

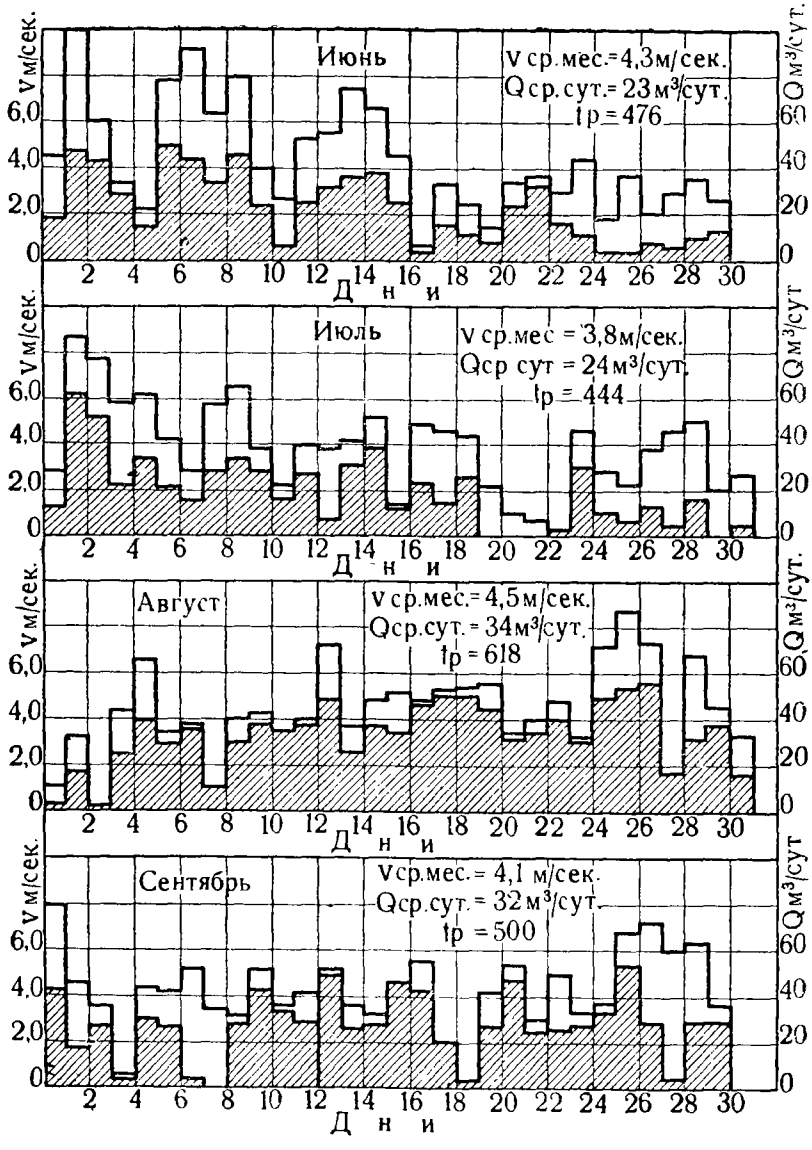


Рис. 269. График годовой работы ветронасосной установки ТВ-5, показанной на рисунке 268 (продолжение).

определялась по счётчику числа ходов штанги насоса, а скорость ветра— с помощью анемометра 4 раза в сутки.

Наблюдения обработаны в виде графиков, приведённых на рис. 269, которые построены за период с 1 октября по 30 сентября — за 12 месяцев. Суточная производительность установки показана заштрихованными площадками. Ломаная линия над заштрихованными площадками показывает изменение среднесуточной скорости ветра.

Среднесуточная производительность этой ветроустановки составляла около 30 м³ при среднемесячной скорости ветра в 5 м/сек. Работа конного привода на две лошади составляла около 7,5% времени от годового числа часов работы ветродвигателя; коэфициент эксплоатации ветроустановки составлял 73%.

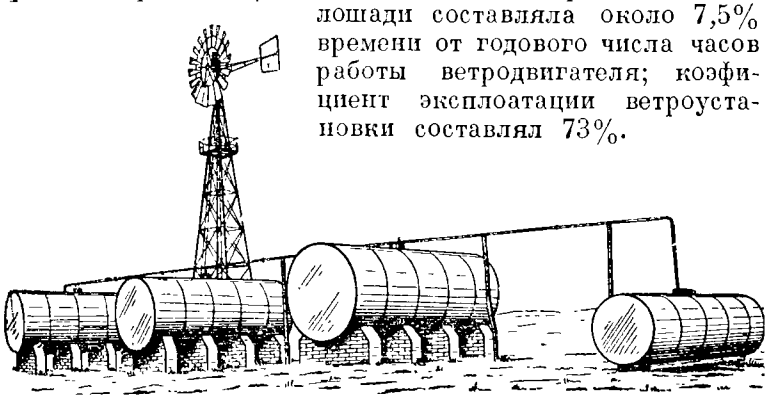


Рис. 270. Ветроустановка ТВ-5 для перекачки горючего.

Ветронасосные установки применяются в сельском хозяйстве иногда для перекачки горючего.

Например, одна из МТС Сталинградской области имеет ветронасосную установку с ветродвигателем ТВ-5 для перекачки горючего в запасные цистерны (рис. 270). Хозяйству требуется около 1 000 т горючего, тогда как ветродвигатель может за год перекачать до 15 000 т. Несмотря на столь слабую загрузку ветродвигателя, хозяйству всё же выгодно эксплоатировать эту установку. Кроме того, ветроустановка безопасна в пожарном отношении.

Ветронасосные установки применяются и для производственных целей в местной промышленности. Например, в Киевской области на одном из кирпичных заводов имеется ветронасосная установка для подачи воды на замеску глины. Общее количество потребной воды — 14 м³ в сутки.

Ветродвигатель ТВ-5, при наличии бака ёмкостью в 30 м³, почти полностью обеспечивает производство водою.

Для подачи большого количества воды из колодцев с высоким дебитом колхозы применяют ветродвигатель ТВ-8. На рис. 271 показана ветронасосная установка ТВ-8, построенная в колхозе Чесменского района, Челябинской области. Эта ветроустановка поднимает воду поршневым насосом $d=5^3/_4''$, $h=450$ мм из колодца с дебитом до 11 м³/час в два деревянных бака по 28 м³ каждый. Эти баки уста-

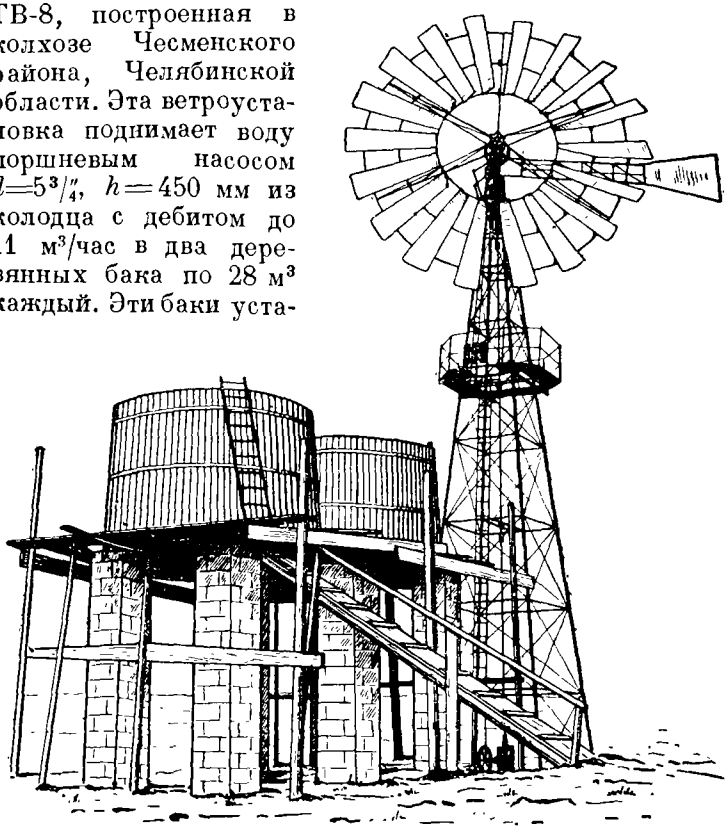


Рис. 271. Ветронасосная установка ТВ-8 в колхозе Чесменского района, Челябинской области.

новлены на шести железобетонных столбах высотою в 4 м и имеют каркасную будку с утеплёнными стенками (когда делался фотоснимок, будка не была закончена, поэтому на рисунке её нет). Эта ветроустановка снабжает водою колхоз в 63 двора, который имеет: крупного рогатого скота — 353 головы; молодняка — 98 го-

лов; свиней — 163 головы; овец — 809 голов и лошадей — 77. Общее количество потребной воды составляет около 55 м³ в сутки. Ветронасосная установка ТВ-8 вполне соответствует данному расходу воды; с фактическим напором в 17 м она подаёт:

при скоростях ветра м/сек.	3	4	5	6
производительность м³ в час	4	6,5	9,18	12,5

§ 56. ВЕТРООРОСИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

В зависимости от характера источников воды, положения орошаемой площади относительно этих источников, климатических и почвенных условий, а также сельскохозяйственных задач и экономических возможностей различаются следующие виды оросительных мелиораций [14].

I. Постоянно действующее орошение из рек, водохранилищ или грунтовых вод самотёчное и механическое.

II. Периодически действующее орошение (паводковое) производится ирригационными каналами (в период паводков в реке) и лиманное — затоплением путём задержания стока полых (весенних) вод.

III. Увлажнительные работы — задержание и использование на месте выпадающих атмосферных осадков.

IV. Обводнение местности при помощи устройства запасных водохранилищ (прудов), используемых для хозяйственных нужд или орошения.

Постоянно действующие оросительные мелиорации, в зависимости от положения орошаемой площади относительно источника воды, разделяются на две основные системы: самотёчную и механическую.

Самотёчная система возможна вблизи рек с забором воды в главный или магистральный оросительный канал, трассирование которого с определённым уклоном позволяет обеспечить возможность самотёчной подачи воды на земли, расположенные между каналом и рекою.

Оросительная система, где подъём воды на орошаемые земли проводится с помощью насосных установок, называется механической системой орошения. Эта система позволяет приспособляться к сложному рельефу местности и использовать грунтовые

воды, что очень важно для степных удалённых от рек районов, где единственным источником воды являются колодцы и скважины.

Использование ветродвигателей для орошения ещё не получило своего развития, тем не менее ветродвигатели могут иметь весьма большое значение в этом деле.

Нельзя сказать, чтобы ветродвигатели могли быть широко использованы на орошение любых культур, ибо многие из них требуют строго определённых сроков полива и определённой величины гидромодуля, что ветродвигатели из-за непостоянства энергии ветра не могут обеспечить. Сооружение же водоёмов для запаса воды, расходуемой в дни безветрия, требует больших затрат. Поэтому, при современном состоянии ветротехники, можно рекомендовать применение ветродвигателей на орошение таких культур, которые меньше всего требуют строго определённых сроков полива. Наиболее удобны для орошения с помощью ветродвигателей небольшие участки в 10—25 га, а также сады. Такие участки можно орошать как из рек и открытых водоёмов, так и из скважин и колодцев, если дебит последних соответствует потребному для орошения количеству воды.

Расход воды на орошение для разных районов и разных культур определяется на основании существующих в агротехнике норм. Количество воды в куб. метрах, необходимое для орошения одного гектара данной культуры за сезон, называют оросительной нормой. Величина этой нормы изменяется в зависимости от района и орошаемой культуры. Например, в Украино-Крымском районе оросительная норма пшеницы равна 2 500 м³/га нетто, а для Средней Азии и Южного Казахстана — 4 200 м³/га нетто. В этих же районах для овощей оросительная норма соответственно равна 3 000 и 5 000 м³/га нетто.

Оросительная норма выполняется за несколько приёмов в установленные сроки полива.

Количество воды в куб. метрах, подаваемое на 1 га за один полив, называют поливной нормой.

Величина поливной нормы различна и зависит от многих факторов: климата, почвы, естественных осадков, культуры и т. п. Например, в Крыму поливная норма для глинистых и суглинистых почв равна от 400 до 600 м³/га, а для глинистых солонцеватых почв — от 300 до 400 м³/га. По культурам: для помидоров поливная

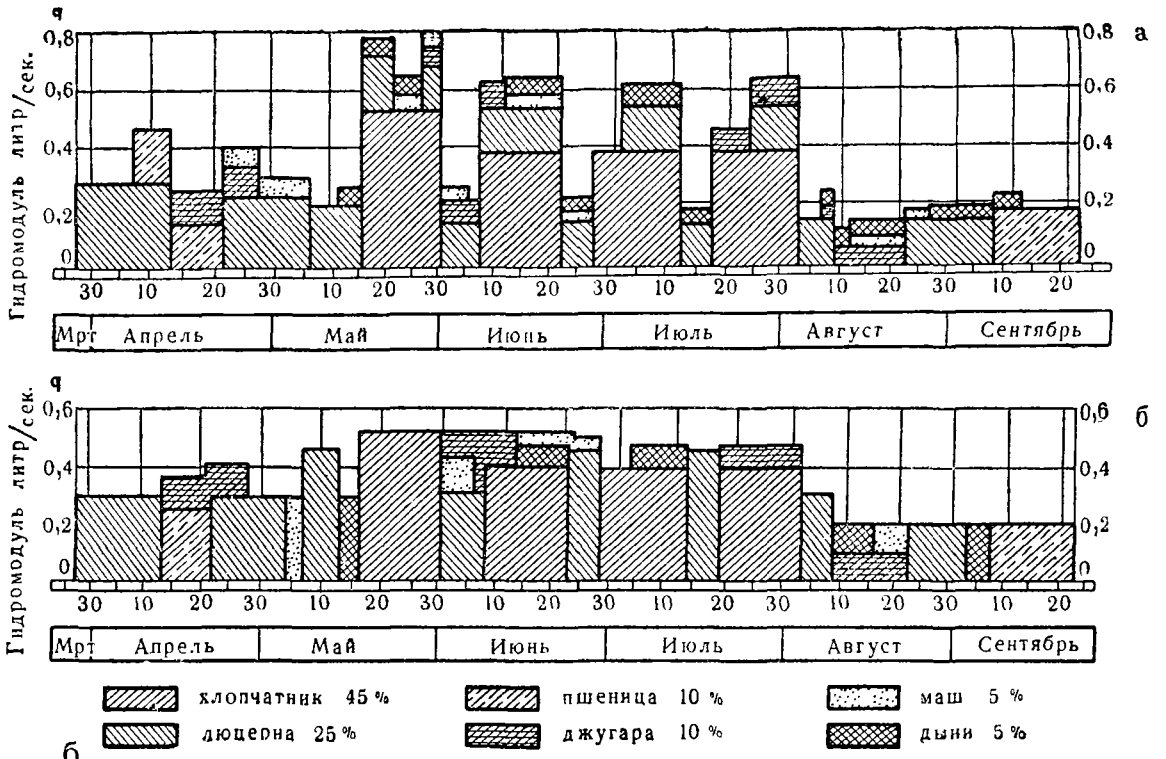


Рис. 272. Графики гидромодуля:
а — неукомплектованный; *б* — укомплектованный.

норма равна от 300 до 500 м³/га, а для картофеля — от 400 до 600 м³/га.

Секундный расход воды, полученный от деления поливной нормы на продолжительность полива в секундах, называют поливным модулем. Умножив эту величину на процентный состав данной культуры в севообороте, получим оросительный модуль, или гидромодуль, данной культуры.



Рис. 273. Маломощная ветрооросительная установка.

Гидромодуль для комплекса орошаемых культур изображают графически (рис. 272). На оси ординат откладывают секундные расходы воды в одновременные сроки, а по оси абсцисс—сроки полива; в результате получают предварительный график полива. Так как предварительный график имеет пики расхода воды, неудобные для нагрузки сети каналов и насосной станции (см. верхний график *а*), то этот график укомплектовывают, т. е. выравнивают, уничтожая, по возможности, пики и провалы расхода воды. В результате получают более ровный график гидромодуля, показанный на рис. 272, внизу. Этот график даёт не только сроки, которые необходимо соблюдать при поливах, но и характер нагрузки

насосной станции. Этим графиком следует руководствоваться при определении мощности станции.

Определив общую мощность ветронасосной установки, необходимо распределить её по отдельным орошаемым участкам с учётом месторасположения и рельефа каждого участка. При выборе типа ветродвигателя необходимо руководствоваться наличием ветродвигателей, выпускаемых нашей промышленностью.

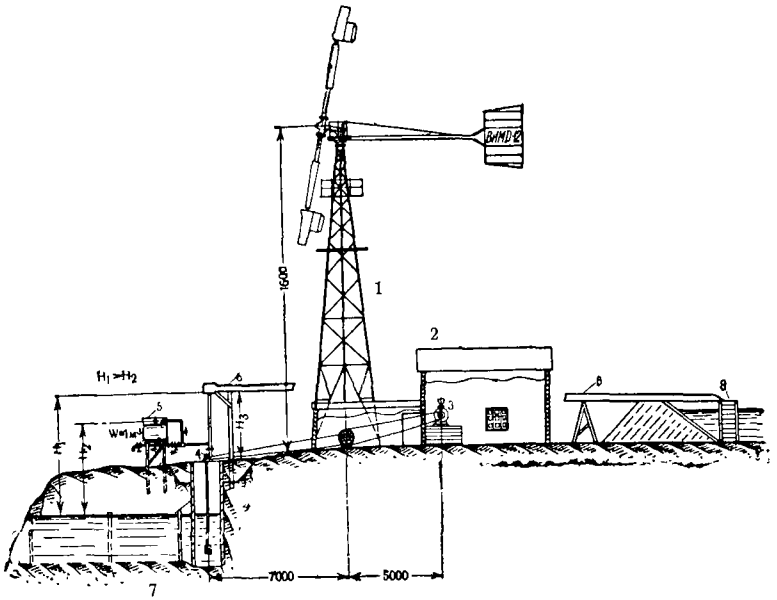


Рис. 274. Конструктивная схема ветрооросительной установки с ветродвигателем ВИМЭ Д-12:

1 — ветродвигатель; *2* — мельница; *3* — мельничный постав — «Фермер № 2»; *4* — центробежный насос; *5* — устройство для автоматической заливки насоса; *6* — жёлоб для подвода воды к водоёму; *7* — водозабор; *8* — водоём.

Из существующих типов ветродвигателей наиболее подходит для целей орошения быстроходный ветродвигатель ВИМЭ Д-12 мощностью в 14 л. с. и ветродвигатель ВИМЭ-ГУСМП-Д-18 на 38 л. с. при скорости ветра 8 м/сек. Их можно приспособить для работы с центробежными насосами любой системы.

Для орошения небольших участков земли, до 5 га, наиболее удобен ветродвигатель ТВ-8, который может одно-

временно приводить в действие поршневой и центробежный насосы. Наличие поршневого насоса обеспечивает заливку центробежного насоса без дополнительных приспособлений.

На рис. 273 показана маломощная ветрооросительная установка, мощностью в 2—3 л. с., поднимающая воду в водоём, откуда она распределяется по участку. Подобные ветроустановки работают с поршневыми насосами и забирают воду из скважин.

Такие ветроустановки применялись в южных областях СССР для орошения садов. В большом количестве их можно встретить в США.

Одним из сооружений ветронасосной установки является бассейн для запаса воды с трубами, подводящими воду к участку.

На рис. 274 показана конструктивная схема ветрооросительной установки с ветродвигателем Д-12, подающей воду из открытого водоёма в жёлоб, по которому она самотёком поступает в бассейн, расположенный в более высокой точке орошаемого участка.

Открытый жёлоб из досок для подачи воды самотёком представляет дешёвое сооружение, однако страдает большими недостатками. Вследствие прерывности работы, доски жёлоба высыхают, и между ними в стыках образуются щели, сквозь которые уходит вода, и жёлоб работает с большими потерями.

Для выпуска воды из бассейна иногда ставят деревянные трубы, а также оцинкованные железные.

Не менее сложный вопрос в орошении представляет бассейн для запаса воды. Емкость бассейна, а также мощность ветродвигателя, вполне обеспечивающие запас воды на все штилевые дни, согласно расчётам, изложенным в §53 [см. уравнение (308)], получаются чрезвычайно большие.

Емкость водохранилища получается большой даже в том случае, если её рассчитать на 1 полив, умножив поливную норму на число гектаров орошаемого участка.

Основным недостатком открытых водохранилищ является, помимо просачивания воды в грунт, большая испаряемость, которая составляет в среднем от 500 до 1 000 мм толщины зеркала воды за сезон, в зависимости от климата.

Эти потери могут быть уменьшены, если защитить водохранилище от ветра какими-либо насаждениями. При

этом на самой дамбе, образующей стенки водохранилища, деревья насаждать не рекомендуется, так как корни деревьев могут ослаблять грунт, увеличивая потери на просачивание воды.

Опыт применения ветродвигателей для орошения в СССР имеется лишь на садовых и огородных культурах небольших участков.



Рис. 275. Ветрооросительная установка ТВ-8 в Саратовской области.

Для этого на площади, возвышающейся над участком сада или огорода, бурят скважину, а над нею монтируют многолопастный ветродвигатель и рядом строят водоём.

Ветродвигатель качает воду всё время, когда есть ветер с достаточной скоростью, и останавливается только при осмотре и ремонте ветроустановки. Таким образом, ветродвигатель может запасти воду задолго до наступления оросительного сезона.

На рис. 275 показана ветрооросительная установка ТВ-8, построенная в колхозе «Пролетарская воля», Саратовской области. Ветродвигатель работает на центробежный насос $d=4''$ и поршневой $d=5\frac{3}{4}''$, который при слабых ветрах работает один, а при сильных — вместе с

центробежным насосом. Поршневой насос в данном случае обеспечивает заливку центробежного насоса. Вода из реки подаётся в деревянный жёлоб, из которого самотёком поступает на орошаемый участок сада в 10 га. Когда ветроустановка не подаёт воду на орошение, ветродвигатель работает на жерновой постав с диаметром жёрнова 810 мм (рис. 276).

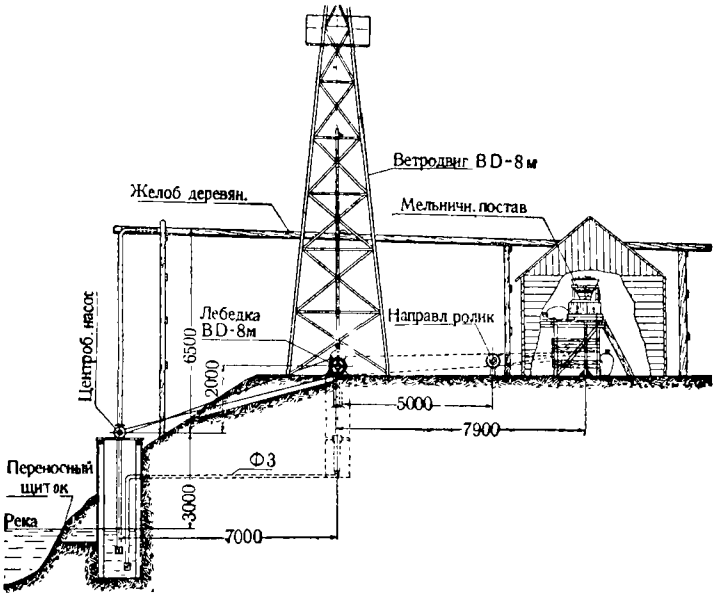


Рис. 276. Конструктивная схема ветроустановки, показанной на рисунке 275.

Заслуживает внимания опыт орошения огородных культур, который проводится в Гурьевском районе вдоль реки Урала, где установлено свыше 800 штук кустарных ветрооросительных установок. Маломощные кустарные ветродвигатели с помощью поршневых насосов качают воду из реки непосредственно на орошаемые участки.

ГЛАВА XV

ВЕТРЯНЫЕ МЕЛЬНИЦЫ

§ 57. ТИПЫ ВЕТРЯНЫХ МЕЛЬНИЦ

Ветряными мельницами называют деревянные ветроустановки кустарного изготовления, работающие на один или два жерновых постава.

Существуют два основных типа ветряных мельниц: козловые и шатровые.

Козловая ветряная мельница (рис. 277) имеет следующие конструктивные особенности.

1. Здание мельницы с мельничным оборудованием свободно опирается своими нижними балками на фундамент, в центре которого заделан стояк. Около этого стояка мельницу можно поворачивать, когда необходимо установить ветроколесо на ветер, либо вывести его из-под ветра. У некоторых старых небольших мельниц фундамент делали в виде козел или наклонных стульев, между которыми был закреплён стояк. Отсюда и произошло название козловой ветряной мельницы.

2. Вращение ветроколеса передаётся жёрнову через одноступенчатую передачу. Ведущее кулачковое колесо главного вала приключено к шестерне, насаженной непосредственно на веретено жёрнова.

3. При установе ветроколеса на ветер, поворачивают всё здание мельницы со всем мельничным оборудованием; при этом необходимо затрачивать большое мускульное усилие при повороте мельницы на ветер или выводе её из-под ветра.

4. Здание мельницы, свободно опирающееся на фундамент, неустойчиво, что служит препятствием к поднятию крыльев на бо́льшую высоту и к увеличению их размаха.

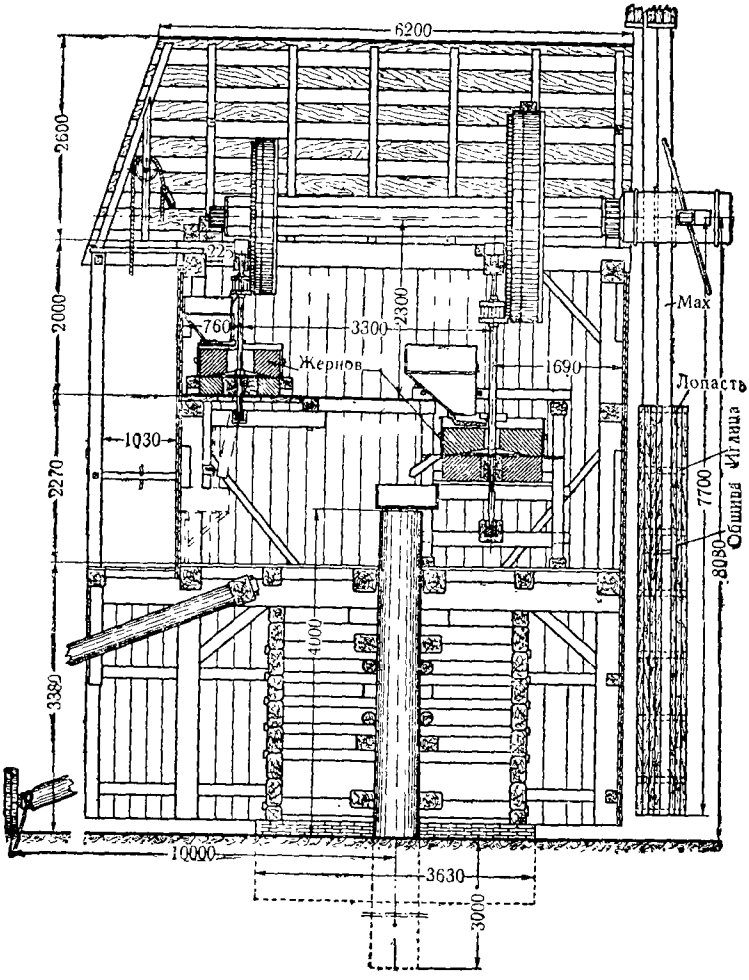


Рис. 277. Разрез козловой ветряной мельницы.

Достоинство козловых ветряных мельниц — простота их устройства. При одной передаче от ветроколеса к жёрнову требуется очень мало металлических деталей; вертикальный вал отсутствует, поэтому можно постройку таких мельниц осуществить силами самих колхозников.

Основной недостаток конструкций козловых ветряных мельниц — необходимость поворота всего здания мель-

ницы вместе с оборудованием при установке крыльев на ветер. Отсюда вытекают следующие недостатки и неудобства этой конструкции.

1. Затрата больших усилий при повороте мельницы на ветер.

2. Нарушение точности пригонки различных частей мельницы, а также опор жерновов, возникающее при установе ветроколеса на ветер, с одновременным поворотом здания вместе со всей системой передачи.

3. Ограничение высоты положения вала ветроколеса, так как с увеличением этой высоты возрастает высота всего здания и ухудшается его устойчивость. По этой же причине диаметры ветроколёс этих мельниц не делают больше 15 м.

4. В силу своего конструктивного устройства козловая мельница не может быть построена с раскрытыми стенами, допускающими свободное протекание ветра.

Шатровая ветряная мельница (рис. 278) имеет обычно восьмигранную башню, обшитую снаружи тёсом. В этой башне размещается всё мельничное оборудование. Верх башни заканчивается ободом, на который свободно опирается рама из толстых брусков. На раме смонтирован вал ветроколеса с подшипниками и закреплены стропила крыши, которую строят в виде шатра; отсюда и произошло название шатровой ветряной мельницы. Шатёр можно поворачивать при установе ветроколеса на ветер или выводе его из-под ветра.

Конструкция шатровой ветряной мельницы имеет следующие особенности.

1. Шатёр легче, чем корпус козловой мельницы, поэтому для поворачивания шатра при установе ветроколеса на ветер требуется меньше усилий, чем у козловых мельниц.

2. Башня шатровой мельницы допускает возможность вынести ветроколесо на большую высоту.

3. У большинства шатровых мельниц вращение жёрнова осуществляется через двухступенчатую передачу.

