УДК 621.311.245(045)

В. М. Синеглазов, д-р техн. наук, проф.,
С. С. Алёшкин,
А. В. Кульбака

АНАЛИЗ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Институт аэрокосмических систем управления НАУ, e-mail: svm@nau.edu.ua

Выполнен анализ ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения. Оценены выходные параметры известных ветроустановок по геометрическим размерам их ротора вращения.

Ключевые слова: ротор с вертикальной осью вращения, выходные параметры, метод перебора.

Введение. В настоящее время энергопотребление возрастает очень быстро. Например, по данным [1] потребление энергии в 1975 г. на душу населения возросло в четыре раза по сравнению с началом двадцатого века. При этом суммарное энергопотребление удваивалось каждые 20 лет. Этот факт объясняется резким ростом населения Земли за указанный временной отрезок – почти на 75 %. До 70-х годов XX ст. более 90 % потребляемых энергоресурсов составили невозобновляемые источники энергии (нефть, газ, уголь и т. д.) и только 10 % – возобновляемые (в основном гидроэнергия). При сохранении темпов роста энергопотребления к XXII ст. возможно полное исчерпание ископаемых запасов органического топлива и не только уже разведанных, но и прогнозируемых. Тем не менее, дешевизна и сравнительно несложная техника добычи ископаемого топлива (особенно в районе Персидского залива) обусловила ситуацию, когда использование возобновляемых источников энергии (солнце, ветер и др.) было невыгодным в экономическом отношении [1]. Однако, по мнению многих экспертов, производство энергии на базе возобновляемых источников ведет к загрязнению окружающей среды твердыми частицами, перегрева поверхности Земли, образование большого количества углекислого газа, что грозит глобальными нарушениями природной теплового равновесия со всеми вытекающими последствиями для климата и жизни на планете. По данным отчета Института технической теплофизики НАН Украины, при существующем в настоящее время уровне потребления энергии мировые запасы нефти будут исчерпаны в течение 35 лет, запасы угля – за несколько больший срок, однако следует учесть, что, например, в Украине добыча 1 млн т угля стоит жизни четырех шахтеров. К тому же человечеством используется на прямые нужды 2 % добываемых ресурсов, остальные 98 % идут на производство средств производства и отходы. Что же касается атомной энергетики, то ее преимущества связаны с необходимостью переработки и захоронения отработанного топлива, а также с опасностью аварий, которые могут приводить не только к сиюминутным разрушениям станций и гибели людей, но и к длительному (в течение десятков лет) воздействию радиации на прилегающей к станции территории. Так, в случае Чернобыльской АЭС эта зона условно ограничена радиусом тридцать километров.

Названные факторы стимулировали в конце XX ст. в экономически развитых странах (Дании, Голландии, США, Франции) широкомасштабные разработки способов получения энергии от возобновляемых источников, таких, как солнце, ветер, биомасса, геотермальные воды и т. д. В настоящее время независимо энергетические программы названных и многих других стран содержат два основных подхода, направленные на улучшение обеспечения энергией [2]:

1) развитие энергетики на возобновляемых источниках энергии;
2) повышение эффективности использования энергии.

Одним из наиболее перспективных среди возобновляемых источников энергии является ветровая энергия. По данным работы [3] теоретическая величина ветроэнергетического потенциала атмосферы составляет 1012 кВт, а по данным издания «Курьер ЮНЕСКО» за 08.1981 г. для приземного слоя высотой до 100 м – 0,7 · 1012 кВт (в том числе, над сушей 4 · 1010 кВт). Пригодная с точки зрения рентабельности величина ветропотенциала будет несколько меньше теоретической. Для сравнения – гидроэнергетический потенциал всего мира составляет 1010 кВт, в том числе экономически доступный – 1,5 · 109 кВт.

