

К.А.Аяпбергенов, А.Р.Галиева

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

О ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ, В ЧАСТНОСТИ О ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ И КПД ИДЕАЛЬНОГО ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ

Мақалада жел энергетикасына ерекше назар аударылады, жел энергиясын тиімді пайдалану экологиялық проблеманы табысты шешетін кілт болып табылады. Бұл міндетті тәжірибелік іске асыру көмірді, мұнайды және газды айтарлықтай үнемдеуге және атмосфераға зиянды заттардың және парник газдардың шығуын, жер асты байлығының шығынын ықшамдауға мүмкіндік береді.

In this paper special attention is paid to wind energy. Effective use of wind energy is the key to successful solution of the ecological problem. Practical accomplishment of this task allows to save significantly the coal, oil and gas; it will decrease allocation of harmful wastes and hotbed gases; and emptying the Earth's terrestrial bowels.

На химическом факультете КарГУ им. академика Е.А.Букетова согласно учебной программе (в объеме двух кредитов) систематически читаются лекции по курсу «Энергетические ресурсы. Источники энергии и способы ее получения». Преследуемая при этом главная цель — ознакомление студентов с видами энергии, топливными и нетопливными энергоресурсами, с понятиями «энергетические ресурсы» и «энергетика», с источниками возобновляемой энергии (энергия воды, ветра, солнца, волн, морских приливов и отливов, геотермальная энергия и т.д.), с цепными реакциями и со способами получения с их помощью энергии. Фатальная необходимость в этом сегодня назрела, о чем свидетельствуют следующие факты.

Мировое потребление энергии с 1950 г. выросло примерно в четыре раза. Имеется прогноз, согласно которому к 2060 г. потребность в энергии возрастет еще в три раза. Традиционные горючие топлива, такие как уголь, лигниты, нефть, газ, горючие сланцы, торф, а также ^{235}U , смогут удовлетворять потребности человечества на 50 %. При использовании первых, которые на грани истощения, к 2000 г. выброшено в атмосферу около $24 \cdot 10^9$ тонн CO_2 . Известный казахстанский эколог полагает, что запасы наших подземных богатств — нефти, газа и даже угля — могут заметно уменьшиться до опасного предела в ближайшие 20–30 лет. Большинство ученых, работающих в этой области, сходятся во мнении, что объем потребляемой энергии обгоняет рост населения, особенно быстро сокращается запас нефти и газа.

По прогнозным оценкам ученых, вовлечение урана в топливно-энергетический баланс значительно улучшает его, но не предотвращает топливный голод в будущем. И реакторы, работающие на тепловых и быстрых нейтронах, также не смогут внести значительный вклад в утоление энергетического голода мира.

При такой обстановке возникает вопрос: какими путями и средствами можно предотвратить надвигающийся энергетический кризис и сохранить атмосферный воздух в экологически чистом виде?

Известно, что слияние легких ядер в тяжелые сопровождается выделением колоссального количества энергии — при синтезе одного грамма ^4He из водорода получается столько же энергии, как при сгорании 25 тонн самого лучшего угля (антрацита).

Запасы дейтерия в мировом океане таковы, что их хватит на миллиарды лет, даже при многократном увеличении производства энергии, а тритий получается, например, искусственным путем как продукт реакции $^2\text{H}(d, p)^3\text{H}$ или $^6\text{Li}(n, ^4\text{He})^3\text{H}$ [1]. Считалось, что к началу XXI в. обычные источники энергии в мире будут исчерпаны (по прогнозу Комиссии по атомной энергии США), а потому все надежды возлагались на атомную энергетику. По оценкам некоторых специалистов, в морской воде содержится около $5 \cdot 10^9$ тонн природного урана. Однако, как потом выяснилось, его удельная концентрация настолько мала, что для извлечения только одной тонны урана необходимо пропустить через установки, добывающие таким путем уран, $3 \cdot 10^{11}$ км³ морской воды — это явно неэффективно.