§ 58. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЕТРЯНЫХ МЕЛЬНИЦ

Шатровые ветряные мельницы, с конструктивной точки зрения, значительно совершеннее козловых. Благодаря тому что шатёр поворачивать легче, чем всё здание

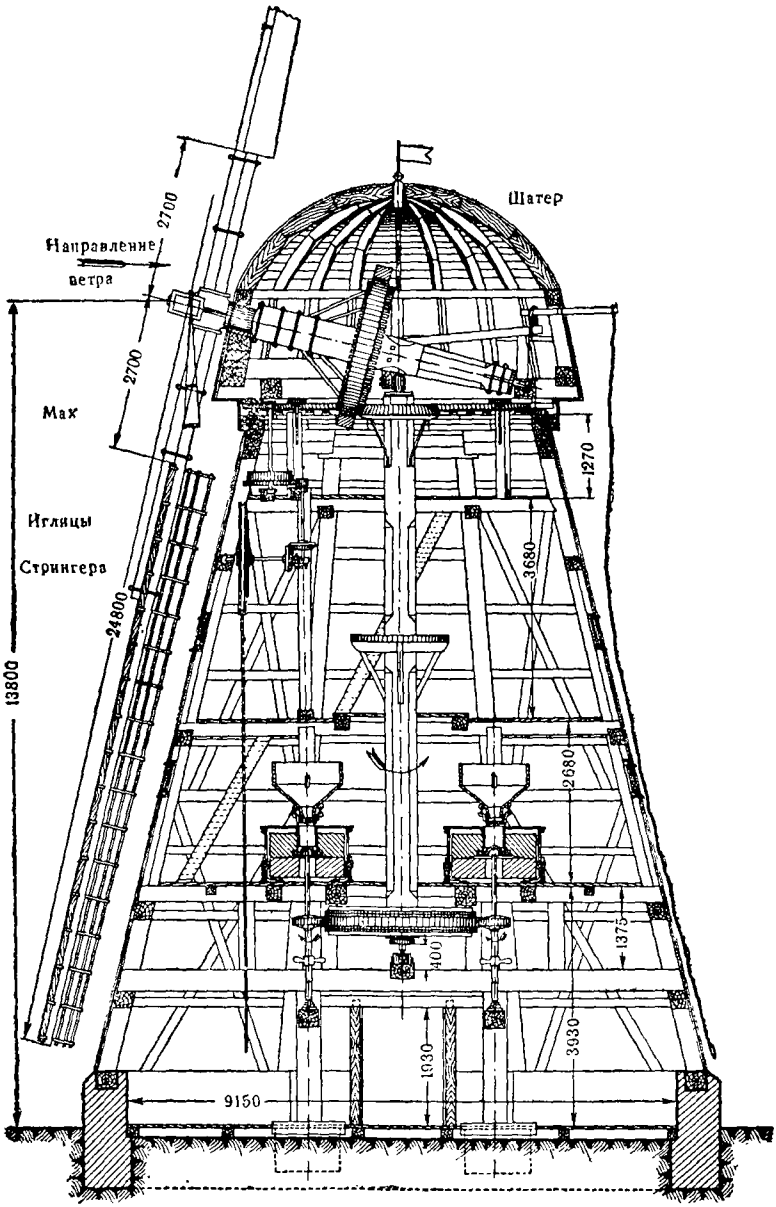


Рис. 278. Разрез шатровой ветряной мельницы.

мельницы, особенно если шатёр поставить на ролики, возможно автоматизировать установ на ветер ветроколеса шатровых мельниц или с помощью хвоста или с помощью виндроз и иных устройств. Кроме того, у этих мельниц возможен вынос ветроколеса на большую высоту за счёт одной лишъ вышки, построенной в виде фермы, что не осуществимо у козловой ветряной мельницы. Это даёт полную возможность делать башню шатровых мельниц раскрытой, оставляя закрытым лишь помещение внизу, где смонтировано мельничное оборудование. Однако следует иметь в виду, что раскрытая башня менее долговечна. Поэтому необходимо предохранить дерево от преждевременного разрушения, покрывая его листовым железом, толем и т. п. Если покрытие не устраивается, то целесообразно части, подвергающиеся влиянию атмосферных осадков, зашпаклевать и покрасить.

Шатровые ветряные мельницы различаются лишь способом поворота шатра и схемой расположения поставов.

Поворот шатра у некоторых простейших ветряных мельниц осуществляется вручную, с помощью так называемого водила. Обычно у таких мельниц шатёр при поворотах скользит на деревянных брусках, при этом наибольшие напряжения испытывает башня. Крутящий момент, преодолевающий сопротивление трения в опоре шатра, расшатывает соединения башни, перекашивает опоры и т. п.

Более совершенной является мельница, у которой шатёр имеет рельс, опирающийся на ролики, или, наоборот, ролики, опирающиеся на рельс, а поворот осуществляется передачей с двумя или тремя парами шестерён. Эта передача вращается либо вручную, как сделано у ветряной мельницы, показанной на рис. 278, либо виндрозами, монтируемыми позади шатра, на консолях (рис. 279).

Виндрозы, применяемые обычно только для установа ветроколеса на ветер, удобны лишь для ветряных мельниц, имеющих либо парусные крылья, либо крылья со створками, позволяющими сокращать рабочие поверхности их, либо, наконец, крылья с лопастями, устанавливающимися ребром к ветру.

Если ветроколесо построено с жёстко закреплёнными лопастями, то шатёр целесообразнее поворачивать вручную, так как при этом имеется возможность выводить ветроколесо из-под ветра и тогда, когда работа ветряной мельницы не требуется. Однако в этом случае ветряная

мельница, будучи выведена из-под ветра, должна быть поставлена на тормоз, так как при стоянке ветер может зайти спереди ветроколеса и оно, не будучи заторможено, может пойти на разнос. Ветровые нагрузки вредно сказываются на ветряной мельнице именно тогда, когда она не работает при наличии ветра, не говоря уже о том, что простой ветряной мельницы во время ветра вообще нежелателен. Поэтому, при правильной организации эксплоатации ветряной мельницы, к тормозу прибегают, оче-

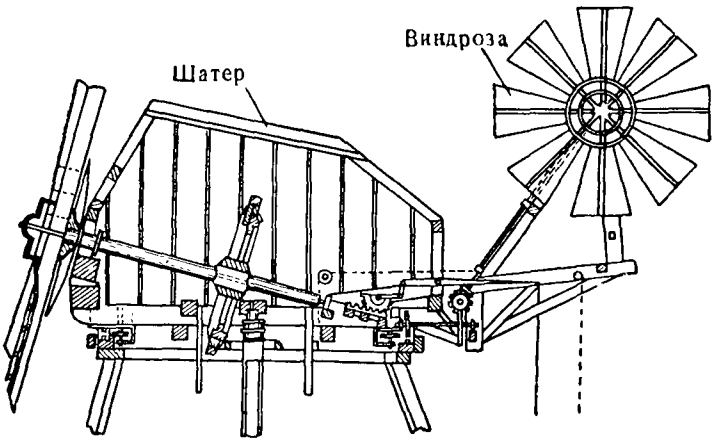


Рис. 279. Виндрозы для установа ветряной мельницы на ветер.

видно, лишь в исключительных случаях. Отсюда видим, что в данном случае ручной способ позноляет лучше регулировать работу ветряной мельницы, чем виндрозы, только устанавливающие ветроколесо по ветру. Вручную можно поставить ветроколесо в любое положение по отношению к ветру, что удобно для регулирования мощности ветряной мельницы при сильных ветрах.

Недостатки крыльев ветряных мельниц. У простейших ветряных мельниц крылья делаются с постоянным углом заклинения лопасти, имеющим величину от 14 до 15°. Коэфициент использования энергии ветра такими крыльями примерно в полтора раза меньше, чем у крыльев с винтовой лопастью. Но крылья с постоянным углом заклинения значительно проще изготовить.

Та или иная форма крыла обычно выбиралась не из теоретических соображений, а в зависимости от степени

практических познаний мастера, строившего данную ветряную мельницу.

У некоторых шатровых мельниц крылья делают с переменным углом заклинения: на конце от 0 до 10° и у основания от 16 до 30°, а именно:

на внешнем конце крыла	10°
на расстоянии $^2/_3R$	15°
на расстоянии $^1/_3R$	20°
на внутреннем конце — около $^1/_5R$ . .	30°

где R — длина крыла, считая от оси вала до конца крыла.

Крылья являются основной частью ветряной мельницы. Чем лучше их состояние, тем больше производительность мельницы, если, конечно, другие части (жернова, передача) также в хорошем состоянии. Между тем, часто можно видеть крылья, находящиеся в плохом состоянии. Щели, грубо пригнанный тёс на досчатом крыле, обрывки полотна на парусном крыле снижают в несколько раз подъёмную силу крыльев, а следовательно, во столько же раз и производительность ветряной мельницы. Одно только приведение крыльев работающих ветряных мельниц в тот вид, который требует сама их конструкция, могло бы значительно повысить производительность без каких бы то ни было сложных конструктивных переделок. Если же поставить крылья с правильными углами заклинения поперечных брусков лопасти, называемых иглицами, образующими винтовую лопасть, то производительность повысится более чем в два раза. Крылья же с обтекаемым профилем и правильными углами заклинения лопастей, в соответствии с необходимой быстроходностью, могут повысить производительность в 3—4 раза.

§ 59. ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ СТАРЫХ ВЕТРЯНЫХ МЕЛЬНИЦ

Повышения мощности существующих старых ветряных мельниц можно достигнуть простейшей реконструкцией крыльев. Испытания некоторых действующих ветряных мельниц с измерениями скорости ветра, оборотов ветроколеса и производительности показали, что они работают с очень низким коэфициентом использования энергии ветра — от 4 до 10%.

Результат испытаний трёх ветряных мельниц приведён в таблице 40.

Таблица 40

Эксплоатационные показатели старых ветряных мельниц

Название показателей	Скорости ветра (м/сек.)								
	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Козловая ветряная мельница Д=15,4 м									
Производительность (кг/час) . .	6,0	30	60	96	138	180	—	—	—
Обороты ветроколеса в минуту .	6	8	10	12	13	15	—	—	—
Обороты жёрнова 8/4	50	74	90	108	122	135	—	—	—
Шатровая ветряная мельница Д=24,8 м с парусными крыльями									
Производительность (кг/час) . .	—	—	90	108	125	165	198	246	300
Обороты ветроколеса в минуту .	—	—	5,6	6	6,4	7,0	8,2	8,8	9,8
Обороты жёрнова 8/4	—	—	55	59	63	69	81	87	97
Шатровая ветряная мельница дерево-металлическая Д=20 м									
Производительность (кг/час) . .	72	108	150	192	246	300	—	—	—
Обороты ветроколеса в минуту .	8	10,5	12,7	14	15	15,8	—	—	—
Обороты жёрнова 6/4	45	58	70	78	83	88	—	—	—
Обороты жёрнова 8/4	38	50	61	67	72	76	—	—	—

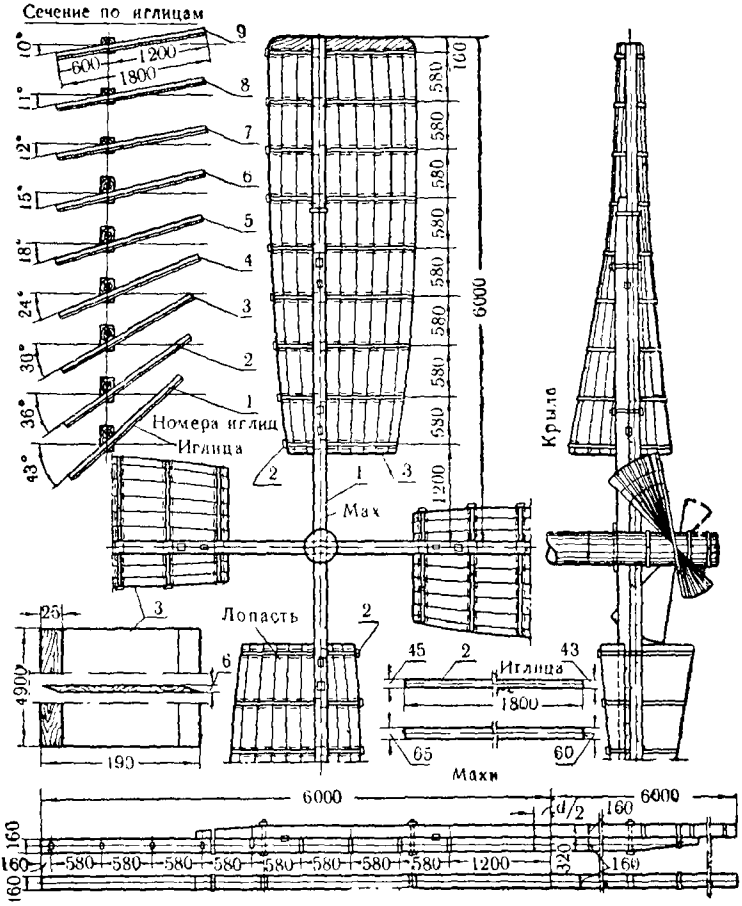


Рис. 280. Конструкция крыльев с плосковинтовыми лопастями.

Основной причиной низкой производительности существующих ветряных мельниц является неудовлетворительное состояние крыльев. Надлежащий ремонт этих крыльев или замена их новыми крыльями более правильной формы может повысить производительность старых ветряных мельниц более чем в три раза.

Результаты испытаний старых ветряных мельниц послужили поводом к постановке задачи о реконструкции

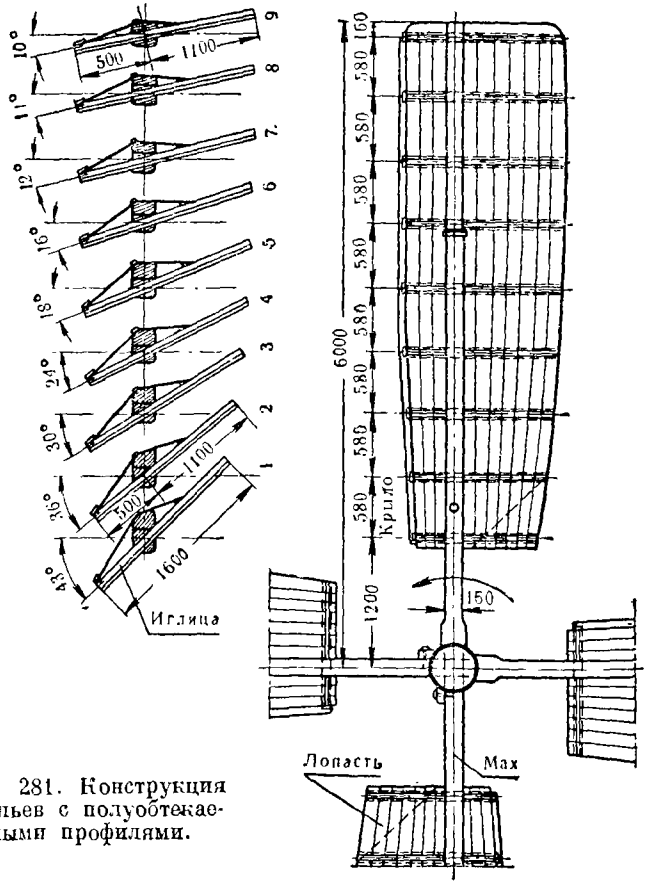


Рис. 281. Конструкция крыльев с полуобтекаемыми профилями.

старых ветряных мельниц с целью повышения их мощности.

Опытная реконструкция ветряных мельниц была проведена под руководством автора в 1941 — 1942 гг. в Чувашской АССР, для чего в ВИМЭ была разработана простейшая конструкция новых крыльев, отличающихся малой быстроходностью и относительно высоким коэфициентом использования энергии ветра. Модели этих крыльев были продуты в аэродинамической трубе ВИСХОМа и на вышке ЦАГИ.

На рис. 280 показана конструкция крыльев с плосковинтовой лопастью, а на рис. 281 конструкция крыльев

с полуобтекаемым профилем. Аэродинамические характеристики при углах заклинения конца лопасти $\varphi=0°$, $\varphi=10°$ и $\varphi=20°$ для полуобтекаемых крыльев приведены на рис. 282. Понятно, что легко создать крылья с коэффициентом использования энергии ветра от 0,35 до 0,40, но такие крылья отличались бы высокой быстроходностью и требовали бы заводского производства. Существующие же ветряные мельницы отличаются малой быстроходностью; их передача с деревянными зубьями колёс и цевок шестерён рассчитана на быстроходность ветроколеса $Z_n=2{,}0-2{,}5$.

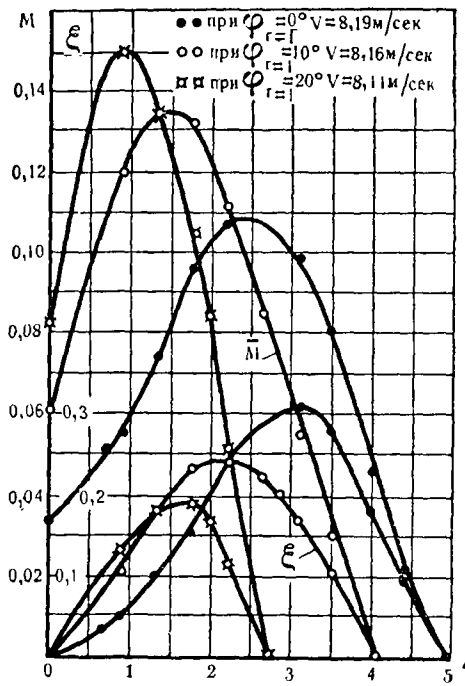


Рис. 282. Характеристика крыльев с полуобтекаемыми профилями.

При реконструкции мельниц ставились простейшие новые крылья (рис. 280 и 281) и производилась наковка жерновов, т. е. насечка борозд на рабочей поверхности, согласно рис. 245, внизу. До и после реконструкции этих мельниц были произведены испытания, результаты которых приводятся в таблице 41.

Сопоставляя цифры, полученные при испытании этих ветряных мельниц до и после реконструкции, видим, что при замене старых крыльев новыми, такими же простыми, как и старые, но с правильной формой лопасти, можно повысить производительность существующих ветряных мельниц в два-три раза.

Таблица 41

Производительность ветряных мельниц до и после реконструкции

Производительность (кг/час)	Скорости ветра (м/сек.)			
	3	4	5	6
Мельница с крыльями Д = 15,5 м				
С жёрновом 6/4				
до реконструкции	не работала	30	40	65
после реконструкции	25	55	90	115
С жёрновом 7/4				
до реконструкции	не работала	20	76	120
после реконструкции	» »	60	160	280
Мельница с крыльями Д = 12,5 м				
До реконструкции	не работала	—	30	55
После реконструкции с перенакованным жёрновом	» »	45	90	155

§ 60. ВЕТРЯНЫЕ МЕЛЬНИЦЫ НОВОГО ТИПА

Многие колхозы проявляют инициативу в постройке ветряных мельниц своими силами, что имеет большое народнохозяйственное значение.

Количество ветродвигателей, необходимое сельскому хозяйству, так велико, что промышленность не может обеспечить в короткий срок все колхозы ветродвигателями заводского производства. Поэтому постройка мельниц силами колхозов из местных материалов может значительно ускорить развитие ветроиспользования.

Для оказания в этом деле колхозам помощи, ВИМЭ, под руководством автора, разработаны конструкции упрощённых ветряных мельниц нового типа ВИМЭ Д-8; Д-10 и Д-12. Упрощение достигнуто за счёт исключения автоматических устройств, на основании опыта эксплоатации старых ветряных мельниц, управляемых вручную. Эти мельницы сконструированы целиком из дерева, за исключением крепёжных деталей, осей втулок и тяг (рис. 283).

Ветроколесо имеет четыре крыла, лопасти которых имеют полуобтекаемый профиль (рис. 281). Махи крыльев закреплены в проушинах главного вала клиньями. На главном валу позади вертикальной оси укреплено зубчатое колесо, находящееся в зацеплении с цевочной шестернёй, посаженной на вертикальный вал. Главный вал имеет наклон к горизонту 8°, что вызвано наклоном ног

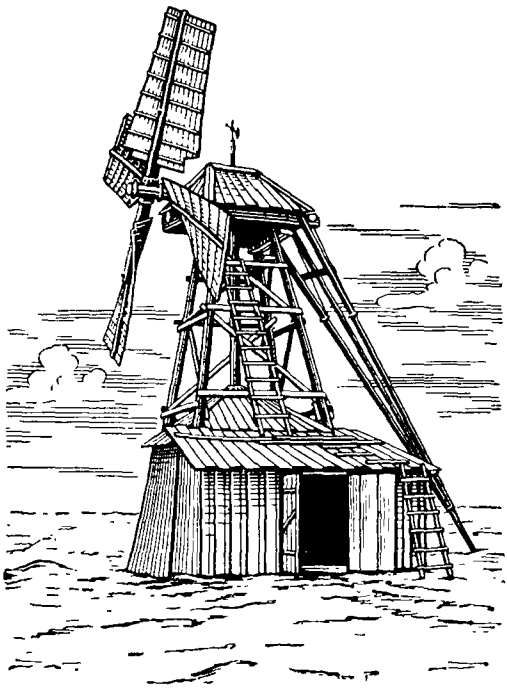


Рис. 283. Простейшая ветряная мельница типа ВИМЭ.

башни. Головка ветродвигателя построена по принципу шатровых ветряных мельниц. Шатёр с четырёхскатной крышей прикрывает верхнюю передачу от атмосферных осадков.

Передача вращения от вертикального вала к жёрнову осуществлена через вторую пару зубчатого зацепления, смонтированную внизу под помостом постава. Зубчатое колесо, насаженное на вертикальный вал, находится в зацеплении с цевочной шестернёй жёрнова.

Пуск ветродвигателя в работу производится установом ветроколеса на ветер вручную. Для этого позади шатра на брусках опорной рамы закреплено водило, составленное из трёх жердей, соединённых у основания башни в узел и подвешенных на растяжках из круткового железа $^3/_4$".

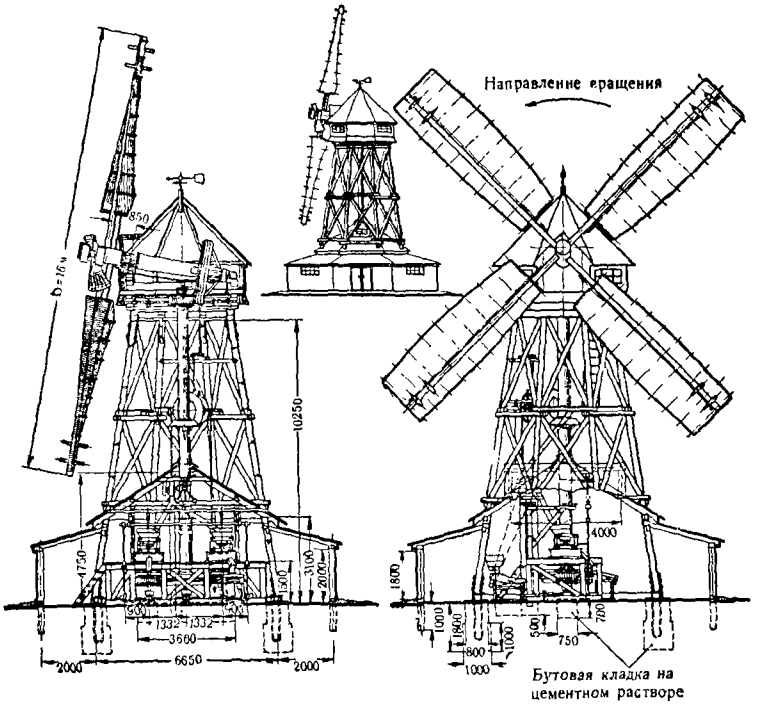


Рис. 284. Ветряная мельница ВИМЭ Д-16.

Ограничение оборотов ветроколеса производится выводом его из-под ветра, для чего при сильных ветрах поворачивают шатёр водилом, пока ветроколесо не будет давать нормальные обороты.

Ветродвигатель смонтирован на деревянной башне ферменной конструкции высотой 9,5 м. Ниже плоскости вращения ветроколеса башня обшита тёсом. Таким образом, всё мельничное оборудование находится в закрытом помещении. При наличии достаточного количества пило-

материалов строят каркасное здание с четырёхскатной крышей с башней ветряка в центре здания.

С целью удобства обслуживания мельничного оборудования, с фронтовой части каркаса делают пристройку, которая увеличивает площадь обслуживания.

Данные ветроустановки предназначаются для размола зерна в колхозах. Однако, их можно использовать и на других работах, требующих малой мощности, как-то: подготовка кормов, зерноочистка, молотьба и т. п. Эти ветряные мельницы строятся в Рязанской, Курской, Киевской и других областях СССР. Эксплоатационные показатели этих мельниц приведены в § 61.

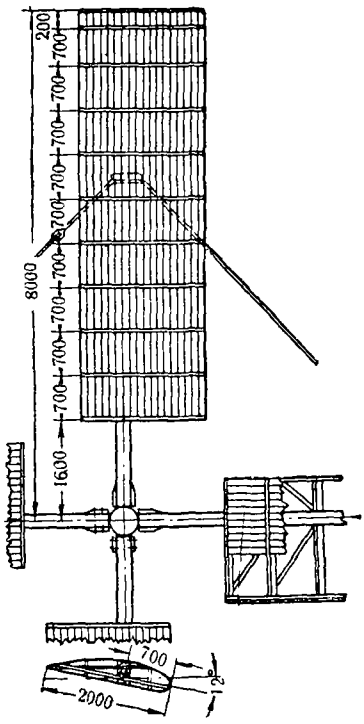


Рис. 285. Крылья ветряной мельницы ВИМЭ Д-16 с обтекаемым профилем.

Ветряная мельница ВИМЭ Д-16 (рис. 284) отличается от описанных выше простейших мельниц конструкции ВИМЭ тем, что её мощность обеспечивает работу двух поставов. При установке ветроколеса на ветер шатёр поворачивается передачей, расположенной в башне. Крылья имеют прямую лопасть с обтекаемым аэродинамическим профилем (рис. 285) и отличаются от простых крыльев тем, что иглицы проходят сквозь мах и подмашник, образуя каркас, к которому сбоку гвоздями прибивают нервюры, образующие обтекаемый профиль крыла. Обшива лопасти сделана из тёса толщиной 6 мм и шириной 100 мм, прибитого к нервюрам сквозь полосу из оцинкованного железа, опоясывающую периметр лопасти против нервюр.

Крепление махов на валу ветроколеса сделано клиньями, как и у простейших ветряных мельниц.

Крылья этой мельницы можно делать также с полуобтекаемым профилем (рис. 281) при заклинении концевой иглицы под углом $\varphi = 5°$. На общем виде рис. 284 показаны крылья с полуобтекаемым профилем.

Техническая характеристика мельницы Д-16

Диаметр ветроколеса	16 м
Число крыльев	4
Ширина крыльев	2 м
Мощность на валу ветроколеса при скорости ветра 8 м/сек	25 л. с.
Коэфициент использования энергии ветра	0,30
Быстроходность	2,9
Число оборотов ветроколеса при $V=8$ м/сек	26 об/мин.
Высота башни	11 м

Устройство основных деталей ветряной мельницы ВИМЭ Д-16. Большое количество ветряных мельниц,

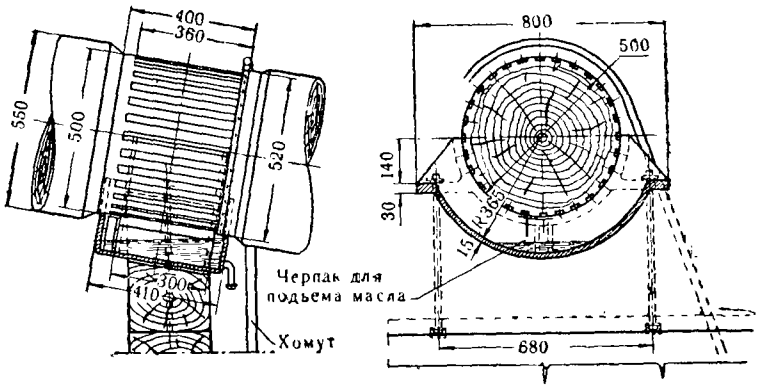


Рис. 286. Передний подшипник главного вала ветряной мельницы.

построенных и строящихся в СССР, имеют части и детали почти одинаковые по конструктивной схеме. Если и наблюдаются отступления от общепринятых их конструктивных форм, то они обычно вызываются местными условиями: наличием материалов, опытностью мастеров и т. п.

Для ознакомления с устройством некоторых деталей ветряных мельниц мы приводим описание основных частей ветряной мельницы ВИМЭ Д-16, которые вообще являются типичными для постройки ветряных мельниц кустарного и полукустарного производства.

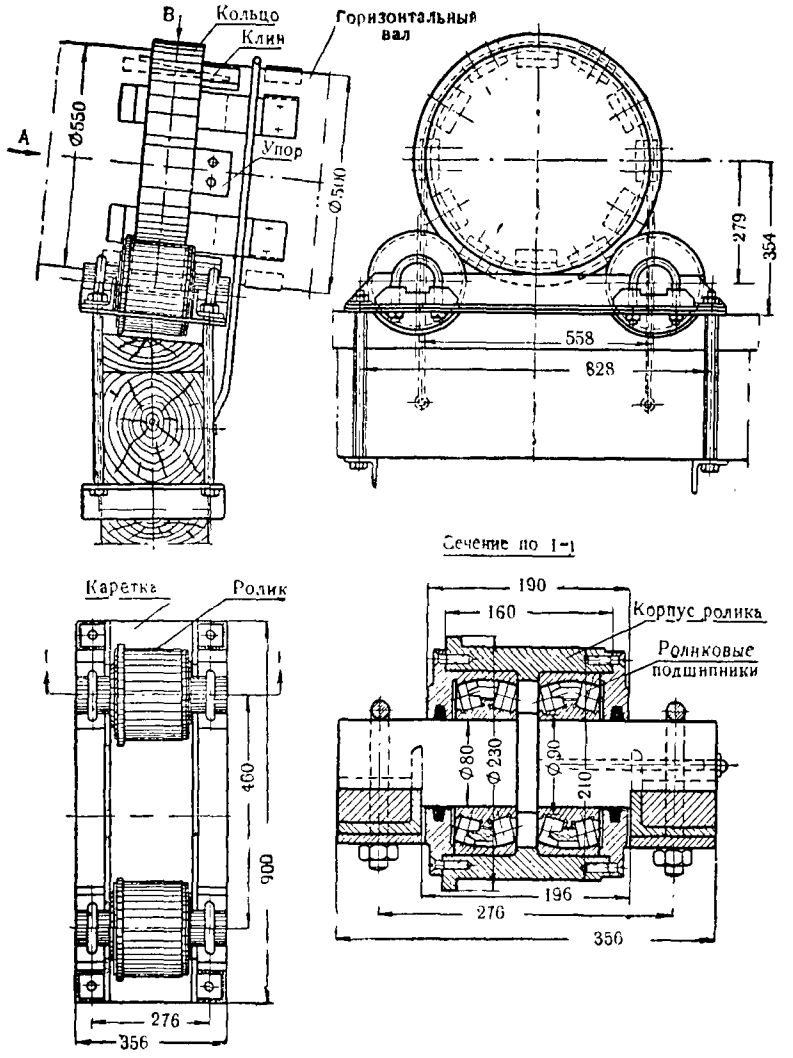


Рис. 287. Роликовая опора переднего подшипника главного вала.

