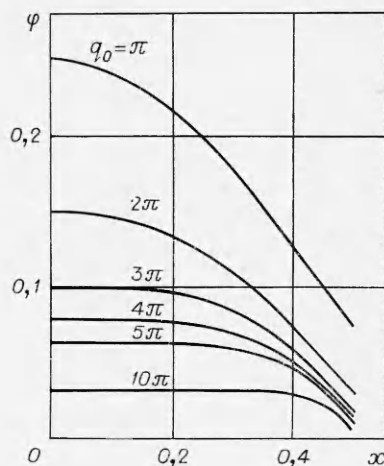


Ф и г. 5



Ф и г. 6

рых достигаются большие значения КПД, данную теорию следует уточнить с учетом влияния объемных сил на структуру поля скоростей.

Наконец, на фиг. 6 изображены функции  $\varphi(x)$ , определяющие, согласно (4.4), оптимальное распределение потенциала на электродах при различных значениях  $q_0$ .

Поступила 17 XII 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Way S. MHD-ship propulsion. ASME, Advance Marine Vehicles Meeting. Norfolk, Virginia, 22—24 May, 1967.
2. Phillips O. M. The prospects for magnetohydrodynamic ship propulsion.— J. ship. research, 1962, vol. 5, N 4.
3. Васильев Л. Г., Хожанов А. И. Магнитная гидродинамика в судовой технике. Л., Судостроение, 1967.
4. Башкатов В. А., Орлов П. П., Федосов М. И. Гидрореактивные пропульсивные установки. Л., Судостроение, 1977.
5. Яковлев В. И. К теории индукционного МГД-двигателя со свободным полем.— ДАН СССР, 1979, т. 229, № 6.
6. Ватажин А. Б., Любимов Г. А., Регирер С. А. Магнитогидродинамические течения в каналах. М., Наука, 1970.

УДК 621.548

### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ИХ СРАВНЕНИЕ С ИСПОЛЬЗУЕМЫМИ

*Б. В. Войцеховский*

(Новосибирск)

В средние века главным источником энергии был ветер. Его энергия использовалась парусным флотом и ветряными мельницами. По данным III Международного симпозиума по возобновляемым источникам энергии

(Турция 1977 г.) в средние века годовая выработка энергии на человека в Европе составляла 200 кВт·ч. Особенно сильно была развита ветроэнергетика в Голландии и Дании.

В настоящее время половина всей мировой энергетики базируется на самом быстроистощаемом невозобновляемом источнике энергии — нефти. При этом кратность запасов нефти (отношение доказанных извлекаемых запасов к годовой добыче) неуклонно падает. Пока эта кратность не приблизилась к величинам порядка 10 и менее, ученые должны найти экономически выгодный эквивалент, желателен из возобновляемых источников, и успеть освоить его в широких масштабах прежде, чем наступит энергетический крах со всеми вытекающими из него народнохозяйственными потрясениями.

На данный исторический период запасы угля практически неисчерпаемы. Однако трудные условия работы в шахтах поддерживают высокий уровень его стоимости.

Себестоимость и базирующаяся на ней отпускная стоимость нефти на мировом рынке в последние годы непрерывно растут. За период с 1970 г. по настоящее время стоимость тонны сырой нефти более чем удесятилась. Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой ТЭС, работающей на газомазутном топливе, равна 0,8—0,9 коп. [1].

Гидроэнергия, удельный вес которой в суммарной установленной мощности всех электростанций Советского Союза составляет 19%, не может рассматриваться как серьезный преемник нефтяных энергетических ресурсов [2]. Себестоимость 1 кВт·ч, снимаемого с ГЭС, равна 0,04 коп. [3].

В настоящее время еще меньший процент в общем энергетическом балансе составляет атомная энергия. Учитывая непрерывно возрастающие требования к чистоте окружающей среды, можно предполагать непрерывный рост стоимости киловатт-часа атомной энергии. Ее нерентабельность в стационарных объектах с годами будет проявляться все в большей степени. Помимо чисто денежного выражения высокой стоимости атомной энергии, ее нерентабельность еще усугубляется тем, что она отвлекает для своего функционирования непропорционально большие высококвалифицированные дефицитные контингенты трудящихся, деятельность которых в других отраслях, испытывающих острую нехватку кадров, могла бы оказаться более полезной для народного хозяйства страны.