Реакторы на быстрых нейтронах позволяют расширить топливную базу ядерной энергетики в 30–40 раз, благодаря превращению урана ^{238}U в новые делящиеся вещества — плутоний $^{239}_{94}\text{Pu}$,

торий ${}^{232}_{90}\text{Th}$ или в ${}^{233}\text{U}$ [1]. Здесь следует учесть, что природный уран является невозобновляемым источником энергии.

После самой крупной в мире аварии в апреле 1986 г. на Чернобыльской АЭС почти во всех странах, обладающих атомным потенциалом, значительно снизился (притормознулся) темп развития атомной энергетики и строительства атомных электростанций в Германии, США, во Франции и т.д.

Нельзя было не учитывать оппозицию общественного мнения, например, которая, считая, без достаточных оснований, реакторы-размножители более опасными, чем обычные реакторы на тепловых нейтронах, особенно активно препятствует их созданию и эксплуатации. По этим причинам сроки широкого внедрения реакторов-бридеров в атомную энергетику все время отодвигались.

Известно, что если удастся осуществить термоядерную реакцию $\text{D} + \text{D}$ или $\text{D} + \text{D} \rightarrow {}^4\text{He}$, то выделяется колоссальная энергия, и тем самым открылся бы для человечества практически неисчерпаемый источник энергии. С помощью реакции $\text{D}-\text{D}$ можно было бы производить энергии в 10^8 раз больше, чем все запасы органического топлива. Будто бы этому благоприятствует (способствует) и тот факт, что запасы дейтерия в обычной воде огромны — из каждых 6500 молекул обычной воды можно извлечь одну молекулу дейтерия. Несмотря на это, такая реакция пока неосуществима: вероятность ее реализации лимитируется требованием (критерием) Лоусона, а именно эта трудность связана с созданием необходимой для этой реакции весьма высокой температуры очень горячей (высокотемпературной) плазмы, которой не выдерживает ни российская лазерная установка «Дельфин», ни японская «Секко XII» и ни американская «Шива», тем более «Токамак» П.А. Арцимовича.

Плюс ко всему этому (перечисленному выше) хищническое разграбление земных богатств и то, что многие страны живут сиюминутными интересами, т.е. расходуют бездумно подаренные им природой нефтяные запасы и запасы газа, иссякание запасов последних (и угля), участвовавшее в последнее время периодическое неблагоприятное колебание их цен и ужесточение (усиление) с каждым годом борьбы за сохранение и защиту окружающей среды заставляют человечество задуматься над возможностями эффективной эксплуатации (использования) и других новых теплотворных возобновляемых источников энергии.

В настоящей работе особое внимание уделяется ветроэнергетике.

Эффективное использование энергии ветра — ключ к успешному решению экологической проблемы, поэтому подобная постановка вопроса является актуальной. Практическое осуществление этой задачи позволит значительно сэкономить уголь, нефть и газ и сократит выбросы в атмосферу вредных веществ и парниковых газов, замедлит опустошение земных недр.