Вал ветроколеса изготовляют из цельного дерева(дуба) диаметром в комлевой части 550 мм. Передний подшипник представляет чугунную отливку с карманом для масла. Из этого кармана смазка подаётся на шейку вала черпач-

ком, закреплённым с передней стороны шейки (рис. 286). Более рационально делать передний подшипник на роликовой опоре, как показано на рис. 287. Кольцо, закреплённое на валу, катится на двух роликах, надетых на оси, с двумя шарикоподшипниками каждый. Задний подшипник, радиально упорный, шариковый, смонтирован в чугунном корпусе, прихваченном к раме четырьмя болтами (рис. 288).

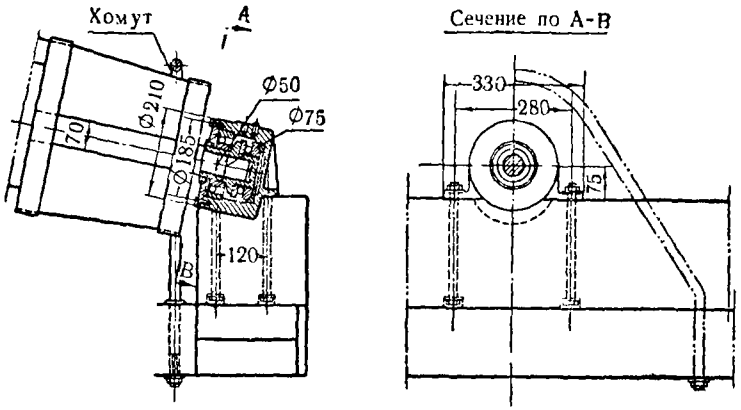


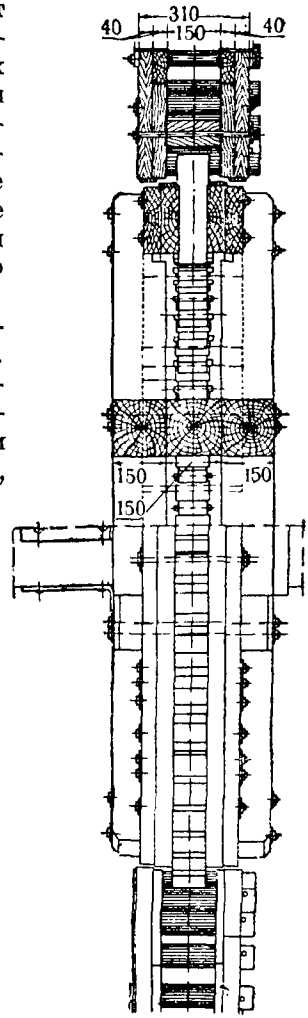
Рис. 288. Задний подшипник главного вала.

Колесо и шестерни деревянные, нормального типа, как их делают у существующих ветряных мельниц (рис. 289). Передаточное отношение верхней пары равно 1 : 3 и нижней пары шестерён 1 : 2,34. Общее передаточное отношение равно 1 : 7. Таким образом, при скорости ветра 8 м/сек. жёрнов будет делать 182 оборота в минуту, что для поставленных здесь жерновов $^{6}/_{4}$ вполне нормально.

Шатёр (рис. 290) представляет лёгкую каркасную будку, обшитую тёсом. Стойки каркаса опираются на восемь углов, образованных двумя квадратами, связанными из брусков и сдвинутыми относительно друг друга в горизонтальной плоскости на 45° (рис. 291). Сверху этих квадратов лежит рама шатра, на которой смонтированы подшипники горизонтального и вертикального валов, а снизу к брускам квадратов притянут болтами обод шатра, которым он опирается на роликовую опору, закреплённую на ободе башни.

Роликовая опора шатра состоит из 16 роликовых опор горизонтальных и из 8 опор, имеющих горизонтальные и боковые ролики (рис. 292). Таким образом, вертикальные нагрузки воспринимаются 24 роликами, а боковые 8 роликами. При такой системе опоры момент, необходимый для поворота шатра, составляет около 1 010 кгм.

Механизм поворота шатра построен следующим образом (рис. 293): на вертикальном валу *1* закреплён конический шкив *2*, который находится в фрикционном зацеплении с таким же шкивом *3*,



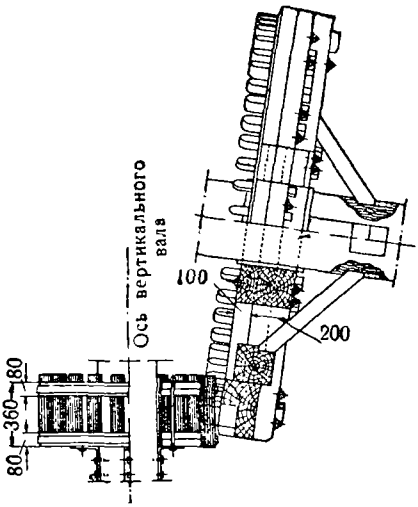


Рис. 289. Верхняя и нижняя передача ветряной мельницы.

насаженным на горизонтальный валик *4*, имеющий на другом конце коническую шестерню *5*.

Эта шестерня находится в зацеплении с большой конической шестернёй *6*, насаженной на вертикальный валик *7*,

вращение которого через пару цилиндрических шестерён *8* передаётся зубчатой рейке *9*, закреплённой на внутренней стенке обода шатра.

Включение фрикционных шкивов и отключение делается специальной отводкой *10*, смонтированной на втулке фрикционного шкива, надетого на горизонтальный валик. Вместо фрикционных шкивов можно поставить чу-

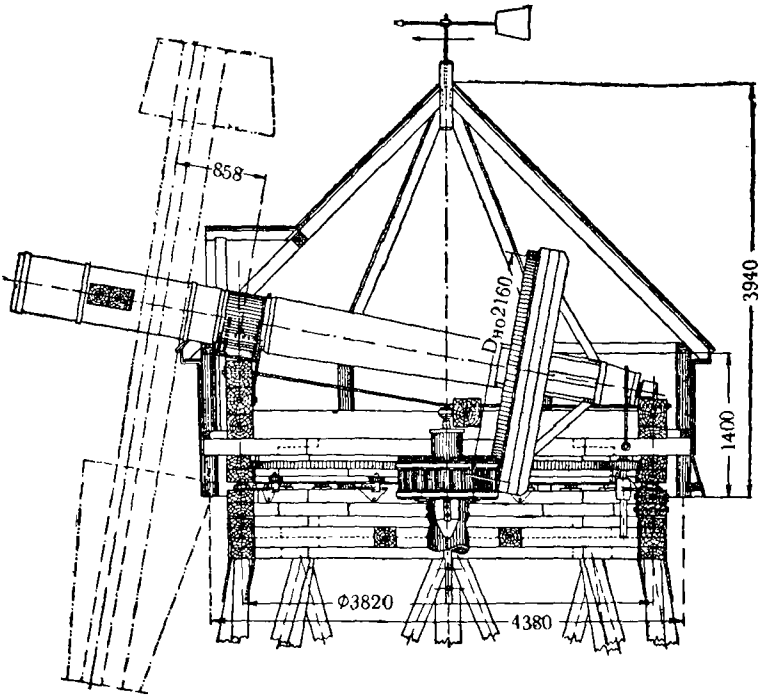


Рис. 290. Шатёр ветряной мельницы.

гунные шестерни. В этом случае включение передачи надо делать при остановленном ветроколесе. При установе ветроколеса на ветер этот механизм приводится в движение вручную, для чего на том же горизонтальном валике, на котором надет конический фрикционный шкив, насажено деревянное колесо *11*, которое вращают канатом *12* снизу. Данное устройство обеспечивает возможность ветроколесу самому выводить себя из-под ветра, что должно предохранить его от поломок в бурю. Этот

механизм не является типовым и применяется у ветряной мельницы впервые.

Опыт эксплоатации первой ветряной мельницы Д-16, построенной с этим механизмом в селе Колонщино, Киевской области, показал, что фрикционная передача

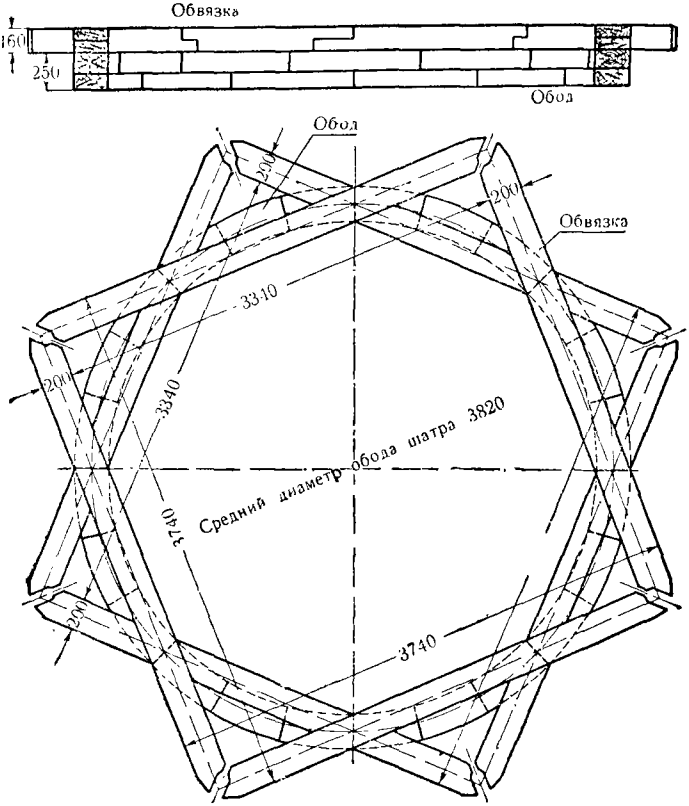


Рис. 291. Обвязка и обод шатра.

с деревянными шкивами допустима при условии лёгкого поворота шатра на роликах. В противном случае происходит проскальзывание шкивов, которое может вызвать загорание их. Более правильно деревянные шкивы заменить чугунными коническими шестернями с передаточным отношением 1 : 2 (малая шестерня на вертикаль-

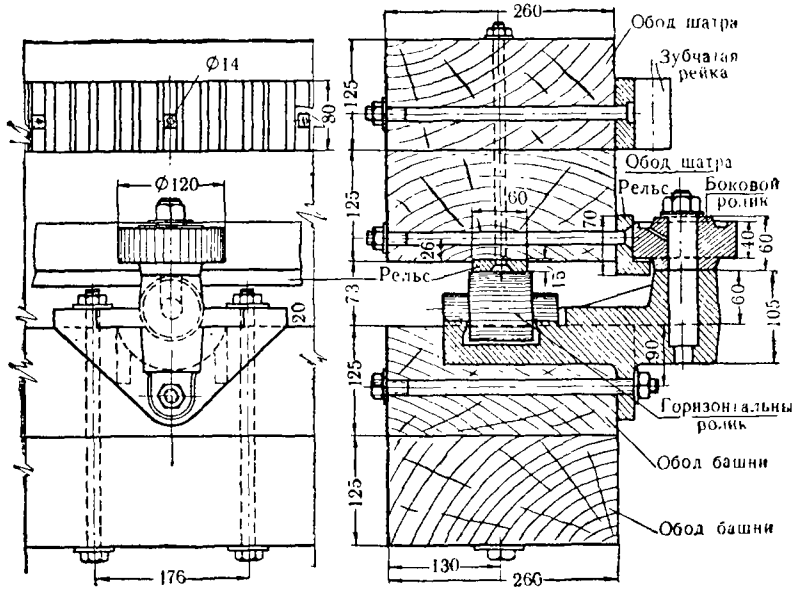


Рис. 292. Роликовая опора шатра ветряной мельницы ВИМЭ Д-16.

ном валу). В этом случае шестерни должны включаться в действие при остановленном ветродвигателе.

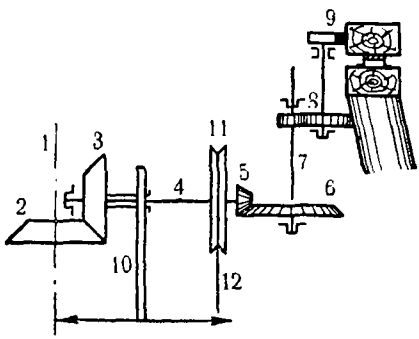


Рис. 293. Схема поворота шатра с помощью передачи.

Башня ветродвигателя имеет восемь ног (рис. 294), чем достигается: 1) высокая сопротивляемость скручивающему моменту, так как удобно располагаются горизонтальные схватки, и 2) более удобное расположение крыльев относительно ног башни, что позволяет сократить расстояние между опорой переднего подшипника вала и осью махов. Увеличение этого расстояния вызывает увеличение нагрузок на передний подшипник, что нежелательно.

Ветряная мельница УНДИМ Д-10. Украинский институт механизации сельского хозяйства (УНДИМ) в 1945 г. по проекту С. Б. Перли построил ветряную мельницу Д-10 деревометаллической конструкции (рис. 295). Регулирование оборотов ветроколеса автоматическое, с помощью форточек (предложение Б. Б. Кажинского), сделанных в крыле, которые поворачиваются при больших оборотах действием центробежных грузов, как лопасть в системе регулирования В. С. Шаманина.

Ветряная мельница работает на жерновой постав 6/4.

Головка ветродвигателя представляет чугунную отливку, в которой смонтированы опоры шарикоподшипников главного вала и верхняя коническая передача. Испытание первого образца этой мельницы дало удовлетворительные результаты; приступлено к производству первой серии мельниц.

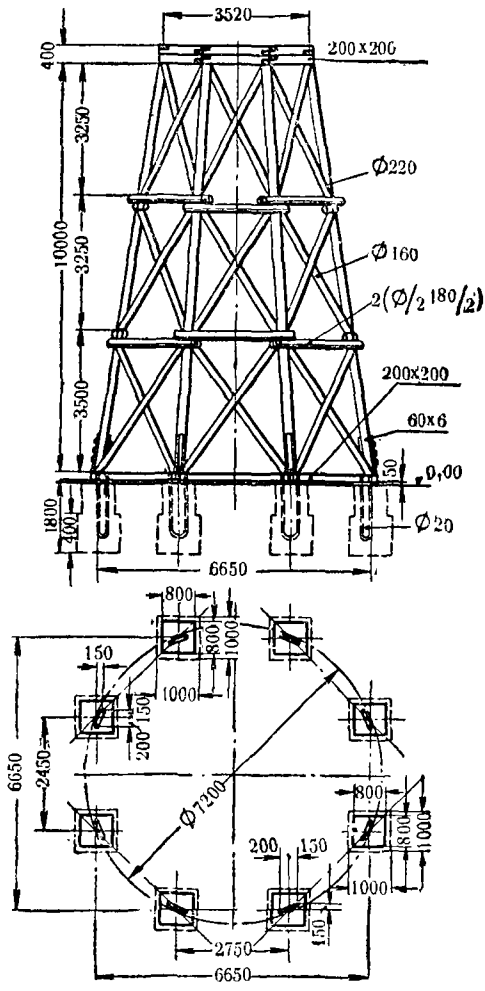


Рис. 294. Башня 8-ногая.

Ветряная мельница ЦАГИ Д-10. Эта мельница сконструирована инженером ЦАГИ М. Г. Сорокиным и построена в 1945 г. в одном из колхозов Московской

области. Ветроколесо диаметром 10 м и имеет три крыла с обтекаемыми лопастями. Для передачи вращения от ветроколеса вертикальному валу использован задний редуктор автомобиля. Этот редуктор смонтирован на фермочке из углового железа, закреплённой на опоре с шариками, уложенными по кольцу верхнего

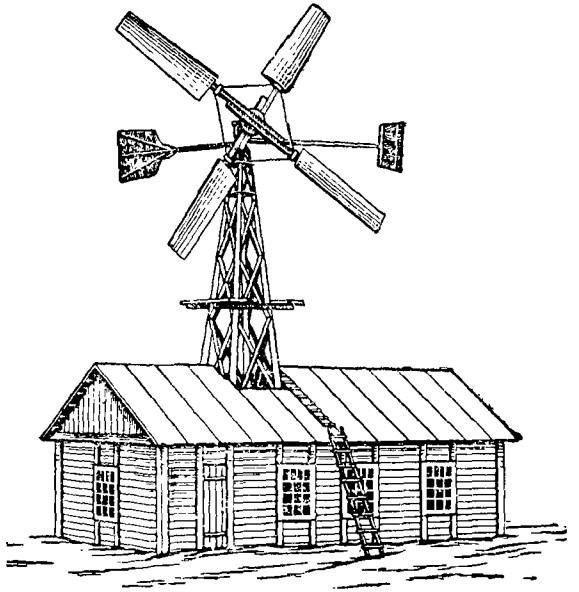


Рис. 295. Ветряная мельница УНДИМ Д-10.

венца башни. Позади фермы пристроено водило из двух жердей, которое нижним своим концом опирается на перила, окружающие здание мельницы. Этим водилом поворачивают головку при установе ветроколеса на ветер или выводе его из-под ветра.

На нижнем конце вертикального вала насажен шкив, от которого ремённой передачей приводится в движение жёрнов 6 4.

Ветряная мельница усовершенствованного типа. В 1945 г., в селе Колонщино, Макаровского района, Киевской области, построена опытная ветряная мельница усовершенствованного типа с описанным выше ветродвигателем ВИМЭ Д-16 (рис. 296).

Здание мельницы кирпичное, цилиндрической формы. Машинное оборудование расположено в трёх этажах здания. Два «Фермера № 2», крупорушка, сепаратор и первая трансмиссия расположены в третьем этаже; вторая трансмиссия и два бурата во втором этаже; в первом этаже — выход муки. Для использования ветряной мельницы

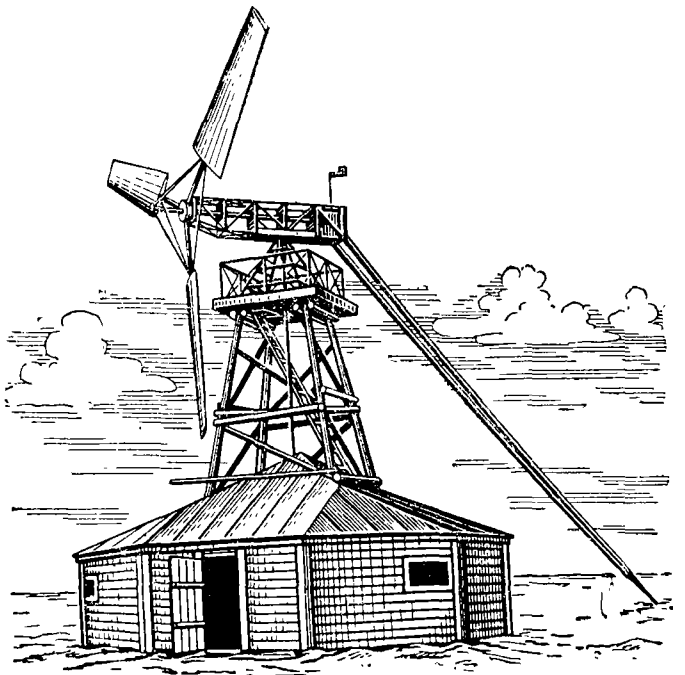


Рис. 295а. Ветряная мельница ЦАГИ Д-10.

на другие машины — молотилку, пилу и т. п., в первом этаже имеется трансмиссия со шкивом вне помещения. В четвёртом этаже здания размещены ремённая передача от вертикального вала ветродвигателя к трансмиссии и генератор автомобильного типа с аккумуляторной батареей. Электричество расходуется только для освещения помещений мельницы.

Подъём зерна к фермеру и крупорушке осуществляется четырьмя самотасками.

В практике эксплоатации оказалось, что фермера, не имеющие регулирующих приспособлений, при работе на

ветряной мельнице менее удобны, чем жерновые поставы.

Для ограничения оборотов ветроколеса и предохранения его от разноса, на двух крыльях поставлены воздушные тормоза, запроектированные автором. Они состоят из 12 обтекаемых открылков с общей поверхностью в 2,25 м² каждая, закреплённых на осях диаметром в 20 мм, пропущенных сквозь мах. Оси поворачиваются в подшипниках под действием центробежных сил грузика и тяги, шарнирно соединённой с рычажками, закреплёнными на осях поверхностей. При нормальных оборотах поверхности тормоза идут ребром в направлении вращения, при увеличении же оборотов выше нормальных центробежные силы грузика и тяги преодолевают усилие предварительной затяжки пружины и поворачивают поверхности плоскостью в направлении движения. Пружина прикреплена одним концом к тяге, связывающей тормозные поверхности, а другим к маху крыла вблизи вала (рис. 297). Диаметр пружины 40 мм, диаметр проволоки 3 мм, число витков 115. Суммарная поверхность тормозов развивает тормозящий момент M_T, равный избыточному моменту ветроколеса, который может быть определён с помощью уравнения:

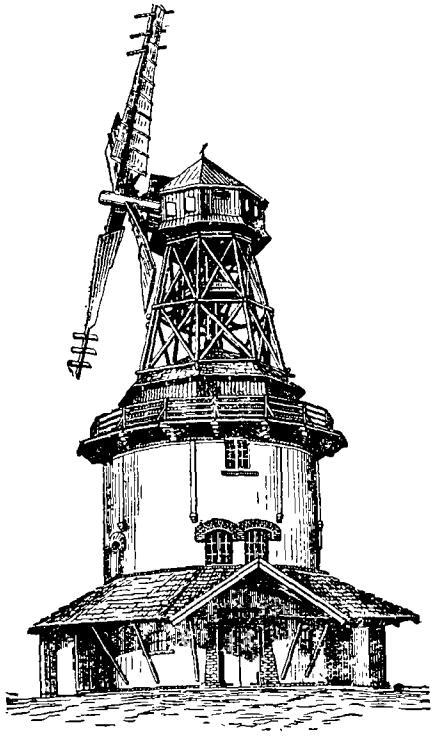


Рис. 296. Ветряная мельница Промзернопроекта усовершенствованного типа с ветродвигателем ВНИМЭ Д-16.

$$M_T = \overline{M}\pi R^3 \frac{\rho V_2^2}{2} - \overline{M}\pi R^3 \frac{\rho V_1^2}{2} = \overline{M}\pi R^3 \frac{\rho (V_2^2 - V_1^2)}{2}. \quad \text{(а)}$$

Кроме того:

$$M_T = C_x S \frac{\rho W^2}{2} R_1. \quad \text{(б)}$$

Из уравнений (а) и(б)получаем суммарную поверхность:

$$S = \frac{\overline{M}\pi R^3 (V_2^2 - V_1^2)}{C_x W^2 R_1}, \quad (309)$$

где:

V_1 — скорость ветра, при которой надо ограничивать обороты ветроколеса;

V_2 — максимальная скорость ветра, при которой допускается работа ветряной мельницы до вывода её из-под ветра;

W — относительная скорость воздушного потока, набегающего на открылки воздушных тормозов, расположенных на радиусе R_1:

$$W = \sqrt{\omega^2 R_1^2 + V_2^2};$$

C_x— коэфициент силы сопротивления.

Подставляя значение W^2 в равенство (309), получим:

$$S = \frac{\overline{M}\pi R^3 (V_2^2 - V_1^2)}{C_x R_1 (\omega^2 R_1^2 + V_2^2)}. \quad (309а)$$

Задаваясь максимальными оборотами ветроколеса n=32 об/мин. при скорости ветра V_2=12 м/сек., определим суммарную поверхность тормозов S для ветряной мельницы ВИМЭ Д-16. Скоростью ветра в 12 м/сек. задаёмся, имея в виду, что при ветре выше этой скорости ветроколесо должно быть выведено из-под ветра, на угол γ, при котором мощность ветроколеса не будет возрастать.

Далее принимаем угол открылков по отношению к потоку $\alpha = 90°$ и $C_x = 1{,}28$.

Для крыльев ВИМЭ Д-16 имеем: $R_1 = 7$ м и $\overline{M} = 0{,}1$. Скорость ветра, при которой должно начинаться ограничение оборотов V_1=8 м/сек. Подставляя цифровые значения, получим:

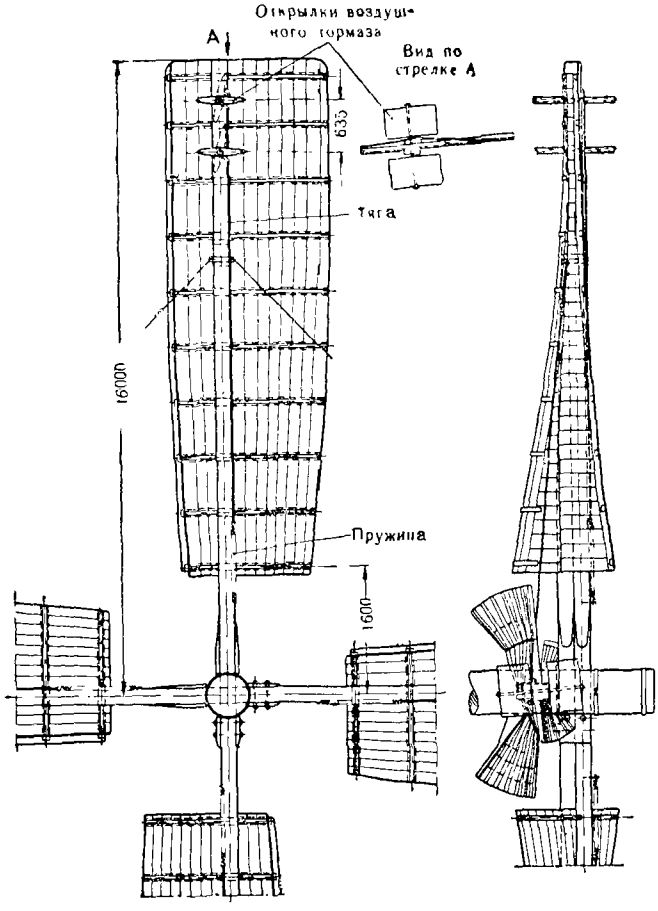


Рис. 297. Крылья с воздушными тормозами ветряной мельницы, показанной на рисунке 296.

$$S = \frac{0{,}10 \cdot 3{,}14 \cdot 8^3 (12^2 - 8^2)}{1{,}28 \cdot 7 \left[\left(\frac{3{,}14 \cdot 32}{30} \right)^2 \cdot 7^2 + 12^2 \right]} = \frac{12\,900}{6\,200} = 2{,}25 \text{ м}^2.$$

При установке на двух крыльях по 6 открылков, поверхность каждого должна быть равна:

$$S_1 = \frac{2{,}25}{12} = 0{,}188 \text{ м}^2.$$

При установке на четырёх крыльях по 2 штуки:

$$S_1 = \frac{2{,}25}{16} = 0{,}14 \text{ м}^2.$$

При пуске мельницы в работу эти тормоза действовали вполне удовлетворительно.

§ 61. ЭКСПЛОАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРЯНЫХ МЕЛЬНИЦ

При эксплоатации ветроустановки необходимо стремиться использовать весь годовой ход рабочих скоростей ветра. Простаивание ветряной мельницы при наличии ветра влечёт за собой уменьшение годовой выработки, а следовательно, и повышение стоимости помола. Отсюда следует, что эксплоатацию ветряной мельницы необходимо организовать так, чтобы она работала всё время, когда дует ветер.

В таблице 42 подсчитана мощность ветряных мельниц ВИМЭ Д-8, Д-10, Д-12 и Д-16, а также их производительность и обороты в зависимости от скорости ветра, а в таблице 43 приведена возможная годовая производительность этих мельниц в зависимости от среднегодовых скоростей ветра.

Часы годовой работы, приведённые в таблице 43, даются:

1) для ветряной мельницы ВИМЭ Д-8 из расчёта, что она начинает работать при скорости ветра 4 м/сек.;

2) для ветряков Д-10, Д-12 и Д-16 из расчёта, что они начинают работать при скорости ветра 3 м/сек.

Проверка работы ветряных мельниц в хозяйственной эксплоатации производилась ВИМЭ в различных областях Союза ССР.

В качестве примера приведём результат краткосрочных испытаний в колхозах ветряных мельниц ВИМЭ Д-8 и ВИМЭ Д-10. При испытаниях производились одновременные (по сигналу) замеры:

V — скоростей ветра — по анемометру через каждые 2 минуты;

Q — производительности — путём взвешивания, через каждые 2 минуты.

n — числа оборотов ветроколеса.

В таблице 44 и на графиках рис. 298 и 299 приведены данные этих испытаний.

Таблица 42

Расчётные технические характеристики ветряных мельниц

Название	Рабочие скорости ветра (м/сек.)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
Ветряная мельница ВИМЭ Д-8								
Мощность на валу ветроколеса (л. с.)	—	0,65	1,3	2,2	3,5	5,3	7,5	10,3
Обороты ветроколеса в минуту . . .	—	21	27	32	38	40	45	50
Производительность (кг/час)	—	20	40	70	100	130	180	230
Ветряная мельница ВИМЭ Д-10								
Мощность на валу ветроколеса (л. с)	0,43	1,01	2,03	3,42	5,46	8,26	11,7	16,7
Обороты ветроколеса в минуту . . .	13	17	22	26	30	32	38	43
Производительность (кг/час)	13	30	60	108	150	175	218	310
Ветряная мельница ВИМЭ Д-12								
Мощность на валу ветроколеса (л. с.)	0,63	1,47	2,92	4,95	7,90	12,0	16,9	23,0
Обороты ветроколеса в минуту . . .	10	14	18	21	25	28	32	36
Производительность (кг/час)	19	45	90	158	220	270	360	520
Ветряная мельница ВИМЭ Д-16								
Мощность на валу ветроколеса (л. с.)	1,5	3,2	6,3	11,0	17,5	25,5	37	50
Обороты ветроколеса в минуту . . .	10	13	17	20	23	26	29	33
Производительность (кг/час)	32	76	144	264	420	615	880	1 200

Таблица 43

Расчётная годовая производительность ветряных мельниц

Тип мельницы	Диаметр ветроколеса (м)	Среднегодовые скорости ветра					
		4 м/сек.		5 м/сек.		6 м/сек.	
		Возможное число часов работы в году	Годовая производительность (т)	Возможное число часов работы в году	Годовая производительность (т)	Возможное число часов работы в году	Годовая производительность (т)
ВИМЭ Д-8 . . .	8	5 310	185	6 522	290	7 325	408
ВИМЭ Д-10 . . .	10	6 755	289	7 525	452	8 025	638
ВИМЭ Д-12 . . .	12	6 755	416	7 525	649	8 025	909
ВИМЭ Д-16 . . . с обтекаемым профилем крыльев	16	6 755	1 224	7 525	2 029	8 025	2 609

Таблица 44

Фактическая производительность ветряных мельниц ВИМЭ (кг/час) в зависимости от скорости ветра

Тип мельницы	Скорости ветра (в м/сек.)					
	4	5	6	7	8	9
ВИМЭ Д-8	10	25	50	100	170	270
ВИМЭ Д-10	26	50	95	155	—	—

Расчётные производительности этих мельниц приведены выше, в таблице 42.

