

НАУЧНОЕ ОБЩЕСТВО
"СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ"

ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ МОЩНОЙ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ С КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ
РАБОЧИМ ДВИЖЕНИЕМ

Москва 1995

ВВЕДЕНИЕ

В развитии мировой энергетики ветроэнергетике отводится возрастающая роль. Так в материалах ряда конференций по ветроэнергетике на основе международных прогнозов указывается, что к 2020 г. суммарная мощность ветроэнергетических установок (ВЭУ) (в основном традиционных типов) на континентах мира может составить 450–500 тыс. МВт при годовой выработке электроэнергии 900 ТВт.ч [1]. Традиционными здесь именуется ВЭУ, функционирующие в приземном слое атмосферы (на относительной высоте H , не превышающей 100 м) и использующие импеллеры в виде ветротурбин, ветроколес с горизонтальными или вертикальными осями. Несмотря на высокую прогнозируемую общую мощность мировой традиционной ветроэнергетики (450–500 млн. кВт) отмечается, что суммарная годовая выработка электроэнергии ВЭУ составит в 2020 г. только 3,5 % мирового электропотребления. При этом экологические и иные требования к размещению наземных ВЭУ неуклонно ужесточаются.

В густонаселенных регионах для традиционных ВЭУ уже сейчас не хватает места. Об этом свидетельствует, в частности, развитие работ по размещению ВЭУ на платформах в прибрежной полосе акваторий [3,4].

К этому следует добавить, что сам ветровой энергетический потенциал в тонком приземном слое атмосферы ограничен и, как показано в работе [6], составляет около 0,1 % от ветрового потенциала в слое атмосферы Земли, простирающемся от $H = 8$ до $H = 12$ км (рис.1).

Отсюда следует радикальное заключение о том, что традиционная ветроэнергетика не в состоянии решить главной проблемы —

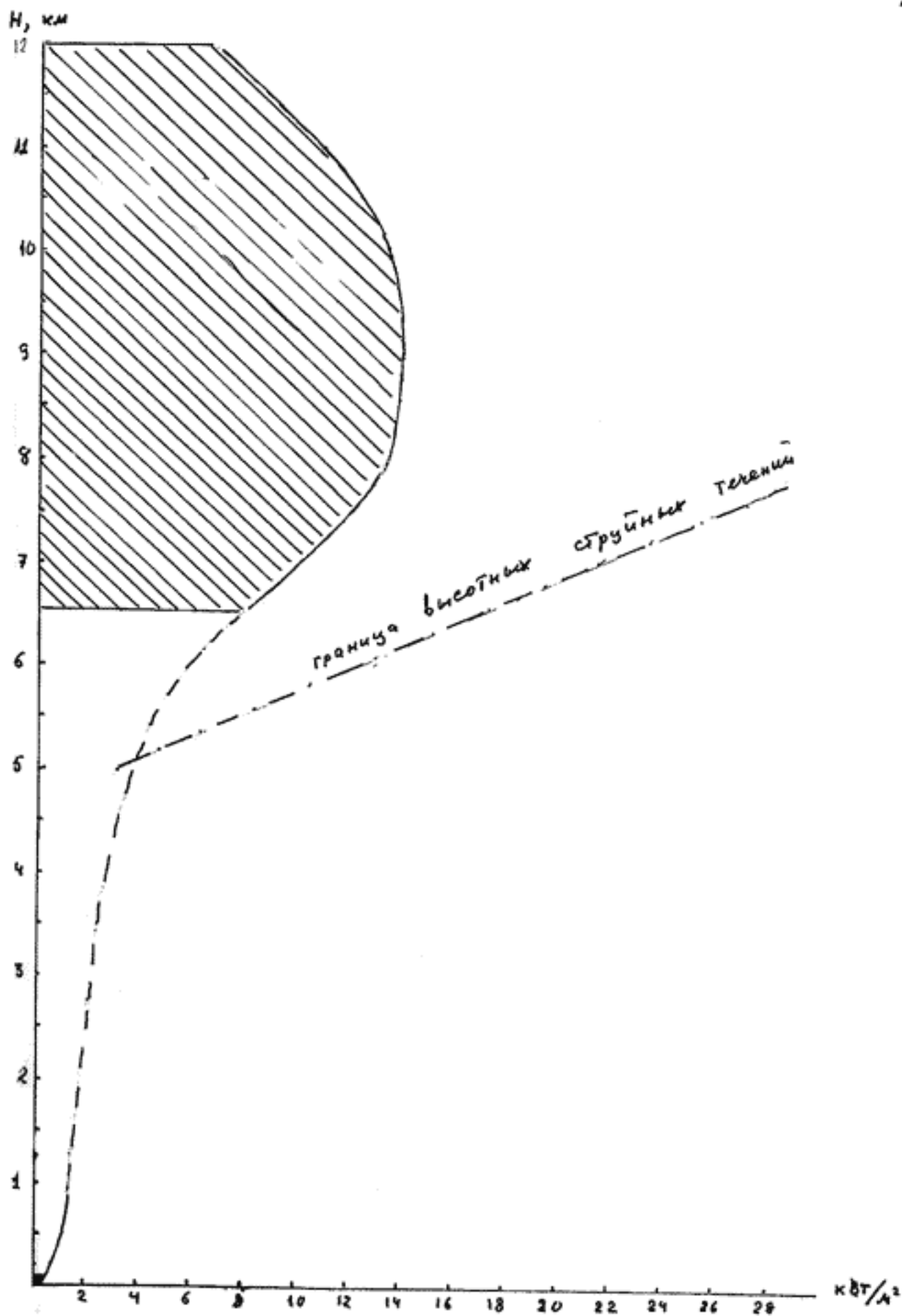


Рис. 1

Диаграмма распределения среднегодового узлового ветроэнергетического потенциала в тропосфере

создание большой экологически чистой энергетики, предотвращающей надвигающийся кризис.

Именно это явилось главным стимулом к разработке новой концепции нетрадиционной ветроэнергетики, составившей основной предмет НИР "Ветроэнергетика-I", выполненной в 1993 г. [6].

Центральной особенностью новой концепции служит колебательный характер рабочего движения импеллеров (вместо традиционного вращательного), колебательный (волновой) принцип передачи механической энергии на малые, а также значительные расстояния.

Распределенный характер предлагаемых импеллеров естественным образом согласуется с распределенным характером ветроэнергетического потенциала, позволяет получить малые удельные (по отношению к генерируемой мощности) массы и обеспечить удержание и функционирование импеллеров как на малых, так и больших (8-12 км) высотах. При этом электроэнергетическая часть выполняется на стандартном оборудовании и находится практически целиком на земле.

В целом это открывает принципиально новые возможности ветроэнергетики вплоть до замены экологически опасных отраслей большой электроэнергетики, причем без революционных изменений в электротехнической промышленности, электротехническом оборудовании.

1. НЕДОСТАТКИ ТРАДИЦИОННЫХ ВЭУ. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЭУК

ВЭУ, построенные на традиционных принципах, достигли высокого уровня технологического совершенства. Однако им присущи принципиальные недостатки.

1.1. Недостатки традиционных ВЭУ

В табл. I приведены данные ряда эксплуатируемых зарубежных ВЭУ и проектов традиционных ВЭУ. Здесь указаны установленная мощность ВЭУ $P_{уст}$ и соответствующая ей установленная скорость ветра $U_{уст}$; диаметр ветроколеса D ; коэффициент быстроходности λ , равный отношению периферийной скорости ветроколеса в расчетном режиме к $U_{уст}$. В табл. I приведены также минимальная U_{min} и максимальная U_{max} границы диапазона скорости ветра, в пределах которого ВЭУ может функционировать. Диапазон скоростей ветра, в пределах которого генерируется электроэнергия стандартного качества, обычно уже диапазона U_{min} , U_{max} . Коэффициент использования мощности ветрового потока $\xi_{уст}$ равен отношению $P_{уст}$ к $0,5 \rho U_{уст}^3 S_{bx}$, ρ - массовая плотность воздуха; $S_{bx} = \frac{1}{4} \pi D^2$ - площадь, ометаемая ветротурбиной. Далее следуют коэффициенты $k_{вк}$, k_r , $k_{вy}$, характеризующие удельную массу*). Коэффициент $k_{вк}$, равный отношению массы ветротурбины к мощности $P_{уст}$ для ВЭУ, перечисленный в табл. I, изменяется от 10 до 45 кг/кВт. Уменьшение этой удельной массы затруднено, так как лопасти ветротурбины несут значительную механическую нагрузку как в рабочих режимах, так и при ураганном ветре в заторможенном состоянии.

*) Часть перечисленных параметров для некоторых ВЭУ опущена из-за отсутствия информации.

Данные функционирующих традиционных ВЭУ и проектов

	$P_{\text{уд}}, \text{кВт}$ $U_{\text{вет}}, \text{м/с}$	$D, \text{м}$	z	$U_{\text{min}},$ $U_{\text{max}},$ м/с	$\sum \zeta_{\text{вет}}$	$k_{\text{вк}}$ кг/кВт	$k_{\text{г}}$ кг/кВт	$k_{\text{вэу}}$ кг/кВт
I	2	3	4	5	6	7	8	9
1. ВУ <i>Aegon</i> , 12,5/17 (ФРГ)	17 12	12,5	4,9	5 25	0,13	17,5	70	236
2. ВЭУ (Испания)	20 14	12		4,5 25	0,10	25	80	140
3. ВЭУ НВР-60 (Англия)	60 16	15		4,5 30	0,133			
4. ВЭУ MOD-0 (США)	100 9	38		4,2 18	0,28	45		
5. ВЭУ НВР-300 (Англия)	300 13	31		5 30	0,30			
6. Проект ВЭУ КАМА AEROSPACE (США)	500 9,3	45,7	8,3	4,8 14	0,29	16	55	145
7. Проект ВЭУ GENERAL ELECTRIC (США)	500 7,27	55,3	9	3,54 17,9	0,42	24	72,2	480
8. ВУ (Франция)	800 16,5	30	4,5		0,4			
9. ВЭУ "Смит-Путнэн" (США)	1250 14,3	53	6			12,8		
10. Проект ВЭУ КАМА AEROSPACE (США)	1500 11,5	54,9	8,6	5,4 30	0,43	11,5	40	85

Продолжение табл. I

I	2	3	4	5	6	7	8	9
11. Проект ВЭУ GENERAL ELECTRIC (США)	1500 10,1	57,9	9,6	5,1 22,3	0,51	10,5	39	70
12. АМ BONUS 150/30	150 13	23	3,75	4 28	0,27	13,6		
13. Vestas V-27	225	27				13,4	58	100
14. ВЭУ (Дания)	630 13	40	6,2	5 25	0,38			
15. ВЭУ Nozdic (Швеция)	400 13	35,2	5,7	5 25			71	375
16. ВЭУ фирмы MAN (ФРГ)	1200 12,3	60	7	6 24	0,48	25	172	468
17. ВЭУ LEV (ФРГ)	500 15	30		4 25	0,35			
18. ВЭУ типа Дарье (США)	500	40						
19. MOD-5 (США) Гавайя	4400	122						
20. MOD-2 (США) Бун	3200	198						

Коэффициент k_r соответствует отношению общей массы верхней поворотной части ВЭУ ("головки") к $P_{уст}$. Ввиду принципиальных недостатков трансмиссий традиционных типов, в ВЭУ основного вида (с горизонтальной осью) редуктор и электрогенератор размещаются на верхней поворотной части ВЭУ. Это определяет большую удельную массу k_r этой части ВЭУ (от 40 до 170 кг/кВт согласно табл. I).

Как видно из табл. I, показатель $\xi_{уст}$ несколько улучшается с возрастанием мощности единичной ВЭУ. Однако при этом неизбежно растет диаметр ветротурбины, достигающий при $P_{уст} = 1$ МВт 50 м, а при $P_{уст} = 4,4$ МВт — 122 м и более. Высота башни должна по меньшей мере превосходить радиус ветротурбины, а прочность ее должна быть такой, чтобы противостоять при максимально возможном ураганном ветре скоростному напору, действующему на ветротурбину и саму башню. Естественно, что такие башни получаются массивными и коэффициент $k_{бш}$ составляет от 70 до 480 кг/кВт (последнее для железобетонной башни).

Заметим также следующее. Коэффициент использования мощности ветра $\xi_{уст}$ лишь для мощных ВЭУ приближается к 0,5, а для ВЭУ малой мощности опускается до 0,1 и ниже. При этом надо учитывать еще такие важнейшие показатели, как годовая выработка электроэнергии и время (за год), в течение которого вырабатывается электроэнергия стандартного качества. Эти показатели зависят как от места установки ВЭУ, так и ее технических характеристик. Лучшие показатели для традиционных ВЭУ имеют порядок 1200 кВт.ч на 1 м² площади, ометаемой ветротурбиной, и 2000–3000 ч работы в год. Что касается стоимости традиционных ВЭУ, то она остается довольно высокой. Так, согласно [14] при $P_{уст}$, меньшей 50 кВт, каждый кВт мощности ВЭУ стоит 2200 долл. США. Стоимость ВЭУ фирмы MAN с установленной мощностью $P_{уст} =$

1,2 МВт, пуск которой состоялся в 1993 г., составила 15 млн. марок ФРГ.

Данные табл. I заимствованы из различных литературных источников, в том числе [1, 4, 7, 13] и др. Перечисленные здесь традиционные ВЭУ включают как введенные в эксплуатацию 15–20 лет назад, так и новейшие ВЭУ, созданные в последние годы. Из сопоставления приведенных данных видно, что процесс совершенствования ВЭУ на традиционных принципах близок к насыщению.

Недостатки традиционных ВЭУ (прежде всего высокая удельная масса ветротурбин, редукторов, электрогенераторов, трансформаторов, медленно прогрессирующих в ходе научно-технической эволюции) выступают особенно рельефно в проблеме освоения основного ветроэнергетического потенциала, содержащегося в верхнем слое тропосферы на высоте 8, ..., 12 км.

На рис. 2 представлена зависимость удельной массы промышленных отечественных синхронных турбогенераторов ($n = 3000$ об/мин) от их мощности. Видно, что удельная масса 1 кг/кВт и меньше имеет место только для генераторов мощностью 200 МВт и выше. Аналогичная зависимость для трансформаторов представлена на рис. 2. Удельная масса 1 кг/кВ·А достигается здесь при мощности 100 МВ·А.

При рассмотрении возможности создания в высотном струйном течении сверхмощной ВЭУ ($P_{уст} = 100$ МВт) необходимо учитывать, что в традиционной системе ветротурбина–редуктор–электрогенератор–трансформатор–кабель (провода) только электрогенератор и трансформатор будут иметь общую массу 300 т. При этом это массы сосредоточенные, требующие прочной несущей конструкции для своего размещения. Расчет баланса сил, прове-

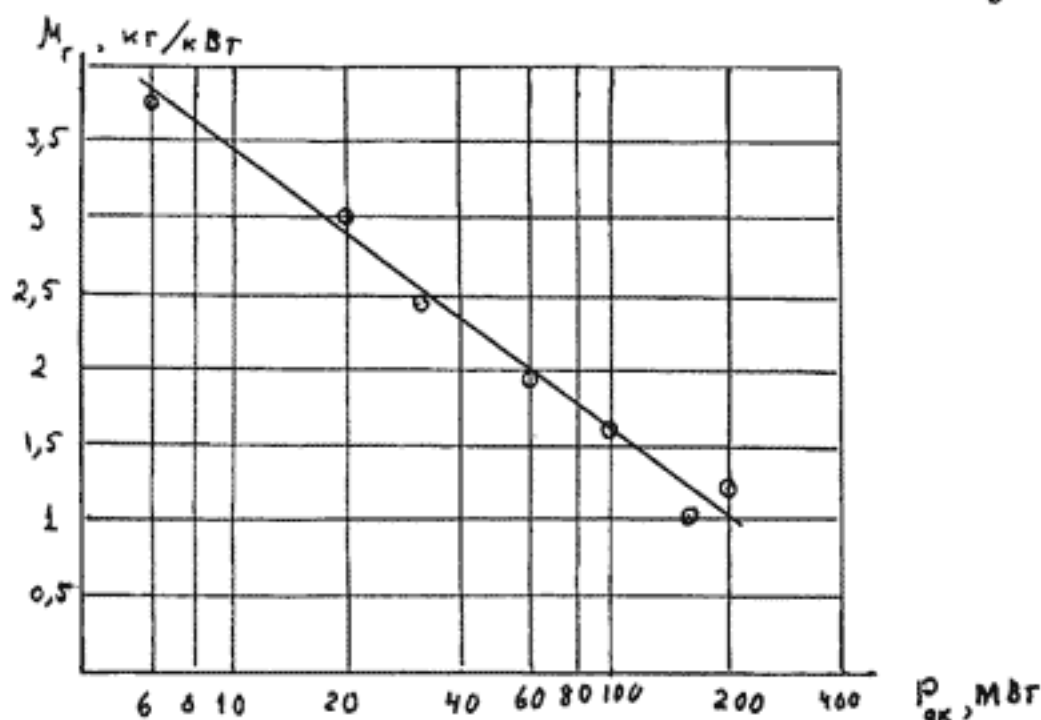


рис. 2

Удельная масса синхронных генераторов ($n = 3000 \text{ об/мин}$) в зависимости от мощности

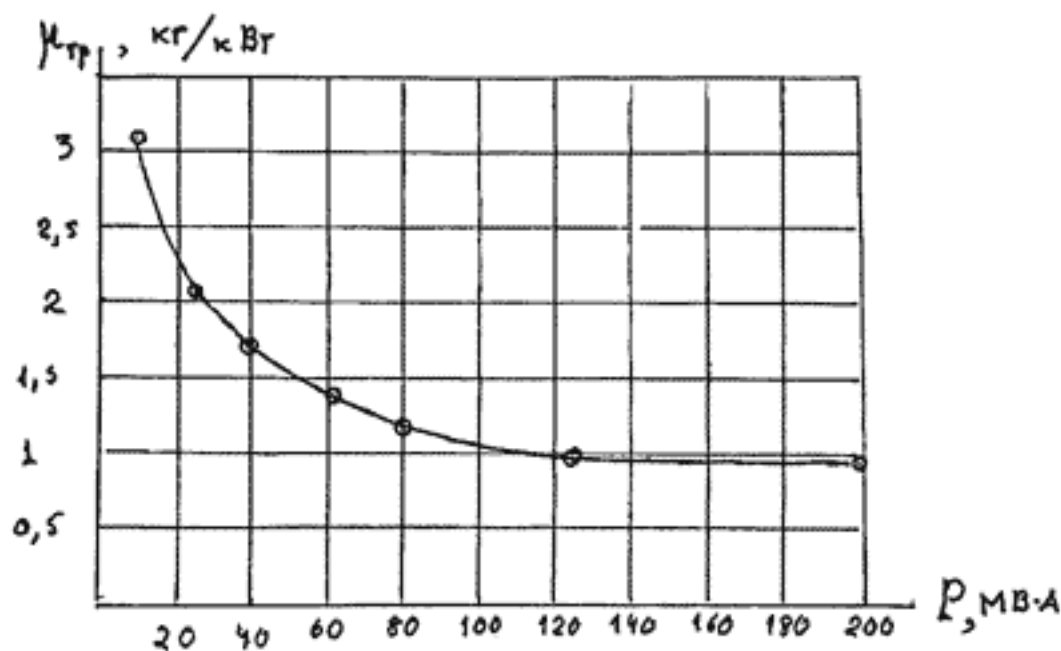


рис. 3

Удельная масса трансформаторов (В.Н. 110 кВ) в зависимости от мощности

денный, в частности, в [6], показывает, что даже в наилучшем варианте использования подъемной силы планера (в режиме "воздушного змея") создание таких ВЭУ в обозримом будущем невозможно. Конечно, в принципе возможна разработка новых систем генерации и передачи электроэнергии: высокочастотных, электростатических (как предлагал Герман Оберт [10]).

