

Historical%20Wind%20Generators%20Machines.pdf.

24. **South P.** A Wind Tunnel Investigation of a 14ft Diameter Vertical Axis Windmill / P. South, R. S. Rangi, NRC, Canada, report LTR-LA-105. – 1972.

25. **Spera D. A.** Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering/ D. A. Spera. – New York: ASME, 1994. – 638 p.

26. **Tong W.** Wind Power Generation and Wind Turbine Design / W. Tong. – Boston: WIT Press, 2010. – 769 p.

27. Water pumping windmill history in America / Ironman Windmill Co, 2012. Режим доступу: <http://www.ironmanwindmill.com/windmill-history.htm>.

28. Wind Energy – the Facts / European Commission, Directorate General for Energy, EWEA, 2008. – P. 76, 89, 125.

*Надійшла до редколегії 25.12.2013*

УДК 577.4; 130.1

**\*Е. Р. Абрамовский, \*\*И. Ю. Костюков, \*\*С. В. Тарасов, \*\*\*А. И. Яковлев**

*\*Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара*

*\*\*Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг»*

*\*\*\*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*

## **РЕТРОСПЕКТИВА И ПЕРСПЕКТИВА ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ**

### **Статья II. Развитие вертикально-осевого направления ветроэнергетики в Украине**

**Рассмотрены основные работы украинских предприятий по теоретическим и экспериментальным исследованиям и созданию натуральных образцов вертикально-осевых ветроустановок с ротором Дарье.**

*Ключевые слова:* вертикально-осевая ветроустановка, ротор Дарье, аэродинамика ветродвигателей, автономная ветроустановка, сетевая ветроустановка.

**Розглянуто основні роботи українських підприємств з теоретичних і експериментальних досліджень та створення натурних зразків вертикально-осьових вітроустановок з ротором Дар'є.**

*Ключові слова:* вертикально-осьова вітроустановка, ротор Дар'є, аеродинаміка вітродвигунів, автономна вітроустановка, приєднана до мережі вітроустановка.

**The basic works of the Ukrainian enterprises in the field of theoretical and experiment-tal research and on creation of natural samples Darrieus vertical axis wind turbine are considered.**

*Keywords:* vertical axis wind turbine, Darrieus rotor, aerodynamics of wind turbines, stand alone wind turbine, network wind turbine.

**Введение.** В конце 1980-х годов в Украине возникла новая отрасль науки и техники – ветроэнергетика. С самого начала развитие ветроэнергетики пошло по двум направлениям. Первое направление, заключающееся в разработке и производстве отечественных ветроустановок, было для Украины, обладающей высо-

© Е. Р. Абрамовский, И. Ю. Костюков, С. В. Тарасов, А. И. Яковлев, 2014

ким научным, техническим и производственным потенциалом, естественным путем развития новой техники. Основным принципом второго направления было изготовление на украинских предприятиях зарубежных лицензионных ветроустановок. В 1993 году в Украине были построены первые ветровые электростанции с горизонтально-осевыми ветроустановками: Акташская ВЭС на базе отечественных ветроустановок КБ «Южное» АВЭ-250 мощностью 200 кВт и Донузлавская ВЭС на базе лицензионных ветроустановок USW 56-100 американской фирмы «Kenetech Windpower» мощностью 100 кВт, производства ПО «Южный машиностроительный завод». Принятая в 1997 году Комплексная программа строительства ветровых электростанций отдала приоритет и государственное финансирование не украинским разработкам, а американским – лицензионной ветроустановке USW 56-100, которых за время действия программы было изготовлено чуть меньше 750 единиц. Однако американский ветроагрегат, разработанный в 1970-х годах, уступал по техническим характеристикам украинским – горизонтально-осевой ветроустановке АВЭ-250 и вертикально-осевой ветроустановке ЭСО-420, а его энергоотдача была значительно ниже отечественных ветроагрегатов [3]. В результате производительность украинских ветровых станций с ветроагрегатами USW 56-100 оказалась в 4 раза ниже европейских показателей, а перспективные проекты отечественных ветроустановок, лишившись государственной поддержки, были закрыты.

Для завершения общего экскурса в историю развития ветроэнергетики в Украине необходимо сказать, что после введения в 2009 году «зеленого тарифа» в стране начался новый этап развития ветроэнергетики. В 2011 году в Украине были реализованы первые частные проекты промышленных ветровых электростанций, в основном, на базе немецких горизонтально-осевых ветроустановок «Fuhrlander» мощностью 2,5 МВт, производство которых в настоящее время налаживается на украинских предприятиях. Сегодня Украина занимает второе место в мире по темпам роста ветроэнергетики. Установленная мощность ветровых электростанций в 2011 году выросла на 73%, а в 2012 году – на 100% [4]. Однако ситуация с изготовлением на украинских предприятий лицензионных ветроустановок «Fuhrlander» повторяет историю тиражирования уже устаревшей на момент приобретения лицензии американской ветроустановки USW 56-100. Тогда надежды первого заместителя генерального директора ПО «Южный машиностроительный завод» В. И. Сичевого на то, что при изготовлении лицензионных американских ветроустановок будет приобретен необходимый опыт отработки конструкции и технологии для создания собственных ветроагрегатов нового поколения, из-за серьезных недостатков установки USW 56-100, не оправдались [12]. Ведь ветроагрегат «Fuhrlander» на мировом рынке не пользуется спросом, а сама компания, по данным EWEA (Европейская Ветроэнергетическая Ассоциация), даже не входит в десятку крупных европейских изготовителей ветроустановок и продолжает снижать свои объемы в Германии [24].