Ветряная мельница ВИМЭ Д-10 испытывалась вначале с жёрновом, проработавшим свой срок до наковки, и затем с этим же жёрновом, но заново накованным. Это было сделано с тем, чтобы выявить влияние наковки жёрнова на повышение производительности.

Из графика рис. 299 видим, что жёрнов после наковки сильно повышает свою производительность, причём на малых скоростях ветра это повышение не заметно, а на скоростях ветра выше 5 м/сек. кривые быстро расходятся — производительность повышается до 50%.

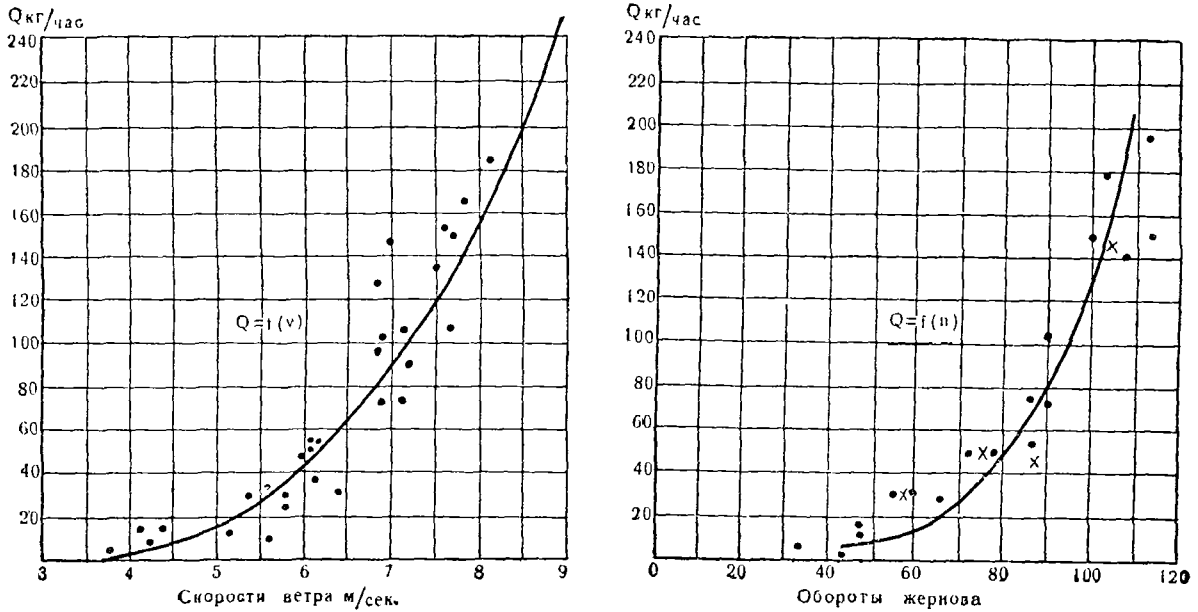


Рис. 298. Характеристика производительности ветряной мельницы ВИМЭ Д-8:

А — производительность в зависимости от скорости ветра; *Б* — производительность в зависимости от оборотов жёрнова.

Эксплоатационные показатели трёх мельниц типа ВИМЭ, полученные в результате длительных наблюдений за их работой в колхозах Рязанской области, приведены в таблице 45.

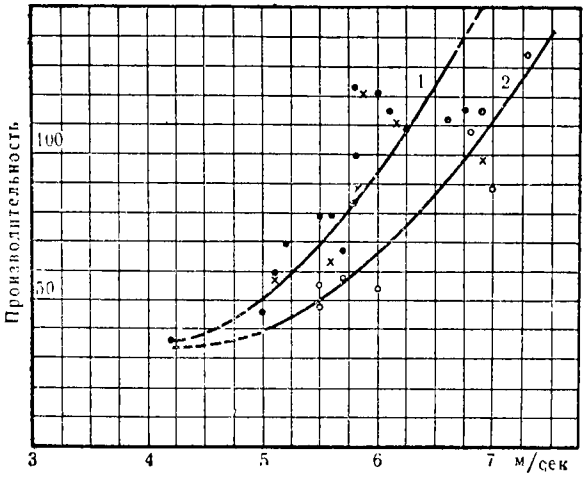


Рис. 299. Характеристика производительности ветряной мельницы ВИМЭ Д-10:

1 — после наковки жерновов; *2* — до наковки жерновов.

Таблица 45

Эксплоатационные показатели новых ветряных мельниц простейшего типа

Тип ветряной мельницы	Число часов работы за месяц	Средняя скорость ветра (м сек.)	Помол за месяц (кг)	Среднечасовая производительность (кг час)
ВИМЭ Д-8	Июнь—116	4,18	8 230	71
	Июль— 58	3,30	3 707	64
ВИМЭ Д-10	С 15 октября по 15 ноября—82	3,70	4 467	55
ВИМЭ Д-12	С 15 октября по 15 ноября—127	4.28	7 875	62

По данным повторяемости ветров, по Поморцеву, при среднемесячных скоростях ветра от 3 до 4 м/сек. возможное число часов работы должно составлять от 400 до 500

Таблица 46

Тип мельницы	Коэфициент эксплоатации	
	фактический	расчётный (возможный)
ВИМЭ Д-8	0,161	0,70
ВИМЭ Д-10	0,114	0,55
ВИМЭ Д-12	0,176	0,70

Таблица 47

Сравнение эксплоатационных показателей существующих старых ветряных мельниц с показателями новых мельниц типа ВИМЭ

Типы ветряных мельниц	Производительность при скорости ветра 8 м/сек. (кг/час) Q	Условная мощность на валу ветроколеса при удельной производительности 20 кг/л. с. ч. (л. с.)	Коэффициент использования энергии ветра при условной мощности предыдущей графы ξ	Производительность, отнесённая к 1 м² ометаемой поверхности ветроколеса (кг/м²)
1. Козловая ветряная мельница Д-15,4 м, Барышевского района, Киевской области, построена в 1910 г. . . .	138	6,9	0,087	0,74
2. Шатровая ветряная мельница Д-24,8 м, Менского района, Черниговской области, построена в 1904 г. . . .	125	6,2	0,03	0,26
3. Шатровая ветряная мельница Д-20 м, Ольшанского района, Киевской области, построена в 1937 г.	246	12,3	0,117	0,79
4. Ветряная мельница ВИМЭ Д-8, построена в 1943 году в Рязанском районе, Рязанской области	130	6,5	0,304	2,6
5. Ветряная мельница ВИМЭ Д-10, построена в 1944 г. в Солотчинском районе, Рязанской области	200	10	0,30	2,5

часов за месяц. Отсюда получаем фактический и расчётный (возможный) коэфициент эксплоатации (см. таблицу 46).

Следует полагать, что испытанные ветряные мельницы работали с низким коэфициентом эксплоатации не потому, что были слабые ветры, а потому, что не был использован полностью суточный ход рабочих скоростей ветра. Очевидно, в обязанности механиков не входила работа в ночные часы, когда был ветер достаточной силы.

Чтобы показать, насколько производительность новых ветряных мельниц выше старых, в таблице 47 приводятся эксплоатационные показатели старых ветряных мельниц, испытанных автором в 1940 г., и новых, построенных в Рязанской области и испытанных тем же методом в 1944 г. Для удобства сравнения в последней графе таблицы 47 подсчитана производительность, отнесённая к 1 м^2 ометаемой поверхности ветроколеса.

ГЛАВА XVI

ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Ветроэлектрические установки ещё не получили широкого распространения, однако теоретическая и экспериментальная разработка этого вопроса в СССР позволяет уже сейчас решать практические вопросы строительства ветроэлектростанций как малой, так и большой мощностей.

Основным препятствием к применению ветродвигателей для получения электрической энергии является неравномерность энергии ветра. Однако применение специальных генераторов (компаунд-генераторов), более приспособленных к изменению оборотов, а также автоматических регуляторов напряжения даёт возможность вырабатывать на ветроустановках ток, годный для практических целей освещения и силовой нагрузки. На рис. 300 и 301 приведен один из первых автоматических выключателей.

Эксплоатация ветроэлектростанций: Крымской ЦАГИ Д-30, ВИМЭ Д-12, Курской системы Уфимцева — Ветчинкина позволяет значительно ускорить практическое строительство ветроэлектростанций.

Параллельная работа ветровой и тепловой или гидравлической электростанций сейчас изучается экспериментально.

Основными элементами ветроэлектростанций изолированного типа являются:

1) ветродвигатель;

2) генератор специального типа, приспособленный для работы при переменном числе оборотов;

3) аккумуляторная батарея, обеспечивающая потребителя электроэнергией в короткие периоды затишья; при батарее — автоматический выключатель;

4) резервный агрегат с тепловым двигателем для работы в периоды длительного затишья, когда аккумуляторной батареи недостаточно.

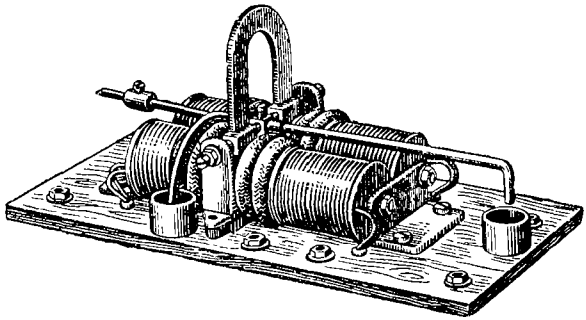


Рис. 300. Автоматический выключатель.

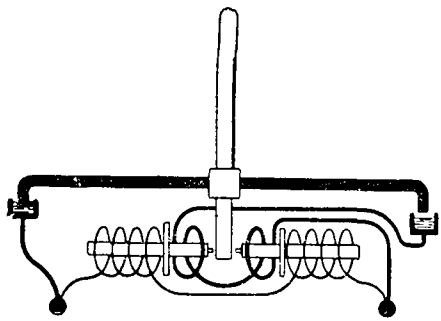


Рис. 301. Схема выключателя.

Штилевых дней и дней с нерабочими скоростями ветра в году от 10 до 40%; чередование их нельзя предугадать, а также нельзя предугадать и число штилевых дней подряд.

Поэтому трудно построить такую аккумуляторную батарею, ёмкость которой могла бы полностью обеспечить потребителя электроэнергией. Это обстоятельство обусловливает необходимость иметь при ветроэлектростанции резервный двигатель — не ветровой.

§ 62. ТИПЫ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ РАБОТЫ С ВЕТРОДВИГАТЕЛЯМИ И РЕГУЛЯТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Обычно ветродвигатели работают на слабых скоростях ветра — от 4 до 8 м/сек., с переменными оборотами, а на скоростях ветра выше 8 м/сек. — с постоянными, если ветродвигатель имеет автоматическое регулирование. Неравномерность оборотов колеблется в пределах от 3 до 15%, в зависимости от системы регулирования данного ветродвигателя.

Таким образом, генератор, приключённый к ветродвигателю, должен обеспечивать постоянство напряжения при колебаниях оборотов. Этому условию отвечают генераторы постоянного тока, которые, как правило, и устанавливаются на ветроэлектростанциях малой мощности.

Генераторы переменного тока, синхронные и асинхронные, могут быть применены на ветроэлектростанциях большой мощности для работы параллельно с другими мощными тепловыми или гидравлическими электростанциями в общую сеть.

Для работы с ветродвигателями применяются шунтовые генераторы постоянного тока.

Эти генераторы могут быть с чисто шунтовым возбуждением, схема которых дана на рис. 302, или со смешанным возбуждением, у которых, кроме основной шунтовой обмотки, имеется дополнительная сериесная обмотка возбуждения.

Дополнительная обмотка включается так, что её магнитный поток складывается с основным потоком шунтовой обмотки, и мы получаем схему генератора с компаундным возбуждением (рис. 303).

Для маломощных ветроэлектростанций, от 100 до 1 000 ватт, применяются генераторы, устанавливаемые обычно на тракторах и автомобилях. Так как эти машины работают с переменными оборотами, то генераторы к ним выполняются с большим магнитным насыщением, а также имеют регуляторы напряжения. Благодаря этому они допускают колебания оборотов в больших пределах, что вполне соответствует той неравномерности, с которой работают ветродвигатели. Недостатком этих генераторов, известных под марками ГБТ, ГАУ и ГБФ, является низкий коэфициент полезного действия.

Генераторы ГБТ устанавливаются на тракторах СТЗ и ХТЗ и имеют мощность от 60 до 85 ватт, напряжение 6 вольт, двухполюсную шунтовую обмотку возбуждения и работают с автоматическим регулятором напряжения. Регулятор позволяет изменять обороты при режиме с нагрузкой от 1 100 до 2 100 об мин., причём напряжение удерживается постоянным.

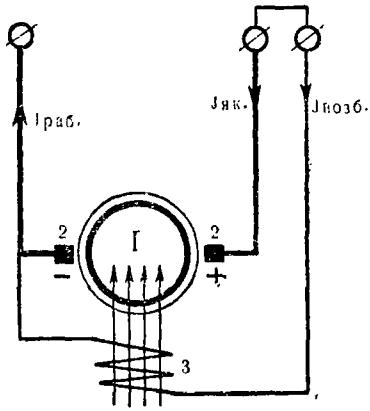


Рис. 302. Схема шунтового генератора постоянного тока:
1 — генератор; *2* — щётки; *3* — шунтовая обмотка возбуждения.

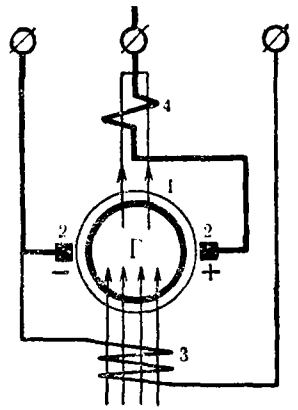


Рис. 303. Схема шунтового генератора с компаундным возбуждением:
1 — генератор; *2* — щётки; *3* — шунтовая обмотка возбуждения; *4* — дополнительная последовательная обмотка возбуждения.

Генераторы ГБФ, трёхщёточные, устанавливаются на легковых автомобилях М-2, ЗИС-101. Мощность их — от 60 до 80 ватт, напряжение — 6 вольт; двухполюсные, с шунтовой обмоткой возбуждения.

Преимущество трёхщёточного генератора заключается в том, что он может работать на зарядку аккумуляторов без специальных регуляторов напряжения, при изменениях оборотов от 700 до 4 500 об/мин. Плюсовой конец шунтовой обмотки возбуждения присоединён к особой третьей щётке, сдвинутой по отношению к нейтрали на некоторый угол около 60°. В этом случае используется влияние реакции обмотки якоря на распределение магнитного потока в полюсах генератора. Поток,

создаваемый обмоткой якоря, выполняет здесь функции, аналогичные потоку противокомпаундной обмотки, т. е. размагничивает полюса. Благодаря этому, даже при очень больших колебаниях числа оборотов, напряжение на зажимах генератора меняется в небольших пределах. Необходимо заметить, что ограничение напряжения будет происходить только в том случае, если генератор работает на аккумуляторную батарею, или на мощную нагрузку. При неполной нагрузке или холостой работе напряжение будет меняться в больших пределах, так как в этом случае нет рабочего тока, а следо-

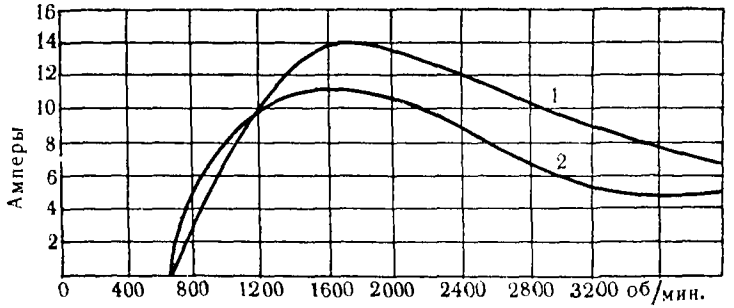


Рис. 304. Характеристика генератора ГБФ.

вательно, нет и реакции якоря. Изменение силы зарядного тока при колебаниях оборотов от 600 до 3 200 в минуту показано на рис. 304.

Генератор марки ГА 250/12 шунтовой, четырёхполюсный, мощность 250 ватт, напряжение 12 вольт, предназначен для работы на автобусах. Работает с автоматическим регулятором напряжения типа РРТ. Этот регулятор обеспечивает постоянство напряжения при изменении оборотов от 1 300 до 3 000 об/мин. с нагрузкой. Генератор может быть использован для работы с ветродвигателем, имеющим диаметр ветроколеса 3 м.

Генератор ГТ 1 000/24, мощностью 1 000 ватт, напряжением 24 вольта, работает с регулятором напряжения типа РРТ, который обеспечивает постоянство напряжения при колебаниях оборотов от 950 до 3 000.

Этот генератор может быть использован на ветродвигателях, имеющих диаметр ветроколеса от 3 до 3,5 м и

предназначенных для работы в районах с высокими среднегодовыми скоростями ветра, а также с ветродвигателями, имеющими диаметр ветроколеса 5 м, предназначенными для работы в районах со среднегодовыми скоростями ветра ниже 5 м сек.

Генераторы постоянного тока общего назначения имеют магнитную систему с нормальным насыщением, вследствие чего их характеристика имеет кривую с большим углом наклона (относительно горизонтали) и отличается малым диапазоном колебания оборотов. Такие генераторы могут работать с ветродвигателями, обладающими меньшей неравномерностью хода и с более высокой мощностью.

Режим работы с постоянным сопротивлением в цепи возбуждения *. Характеристика шунтового генератора в зависимости от оборотов при постоянном напряжении графически представляется в виде прямой линии, наклон которой к горизонтальной оси координат определяется величиной тока возбуждения в цепи шунтовой обмотки генератора.

Вводя сопротивление в шунт генератора, мы сдвигаем характеристику вправо и уменьшаем крутизну её наклона, как показано на рисунке 305.

Кривая *I* дана при максимальном токе возбуждения. Кривая *II* — при среднем его значении и кривая *III* — при минимальном.

При работе ветроэлектрического агрегата желательно получить постоянство напряжения, которое достигается регулированием нагрузки генератора.

Такое регулирование наиболее просто осуществить приключением аккумуляторной батареи параллельно клеммам генератора (рис. 306). Роль аккумуляторной батареи в данном случае состоит в том, чтобы сглаживать колебания мощности ветродвигателя и поддерживать нормальную величину напряжения на клеммах генератора. При снижении оборотов ветродвигателя будет падать напряжение на клеммах генератора, и, если аккумуляторная батарея находится в состоянии нормального заряда, то её напряжение окажется выше, чем у генератора.

---

* По материалам ветросиловой лаборатории ВНИМЭ, разработанным инж.-электр. И. Б. Вершининым и Г. А. Печковским.

Благодаря этому она примет на себя часть нагрузки за счёт разгрузки ветродвигателя. Вместе с этим увеличатся его обороты, и напряжение генератора восстановится.

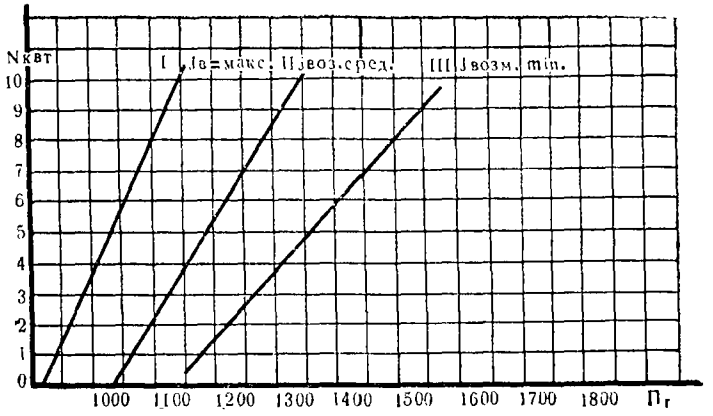


Рис. 305. Характеристика шунтового генератора с разным возбуждением.

Если обороты ветродвигателя упадут настолько, что генератор может перейти на режим мотора, то он должен автоматически отключаться. При увеличении же мощности и оборотов ветродвигателя напряжение генератора окажется выше напряжения аккумуляторной батареи, вследствие чего она перейдёт на режим заряда.

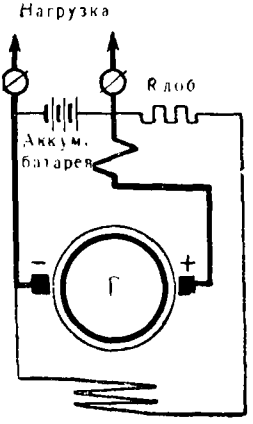


Рис. 306. Приключение аккумуляторной батареи к клеммам генератора (буфером).

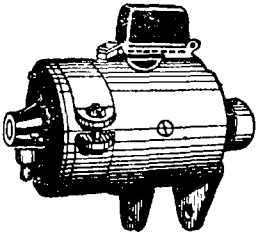


Рис. 307. Регулятор напряжения на электродинамо.

Поддержание нормального напряжения может быть также осуществлено посредством автоматического включения и отключения части нагрузки в такт с колебанием мощности ветродвигателя. Для такой работы более подходит шунтовой генератор с противокомпаундной обмоткой. Этот генератор обладает более мягкой характеристикой $N=f(n)$ и ограничивает максимальный ток заряда аккумуляторной батареи. С увеличением оборотов поднимется напряжение генератора и при постоянном сопротивлении внешней цепи увеличивается ток нагрузки и

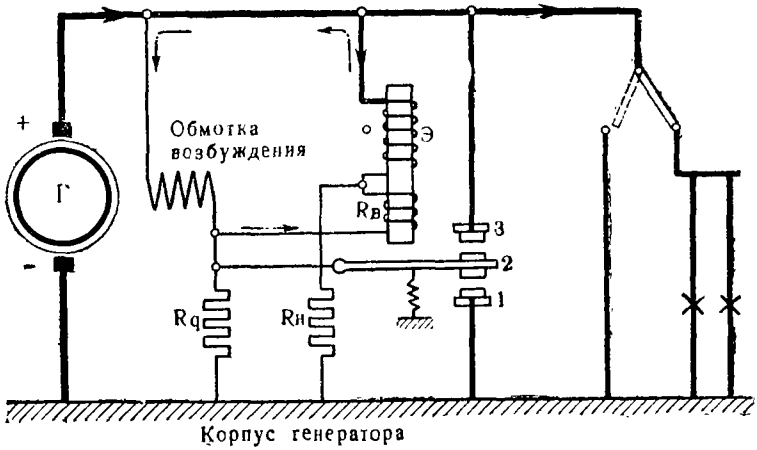


Рис. 308. Регулятор напряжения ВР.

последовательной противокомпаундной обмотки. Увеличение же тока в последовательной компаундной обмотке усилит противодействующее её влияние основному току возбуждения и, следовательно, ограничит степень возрастания напряжения.

Регуляторы напряжения. Для работы с генераторами ГБТ и ГАУ применяется вибрационный регулятор БР, который монтируется на самом генераторе (рис. 307). Действие регулятора заключается в следующем. При напряжении генератора ниже нормального пружина притягивает якорёк *2* к контакту *1* (рис. 308); при этом добавочное сопротивление обмотки возбуждения генератора увеличивается. Как только напряжение поднимется выше нормального, электромагнит *3*, преодолев силу пружины, притягивает якорёк *2* в свою сторону; при этом

сопротивление $R_н$ окажется расшунтированным, ток возбуждения уменьшается и напряжение генератора начнёт падать и т. д. В результате якорёк будет делать колебания, частота которых может доходить до 30 периодов в секунду, вследствие чего колебания напряжения будут настолько малы и часты, что практически его можно считать постоянным.

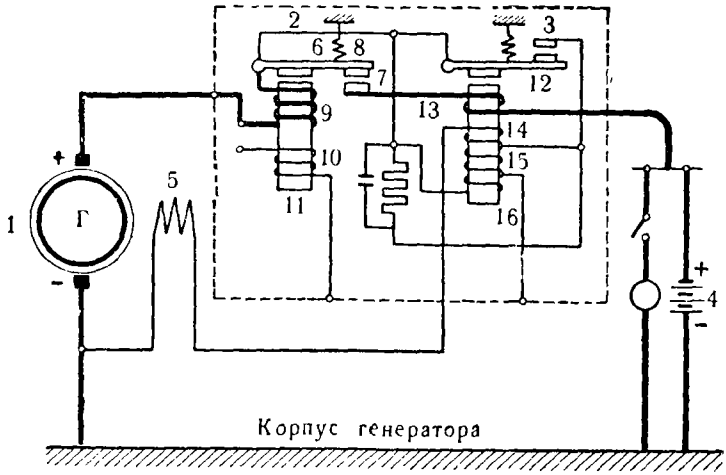


Рис. 309. Электрическая схема реле-регулятора РР:

1 — генератор автобусный; *2* — реле обратного тока; *3* — регулятор напряжения; *4* — аккумуляторная батарея; *5* — обмотка возбуждения генератора; *6* — якорь реле обратного тока; *7* — контакты; *8* — пружина; *9* — токовая обмотка; *10* — шунтовая обмотка; *11* — сердечник; *12* — якорь регулятора напряжения; *13* — токовая обмотка; *14* — выравнивающая обмотка; *15* — ускоряющая обмотка; *16* — основная обмотка.

Реле-регулятор РР (рис. 309), также вибрационного типа, кроме собственного регулятора *3*, имеет реле *2* обратного тока типа ЦБ, служащее для защиты аккумуляторной батареи от разряда на генератор. Реле-регулятор предназначен для работы с генератором ГА 250/12. Выполняется он в виде самостоятельного прибора и монтируется отдельно от генератора.

§ 63. ВЕТРОЗАРЯДНЫЕ АГРЕГАТЫ

Ветрозарядными агрегатами называют маломощные ветроэлектрические установки, предназначенные для зарядки аккумуляторных батарей. Для ветрозарядных агре-

гатов применяются быстроходные ветродвигатели малой мощности с диаметром ветроколес от 1,5 до 3,5 м, а генераторы — автомобильного типа, описанные выше. Зарядка аккумуляторной батареи является наиболее удобной нагрузкой для ветродвигателя. Рассмотрим несколько примеров ветроэлектрических агрегатов.

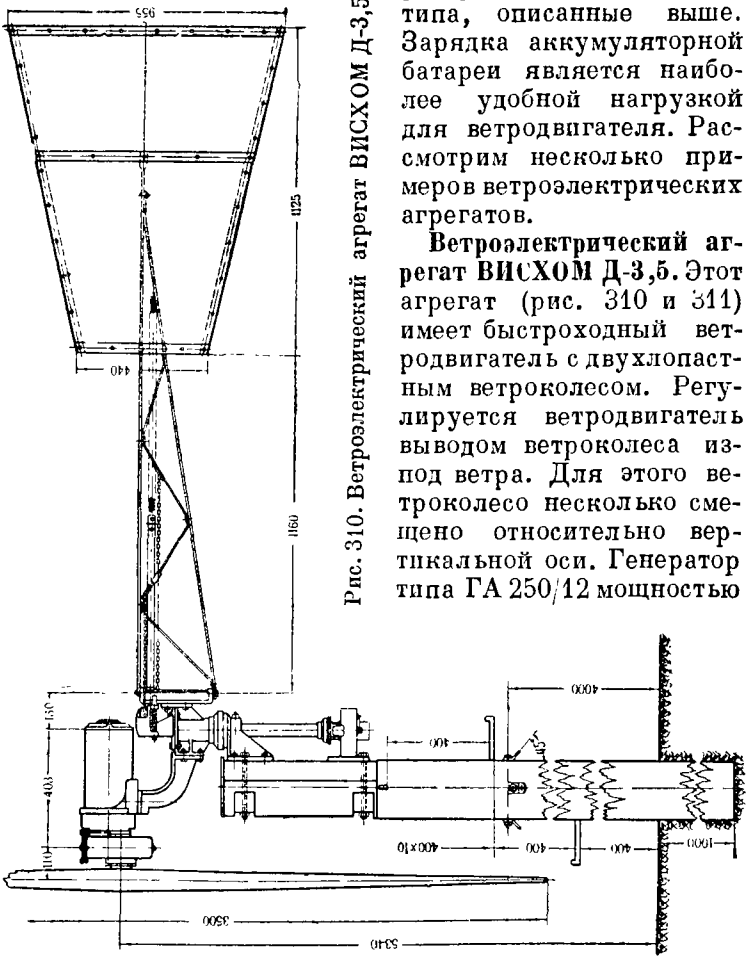


Рис. 310. Ветроэлектрический агрегат ВИСХОМ Д-3,5.