В настоящее время в мире изучается возможность использования возобновляемых источников энергии, которые можно разделить на две основные группы.

*I. Используемые органический мир.* 1) Растительные масла в качестве жидкого топлива. По имеющимся сообщениям в прессе, в ЮАР проведены исследования по использованию подсолнечного масла вместо солярки, в Бразилии — по использованию спирта. В крупных масштабах на протяжении многих веков человечество использует органическое топливо в бытовых целях.

*II. Неорганического происхождения.* 1) преобразующие энергию ветра; 2) гелиотепловые источники; 3) фотохимические и биологические преобразователи энергии света в химическую; 4) использующие разницу температур по высоте в воздухе и океане; 5) реализующие кинетическую энергию морских течений; 6) приливные электростанции; 7) электростанции, преобразующие энергию ветровых волн на поверхности жидкости.

Сравнительный анализ показывает, что по технико-экономическим показателям наибольший интерес может представлять ветроэнергетика, которой уделим ниже несколько больше внимания. Необходимо отметить, что М. А. Лаврентьев всегда очень интересовался явлениями сильных вет-

ров в районе Новороссийской боры и считает целесообразным их промышленное использование.

Гелиоустановки остаются пока чрезвычайно дорогостоящими. Например, по сообщениям печати, гелиоустановка мощностью 100—200 кВт стоит 11 млн. долларов. Примечательно, что для гелиоустановок показатель — стоимость 1 кВт мощности близок к 100 тыс. долларов.

Существенным недостатком гелиоисточников, о котором обычно забывают при их обсуждении, является относительно быстрое потускнение отражающих поверхностей, имеющих большую площадь и требующих ручного труда для их очистки. Предлагаемые масштабы прозрачных или отражающих поверхностей в гелиоустановках во много раз превышают размеры остекленных поверхностей заводских корпусов, где остро стоит и пока не разрешена проблема увеличения их прозрачности.

Фотохимические и биологические преобразователи энергии света в химическую обладают теми же недостатками, связанными с быстрым потускнением прозрачных поверхностей. В отдельных случаях существуют дополнительные трудности в реализации. Например, чл.-кор. АН СССР И. В. Березин вместе с руководимым им коллективом развил оригинальный способ получения водорода из воды с помощью водорослей, размещенных в специальном аквариуме. Эти работы показывают, что с квадратного метра можно снимать мощность 24 Вт и при сравнительно небольшой площади акватория в пустыне размером в 100 тыс км<sup>2</sup> такой источник может обеспечить энергией весь Советский Союз [4]. К проблеме прозрачности поверхностей здесь еще добавляется проблема герметизации аквариумов, необходимость их очистки изнутри в среде водорода, а также большая серия других технических задач, трудноразрешимых в крупных масштабах.

Использование разницы температур в различных слоях океана требует развития фантастических по размеру теплообменников вследствие низкого термодинамического КПД. Такие теплообменники, работая в естественных условиях, будут, подобно кораблям, покрываться ракушками, подвергаться коррозии. Их тепловое сопротивление будет быстро расти. В результате стоимость полученной энергии превысит стоимость энергии, получаемой от других источников.

На протяжении последних десятилетий в различных странах появляются проекты использования кинетической энергии морских течений. Например, предложение затормозить течение в Беринговом проливе, превратив его кинетическую энергию в работу. В последнее время ряд изобретателей предложили использовать ответвление Гольфштрема, протекающего мимо берегов Франции. Такие предложения можно отнести к разряду безответственных и при их реализации опасных для климата северного полушария. Морские течения способствуют обмену теплом между тропическими областями и полярными, их затормаживание может привести к катастрофическим последствиям для народов, населяющих умеренные климатические пояса. Замедление течения в Беринговом проливе приведет к необратимым последствиям.

Кое-где используются приливные электростанции. Однако вследствие больших капиталовложений, связанных с их созданием, они не могут рассматриваться как серьезный источник энергии в будущем.