Но это означает создание новой электротехнической промышленности, что в условиях неизбежной конкуренции с мощными традиционными отраслями электроэнергетики практически нереально.

1.2. Классификация ВЭУК

Для ветроэнергетических установок с колебательным рабочим движением (ВЭУК) помимо общих для всех ВЭУ показателей и параметров необходимы специфические показатели и характеристики. К ним относится коэффициент колебательной быстроходности $\kappa = \Delta_m \omega_p / U_{уст}$, где Δ_m - амплитуда рабочих возвратно-поступательных колебаний импеллера. По показателю κ ВЭУК можно разделить на тихоходные ($\kappa < 1$) и быстроходные ($\kappa > 1$) (рис.4). По своему влиянию коэффициент κ напоминает коэффициент быстроходности Z для ВЭУ традиционного типа. Рабочая частота импеллера ω_p , выраженная в герцах, равна $\nu_p = \omega_p / 2\pi$. ВЭУК, для которых $\nu_p \leq 5$ Гц, в отчете [6] именуется низкочастотными, а при $\nu_p > 5$ Гц - высокочастотными.

Рабочие колебания импеллера ВЭУК могут быть поступательными (возвратно-поступательными) и вращательно-поступательными (крутильно-поступательными). Последние выгоднее в отношении энергетической эффективности и устойчивости.

Рабочие колебания в ВЭУК являются автоколебаниями. Они возникают и поддерживаются (при жестком режиме возбуждения автоколебаний - поддерживаются) за счет обратных связей (ОС) есте-

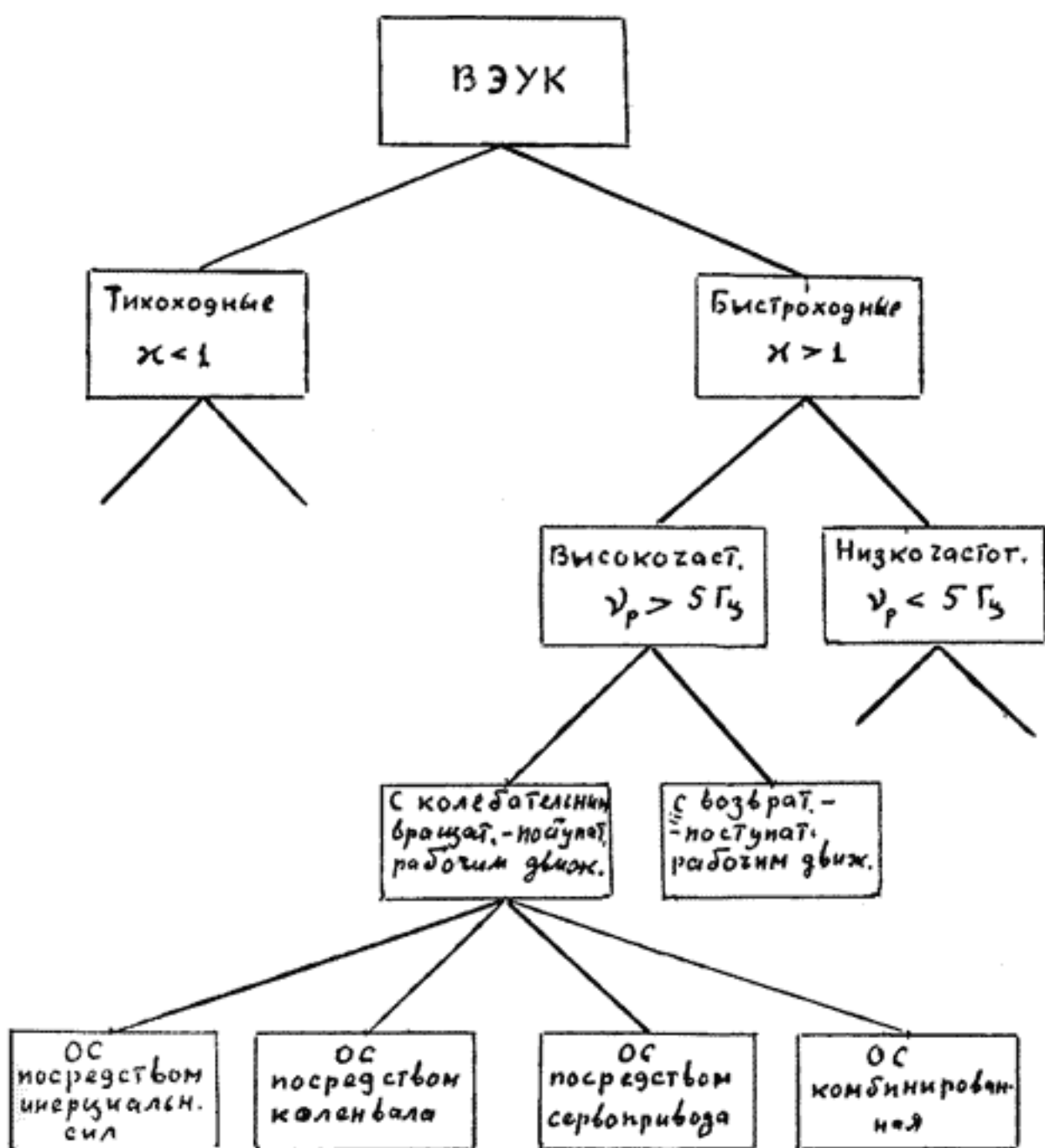


рис. 4
Классификация ВЭУК

ственного или (и) искусственного происхождения. Естественные обратные связи возникают через инерционные, упругие и аэродинамические силы, как при флаттере крыла или другой аэродинамической поверхности. Искусственная обратная связь создается посредством сервоприводов углового движения рабочих аэродинамических поверхностей (планов) или механических связей. Механические связи могут осуществляться посредством сил (эффектов) инерции и через коленчатый вал, используемый одновременно для основного преобразования возвратно-поступательного движения импеллера во вращательное движение вала нагрузки.

Последние теоретические исследования показали, что наиболее эффективными являются комбинированные ОС, а именно инерциальные (при статической неустойчивости рабочих поверхностей импеллеров-планов) в сочетании с сервомоторной искусственной ОС. При комбинированной ОС естественная ОС выводит импеллер на автоколебательный (или почти автоколебательный) режим, а искусственная сервомоторная ОС, содержащая вычислитель, позволяет оптимизировать автоколебания при любой величине скорости ветра (в пределах рабочего диапазона). Развитые свойства адаптации ВЭУК по отношению к величине и направлению ветра являются существенным достоинством ВЭУК (см. ниже).

Классификация ВЭУК, представленная на рис. 4, упрощена. Так, в ней не отражено то, что ВЭУК могут быть наземными (высота импеллера над земной или водной поверхностью H до нескольких десятков метров), приземными (H до 500...100 м), высотными (H до 10...12 км). Стратификация по χ , ν_p может содержать не две, а несколько категорий.

2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ ВЭУК

Здесь приводятся конструктивные схемы, принципы функционирования и расчетные данные ВЭУК различных видов, начиная от наземных ВЭУК малой и средней мощности и кончая сверхмощными высотными ВЭУК в струйных течениях.

2.1. Наземные ВЭУК

Наземными ветроэнергетическими установками здесь именуется установки, относительная высота расположения импеллеров которых не превышает 100 м.

ВЭУК мачтового вида. Предлагаемая схема ВЭУК мачтового поворотного вида представлена на рис.5. По классификации, приведенной выше, данная ВЭУК относится к быстроходным низкочастотным установкам с вращательно-поступательным рабочим движением планов вертикального импеллера и комбинированной обратной связью.

Данная схема рекомендуется для ВЭУК малой или средней (до 100 кВт) установленной мощности.

Мачта выполнена в виде "внутренней" трубы 6, установленной на неподвижной плите 9 и укрепленной на верхнем конце*) оттяжками 7 (рис.5). Импеллер связан с внешней трубой 8, поворачивающейся вместе с поворотной платформой 10 при изменении направления ветра. Поворот внешней концентрической трубы относительно внутренней осуществляется на подшипниках скольжения или качения. Подвеска импеллера осуществляется посредством верхней

*) При наличии кольцевого рельса на земле и двух штанг на поворотной платформе 10, опирающихся своими концами на тележки, перемещающиеся вдоль указанного рельса, возможно применение дополнительных оттяжек.

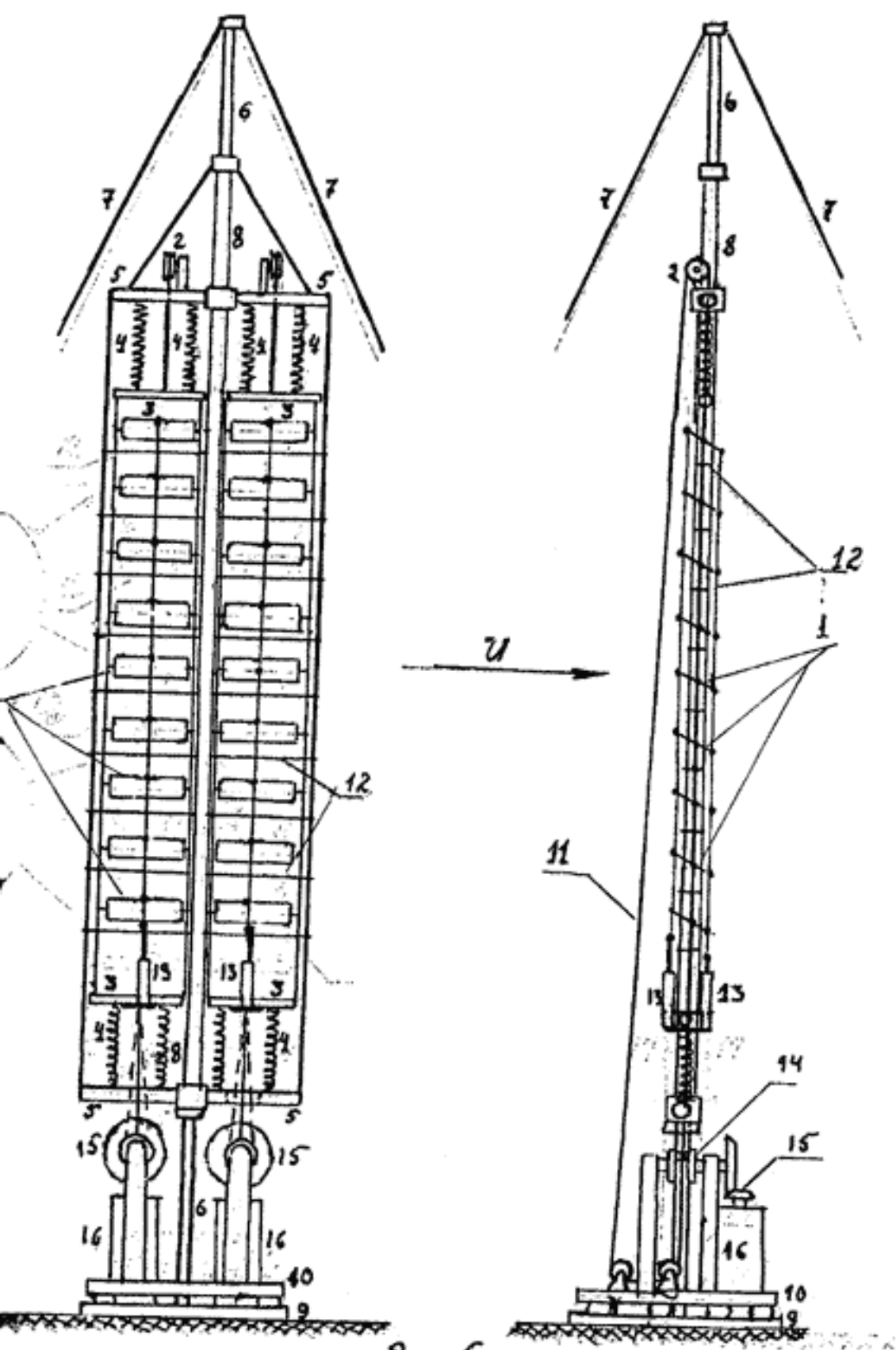


Рис. 5

Схема ВЗУК мачтового
типа

и нижней рей 5, приваренных к внешней трубе мачты. Подвеска двух одинаковых лент импеллера выполнена на достаточно мощных пружинах 4, имеющих предварительный натяг и растяжение. Каждая из этих пружин одним концом соединена с реей 5, а другим концом — с крайней поперечной балкой 3 импеллера. Концы балок 3 каждой из двух лент импеллера соединены достаточно жесткими на растяжение вертикальными тросами. Крайние балки с натянутыми между ними тросами образуют как бы легкую раму, на которой подвешиваются рабочие аэродинамические поверхности — планы I.

Планы имеют симметричный тонкий профиль и подвешиваются к тросам посредством цапф на концах и шарикоподшипников, внешние обоймы которых тем или иным способом укреплены на боковых тросах. Для придания лентам импеллера достаточной жесткости в направлении ветрового потока предусмотрены пластины I2, приваренные внутренними концами к внешней трубе 8 мачтовой опоры, а внешними концами — к вертикальным стержням (проводам), соединяющим верхнюю и нижнюю рей. Тросы II лент импеллера проходят через роликовые направляющие, установленные в пластинах I2.

Собственная частота возвратно-поступательных вертикальных колебаний импеллера выбирается равной рабочей частоте вращения коленчатых валов ν_p с целью разгрузки последних от инерционной силы, пропорциональной массе импеллера. Два коленчатых вала I4 имеют опоры, установленные на платформе I0 и поворачивающиеся вместе с ней при изменении направления ветра.

Каждый из коленчатых валов I4 имеет шейку, радиус установки которой относительно оси вращения вала может изменяться в зависимости от скорости ветра посредством специального привода, не показанного на рис.5. Это расширяет адаптивные свойства

ВЭУК и повышает их КПД.

Шейки коленвалов соединены "струнными" (тросовыми) шатунами с нижними балками 3 импеллера. В принципе возможно применение обычных жестких шатунов. Однако такие шатуны, работающие как на растяжение, так и на сжатие, во избежание "выпучивания" должны обладать достаточной жесткостью на изгиб, что значительно увеличивает массу импеллера. Струнные шатуны работают только на растяжение.

Испытания экспериментальной (одноплановой) установки в аэродинамической трубе показали, что для достаточно точного соответствия амплитуды возвратно-поступательных колебаний планов расчетному значению односторонней тросовой тяги недостаточно даже при наличии дополнительного натяжения верхних пружин [4-6]. В ВЭУК рис.5 для каждой ленты импеллера применяется вторая тяга, образующая замкнутую тросовую проводку. Эта тяга подводится к шейке коленвала в направлении, почти противоположном направлению первой тяги (первого струнного шатуна) и посредством блоков, в частности, блоков 2, установленных на верхней рее 5, направляется к верхней балке 3, на которой закрепляется. Если плечо (радиус выноса) шейки коленвала составляет $1/7$ длины струнного шатуна, то амплитуда продольных упругих деформаций тросовой проводки II (рис.5) при рекомендуемой ниже высоте мачты в 20-40 м не превышает 0,2-0,1%. Это соответствует незначительным дополнительным усилиям.