Ветроэлектрический агрегат ВИСХОМ Д-3,5. Этот агрегат (рис. 310 и 311) имеет быстроходный ветродвигатель с двухлопастным ветроколесом. Регулируется ветродвигатель выводом ветроколеса из-под ветра. Для этого ветроколесо несколько смещено относительно вертикальной оси. Генератор типа ГА 250/12 мощностью 250 ватт и напряжением 12 вольт закреплён на головке ветродвигателя. Для районов с большими среднегодовыми скоростями ветра, выше 5 м/сек., агрегат оборудуется генератором типа ГТ 1000/24 мощностью в 1 квт, напряжением 24 вольта. Электрическая часть агрегата предусматривает использование его, как зарядной установки для

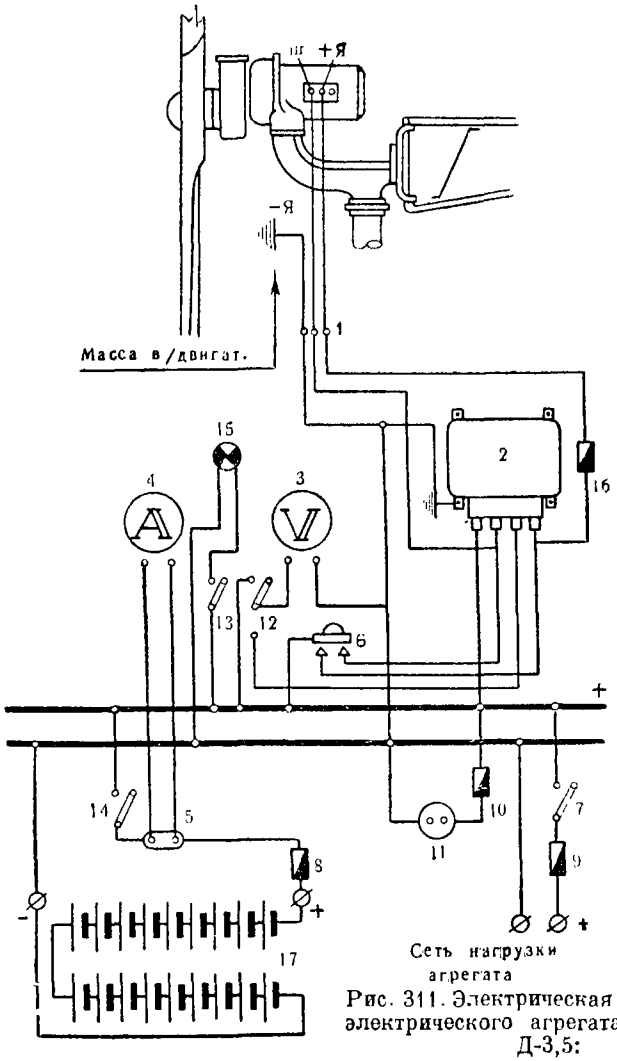


Рис. 311. Электрическая схема ветроэлектрического агрегата ВИСХОМ Д-3,5:

1 — генератор; *2* — реле-регулятор; *3* — вольтметр; *4* — амперметр в цепи аккумуляторной батареи; *5* — клеммы подключения аккумуляторной батареи; *6* — кнопка стартерного пуска ветродвигателя; *7* — выключатель сети нагрузки агрегата; *8* — предохранитель аккумуляторной батареи; *9* — предохранитель сети нагрузки агрегата; *10* — предохранитель в штепсель на розетке щита; *11* — штепсельная розетка включения переносной лампы; *12* — вольтметровый переключатель; *13* — выключатель лампы приборов; *14* — выключатель аккумуляторной батареи; *15* — лампа подсвета приборов щита; *16* — предохранитель цепи генератора; *17* — аккумуляторная батарея.

маломощных радиостанций. Установка предназначается для зарядки двух групп аккумуляторных батарей на 12 вольт и на 160 вольт. Каждая батарея состоит из двух комплектов. Когда один питает аппаратуру станции, другой заряжается. Подключение для зарядки аккумуляторной батареи 160 вольт к источнику тока 12 вольт осуществляется путём разбивки её на 13 групп. При зарядке группы соединяются параллельно, а при работе на нагрузку они переключаются в общую цепь последовательно.

Чтобы обеспечить достаточное напряжение при заряде батарей, генератору задаётся напряжение до 18 вольт, которое при начале заряда гасится в реостатах, имеющихся у каждой группы аккумуляторных батарей.

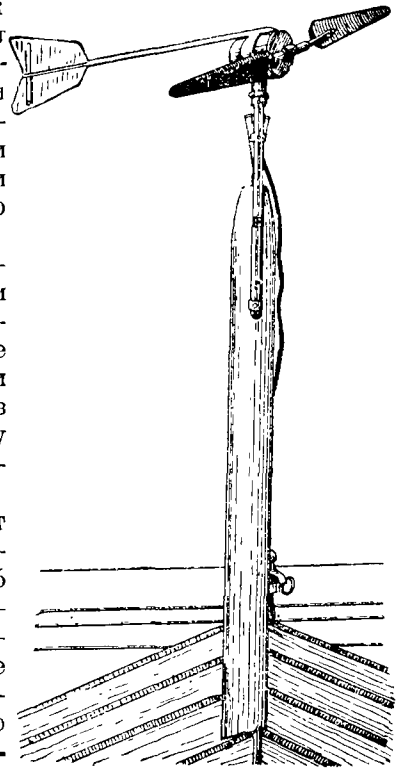


Рис. 312. Ветрозарядный агрегат ВИСХОМ РД-1,5.

Ветрозарядный агрегат ВИСХОМ РД 1,5. Ветрозарядный агрегат РД-1,5 на 100 ватт имеет двухлопастное ветроколесо диаметром в 1,5 м. В процессе регулирования махи лопасти поворачиваются во втулке под действием центробежных грузов, смонтированных на штанге, закреплённой на махе под углом 90° к хорде профиля нижнего сечения лопасти. Эта система регулирования предложена В. С. Шаманиным. Электрическая часть агрегата разработана инж. И. Б. Вершининым. Ветроколесо насажено непосредственно на ось генератора типа ГАУ мощностью 100 ватт, напряжением 6 вольт. Общий вид агрегата показан на рис. 312; на рис. 313 дана электрическая схема.

Ветрозарядный агрегат ВИСХОМ УД-1,5, такой же мощности (рис. 314), разработан В. В. Уткиным-Егоровым. Отличительной особенностью этого ветродвигателя является весьма точное регулирование оборотов ветроколеса, насаженного непосредственно на ось генератора. Этот агрегат рассчитан для работы с генератором переменного

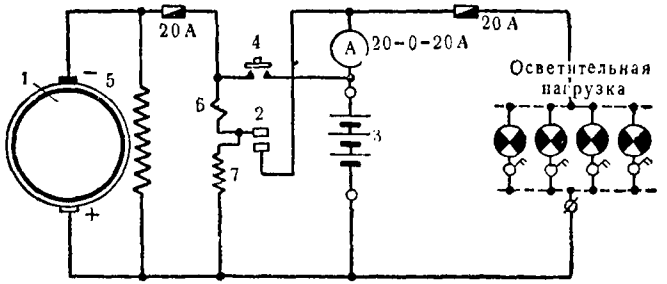


Рис. 313. Электрическая схема ветрозарядного агрегата ВИСХОМ РД-1,5:

1 — генератор 100 вт, 6—8 в; *2* — реле обратного тока; *3* — аккумуляторная батарея 6 в, 144а-ч; *4* — кнопка принуждённого пуска ветродвигателя; *5* — шунтовая обмотка генератора; *6* — последовательная обмотка реле; *7* — шунтовая обмотка реле.

тока в течение до полутора лет, без обслуживающего персонала.

Применяется для автоматических метеорологических станций.

§ 64. ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ МАЛЫХ МОЩНОСТЕЙ

Ветры побережий морей и океанов отличаются большими скоростями и представляют мощный источник энергии.

Даже первая ветроэлектростанция в приморском районе СССР с ветродвигателем ЦВЭИ Д-8, несмотря на отсутствие автоматического электрооборудования, давала электроток с малым колебанием напряжения. Из 8 760 часов в году эта ветроэлектростанция работала 6 200 часов с полной мощностью. Понятно, такое число часов годовой отдачи полной нагрузки возможно лишь в этом районе, с высокими скоростями ветра. Что же касается малых колебаний напряжения электротока, то это до-

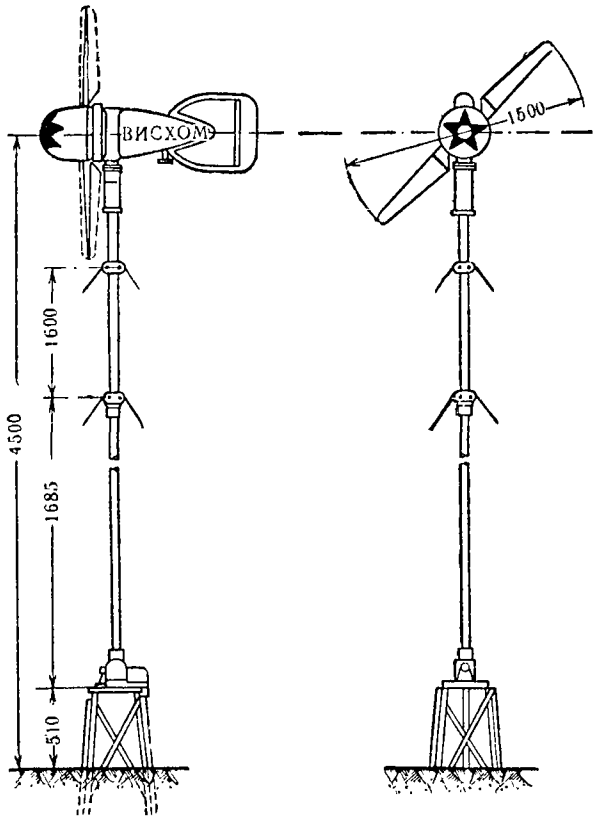


Рис. 314. Ветроэлектрический агрегат ВИСХОМ УД-1,5.

стижение обязано исключительно системе регулирования Г. Х. Сабинина и Н. В. Красовского, применяемого у ветродвигателей этого типа (см. главу IX, § 35, рис. 129).

Благодаря высоким скоростям ветра, многие ветроэлектростанции работают по нескольку месяцев без резерва. В какой мере загружался резерв в течение года на одной из станции видно из эксплоатационных графиков (рис. 315, а и б) ВЭС Д-12 — нижний график и ВИМЭ Д-5 — верхний, где выработка резерва показана чёрным, а выработка ветродвигателя — косыми штрихами.

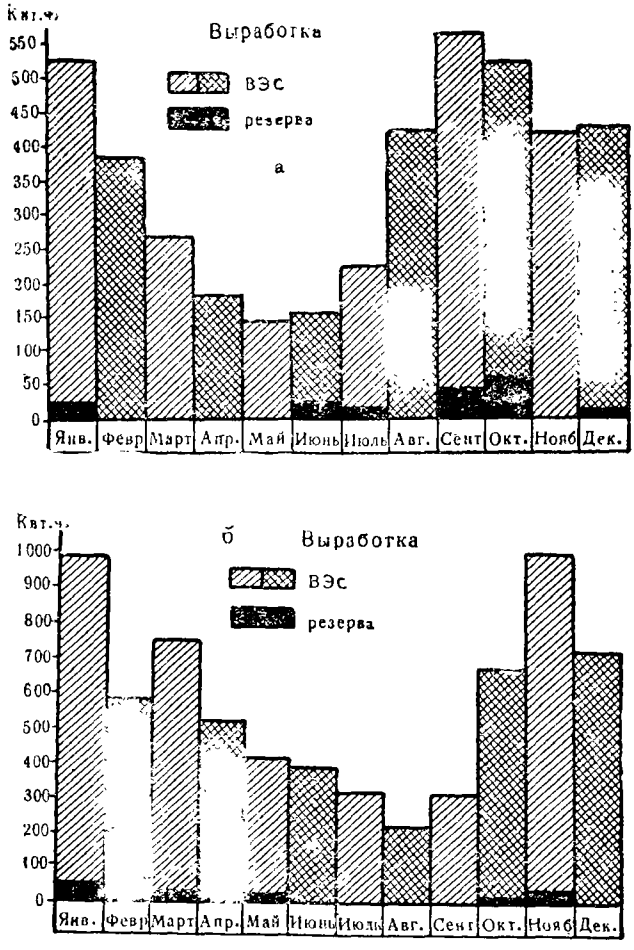


Рис. 315. Эксплоатационный график ветроэлектростанции:

а — ветроэлектростанция ВИМЭ Д-5; *б* — ветроэлектростанция Д-12.

Строительство ветроэлектростанций в районах, удалённых от тепловых энергетических ресурсов, позволяет значительно сократить ввоз туда горючего, сопряжённый обычно с большими трудностями [39].

§ 65. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ОБЩУЮ СЕТЬ С КРУПНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ СТАНЦИЯМИ И ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ

Ветроэлектростанции изолированного типа имеют весьма существенный недостаток, который заключается в том, что для обеспечения равномерной подачи энергии необходимо устанавливать аккумуляторы и резервный тепловой двигатель. Вследствие этого мощные ветроустановки постоянного тока трудно осуществимы, а стоимость получаемой энергии очень высока. Ветроустановки изолированного типа целесообразно строить там, где слишком дорога энергия других источников. Однако эти ветроустановки оказываются выгодными в том случае, если они работают с механическим приводом, а электроэнергия вырабатывается для подсобных целей, как-то: освещение обслуживающих помещений, зарядка и т. п.; в этом случае не нужны аккумуляторы большой ёмкости.

Ветроустановка, обслуживающая электроосвещение и моторную нагрузку, будет иметь потери как в механических, так и электрических машинах, т. е. будет менее выгодна.

Полезная мощность ветроустановки, работающей на механический привод, имеет выражение:

$$N_n = N_в\, \eta_м.$$

Если же ветроустановка будет вырабатывать электроэнергию для силовой нагрузки, то её полезная работа будет равна

$$N'_n = N_в\, \eta_м \eta_г\, \eta_д,$$

где: N'_n — полезная мощность;

$N_в$ — мощность ветродвигателя;

$\eta_м$ = от 0,6 до 0,8 — механический коэфициент полезного действия передачи от ветроколеса к рабочей машине;

$\eta_г$ = от 0,7 до 0,8 — коэфициент полезного действия генератора;

$\eta_д$ = от 0.7 до 0,8 — коэфициент полезного действия электродвигателя.

Взяв верхние пределы коэфициентов полезного действия машин, получим:

$$N_n = N_в\, 0{,}8$$
$$N'_n = N_в\, 0.8 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8 = N_в \cdot 0{,}512.$$

Таким образом, во втором случае наша ветроустановка давала бы в 0,8:0,512=1,56 раза меньше полезной мощности.

Для электрификации социалистического сельского хозяйства чрезвычайный интерес представляют ветроэлектростанции большой мощности, работающие на общую электрическую сеть параллельно с тепловыми и гидравлическими станциями. Общая сеть крупных электростанций в этом случае представит огромный аккумулятор, поглощающий избыточную электроэнергию и покрывающий нагрузку ветроэлектростанций в дни безветрия. В этом случае будет исключена необходимость установки аккумуляторов с низким коэфициентом полезного действия, чем сильно удорожается энергия ветроэлектростанций.

При работе ветроэлектростанции параллельно в сеть, приходится решать вопросы, связанные с устойчивой работой станции, исключающей перегрузку ветродвигателя и генератора и качания в системе при надёжности в эксплоатации. Всё это требует создания механических и электрических устройств для автоматического регулирования ветроэлектростанции.

Генераторы для параллельной работы в общую сеть. Для параллельной работы ветроэлектростанций переменного тока возможно применение как синхронных, так и асинхронных генераторов.

Первые имеют строго определённое постоянное число оборотов, зависящее от частоты сети.

Асинхронные же генераторы могут при постоянной частоте сети допускать некоторое небольшое колебание оборотов.

Асинхронные генераторы обладают рядом преимуществ по сравнению с синхронными, а именно: они дёшевы и просты в конструкции, не требуют добавочного возбудителя и устойчивы при перегрузках. К недостаткам этих генераторов можно отнести то, что они загружают сеть реактивными токами. Коэфициент полезного действия их сильно падает с уменьшением нагрузки.

Синхронные генераторы для включения в сеть переменного тока требуют полной предварительной синхронизации генератора с сетью. Это может быть осуществлено автоматическим синхронизатором. Достоинство этих генераторов заключается в том, что они работают в сеть, не ухудшая её режима, и обладают высоким коэфициентом

мощности cos φ. Нагрузка мало влияет на величину коэфициента полезного действия. Этот генератор менее удобен для работы на ветроэлектростанциях по следующим причинам: сложна синхронизация; генератор требует отдельного возбудителя; имеется опасность перегрузок, против которых электрическая защита затруднительна.

Работа ветродвигателя с асинхронным генератором. Для удовлетворительной работы ветросилового агрегата требуется полное согласование характеристик ветродвигателя с характеристикой генератора. Мощность, отдаваемая асинхронным генератором в сеть на оборотах ниже синхронных, равна 0. При увеличении оборотов выше синхронных мощность быстро растёт и, при скольжении до 5%, достигает своего максимума. При ещё большем увеличении оборотов мощность, отдаваемая генератором в сеть, понижается.

Таким образом рабочий режим асинхронного генератора протекает между наибольшей мощностью, изменяющейся пропорционально скольжению, и нулевой, соответствующей синхронному числу оборотов. При этом ветродвигатель и асинхронный генератор должны быть рассчитаны на возможную перегрузку до 60%.

Рабочий процесс ветроэлектростанции с асинхронным генератором протекает в следующем порядке. Пущенный в работу ветродвигатель при определённой скорости ветра набирает обороты, и как только они достигнут синхронного числа, автомат, связанный с центробежным регулятором, приключает через масляный выключатель сеть электростанции к общей сети, после чего ветроэлектростанция отдаёт ток в общую сеть до уменьшения скорости ветра ниже определённой величины. Реле обратного тока исключает при этом работу генератора в качестве электродвигателя.

Работа ветродвигателя с синхронным генератором. Работа ветродвигателя с синхронным генератором требует строго постоянных оборотов.

Перегрузка синхронного генератора допускается в значительно меньшей степени, чем у асинхронного. Вследствие этого требуется надёжное регулирование ветроэлектростанции либо путём регулирования ветродвигателя, либо регулирования от электросети станции. Без этого при перегрузках возможно выпадение генератора из

синхронизма. Таким образом, автоматизация ветроэлектростанций с синхронным генератором более сложна.

При работе ветроэлектростанций с регулированием за счёт ветродвигателя, как с асинхронным, так и с синхронным генераторами, необходимо отрегулировать ветродвигатель с таким расчётом, чтобы его обороты ограничивались не ниже синхронных. Если ветродвигатель отрегулирован так, что его обороты ограничиваются, не достигнув синхронных, то ни синхронный, ни асинхронный генераторы не будут отдавать энергию в сеть при любом ветре, так как излишнюю энергию будет погашать регулирование ветроколеса.

Нагрузка синхронного генератора может быть только при синхронной скорости и определяется сдвигом фаз.

Вместе с этим при регулировании за счёт ветродвигателя необходимо предохранить его, а также генератор от перегрузки. Так как мощность генератора растёт почти по вертикальной кривой, то, с увеличением скорости ветра, ветродвигатель, регулирующийся под действием центробежного груза, сохраняя обороты, будет развивать мощность пропорционально почти кубу скорости ветра, вызывая перегрузку агрегата. Поэтому требуется дополнительное устройство, предохраняющее агрегат от перегрузок при высоких скоростях ветра.

Работа ветроэлектростанций с синхронным генератором осуществляется по схеме, аналогичной с асинхронным генератором. Разница заключается лишь в том, что ветроэлектростанция с синхронным генератором должна иметь синхронизирующий автомат, который действует на масляный включатель сети лишь после того, как будут достигнуты определённые обороты генератора и совпадение фаз.

Кроме того, с целью улучшения режима сети должно быть введено автоматическое регулирование возбуждения, связанное с фазометром. Защита от перегрузок может быть осуществлена либо путём соответствующего регулирования ветродвигателя, либо дополнительным механическим приспособлением (гидравлическая муфта скольжения).

Электрическая защита от перегрузок делается переключением синхронного генератора на асинхронный, допускающий скольжение при увеличении оборотов.

§ 66. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАБОТЫ ВЭС ПАРАЛЛЕЛЬНО В СЕТЬ [53]

Экспериментальные исследования параллельной работы ВЭС были впервые произведены под руководством Г. Х. Сабинина в ветросиловой лаборатории ЦАГИ. Ветроэлектрический агрегат, с помощью которого проводились эти исследования, состоял из быстроходного ветродвигателя и индукционной машины, работающей в качестве генератора на асинхронном и синхронном режиме с установленной мощностью 5 квт при 220 вольт в сети.

Схема коммутации экспериментальной установки, разработанная И. Б. Вершининым, приведена на рис. 316. Эта схема позволяет работать как на асинхронном, так и на синхронном режиме. Однако она недостаточна для мощной ветроэлектрической станции, так как в ней отсутствует ряд элементов автоматизации и защиты.

Работа приборов, согласно данной схеме, осуществляется в следующем порядке.

а) Асинхронный режим.

Перед пуском ветродвигателя с индукционным генератором рубильники, согласно схеме рис. 316, цепи ротора *bcd* и рубильник *a* цепи статора должны быть включены.

Как только ветродвигатель сообщит ротору синхронную скорость, что отмечается тахометром *3* и *4*, замыкают цепь кнопкой *6* автоматического выключателя *2*. Автомат подключает генератор к сети и, в случае нарастания оборотов ротора, генератор воспринимает нагрузку сети соответственно задаваемому скольжению.

При снижении скорости ветра, а следовательно, и мощности, отдаваемой генератором, ниже расчётной, он автоматически отключается реле обратного тока.

Схемой предусмотрено ручное включение генератора кнопкой *6*, действующей на соленоид автоматического выключателя *2*. Защита генератора от перегрузки за неимением максимально зависимого реле, осуществлена плавкими предохранителями.

При работе ветроэлектростанции с ограничением мощности генератора автоматическим регулятором скольжения *9* последовательность работы приборов в подключении генератора сохраняется такая же, какая была при случае закороченного ротора. Разница лишь в том, что

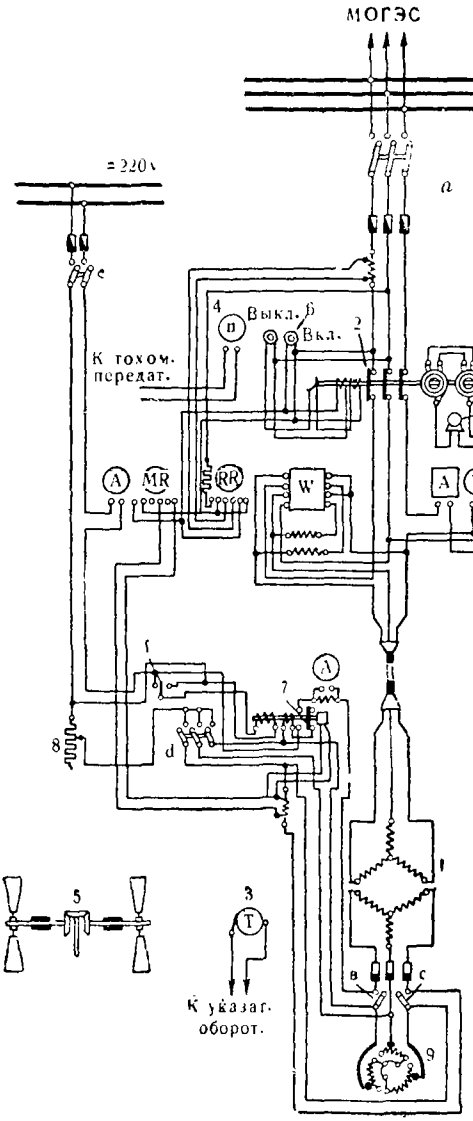


Рис. 316. Схема коммутации экспериментальной ВЭС для изучения параллельной работы в общую сеть:

1 — асинхронный генератор; *2* — автоматический выключатель; *3* — тахометр-передатчик; *4* — указатель тахометра; ○ — измерительные приборы, □ — самописцы; *5* — виндрозы; *6* — кнопки пуска и останова; *7* — автомат синхронизации; *8* — реостат возбуждения; *9* — регулятор скольжения; *10* — мотор затяжки пружины автоматического выключения.

рубильник d, закорачивающий ротор, в этом случае должен быть выключен.

б) Синхронный режим.

Перевод индукционного генератора на синхронный режим (рис. 316) осуществляется автоматически частотным реле 7. Перед пуском ветроэлектростанции включают рубильники a, d, e и выключают b и c. После этого производится подключение индукционного генератора 1 к сети. При этом переключатель f переводится в левое положение, соответствующее включению на шины возбуждения катушки частотного реле 7. Вторая катушка частотного реле, включённая при выключенном рубильнике в цепь 1 фазы ротора, обтекается током частоты скольжения и в момент перехода последнего через максимальное значение отрицательной волны создаёт поток, совпадающий по направлению с потоком катушки. Под действием суммарного потока катушек частотное реле 7 замыкает свои левые рабочие контакты, подключая ротор к машинам постоянного тока. Вследствие этого индукционный генератор входит в синхронизм и далее работает как синхронный. На случай выпадения генератора из синхронизма, что может иметь место при значительном толчке нагрузки, схемой предусмотрено автоматическое отключение генератора.

Защита ветроэлектростанции от перегрузки за счёт регулирования ветродвигателя. При работе ветродвигателя параллельно в сеть с синхронным генератором, центробежный регулятор, ограничивая обороты ветроколеса, не может ограничить мощность ветродвигателя. Объясняется это тем, что при установившихся синхронных оборотах, удерживаемых сетью постоянными, центробежный регулятор не может подействовать на механизм, поворачивающий лопасть под необходимый угол атаки. Чтобы не допустить перегрузку ветроэлектростанции, необходимо либо подействовать на механизм, изменяющий угол лопасти каким-либо приспособлением со стороны, не связанным с оборотами ветроколеса, либо приключить ветродвигатель к генератору не непосредственно, а через промежуточную гидравлическую муфту. В последнем случае мощность ветродвигателя будет ограничиваться за счёт его регулирования, так как в этом случае обороты ветроколеса могут возрасти на 1,5—2% и привести в действие центробежный регулятор. Мощность же

генератора будет ограничиваться за счёт работы гидравлической муфты, которая может передавать только предельный крутящий момент, устанавливаемый в зависимости от мощности рабочей машины. Избыточный момент вызывает проскальзывание муфты.

При исследовании работы ветродвигателя Д-10 со стабилизаторным регулированием на синхронном режиме ВЭС, работающем параллельно в сеть, было проведено испытание с

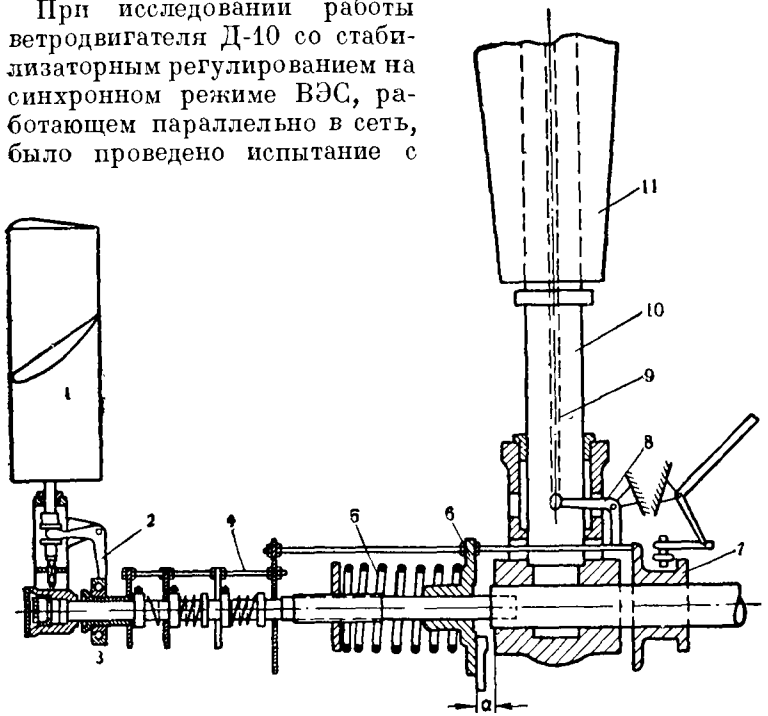


Рис. 317. Приспособление В. С. Шаманина для ограничения мощности ветродвигателя, регулирующегося поворотом лопасти под действием центробежных сил:

1 — гетрянка; *2* — рычаг; *3* — муфта скольжения; *4* — тяга; *5* — пружина; *6* — муфта, ход которой измеряется величиной *a*. *7* — муфта регулирования; *8* — рычаг; *9* — тяга к стабилизатору; *10* — мах; *11* — крыло ветроколеса.

тремя приспособлениями, которые действовали на механизм поворота конца лопасти, не будучи связаны с оборотами ветроколеса:

1) с масляным регулятором «Аскания»;
2) посредством поворота статора;
3) посредством дополнительного ветрячка, лопасти

которого могли перемещаться продольно оси маха под действием своих центробежных сил (рис. 317) (предложение В. С. Шаманина).

Каждый из этих механизмов приключался к регулирующей муфте, поворачивающей стабилизаторы, а вместе с этим и концы лопастей под необходимый угол атаки.

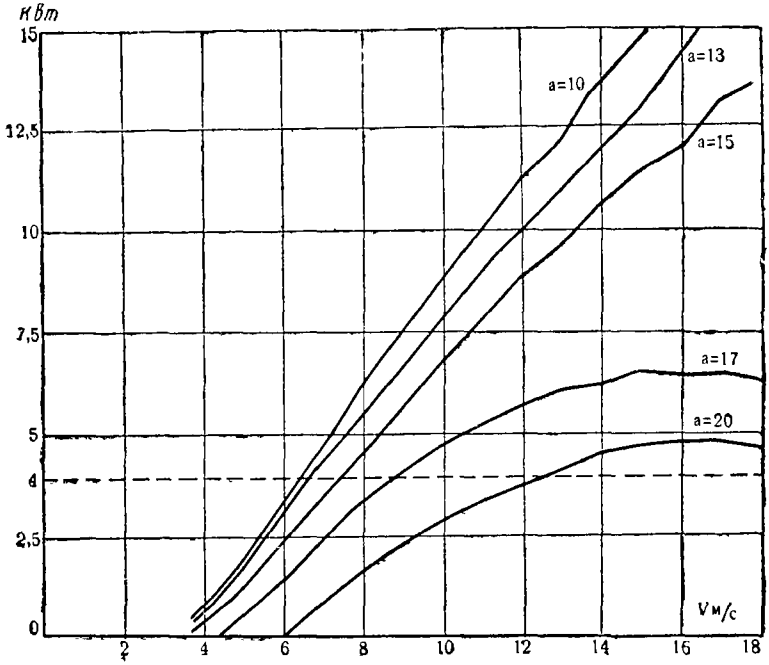


Рис. 318. Изменение мощности ветроколеса при различных a положения муфты в зависимости от скорости ветра.