Настоящая публикация является второй статьей исследования «Ретроспектива и перспектива вертикально-осевой ветроэнергетики», и на фоне общего развития ветроэнергетики в Украине на рубеже XX–XXI веков рассматривает историю отечественного вертикально-осевого направления, ее основные этапы и предприятия, которые внесли наиболее значимый вклад в создание принципиально новых вертикально-осевых ветроустановок. Авторы надеются, что в Украине, имеющей высокий научный, технический и производственный потенциал,

еще будут создаваться ветроустановки мирового уровня, аналогично разработкам в авиации, ракетной технике, судостроении, турбостроении.

**Постановка проблемы.** Современная украинская ветроэнергетика идет по пути использования лицензионных зарубежных ветроустановок с дальнейшей организацией их производства на украинских предприятиях. С одной стороны, такой путь развития позволил в короткие сроки обеспечить высокие темпы роста ветроэнергетических мощностей в стране. С другой стороны, как показывает опыт американской лицензионной ветроустановки USW 56-100, зарубежные компании предлагают третьим странам для изготовления по лицензии конструкции, которые не пользуются спросом на мировом рынке. К таким конструкциям относятся и выбранная для тиражирования предприятием «Ветряные парки Украины» ветроустановка «Fuhrlander». Уже через несколько лет эксплуатации ветроустановок, как и в случае с ветроустановкой USW 56-100, инвесторы столкнутся с необходимостью модернизации ветроустановки для повышения ее эффективности. Поэтому вероятнее всего, наиболее рациональным для развития ветроэнергетики является производство в Украине по лицензии наиболее совершенных ветроустановок, таких как Vestas или Enercon, мощностью свыше 4-5 МВт, что соответствует тенденциям мировой ветроэнергетики, строительство на их базе ветровых электростанций и, на основе полученного опыта отработки, производства и эксплуатации этой техники, разработка отечественных ветроустановок аналогичного технического уровня. Именно благодаря такому подходу, начав со сборки лицензионных датских ветроустановок, Испания превратилась из страны, импортирующей ветроэнергетическое оборудование, в одну из ведущих стран – производителей мегаваттных ветроустановок с такими крупными компаниями, как Acciona, Ecotenia, Gamesa, MTorres, ADES.

В свете изложенного опыт развития вертикально-осевой ветроэнергетики в Украине, от «нулевого» начального состояния до конструкций уровня лучших мировых аналогов, является актуальным вопросом истории техники, т.к. может быть весьма полезным при создании отечественных ветроустановок любых назначений и мощностей. Особенностью этих работ было отсутствие не только отечественного, но и мирового опыта разработки и эксплуатации крупных вертикально-осевых ветроустановок с ротором Дарье с прямыми лопастями.

**Цель написания статьи.** Целью настоящей публикации является отражение истории развития в Украине вертикально-осевого направления ветроэнергетики. Для достижения поставленной цели в статье рассматриваются следующие задачи: поиск и систематизация в хронологической последовательности историко-технических материалов по исследованиям, конструкторским разработкам и эксплуатации украинских вертикально-осевых ветроустановок, ретроспективный обзор и обобщение исторических научных и технических фактов развития вертикально-осевого направления ветроэнергетики в Украине, вклада украинских предприятий в создание первых отечественных вертикально-осевых ветроустановок.

**История вертикально-осевой ветроэнергетики в Украинской ССР.** Второе рождение запатентованного в 1931 году, а после невостребованного и забытого ротора Дарье произошло в 1960-х годах, когда сотрудники канадского NRC в поисках решения, альтернативного горизонтально-осевым ветроустановкам, обратили внимание на вертикально-осевой ротор, который работал по такому же принципу преобразования силы ветра в подъемную силу профилирован-

ной лопасти, но имел более простую конструкцию, т.к. не требовал ориентации на ветер и позволял размещать основное оборудование на фундаменте. Вопрос о роторе Дарье и новом вертикально-осевом направлении развития ветроэнергетики, как о возможной альтернативе традиционным горизонтально-осевым ветроустановкам, приобрел особую актуальность, когда выяснилось, что его эффективность находится на уровне горизонтально-осевой схемы. В 1980-х годах, в рамках государственных программ, в Канаде и США проводились всесторонние исследования вертикально-осевой схемы и создавались первые опытные ветроустановки с ротором Дарье с криволинейными лопастями, а в Великобритании – с ротором Дарье с прямыми лопастями [13].