За рубежом ветровая энергия начала всерьез развиваться после нефтяного кризиса середины 70-х годов XX в., за исключением того частного случая, когда в Дании в течение Второй мировой войны ветровые электростанции выработали 10 млн. кВт·ч энергии, что составляло половину всей произведенной за это время в стране электроэнергии. А ныне в Дании около 20 % электроэнергии вырабатывается из энергии ветра. В 2006 г. суммарные мощности ветряной энергетики выросли во всем мире до 73904 МВт. Фирма «Боинг» работает над созданием ветроагрегата мощностью 7 МВт. Запасы ветра более чем в сто раз превышает запасы гидроэнергии всех рек планеты. Ветроэнергетика сегодня является самой быстрорастущей отраслью среди альтернативных источников энергии. Причина этого кроется в том, что КПД современных ветродвигателей очень высок по сравнению с КПД (около 25 %) солнечных фотоэлектрореобразователей, в основе которых лежат легированные полупроводниковые кристаллы *n*- и (кремния и германия) *p*-проводимостью. В настоящее время для нашей республики очень актуальна проблема эффективного использования энергии как необходимого условия экономического и социального развития, а также улучшения состояния окружающей среды. Использование последних достижений мирового научно-технического прогресса будет способствовать также решению проблемы охраны окружающей среды. В настоящее время острой экологической проблемой в нашей стране является загрязнение атмосферного воздуха, водных ресурсов, накопление опасных токсичных отходов. Электростанции, работающие на твердом топливе, являются одним из основных источников загрязнения воздуха, воды, почвы. Решение основных проблем в области экологии и охраны окружающей среды возможно лишь за счет внедрения перспективных технологий сжигания углей при минимальных выбросах в атмосферу оксидов азота и серы. Территория нашей республики особенно богата ветроэнергией: учет общего кадастра ветровой энергии по СНГ (сюда входит и Казахстан) показывает, что потенциальные возможности равны примерно 11 млрд. кВт, что в 55 раз больше мощности всех электростанций на начало 1976 г. Территория Казахстана богата ветрами разной силы и скорости, о чем свидетельствуют данные таблицы 1 [2].

Ветры на территории Казахстана

Название ветра	Местность проявления	Средняя скорость, м/с	Средняя продолжительность, сутки в году
Эби	Жунгарский Алатау	60–80, может быть и выше	70–100
Сайкан	Хребет Сайкан, дует в сторону Эби-Нур (Китай)	50–60	2–3
Чиликский	Дует с истока реки Чилик в Илийскую долину	8–10	365
Арыстанды-Карабасский	Дует вдоль реки Арыстанды, Каратауский хребет	35	–
Курдайский	Курдайский перевал, юго-восток Жамбылской области	40	55
Мугоджарский	Район Мугоджарских гор. Наблюдается в Актюбинской, Атрауской, Мангистауской областях	50	–
Арало-Балхашский	Северная часть Арало-Балхашской широты	4	–

Энергетический запас этих ветров 1 млрд. кВт.

В соответствии с проектом программы развития ООН и правительства Казахстана «Казахстан — инициатива развития рынка ветроэнергетики» должны вестись в будущем строительства ветроэлектростанций (ВЭС) в следующих районах указанных ниже областей [2].

Перечень перспективных площадок для строительства ВЭС

№	Наименование площадки	Область	Средняя скорость ветра на выс. 10 м, м/с	Рекомендуемая мощность ВЭС, МВт (в скобках первая очередь)	Примечание
1	Жарминская	ВКО	5,6	40	
2	Ерейментау	Акмолинская	5,4	35 (20)	*
3	Селетинская	Акмолинская	5,9	40 (20)	
4	Балхаш	Карагандинская	4,4	10	
5	Егиндыбулак	Карагандинская			
6	Каркаралинск	Карагандинская	4,3	10	*
7	Аркалык	Кустанайская	5,7	10	*
8	Сакрыл	ЗКО	5,2	10	
9	Атырау-Каработан	Атырауская	4,4	40	*
10	Аккистау	Атырауская	5,5	50 (20)	
11	Индер	Атырауская	5,4	20	
12	Прорва	Атырауская	6,2	40 (20)	
13	Форт-Шевченко	Мангистауская	6	40 (20)	*
14	Сай-Утес	Мангистауская			
15	Кордай	Жамбылская	5,1	20 (10)	*
16	Аральск	Кзылординская	4,9	10	
17	Кармакчинская	Кзылординская	5,5	20 (10)	
18	Чаян	ЮКО	5	40 (20)	*
19	Састобе	ЮКО			
20	Джунгарские ворота	Алматинская	7,8	50	**
21	Шелекский коридор	Алматинская	5,8	100	**

* — Проводятся исследования ветропотенциала.