Синхронные с возвратно-поступательным движением угловые колебания планов создаются в данной ВЭУК электропневматическими приводами совместно с силами инерции. Пневмоцилиндры этих электроприводов обозначены на рисунке цифрой 13. Баллоны-пневмоаккумуляторы и насосы, нагнетающие воздух в эти баллоны, могут располагаться рядом с пневмоцилиндрами. На рисунке

они не показаны.

В качестве приводов насосов (нагнетателей), расположенных на колеблющихся лентах импеллера, целесообразно использовать резонансный инерциальный колебательный привод. Нагнетатель с таким приводом может представлять собой просто цилиндр с массивным поршнем, осью, параллельной направлению поступательных колебаний основания (ленты импеллера), клапанами и единственной упруго ограниченной посредством спиральных пружин степенью свободы вдоль оси колебаний. Простой расчет показывает, что мощность, приходящаяся на единицу массы поршня такого привода, может быть выражена формулой

$$\frac{P_{\text{пн}}}{m_{\text{пн}}} = 0,5 \Delta_{\text{пн}} \Delta_{\text{и}} \omega_p^3, \quad (I)$$

где $P_{\text{пн}}$ — мощность инерциального колебательного привода нагнетателя; $m_{\text{пн}}$ — масса поршня; $\Delta_{\text{пн}}$ — амплитуда поступательных колебаний поршня; $\Delta_{\text{и}}$ — амплитуда поступательных колебаний ленты импеллера (равная плечу шейки коленвала); $\omega_p = 2\pi \nu_p$ — рабочая частота. При $\Delta_{\text{и}} = 0,5$ м, $\Delta_{\text{пн}} = 0,3$ м, $\nu_p = 5$ Гц, $P_{\text{пн}}/m_{\text{пн}} = 2,3$ кВт/кг. Отсюда видно, что инерциальный привод, даже при относительно низкой рабочей частоте, намного превосходит электропривод. Таким образом, подобный привод незначительно увеличивает массу лент импеллера. Однако он, конечно, отнимает некоторую часть полезной мощности ВЭУК. Для сокращения мощности, расходуемой на угловые автоколебания планов, помимо искусственной обратной связи, создаваемой посредством сервомоторов (пневмопривода), можно использовать "естественные" обратные связи, вызывающие автоколебания или близкий к ним режим. Такие обратные связи могут создавать небольшие грузы, укрепляемые на всех или нескольких задних кромках планов каждой ленты импеллера при статической неустойчивости планов

за счет осей подвеса, проходящих посередине пластинок планов.

Контур искусственной обратной связи в этом случае совместно с изменением плеч шеек коленвалов служит лишь для изменения амплитуды автоколебаний при изменении скорости ветра и придания им устойчивости. Затраты мощности при этом малы.

На схеме рис.5 импеллер изображен в положении, соответствующем середине хода вверх. В этом положении планы отклонены на максимальный угол носком вверх. Подъемная сила планов направлена вверх и совершает полезную работу. Струнные шатуны основных шеек создают крутящий момент, который через повышающий редуктор передается на электрогенераторы 16 (для надежности используется два генератора). В крайних верхнем и нижнем положениях хорды планов импеллера горизонтальны и их подъемная сила равна нулю. При движении вниз планы отклоняются носками вниз, подъемная сила направлена вниз и опять совершает полезную работу.

Сигналы на входы электропневматических приводов поступают от микропроцессорного вычислителя, входными сигналами которого служат сигналы текущего положения лент импеллера и сигнал скорости ветра. Сигнал колебаний лент импеллера проходит в вычислителе острорезонансное звено, настроенное на рабочую частоту ВЭУК ν_p . Это звено служит эталоном частоты ВЭУК. Сигнал скорости ветра поступает от специального датчика, не показанного на схеме рис.5. Микропроцессорный вычислитель размещается на платформе 10 и его сигналы передаются на приводы с помощью гибких кабелей, приспособленных к соответствующим деформациям. Помимо абсолютной величины скорости ветра датчик ветра выдает сигнал направления горизонтальной проекции ветра. Этот сигнал поступает в провод поворота платформы 10, также не показанный на схеме рис.5. При изменении усредненной скорости ветра

плоскость импеллера поворачивается, занимая положение, ортогональное горизонтальной проекции вектора ветра.

Для получения формул полезной механической мощности $P_{уст}$ и коэффициента использования мощности ветрового потока $\xi_{уст}$ применялись экспериментальные характеристики профиля НАСА 0015 при быстром изменении угла атаки [16]. Эти характеристики в скоростной системе координат приведены на рис. 6. Коэффициент $k_{\dot{\nu}} = \dot{\nu} l_{\kappa} / U$, где l_{κ} - хорда крыла; $\dot{\nu}$ - угловая скорость поворота крыла; U - скорость потока, характеризует относительную скорость поворота. Эти характеристики в пределах рабочего диапазона изменения угла атаки планов $0 \leq \alpha \leq 45^\circ$ аппроксимируются выражениями

$$C_{y\alpha} = a_{y0} \sin(2\alpha), \quad C_{x\alpha} = a_{x0} (1 - \cos\alpha) + C_{x0} \quad (2)$$

где a_{y0} , a_{x0} , C_{x0} - постоянные коэффициенты. Характеристики, соответствующие этим формулам, представлены на рисунке для указанных значений a_{y0} , a_{x0} и $C_{x0} = 0,05$. В [6] на основе (2) получены формулы для установленной мощности $P_{уст}$ и коэффициента использования мощности ветрового потока $\xi_{уст}$ через "входную площадь" S_{bx} рассматриваемой ВУ:

$$P_{уст} = \rho U_{уст}^3 \kappa S_{пз} [0,8 a_{y0} - 0,66 (0,293 a_{x0} + C_{x0}) \kappa] \quad (3)$$

$$\xi_{уст} = \frac{2 S_{пз}}{S_{bx}} \kappa [0,8 a_{y0} - 0,66 (0,293 a_{x0} + C_{x0}) \kappa] \quad (4)$$

Здесь $S_{пз}$ - суммарная площадь планов одной ленты импеллера; $\kappa = 2\pi \nu_{pl} / U_{уст}$ - коэффициент быстроходности; $l_{ш}$ - плечо шейки коленвала.

Формулы (3), (4) соответствуют прямоугольной форме угловых колебаний планов (мгновенный переброс планов в крайних точках их поступательного колебательного движения). Однако при

реальной сглаженной форме угловых колебаний величины $P_{уст}$, $\xi_{уст}$ уменьшаются только на несколько процентов.

Рассчитанные с использованием формул (3), (4) данные ряда наземных ВЭУК мачтового типа при $A_{y\alpha} = 3$, $A_{\alpha\omega} = 2$, $C_{\alpha\omega} = 0,05$ приведены в табл.2.

Таблица 2
Расчетные данные ВЭУК мачтового типа

$P_{уст}$, кВт $U_{уст}$, м/с	H_M , м	S_{6v} , м ²	U_{min} , U_{max} , м/с	$S_{n\Sigma}$, м ²	l_{ω} , м	ν_p , Гц	$\xi_{уст}$
5,4 7	20	30	3 30	4	0,5	5	0,87
19,6 10	25	40	4 30	6	0,5	5	0,82
31,5 10	30	60	4 30	8	0,6	6	0,87
63 12	40	70	4 30	10	0,6	6	0,86
84 12	40	90	4 30	12	0,8	6	0,90

Здесь H_M - высота мачты; U_{min} , U_{max} - минимальная и максимальная рабочие скорости ветра; остальные обозначения пояснены выше.

Достоинствами наземных ВЭУК мачтового вида в сравнении с традиционными ВЭУ аналогичной мощности являются: широкий диапазон рабочих скоростей; прочность (мачта с оттяжками и импеллер описанной выше конструкции могут выдерживать скоростной напор ураганного ветра самого высокого уровня, 60-80 м/с); высокий коэффициент использования мощности ветрового потока через "входную" площадь импеллера (по крайней мере вдвое превышающий аналогичный коэффициент для традиционных ВЭУ). Важным достоинством является малая масса импеллера и других частей сборной конструкции, облегчающая транспортировку. Подъем мач-

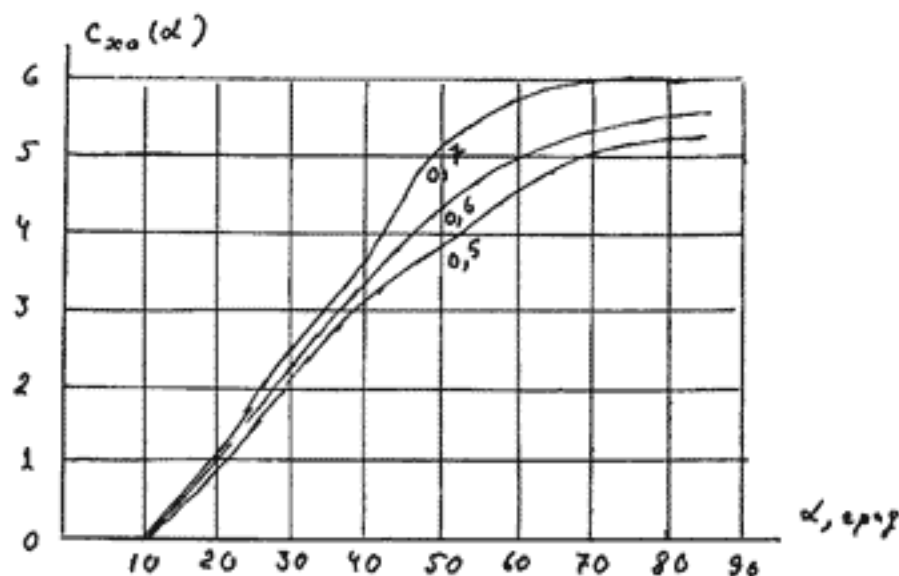
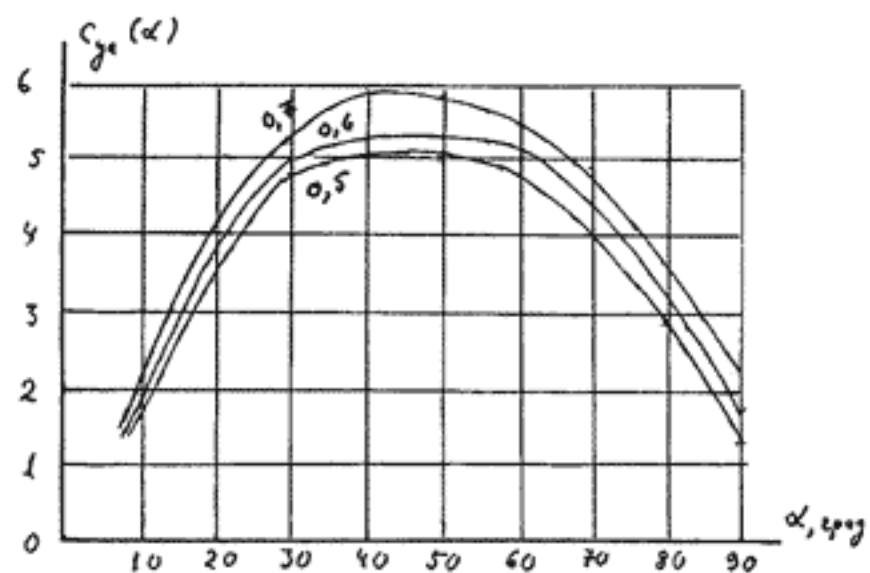
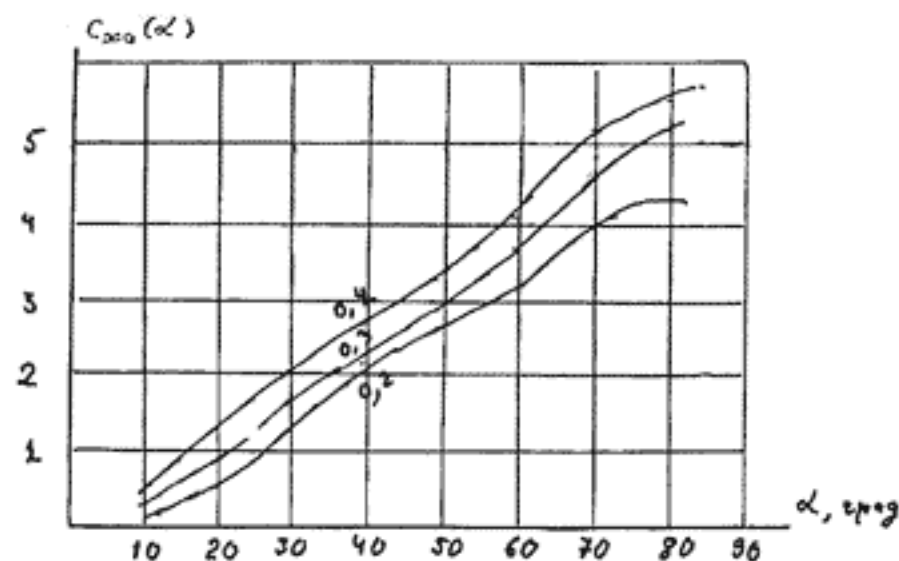
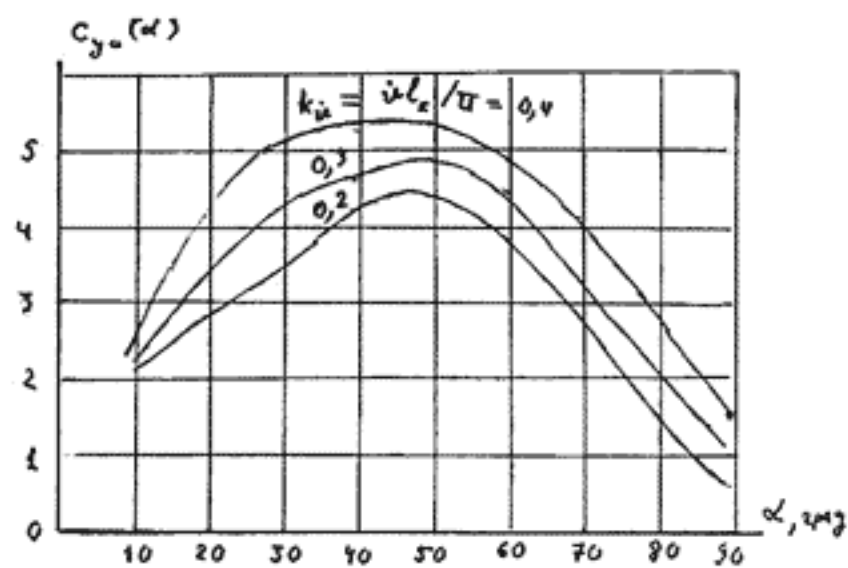


Рис. 6

Экспериментальные аэродинамические характеристики профиля НАСА 0015 при быстром изменении угла тангажа [16].

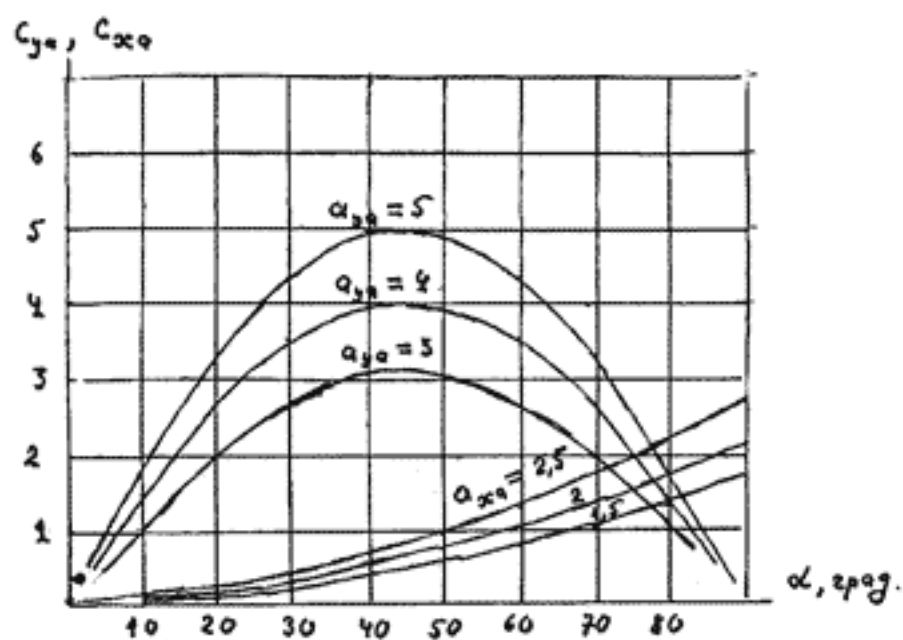


Рис. 7
Характеристики, соответствующие формулам (2)

товой БЭУК возможен с помощью лебедки (без применения подъемного крана).

БЭУК звездного типа. Для районов с высокими значениями среднегодовой скорости ветра и высокими максимальными скоростями ветра (ураганы) рекомендуется схема мощных наземных БЭУК, которая будет именоваться "звездной". В звездной БЭУК три импеллера с вертикальными планами I совершают горизонтальные возвратно-поступательные движения вдоль трех радиальных направлений, образующих друг с другом углы 120° ("звезда", рис.8).

