

УДК 577.4; 130.1

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

*Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара

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

РЕТРОСПЕКТИВА И ПЕРСПЕКТИВА ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

Статья III. Перспективы дальнейшего развития вертикально-осевых ветроустановок

Рассмотрены особенности конструкции и эффективность работы ветроустановок разных типов, определены перспективные направления развития вертикально-осевых ветроустановок с Н-ротатором Дарье.

Ключевые слова: вертикально-осевая ветроустановка, Н-ротатор Дарье, эффективность ветроустановки, городская ветроустановка, офшорная ветроустановка.

Розглянуто особливості конструкції й ефективність роботи вітроустановок різних типів та визначено перспективні напрямки розвитку вертикально-осьових вітроустановок з Н-ротатором Дар'є.

Ключові слова: вертикально-осьова вітроустановка, Н-ротатор Дар'є, ефективність вітроустановки, міська вітроустановка, офшорна вітроустановка.

Features of a design and an overall performance different types wind turbine are considered and perspective directions of development vertical axis wind turbines with a Darrieus H-rotor are defined.

Key words: vertical axis wind turbine, Darrieus H-rotor, efficiency of wind turbine, urban wind turbine, offshore wind turbine.

Введение. Энергия ветра начала служить человеку несколько тысячелетий тому назад. При этом она использовалась по двум основным направлениям: в качестве движителя парусных лодок и судов, а также источника энергии ветряных двигателей, применявшихся в качестве силовых приводов мельниц и устройств для перекачки воды. В течение нескольких столетий ветер выполнял огромную работу, когда с помощью парусного флота были совершены все основные географические открытия, осуществлялись торговые и хозяйственные перевозки по рекам, морям и океанам, проводились морские военные сражения. Одновременно с парусом все более широкое применение находили ветряные двигатели. Они постоянно развивались и совершенствовались, пройдя путь от примитивных ветромеханических устройств мощностью несколько киловатт до современных эффективных ветроустановок мегаваттной мощности, которые применяются для промышленного производства электроэнергии в составе ветровых электростанций. Сегодня специалисты в области ветроэнергетики тщательно исследуют возможности двух основных типов ветроустановок: горизонтально-осевых ветроэлектрических установок (ВЭУ ГО) и вертикально-осевых ветроэлектрических установок (ВЭУ ВО) с точки зрения их эффективного применения в современных технологиях.

Основным отличием этих ветроустановок является расположение оси вращения их ротора. Ось вращения ротора традиционных ВЭУ ГО, который похож на пропеллер, расположена горизонтально и совпадает с направлением ветрового потока. Горизонтально-осевой ротор преобразует часть энергии поступательного движения ветрового потока в энергию своего вращения и передает вращаю-

щий момент на мультипликатор, повышающий скорость вращения вала ротора до скорости электрического генератора, который и вырабатывает электроэнергию. Ротор, мультипликатор, генератор и часть других систем горизонтально-осевых ветроустановок составляют общий узел – гондолу, которая расположена на башне ветроустановки. При изменении направления ветра гондола поворачивается, постоянно обеспечивая параллельность оси вращения ротора и скорости ветрового потока. Этот тип ветроустановок в настоящее время преобладает на мировом ветроэнергетическом рынке.

Ось вращения Н-ротора Дарье ВЭУ ВО расположена вертикально, и вокруг нее вращаются вертикальные прямые лопасти, закрепленные на консольных траверсах. Свое название вертикально-осевой Н-ротор получил из-за своей двухлопастной конфигурации, в которой две вертикальные лопасти ассоциируются с вертикальными элементами латинской буквы Н, а горизонтальный элемент между ними – с горизонтальной консольной траверсой. Вертикально-осевой Н-ротор расположен на башне, а вращающий момент с помощью вертикального вала передает на мультипликатор, расположенный в ее основании. От мультипликатора вращающий момент с необходимой скоростью вращения передается на электрический генератор, расположенный рядом с генератором. Так как ось вращения Н-ротора находится в вертикальном положении, то он воспринимает ветровой поток любого направления и, в отличие от горизонтально-осевого ротора, ему не надо ориентироваться по ветру.