Таким образом, положение поворотного конца лопасти вполне определялось величиной линейного перемещения регулирующей муфты a в миллиметрах, кинематически связанной со стабилизаторами крыльев.

Пользуясь экспериментальными характеристиками $\overline{M}$ и $\xi=f(a,Z)$, полученными при разных положениях регулирующей муфты, можно построить зависимость мощности ветроколеса от скорости ветра при каждом a и при постоянных оборотах. Такое построение выполнено для a=10, 13, 15, 17 и 20 и приведено на рис. 318.

Наиболее эффективно ветряк работает при $a=10$, т. е. при наименьшем угле отклонения лопасти. Однако при этом a мощность ветродвигателя перегружает генератор на 100% уже при скорости ветра в 9,3 м/сек., что недопустимо.

Чтобы избавить агрегат от перегрузки, необходимо, при возрастании скорости ветра выше 8 м/сек., перевести ветроколесо на менее эффективный режим работы, т. е. переместить муфту регулирования, связанную с поворотным концом лопасти, на расстояние более чем 10 мм от исходного положения.

С помощью графика рис. 318 легко определить, на какую величину a необходимо переместить муфту регулирования в зависимости от скорости ветра, чтобы сохранить мощность агрегата постоянной; примерное построение выполнено для генератора мощностью в 4 квт.

При работе ветродвигателя со стабилизаторным регулированием на асинхронный генератор с регулятором скольжения, обороты ветроколеса могут увеличиваться против нормальных от 1,5 до 2%. Это увеличение оборотов сейчас же вызовет перемещение центробежных грузов регулятора, которые подействуют на стабилизаторы и повернут лопасть. Таким образом, в данном случае не требуется дополнительного приспособления для смещения муфты на величину a.

В результате испытаний были получены записи хода регулирующей муфты в зависимости от скорости ветра при работе ветроэлектрического агрегата с указанными выше тремя дополнительными регуляторами. Запись хода муфты при работе с первым и вторым регуляторами показала, что требуемого изменения a в зависимости от V для сохранения постоянства мощности ветряка эти регуляторы не дают.

При непрерывном изменении скорости ветра соответственно должно быть и изменение величины a, между тем, колебания хода a муфты шли пиками. Характер колебаний муфты в зависимости от скорости ветра показан на рис. 319, где верхняя кривая показывает изменение хода a при работе с прибором «Аскания»; изменение скорости ветра при этой работе показано нижней кривой.

Более удовлетворительные результаты были получены при работе с ветрянкой, предложенной В. С. Шаманиным. На рис. 320 даны кривые скорости ветра (нижняя кривая)

и хода муфты *а*, соответствующего этим скоростям. Плавные колебания хода муфты показывают, что это устройство обеспечивает постоянство мощности ветродвигателя с колебаниями в более или менее близких пределах относительно заданной величины.

Таким образом, задача автоматической защиты от перегрузок ветродвигателя, работающего с синхронным

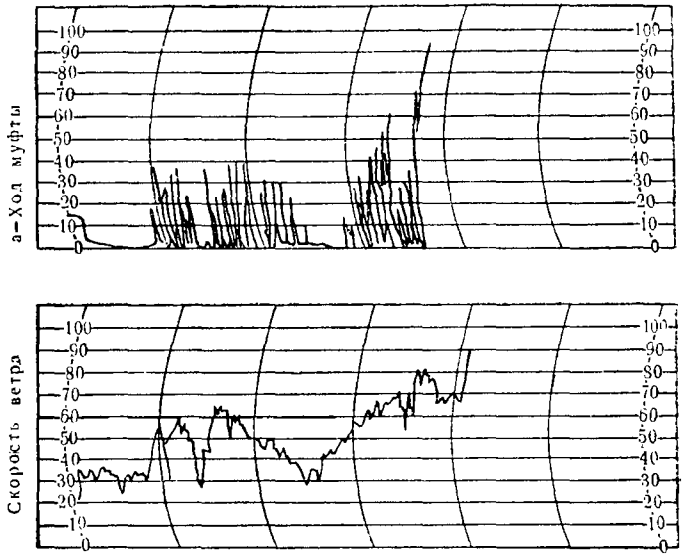


Рис. 319. Запись хода *а* муфты при работе ветроколеса с прибором «Аскания», действующим на муфту в зависимости от скорости ветра.

генератором параллельно в сеть большой мощности при скоростях ветра выше расчётных, технически может быть разрешена.

Хотя причины пульсации момента и не вполне были раскрыты, тем не менее можно высказать по этому вопросу следующее предположение. Пульсирующая по величине и направлению скорость ветра обусловливает более резкую пульсацию сил, вращающих ветроколесо. Но так как обороты ветроколеса при работе с синхронным генератором удерживаются строго постоянными, то пульсирующее действие этих сил проявится в резкой пульсации крутящего момента ветроколеса, что видно из уравнения

мощности ветродвигателя N, выраженной через крутящий момент M и угловую скорость ω:

$$N = M\omega \text{ кг м/сек.}$$

Так как ω=Const, то пульсация мощности целиком будет соответствовать пульсации крутящего момента.

При нагрузке ветродвигателя, допускающей хотя бы незначительные колебания угловой скорости ветроколе-

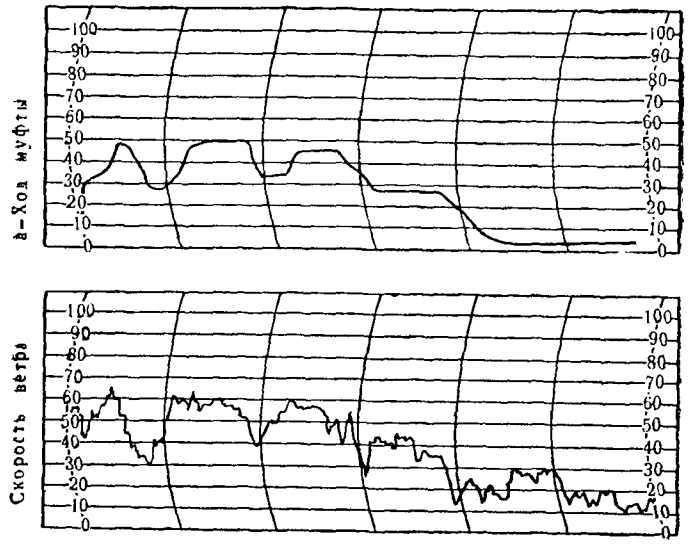


Рис. 320. Запись хода a муфты при работе ветроколеса с ветрянкой, действующей на муфту в зависимости от скорости ветра.

са, как, например, при работе с асинхронным генератором, пики крутящего момента будут в большей или меньшей степени убывать, что сейчас же отразится на течении кривой мощности, которая получит более плавный вид. При работе же ветродвигателя с синхронным генератором в общую электросеть, чрезвычайно важно устранить возможность передачи пульсирующего момента на генератор.

Такие условия работы ветроколеса может вполне обеспечить гидравлическая муфта, включённая в трансмиссию

между редуктором и генератором. Эта муфта допускает возможность скольжения ведущего механизма ветродвигателя относительно ведомого вала генератора. Следовательно, вместе с этим обороты ветроколеса могут несколько увеличиться, не нарушая строго постоянных оборотов генератора.

Нужно предполагать, что при наличии гидравлической муфты работа ветродвигателя на синхронный генератор может быть вполне удовлетворительной без каких бы

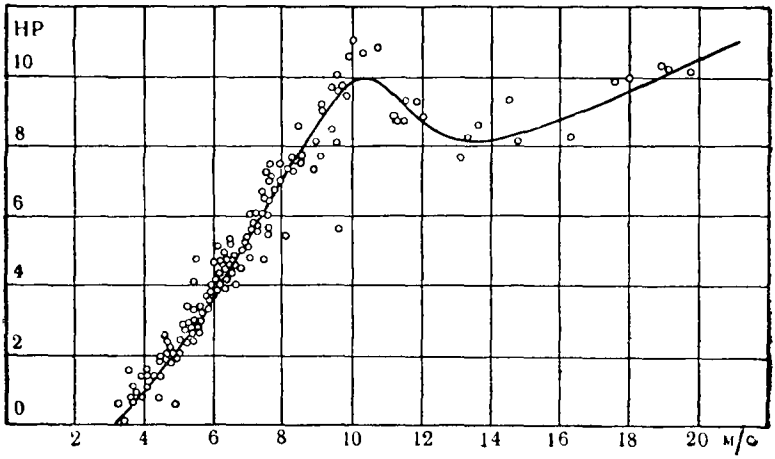


Рис. 321. Характеристика мощности ветроэлектрического агрегата, работающего без регулирования в общую электросеть.

то ни было дополнительных устройств для ограничения мощности ветроколеса, регулирующегося центробежными грузами.

О работе ветродвигателя без регулирования параллельно в сеть. На основании ряда теоретических и экспериментальных работ Г. Х. Сабинин пришёл к выводу, что для быстроходного ветряка (Z_n=6) крыльчатого типа, работающего параллельно в сеть, совершенно не нужно регулирование крутящего момента при скоростях ветра выше расчётных. Это положение было проверено экспериментом в ветросиловой лаборатории ЦАГИ на модели ветроколеса Д-10, i=3, Z_n= 7. Оказалось, что уже при скоростях ветра выше 12 м/сек. мощность на крыльях ветроколеса не только не возрастает, но даже убывает.

При этом число оборотов ограничивает сама сеть, которая по своей общей мощности во много раз больше, чем мощность ветряка. Характеристика мощности ветряка Д-10, $Z_л=7$, $i=3$, работающего без регулирования параллельно в сеть, показана на рис. 321.

Таким образом, во время работы быстроходного ветряка параллельно в сеть исключается опасность большой перегрузки генератора или разноса ветроколеса при увеличивающейся скорости ветра. В этом случае требуется лишь простое приспособление, действующее только при аварии в сети или внезапном снятии нагрузки.

§ 67. МОЩНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ В СЕТЬ

Крымская ветроэлектростанция ЦАГИ Д-30. Ветроэлектрическая станция в Крыму (рис. 322) имела чисто опытное значение и была построена с целью изучения параллельной работы ветроэлектростанции с теплоэлектростанцией района. По размерам ветроколеса Д=30 м и мощности около 100 квт при 30 оборотах эта станция не имела себе равных в СССР и за границей. В 1942 г. станция разрушена немецко-фашистскими захватчиками.

Высота башни ветродвигателя 23,3 м, расстояние между ногами 6,0 м. Кабина головки, где размещён генератор и электроаппаратура, имеет длину 13,7 м, ширину 3,5 м, высоту 3,8 м. Общий вес металла двигателя 49,1 т. Объём фундаментов 60 м³.

Ветроколесо диаметром в 30 м имеет три лопасти, которые свободно поворачиваются на своих махах под действием стабилизаторов системы регулирования Г. Х. Сабинина и Н. В. Красовского. Лопасти имеют обтекаемый профиль, аналогичный профилю крыла самолёта. Лопасть имеет 11 м длины, 2 м ширины у основания, 1 м ширины на конце. Махи из стальных труб диаметром в 350 мм соединены между собой лёгкой фермой из углового и швеллерного железа и труб. К махам прикреплён болтами стальной обод, диаметр которого 3,4 м. Обод с внутренней стороны имеет поверхность катания, которой он опирается на два стальных катка, вращающихся в шарикоподшипниках, закреплённых на ферме головки. Ветроколесо с ободом вращается на этих катках. Кроме того, на ободе рядом с гладкой поверхностью имеется поверхность с

отверстиями, куда вставлены деревянные зубья из граба. Зубья обода находятся в зацеплении с двумя чугунными шестерёнками, расположенными внутри обода. Шестерёнки насажены на два вала, передающих вращение дифференциалу, а от него валу генератора. Диференциал в передаче применён с целью равномерного распределения мощности между двумя передаточными валами. Общее передаточное число двух зубчатых передач равно 21 : 4. Плоскость вращения ветроколеса имеет наклон 12° к вертикали, что вызвано необходимостью уменьшить вылет ветроколеса относительно башни. Головка ветродвигателя смонтирована из углового и швеллерного железа и опирается через шаровую пяту на сферическую опору,



Рис. 322. Крымская ветроэлектростанция ЦАГИ Д-30.

закреплённую наверху башни. На этой опоре ветродвигатель поворачивается около вертикальной оси при установке ветроколеса на ветер. Ферма головки соединена

шарнирно с наклонной хвостовой фермой, на нижнем конце которой шарнирно присоединена тележка с мотором и лебёдкой. Хвостовая ферма служит для установа ветроколеса на ветер при изменениях его направления. Тележка опирается на рельс, уложенный вокруг башни по кругу с радиусом в 20,5 м. Движение тележки по рельсу производится электромотором мощностью в 1,5 квт с червячной передачей. Включение мотора в работу происходит автоматически, при изменениях направления ветра. Для этого наверху кабины установлен флюгер размером 400××700 мм. При изменениях направления ветра флюгер включает одну из катушек электромагнитного переключателя, находящегося в цепи мотора хвостовой тележки. Мотор перемещает тележку по рельсу до тех пор, пока ветроколесо не станет снова против ветра и флюгер не разомкнёт контакта. На башню поднимаются по хвостовой ферме, на которой для этой цели уложена лестница.

Асинхронный генератор установки представляет нормальный тип трёхфазного мотора серии Д-125 л. с. при 600 об/мин.

Номинальная мощность генератора 93 кв. Напряжение фазы статора 220 вольт, соединение обмоток статора треугольником, линейная сила тока 300 ампер, $\cos \varphi_н = 0{,}83$. Вес генератора — 2 040 кг.

От здания ветроэлектростанции проведена воздушная линия электропередачи 6,3 кв, сечением меди 3 ×10 мм, длиною 2 600 м, включённая в линию электропередачи и работающая параллельно тепловой электростанции.

Электрическая схема агрегата показана на рис. 323; принципиальная схема автоматического включения и защиты генератора — на рис. 324. Автоматическое устройство и релейная защита работают на переменном токе в 220 вольт. Автоматическое включение и выключение генератора на стороне низкого напряжения производится двухполюсными электромагнитными включателями типа MSW-34. В третьей фазе имеется однополюсный рубильник. Контакты каждого из выключателей, рассчитанные на 150 А, включены параллельно на ток генератора 300 А. Включение происходит автоматически, по достижении синхронного числа оборотов. Замыкание включающего контакта осуществляется центробежным механизмом, приводящимся во вращение от одного из промежуточных валов передач ветряного двигателя.

Эксплоатационные испытания ветроэлектростанции Д-30 проводились на двух режимах: при 19 и 30 оборотах в минуту ветроколеса. При этом оказалось, что режим работы ветроэлектростанции на 30 оборотах в минуту значительно выгоднее. Полученные испытанием характеристики приведены на рис. 325. Максимальный коэфициент использования энергии ветра крыльев $\xi=0{,}242$ был получен при быстроходности $Z_л=4{,}75$, что хорошо совпало с результатами испытания модели Д-10 на башне ветросиловой лаборатории.

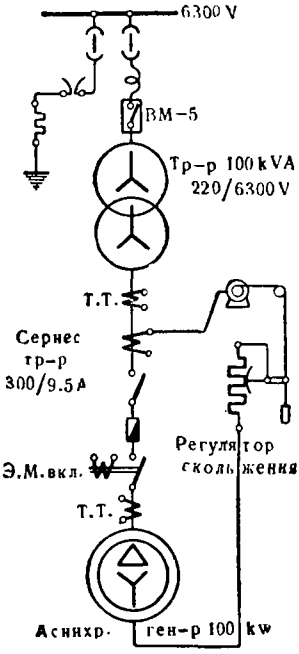


Рис. 323. Электрическая схема ветроэлектростанции Д-30.

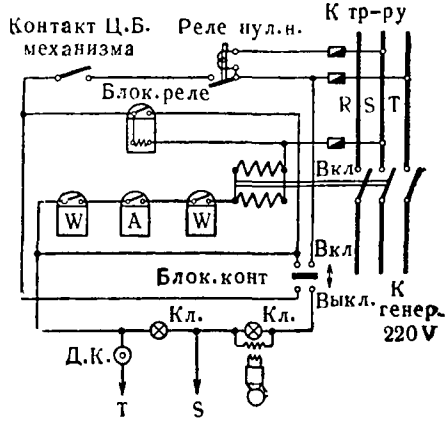


Рис. 324. Принципиальная схема автоматического включения и защиты генератора.

Снятие характеристик производилось следующим образом. Наблюдаемые величины отдаваемой в сеть мощности на низкой стороне повысительного трансформатора 220/6300 вольт брались средние за 20 минут. Эти величины определялись по разности показаний счётчика киловатт-часов и проверялись записью регистрирующего ватт-метра. Средняя скорость ветра за этот же промежуток времени 20 мин. замерялась на мачте на высоте в 25 м, соответствующей центру вращения ветроколеса. Мачта была установлена на расстоянии 50 м от ветродвигателя.

Записи скоростей ветра производились регистрирующим анемометром с электрическим контактом через 500 м пройдённого ветром пути.

Зарегистрированная мощность за 7 минут приведена на рис. 326. Кривая показывает колебания мощности асин-

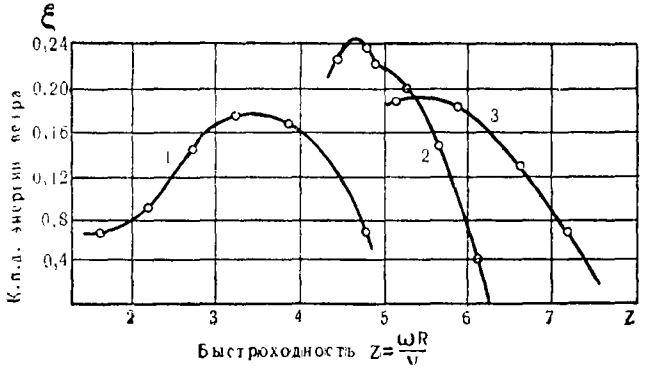


Рис. 325. Аэродинамическая характеристика крыльев ветроэлектростанции Д-30.

хронного генератора за этот короткий промежуток времени в пределах допустимых перегрузок не выше 30%.

Эксплоатационные испытания выявили вполне удовлетворительную работу агрегата и автоматического устройства [38].

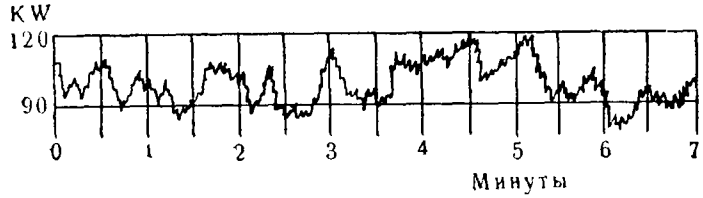


Рис. 326. Запись мощности ВЭС Д-30 при работе параллельно в сеть с асинхронным генератором.

Описание проекта ветроэлектростанции с ветродвигателем Д-50 м. Заслуживает внимания проект ветроэлектростанции с ветродвигателем Д-50 м, предназначенной для параллельной работы в общую сеть с тепловой электростанцией мощностью в 7 500 квт и с гидроэлектростанцией мощностью в 48 000 квт.

Общий вид этой ветроэлектростанции показан на рис. 327. Кабина генератора помещена наверху башни и может поворачиваться около её вертикальной оси при установе ветроколеса на ветер.

Передача вращения от вала ветроколеса к генератору производится через двухступенчатый редуктор с передаточным

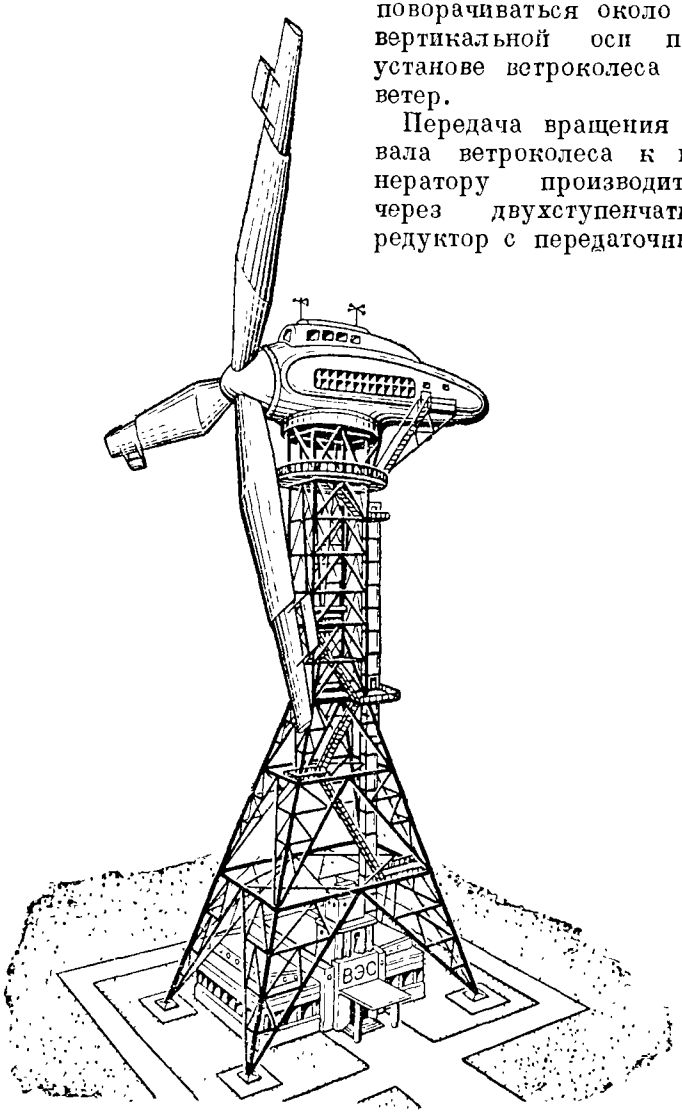


Рис. 327. Ветроэлектростанция ЦВЭИ Д-50 на 1 000 квт (проект).

отношением 1:25. Ветроколесо делает 24 об/мин., генератор — 600 об/мин. Общий вид кабины в разрезе показан на рис. 328. Кроме того, в кабине ветродвигателя находятся мотор установа на ветер и мотор пуска и останова ветродвигателя. Всё остальное электрооборудование находится внизу под башней на подстанции.

Напряжение синхронного генератора равно 6 300 вольт при 600 об/мин.; при этом мощность ВЭС равна 1 000 квт

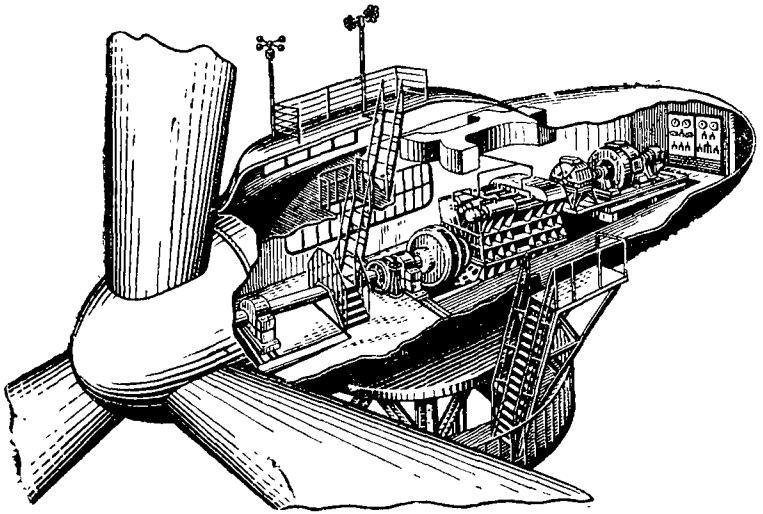


Рис. 328. Кабина ветроэлектростанции ЦВЭИ Д-50.

при 14 м/сек. скорости ветра. Среднегодовые скорости ветра в районе, где предположена к постройке ветроустановка, составляют от 7 до 8 м/сек. Годовая работа ветроэлектростанции рассчитана на 2 380 часов с выработкой из 10 агрегатов Д-50 м в 2,2 миллиона квтч в год. Проектная стоимость киловаттчаса 1,8 коп., стоимость установленного киловатта мощности 425 рублей.

Ветродвигатель электростанции 3-лопастный, быстроходного типа (Z_n=6), с аэродинамическим регулированием поворотом концов лопастей стабилизаторами, предложенным Г. Х. Сабининым и Н. В. Красовским.

Применение этого регулирования даёт огромные преимущества в смысле надёжности в действии, что известно из практики работы ветродвигателя Д-12, регулирую-

щегося по этой системе, а также простоты конструкции и малого веса регулирующего устройства.

Установ ветроколеса на ветер осуществляется электромотором, который смонтирован на ферме штыря в нижней части кабины. Этот мотор соединён через червячную передачу с двумя длинными валами, которые несут вторую червячную передачу, находящуюся в зацеплении с цевками обода, закреплённого на башне.

На кабине установлены ветрячки в вертикальной плоскости, проходящей через ось вала, вращающиеся при изменениях направления ветра; при этом они через электрическую передачу включают мотор останова, который затем и работает, пока ветроколесо не станет против ветра; ветрячки в этот момент останавливаются.

Высота башни 50 м; размеры основания 25×25 м. Для подъёма на верхний балкон башни имеется лифт. Кроме того, имеется лестница на случай бездействия лифта.

У основания башни расположено здание, в котором помещается основное распределительное устройство электрической части.

Пульсирующий характер энергии ветра и непостоянство его по скорости и направлению, а также полная автоматизация управления явились следствием усложнения схемы коммутации. В общей схеме коммутации разработаны следующие основные моменты:

1) автоматический пуск и останов ВЭС, обусловленные наличием или отсутствием ветра;

2) автоматическая синхронизация;

3) автоматическое регулирование напряжения быстродействующим регулятором напряжения;

4) автоматическое отключение ВЭС при срабатывании одной из аварийных защит без повторного автоматического включения;

5) автоматический установ ветродвигателя на ветер;

6) ограничение мощности при больших порывах ветра с помощью гидравлической муфты, допускающей проскальзывание ведущего вала.

Для иллюстрации приводим веса частей ветродвигателя:

Ветроколесо	35 т
Ферма головки	20 »
Механическая часть двигателя	53 »
Башня, лестница и лифт	52 »
Общий вес	160 »

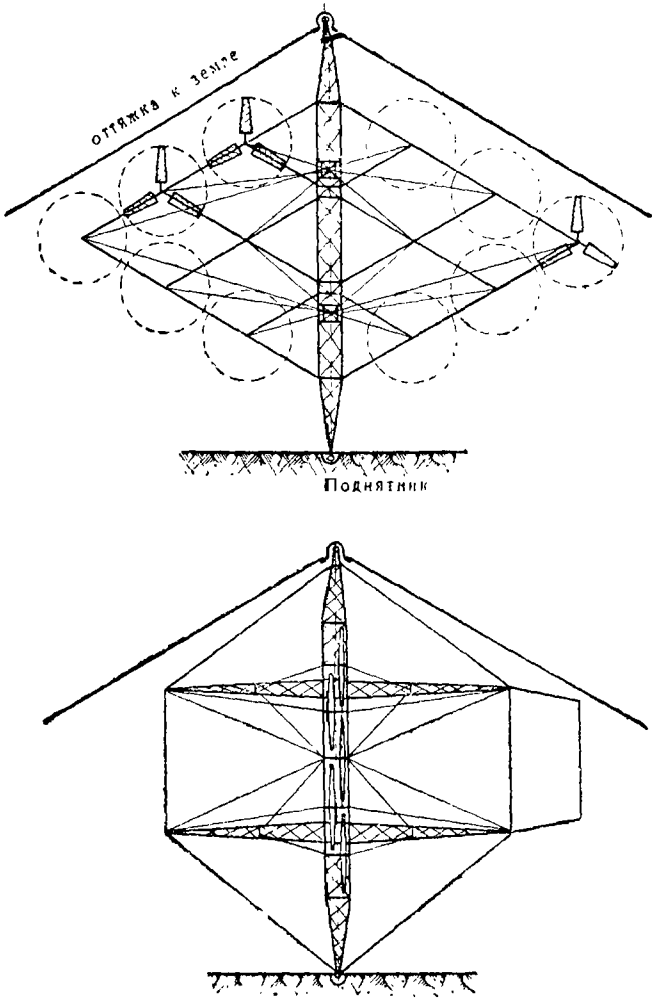


Рис. 329. Схема многоветряковой ветроэлектростанции системы А. Г. Уфимцева и В. П. Ветчинкина.

Многоветряковая ветроэлектростанция. А. Г. Уфимцев и проф. В. П. Ветчинкин предложили решить задачу мощной ветроэлектростанции не увеличением размера диаметра ветроколеса, а значительным числом ветроко-

лёс, относительно малых диаметров, смонтированных на общей башне рамной конструкции (рис. 329).

Рама с шахматным распределением ветроколёс монтируется на ферменной поворотной башне. От верхней опоры идут растяжки, удерживающие башню в вертикальном положении. На раме монтируется 12 ветряков с диаметром ветроколеса в 20 м каждый. Суммарная мощность — около 500 л. с., при скорости ветра 8 м/сек. Такую же мощность может давать при данной скорости ветра ветродвигатель с одним ветроколесом, имеющим диаметр 70 м. Но ветроколесо диаметром в 70 м практически осуществить чрезвычайно трудно, тогда как ветроколёса диаметром в 20 м уже имеются в практике. Последнее обстоятельство и послужило поводом к предложению многоветряковой ветроэлектростанции. Таких ветроэлектростанций в практике ещё нет.

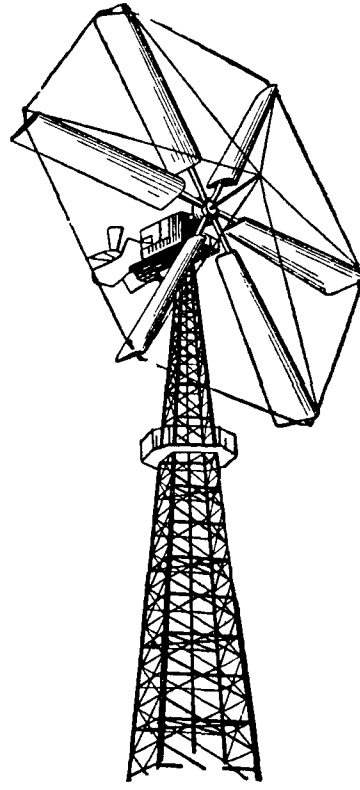


Рис. 330. Ветроэлектростанция на 30 квт с ветродвигателем системы Кумме.