Вся конструкция БЭУК звездного типа отвечает требованиям высокой прочности, долговечности и сравнительно малого возвышения над земной поверхностью. Массовые характеристики здесь не имеют особого значения. Поэтому планы I установлены здесь в жестких рамах 2, совершающих возвратно-поступательные движения вдоль рельсов 3 на роликах (колесах). Три нижних рельса уложены на грунт или фундамент подобно железнодорожным рельсам. Три верхних рельса опираются концами на столбы, установленные на периферии и в центральной части. В центре находятся: вертикальный коленчатый вал 4, имеющий шейки, смещенные в плоскости вращения на 120° друг относительно друга; редуктор 5 и электрогенератор 6. Рамы импеллеров соединены с шейками коленчатого вала обычными жесткими шатунами. Для разгрузки шатунов и коленвала от больших сил инерции импеллеров последние соединены с концевыми опорами мощными пружинами 7.

Прочность сооружению придают фермы 8, соединяющие верхние направляющие импеллеров (верхние рельсы).

Планы импеллеров совершают вращательно-поступательные рабочие колебания. С учетом необходимости оптимизации режимов и большей гибкости электромеханических и электронных систем управления в сравнении с механическими в данной мощной БЭУК, как и

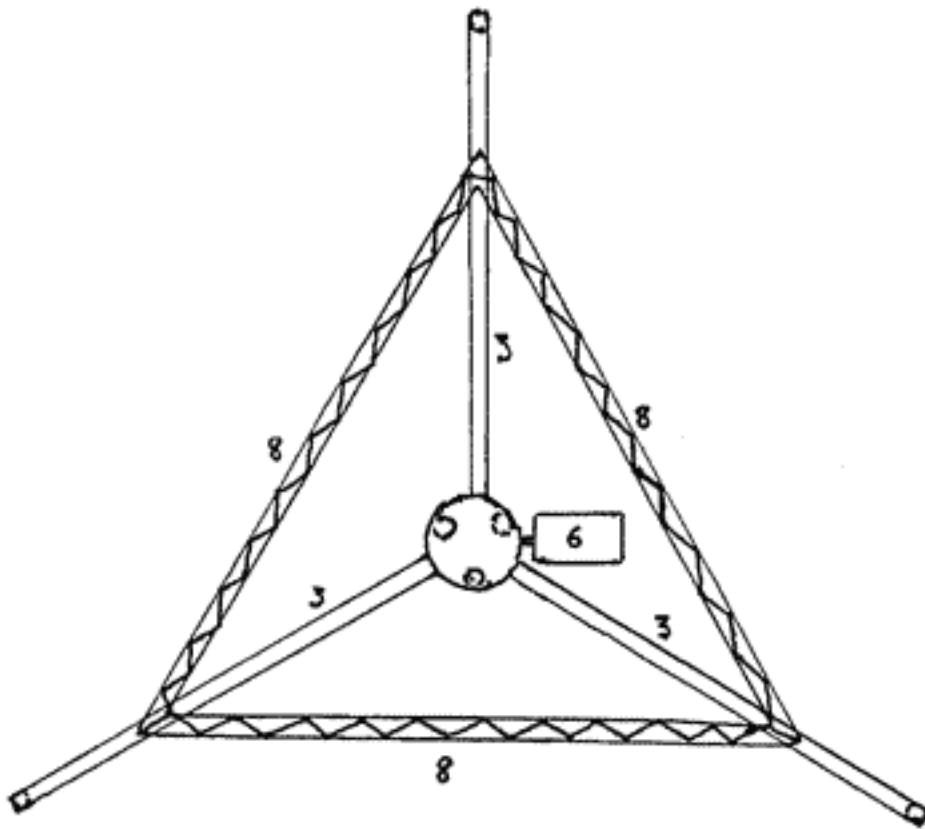
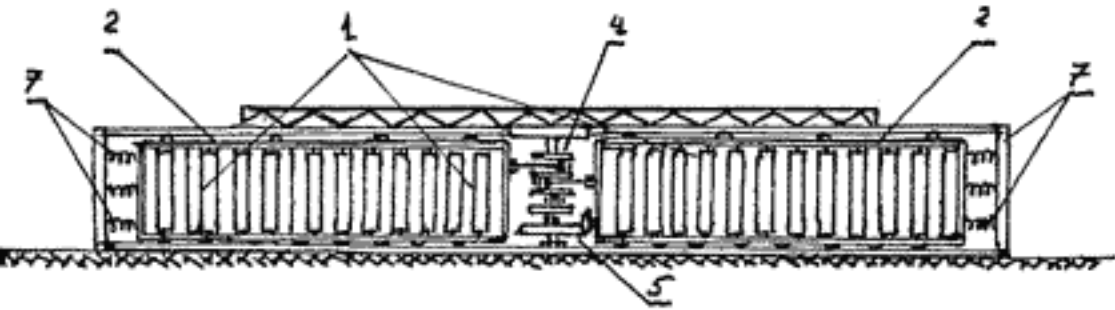


Рис. 8

Схема наземной ВЭУК звездного типа

выше, рекомендуется дополнительная обратная связь с пневмоэлектрическими сервоприводами и цифровым вычислителем. Планы поворачиваются вокруг вертикальных осей, опирающихся на подшипники, установленные в рамах импеллеров. Поворот всех планов одного импеллера может осуществляться одним пневмоэлектрическим сервоприводом, установленным на раме за счет тросовой проводки между планами, подобной описанной выше.

Однако управление импеллером здесь не сводится только к организации автоколебаний за счет обратной связи. Дело в том, что установка, неподвижная в азимуте, должна работать при любом направлении ветра и для каждого направления существует оптимальная средняя ориентация планов каждого импеллера. Расчет этой ориентации целесообразно осуществлять в цифровом вычислителе, а исполнение команд осуществлять посредством пневмоэлектрических приводов вместе с реализацией обратных связей.

В зависимости от скорости ветра должны меняться плечи l_w шеек коленчатого вала относительно оси вращения. Здесь наиболее подходят электромеханический или электрогидравлический привод.

Запуск данной ветроэлектрической установки может осуществляться за счет управления сервоприводом поворота планов. Это экономичнее, чем обеспечение стартерного режима основного электрогенератора или установка специального электростартера. Теория ВЭУК звездного типа достаточно подробно изложена в отчете [6] и статье [15].

Если искать аналог данной ВЭУК среди традиционных ВЭУ, то следует по-видимому обратить внимание на ВЭУ с вертикальной осью типа Дарье. Они также имеют высокую прочность и предназначены для районов с сильным ветром.

Однако мощность предлагаемых ВЭУК звездного типа может во много раз превосходить мощность наиболее крупных установок Дарье, а коэффициент использования мощности ветрового потока намного выше. Расчетные данные ВЭУК звездного вида приведены в табл.3. Помимо ранее поясненных параметров здесь фигурирует площадь, занимаемая ВЭУК на земной поверхности S_3 (в гектарах).

Таблица 3
Расчетные данные ВЭУК звездного вида

№	$P_{уст}$, МВт $U_{уст}$, м/с	$S_{бр}$ м ²	U_{min} , U_{max} , м/с	$S_{пз}$, м ²	l_w , м	γ_p , Гц	$\xi_{уст}$	S_3 , га	H_p , м
1	1 12	1200	3 40	115	1,04	6	0,8	0,63	10
2	3 14	1510	3 40	215	1,21	6	0,85	1,1	12
3	10 16	4520	3 40	462	1,38	6	0,9	4,52	14

Достоинства ВЭУК звездного вида в принципе те же, что и у мачтовых ВЭУК: широкий диапазон рабочих скоростей (даже больший, чем у мачтовых ВЭУК за счет адаптации посредством изменения как амплитуды возвратно-поступательных, так и угловых колебаний планов импеллера); прочность (выше, чем у других ВЭУ за счет жесткой конструкции, возможно, на специальном фундаменте); высокий коэффициент использования мощности ветрового потока.

Дополнительным преимуществом рассматриваемых ВЭУК в сравнении с традиционными может явиться меньшая стоимость. Действительно, в качестве аналогов первых двух из ВЭУК табл.3 можно рассматривать традиционные ВЭУ, обозначенные номерами 9, 10, 11, 16, 17, 20 в табл.1. Эти ВЭУ с горизонтальной осью имеют диаметры ветроколес от 53 до 198 м. Есть основание счи-

тять, что наземная ВЭУК звездного вида будет существенно дешевле своих традиционных аналогов.

На территории СНГ подходящими районами размещения подобных ВЭУК может служить Кольский полуостров (ветроэнергетические ресурсы 100 млн. кВт, [8]) и вся прибрежная полоса северных морей до устья р. Лена (ветроэнергетические ресурсы 2 млрд. кВт [8]).

Следует заметить, что звездные ВЭУК очень подходят для размещения на акваториях вблизи берега, где глубина не превышает нескольких метров (может быть, 10–20 м). Дело в том, что ввиду относительно малой высоты импеллеров опрокидывающий момент, создаваемый ветром, существенно меньше, чем для традиционных ВЭУ равной мощности. В сочетании с большим разном опор это позволит применить простые свайные конструкции вместо сложных платформ для прибрежных надводных обычных мощных ВЭУ.

Относительно влияния шума, создаваемого звездными ВЭУК, можно сказать следующее. В центре звездной ВЭУК, над коленвалом, где целесообразно разместить кабину оператора (обслуживающего персонала), шумы, создаваемые трехфазной системой импеллеров, взаимно уничтожаются вследствие интерференции. Для предотвращения негативного воздействия акустических шумов в окружающем пространстве звездные ВЭУК рекомендуется размещать на достаточном удалении от населенных пунктов.

2.2. Приземные ВЭУК

Приземными ВЭУК (ПВЭУК) здесь именуется ветроэнергетические установки с колебательным рабочим движением, верхние части импеллеров которых располагаются на высоте 200...1000 м над поверхностью земли. Если не относить к традиционным экзотические проекты с привязными аэростатами, гигантскими воздушными

змеями, поднимающими традиционные ветротурбины, редукторы и генераторы на такие высоты, то ПЭЗУК не имеют прямых аналогов в традиционной ветроэнергетике. Это связано с тем, что башни высотой 200 и более метров, несущие к тому же большие сосредоточенные массы электрогенераторных узлов, представляют весьма дорогостоящие сооружения.

Ветровой потенциал в нижнем слое атмосферы. Ветровой потенциал в пограничном слое атмосферы определяется на основе богатого статистического материала измерений скорости ветра метеорологической службой (аэрологического зондирования). Мгновенная удельная мощность ветра $0,5 \rho U^3$ усредняется по временному интервалу (месяц, год). Усреднение производится обычно на основании одной из эмпирических формул распределения скорости ветра по времени, в частности, распределению Вейбула. В качестве примера на рис.9...II приведены карты удельной мощности ветра для января на высотах 100, 500, 900 м над земной поверхностью, построенные по данным аэрологического зондирования 146 станций СССР с использованием распределения Вейбула. Более подробные данные приведены в [5]. Из этих данных следует, что [6] с увеличением высоты растет не только удельная мощность, но и регулярность ветра. При этом рост удельной мощности имеется не только в самом нижнем слое тропосферы, но и на высоте 500 м и более. На высоте 500 м средняя удельная мощность ветра в январе на большей части территории СНГ превосходит 500 Вт/м^2 , на высоте 900 м – 800 Вт/м^2 .

Принципы подъема и удержания импеллера ПЭЗУК. Помимо принципа воздушного змея (рис.12а,б) для подъема, удержания и медленного спуска импеллера ПЭЗУК может использоваться синхронное с возвратно-поступательными колебаниями изменение лобового со-