Данная работа является завершающей частью исследования «Ретроспектива и перспектива вертикально-осевой ветроэнергетики», которое состоит из трех статей. В первой статье «История и мотивация развития вертикально-осевых ветроустановок как нового направления ветроэнергетики» [4] рассмотрена общая история и причины повышения или спада интереса к ветроэнергетике на разных этапах техногенной деятельности общества от примитивных технологий древнего Китая и Персии до нашего времени. Также проведен исторический обзор создания и развития основных конфигураций вертикально-осевого ротора Дарье и ветроустановок на базе этих ветродвигателей. Во второй статье «Развитие вертикально-осевого направления ветроэнергетики в Украине» рассмотрена история развития вертикально-осевого направления ветроэнергетики в Украине, основные этапы этого развития и предприятия, принимавшие участие в создании первых украинских вертикально-осевых ветроустановок. Также изложены основные научные, проектные и инженерные исследования и разработки украинских специалистов по изучению теоретических основ и созданию промышленных образцов вертикально-осевых ветроустановок [8]. В настоящей третьей статье рассмотрены конструктивные особенности и эффективность горизонтально-осевых и вертикально-осевых ветроустановок, на базе проведенного анализа определены направления дальнейшего развития вертикально-осевых ветроустановок с Н-ротором Дарье, перспективы их применения в современных технологиях.

Постановка проблемы. В настоящее время лидерство среди ветроустановок всех классов мощности завоевали горизонтально-осевые ветроагрегаты. Однако в последние годы Н-ротор Дарье стал широко применяться в малых ветроустановках мощностью до 50 кВт. Сегодня около 35% коммерческих малых ветроустановок выполнены по вертикально-осевой схеме [4]. Что касается средних ветроустановок мощностью от 100 до 1000 кВт, то на мировом рынке предлагается только несколько моделей вертикально-осевых агрегатов с ротором Дарье, а ВЭУ

ВО мегаваттної потужності совсем відсутствуют. Однак з накопленням теоретических фундаментальних знань в області аеродинаміки, прочності, динаміки конструкції, а також опыта розробки, конструювання, виготовлення і експлуатації вертикально-осевих ветроустановок с Н-ротором Дарье різних класов потужності становиться ясно, що вони обладують значительним техніческим потенціалом і в определенных умовах можуть забезпечити більш ефективну роботу, чем горизонтально-осевые аналоги. Поэтому на современном этапе развития ветроэнергетики исследование перспектив и способов эффективного применения вертикально-осевых ветроустановок является актуальной проблемой.

Цель написания статьи. Целью публикации является определение перспективных направлений развития вертикально-осевых ветроустановок с Н-ротором Дарье различных классов мощности. Для достижения указанной цели необходимо решить ряд таких задач, как анализ технических, экологических и эксплуатационных особенностей ветроустановок горизонтально-осевой и вертикально-осевой схем, эффективность преобразования энергии ветра горизонтально-осевым ротором и Н-ротором Дарье и по результатам проведенного исследования определить области применения ВЭУ ВО в современных условиях, в которых обеспечивается их наиболее эффективная работа.

Особенности горизонтально-осевых и вертикально-осевых ветроустановок. В 1980-х годах, когда вертикально-осевые установки с роторами Дарье достигли высокого технического и технологического уровня, и в то же время возросли единичные мощности горизонтально-осевых агрегатов, между сторонниками двух направлений ветроэнергетики развернулась дискуссия о преимуществах и недостатках каждого из этих типов ветроустановок и перспективах их развития. В качестве критериев при сравнительном анализе принимались технические, экономические, экологические, эксплуатационные и другие характеристики и особенности этих конструкций [6].

Еще в самом начале исследований этой проблемы Р. Рэнжи и П. Саус отметили такие принципиальные особенности вертикально-осевых ветроустановок, как нечувствительность к изменению направления ветра и возможность расположения мультипликатора и генератора на уровне фундамента. Позже были определены и другие, не менее важные принципиальные отличия конструкций ветроустановок горизонтально-осевой и вертикально-осевой схем. Для сравнения использовались такие критерии, как аэродинамическая эффективность, количество вырабатываемой энергии, способы запуска ветроустановки, рациональность силовой схемы ротора, динамические характеристики, конструкция лопасти, трансмиссии и опорной башни, способы регулирования мощности, степень быстроходности, надежность, массовые характеристики, уровень нагрузок, воздействие на окружающую среду, монтаж, техническое обслуживание и др. Рассмотрим более подробно характеристики и технические решения ВЭУ ГО и ВЭУ ВО, чаще всего упоминаемые в литературе при их сравнительном анализе.