§ 68. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАГРАНИЧНЫХ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Ветроэлектрическая установка, мощностью на 30 квт, выполненная Всеобщей кампанией электричества с ветродвигателем системы Кумме, показана на рис. 330.

Мощность моторов до 45 квт велика для данной ВЭС и требует вспомогательной машины, для чего применена динамомашина постоянного тока с параллельным возбуждением в 44 квт, приводимая в движение резервным двигателем, который

запускается в работу параллельно с ветродвигателем, во время максимального расхода энергии, т. е. во время молотьбы. Работа обеих машин при этом получается вполне удовлетворительной при схеме включения их, показанной на рис. 331. Здесь применена трёхпроводная система 2×230 вольт с распределением напряжения через батарею. Зарядный агрегат состоит из

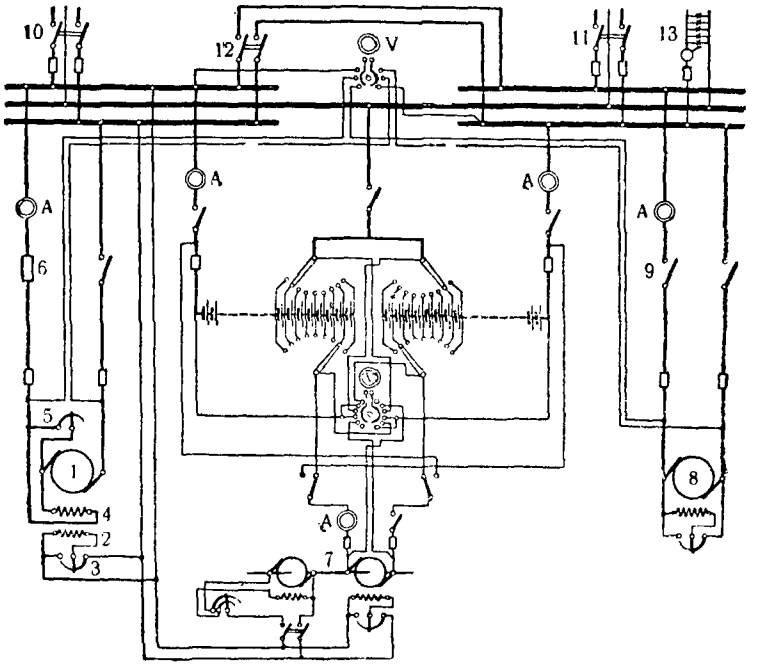


Рис. 331. Схема включения ветродвигателя и резервного двигателя.

мотора с параллельным возбуждением и повысителя напряжения. Аккумуляторная батарея имеет 240 элементов типа АК для наибольшей силы зарядного тока в 36 ампер.

В США большое распространение имеют маломощные ветрозарядные агрегаты с двухлопастным пропеллером, посаженным непосредственно на ось генератора специального тихоходного типа.

Электродинамо маломощных ветрозарядных агрегатов «Винчаржер» дают напряжение 6 вольт, при этом сила тока, в зависимости от оборотов, изменяется:

Обороты динамо	330	370	440	500	600	700	860	1 060
Амперы . .	1	2	4	5	8	10	12	14

Обороты от 300 до 1 000 в минуту может давать двухлопастный пропеллер длиною от 1,5 до 1,8 м, если ширина его лопасти и углы заклинения рассчитаны на быстроходность $Z_n > 7$.

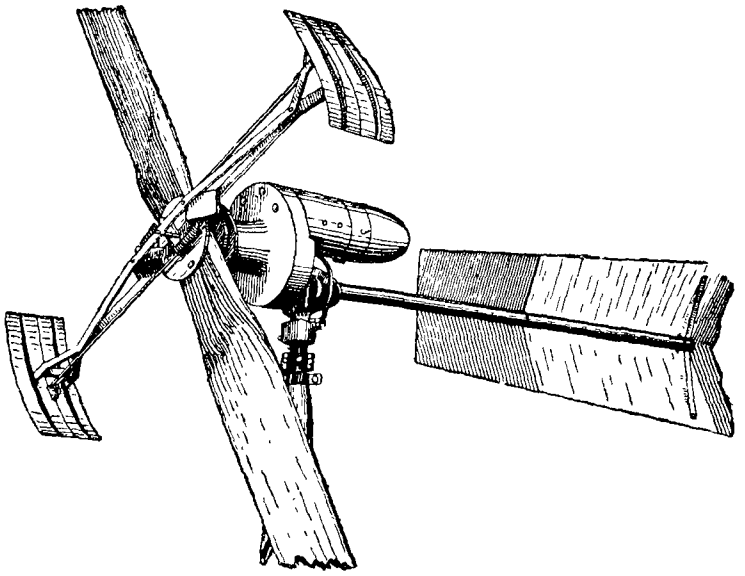


Рис. 332. Ветрозарядный агрегат «Винчаржер».

Ветрозарядные агрегаты мощностью выше 100 вт изготовляют с редуктором, так как пропеллер, имеющий диаметр выше 1,8 м, не может развить обороты, которые необходимы динамо при скорости ветра 8 м/сек.

На рис. 332 показан общий вид ветрозарядного агрегата «Винчаржер» с электродинамо на 32 вольта. Мощность ветрозарядного агрегата 650 вт. Передаточное отношение оборотов динамо к оборотам пропеллера равно около 5. Ограничение оборотов достигается с помощью воздушного тормоза, закреплённого на валу ветроколеса.

На некотором радиусе от оси вращения закреплены поверхности, имеющие изогнутость по радиусу своего вращения, что сделано с целью наименьшего их сопротивления при нормальных оборотах пропеллера. Как только ветроколесо начнёт развивать обороты выше нормальных, эти поверхности под действием центробежных сил отклоняются. При полном отклонении они становятся своей площадью перпендикулярно направлению движения и создают сопротивление. В обратное положение поверхности устанавливаются силой пружины. Устройство редуктора и других частей агрегата видно из рис. 333.

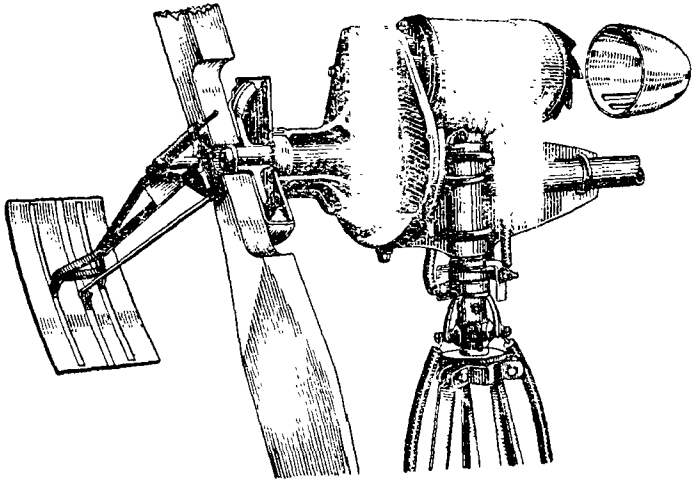


Рис. 333. Головка ветрозарядного агрегата, показанного на рисунке 332.

Фирма «Винд-Импеллер» выпускает ветрозарядные агрегаты (рис. 334) на такую же мощность, как и «Винчаржер», отличающиеся тем, что воздушный тормоз для ограничения оборотов пропеллера делается из поверхностей, поворачивающихся в плоскости вращения ветроколеса (рис. 335). Тормозящие поверхности при нормальных оборотах лежат в плоскости вращения (изображение *а*); при оборотах выше нормальных под действием центробежных сил собственного веса лопасти начнут перемещаться вдоль радиуса и будут преодолевать усилие пружины, показанной в положении *б*. Эти поверхности надеты своими втулками на ось, которая расположена в пло-

скости вращения ветроколеса перпендикулярно пропеллеру. Во втулках имеются винтовые прорези *а*, сквозь которые ввернуты пальцы *в*, благодаря чему поверхность при движении втулки продольно оси поворачивается около неё и устанавливается плоскостью в направлении движения, как изображено на рис. *б*, и создаёт сопротивление.

Эти ветрозарядные агрегаты выпускаются мощностью от 100 вт до 5 квт.

В последние годы в США уделено внимание ветроэлектростанциям большой мощности.

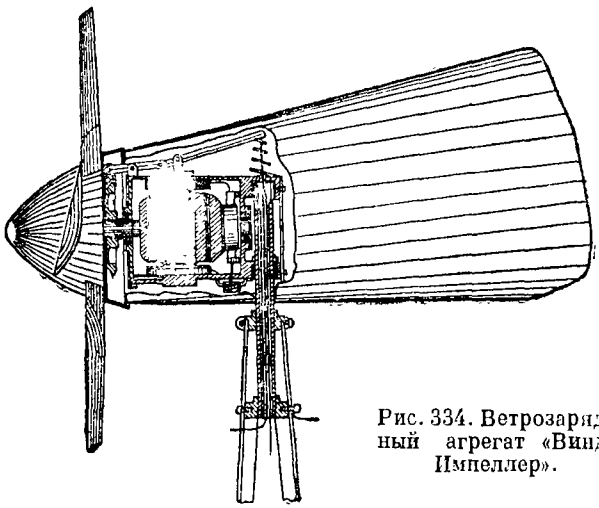


Рис. 334. Ветрозарядный агрегат «Винд-Импеллер».

На рис. 336 показана ветроэлектростанция мощностью в 1 000 квт, построенная около города Рутлэнд, в штате Вермонт, на вершине горы Грэндпас, высота которой около 610 м над уровнем моря.

Башня ветродвигателя ферменной конструкции имеет высоту 35 м и закреплена на стальной решётке, заложенной в бетонный фундамент на глубину около 7 м. Двухлопастное ветроколесо с диаметром в 53 м имеет длину лопасти 20 м и ширину 3,7 м, одинаковую по всей длине. Развиваемая мощность 1000 квт при скорости ветра 14 м/сек. и 28,7 об/мин. Окружная скорость концов лопастей составляет 80,3 м/сек., что даёт быстроходность $Z=5{,}72$. Общий вес ветроколеса 20 т. Регулирование обо-

ротов достигается поворотом лопастей около оси махов. Махи крыльев у вала заделаны шарнирно так, что при порывах ветра под действием ударной нагрузки они отклоняются в направлении ветра на 20°, что помогает регулятору ограничивать обороты ветроколеса. Центробежные силы лопасти стремятся держать их в плоскости враще-

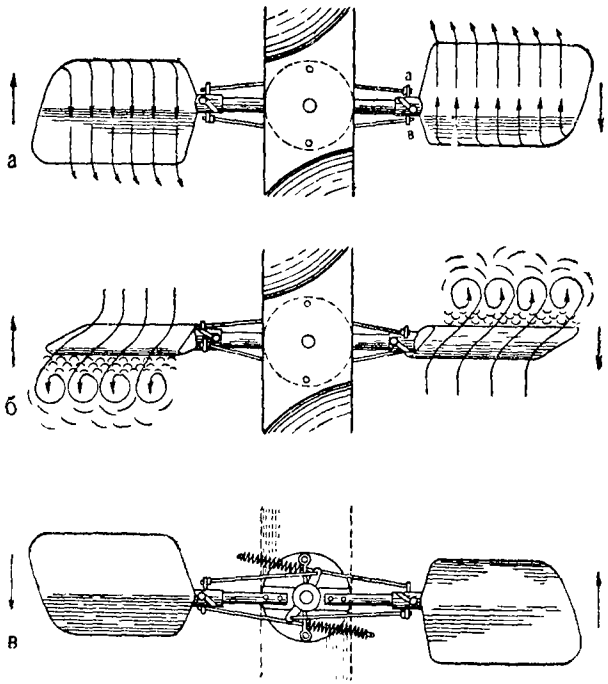


Рис. 335. Регулирование «Винд-Импеллер» изменением положения тормозящих поверхностей ветроколеса:

а — при нормальных оборотах; *б* — тормозные поверхности повернулись под действием центробежных сил; *в* — кинематическая связь поверхностей.

ния ветроколеса. Генератор развивает номинальную мощность 1 000 квт при $\cos\varphi=80\%$, напряжение 230 вольт, 60 периодов трёхфазного тока. Электропроводка от генератора опускается вниз через центральные отверстия фермы головки и соединяется с контактными кольцами, смонтированными на пустотелом стержне контактных колец. Щётки на этих контактных кольцах соединяются

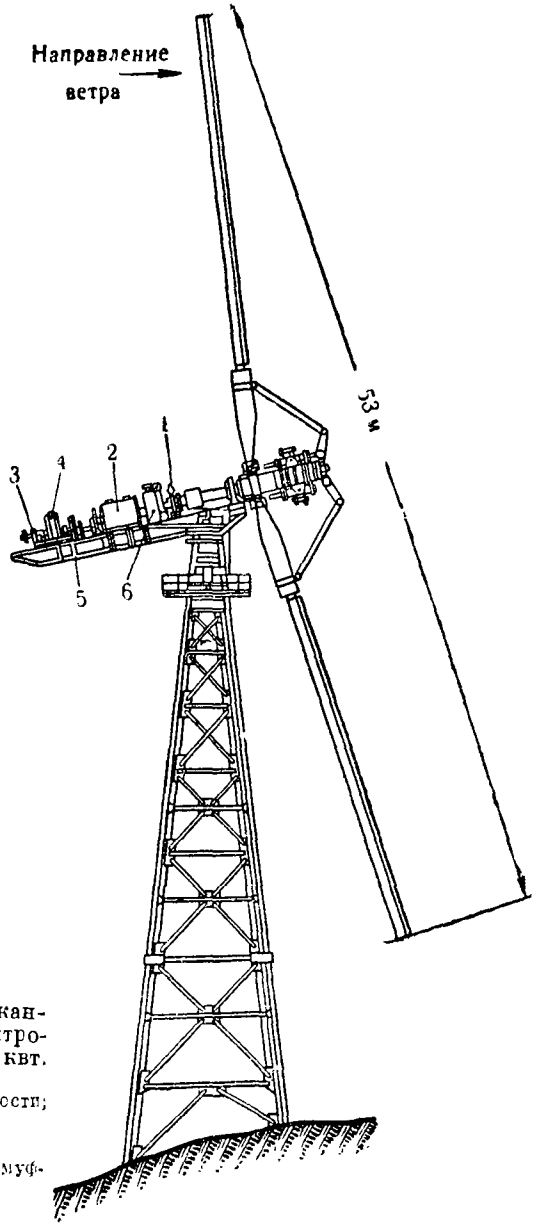


Рис. 336. Американская ветроэлектростанция на 1 000 квт.

1 — регулятор скорости;
2 — редуктор;
3 — возбудитель;
4 — генератор;
5 — гидравлическая муфта;
6 — масляный бак.

с кабелями, отводящими ток к трансформаторной группе, где напряжение повышается с целью присоединения к линиям электропередачи энергосистем.

Вал ветроколеса диаметром 61 см вращается в двух двойных роликовых подшипниках, смонтированных на расстоянии друг от друга около 3,7 м на опорной раме головки. Подшипник, размещённый непосредственно за ветроколесом, является радиальным, а подшипник у муфты для регулирования оборотов воспринимает обе нагрузки, радиальную и лобовую. Вал ветроколеса приключён к двухступенчатому редуктору с шевронной зубчатой передачей, повышающей обороты, которые должен делать генератор, до 600 в минуту. Первая ступень повышения оборотов производится с помощью зубчаток, находящихся в зацеплении с зубчатыми выемками на валу с каждой его стороны в одной плоскости, проходящей через ось вала. Вал второй ступени передачи соединён с валом генератора гидравлической муфтой фирмы Американ Блоуэр. С внешней стороны генератор непосредственно соединён с возбудителем. Стандартный регулятор скорости с дополнительными электроконтактами приводится в движение через зубчатую передачу от главного вала ветроколеса.

Установ ветроколеса по ветру осуществляется гидравлическим механизмом, который приводит в движение передачу, смонтированную на ферме головки и находящуюся в зацеплении с большим зубчатым колесом, закреплённым на верхнем венце башни. Включение и выключение механизма установа на ветер делается флюгером, всё время устанавливающимся по ветру.

Останов ветродвигателя производится тормозным устройством с фрикционной передачей, приводимой в движение электромотором.

С октября 1941 г. по март 1945 г. эта ветроэлектростанция выработала 360 тысяч квтч. Она находилась в работе за этот период всего 1 030 часов, из них 838 часов установка работала со средней мощностью 431 квт параллельно с электрической системой. В марте 1945 г. ветродвигатель потерпел аварию: на ходу отломалась лопасть ветроколеса весом в 7 т. Авария произошла вследствие неудовлетворительной системы регулирования.

ГЛАВА XVII

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО МОНТАЖУ И РЕМОНТУ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ И УХОД ЗА НИМИ

Монтаж ветродвигателей заводского изготовления имеет чрезвычайно важное значение в деле внедрения ветродвигателей в сельское хозяйство. Плохая пригонка частей ветродвигателя при монтаже вызывает не только плохую работу ветроустановки, но и полную её непригодность.

Подробные указания о порядке монтажа различных типов ветродвигателей даются в инструкциях, которые составляются либо заводом-заготовителем на каждый выпускаемый тип ветродвигателя, либо организацией, разработавшей конструкцию ветродвигателя.

§ 69. МОНТАЖ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ МАЛЫХ МОЩНОСТЕЙ ОТ 1 ДО 15 Л. С.

Монтажная бригада обычно состоит из 5 или 6 рабочих и одного квалифицированного бригадира.

Первая работа бригады состоит в распаковке и проверке комплектов частей ветродвигателя, доставленных на место. При проверке следует пользоваться спецификацией, помещённой в инструкции по монтажу, приложенной к данному комплекту ветродвигателя. Если при этом обнаружится недостача или бракованные детали, то сейчас же составляется акт и посылается на завод-изготовитель для срочного доукомплектования агрегата.

Вслед за этим бригадир делает разметку котлованов под фундаменты ног башни на выбранном под ветроустановку месте. Если ветродвигатель строится для подъёма воды, то учитывается при этом положение скважины относительно вертикальной оси башни.

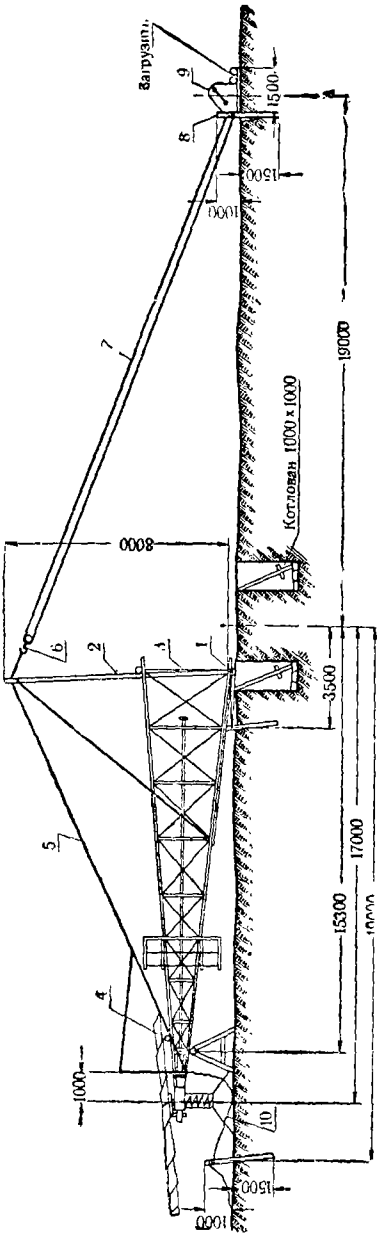


Рис. 337. Оснастка ветродвигателя такелажным оборудованием перед подъёмом.

Монтаж ветродвигателя начинают со сборки башни. Основные угольники пог одной из её панелей раскладываются на брёвнах так, чтобы после подъёма башни её ось точно совпала с отметкой центра башни на её основании. Если же ось башни не совпадёт с отметкой её центра на фундаменте, то для смещения поднятого ветродвигателя потребуется значительный труд.

После сборки башни приступают к сборке головки и вертикального вала ветродвигателя. Загрязнённые детали подшипников и шеек осей и валов промывают керосином и смазывают свежим тавотом. Зацепление верхней передачи, собранной в головке ветродвигателя, проверяют несколькими поворотами за ступицу ветрового колеса. При этом головка повёрнута осью ветроколеса вверх. Ветроколесо и механизм регулирования ветродвигателей мощностью до 10 л. с. собирают внизу, одновременно с монтажом головки.

Собранный ветродвигатель приподнимают в

Таблица 48

Такелаж для подъёма ветродвигателя ТВ-8

Наименование частей и деталей	Размер материала	Количество
1. Лебёдка грузовая 3 т	—	1
2. Блок одноручьевой 5 т		1
3. Блочные ролики под трос 17,5 мм	—	2
4. Якорное бревно для задней оттяжки	Сосна $d=22$ см $l=2$ м	1
5. Стрела	Сосна $d=22$ см $l=8$ м	1
6. Поперечина	Сосна $d=25$ см $l=6$ м	2
7. Бревно для подкрепления ног башни	Сосна $d=12$ см $l=5$ м	2
8. Подкладка — брус	Сосна 13×13 см $l=1$ м	8
9. Якорное бревно нижней поперечины	Сосна $d=25$ см $l=5$ м	1
10. Якорное бревно лебёдки	Сосна $d=25$ см $l=3$ м	1
11. Трос грузовой стальной	$d=17{,}5$ мм $(6\times37\times0{,}8+1)$ $l=100$ м	1
12. Якорный трос лебёдки	Стальной $(6\times37\times0{,}8+1)$ $d=17{,}5$ мм $l=15$ м	1
13. Якорный трос для поперечины	Стальной $(6\times37\times0{,}8+1)$ $d=17{,}5$ м, $l=20$ м	1
14. Растяжка стрелы трос	Стальной $(6\times30\times0{,}5+1)$ $d=10$ до 12 мм $l=20$ м	1
15. Оттяжка трос	Стальной $(6\times30\times0{,}5+1)$ $d=10$ до 12 мм $l=50$ м	3
16. Опорная скоба для роликов	Полосовое железо 100×12 мм	1
17. Ось с гайками	Железо круглое $d=30$ мм $l=250$ мм	1
18. Шпильки с гайками	$d=3/4''$ $l=36$ см	4
19. Шайба	Полосовое железо 10×80 мм	2
20. Хомут узла	Железо круглое $d=3/4''$	1
21. Хомут узла	» полосовое 10×60 мм	4
22. Хомут узла	» полосовое 10×60 мм	1
23. Трос блока стальной	$d=17{,}5$ мм $(6\times37\times0{,}8+1)$ $l=8$ м	1
24. Болты с гайками	$d=3/4''$ $l=45$ м железо круглое	8
25. Бревно упорное задней оттяжки	$d=22$ см $l=120$ см	2
26. Поперечное бревно под ветроколесо	$d=15$ см $l=6$ м	1

наклонное положение и кладут верхним отсеком на козёл (рис. 337) и производят его оснастку такелажным оборудованием. Для справок в таблице 48 приводится список применяемого в практике такелажного оборудования для подъёма ветродвигателя ТВ-8.

Перед подъёмом ветродвигателя проверяется прочность его оснастки, для чего с помощью грузовой лебёдки приподнимают над опорой на несколько сантиметров ветродвигатель и, оставив его в этом положении, дают дополнительную нагрузку на головку ветряка. Обычно эту

нагрузку составляют от 4 до 5 человек, которые становятся у вершины башни (рис. 338). При этом происходит обтяжка и проверка снасти, так как в этом положении силы, направленные по тросу, наибольшие. Общий вид подъёма ветродвигателя ТВ-8 показан на рис. 339.

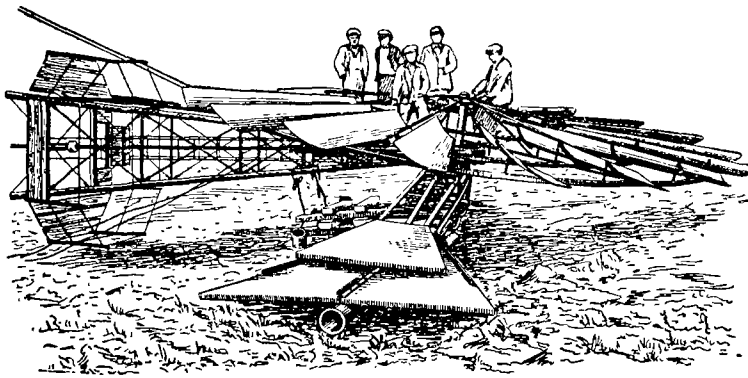


Рис. 338. Проверка оснастки ветродвигателя.

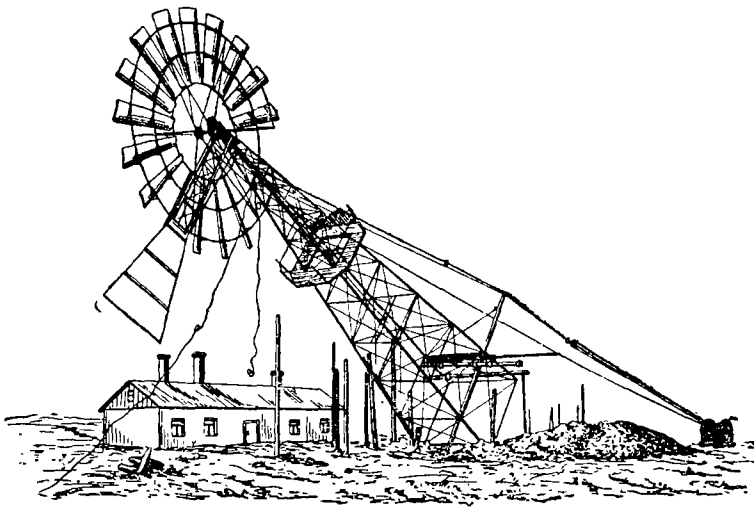


Рис. 339. Общий вид подъёма ТВ-8.

Если ветродвигатель предназначен для подъёма воды из скважины, то для монтажа насосного оборудования между ног башни вырывают котлован под шахту, стенки

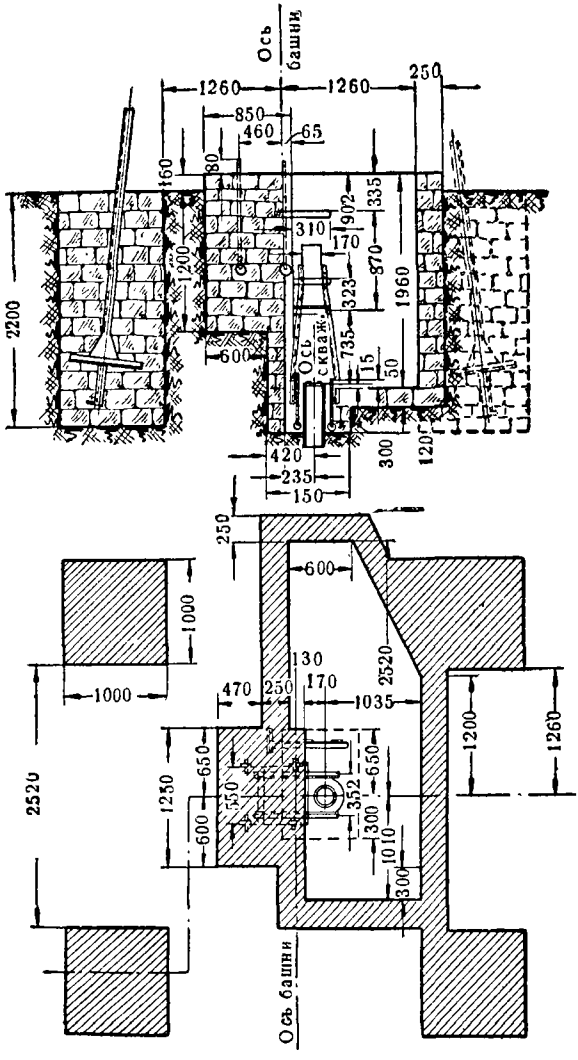


Рис. 340. Фундаменты и шахта насосного оборудования.

которой выкладываются из кирпичной или бутовой кладки на цементном растворе. На рис. 340 показаны фундаменты и шахта насосного оборудования ветродвигателя ТВ-8 с основными установочными размерами.

Более мощные ветродвигатели поднимают также в собранном виде, но без ветроколеса и хвоста. Эти части под-

нимают после того, как башню закрепят на фундаменте, для чего на головке ветродвигателя монтируют ферму с двумя блоками (рис. 341). Через них перекидывают трос, к которому прикрепляют сначала ветроколесо и поднимают его лебёдкой, а затем — хвост.

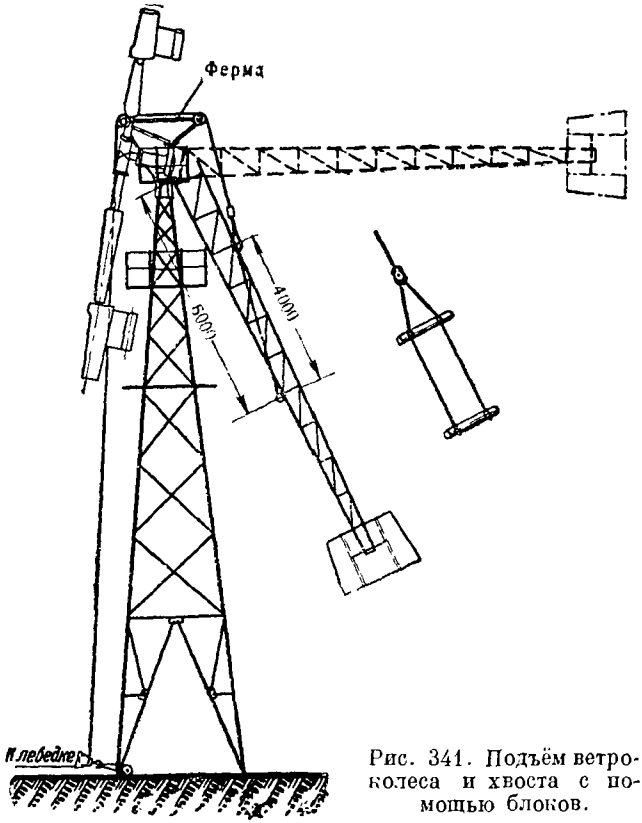


Рис. 341. Подъём ветроколеса и хвоста с помощью блоков.