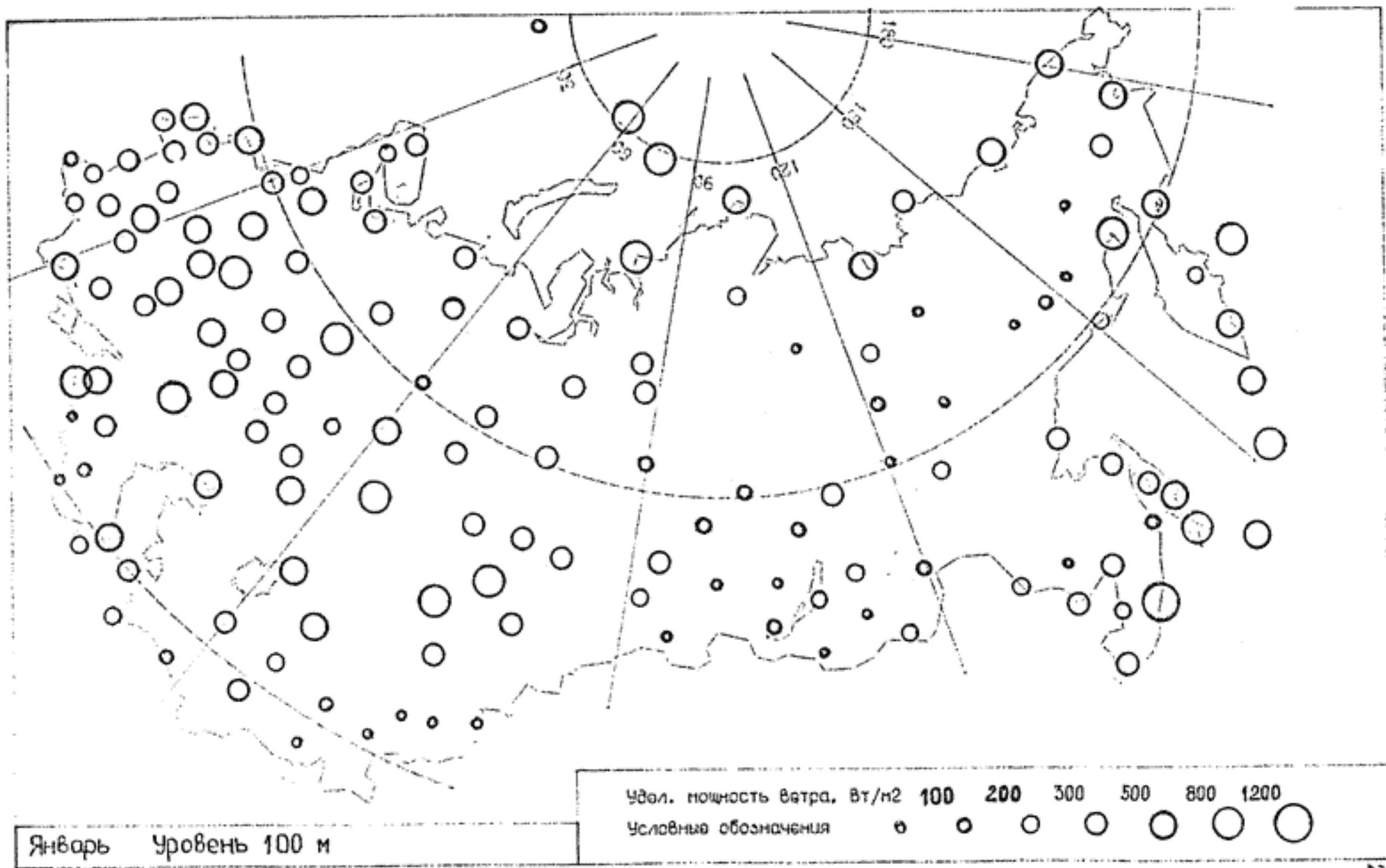


Рис. 9

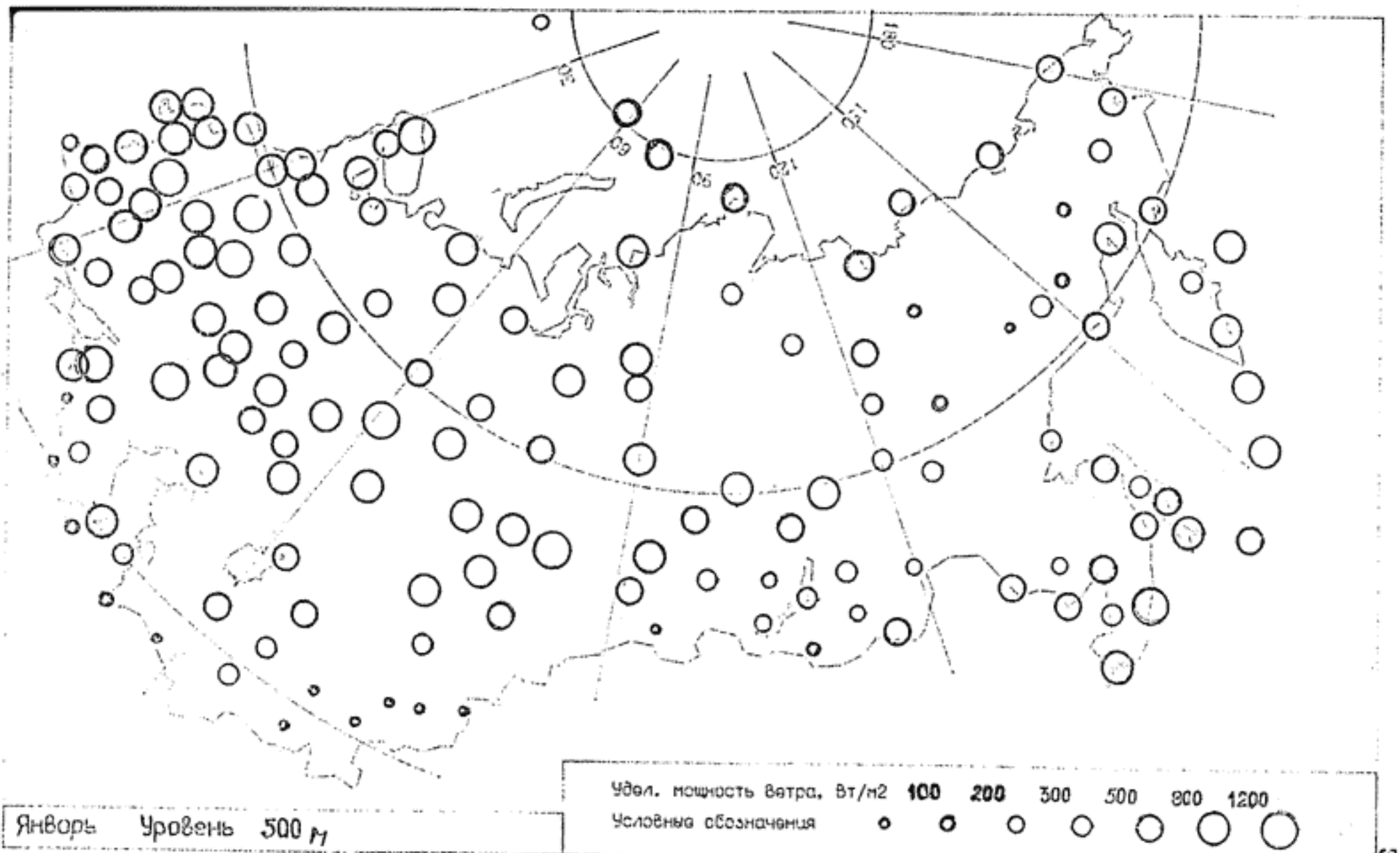


Рис. 10

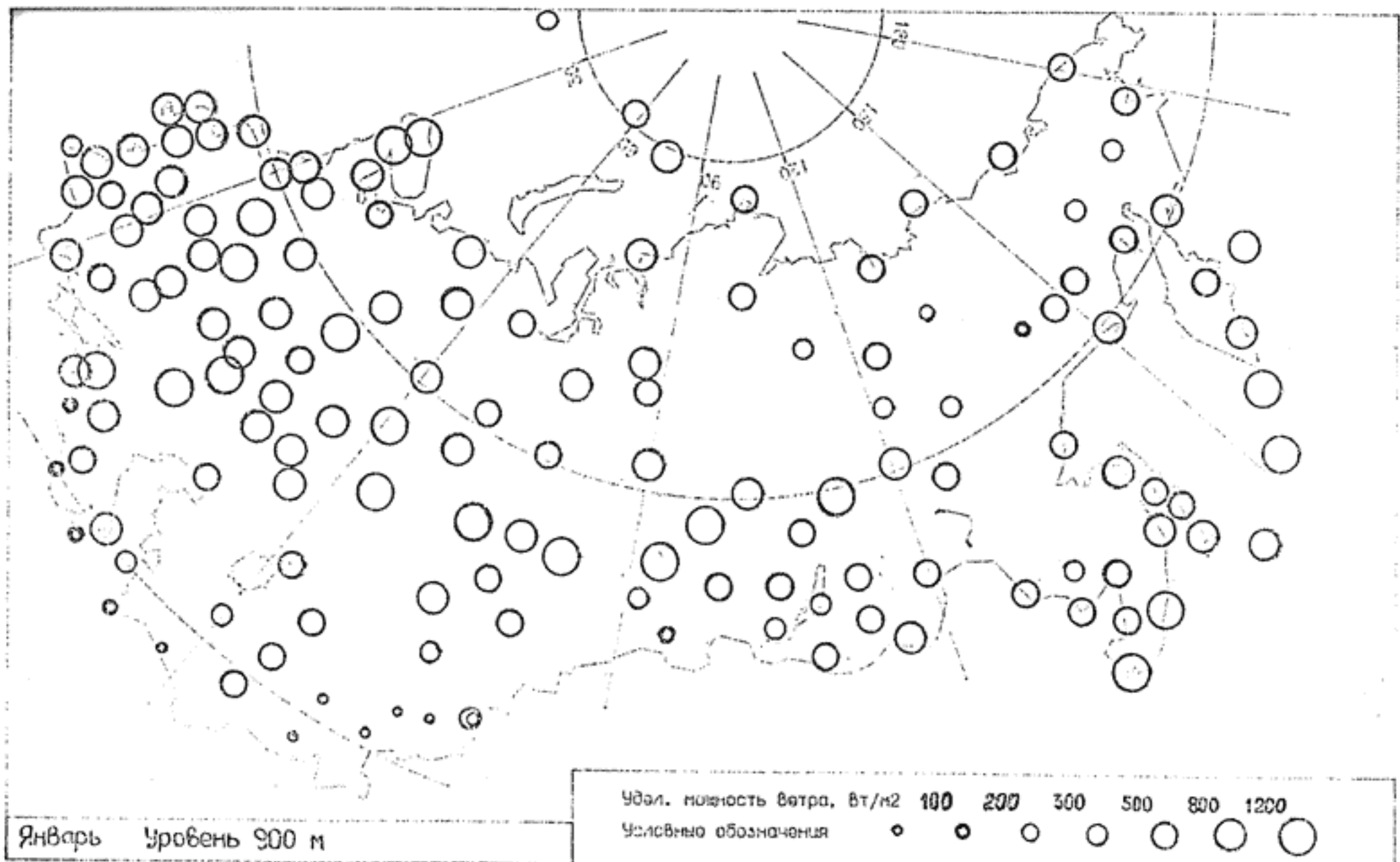


Рис. 11

противления (эффект аэродинамического синхронного детектирования) (рис.12, в, г) и комбинированный из двух предыдущих способов (рис.12, д, е).

Пассивный эффект воздушного змея, не требующий подвода колебательной энергии, использует энергию ветра и силу, создаваемую привязными тросами. Он может реализовываться как посредством планера с небольшим наклоном к горизонту, так и посредством подъемной секции с рядом поворотных несущих поверхностей (планов), также имеющих относительно небольшие углы тангажа*).

В первом случае планер может иметь плоскую форму (рис.12, а) или форму крыла с закрылками и предкрылками (рис.12, б). Эффект аэродинамического синхронного детектирования реализуется как секцией с вертикальной ориентацией (рис.12, в), так и секцией (рамой) с горизонтальной или наклонной ориентацией (рис.12, г). При движении секции вверх (левые позиции на рис.12, в, г) планы устанавливаются в положение малого лобового сопротивления, а при движении вниз — большого лобового сопротивления. При горизонтальной ориентации секции (рамы) снижение эффективности из-за взаимного влияния планов меньше, чем при вертикальной ориентации. Эффект аэродинамического синхронного детектирования позволяет создавать постоянно действующие управляемые аэродинамические силы в условиях отсутствия ветра (штиль). Однако он требует подвода колебательной энергии, значительной, при значительных создаваемых постоянных аэродинамических силах.

*) Парашют в хвостовой части воздушного змея, изображенный на рис.12, а, б, следует рассматривать как условное изображение реального устройства ориентации по направлению ветра (см. ниже).

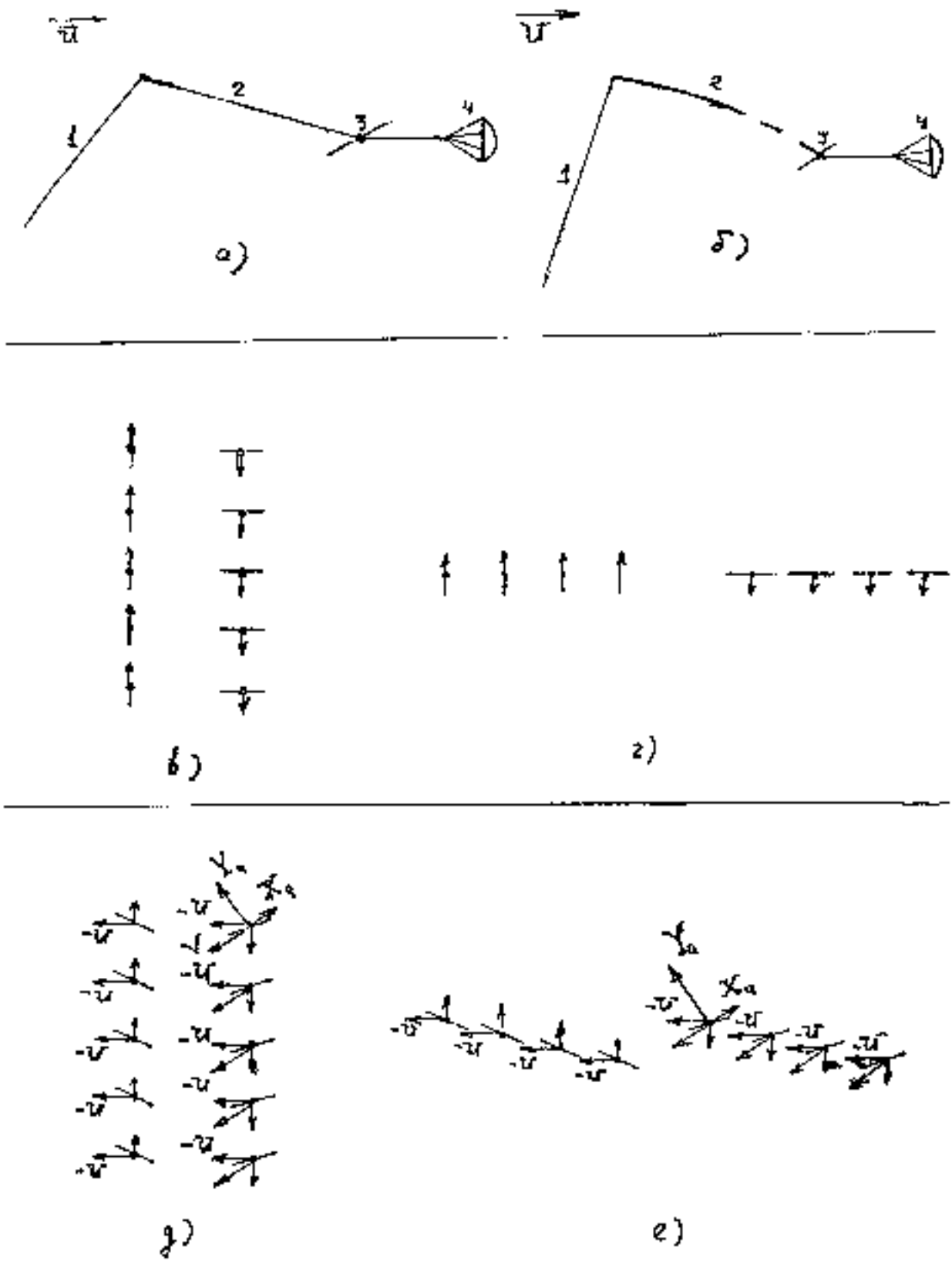


Рис. 12

Иллюстрация принудител создания поземной силы за счет ветра и колебательного рабочего движения

Наиболее универсальным является комбинированный способ, при котором одновременно используется как эффект воздушного змея, так и эффект синхронного детектирования (рис.12,д,е). При движении секции вверх здесь аэродинамические хорды планов ориентируются в каждый текущий момент по вектору относительной воздушной скорости, создавая лишь небольшое лобовое сопротивление. При движении вниз угол атаки планов устанавливается таким, чтобы создавать максимальную желаемую аэродинамическую силу.

Конструктивная схема приземной ВЭУК. Вариант схемы наземной части ПЭУК изображен на рис.13. До разворачивания установки подъемная рама 1 своими концами посредством торцевых замков опирается на тележки 2. Эти тележки при разворачивании ПЭУК совершают возвратно-поступательные вертикальные колебания вдоль четырех опор 3. Рама 1 мощными пружинами 4, работающими как на сжатие, так и на растяжение, связана с горизонтальной балкой 5. К подъемной раме пружины 5 крепятся посредством пневмоцилиндров 6, служащих для изменения угла тангажа рамы. Перемещение тележек 2 ограничено пружинами 7. К балке 5 крепятся основные тросы 8 одноленточного импеллера. В свернутом состоянии ВЭУК большая часть импеллера намотана на барабан 9, при этом жесткие планы и тросы располагаются в барабане на примерно цилиндрических поверхностях. Сам импеллер во многом аналогичен по конструкции изображенному на рис.6. Оси жестких планов 10 (рис.13,14,а) опираются на концах на опоры качения, установленные на основных тросах 8. Эти опоры в дальнейшем именуется опорными узлами. Кроме основной функции (опоры планов) они используются для обеспечения регулярности работы направляющих блоков 13, 14 (рис.13,14,б). Последнему служат и фальшь-узлы 12 (рис.14,а). Узлы, попадая в выемки блоков,