Опыт эксплуатации ВЭУ ГО и ВЭУ ВО показывает, что воздействие обоих типов ветроустановок на окружающую среду, по сравнению с традиционными генерирующими источниками энергии, незначительно. Ветроустановки не требуют затопления больших территорий и нарушения естественных экологических условий, как это происходит при строительстве гидроэлектростанций. Они не выбрасывают в атмосферу вредные химические и радиационные отходы, как тепловые и атомные электростанции. Им не нужна разрушающая экосистему добыча

и транспортировка огромного количества ископаемого органического топлива, которая необходима для работы тепловых электростанций. Однако по некоторым параметрам эти ветроустановки могут неблагоприятно влиять на человека и окружающую фауну. Основными факторами вредного воздействия на человека, животных, птиц и насекомых являются шумы инфразвукового и ультразвукового диапазона работающих ветроустановок, элементы вращающегося ротора, а также оторвавшаяся с лопастей наледь и обломки конструкции при разрушении лопастей. Влияние указанных отрицательных факторов на человека в принципе можно нейтрализовать созданием вокруг ветроустановок буферной зоны, размеры которой зависят как от характеристик ветроустановок, так и от рельефа местности. Мнение об опасности ветроустановок для птиц связаны с первыми ветростанциями, построенными в Калифорнии в 1970–1980-х годах. Эти станции оказались расположенными на путях миграции птиц, что действительно приводило к их массовой гибели. Для устранения этих факторов в большинстве стран были разработаны руководящие положения по максимальному снижению влияния ветроустановок на окружающую среду. Сегодня гибель птиц от ветроустановок составляет всего 0,02% от общего количества птиц, погибших на промышленных и бытовых сооружениях [14]. Существенной разницы между влиянием на окружающую среду ВЭУ ГО и ВЭУ ВО нет.

Что же касается сравнительного анализа технических характеристик и конструктивных решений ВЭУ ГО и ВЭУ ВО, то неправомерность такого подхода заложена в самой постановке вопроса о техническом преимуществе одного типа ветроустановок над другим по следующим причинам. Во-первых, сложное сочетание присущих каждой схеме технических решений не позволяет характеризовать их методами качественной оценки. Например, коэффициент быстроходности Н-ротора Дарье (отношение скорости лопасти к скорости ветра) не превышает трех единиц, что в 2–3 раза ниже быстроходности горизонтально-осевых ветроустановок. Такой низкий уровень быстроходности, с одной стороны, значительно улучшает условия эксплуатации вертикально-осевых ветроустановок в части снижения уровня динамичности нагрузок, снижения требований к опорно-подшипниковым и трансмиссионным узлам, уменьшения уровня механических и аэродинамических шумов, уменьшения опасности разлета оторвавшейся с лопастей наледи и обломков конструкции при разрушении лопастей. С другой стороны, низкий уровень быстроходности обуславливает повышенный вращающий момент на тихоходных узлах трансмиссии, более высокое передаточное число мультипликатора, что, по сравнению с аналогичными узлами более быстроходных горизонтально-осевых ветроустановок, приводит к увеличению их материалоемкости, массивности, а значит, и стоимости. Другим примером может служить одно из основных преимуществ вертикально-осевых ветроустановок: расположение на фундаменте мультипликатора и генератора. Однако за такое преимущество ветроустановкам с ротором Дарье с криволинейными лопастями приходится расплачиваться применением длинного вращающегося опорного вала с системой растяжек (на ветроустановке Eole С длина вала 96 м, а диаметр 5 м), а ветроустановкам с Н-ротором – применением длинного трансмиссионного вала с зубчатыми муфтами и промежуточными опорами, передающего вращающий момент от ротора, расположенного на башне, на мультипликатор, установленный на фундаменте (на ветроустановке ЭСО-0420 длина вала около 30 м, диаметр – 320 мм, а толщина стенки более 20 мм). Введение в конструкцию вращающегося трансмиссионного

вала, соизмеримого с высотой ветроустановки, увеличивает ее массу, усложняет конструкцию и ухудшает динамические характеристики.