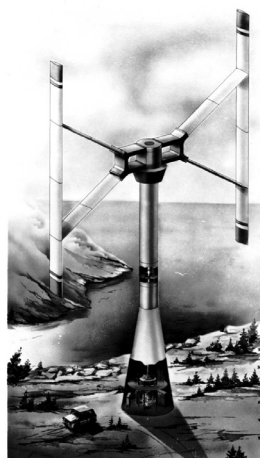
В Советском Союзе работы по созданию крупных отечественных ветроустановок начались с выходом Постановления Совета Министров СССР «Об ускорении развития ветроэнергетической техники в 1988 – 1995 годах». Московским ВПИ НИИ «Гидропроект» им. С. Я. Жука был проведен анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований вертикально-осевых ветроустановок с различными модификациями ротора Дарье по канадской, американской и английской программам и для разработок, как наиболее перспективная, была выбрана схема ротора Дарье с прямыми лопастями. В январе 1989 года к работам ВПИ НИИ «Гидропроект» присоединилось КБ «Южное», Днепропетровск. В 1989 году КБ «Южное», уже как головной разработчик, выпустило техническое предложение и эскизный проект ветроустановки мегаваттного класса. В качестве ветровой турбины был применен ротор Дарье с прямыми лопастями, жестко установленными на траверсах с наклонными ветвями. Проведенные на этапе эскизного проекта теоретические и экспериментальные работы на моделях подтвердили эффективность ветроустановок с вертикальной осью вращения и целесообразность создания вертикально-осевой ветроустановки мегаваттной мощности. В конце 1989 года проект КБ «Южное» на Всесоюзном конкурсе Госкомитета по науке и технике СССР занял II место в классе ветроустановок мощностью свыше 100 кВт как самый мощный ветроагрегат с вертикальной осью вращения. По результатам конкурса проект «Ветроэлектрическая установка с вертикальным валом мощностью 1250 кВт», разработанный КБ «Южное», был включен в Государственную научно-техническую программу ГКНТ СССР «Экологически чистая энергетика» [17]. К работам были привлечены ЦАГИ (г. Жуковский), филиал ЦАГИ (г. Москва), ВПИ НИИ «Гидропроект» (г. Москва), ВНИИ электроэнергетики (г. Москва), НИИ НПО ХЭМЗ (г. Харьков), ДГУ (г. Днепропетровск), КБ им. Миля (г. Москва) и др. В рамках проекта организациями-разработчиками был проведен большой объем исследовательских и проектных работ, в том числе: исследование режимов обтекания потоком Н-ротора; расчетно-теоретические и экспериментальные исследования аэродинамических характеристик Н-ротора; разработка методики и расчет аэродинамических характеристик Н-ротора; разработка методики и оптимизация конструктивных и геометрических параметров Н-ротора; разработка методики и расчет нагрузок на Н-ротор; определение компоновочной схемы ветроустановки и согласование основных технических характеристик составных агрегатов и систем; определение компоновочно-силовой схемы ветровой турбины и расчет частотных, жесткостных и прочностных характеристик траверсы и лопасти, расчеты динамических и прочностных характеристик конструкции и выбор основных конструкционных материалов; проектирование ветровой турби-

ны, опорно-трансмиссионной системы, опорной башни, мультипликатора, системы генерирования электроэнергии, системы контроля и управления, вспомогательных систем ветроустановки; исследование экономической эффективности ветроустановки.

Разработанная ветроустановка «ВТО-1250Б» мощностью 1,25 МВт (рис.1) предназначалась для обеспечения потребности в электроэнергии крупных промышленных объектов и жилых поселков, расположенных в районах с высоким ветровым потенциалом и удаленных от централизованных энергосистем, таких как Крайний Север, Дальний Восток, Якутия, Чукотка. При этом ветроустановка рассчитывалась на повышенные ветровые нагрузки (среднегодовая скорость ветра 7,5–9,5 м/с), экстремальные климатические условия эксплуатации («холодный» и «арктический» климатические районы), отсутствие централизованной энергосистемы (автономная работа ветроустановки и работа в составе ветродизельных электростанций). В 1991 году на секции ветроэнергетики объединенного научного Совета ГКНТ СССР и АН СССР по проблеме «Нетрадиционная энергетика» был защищен технический проект «Ветроэлектрическая установка ВТО-1250Б» [21]. При этом было отмечено, что показатели разработанной ветроустановки соответствуют современному научно-техническому уровню, а схема ветроагрегата – перспективным направлениям развития ветроэнергетики. В этом же году Красноярский крайисполком совместно с ТЭО «Сибирьэнерго» приняли решение о строительстве в пос. Диксон опытно-промышленной ветроэлектрической станции на базе ветроустановки «ВТО–1250Б».



**Рис.1. Ветроустановка «ВТО-1250Б»**



**Рис.2. Ветроустановка «Южная-350»**

В связи с этим дальнейшая работа по проекту выполнялась с учетом адаптации ветроустановки к условиям совместной работы с дизель-электрическими установками в локальной энергосети пос. Диксон. Однако в конце 1991 года произошел распад СССР и на стадии разработки рабочей документации работы по проекту были прекращены.

В феврале 1992 года проект вертикально-осевой ветроустановки мощностью 1250 кВт КБ «Южное» был включен в научно-техническую программу «Экологически чистая энергетика» вновь созданного ГКНТ Украины. В связи с этим было принято решение о разработке в рамках проекта ГКНТ Украины новой модификации ветроустановки «ВТО-1250Б», получившей название «Южная-350» мощностью 350 кВт, более эффективной в ветровых и климати-

ческих условиях Украины. Учитывая отличия ветропотенциала (среднегодовая скорость ветра 5,0–6,5 м/с), климатических условий («умеренно теплый с мягкой зимой» климатический район), наличие централизованной энергосистемы (параллельная работа ВЭУ с сетью бесконечной мощности), ветроустановка «ВТО-1250Б» при эксплуатации в Украине имела избыточную прочность и материалоемкость, усложненную конструкцию и высокую стоимость, что при уменьшении выработки электроэнергии определяло повышение стоимости вырабатываемой в условиях Украины энергии. При разработке ветроустановки мощностью 350 кВт были использованы исследования аэродинамических, энергетических, динамических характеристик ветровой турбины, основные проектные параметры, схемные и конструктивные решения, примененные для ВТО-1250Б. В конце 1992 года была завершена разработка технического проекта «Ветроэлектрическая установка «Южная» мощностью 350 кВт» [22] и началось строительство опытно-промышленного образца ВЭУ «Южная-350» в Севастополе (рис.2). Однако в 1993 году на этапе изготовления оборудования ветроустановки, в связи с резким ухудшением экономической ситуации в Украине, заказчики прекратили финансирование проекта и работы по вертикально-осевым ветроустановкам в КБ «Южное» были прекращены.