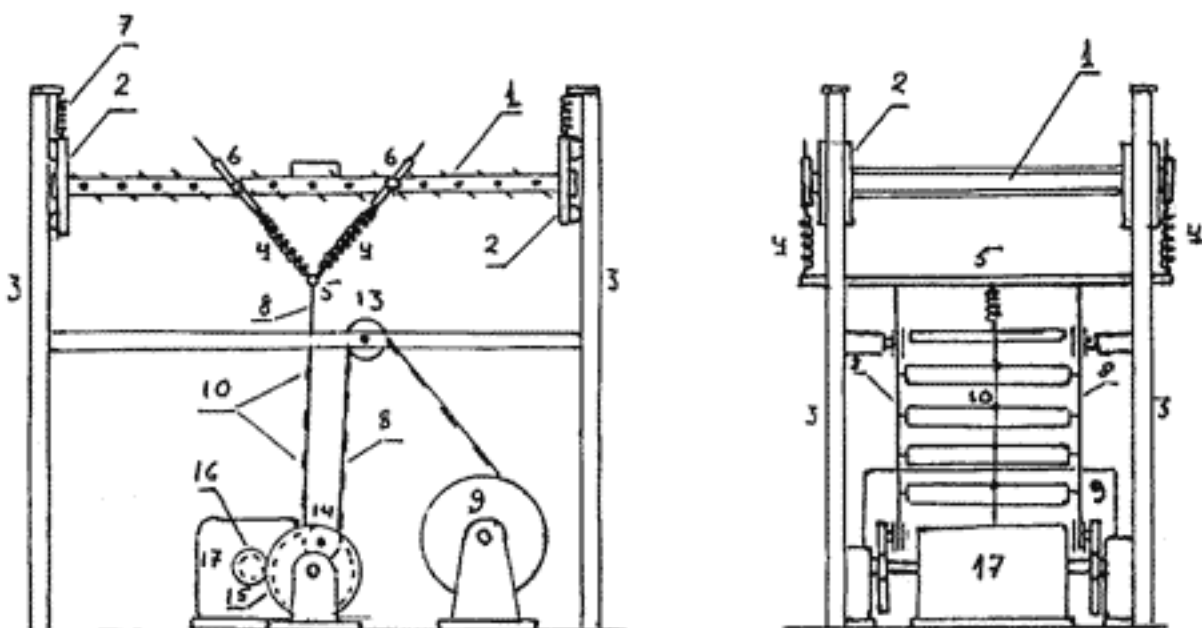


Рис. 13

Наземная часть ПВЭУК

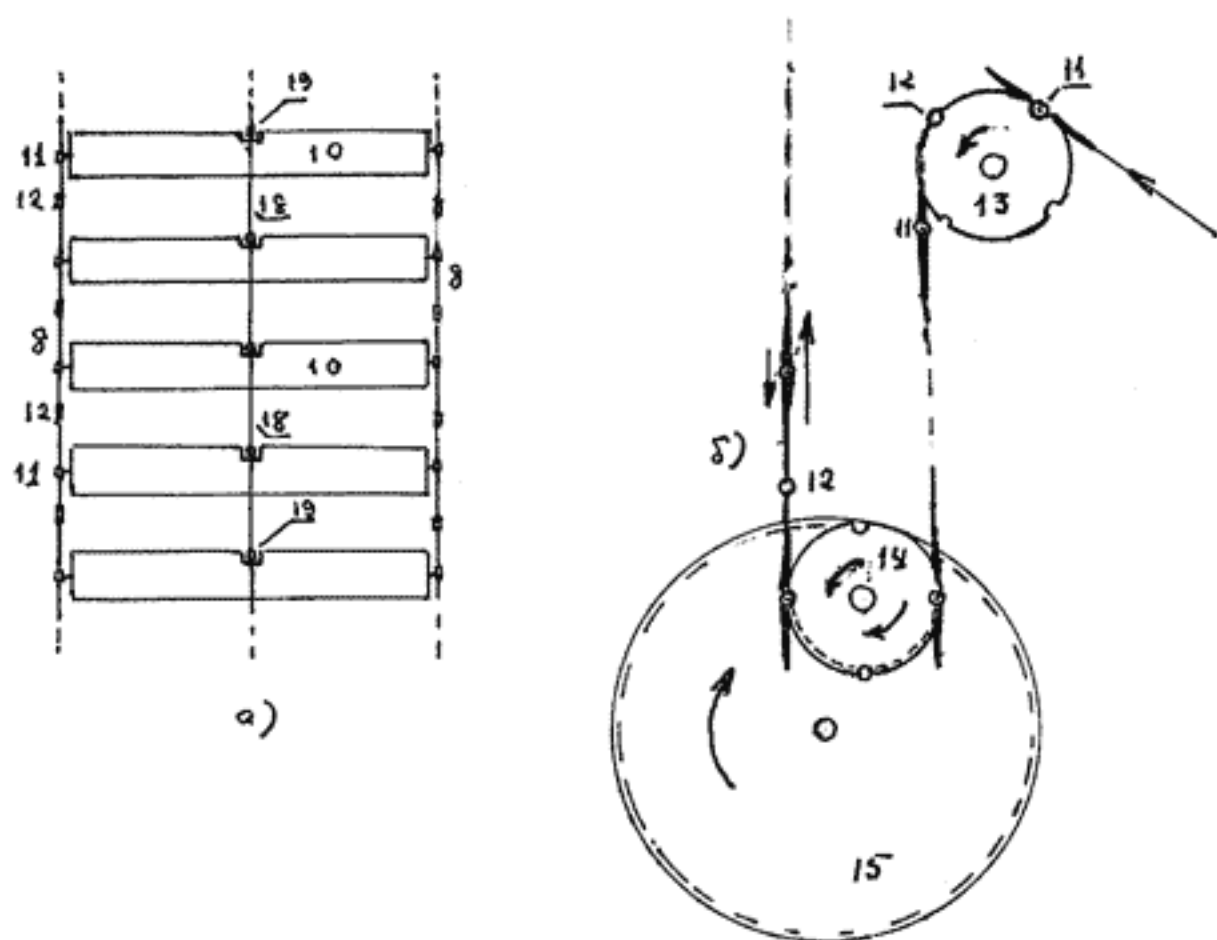


Рис. 14

Схема фрагмента импеллера и передающих -
направляющих устройств

обеспечивают их поворот вокруг собственных осей. Ось блока 3 связана с неподвижным основанием. Этот блок при равномерном подъеме импеллера в процессе разворачивания ПЭУК вращается практически равномерно. Ось блока 14 установлена на шестерне 15 (рис.13, 14,б) как шейка коленчатого вала (кривошипного механизма). Как и в других ВЭУК, в интересах оптимизации плечо блока шейки (блока 14) относительно оси вращения большой шестерни делается переменным для обеспечения постоянства коэффициента колебательной скороходности при изменении скорости ветра. Это обеспечивается за счет радиальной направляющей, ходового винта и позиционного электропривода небольшой мощности. Шестерня 15 (их две, по числу основных тросов, см.рис.13) сцеплена с малой шестерней на валу электрогенератора 17. При равномерном вращении вала электрогенератора и шестерни 15 блок 14, совершая планетарное движение, обеспечивает возвратно-поступательное (а в режиме подъема и вертикальное поступательное) движение импеллера. В установившемся рабочем режиме ПЭУК этот блок как элемент коленчатого вала преобразует энергию рабочего возвратно-поступательного движения импеллера во вращение электрогенератора 17.

Помимо пары основных тросов 8 импеллер имеет еще средний трос 18, служащий для управления угловым положением планов (рис.14,а). Этот трос соединен с каждым планом через узлы 19 (рис.14,а). В принципе возможно механическое управление с земли угловым положением всех планов импеллера как в процессе разворачивания, так и в установившемся режиме.

Однако рекомендуется объединение планов в группы (секции) по 10...30 планов с применением для общего углового привода планов секции электропневматического привода. Такой привод дает большую гибкость, большую возможность оптимизации режима.

Что касается подвода электроэнергии, то он сводится к передаче только слабых сигналов управления (это, очевидно, затруднений не вызывает).

Пневматическая энергия на каждом звене импеллера может вырабатываться простейшим насосом с инерциальным приводом (см. выше).

Таким образом, выбор пневмоэлектрического привода для поворота планов импеллера и подъемной рамы вполне оправдан.

В дальнейшем предполагается, что пневмоэлектропривод используется в мощных ВЭУК и для других функций управления.

Обращаясь к установке, представленной на рис.13, поясним, что процесс подъема импеллера (развертывания ПЭУК) протекает следующим образом. Запускается электрогенератор 17 в стартерном режиме или специальный стартерный (в частности, дизельный) двигатель. Малые 16 и большие 15 шестерни начинают вращаться. Блоки 14, совершая планетарное движение, периодически (с постоянной составляющей) натягивают основные тросы, приводя подъемную раму I в вертикальное колебательное движение. Одновременно за счет электропневмопривода и вычислителя, установленных на подъемной раме, приводятся в колебательное поворотное движение планы подъемной рамы. Наличие на подъемной раме микропроцессорного вычислителя позволяет оптимизировать режим ее работы с учетом скорости ветра.

После достижения необходимой подъемной силы срабатывают торцевые замки подъемной рамы (также посредством электропневмопривода) и рама начинает подниматься, вращая барабан 9 и вытягивая на собой ленту импеллера.

Для стабилизации подъемной рамы по направлению ветра производится выпуск нижних килей рамы с рулями направления (на рис.13 сложенные кили не показаны). Более мощным органом стабилизации

по направлению ветра и стабилизации крена рамы могут служить выпускные (на телескопических штангах) аэродинамические поверхности 20 (рис.15,б). Посредством пневмоцилиндров 6 производится установка оптимального угла тангажа подъемной рамы.

Схема мощной ПЭУК в установившемся рабочем режиме функционирования представлена на рис.15. Рабочее положение импеллера при наличии ветра показано на рис.15,а штрих-пунктирной линией. Подъемная рама I здесь находится на расчетной высоте над поверхностью земли при оптимальном для данного режима угле тангажа. Складывающиеся кили 2 и органы управления 20 подъемной рамы выпущены и вместе с секцией ориентации 4 (рис.15,б) обеспечивают положение плоскости импеллера, приблизительно нормальное к вектору ветра. Секция ориентации 4 одноленточного импеллера отличается от основных ("генераторных") и подъемных секций 3 тем, что все ее планы разделены на две равные части, могущие управляться в угловом положении отдельно. Для создания максимального момента вокруг вертикальной оси все правые "полупланы" (рис.15,б) ставятся фронтально по отношению к ветру, а левые - компланарно вектору ветра, или наоборот. Одновременное управление углом рысканья подъемной рамы осуществляется посредством выпускных органов 20.

В нижней части импеллера планов нет и в развернутом положении здесь находятся только основные тросы 5. Управление (стабилизация) плоскости импеллера осуществляется так, чтобы не допускать скручивания основных тросов и ленты импеллера.

Как отмечалось выше, на секциях импеллера целесообразна установка инерциальных насосов и пневмоэлектрических сервоприводов углового управления планами. Проблема их автоматического монтажа и демонтажа при развертывании и свертывании импеллера может быть сравнительно легко решена посредством соответствующими

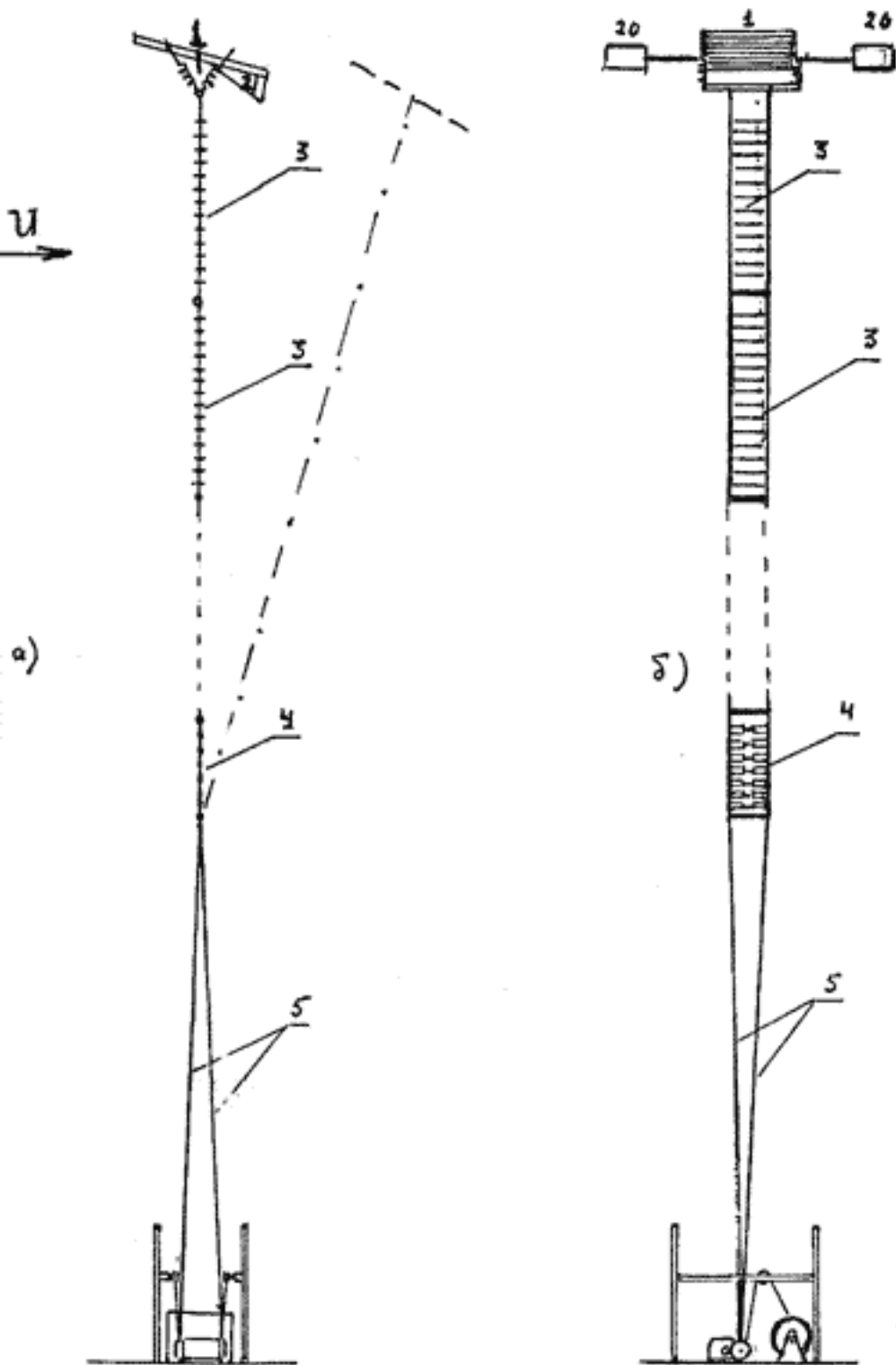


Рис. 15

Схема мощной ПВЭУК в развернутом состоянии

щего робота. Наличие подобного сервопривода на секциях импеллера создает возможность оптимизации процессов разворачивания, свертывания и установившегося рабочего режима, что позволяет существенно сократить энергетические затраты. При этом основные секции импеллера наряду с превращением энергии ветра в энергию рабочих возвратно-поступательных колебаний могут использоваться для создания вертикальной и горизонтальной уравновешивающих сил.

Расчетные данные трех ПЭУК разной мощности приведены в табл.4.

Таблица 4
Расчетные данные ПЭУК разной мощности

№	$P_{уст}$, МВт $U_{уст}$, м/с	$H_{и}$, м $\Theta_{и}$, град	U_{min} , U_{max} , м/с	λ	$m_{тр}$, кг	$S_{пз}^r$, м ²	$S_{пз}^n$, м ²	$S_{пз}^p$, м ²	$\xi_{уст}$	$m_{и}$, кг
1	0,3 15	300 15	7 40	1,5	150	70	130	70	0,85	1500
2	1 16	400 15	7 40	1,5	535	192	450	100	0,86	3500
3	3 17	500 15	7 40	1,5	1800	463	1100	200	0,90	9000

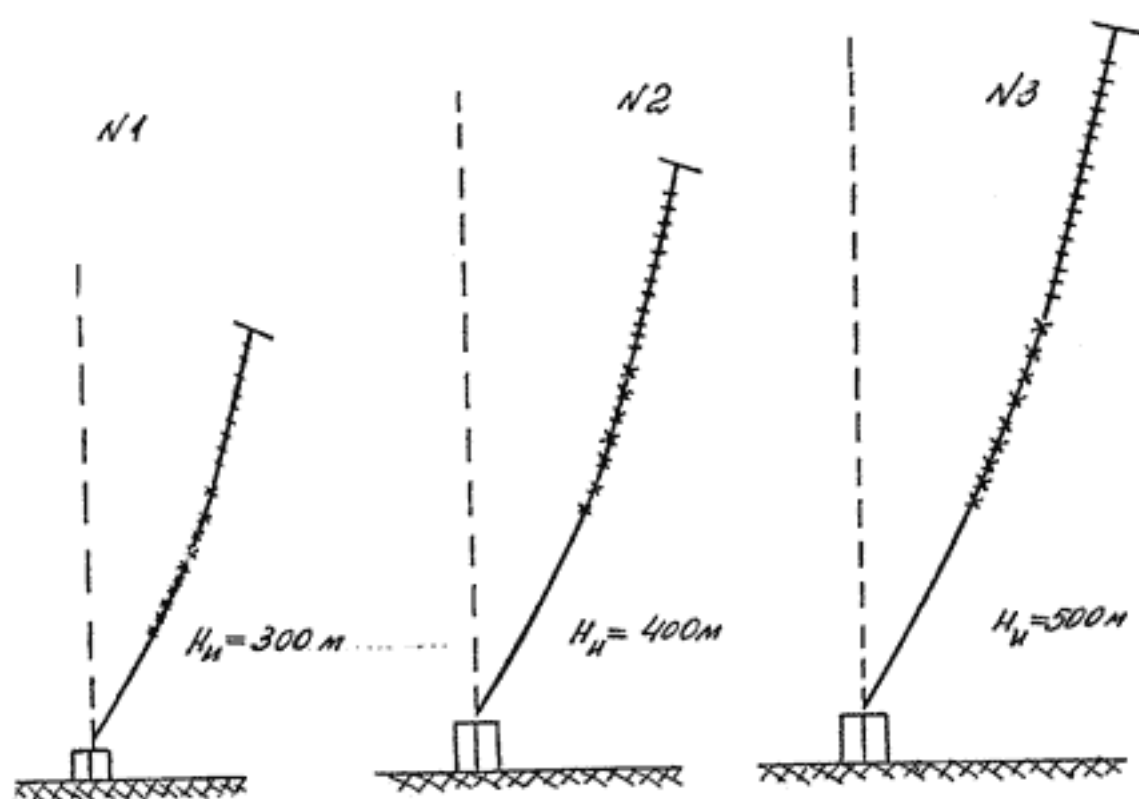
Здесь $P_{уст}$ — установленная механическая мощность ПЭУК при установленной для генерирующей части импеллера скорости ветра $U_{уст}$. Через $H_{и}$ и $\Theta_{и}$ обозначены высота верхней точки импеллера (подъемной рамы) над земной поверхностью и угол наклона верхней части ленты импеллера по отношению к вертикали. Скорости U_{min} , U_{max} соответствуют границам диапазона скорости ветра на высоте $H_{и}$, в пределах которого ПЭУК может функционировать. Величина λ соответствует коэффициенту колебательной быстроходности для генерирующей секции импеллера. Через $m_{тр}$

обозначена суммарная масса стальных тросов импеллера^{*)}, через $m_{и}$ — общая масса импеллера. Величины $S_{пз}^Г$, $S_{пз}^н$, $S_{пз}^Р$ обозначают суммарные площади планов генерирующих секций, подъемных секций и подъемных рам соответственно. Коэффициент использования мощности ветрового потока $\xi_{усл}$ вычисляется для генерирующей секции обычным образом через входную площадь этой секции $S_{6х} = 2,5 S_{пз}$.

Для всех трех вариантов ПВЭУК табл.4 принят одинаковый порядок расположения секций импеллера и одинаковые рабочие режимы их функционирования. Наверху располагаются подъемные рамы, в установившемся рабочем состоянии функционирующие в пассивном режиме воздушного змея. Далее следуют пассивные подъемные секции (отмечены черточками на рис.15,а, 16), функционирующие в таком же режиме. За ними в средней части импеллера размещаются генерирующие секции (отмечены крестиками на рис.16), а также секция ориентации относительно ветра, действующая согласованно с органами азимутальной ориентации верхних подъемных рам. Основные тросы, передающие механическую колебательную энергию от генерирующих секций к наземной части ПВЭУК и коленчатому валу, имеют значительный угол наклона по отношению к вертикали (рис.16).

Чтобы обеспечить передачу энергии при любом направлении ветра без скручивания "струн" (тросов), помимо согласованного действия секции ориентации и органов азимутальной ориентации подъемных рам предусматриваются направляющие для тросов на крыше наземной части ПВЭУК. Эти роликовые направляющие должны

*) При тросах из кварцевого стекловолокна можно ожидать трех-четырёхкратное уменьшение массы тросов.



16. Расположение импеллеров ПВЗУК в рабочем режиме

устанавливаться автоматически после разворачивания (или в завершающей стадии разворачивания) импеллера и обеспечивать практическое совпадение точек входа тросов в наземную часть ПВЭУК. На рис.15 эти направляющие не показаны.