Во-вторых, в современных ветроустановках на высоком техническом уровне решены все их конструктивные и технологические проблемы. За последние десятилетия накоплен достаточный опыт проектирования, изготовления и эксплуатации узлов ветроустановок всего диапазона мощностей и создана обширная база нормативной документации, определяющая полный объем требований к этим конструкциям. Поэтому сегодня не имеет смысла говорить, например, о системе ориентации на ветер или сложности конфигурации лопасти, как о недостатках ВЭУ ГО. Механизмы ориентации на ветер горизонтально-осевых роторов диаметром от 50 см до 120 м имеют высокую надежность и обеспечивают эффективную работу ветроустановок во всем диапазоне рабочих скоростей ветра, а технология изготовления лопастей длиной порядка 60 м из композиционных материалов сегодня не представляет технической сложности и обеспечивает работоспособность конструкции в течение срока службы, который для ВЭУ ГО мегаваттной мощности составляет не менее 20 лет.

В-третьих, в последние годы наблюдается тенденция заимствования ветроустановками обоих типов друг у друга принципиальных технических решений, позволяющих повысить их эффективность и снизить стоимость вырабатываемой энергии. Так, в горизонтально-осевых ветроустановках с конца 1990-х годов стали применять алгоритм работы с переменной скоростью вращения ротора, позволяющий обеспечить максимальную выработку энергии во всем рабочем диапазоне скоростей ветра, который до этого был прерогативой только вертикально-осевых агрегатов. При применении в вертикально-осевой ветроустановке «H-Rotor 20/56» безмультипликаторной схемы прямой передачи мощности разработчики отказались от размещения синхронного многополюсного генератора с возбуждением от постоянных магнитов на фундаменте и установили его, аналогично горизонтально-осевым ветроустановкам, на башне рядом с ротором, что позволило создать конструкцию высокой надежности только с одним вращающимся узлом. В свою очередь, оценив перспективность безмультипликаторной схемы прямой передачи мощности впервые примененной в ВЭУ ВО, разработчики ВЭУ ГО стали широко использовать многополюсные тихоходные генераторы. Сегодня около 85% горизонтально-осевых ветроустановок мощностью до 10 кВт выполняются с прямой передачей мощности от ротора к многополюсному генератору, заимствованной у ВЭУ ВО [2]. Схема прямой передачи мощности начинает применяться и на более крупных горизонтально-осевых ветроустановках мощностью несколько сот киловатт, например, компанией Enercon.

В современном мире ветроустановки применяются для электроснабжения множества объектов с различными требованиями: от автономных микроветроустановок мощностью от 0,04 до 0,25 кВт для зарядки мобильных телефонов до крупных коммерческих сетевых ветроустановок мощностью 7,5 МВт, входящих в состав промышленных ветроэлектростанций, работающих в централизованных энергосистемах. Выбор типа и конфигурации ветроустановки обычно зависит не от ее отдельных технико-экономических характеристик или конструктивных решений, а определяется совокупностью ее свойств, которые позволяют обеспечить требования объекта по его электроснабжению в заданных климатических условиях эксплуатации. При этом критерии выбора ветроустановки для разных объектов могут быть прямо противоположными. Например, вертикально-осевые ветроу-

становки с ротором Савониуса значительно менее эффективные, чем ВЭУ ГО или ВЭУ ВО с ротором Дарье, однако благодаря своей простоте, высокой прочности и надежности они широко применяются для длительного электроснабжения необслуживаемых исследовательских приборов в сложных климатических условиях Антарктиды. Вертикально-осевая ветроустановка с ротором Дарье «H-Rotor 20/56», несмотря на ее высокую стоимость, применяется для автономного электроснабжения труднодоступных объектов в сложных климатических условиях антарктических станций и высокогорья. При этом основным требованием к ней была высокая надежность и минимальное обслуживание при эксплуатации. Критерий стоимости электроэнергии для этой ветроустановки является второстепенным [15]. В противоположность предыдущему примеру, основным критерием для коммерческих ветроустановок, применяемых в промышленных ветровых электростанциях, является стоимость вырабатываемой энергии. Поэтому для этих целей выбирают горизонтально-осевые ветроустановки мегаваттной мощности, которые сегодня в наибольшей степени удовлетворяют требованиям максимальной выработки энергии и минимальной стоимости оборудования, строительства и эксплуатации. Таким образом, общее сравнение ВЭУ ГО и ВЭУ ВО и дискуссия о техническом и экономическом приоритете какого-то типа ветроустановок не имеют смысла, т.к. выбор схемы ветроустановки для электроснабжения данного объекта зависит только от требований, определяемых конкретными условиями ее применения.