Значительную мощность можно получить от поплавковых электростанций, использующих ветровые волны на поверхности жидкости. Для понимания их принципа действия уместно напомнить работы М. А. Лаврентьева и М. М. Лаврентьева по объяснению плавания ужей и рыб в криволинейном канале, образуемом присоединенной массой воды [5]. Мускулатура животных напрягается таким образом, чтобы вдоль тела в каждой

точке был переменный изгибающий момент. В точках, где кривизна канала по ходу движения животного уменьшается в функции времени, их мускулатура совершает работу по распрямлению, и наоборот, в точках возрастающей кривизны мускулатура животных совершает работу по искривлению тела. По закону сохранения энергии в идеально гладком канале затраченная на разгон работа полностью расходуется на продвижение животного вперед по криволинейному каналу, например, по синусоиде.

Аналогичным образом ведут себя поплавковые электростанции. Представим себе длинный плот, составленный из ряда поплавков, соединенных шарнирами, и вообразим обращенную картину по отношению к плавающей ужу. В данном случае плот, будучи заякорен, остается неподвижным относительно берега, а криволинейный канал, образуемый ветровыми волнами, движется вдоль плота. В отличие от ужа, изгибающегося в горизонтальной плоскости, плот изгибается в вертикальной плоскости. При этом волны, производя принудительный изгиб плота, заставляют поворачиваться поплавки относительно друг друга в шарнирных соединениях с большим крутящим моментом, имеющим величину порядка произведения веса каждого плота на расстояние от его центра тяжести до шарнира. Гидрообъемные насосы, вмонтированные в шарниры, тормозят изгиб плота и преобразуют работу по повороту шарнира в гидростатическую энергию воды, которая дальше на однодисковых высокооборотных турбинах легко превращается в энергию электрического тока.

Поплавковые электростанции могут получить распространение на побережье Дальневосточного края, Камчатки, Сахалина, Курильских островов, где наблюдается стабильность волнового поля с большим изменением кривизны вблизи берегов даже при безветрии.

Из всех возобновляемых источников энергии наибольшей перспективой, на наш взгляд, обладает ветроэнергетика. Не случайно наши предки несколько столетий назад рассматривали этот источник энергии как главный по сравнению с другими.

Оценочные расчеты показывают, что при тщательной отработке конструкции ветряного комплекса стоимость 1 кВт мощности может быть снижена до величины порядка 100—200 р., а стоимость энергии — до 0,1 коп. за 1 кВт·ч.

Площадь ветроколеса должна перекрывать возможно большее поперечное сечение воздушного потока при минимальном весе конструкции. В процессе создания ветроэнергетических комплексов необходимо учитывать один весьма существенный параметр  $\lambda = u_{max}/v$ , где  $u_{max}$  — максимальная скорость урагана, наблюдаемая раз в несколько десятилетий;  $v$  — среднекубическая скорость ветра в течение года.

При прочностном расчете ветряной комплекс должен противостоять  $u_{max}$ , а непрерывно работать приходится при скоростях ветра, в несколько раз меньших  $u_{max}$ . Для Дальневосточного побережья ориентировочная величина  $\lambda = 4-5$ .

Ветряной комплекс должен быть абсолютно устойчивым к случайно набегающим ветровым потокам.

Таким образом, если для ураганного ветра мы потребуем двукратного запаса прочности, то эксплуатационный запас прочности должен достигать величины порядка 50.

Ветроколесо должно быть расположено по ходу ветра позади башни. Во всей создаваемой конструкции в отличие от существующих не должно быть ни единого консольного элемента.

Очень сильно снижают ураганостойчивость флюгеры, обладающие большой парусностью для направления оси ветряного колеса вдоль направления ветра. При создании флюгера конструкторы не учитывают, что

во время урагана не может быть и речи о плоскопараллельном перемещении ветряного потока, особенно вблизи земли. Мощные вихри, уединенные и с вертикальной или криволинейной осью, воздействуя на флюгер, мгновенно его ломают, вращая всю ветряную систему вокруг вертикальной оси.

В целях создания более экономичной конструкции необходимо полностью отказаться от догматических рекомендаций по соотношению между диаметром ветроколеса и высотой вышки (1 : 2) и попыток выставить ветроколесо в ненарушенный ветровой поток.