Значения параметров ПВЭУК, приведенные в табл.4, получены при $A_{y0} = 3$, $A_{x0} = 2$, $C_{x0} = 0,05$ (см. отчет [6], стр.169). Для коэффициента C_y планов подъемных секций и подъемных рам в пассивном режиме принято значение $C_y = 2$. Заметим, что импеллер ПВЭУК средней мощности ($P_{усг} = 0,3$ МВт) целесообразно делать одноленточным, как на рис.15. Для ПВЭУК большой мощности целесообразен трехленточный трехфазный импеллер, как для высотных ВЭУК (рис.19).

2.3. Высотные ВЭУК

Согласно изложенному выше основной ветроэнергетический потенциал сосредоточен в верхнем слое тропосферы на высотах $H = 8 \dots 12$ км. Подтверждением этого служат табл.5,6 среднегодовой и максимальной скорости ветра над 11 городами РФ, расположенными в разных регионах. ВЭУК, импеллеры которых находятся на этих высотах, именуется далее высотными (ВВЭУК) независимо от того, попадают они в струйное течение или нет.

Ключевой концепцией ВВЭУК является передача механической энергии на значительные расстояния, как минимум, соответствующие высоте размещения импеллера, посредством струнных (тросовых) передач. Основы теории этого нового вида механических передач изложены в [6,17]. Струнные передачи (СП) делятся на СП малой и значительной (большой) дальности. СП малой дальности называются передачи, длина струн (тросов) которых меньше четверти длины звуковой волны в материале троса. СП большой дальности имеют длину струн (тросов), значительно превосходящую

Таблица 5

Среднегодовые скорости ветра на высотах 8...12 км

Город	Высота, км				
	8	9	10	11	12
Мурманск	19,7	19,7	18,5	17,5	15,2
Москва	20,7	21,5	21,2	19,7	17,2
Ростов-на-Дону	18,5	20,0	21,0	21,0	21,0
Свердловск	21,2	22,2	22,2	20,5	19,0
Минеральные воды	18	21	23	24,5	24
Новосибирск	21,2	22,5	23,5	19,4	22,5
Красноярск	22,2	23	22,7	21,2	19,2
Чита	20,7	22,2	22,5	22,0	22,0
Якутск	15,5	15,5	14,7	13,5	12,7
Владивосток	24,7	27	28,7	30,2	30
Ключи (Камч.обл.)	17,5	17,2	18,0	17,7	16,5

Таблица 6

Максимальные за год скорости ветра на высотах 8...12 км

Город	Высота, км				
	8	9	10	11	12
Мурманск	93	91	91	81	81
Москва	75	81	71	80	60
Ростов-на-Дону	95	90	88	97	93
Свердловск	67	72	85	74	74
Минеральные воды	92	94	95	92	94
Новосибирск	80	76	87	83	87
Красноярск	89	89	92	75	88
Чита	85	86	83	75	81
Якутск	56	69	71	64	58
Владивосток	87	89	95	96	96
Ключи (камч.обл.)	93	82	93	91	87

четверть длины звуковой волны. Для низкочастотных ВЭУК, рабочая частота которых $\nu_p < 5$ Гц, длина продольной волны в стальных тросах составляет примерно 1 км. Поэтому описанные выше СП можно считать струнными передачами малой дальности. Для таких СП возвратно-поступательные продольные движения струн (тросов) с некоторым приближением можно рассматривать как колебательное движение твердого тела или небольшого числа твердых тел, т.е. как процесс в системе с сосредоточенными параметрами.

СП большой дальности, характерные для ВВЭУК, строго говоря, необходимо рассматривать как системы с распределенными параметрами.

Особенности СП ВВЭУК. Средняя за период (эффективная) мощность, передаваемая по одному тросу (струне) СП, может быть определена по формуле $0,5 y_m \omega_p \delta_m \xi_r$, где y_m — амплитуда продольных колебаний частиц троса; δ_m — амплитуда колебаний механического напряжения в тросе; ξ_r — площадь поперечного сечения троса. Главными требованиями к тросам СП ВВЭУК выступают: максимальная допустимая передаваемая по одному тросу мощность, срок службы (при заданной вероятности обрыва), масса троса заданной длины.

При самых низких рабочих частотах (например, $\nu_p = 0,4$ Гц) очень трудно обеспечить достаточно высокие значения колебательной скорости $y_m \omega_p$. Кроме того, при чрезмерно низких ω_p возрастает число ступеней редуктора и потери в редукторе, растут габариты коланчатого вала и всего механизма преобразования колебаний СП во вращение вала электрогенератора. Поэтому для ВВЭУК рекомендуется рабочая частота $\nu_p = 5$ Гц (по классификации рис. 4) на грани между низкочастотными и высокочастотными ВЭУК). При этом для ВВЭУК могут быть получены значения $\dot{y}_m = 30 \dots 80$ м/с.

При $\dot{y}_m = 30$ м/с, $S_1 = 100$ мм², $\delta_m = 400$ Н/мм² мощность $P_{\text{вст}}$ составит 0,6 МВт на один трос. При трехленточном импеллере с шестью основными тросами указанного сечения общая передаваемая мощность может достигать 3,6 МВт. Масса 1 км троса такого сечения составит около 800 кг. По удельной мощности СП не имеют аналогов среды других механических передач значительной длины [17]. Проблема развертывания и удержания планов импеллера и тросов СП может быть решена путем использования специальных разгрузочных секций как в самом импеллере, так и в длинных СП, соединяющих импеллер с наземной частью ВЭУК (см. ниже). Однако достаточно полное использование энергетической пропускной способности СП требует согласования нагрузок (подобно длинной линии) как на концах, так и в промежуточных точках для минимизации обратной волны.

Для такого согласования удобно импеллер, да и просто тросы СП (играющие одновременно роль вертикальных привязных тросов), делить на секции, равные по длине четверти продольной волны. Для стального троса без планов это, как отмечалось, составляет примерно 250 м.

Важным является также следующее замечание. Ориентировочные оценки необратимых потерь энергии при продольных упругих (инфранизкочастотных (5 Гц) колебаниях в натянутых стальных тросах длиной 10 км показывают, что эти потери малы. Однако возбуждение и распространение этих колебаний может сопровождаться возникновением поперечных волн. Необратимые потери энергии при поперечных волнах неизбежны и могут быть, по-видимому, значительными. Для устранения этих волн целесообразно использовать свойство трехфазных СП подавлять нежелательные гармоники. Это достигается посредством размещения редких поперечных штанг, соединяющих ленты импеллера.

Рекомендуемой схемой ВВЭУК большой и сверхбольшой мощности

служит схема с вертикальным трехленточным импеллером и подъемными рамами, представленная на рис.17...19.

Упрощенная схема наземной станции такой ВВЭУК изображена на рис.17. Она соответствует свернутому состоянию ВВЭУК. На крыше здания станции на пружинных опорах 2 размещаются три подъемные рамы I (по одной на каждую ленту трехленточного импеллера). Единую подъемную раму применить нельзя, так как рабочие колебания трехфазного импеллера и трехфазной СП сдвинуты друг относительно друга по фазе на 120° и такие же сдвиги по фазе должны иметь рабочие колебания соответствующих подъемных рам. Ленты импеллера в рассматриваемом состоянии намотаны на барабаны 3. Проблема транспортировки, хранения, развертывания и свертывания импеллеров мощных и сверхмощных ВВЭУК должна решаться в зависимости от мощности ВВЭУК. Так, уже для ВВЭУК мощностью 10 МВт с диаметром основных стальных тросов лент импеллера 10 мм и высотой висения подъемной рамы 10 км масса пары стальных основных тросов составит примерно 12×10^3 кг. Такая масса приемлема для транспортировки широко применяемыми транспортными средствами. Однако размеры барабана (катушки) с горизонтальной осью, позволяющие намотать ленту импеллера длиной 10 км с тросами, планами, узлами подвески планов, поперечными штангами чрезмерно велики. Задача может решаться за счет конвейерной сборки лент импеллера, разделенных на отрезки (секции), снабженные стыковочными узлами. При этом при развертывании барабаны (катушки) с секциями импеллера подаются один за другим к месту сборки и секции автоматически стыкуются.

При свертывании ВВЭУК организуется обратный процесс. Соответствующие конвейерные линии на схеме рис.17 не отображены. Другое решение проблемы заключается в применении катушек боль-

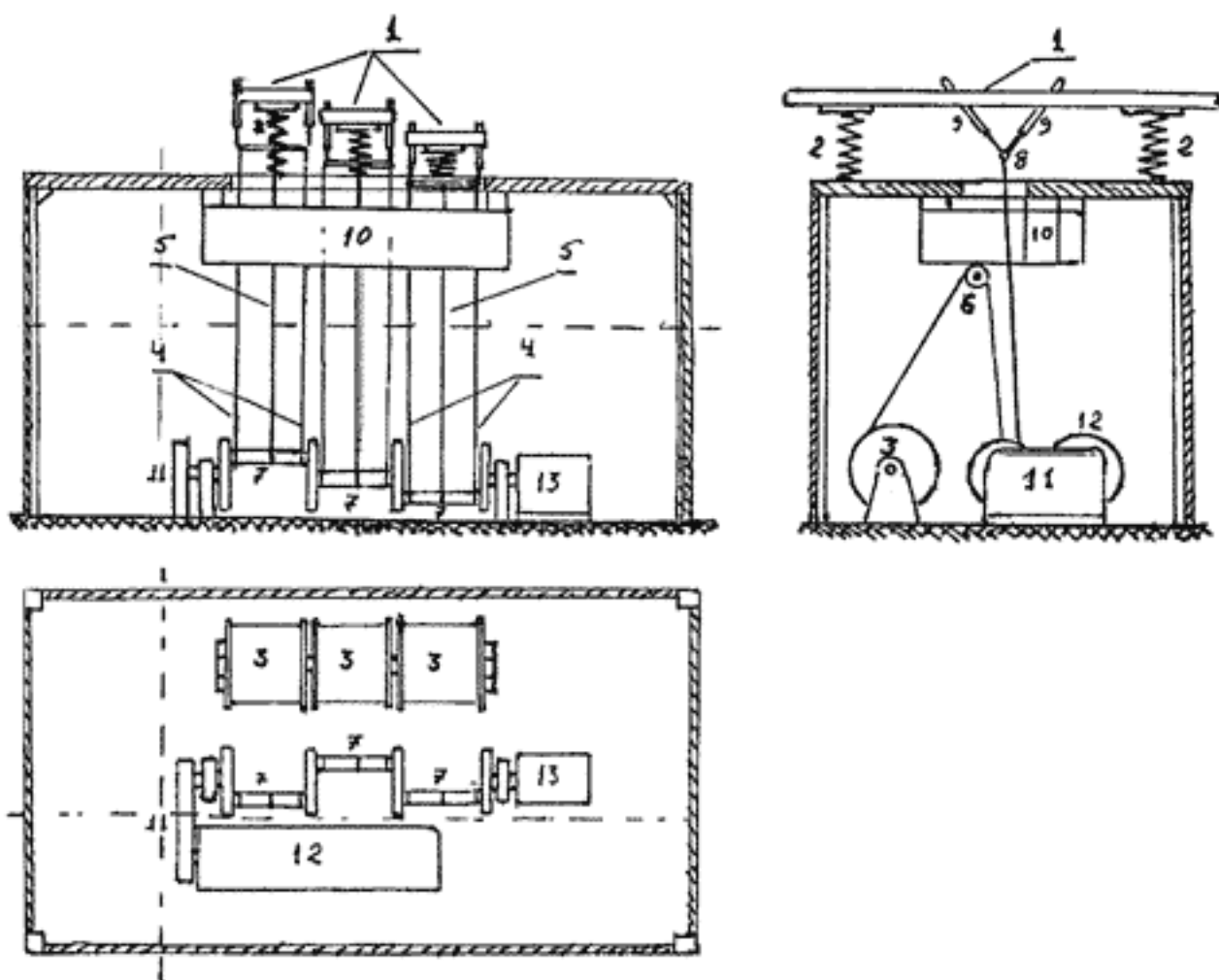


Рис. 17

Схема наземной станции ВВЭУК с вертикальным интегрированным импеллером

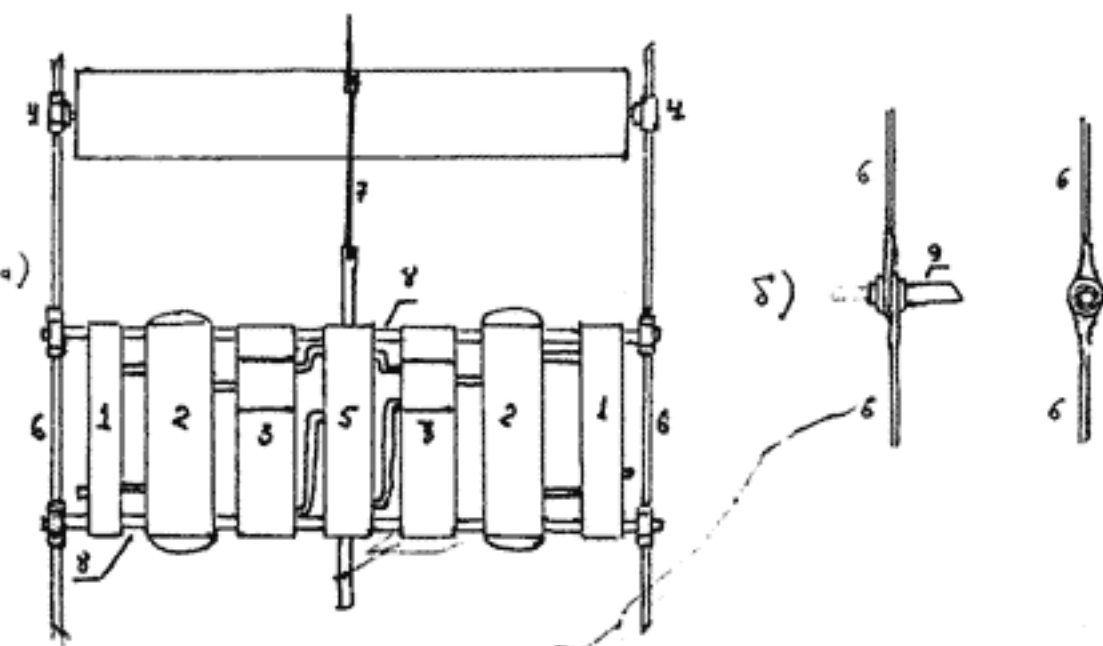


Рис. 18

К пояснению конструкции импеллера ВВЭУК

ВВЭУК

шого диаметра (до нескольких десятков метров) с вертикальной осью вращения, расположенных вне главного помещения станции. Для удешевления конструкции такие катушки могут опираться на кольцевые однорельсовые пути посредством большого числа колес железнодорожного типа.

Помимо пары основных тросов 4 (для сверхмощных ВЕЗУК число основных тросов может быть больше) на каждой секции ленты импеллера имеется относительно тонкий трос (тросы) 5 управления угловым положением планов. Тросы (ленты) импеллера, сматывающиеся при разворачивании ВЕЗУК с барабанов (катушек) 3, проходят промежуточные свободно проворачивающиеся вокруг собственных осей валы 6, играющие роль направляющих блоков, и направляются к таким же валам 7 коленчатого вала, играющим роль шеек этого вала. На валах 6 и валах-шейках 7 имеются пазы для узлов подвески планов и поперечных штанг, а диаметр их достаточно велик (до 1 м), чтобы обеспечить огибание лентами импеллера с планами и штангами этих валов при их одновременном свободном провороте.

Ленты импеллера, огибая валы-шейки 7, меняют свое направление практически на 180° и направляются к подъемным рамам I (рис.17). Основные троса лент импеллера крепятся к поперечным штангам-балкам 8, связанным с подъемными рамами через пневмоцилиндры 9, служащие для управления углами тангажа рам в процессе функционирования ВЕЗУК.

На пути к подъемным рамам ленты импеллера в процессе разворачивания ВЕЗУК проходят около робототехнического комплекса 10, оснащающего импеллер дополнительными деталями и соединяющего поперечные штанги секций соседних лент (см.ниже). При свертывании ВЕЗУК этот комплекс выполняет обратные функции.

Коленчатый вал через редуктор II (при использовании многополюсного генератора редуктор II может отсутствовать) связан с основным электрогенератором станции I2 синхронного типа.

Для разворачивания и запуска ВЭУК служит электродвигатель I3. В случае отсутствия электросети при разворачивании, запуске может применяться дизельная установка.

Дополнительные иллюстрации устройства импеллера приведены на рис. I8. Как отмечалось выше, целесообразно применять быстродействующий пневмоэлектрический сервопривод управления угловым положением планов, устанавливаемый робототехнической системой I0 (рис. I8) при разворачивании и снимаемый той же системой при свертывании импеллера ВЭУК. Один привод посредством тонкого троса (тросов) может одновременно поворачивать группу планов, в частности, все планы секции. Модуль (плата) сервопривода (рис. I8, а) включает инерциальные насосы I (все элементы, кроме пневмоцилиндра 5 дублированы для повышения надежности); баллоны-пневмоаккумуляторы 2; платы пневмоэлектрической и электронной аппаратуры 3, содержащие микропроцессорные вычислители; уже упоминавшийся пневмоцилиндр 5 с датчиком обратной связи.

Все перечисленные элементы крепятся роботом к двум поперечным штангам 8, постоянно укрепленным на основных тросах 6 ленты импеллера. Узлы крепления и сами штанги 8, как и шарикоподшипниковые концевые опоры 4 планов, при разворачивании ленты импеллера входят в пазы направляющих валов 6 и валов-шек 7 коленчатого вала (рис. I7).