Следует отметить, что существующие процессы диссипации энергии в атмосферных течениях полностью устранить невозможно, однако утилизация с помощью соответствующих устройств (ветроустановок) только 1 % энергии даст человечеству по расчетам [3] около 3 · 1010 кВт или 2,6 · 1014 кВт·ч. Согласно тому же источнику при достижении человечеством численности восемь миллиардов ему необходимо 1,6 · 1014 кВт·ч при условии энергопотребления на душу населения вдвое больше по сравнению с расходованием энергии в наиболее енергооснащенних странах в 1985 г (в США, например, суммарное энергопотребление в упомянутом году составила 104 кВт·ч). Таким образом, анализ показывает, что благодаря таким принципиальным особенностям, как отсутствие необходимости ориентации на ветер, работа с переменной скоростью вращения, нижнее расположение генератора и мультипликатора, самозапуск ротора при любом направлении ветра, отсутствие поворота лопастей, постоянство сечения лопастей по длине, тихоходность, минимальное воздействие на окружающую среду, вертикально-осевые (ВО) ветроэнергетические установки (ВЭУ) выгодно отличаются от традиционных горизонтально-осевых (ГО) ВЭУ по таким характеристикам, как эффективность, простота конструкции, надежность, экологическая чистота, удобство технического обслуживания и ремонта [4].

Классификация ВО установок. По принципу действия ВО ВЭУ можно разделить на две группы [4], в которых для создания момента вращения используются:

– различие в сопротивлении лопастей при их движении по ветру и против ветра;

– подъемная сила лопастей.

К первой группе относятся:

1) ротор пластинчатый (рис. 1, *а*);

2) ротор чашечный (рис. 1, *б*);

3) ветротурбина Лафонда (рис. 1, *в*);

4) ротор Савониуса замкнутый (рис. 1, *г*), щелевой (рис. 1, *д*);

5) ротор Савониуса с диффузором (рис. 1, *е*).

Ветроагрегаты такого типа обладают большим начальным крутящим моментом, но меньшей быстроходностью и мощностью по сравнению с ГО ВЭУ пропеллерного типа.

Ко второй группе относятся:

1) ротор Дарье Ф-образный с замкнутыми лопастями (рис. 2, *а*);

2) ротор Дарье Δ-образный с наклонными лопастями (рис. 2, *б*);

3) ротор Дарье *Н*-образный с прямыми лопастями (рис. 2, *в*);

4) ротор Дарье *V*-образный с наклонными лопастями (рис. 2, *г*);

5) ротор Дарье с изменяемым углом установки лопасти (рис. 2, *д*);

6) ротор Дарье с гибкими лопастями (рис. 2, *е*).

Эти турбины способны преобразовывать подъемную силу в положительный момент вращения, если их лопасти движутся довольно быстро по сравнению с набегающим потоком. Именно роторы Дарье составляют реальную конкуренцию ГО ВЭУ пропеллерного типа.

1. Ротор Савониуса. Из существующих типов роторов Савониуса наиболее распространенными являются замкнутые (рис. 1, *г*) и щелевые (рис. 1, *д*) с двумя и тремя лопастями. Роторы Савониуса состоят из двух или трех полуцилиндров.