Эффективность горизонтально-осевого ротора и H-ротора Дарье. Основными экономическими показателями, которые применяются в ветроэнергетике для оценки эффективности ветроустановок, являются коэффициент мощности ротора, стоимость 1 кВт установленной мощности и стоимость вырабатываемой энергии. Говорить о сравнении стоимости 1 кВт установленной мощности и стоимости вырабатываемой энергии горизонтально-осевых и вертикально-осевых ветроустановок можно только для узкого диапазона агрегатов мощностью до 50 кВт, т.к. коммерческие ВЭУ ВО с ротором Дарье мощностью свыше 50 кВт на мировом рынке отсутствуют. Поэтому при сравнении эффективности роторов будем использовать коэффициент мощности (отношение мощности, отбираемой ротором у ветрового потока, к мощности ветрового потока), который, в принципе, является универсальным критерием и определяет технический уровень конструкции. На современном этапе развития ветроэнергетики коэффициент мощности наиболее совершенных коммерческих горизонтально-осевых роторов достиг уровня $C_p = 0,54$. Коэффициент мощности современных вертикально-осевых роторов Дарье ниже и составляет не более $C_p = 0,435$ [12].

Как известно, в основе работы обоих роторов лежит принцип преобразования кинетической энергии ветрового потока в механическую энергию их вращения, при этом вращающий момент роторов создается тангенциальной составляющей подъемной силы, возникающей на лопастях аэродинамического профиля. В соответствии с классической теорией идеального ветродвигателя Жуковского-Бетца, максимальная величина коэффициента мощности горизонтально-осевого ротора и вертикально-осевого ротора Дарье равна 0,593. Теоретическая эффективность обоих роторов находится практически на одном уровне, т.к. определяется одним и тем же принципом преобразования энергии, а уровень достигнутой эффективности горизонтально-осевых ветроустановок значительно выше. В этой связи представляет интерес вопрос о причине разницы достигнутой эффективности ВЭУ ГО

и ВЭУ ВО: является ли более высокое значение коэффициента мощности современных горизонтально-осевых ветроустановок принципиальным отличием этой схемы или объясняется конструктивным несовершенством ВЭУ ВО.

Коэффициент мощности реального ротора любого типа имеет величину более низкую, чем теоретическое максимальное значение идеального ротора, и зависит от уровня потерь энергии на роторе в процессе ее преобразования. Все потери на роторе можно разбить на две группы: потери, связанные с отличиями реальной конструкции от идеального ветродвигателя, и потери, определяемые конструкцией ротора, т.е. схемой преобразования ротором аэродинамической силы ветрового потока в тангенциальную силу, создающую его вращающий момент. К первой группе относятся потери, связанные с отличием количества, размеров и скорости вращения лопастей реальных роторов от идеального ветродвигателя, а также с отличиями реального воздушного потока от потенциального течения идеальной жидкости (концевые и профильные потери на лопастях и потери на закрутку струи за ротором). Для горизонтально-осевого ротора и ротора Дарье с соизмеримыми мощностями и площадями ометаемой поверхности параметры лопастей и характеристики течения будут отличаться незначительно, на основании чего можно сказать, что для роторов обоих типов эти потери будут примерно одинаковые.