Сказанное выше указывает на целесообразность для мощных и особенно сверхмощных ВЭУК (например, 100 МВт) сборки в ходе разворачивания лент импеллера из секций длиной, например, 250 м (четверть длины продольной волны в стальном тросе).

Рис.18,б поясняет возможное устройство стыковочного узла, использующего прочную трубчатую штангу 9 и концевые петли основных тросов 6. "Нарращивание" основных тросов посредством данных стыковочных узлов должно производиться специальной автоматической установкой, не показанной на схеме рис.17. При свертывании импеллера эта установка должна выполнять обратные операции.

Выше говорилось также, что для предотвращения паразитных поперечных колебаний выгодно обеспечивать скользящие механические связи между лентами трехфазного импеллера. Эти связи не должны препятствовать продольным рабочим колебаниям, сдвинутым по фазе на 120° , лент импеллера. Однако, находясь по возможности в пучностях стоячих поперечных волн, эти связи должны подавлять наиболее существенные тона (гармоники) поперечных колебаний. Для обеспечения этого могут применяться редкие (не на каждой секции) поперечные штанги, скрепляемые друг с другом, например, посредством байонетных соединений.

Соответствующая штанга на центральной ленте импеллера жестко связана с основными тросами этой ленты. Штанги этого назначения на боковых лентах импеллера в рабочем состоянии должны свободно перемещаться (например, посредством роликовых направляющих) вдоль основных тросов на расстояние, несколько превышающее удвоенную амплитуду рабочих продольных колебаний.

Приведение байонетных соединений в рабочее положение (установка связей между штангами) и освобождение крайних штанг от стопорных устройств при разворачивании импеллера должны производиться робототехническим комплексом 10 (рис.17), как и обратные действия при свертывании импеллера.

Процесс разворачивания импеллера в целом может быть кратко описан следующим образом. Включается двигатель 13, раскручи-

вающий коленчатый вал. Свободно проворачивающиеся вокруг собственных осей валы-шейки 7 коленвала, совершая планетарное движение, периодически натягивают основные тросы 4 лент импеллера, идущие к подъемным рамам I (рис.17). Рамы I, находящиеся на упругих опорах 2, под действием периодически натягиваемых тросов приходят в возвратно-поступательное вертикальное движение. Включается система управления угловым движением планов. Под действием эффекта аэродинамического синхронного детектирования или совместным действием этого эффекта и ветра (эффект воздушного змея) образуются постоянные подъемные силы рам. После достижения достаточных подъемных сил открываются замки, крепящие подъемные рамы к пружинным опорам 2 и рамы I начинают подниматься, вытягивая за собой ленты импеллера.

При этом направляющий вал 6 и валы-шейки 7 коленвала помимо периодического крутильного движения начинают вращаться с практически постоянной угловой скоростью, подавая ленты, сматываемые с катушек 3 (рис.17). Для многосекционного импеллера за начальным небольшим тросовым участком прежде всего разворачивается первая "генераторная" секция. Одновременно с этим в любых ветровых условиях, кроме штилевых, производится ориентация подъемных рам по ветру.

После разворачивания одной или нескольких "генераторных" секций импеллера включается управление угловым положением их планов и эти секции переводятся в рабочий "генераторный" режим. В этом режиме они преобразуют энергию ветра в возвратно-поступательное рабочее движение, передаваемое на коленвал и подъемные рамы. Двигатель I3 при этом отключается, а включается основной электрогенератор I2 (рис.17).

Схему ВВЗУК в развернутом положении иллюстрирует рис.19.

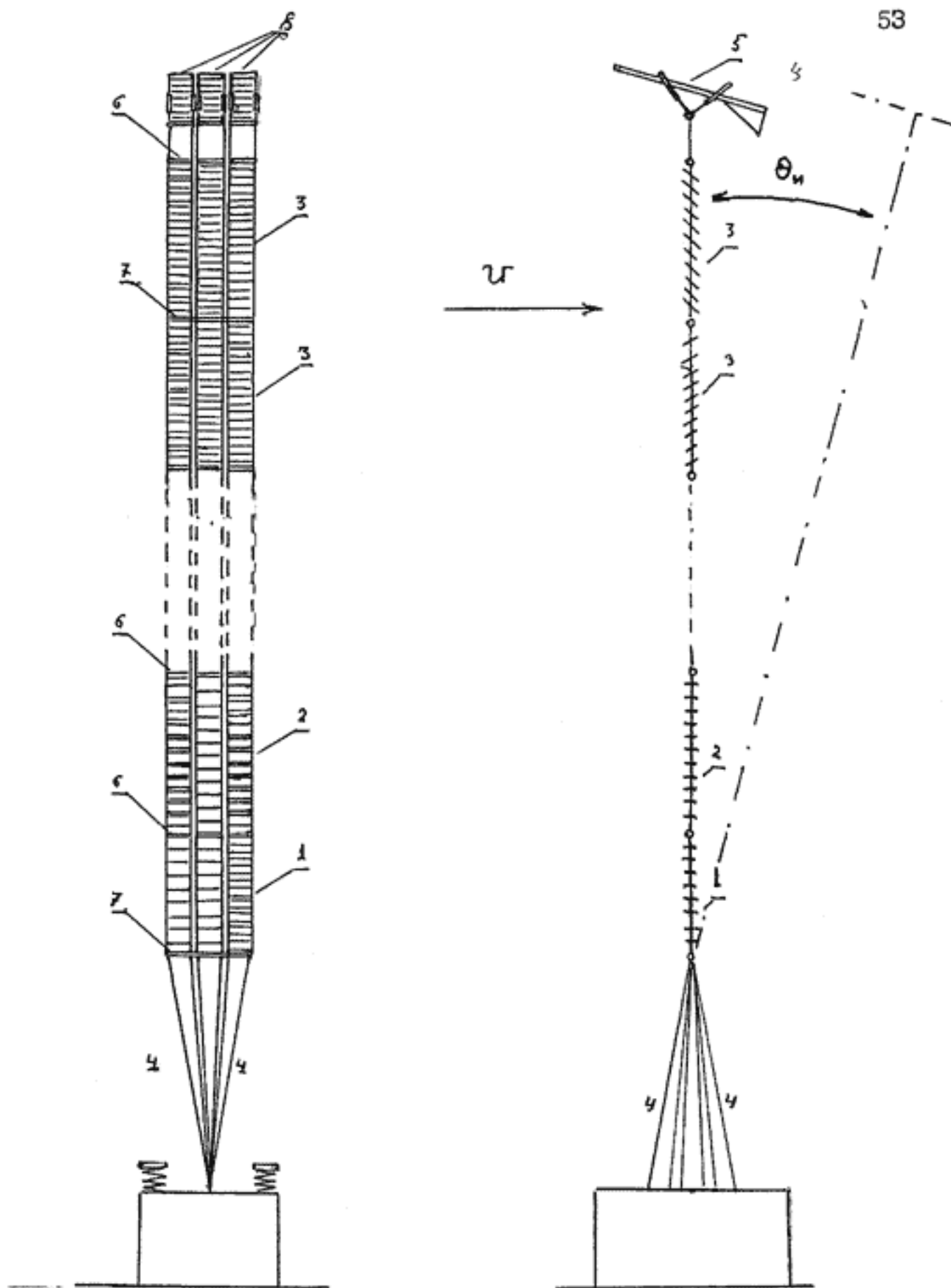


рис. 19
 Схема ИЗЭУК в развернутом положении

В [6] выполнены приближенные расчеты ВВЭУК как использующих струйные течения, так и использующих энергию обычного ветра на высотах 8...10 км. Естественно, наиболее эффективным является первый класс ВВЭУК, расчетные данные для которого приведены в табл.7.

Таблица 7

Расчетные данные сверхмощных ВВЭУК, использующих энергию высотных струйных течений

№	$P_{уст},$ МВт $U_{уст},$ м/с	$H_{и\theta_{вх}},$ км град	λ	$m_{тр},$ кг	$S_{пз}^r,$ м ²	$S_{пз}^n,$ м ²	$S_{пз}^p,$ м ²	$m_{и},$ кг	$\xi_{уст}$
1	50 100	11 15	1	10^5	161	150	112	$1,2 \cdot 10^5$	0,60
2	100 100	11 15	1	$2 \cdot 10^5$	323	300	264	$2,4 \cdot 10^5$	0,60
3	150 100	11 15	1	$3 \cdot 10^5$	484	400	386	$3,5 \cdot 10^5$	0,60

При равной мощности суммарные площади планов импеллера сокращаются для струйных ВВЭУК более чем на порядок. Это связано с высокой естественной концентрацией ветровой энергии в струйном течении (высоким скоростным напором). Коэффициент использования мощности ветрового потока $\xi_{уст}$ в данном случае несколько ниже, чем в предыдущем за счет меньшего λ , но это не имеет существенного значения, ввиду весьма высокого значения удельной мощности ветрового потока $0,5 \rho U_{уст}^3 \approx 200$ кВт/м².

При расчете, результаты которого приведены в табл.7, предполагалось, что все подъемные и генераторные секции располагаются в верхней части импеллера, находящейся в установившемся рабочем режиме в струйном течении.

Однако согласно предыдущему должны обеспечиваться и саморазвертывание и самосвертывание ВВЭУК.

Предположим, что саморазвертывание и свертывание обеспечиваются за счет тех же секций, переводимых в подъемный режим аэродинамического детектирования и питаемых колебательной механической энергией от наземной станции. Ввиду высокой колебательной скорости $\dot{y}_m = 100$ м/с, влияние ветра до высоты струйного течения не учитывается (штилевой режим).

Критическим моментом самоподъема импеллера является положение, при котором верхушка импеллера еще не достигла струйного течения, все секции работают в режиме активных подъемных секций, а импеллер развернут почти на полную длину. Предположим, что это имеет место на высоте, где средняя для секций плотность $\rho = 0,467$ кг/м³ (H = 9 км). Для вариантов сверхмощных ВВЭУК получены следующие значения силы и потребляемой мощности в режиме самоподъема импеллера: (табл.8).

Таблица 8

Максимальные значения силы и потребляемой мощности в режиме самоподъема ВВЭУК

№	1	2	3
F_y , Н	$1,26 \cdot 10^6$	$2,59 \cdot 10^6$	$3,78 \cdot 10^6$
P , МВт	8	16	24

Сопоставление этих значений с данными табл.7 показывает, что подъемные и генераторные секции в верхней части импеллеров сверхмощных ВВЭУК, переведенные в режим разворачивания (свертывания) установок, способны обеспечить управляемый подъем и снижение без увеличения площади секций. При этом потребляемая при разворачивании (свертывании) мощность не превышает 16 % от установленной мощности ВВЭУК. Понятно, что для усовершенствования процессов разворачивания и свертывания ВВЭУК могут применяться вспомогательные редкие подъемные секции на всем протяжении основных тросов. Однако их применение не является

здесь строго необходимым.

Для ориентации плоскости импеллера и "ленты" тросов относительно направления ветра могут применяться секции ориентации не только в верхней, но в средней и нижней частях импеллера. Для предотвращения паразитных поперечных колебаний тросов трехфазных импеллеров целесообразно применение редких поперечных штанг, о которых говорилось выше. Однако вес этих дополнительных элементов импеллера невелик и в приближенном балансировочном расчете им можно пренебречь, что сделано выше.

Все изложенное дает основание для утверждения, что среди ВЭУК именно ВЭУК, размещаемые в струйных течениях, позволяют решить не простой комплекс проблем, связанных с созданием в ближайшем (обозримом) будущем сверхмощных ветроэнергетических установок с импеллерами на высоте 8...12 км.

Именно такие ВЭУК рекомендуются нами для разработки в первую очередь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Традиционная ветроэнергетика не в состоянии заменить основные отрасли мощной экологически опасной мировой электроэнергетики. Это связано с ограниченностью, распыленностью и нерегулярностью ветрового энергетического потенциала Земли в нижнем слое атмосферы, доступном для обычных ВЭУ.

Технология традиционных ВЭУ достигла высокого уровня и близка к насыщению. При этом проблема построения ВЭУ с импеллерами в верхней тропосфере (на высотах 8...12 км), где сосредоточено 99,9 % ветровой энергии, не имеет (и в обозримом будущем не будет иметь) удовлетворительных решений в классе традиционных ВЭУ. Это определяется прежде всего высокой удельной (приходящейся на единицу мощности) массой ветротурбин, редукторов, электрогенераторов, трансформаторов, а также другими параметрами компонентов и материалов, медленно прогрессирующих в ходе научно-технической эволюции.

Предлагаемая нетрадиционная ветроэнергетика с колебательным рабочим движением импеллеров и волновым (в виде продольных инфранизкочастотных колебаний тросов) способом передачи механической энергии) и многофункциональным применением автоматического управления способна решить фундаментальную проблему создания высотных и приземных ВЭУК. Такая ветроэнергетика в перспективе в состоянии заменить основные экологически опасные виды мощной ветроэнергетики и повысить эффективность наземных ветроэнергетических установок малой и средней мощности. При этом резко возрастет возможность создания автономных и мобильных ВЭУ, особенно важная для государств с большой территорией, содержащей регионы со слабой инфраструктурой, в частности СНГ. Достоинствами ВЭУК служат малая (в 3-20 раз меньшая,

чем у традиционных ВЭУ) удельная масса частей, находящихся в воздухе; возможность создания импеллерами подъемной силы для развертывания, свертывания и висения; высокий коэффициент использования мощности набегающего ветрового потока; высокая прочность ВЭУК и широкий диапазон рабочих скоростей за счет развитых свойств автоматической адаптации и оптимизации режима работы при изменении скорости ветра; меньшая стоимость в сравнении с традиционными ВЭУ равной мощности.

В порядке возрастания суммарного показателя наукоемкости, стоимости, сроков разработки и освоения в серийном производстве ВЭУК могут быть расположены следующим образом: наземные ВЭУК малой и средней (до 100 кВт) мощности; мощные (до 10 МВт) наземные и надводные ВЭУК в районах с высокой среднегодовой и максимальной скоростью ветра; ВЭУК средней и большой мощностью с расположением импеллеров на относительной высоте 200...1000 м; сверхмощные (50...200 МВт) ВЭУК с импеллерами в высотных струйных течениях; сверхмощные (50...100 МВт) ВЭУК с импеллерами вне струйных течений на высоте 6...10 км.

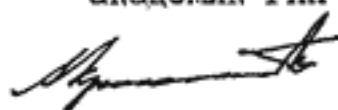
ЛИТЕРАТУРА

1. Perspektiven für die Windenergie. Betrachtungen der europäischen Windenergie in Amsterdam //Windkraft J.1991 N 3.
2. Neue Bau. Genehmigungsrichtlinien des Landes Schleswig-Holstein für Windkraftanlagen. Windkraft J.1991,II, N 4.
3. Описание ветровой обстановки на Северном море для оценки возможности применения ВЭУ (на шельфе).//Реферативный журнал ВИНТИ.90. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. 1993. № 3, реф.3.90.72, с.8.
4. Головная прибрежная ветроустановка в Швеции.//Реферативный журнал ВИНТИ.90. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. 1993. № 5, реф.5.90.43. с.6-7.
5. Отчет по НИР "Обоснование концепций нетрадиционных ВЭУ и соответствующих технологий двойного применения". НО СПУ. Москва. 1992. 189 с.
6. Обоснование возможности создания нетрадиционных высокоэффективных ВЭУ и соответствующих технологий./Отчет по НИР "Ветроэнергетика-I". М.: НО "Системы и процессы управления". 1993.
7. Ветроэнергетика. Под ред.Д.де Резно. Пер.с англ. М.:Энергоатомиздат. 1982.
8. Непорожний П.С., Обрезков В.И. Введение в специальность: гидроэнергетика. М.: Энергоатомиздат. 1990.
9. Энергия ветра: оценки технического и экономического потенциала./Под ред.Яруса. М.: Мир. 1982.
10. Раушенбах Б.В. Герман Оберт. М.: Наука. 1993.

11. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. М.: Энергоатомиздат. 1989.
12. Данилевич Я.Б., Чубарева Л.И. Новые конструкции генераторов и проблемы их создания. С.П.: Наука. 1993.
13. Обзор состояния развития ветроэнергетических установок малой и средней мощности (0,5...40 кВт) за рубежом. Агрегатные конструкторское бюро "Якорь". ОНТИ. 1990.
14. Развитие ветроиспользования в США.// Реферативный журнал ВИНТИ.90 Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Отдельный выпуск. 1994. № 5.
15. Красовский А.А. Синтез автоколебательных систем с применением к ветроэнергетической установке нового класса.//Изв. РАН. Техн.кибернет. 1994. № 4. С.5-18.
16. Плоское послесрывное движение профиля НАСА 0015 при больших скоростях тангажа.//ВИНТИ. Авиастроение. 1992. № 46. С.35-45.
17. Красовский А.А. Струнные передачи механической энергии управления.//Изв.РАН. Техн.кибернет. 1993. № 4. С.3-14.

Вице-президент ИО СТУ

академик РАН



А.А.Красовский

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Введение	I
1. Недостатки традиционных ВЭУК. Классификация ВЭУК .	4
1.1. Недостатки традиционных ВЭУК	4
1.2. Классификация ВЭУК	10
2. Принципы построения и расчетные данные ВЭУК	13
2.1. Наземные ВЭУК	13
2.2. Приземные ВЭУК	27
2.3. Высотные ВЭУК	43
Заключение	57
Литература	59