**Развитие вертикально-осевой ветроэнергетики в Украине.** В 1994 году вертикально-осевой ветроэнергетической тематикой начало заниматься предприятие «Энергетические системы и оборудование» (ЭСО), г. Днепропетровск, основным направлением деятельности которого были разработка, изготовление, строительство и эксплуатация ветроустановок для различных потребителей: от мелких фермерских хозяйств и жилых усадеб до крупных промышленных ветроэлектростанций. Учитывая наукоемкость и сложность разработки, а также отсутствие посторонних источников финансирования и проведение работ только за счет собственных средств, была принята программа развития предприятия «ЭСО». Важным аспектом данной программы был выбор первого стартового проекта ветроустановки, реализация которого позволила бы создать необходимый научный, технический, организационный и финансовый задел для последующего развертывания работ предприятия. Таким стартовым проектом была выбрана автономная ветроэлектрическая установка с Н-ротором Дарье мощностью 20 кВт «ЭСО-0020» с относительно небольшим сроком разработки и низкой стоимостью (рис.3) [14]. Для разработки и изготовления оборудования ветроустановки были привлечены специализированные организации и предприятия Украины: Новомосковский механический завод и завод «АВИАНТ», г. Киев – проектирование и изготовление ветровой турбины; завод «Редуктор», г. Киев – проектирование и изготовление мультипликатора; ЦКБ «Шхуна», г. Киев – проектирование опорно-трансмиссионной системы; Днепрпроектстальконструкция, г. Днепропетровск – проектирование опорной конструкции; завод горно-шахтного оборудования, г. Днепропетровск – изготовление опорно-трансмиссионной системы; Донецкий завод высоковольтных опор – изготовление опорной конструкции; ПО «Южэлектромаш», г. Новая Каховка – изготовление электрической машины; ГKB «Днепровское», г. Днепропетровск – проектирование и изготовление системы управления и др. В 1995 году опытно-промышленный образец ветроустановки прошел сертификационные испытания в ЦАГИ, г. Жуковский, в следующем объеме: прочностные расчеты конструкции (расчет ветровой турбины на статическую и усталостную прочность, прочностной расчет опорно-трансмиссионной систе-

мы, расчет мультипликатора на статическую и усталостную прочность, расчет опорной конструкции на прочность при действии динамических и ветровых нагрузок); автономные стендовые испытания мультипликатора и системы генерирования электроэнергии; комплексные испытания ветроустановки (гоночные испытания, динамические испытания с определением собственных частот элементов конструкции, испытания в аэродинамической трубе АДТ-101 с определением напряженно-деформированного состояния ветровой турбины и опорной конструкции, натурные испытания с определением энергетических характеристик ветроустановки); ресурсные испытания ветровой турбины и опорной конструкции. Проведенные испытания показали, что динамические и прочностные характеристики конструкции обеспечивают надежную работоспособность ветроустановки в рабочем диапазоне ветров и достаточную прочность при буревом воздействии, энергетические характеристики ветроустановки на 10–14% выше расчетных, коэффициент мощности ветроустановки во всем рабочем диапазоне ветров составляет 0,4–0,43 [18], ресурс ветровой турбины равен 18,9 лет, а ресурс опорной конструкции – 23 года [5], коэффициент установленной мощности для районов со средним ветровым потенциалом составляет не менее 0,28. По результатам сертификационных испытаний ветроустановка «ЭСО-0020» получила сертификат Госстандарта России [19].



Рис.3. Ветроустановка «ЭСО-0020»



Рис.4. Ветроустановка «ЭСО-0420»

Ветроустановки «ЭСО-0020» были построены в России (Приморский край, Таймырский автономный округ) и Украине (Харьков, Днепропетровск, Одесса, Луганск, Евпатория) для электроснабжения промышленных и бытовых потребителей.

*Днепропетровск, ООО «Фалвест».* Ветроустановка с автономной электрогенерирующей системой использовалась разработчиками в качестве опытного образца для отработки конструкции и алгоритма управления. В целях упрощения испытаний ветроустановка не имела дополнительной аккумуляторной батареи и устройств преобразования электроэнергии. В данной комплектации она могла обеспечить электропитание только тех потребителей, которые не зависели от произвольного графика выработки энергии, изменений вырабатываемой мощности в диапазоне от 0 до 20 кВт и колебаний частоты выдаваемого переменного тока в диапазоне от 45 до 90 Гц в условиях постоянно изменяющихся ветровых характеристик. Поэтому ветроустановка применялась для освещения (лампы накаливания) и отопления (водонагревательные ТЭНы) производственных помещений.