Диаметр ветроколеса должен выбираться из соображений удобства монтажа с помощью широко распространенных в данное время погрузочных средств. Учитывая размеры поставляемого проката и высоту современных подъемных кранов (высота оси колеса 15 м), в настоящее время диаметр ветроколеса наиболее целесообразно иметь близким к 30 метрам. При этом нижняя точка ветроколеса должна находиться вблизи земли.

Для оценки перспективности развития ветроэнергетики в пределах Сибири и Дальнего Востока необходимо произвести оценочный расчет запасов ветроэнергетической мощности. Главными ветряными районами нужно считать морское побережье, большие равнинные участки тундры и участки стокового ветра [6].

Ветряные комплексы могут располагаться как на берегу, так и на кораблях. С учетом того, что протяженность морских границ восточнее Урала достигает величины порядка 30 000 км и на протяжении 100 км в глубь территории в сторону моря может эффективно использоваться ветровой поток, общая площадь с относительно большим ветром достигает величины 6 млн км<sup>2</sup>. На этой площади средняя кубическая скорость ветра близка к 10 м/с.

Произведем оценку ветряной мощности  $N$ , затрачиваемой на рассматриваемой площади  $S$  для преодоления трения с поверхностью земли, определяемой выражением

$$(1) \quad N = \int_S k \frac{\rho u^3}{2} dS,$$

где  $k$  — коэффициент трения, для естественной шероховатости земли его можно ориентировочно полагать равным 0,01;  $\rho$ ,  $u$  — плотность и скорость воздуха вблизи грунта.

Получаемую мощность нужно усреднить по времени, т. е. вычислить ее среднюю величину в течение года.

Естественно, что вычисление этих интегралов будет производиться тем точнее, чем более мелкими слагаемыми мы их будем аппроксимировать. Грубая оценка без учета множества слагаемых, которые в данный момент в научной литературе отсутствуют, может быть произведена, если вместо выражения (1) считать

$$N = Skv^3/2,$$

где  $S$  — площадь обдуваемой поверхности земли, равная  $6 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup>;  $v$  — среднекубическая скорость ветра, близкая к 10 м/с;  $\rho$  — плотность воздуха. При принятых значениях  $S$ ,  $\rho$  и  $v$   $N = 3 \cdot 10^{10}$  кВт.

Для сравнения укажем, что суммарная мощность всех электростанций Советского Союза несколько превышает 200 млн кВт. Таким образом, запасы ветряной мощности примерно в 150 раз превосходят потребные в настоящее время мощности в электроэнергии и являются, по существу, неисчерпаемыми, а с точки зрения экологии природы идеально чистыми.

При конструировании ветряных комплексов удобно пользоваться выражением, определяющим стоимость 1 кВт·ч:

$$(2) \quad C = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{E_i},$$

где  $E_i$  — энергия, пропущенная через данный узел стоимостью  $C_i$  до его полного разрушения.

Каждое слагаемое в выражении (2) соответствует одному из узлов ветряного комплекса. Эта формула позволяет быстро считать, легко отбрасывать нерентабельные конструктивные решения и сводить стоимость 1 кВт·ч до предельно малых величин. Но наиболее резкий скачок при снижении стоимости достигается при использовании специальных многополюсных кольцевых легких динамомашин, насаживаемых на вал ветроколеса и обеспечивающих благодаря большому диаметру необходимый съем мощности при относительно малой угловой скорости.

Широкое использование тиристорных преобразователей и других полупроводниковых приборов позволит полностью автоматизировать работу ветряных комплексов и передавать вырабатываемую ими электроэнергию непосредственно в электросеть.

Внимание к ветроэнергетике быстро возрастает во всем мире, о чем можно судить по числу патентов, выдаваемых ежегодно на ветросиловые установки. После 1976 г. это число подскочило по сравнению с предыдущими годами в 20—30 раз и удерживается примерно на постоянном уровне.

За рубежом изучается возможность использования в ближайшие два десятилетия ВЭС в качестве дополнительного источника энергии для существующих энергосистем.