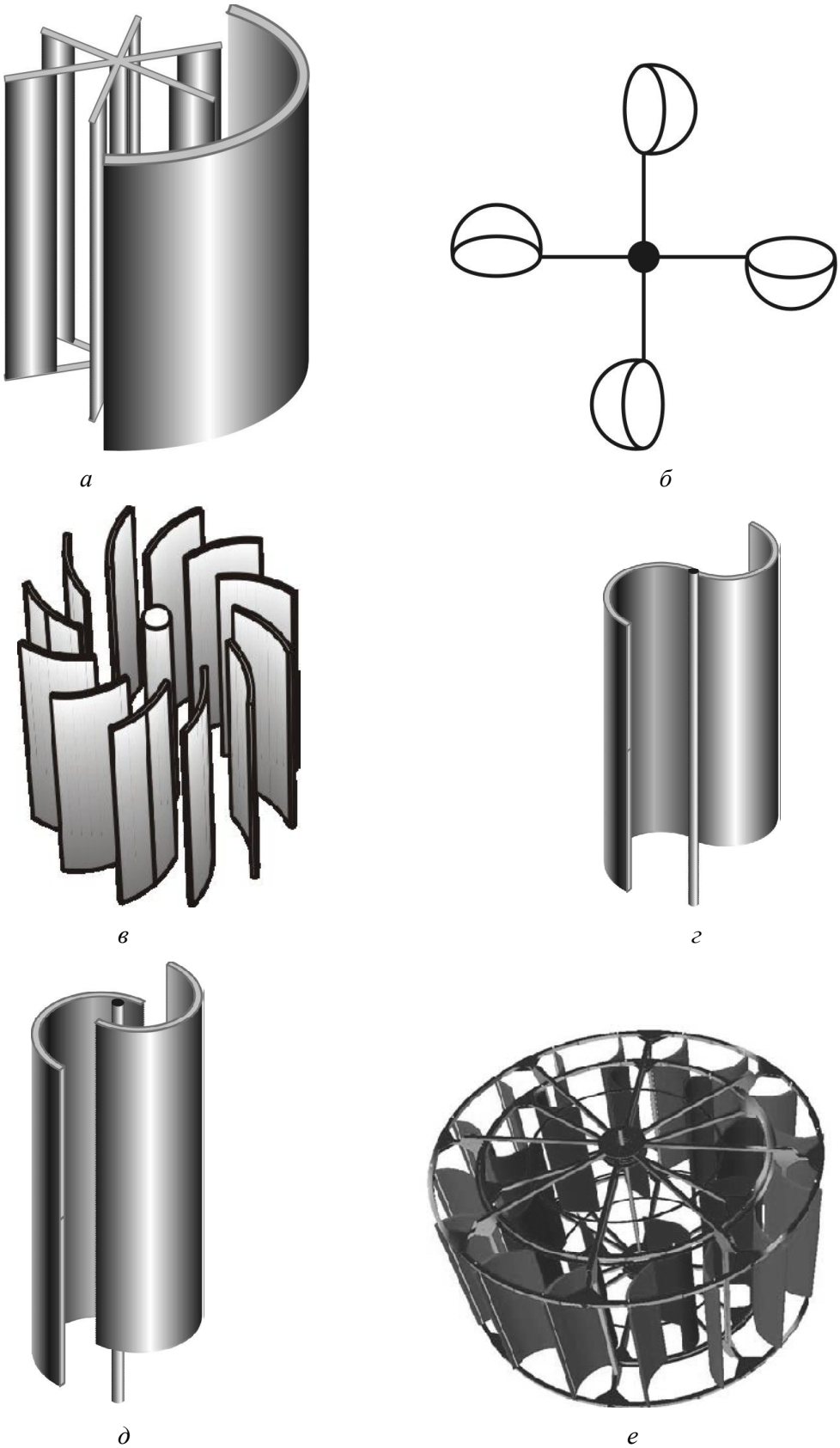

Рис. 1. Основные типы и конструктивные схемы ВО ВЕУ, крутящий момент у которых создается за счет силы лобового сопротивления: *а* – ротор пластинчатый; *б* – ротор чашечный; *в* – ветротурбина Лафонда; *г* – ротор Савониуса замкнутый; *д* – ротор Савониуса щелевой; *е* – ротор Савониуса с дифузором