*Харьков, Харьковский завод электромонтажного оборудования.* Ветроустановка с автономной электрогенерирующей системой в комплектации с преобразователем частоты выдавала электроэнергию с изменяющейся, в зависимости от скорости ветра, мощностью и стандартной частотой 60 Гц для питания осветительных и нагревательных приборов. Из-за отсутствия аккумуляторной батареи подача энергии потребителям осуществлялась только при наличии ветра в диапазоне от 5 до 20 м/с.

*Евпатория. Предприятие электрических сетей.* Учитывая высокий ветропотенциал Крыма и специализацию заказчика, на Евпаторийском ПЭС проводились испытания, отработка и последующая эксплуатация ветроустановки с сетевой электрогенерирующей системой с выдачей выработанной электроэнергии в централизованную сеть Крымэнерго.

*Владивосток, ОАО «Приморскнефтепродукт».* При поставке, по требованию заказчика, были рассмотрены несколько вариантов электрогенерирующей системы ветроустановки, предназначенной для электроснабжения автозаправочной станции. В целях экономии средств заказчик предложил отказаться от аккумуляторной батареи для накопления электроэнергии и преобразователя частоты и оснастить ветроустановку только источником бесперебойного питания мощностью 2 кВА. Ветроустановка в такой комплектации имела ряд недостатков. Во-первых, не могла обеспечивать электроснабжение потребителей в безветренные периоды и устойчивое генерирование электроэнергии при низких скоростях ветра из-за отсутствия буферной аккумуляторной батареи, а во-вторых, из-за отсутствия преобразователя частоты не могла обеспечивать электроснабжения всех насосов бензоколонок, устройств автоматики и оргтехники АЗС при скорости ветра свыше 7 м/с. Разработчик предложил два варианта электрогенерирующей системы: автономный и сетевой. Автономная ветроустановка для гарантированного электроснабжения всех потребителей АЗС должна комплектоваться аккумуляторной батареей, накапливающей энергию на несколько часов работы, и преобразователем частоты с суммарной мощностью всего оборудования АЗС. Сетевой вариант предусматривал подачу вырабатываемой энергии в энергосистему, а расчет с «Дальэнерго» производить по разности поданной в сеть и потребленной из сети АЗС электроэнергии. Последний вариант был принят к реализации как имевший минимальный срок исполнения и стоимость.

*Луганская область, Алмазная, ООО «Экина».* Автономная ветроустановка с аккумуляторной батареей и преобразователем частоты предназначена для освещения производственных помещений и нагрева воды для бытовых нужд.

*Одесская область, Вилково, порт Усть-Дунайск.* При штатном режиме работы порта, расположенном на острове в дельте Дуная, для его электроснабжения применяется дизельгенераторная установка мощностью 240 кВт. В условиях дежурного режима потребление электроэнергии портом резко сокращается и не превышает 10–15 кВт. Автономная ветроустановка с аккумуляторной батареей и преобразователем частоты позволяет в ветреные периоды накапливать электроэнергию в аккумуляторах и при дежурном режиме работы порта обеспечивать его электроснабжение, что экономит дизельное топливо и ресурс работы дизельгенераторной установки.

*Таймырский автономный округ, пос. Левинские пески.* В 1999 году после паводка, разрушившего пос. *Левинские пески*, расположенный на левом берегу Енисея в 10 км от Дудинки, было принято решение о строительстве в поселке ве-



тродизельной электростанции, состоящей из пяти ветроустановок и резервной дизельгенераторной установки. Автономная вертикально-осевая ветроустановка мощностью 20 кВт оказалась предпочтительнее других в экстремальных климатических условиях (низкая температура, вечная мерзлота) Заполярья, благодаря таким основным особенностям, как высокая эффективность и надежность, простота и удобство технического обслуживания, низкая стоимость, простота фундаментов и монтаж оборудования с помощью обычных подъемных механизмов, возможность привлечения местных предприятий для выполнения проектных, строительных, монтажных работ и эксплуатации ветроустановок. Кроме того, комплектование ветростанции пятью ветроустановками единичной мощностью 20 кВт вместо одной, мощностью 100 кВт повышает надежность станции, т.к. при выходе из строя одного или двух агрегатов ветростанция продолжает функционировать. В состав ветродизельной электростанции входило следующее оборудование: пять ветроустановок «Січ-20» (модификация «ЭСО-0020» для условий Севера) общей мощностью 100 кВт, два выпрямительно-зарядных устройства для заряда аккумуляторной батареи от ветроустановок и дизельгенераторной установки, инвертор мощностью 138 кВА, аккумуляторная батарея из 120 элементов 2 В/1000 Ач, коммутирующее устройство, шкаф управления ветродизельной электростанцией, блок балластных резисторов, дизель-электрическая установка мощностью 100 кВт. Ветродизельная электростанция обеспечивает электроснабжение поселка в двух режимах. В инверторном режиме электроснабжение осуществляется от ветроустановок при наличии ветра, а при отсутствии ветра – от аккумуляторной батареи. Дизельгенераторный режим включается в случае отсутствия ветра и разряда аккумуляторной батареи. Станция работает в автоматическом режиме, и дежурный персонал осуществляет только контролируемые функции [7].