Анализ потерь второй группы проведем отдельно для горизонтально-осевого ротора и ротора Дарье. Плоскость вращения горизонтально-осевого ротора расположена перпендикулярно набегающему потоку, поэтому он пересекается с плоскостью ротора и отдает ему часть своей энергии только один раз. При установившемся режиме работы (постоянная скорость ветра и угловая скорость вращения ротора) углы атаки сечений лопасти, местная скорость набегающего потока, аэродинамическая тянущая сила и вращающий момент горизонтально-осевого ротора будут постоянными и не зависят от положения лопасти на траектории вращения. Однако при постоянной угловой скорости вращения ротора поперечные сечения лопасти, расположенные на разных расстояниях от оси вращения, будут иметь разную линейную скорость, а значит, и разную местную скорость набегающего потока. Разные сечения лопасти будут находиться в разных режимах обтекания потоком, поэтому лопасть будет работать в неоптимальных энергетических условиях с потерей мощности. Для работы всех сечений в одинаковых или близких режимах обтекания с максимальной эффективностью лопасть горизонтально-осевого ротора выполняют с круткой и сужением хорды сечений по длине, что обеспечивает приближение угла атаки всех сечений лопасти к их оптимальному значению и равномерному распределению вращающего момента по длине лопасти. При изменении скорости ветра и соответственно угловой скорости вращения лопасти для обеспечения максимального съема энергии величина углов атаки сечений лопасти изменяется с помощью поворота лопасти относительно ее продольной оси. Таким образом, конструкция лопасти с круткой и сужением сечений по длине в комбинации со способом регулирования угловой скорости вращения ротора и изменения угла атаки с помощью угла поворота лопасти в зависимости от скорости ветра позволяют существенно снизить потери горизонтально-осевого ротора, которые в современных ВЭУ ГО составляют около 10–15% максимального теоретического значения коэффициента мощности.

У ротора Дарье вектор ветрового потока лежит в плоскости вращения, поэтому он дважды пересекает траекторию движения лопастей и дважды взаимодействует с ними: на наветренной и подветренной половине ротора. В отличие от

горизонтально-осевого ротора, все сечения прямой, вертикально расположенной и жестко закрепленной на траверсе лопасти Н-ротора, вращающейся относительно вертикальной оси, при установившемся режиме работы (постоянная скорость ветра и угловая скорость вращения ротора), имеют одну угловую скорость вращения, а значит, и одну местную скорость набегающего потока и один угол атаки. При этом местная скорость набегающего потока и угол атаки лопасти и соответственно тангенциальная составляющая подъемной силы и вращающий момент лопасти за один оборот циклически изменяются. На отдельных участках траектории, когда движение лопасти совпадает с направлением потока (направлена к потоку задней кромкой) или лопасть движется навстречу потоку (направлена к потоку передней кромкой), тангенциальная составляющая аэродинамической подъемной силы и вращающий момент лопасти имеют даже отрицательные значения. Поэтому лопасть с фиксированным углом установки обеспечивает максимальный отбор энергии потока только на отдельных участках траектории вращения. Кроме того, даже при установившемся режиме работы вертикально-осевого Н-ротора возникают нестационарные аэродинамические явления, такие как динамический срыв потока, искривление набегающего потока, взаимодействие лопастей на подветренной половине траектории со своими следами и следами других лопастей, траверс и башни, которые приводят к дополнительным потерям мощности. Суммарные потери мощности Н-ротора с фиксированным углом лопасти, вызванные схемой преобразования аэродинамической силы ветрового потока, определяются переменной величиной вращающего момента в течение одного оборота, в зависимости от азимутального положения лопасти на траектории вращения, и нестационарным характером обтекания ротора ветровым потоком и составляют около 30% предельного теоретического значения его коэффициента мощности. Таким образом, при одном и том же принципе работы, более высокий уровень потерь мощности Н-ротора с фиксированным углом лопасти, по сравнению с горизонтально-осевым ротором, определяется именно особенностями этого варианта вертикально-осевой схемы преобразования энергии ветра.

Если обратиться к патенту Дж. Дарье, то заявленная конструкция ротора с прямыми лопастями снабжена кинематическим устройством в виде тяг, соединяющих лопасти с вращающимся эксцентриком, которое заставляет лопасти отклоняться от касательной к окружности вращения с частотой, равной частоте вращения ротора. В этом случае лопасти всегда находятся в таком положении к местной скорости набегающего потока, при котором не будет превышать угол атаки отрыва потока от профиля лопасти. Другими словами, оригинальный ротор Дарье предполагает регулирование угла установки лопасти в зависимости от ее положения на окружности вращения, которое обеспечивает угол атаки на каждом участке окружности, при котором достигается максимальный отбор лопастью энергии ветрового потока и минимальные потери мощности. Во всех рассмотренных выше ветроустановках с ротором Дарье, для упрощения конструкции, повышения надежности и снижения объема теоретических исследований и экспериментальной отработки, применялась менее эффективная схема ротора с фиксированным углом установки лопасти, чем и объясняются повышенные потери мощности и заниженные значения достигнутого коэффициента мощности этих агрегатов.