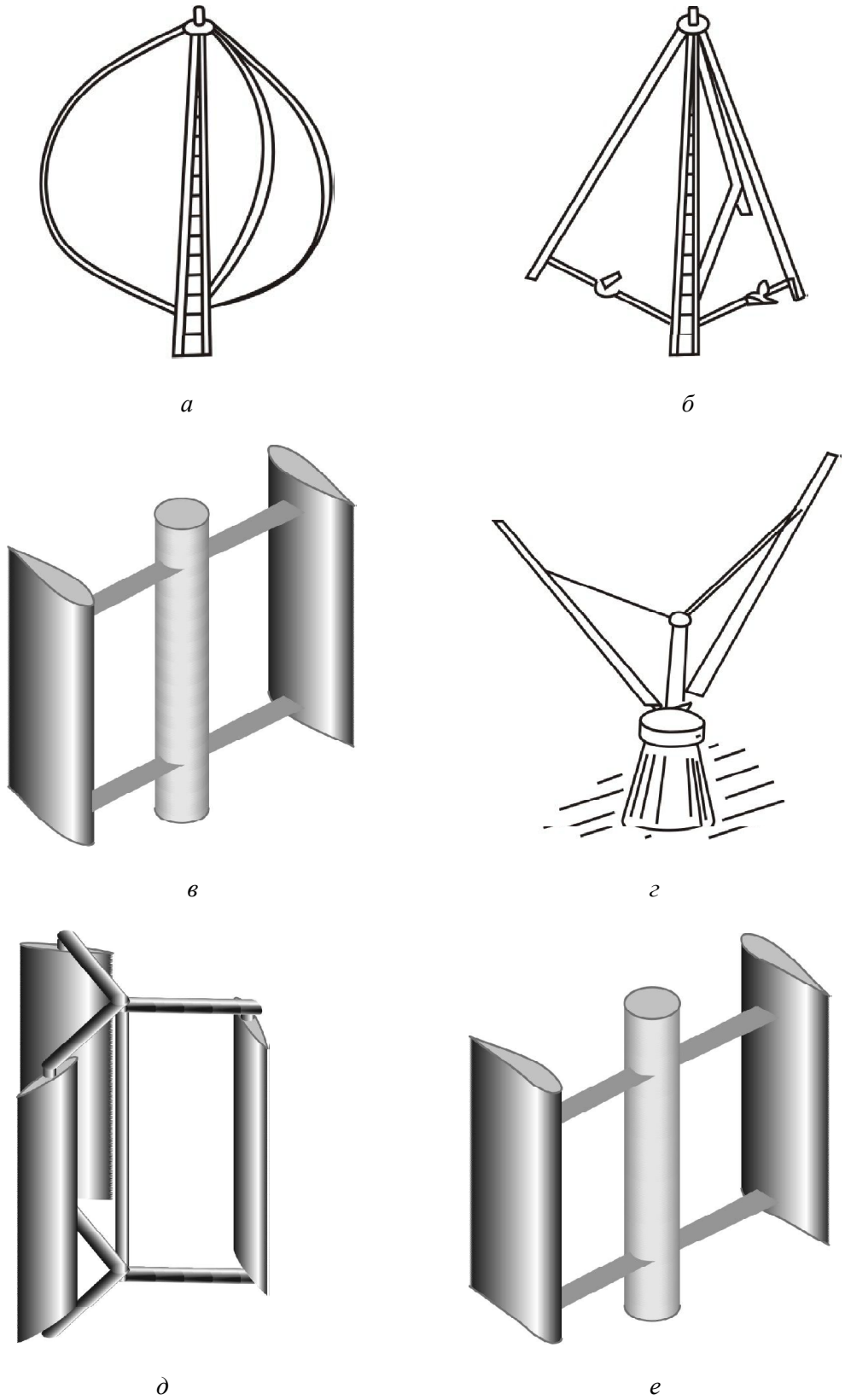

Рис. 2. Основные типы и конструктивные схемы ВЕУ, крутящий момент у которых создается за счет подъемной силы: *а* – ротор Дарье Ф-образный; *б* – ротор Дарье Δ-образный; *в* – ротор Дарье *Н*-образный; *г* – ротор Дарье *V*-образный; *д* – ротор Дарье с изменяемым углом установки лопасти; *е* – ротор Дарье с гибкими лопастями

Разница в сопротивлении потоку ветра полуцилиндров создает крутящий момент. И хотя они недорогие и просты в изготовлении по сравнению с другими типами турбин, тем не менее, они имеют серьезные недостатки. Роторы Савониуса требуют не только много материала для изготовления лопастей на единицу площади, ометаемой ротором, но и коэффициент использования энергии ветра C_P (коэффициент мощности) у них мал по сравнению с остальными ВЭУ. Типичными значениями C_P для других типов ветротурбин являются значения в диапазоне 0,30–0,45, а для роторов Савониуса они не превышают 0,25.

Этот тип турбин с точки зрения их стоимостной эффективности не оправдывает себя, за исключением случаев с очень низкой мощностью для производства электроэнергии, и в дальнейшем они будут рассматриваться в качестве вспомогательных роторов для обеспечения стартового крутящего момента для роторов Дарье.

2. Ротор Дарье с фиксированными лопастями. Ротор Дарье является одним из эффективных устройств по преобразованию энергии ветра в другие виды энергии (электрическую, механическую).