Параллельно с автономной ветроустановкой «ЭСО-0020» в 1994 году началась разработка сетевой вертикально-осевой ветроэлектрической установки с Н-ротором мощностью 420 кВт - «ЭСО-0420» (рис.4), которая предназначалась для параллельной работы с энергосистемой [11]. В разработке и изготовлении узлов и систем ветроустановки принимали участие организации и предприятия Министерства машиностроительной промышленности и Министерства энергетики Украины: завод «АВИАНТ», г. Киев – изготовитель ветровой турбины; ЦКБ «Шхуна», г. Киев – разработчик опорно-трансмиссионной системы, машинного и электротехнического модулей; завод «Ленинская кузница», г. Киев – изготовитель опорно-трансмиссионной системы; НПО ХЭМЗ, г. Харьков – разработчик и изготовитель системы генерирования, изготовитель электротехнического модуля; завод «Харэлектромаш», г. Харьков – разработчик и изготовитель электрической машины; ПО «Заря», г. Николаев – изготовитель мультипликатора; Киевский судостроительный-судоремонтный завод – изготовитель машинного модуля и контейнера электротехнического модуля; институт «Укрэнергопроект», г. Харьков – разработчик электрической части ветроустановки; ГКБ «Днепровское», г. Днепропетровск – разработчик и изготовитель системы управления; завод металлоконструкций им. Бабушкина, г. Днепропетровск – изготовитель опорной башни и др. Заказчиком ветроустановки выступил медицинский центр «Медики-Чернобылю» Министерства здравоохранения Украины в г. Евпатория. В связи с тяжелой ситуацией, которая сложилась в эти годы в экономике и промышленности Украины, разработка ветроустановки растянулась на несколько лет. Средства

на создание «ЭСО-0420» изыскивались из самых различных источников. Финансирование проекта производилось за счет средств разработчика ветроустановки – предприятия «ЭСО», Государственного инновационного фонда, МЦ «Медики-Чернобылю», Комитета по энергосбережению, средств «Государственной программы строительства ветровых электростанций Украины». Общая стоимость проектирования, разработки документации и строительства в МЦ «Медики-Чернобылю» первого образца ветроустановки составила около 1,5 млн долларов США. И только к концу 2002 года ветроустановка была готова к сдаче рабочей комиссии в опытную эксплуатацию. Однако дальнейшие работы были остановлены из-за разрушения опорно-подшипникового узла ветроустановки. Экспертиза дефектного сварного шва, проведенная Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, показала, что причиной разрушения опорно-подшипникового узла ветроустановки явилось крайне низкое качество сварного соединения конусной оболочки узла с фланцем, которое было выполнено с грубыми нарушениями требований нормативной документации [23]. При утверждении экспертного заключения заместитель директора института, академик НАН Украины Л. М. Лобанов заметил, что так плохо выполнить сварку мог только ученик, впервые взявший в руки сварочную горелку.

С 2004 года работы по вертикально-осевым ветроустановкам с Н-ротором Дарье с широким диапазоном мощностей проводятся Институтом транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг», г. Днепропетровск в рамках пилотного инновационного проекта Международной научно-промышленной корпорации «ВЕСТА» «Разработка и производство новейших автономных интегрированных систем электроснабжения с использованием солнечных электрических систем, ветроэнергоустановок и энергонакопителей», принятого Постановлением Кабинета Министров Украины от 27 августа 2002 года №1244. Специалисты института «Трансмаг» занимаются исследованиями вопросов аэродинамики, прочности, динамики, управления и разработкой методик расчетов характеристик и проектирования вертикально-осевых ветроустановок с Н-ротором Дарье. Отдельным направлением деятельности института «Трансмаг» являются теоретические и экспериментальные исследования и разработка вертикально-осевых ветроустановок с ротором на магнитном подвесе. Институт разрабатывает несколько перспективных вертикально-осевых ветроустановок различных классов мощности. Ветроустановка малой мощности с ротором Савониуса на магнитном подвесе отличается конструктивной простотой и повышенными характеристиками за счет применения принципа магнитной левитации ротора. Ветроустановка «WESTA-20» мощностью 20 кВт является более эффективной модификацией модели «ЭСО-0020» за счет принципиально новой системы генерирования электроэнергии и конструктивного исполнения ротора. Новая ветроустановка «WESTA-30» мощностью 30 кВт разработана с учетом недостатков модели «ЭСО-0020», выявленных при более чем 10-летней ее эксплуатации в различных условиях, что позволило в 1,5 раза уменьшить стоимость 1 кВт установленной мощности. Ветроустановка мегаваттного класса разрабатывается с применением новых технических решений, позволяющих в полной мере реализовать достоинства схемы Н-ротора Дарье. Отдельным направлением работ института является исследования в области создания на базе автономного вертикально-осевого ветроагрегата «WESTA-20» специализированных промышленных установок для опреснения воды, сбора и переработки

водорослей рек и озер, плавающей автономной ветро-солнечной системы электрообеспечения.

На предприятии «ВЕСТА-Днепр», Днепропетровск, установлен опытно-промышленный образец ветроагрегата «WESTA-20», на котором проводятся исследования аэродинамики ротора, прочности и динамики конструкции, электрогенерирующей системы, а также испытания новых технических решений вертикально-осевых ветроустановок с ротором Дарье с прямыми лопастями. В производственном процессе ветроустановка применяется для зарядки аккумуляторов парка электрокар предприятия «ВЕСТА-Днепр».