** — Имеются данные по ветропотенциалу.

Теперь несколько слов относительно коэффициента полезного действия (КПД) ветродвигателя. Известно, что преимущество и ценность ветродвигателя определяются КПД и себестоимостью каждого кВт, вырабатываемого данным ветряком. Теорию ветродвигателя еще в начале XX в. разработал известный русский ученый, отец русской авиации Н.Е.Жуковский. Для описания исследуемого им

явления, связанного с прохождением потока воздуха через ветроколесо, он применил теорию подъемной силы крыла самолета и определил значение максимально возможного, т.е. идеального коэффициента полезного действия ветряка. Согласно его расчету, значение КПД равно 16/27, или 59,26 % (в оригинале вывод этой формулы занимает около 5–6 страниц) [3].

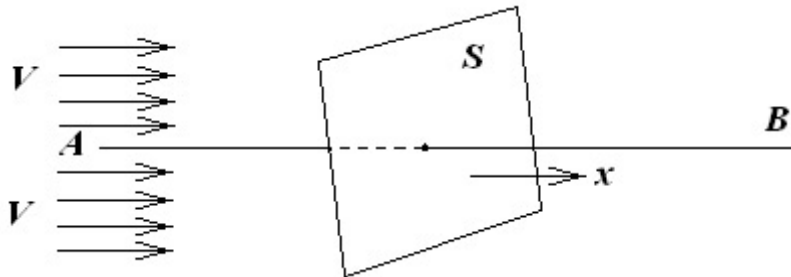


Рис. 1. Пластика, испытывающая давление потока воздуха

В настоящей работе для получения такого же результата использован другой подход (рис. 1). Ветер дует со скоростью v в перпендикулярном направлении к четырехугольной пластинке, имеющей площадь S . Если пластинка находится в состоянии покоя (когда скорость перемещения ее по ветру $x = 0$), то она испытывает аэродинамическое давление (наветренная сторона) ρv^2 , либо при соударении потока воздуха с пластинкой последняя испытывает аэродинамическое давление $\rho v^2/2$, а при отскакивании от нее также оказывает такое же давление ($\rho v^2/2$). Эту величину давления (ρv^2) можно рассматривать как плотность кинетической энергии движущейся воздушной массы, имеющей плотность ρ . За пластинкой (подветренная сторона) происходит разрежение воздуха и в результате этого давление уменьшается. По закону сохранения энергии аэродинамическое давление уменьшится на ту величину, на сколько увеличится оно перед пластинкой, т.е. на величину ρv^2 . Тогда, если считать атмосферное давление равным P_0 , то перед пластинкой давление будет равно $P_0 + \rho v^2$, а за пластинкой — $(P_0 - \rho v^2)$, а разность давлений, действующая на пластинку и могущая приводить ее в движение, будет равна $\Delta P_0 = P_0 + \rho v^2 - (P_0 - \rho v^2) = 2\rho v^2$. При перемещении пластинки в направлении вектора \overline{AB} со скоростью x эта разность давлений будет равна $\Delta P = 2\rho(v - x)^2$. А сила, действующая на всю пластинку, равна $F = \Delta P S$, и мощность $N = Fx = 2\rho(v - x)^2 x$. Это полезная мощность, а полная мощность напора воздуха (ветра), проходящего через площадь S перпендикулярно (если пластинки не было бы), равна $N_{\text{полн}} = \frac{\rho v^2}{2} S v = \frac{1}{2} \rho v^3 S$. Коэффициент полезного действия согласно его определению равен $\eta = \frac{N}{N_{\text{полн}}} = \frac{4(v - x)^2 x}{v^2 v} = 4 \left(1 - \frac{x}{v}\right)^2 \frac{x}{v} = 4(1 - y)^2 y$, где $y = \frac{x}{v}$.

С тем чтобы найти максимальное значение КПД (η), первую производную от η по y приравняем к нулю:

$$\frac{d\eta}{dy} = 4[(1 - y^2) \cdot 1 + 2(1 - y) \cdot (-1) \cdot y] = 4(1 - y)(1 - y - 2y) = 4(1 - y)(1 - 3y) = 0,$$

откуда $y = 1$ и $y = \frac{1}{3}$ или $x = v$ и $x = \frac{v}{3}$.