Ротор Дарье в своей первоначальной форме (рис. 2, *а*) имеет замкнутые лопасти (eggbeater), представляющие собой форму, которую принимает гибкая веревка, когда она вращается вокруг вертикальной оси. Такая форма позволяет уменьшать (сводить к минимуму) изгибающие моменты в лопастях, возникающие за счет центробежной силы, так, чтобы на лопасти действовали только растягивающая сила и сила лобового сопротивления. Однако и эта форма не может полностью устранить изгибающие моменты, вызываемые изменяющимися комбинациями аэродинамических, гравитационных и инерционных сил, участвующих в процессе работы.

Роторы Дарье с прямыми лопастями (giromill – рис. 2, *в*), установленные на радиальных плечах с фиксированным углом установки должны выдерживать большие изгибающие моменты, вызываемые центробежными нагрузками, но при этом вся длина их лопастей оперирует при полном окружном радиусе и перпендикулярна к плоскости вращения. Вырабатываемая им мощность генерируется за счет действия подъемной силы на лопасти. Линейная скорость лопасти при вращении может быть намного больше скорости ветра.

3. Ротор Дарье с изменяемым углом установки лопасти. Прямые лопасти ротора Дарье могут вращаться относительно вертикальной оси. Изменение угла установки (тангажа) лопасти улучшает аэродинамические характеристики лопастей, снижая тенденцию к динамическому срыву потока, и увеличивает суммарный крутящий момент ВЭУ. Роторы Дарье с изменяемым углом тангажа (cyclogiro, cycloturbine – рис. 2, *д*) можно разделить на «активные», в которых момент установки лопасти создается за счет толкателей, и «пассивные», в которых момент тангажа регулируется комбинацией аэродинамических и инерционных сил.

4. Ротор Дарье с гибкими лопастями типа «парус». Роторы Дарье с лопастями типа «парус» (рис. 2, *е*) могут развивать высокий момент вращения, так как кривизна поверхности лопастей меняется синхронно с изменением угла атаки. И хотя «паруса» ветроагрегата недолговечные (от одного до трех лет, в зависимости от погоды в данной местности), они дешевые, легкие и простые в креплении. Существуют и другие виды ВО ВЭУ, которые были запатентованы, но не получили широкого распространения из-за сложности конструкций.

Промышленная разработка вертикально-осевых ВЭУ. Вертикально-осевые ВЭУ стали интенсивно осваивать с начала 80-х годов, причем диапазон их мощностей непрерывно расширяется. Сегодня почти все страны эксплуатируют ВО ВЭУ с ротором Дарье, причем в Канаде, США, Нидерландах предпочтение отдается классической схеме с криволинейными лопастями, а в Великобритании и Румынии в качестве основной схемы приняты роторы с прямыми лопастями, параллельными оси вращения. Наибольших успехов добилась фирма VAWT (Великобритания). С 1986 г. на о-ве Сардиния была испытана ВЭУ этой фирмы с ротором диаметром 14 м и мощностью 40 кВт. В том же году была введена в промышленную эксплуатацию ВЭУ VAWT-450 с ротором диаметром 25 м мощностью 130 кВт. Сейчас

фирма работает над созданием установки VAWT-850 мощностью 500 кВт, а также приступила к разработке более крупной установки VAWT-2400 с ротором диаметром 67 м мощностью 1,7 МВт.

В России разработкой ВО ВЭУ с прямыми лопастями занимаются КБ «Радуга», ООО «ГРЦ-Вертикаль», объединение «Гидропроект», ЦАГИ, ВНИИ электроэнергетики, ООО «Электросфера» и многие другие. Созданы опытные установки ВЛ-2М, ВДД-16, которые при испытаниях показывают неплохие результаты.

В Украине в это же время разработкой и производством ВЭУ занялись частные компании. Так, в 1994 – 1995 гг. усилиями финансово-промышленной группы «Атика» (г. Киев) были разработаны и подготовлены к производству ВЭУ мощностью 5, 30, 45 кВт. В настоящее время правопреемником является компания «Ветромаш» (г. Днепропетровск). Компания «ЭСО» разработала ВЭУ мощностью 20 и 420 кВт с вертикальной осью вращения (г. Днепропетровск). В настоящее время эти установки находятся в г. Евпатории, работают в экспериментальном режиме.