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара (в то время еще Днепропетровский государственный университет) в середине 1980-х годов одним из первых в Украине начал заниматься исследованиями вертикально-осевых роторов Дарье. В это время была издана монография по аэродинамике ветродвигателей, в которой были рассмотрены основные известные в то время методы аэродинамического расчета вертикально-осевого ротора Дарье [1]. В начале 1990-х годов кафедра аэрогидромеханики активно включилась в расчетно-теоретический анализ параметров Н-ротора Дарье для вертикально-осевой ветроустановки «ВТО 1250Б» КБ «Южное». В ДНУ им. О. Гончара были разработаны инженерные методики расчета проектных параметров вертикально-осевой ветроустановки с ротором Дарье, основанные на методе дискретных вихрей и двухдисковой импульсной теории, проведены исследования характеристик траверс и аэродинамических тормозных устройств. В последние годы основные усилия специалистов ДНУ были направлены на разработку способов повышения эффективности использования ветроустановок применительно к локальным ветровым условиям Украины. Также проводятся исследования новых направлений развития отечественной ветроэнергетики, а именно: применение вертикально-осевых ветроустановок в городских условиях и в оффшорных ветровых электростанциях [2; 20].

В 1980-х годах ХАИ (ныне Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ») приступил к исследованиям аэродинамики и систем генерирования энергии вертикально-осевых ветроустановок с ротором Дарье. В рамках этих работ исследовались вопросы выбора оптимальных размеров, энергетических и регулировочных характеристик, совершенствования конструкции лопастей ротора Дарье. На моделях в аэродинамической трубе проводились экспериментальные исследования характеристик вертикально-осевого ротора, а также были разработаны методики аэродинамического расчета ротора Дарье, прогнозирования мощностных и моментных характеристик вертикально-осевого ротора с различными аэродинамическими профилями лопастей. По тематике системы генерирования вертикально-осевых ветроустановок проводились комплексные исследования характеристик ротора, генератора и преобразователя напряжения вертикально-осевых ветроустановок малой мощности, работы по автоматическому регулированию возбуждения генератора вертикально-осевой ветроустановки, исследования вопросов преобразования и стабилизации напряжения в системе генерирования электроэнергии, а также разрабатывались генераторы для применения в вертикально-осевых ветроустановках малой мощности. В 2011 году учебнику «Невичерпна енергія» НАУ им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», в котором две книги посвящены ветроэнергетике, была присуждена Государственная премия Украины в области науки и техники [15; 16].

В 1990-х годах в Сумском государственном университете проводились исследования вертикально-осевых роторов, которые к 1994 году сформировались в два основных направления: исследования аэродинамики Н-ротора Дарье и разработка ветроустановок с Н-ротором малой мощности [10]. В рамках первого направления проводились теоретические и экспериментальные исследования по определению оптимальных геометрических параметров Н-ротора, эффективных профилей, числа, удлинения, угла установки и других параметров лопастей. Аэродинамические исследования выполнялись как в аэродинамической трубе и гидробассейне, так и в натуральных условиях. Был получен ряд интересных решений принципиально нового незамкнутого профиля КН-6 с демпфером отрывных течений, позволяющим существенно улучшить аэродинамическое качество лопастей [6]. Большая серия опытов подтвердила эффективность нового профиля. По второму направлению исследований проводился поиск рациональной схемы и основных конструктивных элементов вертикально-осевых ветроустановок малой мощности. Разрабатывались новые методы экспериментальных исследований моделей, в том числе измерения вращающего момента ротора, визуализации течений в окрестности ротора, управления частотой вращения ротора. Создавались и испытывались экспериментальные образцы ветроустановок мощностью до 10 кВт.

В Институте гидромеханики НАН Украины начиная с конца 1990-х годов проводятся теоретические и экспериментальные исследования вопросов повышения эффективности Н-ротора Дарье путем управления угла лопастей при их движении по круговой траектории, а также изыскания по разработке и реализации в полномасштабных вертикально-осевых ветроустановках алгоритмов и механизмов pitch лопасти [8; 9].

**Выводы.** В 1980 – 1990-х годах в Украине проводились масштабные работы по созданию принципиально новых конструкций вертикально-осевых ветроустановок, которые привели к следующим результатам:

1. Создана широкая кооперация научных, проектных и промышленных предприятий – разработчиков и изготовителей вертикально-осевых ветроустановок.

2. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные научными предприятиями, показали принципиальную возможность создания эффективных вертикально-осевых ветроустановок с Н-ротором Дарье, конструкторские проработки, проведенные проектными предприятиями, – возможность создания надежных и работоспособных конструкций, а технологические проработки, проведенные промышленными предприятиями, подтвердили возможность качественного изготовления разработанных ветроустановок.

3. Созданные в Украине вертикально-осевые ветроустановки с Н-ротором Дарье мощностью 20, 30 и 420 кВт по своим технико-экономическим характеристикам не уступают зарубежным аналогам, а при эксплуатации в различных климатических условиях показали надежную и эффективную работу.

4. В последние годы в Украине продолжаются научно-исследовательские работы по повышению эффективности и надежности вертикально-осевых ветроустановок, которые свидетельствуют о возможности их дальнейшего совершенствования.