Для европейских стран с малой территорией представляет интерес решение использования ветроэнергетики с помощью аэростатов или дирижаблей, находящихся на высоте 10 км, где сильный постоянный ветер позволяет установить ветроэнергетическую установку мощностью 50 МВт. Для передачи энергии на Землю предусматривается два кабеля, связывающих ВУ с наземной подстанцией [7].

В США работы по использованию энергии ветра ведутся по национальной программе. Правительственные ассигнования на ветроэнергетические исследования в 1973 по 1979 г. возросли в 30 раз и в 1979 г. составляют 60 млн. долларов [8].

В исследованиях, проводимых в США, показано, что с учетом многих факторов, в том числе характера Земли, турбулентности атмосферы, коэффициента использования энергии ветра ветродвигателем, КПД ветроэнергетической системы, следует считать, что в ветровую энергию приземного слоя преобразуется 0,7% энергии солнечного излучения и может быть использовано порядка 10% этой величины, что соответствует средней мощности 0,25 Вт/м<sup>2</sup>, или  $N = 1,3 \cdot 10^{14}$  Вт. При принятых допущениях суммарный ветроэнергетический потенциал Земли в 20 раз превышает потребляемую энергию. Эти исследования подтверждают существенное превышение ветроэнергетического потенциала Земли по сравнению с энергетическим потенциалом других возобновляемых источников энергии [9].

В ФРГ, Швеции и ряде других зарубежных стран производятся исследования воз-

Т а б л и ц а 1

Год	Страна	% энергии ВЭУ от общего энергетического потенциала	Литературный источник
1995	США	10—15	[12]
1907	Дания	20—25	[13]

Т а б л и ц а 2

Год	Страна	Вид энергии	Стоимость 1 кВт·ч	Литературный источник
1976	США, залив Св. Лаврентия	ВЭУ $P=200$ кВт дизельная	2,49 цента/кВт·ч 5,25 цента/кВт·ч	[14]
1957	Дания	ВЭУ $P=200$ кВт	1 кВт·ч ВЭУ на 20% дешевле, чем вырабатываемый ТЭЦ	[15]
1977	США	ВЭУ <sup>1</sup> $P=1500$ кВт ЭС	1,65—2,02 цента/кВт·ч 1—5 цента/кВт·ч	[16]
1977	СССР	ОЭС Сибири	1,5—0,5 коп/кВт·ч	[17]

возможности использования энергии ветра и определяют оптимальные технико-экономические характеристики ВУ. На этом основании прогнозируется снижение стоимости мощности ВУ до 400 долларов на 1 кВт мощности, что соизмеримо с удельной стоимостью ТЭС и АЭС [10].

В Японии создана ВУ NU-101, удовлетворительно работающая на антарктической станции Syowa при скоростях ветра 50 м/с [11]. В табл. 1, 2 приведены некоторые характеристики ветроэнергетических установок и их связь с другими источниками энергии.

Таким образом, ветровая энергия станет наиболее дешевым видом энергии по сравнению со всеми другими видами энергии, называемыми сейчас первичными (нефть, газ, уголь).