Для организации выпуска на Украине ВЭУ USW-56/100 было создано украинско-американское предприятие (СП) «Уиндэнерго Лтд», зарегистрированное 11 декабря 1992 г. С американской стороны в состав СП вошли фирмы «US Windpower» (ветроэнергетическое отделение корпорации «Kenetech») и «Putman, Hayes and Bartlett». Первоначально в состав украинских участников СП предполагалось включение НПО «Укрэнергоресурсы» и «Крымэнерго», однако с изменением законодательства произведена перерегистрация СП с участием Фонда Госимущества Украины. СП «Уиндэнерго Лтд» – единственная компания, созданная при участии иностранного инвестора.

За этот период предпринимались попытки со стороны иностранных компаний по участию в ветроэнергетических проектах, которые не завершались долговременным сотрудничеством. Это, например, такие.

Украинско-датский проект «Ай-Петри». По контракту Минэнерго Украины и датской фирмы «Genvind» в 1993 г. началось строительство ветроустановки GV-270 мощностью 270 кВт. В ходе монтажа произошла поломка лопастей, что привело к срыву проекта. В настоящее время датская сторона намерена восстановить ветроустановку в рамках украинско-датского проекта «Завершение строительства ветроагрегата на Ай-Петри», финансируемого грантами датского энергетического агентства.

Проведение тематических семинаров и конференций, информационный обмен датскими организациями ветроэнергетического сектора. Наиболее активна в этой области фирма «Genvind Engineering ApS» и «Folkecenter for Renewable Energy».

Переговоры компании «Атика» с американской фирмой «Sea West» (1993 – 1995гг) о создании СП с целью строительства ВЭС в Крыму. Проект не осуществлен по причинам неблагоприятных законодательных и экономических условий в Украине.

Переговоры НПО «Ротор» (г. Черкассы) с германской фирмой «Genesis» (1996 – 1997 гг) о создании СП для производства безредукторных ВЭУ с переменной частотой вращения ветроколеса. Вопрос не решен из-за отсутствия гарантий возврата инвестиций с украинской стороны. В настоящее время процесс снова начат украинской стороной с помощью «Уиндэнерго Лтд», имеющей намерения вовлечь фирму «Genesis» в совместный проект в рамках «Комплексной программы строительства ВЭС в Украине до 2010 года».

Анализ расчёта вертикально-осевых установок. В качестве ротора с вертикальной осью вращения в этой работе выбираем ротор Дарье, общий вид которого показан на рис. 3. Эффективность ВЭУ характеризуется мощностью N и моментом трогания $M_{\text{тр}}$, которые определяются следующим образом:

$$N = C_p \frac{\rho V^3}{2} DH\eta_{\text{общ}},$$

где C_P – коэффициент мощности; V – расчетная скорость ветра [5], м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м^3; $\eta_{общ}$ – задаваемый предварительно КПД;

$$M_{ТР} = C_m \rho V^2 D^2 H \text{ при } Z = 0,$$

где C_m – коэффициент момента.

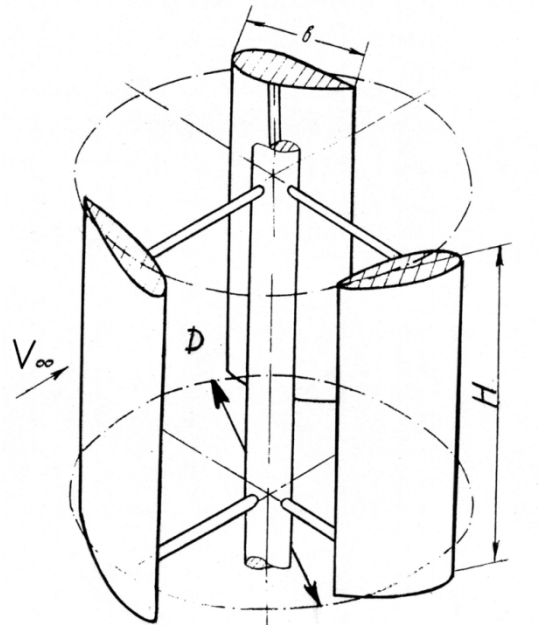

Рис. 3. Конструктивная схема ротора Дарье: H – высота лопасти; D – диаметр; b – длина хорды лопасти; V – скорость ветра; $n = 3$ – количество лопастей; $p = (p_1, p_2, \ldots, p_k)$, где p_i ($i = 1...k$) – вид профиля лопасти

В настоящей работе ставится задача нахождения оптимального вектора геометрических параметров ротора ВЭУ $X^* = (H, D, b, n, p)^T$, $X^* = \max_{X^*} N$ при следующем ограничении $M_{тр} \le M_{тр_{зад}}$.