Перспективы развития вертикально-осевых ветроустановок с Н-ротором Дарье. Как отмечалось выше, в 1970-х – 1990-х годах в США, Канаде и Великобритании действовали программы развития вертикально-осевых ветроу-

становок, финансируемые правительствами этих стран, ставившие своей целью создание средних (мощностью от 100 до 1000 кВт) и крупных (мощностью свыше 1000 кВт) наземных и оффшорных ВЭУ ВО с роторами Дарье с криволинейными и прямыми лопастями, которые в период энергетического кризиса могли бы стать экономически выгодными альтернативными источниками энергии. В это же время в Америке и Европе проводились работы по программам развития промышленных горизонтально-осевых ветроустановок мегаваттной мощности. В рамках программы NASA, финансируемой министерством энергетики США, в период с 1975 по 1987 года была создана серия горизонтально-осевых ветроустановок MOD мощностью от 100 кВт (ветроустановка MOD-0) до 3,2 МВт (ветроустановка MOD-5) и ветроустановки WTS-3 и WTS-4 мощностью 3 МВт и 4 МВт. В Германии правительство финансировало создание в 1983 году горизонтально-осевой ветроустановки Growian мощностью 3 МВт. При выполнении этих программ был проведен большой объем фундаментальных и прикладных исследований аэродинамических, прочностных, динамических, электрических, эксплуатационных характеристик ВЭУ ГО и ВЭУ ВО, определены оптимальные конструктивные и технологические решения их основных узлов и систем, разработаны стандарты и сертификационные требования, получен опыт проектирования, изготовления и эксплуатации, подтвердивший возможность создания достаточно эффективных и надежных ветроустановок мегаваттной мощности обоих типов. Однако для развития коммерческих ветроустановок эти программы были неудачными, т.к. ни одна ветроустановка, созданная в рамках этих программ, не получила применения в промышленной ветроэнергетике. Это отчасти объясняется тем, что в 1980-х годах после окончания энергетического кризиса не произошло ожидаемого повышения стоимости нефти, и ветроэнергетика еще не могла составить конкуренцию традиционным направлениям производства электроэнергии. Продолжающееся развитие ветроэнергетики привело к тому, что к концу XX века мегаваттные ветроустановки достигли уровня стоимости энергии, производимой традиционными электростанциями, и стали интенсивно осваиваться.

На современном мировом рынке коммерческие промышленные вертикально-осевые ветроустановки мощностью свыше 100 кВт практически отсутствуют. Причины, по которым после трех десятилетий повышенного интереса специалистов к ротору Дарье и завершения правительственных программ развития ветроустановок в США, Канаде и Европе в 1970-х – 1990-х годах лидирующее положение заняли ВЭУ ГО, а ВЭУ ВО не получили широкого распространения, рассматриваются во многих исследованиях.

В работе [2] отставание в развитии вертикально-осевых ветроустановок объясняется тем, что запатентованный в 1931 году ротор Дарье стал широко известен специалистам только в 1960-х годах, в результате чего развитие этого направления ветроэнергетики сдерживалось недостаточным объемом исследований принципиально новых вопросов его аэродинамики, отсутствием опыта разработки и эксплуатации таких ветроустановок, а также конструктивными проблемами, связанными с повышенной массивностью и инерционностью вращающихся узлов, циклической и динамической прочностью лопастей, технологической сложностью криволинейных лопастей, отсутствием самозапуска ротора. Однако существует и противоположное мнение, что даже проведенные в конце XX века в рамках правительственных программ США, Канады и Великобритании широкие исследования и масштабные инженерные разработки не смогли обеспечить тако-

го развития вертикально-осевых ветроустановок, которого достигли горизонтально-осевые агрегаты [4; 6].