Поступила 27 III 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Непорожный П. С. Проблемы и перспективы научно-технического прогресса теплоэнергетики. Теплоэнергетика, 1973, № 1.
2. Бабурин Б. Л. Гидроэнергетика СССР и направления ее развития.— В кн.: Перспективы гидроэнергетического и водохоз. строительства и технико-экономические вопросы проектирования и исследования в области гидроэнергетики. М., 1979.
3. Гидроэнергетические ресурсы СССР. М., Наука, 1967.
4. Ощепков П. П., Красновский А. А. Фотообразование молекулярного водорода зелеными водорослями.— Изв. АН СССР. Сер. биологическая, 1976, № 1.
5. Лаврентьев М. А., Лаврентьев М. М. Об одном принципе создания тяговой силы при движении.— ПМТФ, 1962, № 4.
6. Русин Н. П. Континент за облаками. М., Советская Россия, 1959.
7. Hübner Roland. Развитие мировой ветроэнергетики. РЖ. Сер. Электротехника и энергетика. 9Д206, 1979, № 9.
8. Divone L. Ветроэнергетические разработки в США. РЖ. Сер. Электротехника и энергетика. 5Д174, 1979, № 5.
9. Gustavson M. R. Ветроэнергетические ресурсы. РЖ. Сер. Электротехника и энергетика. Гидроэнергетика. 10Д232, 1979, № 10.
10. Köhler Horst W. Ветер как источник электроэнергии. РЖ. Сер. электротехника и энергетика. Гидроэнергетика. 4Д201, 1977, № 4.
11. Awano Seiiti, Murayama Masayoshi, Takeuchi Sadao. Ветроэлектроустановка мощностью 2 кВт для антарктических станций. Япония. РЖ. Сер. Электротехника и энергетика. Гидротехника. 7Д242, 1977, № 7.
12. Bain Donald. Прогноз развития ветроэнергетики США. 3Д232, 1979, № 3, сер. 21 Д.
13. Qlgaard P. L. Количество ветроустановок в Дании с 1900 г. по 1950 г. 10Д239, 1979, № 10, сер. 21 Д.
14. Mc. Connel R. D., Vansant J. H., Fortin M., Piché B. Экспериментальная ветроустановка с вертикальной осью. Канада. 10Д211, 1977, № 10, сер. 21 Д.

15. Urmalis Alberts. Использование энергии ветра. ЗД253, 1977, № 3, сер. 21 Д.
16. Melargno Michele. Разработка мощных ветроэлектростанций в США. 8Д186, 1977, № 8, сер. 21 Д.
17. Справочник по проектированию электро-энергетических систем. М., Энергия, 1977.

УДК 538.4

### МК-ГЕНЕРАТОРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕХОДА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МАТЕРИАЛА В ПРОВОДЯЩЕЕ СОСТОЯНИЕ

*Е. И. Биченков, С. Д. Гилев, А. М. Трубачев*  
(Новосибирск)

В настоящее время известен ряд взрывных генераторов, предназначенных для получения мощных импульсов электрического тока и сильных магнитных полей [1—6]. В этих устройствах энергия ВВ преобразуется в электромагнитную энергию с помощью проводников, движущихся в магнитном поле. Так, в МК-генераторах роль движущихся проводников выполняют металлические части электрического контура, а во взрывных МГД-генераторах — высокоскоростной поток проводящих продуктов взрыва.

В [7] предложен отличный от указанных способ формирования движущегося проводника. Для этого используется материал, имеющий в области разумных давлений фазовый переход полупроводник — металл. При прохождении ударной волны по такому материалу за ее фронтом образуется проводящий слой. Если ударная волна распространяется поперек магнитного поля, то в слое будет возбуждаться ЭДС индукции, что при замкнутой конфигурации ударных волн и ограничивающих проводников может приводить к захвату магнитного потока и его кумуляции.

В данной работе приводятся экспериментальные результаты испытания генераторов на кремнии, а также некоторые оценки их параметров, выполненные в рамках электротехнической модели.

1. Эксперименты проводились с генераторами плоской и коаксиальной конструкций. В качестве рабочего вещества был выбран кремний марки КП-1 в виде порошка с размером зерен 0,1—0,15 мм. Давление фазового перехода кристаллического кремния определено в [8] из статических экспериментов и составляет около 120 кбар, причем проводимость кремния в металлической фазе близка к проводимости обычных металлов.

Схема коаксиального генератора приведена на фиг. 1. Генератор изготовлен из медных трубок, сваренных на одном из концов друг с другом. Эта часть генератора длиной 10 мм служит нагрузкой, где устанавливается индуктивный датчик для измерения тока в генераторе. Длина рабочей части генератора равна 300 мм. Диаметр внешней трубки 30 мм, толщина стенки 2 мм, диаметр внутренней трубки 18 мм, толщина стенки 1,5 мм. Пространство между трубками заполняется кремнием, который уплотняется трамбовкой. Заряд ВВ ТГ50/50 заливается во внутреннюю трубку.

Начальный ток в генераторе создавался разрядом конденсаторной батареи. В момент максимума начального тока заряд ВВ инициировался в точке, противоположной нагрузке. С выходом ударной волны в кремний в нем формируется проводящий слой, который замыкает шины генера-