Для решения поставленной оптимизационной задачи зададимся высотой лопасти, а на остальные параметры наложены ограничения: $b_{min} \le b \le b_{max}$ – длина хорды лопасти, $D_{min} \le D \le D_{max}$ – диаметр, $n_{min} \le n \le n_{max}$ – количество лопастей, $p = (p_1, p_2, \ldots, p_k)$, где p_i ($i = 1 \ldots k$) – вид профиля лопасти. Для каждого из этих параметров задается шаг: Δb, ΔD, Δn. С помощью дискретного перебора результатов расчёта выбираются те геометрические параметры, при которых достигается максимальная мощность N [6].

Рассмотрены реальные станции и проведено сравнение их указанных мощностей с рассчитанными мощностями и пусковым моментом согласно методике. Данные приведены в таблице.

Сравнение реальных станций и их указанных мощностей с рассчитанными мощностями и пусковым моментом согласно методике

Название	Указанная мощность	Мощность	Пусковой момент
U-Lift-1kW	1000	1010	123
WindGen-1000	1000	1000	162
WK 18-20	1320	1351	197
Carbon	2500	2499	70
WK 32-20	2260	2240	250

Продолжение таблицы

Название	Указанная мощность	Мощность	Пусковой момент
FDM 5kW	5000	5007	75
U-FDM 6kW	6000	6006	152
A 10K	10000	10009	105
AV-R4	12000	12017	183
Eurowind 19kW	19000	19004	117
Vata H20	20000	20019	90
Westa 30	30000	30022	39
Enecom 50kW	50000	50690	27
Heos H50	50000	50141	19

Выводы. Энергия ветра – это бесконечный потенциал бесплатной энергии независимо от импортных энергоносителей. Развитие технологий позволяет постоянно совершенствовать конструкцию ВЭУ и повышать ее эффективность, уменьшая отрицательные моменты использования ВЭУ.

Список литературы

1. *Белов И. А.* Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости / И. А. Белов, С. А. Исаев, В. А. Коробков – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с.
2. *Куцан Ю. Г.* Щодо проекту концепції енергетичної політики України на період 2030 року / Ю. Г. Куцан, В. Д. Білодід // Энергетика и электрификация. – 2001. – № 3. – С. 2–5.
3. *Дальнейшее* развитие метода маркеров и ячеек для течений несжимаемой жидкости. –В кн.: Численные методы в механике жидкостей. – М.: Мир, 1973. – С. 165–173.
4. *Кривцов В. С.* Неисчерпаемая энергия: учеб.: в 4 кн. Ветроэнергетика / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т ХАИ, Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т. – Кн.2. – 2004. – 519 с.
5. *Фатеев Е. М.* Ветродвигатели и ветротурбины / Е. М. Фатеев – М.: Сельхозгиз, 1957. – 544 с.
6. *Яковлев А. И.* Прогнозирование мощностных и моментных характеристик ветроколеса с вертикальной осью вращения и различными аэродинамическими профилями рабочих лопатей / А. И. Яковлев, М. А. Затучная, И. Г. Головчинер, А. А. Зайкин // Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразование энергии. – Х., 1997. – С. 111 – 115.

В. М. Синєглазов, С. С. Альошкін, А. В. Кульбака

Аналіз вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання

Виконано аналіз вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання. Оцінено вихідні параметри відомих вітроустановок за геометричними розмірами їх ротора обертання.

V. M. Sineglazov, S. S. Aloshkin, A. V. Kulbaka

Analysis of Wind Turbines with Vertical Axis of Rotation

The analysis of wind turbines with vertical axis of rotation is done. The output parameters estimation of known wind turbines by geometrical parameters of their rotor of rotation is done.