Как видно, при $x = v$ $N = 0$ и при $x = \frac{v}{3}$ мощность имеет максимальное значение.

Тогда $\eta_{\text{max}} = 4(1 - y)^2 y = 4(1 - \frac{1}{3})^2 \frac{1}{3} = \frac{16}{27} = 0,5926$ или $\eta_{\text{max}} = 59,26\%$, что совпадает с КПД Жу-

ковского.

Вообще-то значение КПД ветродвигателя зависит от геометрической формы его рабочей части. Например, профессор Г.Х.Сабинин, работавший в области ветроэнергетики, утверждал, что КПД

ветряка может равняться 68,7 % (существенно отличается от КПД Жуковского). Одним из соавторов настоящей статьи получен патент на изобретение ветродвигателя нового типа с высоким КПД [4]. Им использовано в качестве рабочей части несколько пар соединенных друг с другом под прямым углом пластин (число таких пар обозначено буквой n). Число лопастей, на каждой из которых перпендикулярно устанавливается n пар пластин, обозначается буквой n_0 и равняется (по желанию) 2, 3, 4, 5, 6, 7, ..., 12, ..., 24, ... Ниже на рисунке изображена упрощенная двухлопастная модель рабочей части, состоящая из трех соединенных друг с другом под прямым углом пластинок, каждая из которых представляет собой квадрат со стороной a , т.е. $AB = BC = CD = DE = \dots = PQ = QA = A_1B_1 = B_1C_1 = C_1D_1 = \dots = P_1Q_1 = Q_1A_1 = a$. Такая модель рассматривается, чтобы упростить вычислительную процедуру.

Рассмотрим судьбу одной пластинки, например, пластинки $QABCQ$ или $FPDEF$, на каждую из которых поток воздуха падает нормально (\perp). Если набор этих пластинок перемещается (вращается) с линейной скоростью $x = \left(OO_1 + \frac{a}{2} \right) \omega$ (ω — циклическая частота вращения) в указанном на рисунке направлении, то так же, как это разобрано выше, на пластинку $QCDPQ$ оказывается аэродинамическое давление, равное $2\rho(v^2 - x^2) = \Delta P$, где v — скорость ветра в данный момент времени, ρ — плотность воздуха и $2\rho x^2$ — давление, испытываемое вертикально расположенной (по направлению ветра) пластинкой $QCDPQ$ со стороны покоящегося атмосферного воздуха.

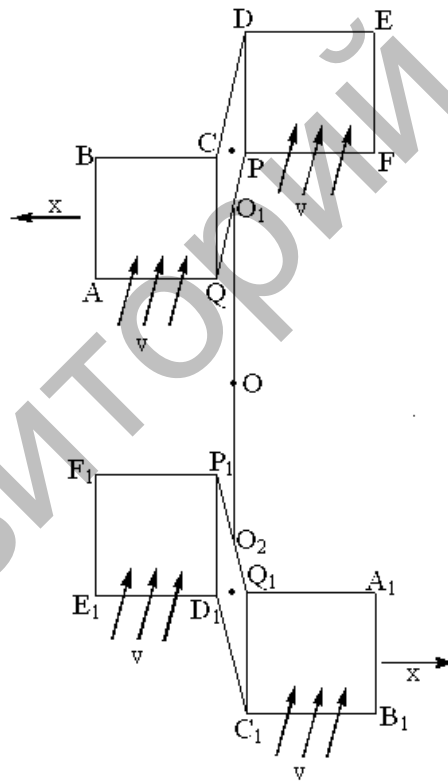


Рис. 2. Модель простого ветряка, состоящая из двух пар пластинок, в каждую из которых входят три пластинки

Сила, действующая на пластику $QCDPQ$ и создающая момент вращения, равна $F = 2\rho(v^2 - x^2)a^2$, а мощность ее $N = 2\rho(v^2 - x^2)xa^2$. Если взято не три, а n пар пластинок, тогда их общая площадь $S = (n+1)S_{ABCQA} + nS_{QCDPQ} = 2na^2 + a^2$.