### Библиографические ссылки

1. **Абрамовский Е. Р.** Аэродинамика ветродвигателей / Е. Р. Абрамовский, С. В. Городько, Н. В. Свиридов. – Д.: Изд-во ДГУ, 1987. – 220 с.
2. **Абрамовский Е. Р.** Расчетный анализ параметров ветродвигателей, предназначенных для использования в застроенной зоне городов / Е. Р. Абрамовский, С. В. Тарасов, И. Ю. Костюков // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: сб. наук. праць ДНУ. – Т. XIII. – Д.: Пороги, 2012. – С. 3–15.
3. **Бордюгов В.** Мифы и реалии украинской ветроэнергетики / В. Бордюгов, В. Подгуренко // Зеркало недели. – 2002. – № 17.
4. Ветроэнергетика Украины / УВЕА, 2011. – 16 с. Режим доступа: [http://www.uwea.com.ua/files/WIND\\_ENERGY\\_UKRAINE\\_2011\\_rus.pdf](http://www.uwea.com.ua/files/WIND_ENERGY_UKRAINE_2011_rus.pdf).
5. Виброусталостные испытания опорной башни ветроэнергетической установки ЭСО-0020: научно-технический отчет / ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского; рук. Стучалкин Ю. А.; исполн. Нестеренко Г. И. – 1996. – 41 с.
6. **Волков Н. И.** Влияние демпфера отрывных течений на аэродинамические характеристики лопасти ортогонального ветродвигателя / Н. И. Волков // Вісн. Сум. держ. ун-ту. – 1994. – № 2. – С. 43–46.
7. **Гагач Д. К.** Первая ветродизельная электростанция на Таймыре / Д. К. Гагач, В. К. Мальцев, И. Ю. Костюков, В. А. Михайлов, А. Г. Шкурупий // Энергетик. – 2001. – № 9. – С. 10–12.
8. **Гринченко В. Т.** Исследование и оптимизация рабочих характеристик ветроротора с вертикальной осью вращения с механизмом управления лопастями / В. Т. Гринченко, В. П. Каян, В. А. Кочин // Доповіді НАН України. – 2008. – № 12. – С. 62–68.
9. **Каян В. П.** Оптимизация рабочих характеристик полномасштабного макета ветроротора Дарье с прямыми управляемыми лопастями / В. П. Каян, А. Т. Лебедь // Прикладна гідромеханіка. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 16–35.
10. **Коваленко В. М.** Исследования по ветроэнергетике в Сумском государственном универ-ситете / В. М. Коваленко // Вісн. Сум. держ. ун-ту. – 1994. – № 1. – С.84–89.
11. **Конеченков А.** Воздушные мегаватты / А. Конеченков, Ю. Матвеев // ММ Деньги и Технологии. – 2002. – Апр. – С. 30–32.
12. **Конеченков А.** Ліцензійний шлях української вітроенергетики / А. Конеченков // Зелена енергетика. – 2002. – № 3(7). – С. 5–11.
13. **Костюков И. Ю.** Ретроспектива и перспектива вертикально-осевой ветроэнергетики. Статья I. История и мотивация развития вертикально-осевых ветроустановок как нового направления ветроэнергетики / И. Ю. Костюков, С. В. Тарасов // Вісник Дніпропетр. ун-ту. – № 1/2, Т. 22. Серія : Історія і філософія науки і техніки. Вип. 22. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту. – 2013.
14. **Костюков И. Ю.** Вертикально-осевая ветроустановка мощностью 20 кВт / И. Ю. Костюков, В. А. Михайлов, П. Г. Капля, О. Л. Перфилов // Энергетик. – 1997. – № 10. – С. 14.
15. **Кривцов В. С.** Невичерпна енергія. Книга 1. Вітроелектрогенератори / В. С. Кривцов, О. М. Олейников, О. І. Яковлев. – Х.: ХАІ, 2005. – 396 с.
16. **Кривцов В. С.** Невичерпна енергія. Книга 2. Вітроенергетика / В. С. Кривцов, О. М. Олейников, О. І. Яковлев. – Х.: ХАІ. – 2005. – 502 с.
17. Письмо Госкомитета СССР по науке и технике № ТЭ-10-2-3/26, М.,

27 февр. 1990.

18. Результаты испытаний натурального образца ветроэлектрической установки ЭСО-0020 производства предприятия «ЭСО» в аэродинамической трубе Е-101 ЦАГИ: научно-технический отчет / ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского; рук. Стучалкин Ю. А.; исполн. Поповский В. Н. – 1994. – 97 с.

19. Сертификат № ГОСТ Р. УА.АЕ01.1.3.0010 / Госстандарт России. – М., 28 февр. 1998. – 2 с.

20. **Тарасов С. В.** Расчетный анализ аэродинамических и энергетических характеристик ветродвигателей мегаваттного класса, предназначенных для размещения на мелководных акваториях Украины // С. В. Тарасов, И. Ю. Костюков, Е. Р. Абрамовский, Н. Н. Лычагин // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: сб. наук. праць ДНУ. – Т. XIV. – Д.: Пороги, 2012. – С. 97–108.

21. Технический проект «Ветроэлектрическая установка ВТО-1250Б», КБ «Южное». – 1990 г.

22. Технический проект «Ветроэлектрическая установка «Южная» мощностью 350 кВт» КБ «Южное». – 1992 г.

23. Экспертное заключение качества сварного соединения приварки конуса к фланцу вертикально-осевой ветроустановки мощностью 420 кВт / Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины; рук. Лобанов Л.М.; исполн. Гарф Э.Ф. – К., 2005. – 2 с.

24. Wind Energy – the Facts / European Commission, Directorate General for Energy, EWEA, 2008. – P. 279.

*Надійшла до редколегії 25.12.2013*