После монтажа ветродвигателя приступают к сборке передачи от ветродвигателя к рабочим машинам.

Ветродвигатели мощностью выше 25 л. с. монтируют по частям. Башню собирают с лесов и подмостей. Отдельные части ветродвигателя, собранные внизу, поднимают вверх краном «Дерик». На рис. 342 показан монтаж ветродвигателя Крымской ветроэлектростанции Д-30 м краном «Дерик» (описание станции см. § 67).

Проверка монтажа и наладка работы ветродвигателя. По окончании монтажа проверяют действие передачи, регулирования и установа на ветер. При этом двигатель должен быть отрегулирован так, чтобы механизм начинал ограничивать обороты при определённой скорости ветра. Например, для районов со среднегодовой скоростью ветра от 4 до 5 м/сек. ветряк должен начинать ограничивать обо-

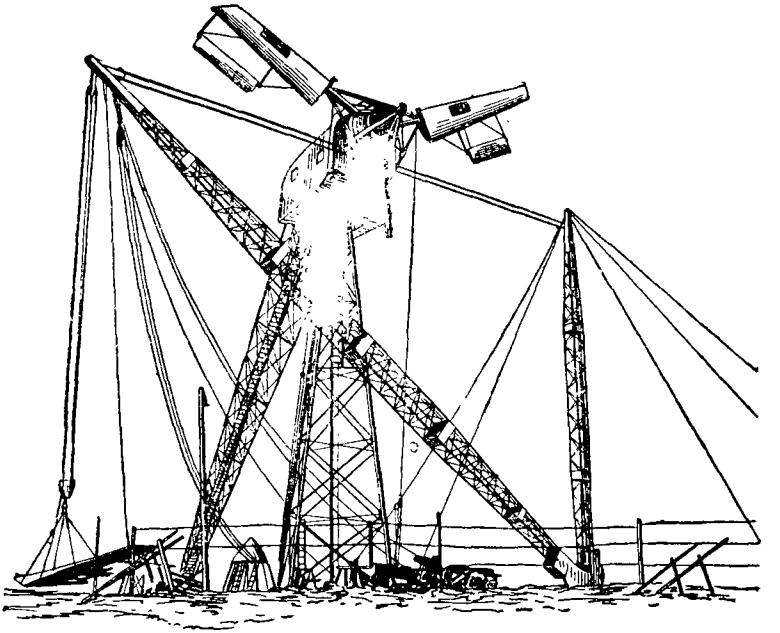


Рис. 342. Монтаж ветродвигателя с помощью крана «Дерик».

роты при скорости ветра 8 м/сек. Большей или меньшей затяжкой регулирующей пружины можно добиться, что ветродвигатель начнёт ограничивать обороты именно при данной скорости ветра.

Контрольная проверка регулирования делается пуском ветродвигателя в работу. При этом ветродвигатели, регулирующиеся выводом ветроколеса из-под ветра, запускаются в работу под нагрузкой. Если при этом вывод ветроколеса осуществляется давлением ветра либо на боковую лопату, либо на ветроколесо, имеющее эксцентриситет, то эту проверку необходимо производить при

скоростях ветра, изменяющихся от 7 и выше 8 м/сек. с тем, чтобы можно было проверить, при какой скорости ветра начинает действовать регулирующий механизм.

Если ветродвигатель регулируется под действием центробежных сил, то контрольную проверку можно производить и на слабых ветрах, но без нагрузки, так как в данном случае центробежный регулятор начинает действовать при определённых оборотах, которые и необходимо выяснить при данной проверке.

Замер скоростей ветра при контрольной проверке регулирования наиболее удобно производить анемометром, показывающим мгновенные колебания скорости ветра. Для этой цели удобен прибор с вольтметром, шкала которого протарирована на скорости ветра. Одновременно с проверкой регулировки, проверяют также чёткость работы передачи и других частей ветроустановки.

Монтажная бригада сдаёт ветроустановку хозяйству после проверки её в работе в течение суток. Если при этом будет замечена нечёткость в работе механизмов вследствие неудовлетворительного монтажа, то обнаруженный недостаток должен быть устранён, и только после этого ветроустановку можно сдать хозяйству по акту для пуска в эксплоатацию.

§ 70. ОБ УХОДЕ ЗА ВЕТРОДВИГАТЕЛЯМИ И РЕМОНТЕ ИХ

Ветродвигатель, по сравнению с другими двигателями, находится в наиболее тяжёлых условиях эксплоатации. Атмосферные осадки (гололёд), порывистый ветер и буря создают переменные нагрузки, которые действуют на его части и при работе и при стоянке. Чтобы предупреждать поломки ветродвигателя и поддерживать ветроустановку в хорошем состоянии, необходимо, чтобы наблюдающий был знаком с механизмом и мог бы устранять неполадки, замеченные при работе двигателя.

Обязанности наблюдающего за ветроустановкой излагаются в инструкции, которая должна быть вывешена в помещении установки. Здесь же должен быть набор инструментов: молоток слесарный, зубило слесарное, маслёнка на 0,5 л, бидон для тавота на 10 кг, бидон для масла на 15 кг, разводные и гаечные ключи, пожарный пояс с карабином и верёвкой длиной в 4 м и толщиной в 45 мм, керосиновая лампа «летучая мышь» и комплект спец-

одежды. Обязанности наблюдающего, общие для всех ветроустановок, сводятся к следующему.

Производить ежедневно осмотр болтовых соединений и подтягивать ослабевшие гайки, шпильки и шурупы. При осмотре должны смазываться все места трущихся частей. Масло, залитое для автоматической смазки, должно обновляться 1 раз в 6 месяцев. Отработанное и загрязнённое масло для смазки употреблять нельзя.

Наблюдающий должен не допускать посторонних людей подниматься на башню. При наблюдении нужно иметь в виду также следующее. Ветроколесо нельзя привязывать к башне. Если потребуется его затормозить, то можно привязать только к хвосту или к головке. К башне можно привязать ветроколесо лишь в том случае, если оно устанавливается на ветер не хвостом, а вручную.

Ветродвигатель должен быть загружен только на ту мощность, на которую рассчитана его передача. Если ветродвигатель регулируется действием центробежных сил, то при больших скоростях ветра его можно перегрузить. Излишняя нагрузка будет снижать нарастающие обороты; при этом он будет в состоянии работать с такой нагрузкой, которая соответствует мощности ветродвигателя, возрастающей пропорционально кубу скорости ветра. Например, если ветродвигатель Д-12 с расчётной мощностью в 15 л. с. при скорости ветра 8 м/сек. подгружать по мере увеличения скорости ветра выше 8 м/сек., то при 16 м/сек. он мог бы обеспечить работу с нагрузкой, соответствующей 120 л. с., при незначительном повышении оборотов. Естественно, такая перегрузка вызовет поломку механизма передачи.

Ремонт ветродвигателей, как и других машин, заключается в исправлении старых, износившихся или сломанных деталей и замене их новыми. Для ветродвигателей ещё не разработаны нормативы, которые позволили бы применить известную систему планово-предупредительного ремонта, поэтому, чтобы избежать аварий, вызванных чрезмерным износом деталей, в практике ремонта ветродвигателей пользуются общими для всех машин приёмами устранения дефектов. Что же касается организации ремонтного дела по ветродвигателям, то оно имеет свои специфические особенности, вытекающие из условий эксплоатации этих машин. При массовом

внедрении ветродвигателей, несомненно, и здесь будет введена более совершенная система ремонта, применяемая сейчас в тракторном и автомобильном деле.

Плановопредупредительная система ремонта применяется там, где интервалы, по истечении которых необходимо производить тот или другой ремонт, могут быть заранее установлены в виде определённого плана ремонта. Эта система ремонта разделяется на текущий, средний и капитальный.

Технический уход, в задачу которого входит устранение незначительных дефектов в оборудовании, выполняется обслуживающим машину персоналом без участия ремонтной мастерской или ремонтной бригады.

Текущий ремонт включает ремонт деталей, доступных осмотру, а также и тех деталей, которые требуют неотложных исправлений и ремонт или замена которых не связаны с полной разборкой машины. Этот ремонт должен устранить обнаруженную неисправность сейчас же, пока действие её не отразилось на других частях. Таким образом, текущий ремонт играет важную роль в сроке службы ветродвигателя, как и других машин.

Средний ремонт отличается от текущего более значительной разборкой машины. Например, при ремонте ветродвигателя сюда можно отнести: снятие ветроколеса, замену шатуна или шестерни и т. п. Производится одновременно ремонт других деталей, включающий все операции по текущему ремонту.

Капитальный ремонт производится через определённый срок эксплоатации машин, когда она приходит в такое состояние, что ни текущий, ни средний ремонт не в состоянии устранить дефекты изношенности машины. Требуется полная проверка всех частей и деталей, а ремонт ветродвигателя сопровождается «повалкой» его на землю. В этом случае необходимо участие целой бригады с такелажным оборудованием и полным набором инструментов, применяемых при ремонте и монтаже. Ветродвигатель при ремонте выключается из работы на длительный срок.

Аварийные дефекты машины устраняются либо средним ремонтом, либо капитальным, в зависимости от степени повреждений и общего состояния машины после аварии. В практике ремонта ветродвигателей применяются два вида ремонта: текущий и капитальный.

Ветродвигатель подвергается износу не только во вре-

мя работы, когда изнашиваются передача и подшипники, но и во время остановок ветродвигателя, вследствие постоянного действия порывов ветра. При остановленном ветродвигателе изнашиваются опоры в головке, шарниры в хвосте, опоры поворотной лопасти и т. п.

Постоянное действие ветра, а также атмосферных осадков на рабочие части, обычно находящиеся в наиболее сильном ветровом потоке, ставит ветродвигатели в весьма тяжёлые условия эксплоатации.

Поэтому осмотр и текущий ремонт ветродвигателя должны производиться повседневно. Этот ремонт включает ряд предупредительных мероприятий, которые позволяют значительно уменьшить износы деталей и свести до минимума различные неполадки и аварии. Чтобы провести капитальный ремонт, требуется знать конструкцию узлов и механизмов ветродвигателя, взаимодействия его частей. Следовательно, руководитель ремонта должен быть квалифицированным в области ветроустановок.

Ремонт ветродвигателей целесообразно организовывать с передвижных монтажно-ремонтных мастерских. Это — закрытая грузовая автомашина, снабжённая необходимым механическим оборудованием, как-то: настенным ручным сверлильным станком, тисками, комплектом слесарно-кузнечного инструмента и т. п. В машине должна быть кладовка для хранения запасных частей и мелких ремонтных материалов.

§ 71. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ МОНТАЖЕ И ОБСЛУЖИВАНИИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Приспособления и устройства, обеспечивающие безопасность работающих, разделяются на: 1) индивидуальные защитные приспособления, 2) ограждения и 3) предохранительные устройства.

Индивидуальные защитные приспособления предназначаются для каждого работающего в отдельности; сюда относятся: предохранительные (защитные) очки, спецодежда и спецобувь, шлемы и щитки для электросварщиков, спасательные пояса и когти для работающих на высоте.

Ограждения применяются для того, чтобы недопустить человека к опасному месту, а также предостеречь от опасных предметов и возможного падения с высоты.

Предохранительные устройства предназначаются для сигнализации о наступлении опасности или для устранения опасности в надлежащий момент.

Работы на высоте являются основными при монтаже, ремонте и обслуживании ветродвигателей. К этим работам допускаются лица, прошедшие медицинский осмотр. Нельзя допускать к работам на высоте лиц, страдающих головокружением, эпилепсией, сердечными болезнями и т. п. Для работы на высоте всюду, где только это возможно, должны быть предусмотрены постоянные площадки достаточных размеров, ограждённые перилами высотой не менее 1 м со сплошной обшивкой понизу, для того чтобы с площадки не упал какой-либо предмет, могущий причинить увечье проходящим внизу.

На площадку, расположенную на высоте, должны вести лестницы с перилами.

Для работ на головке ветродвигателя в целях безопасности необходимо применять спасательные пояса. Безопасность работ при этом зависит от надёжности самого пояса и верёвки, к которой он прикреплён. Перед употреблением пояс и верёвку необходимо испытывать грузом в 100 кг, сбрасываемым пять раз с высоты в 2 м. Длина верёвки для подвязки рабочего применяется в 2 м. Пояса и верёвки должны храниться на складе в сухом месте.

При работе на телефонных столбах и на деревянных мачтах под ветродвигатели необходимо пользоваться исправными когтями.

Наиболее опасным моментом при монтаже ветродвигателей является его подъём с земли (рис. 339). Небрежная и поспешная сборка снасти (рис. 337), а также неправильная организация монтажа могут послужить причиной серьёзной аварии, при которой, кроме неизбежной поломки ветродвигателя, возможны несчастные случаи с людьми.

Для успешного и безопасного подъёма ветродвигателя бригадир монтажной группы должен строго соблюдать следующие элементарные правила:

1. Для такелажного оборудования употреблять брёвна, отвечающие ГОСТ на строительный лес. При использовании старых брёвен нельзя допускать брёвна, ослабленные врубками, отверстиями, пропилами, а также поражённые гнилью. Толщина брёвен не должна быть меньше

приведённых в спецификации размеров, которые относятся к верхнему концу бревна, а не к комлю.

2. Грузовая лебёдка должна иметь фрикционный тормоз. Нельзя пользоваться лебёдками старого образца с ленточным тормозом.

Не разрешается производить подъём или опускание груза с откинутой собачкой, так как при этом фрикционный тормоз лебёдки не может действовать. Опускание груза лебёдкой осуществляется вращением рукояток в обратную подъёму сторону.

3. При соединении деревянных элементов подъёмной снасти обязательно подкладывать под гайку болтов широкие шайбы.

4. Нельзя допускать крутых перегибов стального троса в узлах крепления его к поднимаемому грузу. Если трос ложится на острые углы поднимаемого груза или на его деревянные детали, то необходимо под него подкладывать специальные пеньковые маты или, в крайнем случае, тряпки, куски досок, фанеру и т. п.

5. Нельзя допускать кручения троса при наматывании на барабан лебёдки, так как при длительной крутке в проволоках получается дополнительное напряжение, могущее вызвать обрыв. При наматывании грузового троса на барабан лебёдки надо следить, чтобы он ложился ровными рядами, без образования бугров, так как соскальзывание троса с бугра сопровождается сотрясением поднимаемого груза с ударным действием на снасть, что может вызвать разрыв наиболее слабого узла.

6. Во избежание обрывов троса или узлов оснастки при подъёме, необходимо сделать проверку прочности оснастки перед подъёмом. Приподняв лебёдкой головку ветродвигателя на 10 см над опорой, закрепляют подъёмное устройство и оставляют в приподнятом положении ветродвигатель. Это положение вызывает наибольшее напряжение в оснастке. Затем создают дополнительную нагрузку, устанавливая на ветроколесо 4—5 человек (рис. 338). При такой нагрузке (около 300 кг) тросы оснастки вытягиваются и, если они при этом не дадут обрывов, то при последующем увеличении наклона обрыв не может последовать, так как при увеличении угла наклона положения башни с ветродвигателем напряжение будет убывать, приближаясь к нулю, когда башня займёт вертикальное положение. При подъёме нельзя находиться под грузом,

а также под башней, когда она находится в наклонном положении.

7. Подъём желательно и целесообразно производить в тихую погоду; если и будет ветер, то скорость его не должна превышать 5 м/сек.

8. В зимнее время нельзя производить подъём при температуре ниже 12—15°, так как оснастка при низкой температуре делается хрупкой и менее прочной.

Практика показывает, что даже в южных районах СССР в зимнее время монтажные работы обходятся дороже, к тому же страдает их качество.

9. Подниматься и опускаться по лестнице допускается без груза. Лёгкие предметы должны быть заложены в карманы или заткнуты за пояс. Тяжёлые детали должны подниматься или опускаться верёвкой или тросом.

10. Оттяжки и грузовой трос необходимо освобождать только после полного закрепления башни.

11. При пуске двигателя в работу нельзя находиться на площадке у вершины башни.

12. Руководитель подъёмом должен отдавать распоряжения рабочим у грузовой лебёдки условными сигналами. Рабочие у лебёдки обязаны принимать сигналы только от руководителя подъёмом. Во избежание путаницы в работе не следует отдавать словесных распоряжений.

В эксплоатации ветроустановка должна обслуживаться специально выделенным для этой цели человеком, который должен быть знаком с требованиями техники безопасности на данной работе. Эти требования можно свести к следующему:

а) осмотр и смазку частей ветродвигателя необходимо производить при остановленном ветродвигателе;

б) нельзя допускать посторонних людей на башню ветродвигателя, особенно детей. У основания башни должно быть сделано ограждение, не позволяющее детям проникать под башню к подвижным механизмам;

в) для останова ветродвигателя во всех случаях необходимо пользоваться специальными приспособлениями, имеющимися для этой цели у каждого ветродвигателя. Останавливать ветродвигатель путём затормаживания колёс шестерни или шкива каким-либо рычагом нельзя: может произойти авария с поломками частей ветродвигателя и несчастным случаем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В. Л. Техническая гидромеханика. Москва, 1946 г.
2. Вершинин И. Б. Применение маломощных ветроэлектрических агрегатов в сельском хозяйстве. 1946 г.
3. Ветчинкин В. П. и Поляков Н. Н. Теория и расчёт гребного винта. Москва, 1940 г.
4. Ветчинкин В. П. Принципы ветроиспользования, разработанные А. Г. Уфимцевым. «Труды I Всесоюзной конференции по аэродинамике», Москва, 1932 г.
5. Ветчинкин В. П. Аккумуляторы ветровой энергии. Материалы по Курской ветроэлектростанции. 1935 г.
6. Ветчинкин В. П. и Фатеев Е. М. Энергетика и техника ветроиспользования. «Материалы Академии наук СССР». 1936 г.
7. Жуковский Н. Е. Ветряная мельница НЕЖ. Полное собрание сочинений Н. Е. Жуковского, т. VI, 1937 г.
8. Жуковский Н. Е. Теоретические основы воздухоплавания. Москва, 1925 г.
9. Кажинский Б. Б. Руководство по установке, ремонту и эксплоатации ветродвигателей в совхозах. Москва, 1943 г.
10. Кажинский Б. Б. Гидроэлектрические и ветроэлектрические станции малой мощности. Москва, 1946 г.
11. Кармишин А. В. Ветродвигатель ТВ-8. Сборка, подъём и уход за ним. 1937 г.
12. Кармишин А. В. Ветродвигатель ТВ-8 (правила ухода и технической эксплоатации). 1947 г.
13. Кармишин А. В. Ветродвигатель ТВ-5 (правила ухода и технической эксплоатации). 1947 г.
14. Костяков А. Н. Основы мелиорации. Москва, 1940 г.
15. Краснов В. С. Механизация трудоёмких процессов в животноводстве. Сельхозгиз, 1940 г.
16. Красовский Н. В. Метод расчёта ветросиловых станций. «Труды ЦАГИ», вып. 43, 1929 г.
17. Красовский Н. В. Как использовать энергию ветра. Москва, Энергоиздат, 1936 г.
18. Красовский Н. В. Ветроэнергетические ресурсы СССР и перспективы их использования. 1935 г.
19. Красовский Н. В. и Уткин-Егоров В. В. Новое крыло для русской ветряной мельницы. «Труды ЦАГИ», вып. 4, 1923 г.

20. Макаревский А. И. О расчёте на прочность самоустанавливающихся крыльев ветродвигателей. «Материалы б. ЦВЭИ». 1935 г.
21. Макаревский А. И. Экспериментально-теоретические работы Центрального ветроэнергетического института (ЦВЭИ). «Бюллетень ЦАГИ», 1933 г.
22. Макаревский А. И. Сверхмощный ветродвигатель. Социалистический заказ изобретателям энергохозяйства. 1932 г.
23. Молчанов П. А. Аэрология. Москва, 1931 г.
24. Павловский И. Н. Гидравлический справочник ОНТИ, 1937 г.
25. Перли С. Б. Ветроэлектрические и ветронасосные агрегаты. Харьков, 1938 г.
26. Попов С. Г. Измерение воздушных потоков. ОГИЗ, Гостехиздат, 1947 г.
27. Поморцев М. М. О законе распределения скоростей ветра. «Записки по гидрографии», вып. XV, 1894 г.
28. Проскура Г. Ф. Экспериментальная гидроаэродинамика. Харьков, Госэнергоиздат, 1933 г.
29. Рогожкин Н. С. Ремонт и эксплоатация ветродвигателей. Ростов н/Д, 1947 г.
30. Розентул С. Л. Проблема аккумулирования при ветросиловых установках. «Материалы б. ЦВЭИ», Рукопись, 1934 г.
31. Сабинин Г. Х. Ветряные двигатели с самоустанавливающимися лопастями. «Труды ЦАГИ», вып. 2.
32. Сабинин Г. Х. Теория идеального ветряка. «Труды ЦАГИ», вып. 32, 1927 г.
33. Сабинин Г. Х. Характеристика ветродвигателя в зависимости от направления ветра. «Труды ЦАГИ», вып. 28, 1926 г.
34. Сабинин Г. Х. Гироскопический эффект ветряных двигателей и расчёт поворотных ветряков. «Труды ЦАГИ», вып. 22, 1926 г.
35. Сабинин Г. Х. Теория и аэродинамический расчёт ветряных двигателей. «Труды ЦАГИ», вып. 104, 1931 г.
36. Сабинин Г. Х. Экспериментальная проверка теории ветряных двигателей. «Труды Центрального института экспериментальной гидрологии и метеорологии», вып. I (43), 1934 г.
37. Сабинин Г. Х. Ветросиловая лаборатория ЦАГИ. «Труды ЦАГИ», вып. 164, 1934 г.
38. Секторов В. Р. Балаклавская опытная ветроэлектростанция. Журнал «Электричество», № 19, 1938 г.
39. Секторов В. Р. Энергетические характеристики ВЭС с асинхронным генератором, работающих на общую сеть. 1947 г.
40. Смирнов И. В. Инерционный метод испытания моделей ветряков в аэродинамической трубе. «Материалы б. ЦВЭИ». 1935 г.
41. Смирнов И. В. Экспериментальная проверка классической теории ветряка. «Материалы ЦВЭИ», 1931 г.

42. Уфимцев Г. А. Проблема анемофикации. Курский Губплан, 1927 г.
43. Фабрикант Н. Я. Курс аэродинамики. Ч. I, Москва, 1938 г.
44. Фатеев Е. М. Системы ветродвигателей. Энергоиздат, 1933 г.
45. Фатеев Е. М. Ветродвигатели в сельском хозяйстве. Сельхозгиз, 1939 г.
46. Фатеев Е. М. Роль ветродвигателей в животноводческих хозяйствах. «Вестник механизации и электрификации», № 1,1940 г.
47. Фатеев Е. М. и Шаманин В. С. Руководство к изготовлению крыльев ветряных мельниц. НКЗ РСФСР, 1941 г.
48. Фатеев Е. М. Как повысить мощность существующих ветряных мельниц НКЗ СССР, 1943 г.
49. Фатеев Е. М. Ветряные мельницы.«Московский большевик», 1945 г.
50. Фатеев Е. М. Ветродвигатели. Москва, Энергоиздат, 1946 г.
51. Флоринский М. М. Насосные установки и станции. Сельхозгиз, 1946 г.
52. Чирков М. М. Исследование ветряных двигателей в ветросиловой лаборатории ЦАГИ. «Труды ЦАГИ», вып. 164, 1934 г.
53. Чирков М. М. и Вершинин И. Б. Экспериментальная проверка работы ВЭС параллельно в сеть. «Материалы б. ЦВЭИ», 1934 г.
54. Ширманов П. М. и Горский В. С. Атлас аэродинамических характеристик авиационных профилей. Госавиаиздат, 1932 г.
55. Юрьев Б. Н. Экспериментальная аэродинамика. Ч. I, Москва, 1939 г.
56. Юрьев Б. Н. Экспериментальная аэродинамика. Ч. II, Москва, 1938 г.
57. Юрьев Б. Н. и Лесникова Н. П. Аэродинамические исследования.
58. Юрьев Б. Н. Вихревая теория винтов. Издание Военно-воздушной инженерной академии им. Н. Е. Жуковского, 1947 г.

Примечание. Ссылки на приведённую в данном списке литературу даны в тексте по порядковому номеру в квадратных скобках [ ].

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Развитие ветроиспользования 3
§ 2. Применение ветродвигателей в сельском хозяйстве 5

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ВЕТРОДВИГАТЕЛИ

Глава I. **Краткие сведения из аэродинамики** 12

§ 3. Воздух и его свойства 12
§ 4. Уравнение неразрывности. Уравнение Бернулли 15
§ 5. Понятие о вихревом движении 26
§ 6. Вязкость 38
§ 7. Закон подобия. Критерии подобия 40
§ 8. Пограничный слой и турбулентность 45

Глава II. **Основные понятия экспериментальной аэродинамики** 51

§ 9. Оси координат и аэродинамические коэфициенты . . . 51
§ 10. Определение аэродинамических коэфициентов. Поляра Лилиенталя 54
§ 11. Индуктивное сопротивление крыла 59
§ 12. Теорема Н. Е. Жуковского о подъёмной силе крыла . . 62
§ 13. Переход с одного размаха крыльев на другой 70

Глава III. **Системы ветродвигателей** 79

§ 14. Классификация ветродвигателей по принципу их работы 79
§ 15. Преимущества и недостатки различных систем ветродвигателей 90

Глава IV. **Теория идеального ветряка** 93

§ 16. Классическая теория идеального ветряка 94
§ 17. Теория идеального ветряка проф. Г. Х. Сабинина . . . 98

Глава V. **Теория реального ветряка проф. Г. Х. Сабинина**

§ 18. Работа элементарных лопастей ветроколеса. Первое уравнение связи 111
§ 19. Второе уравнение связи 117
§ 20. Момент и мощность всего ветряка 119
§ 21. Потери ветряных двигателей 122
§ 22. Аэродинамический расчёт ветроколеса 126
§ 23. Расчёт характеристики ветроколеса 133
§ 24. Профили «Эсперо» и построение их 139

Глава VI. **Экспериментальные характеристики ветродвигателей** 143
§ 25. Метод получения экспериментальных характеристик . 143
§ 26. Аэродинамические характеристики ветродвигателей 156
§ 27. Экспериментальная проверка теории ветродвигателей 163

Глава VII. **Экспериментальная проверка ветродвигателей** 170
§ 28. Оборудование башни для испытания ветродвигателей 170
§ 29. Соответствие характеристик ветродвигателя и его моделей 175

Глава VIII. **Установ ветродвигателей на ветер** 181
§ 30. Установ при помощи хвоста 182
§ 31. Установ виндрозами 195
§ 32. Установ расположением ветроколеса за башней 197

Глава IX. **Регулирование числа оборотов и мощности ветродвигателей** 199
§ 33. Регулирование выводом ветроколеса из-под ветра . . . 201
§ 34. Регулирование уменьшением поверхности крыльев . . 212
§ 35. Регулирование поворотом лопасти или части её около оси маха 214
§ 36. Регулирование воздушным тормозом 224

Глава X. **Конструкции ветродвигателей** 226
§ 37. Многолопастные ветродвигатели 227
§ 38. Быстроходные (малолопастные) ветродвигатели 233
§ 39. Веса ветродвигателей 255

Глава XI. **Расчёт ветродвигателей на прочность** . . . 261
§ 40. Ветровые нагрузки на крылья и расчёт их на прочность. 261
§ 41. Ветровая нагрузка на хвост и боковую лопату регулирования 281
§ 42. Расчёт головки ветродвигателя 282
§ 43. Гироскопический момент ветроколеса 284
§ 44. Башни ветродвигателей 288

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ВЕТРОСИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ

Глава XII. **Ветер как источник энергии** 305
§ 45. Понятие о происхождении ветра 305
§ 46. Основные величины, характеризующие ветер с энергетической стороны 308
§ 47. Энергия ветра 332
§ 48. Аккумулирование энергии ветра 335

Глава XIII. **Характеристики ветросиловых агрегатов** . . 344
§ 49. Рабочие характеристики ветродвигателей и поршневых насосов 345
§ 50. Работа ветродвигателей с центробежными насосами 365
§ 51. Работа ветродвигателей с жерновыми поставами и сельскохозяйственными машинами 389

Глава XIV. Ветронасосные установки 408

§ 52. Ветронасосные установки для водоснабжения 408
§ 53. Водоразборные баки и водонапорные башни при ветронасосных установках 416
§ 54. Типовые конструкции ветронасосных установок 423
§ 55. Опыт эксплоатации ветронасосных установок для водоснабжения в сельском хозяйстве 430
§ 56. Ветроорошительные установки 437

Глава XV. Ветряные мельницы 445

§ 57. Типы ветряных мельниц 445
§ 58. Техническая характеристика ветряных мельниц. . . . 447
§ 59. Повышение мощности старых ветряных мельниц 451
§ 60. Ветряные мельницы нового типа 456
§ 61. Эксплоатационные характеристики ветряных мельниц 474

Глава XVI. Ветроэлектростанции 480

§ 62. Типы генераторов для работы с ветродвигателями и регуляторы напряжения 482
§ 63. Ветрозарядные агрегаты 488
§ 64. Ветроэлектростанции малых мощностей 492
§ 65. Параллельная работа ветроэлектростанций в общую сеть с крупными тепловыми станциями и гидроэлектростанциями 495
§ 66. Экспериментальная проверка работы ВЭС параллельно в сеть 499
§ 67. Мощные электростанции для параллельной работы в сеть 508
§ 68. Краткие сведения о заграничных ветроэлектростанциях 517

Глава XVII. Краткие сведения по монтажу и ремонту ветродвигателей и уход за ними 525

§ 69. Монтаж ветродвигателей малых мощностей от 1 до 15 л. с. 525
§ 70. Об уходе за ветродвигателями и ремонте их 532
§ 71. Техника безопасности при монтаже и обслуживании ветродвигателей 535

Список литературы 539

Редактор *М. Г. Рябышев*
Техн. редактор *Д. Г. Моисеенко*
Подписано к печати 9/XI 1948 г. А 10222 Тираж 15000 экз. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Объём 34 п. л.+2 вкл.=1 п. л. Уч.-изд. л. 29.55. В 1 печ. л. 35.000 зн. Цена 10 руб. 85 коп. Заказ № 8135.

Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова треста «Полиграфкнига» ОГИЗа при Совете Министров СССР. Москва, Валовая, 28.