Тогда полная мощность потока воздуха (ветра), проходящего через эту площадь без преград, будет равна $N_{полн} = \frac{\rho v^2}{2} (2na^2 + a^2)$.

Отсюда имеем формулу и для КПД ветродвигателя данного типа:

$$\eta = \frac{2\rho(v^2 - x^2)xn a^2}{\frac{\rho v^3}{2}(2na^2 + a^2)} = 4 \frac{\left[1 - \left(\frac{x}{v}\right)^2\right] \cdot \frac{x}{v}}{2 + \frac{1}{n}}.$$

Если $n \rightarrow \infty$, т.е. когда берем как можно больше таких пар пластинок (пластин), η примет следующий вид:

$$\eta = 2(1 - y^2)y = 2(y - y^3), \text{ где } y = \frac{x}{v}.$$

Отсюда и определяется максимальное значение η_{\max} (КПД)

$$\frac{d\eta}{dy} = 2(1 - 3y^2) = 0, \text{ или } y = \frac{1}{\sqrt{3}}, \text{ или } x = \frac{v}{\sqrt{3}}.$$

Итак, $\eta_{\max} = 2\left(1 - \frac{1}{3}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \approx 0,77515$ или 77,52 %.

Как отмечалось выше, ныне уделяется особое внимание практическому использованию возобновляемых источников энергии, о чем свидетельствует следующее. В статье Ю.Кубайчука, депутата Сената Парламента [5], говорится, что «на сегодняшний день действующее законодательство в области электроэнергетики не располагает механизмами поддержки для преодоления инвестиционной непривлекательности возобновляемой энергетики... Следует вспомнить о Национальной программе развития ветроэнергетики, рассчитанной на 2007–2015 годы с перспективой до 2024 года. Она подготовлена Министерством энергетики и минеральных ресурсов и будет принята после подписания обсуждаемого сегодня в стенах Парламента законопроекта. ... Местные исполнительные органы будут разрабатывать региональные программы развития с учетом использования возобновляемых источников энергии. ... При всех этих неоспоримых достоинствах все же считаю, что проектом закона не достигнута главная цель — вовлечение в энергобаланс страны чистой энергии. Также не затронуты вопросы экологии, сохранения и улучшения окружающей среды. Этот законопроект создает первоначальные основы для развития в нашей стране возобновляемых источников энергии».

Следует отметить, что содержание статьи депутата Сената Парламента полностью соответствует духу Киотского протокола и международным обязательствам Казахстана, ориентированным на снижение выбросов парниковых и других вредных газов. Ныне, при настигающем нас энергетическом кризисе, только государственный подход к делу позволит решить проблему на должном уровне.

Закон Республики Казахстан «О поддержке использования возобновляемых источников энергии» подписан 4 июля 2009 г. Президентом Республики Н.А.Назарбаевым. Настоящий Закон несомненно придает новый толчок оживлению исследовательских и рационализаторских поисков в области практического использования возобновляемых источников.

Большая перспектива в будущем, когда иссякнут запасы газа, нефти, угля, урана и т.д., принадлежит энергии солнца (однако КПД солнечных фотоэлектрореобразователей пока очень низок), энергии ветра, геотермальной энергии.

Список литературы

1. Стрикович М.А., Шпильрайн Э.Э. Энергетика. Проблемы и перспективы. — М.: Энергия, 1981. — С. 171–191.
2. Чистякова Г.Н., Сарпеков М.Б. Характеристика природных условий для развития ветроэнергетики в Казахстане. — Караганда, 2008.
3. БСЭ. — Т. 16. — М.: 2^{ое} изд-во «Большая Советская Энциклопедия», 1952. — С. 227–229.
4. Аяпбергенов Қ. Жел күшінен қозғалғыш. — Патент № 381. 28.05.2008.
5. Кубайчук Ю. Энергия ветра в строке Закона. Государство должно поддержать альтернативную электроэнергетику // Индустр. Караганда. — 2009. — 25 июня.