В работе [9] отмечается, что ВЭУ ГО не имеет очевидных преимуществ перед ВЭУ ВО – эта схема была случайно выбрана для разработки крупноразмерных ветроустановок. Авторы исследований [11] считают, что «спад вертикально-осевой ветроэнергетики в США и Канаде, произошедший после пика изучения ротора Дарье в 1980-х годах, и последующее преимущественное развитие ВЭУ ГО привели к принятию горизонтально-осевой установки в качестве стандарта агрегатов мегаваттной мощности. Как следствие, в исследованиях стала преобладать горизонтально-осевая тематика, а большая часть исследований ВЭУ ВО была закрыта». По поводу этого тезиса отметим, что опыт изготовления и эксплуатации показал, что аэродинамическая эффективность вертикально-осевых ветроустановок средней и мегаваттной мощности на 15–20% ниже, а стоимость вырабатываемой энергии соответственно выше, чем горизонтально-осевых агрегатов, притом что технологичность изготовления конструкции и эксплуатационные затраты обоих типов ветроустановок находятся примерно на одном уровне [13]. По всей вероятности, именно экономические критерии и явились причиной того, что горизонтально-осевые ветроустановки, как более эффективные, заняли лидирующее положение как в промышленной, так и в малой ветроэнергетике. После такого вывода рассмотрим, какую перспективу сегодня имеет вертикально-осевое направление ветроэнергетики: в каких областях применения и какими путями может происходить дальнейшее развитие ВЭУ ВО.

В 2000 году на голландском павильоне Ганноверской ярмарки «Экспо-2000» была установлена горизонтально-осевая ветроустановка малой мощности WES5 Tulip компании Wind Energy Solutions, разработанная специально для городских условий. Рынок проявил большой интерес к этой ветроустановке, что привело к созданию во многих странах Европы, Америки, Азии и Австралии новых моделей ветроустановок, предназначенных для эксплуатации в населенных пунктах. Эти агрегаты размещаются на крышах зданий и сооружений, на улицах, в парках и скверах и производят электроэнергию в непосредственной близости от городских потребителей. В настоящее время городские ветроустановки стали очень популярными и диапазон их мощностей постоянно расширяется. Специфические условия эксплуатации в жилых, промышленных районах и зонах отдыха накладывают на городские ветроустановки повышенные требования по эффективности, безопасности, надежности, воздействию на окружающую среду и население, визуальному восприятию. Эффективность современных малых ВЭУ ГО и ВЭУ ВО находится на одном уровне: их коэффициент мощности составляет от 0,17 до 0,3 [17]. В условиях городской застройки особенности ветровых потоков приводят к тому, что эффективность ветроустановок различных типов может быть одинаковой [1]. Европейские специалисты считают, что при одинаковой эффективности для городских условий предпочтительнее являются вертикально-осевые ветроустановки, т.к. их производительность не зависит от постоянных завихрений и изменений направления воздушных потоков между строениями. Кроме того, более низкая скорость вращения ограничивает вибрации и шумы, а также обеспечивает более высокую надежность и безопасность ветроустановок за счет уменьшения зоны разлета наледи с ротора или обломков конструкции при разрушении лопастей. Проведенные социологические исследования показали, что большинство населения отдает предпочтение зрительному восприятию в городском ландшафте

именно вертикально-осевым ветроустановкам. Поэтому сегодня ВЭУ ВО малой мощности широко применяются в жилых зонах. Их доля на мировом рынке составляет уже около 35% и постоянно увеличивается [2].

Сегодня широкое распространение получили оффшорные ветровые электростанции, которые размещаются за пределами суши, работают в условиях высокого ветропотенциала акваторий, удалены от жилых и промышленных зон и характеризуются ветроустановками большой единичной мощности. Применение для оффшорных ветростанций ветроустановок мегаваттной мощности обусловлено несколькими факторами. Большие размеры ротора позволяют при минимальной высоте башни отбирать энергию ветра с большей высоты. Стоимость фундаментных оснований, монтажа и технического обслуживания оффшорных ветростанций настолько высоки, что экономически выгодным становится применение меньшего числа более крупных агрегатов [7]. Эксперты считают, что для оффшорного применения предпочтительнее будут вертикально-осевые ветроустановки мультимегаваттной мощности с ротором Дарье по нескольким соображениям. С увеличением размеров сложность и стоимость конструкции вертикально-осевой ветроустановки будет уменьшаться, и при мощности свыше 5 МВт стоимость ВЭУ ВО должна быть ниже ВЭУ ГО. Симметричность конструкции вертикально-осевой ветроустановки и расположение оборудования в основании башни обеспечивает ей повышенную устойчивость на плавучем основании. Кроме того, с увеличением размеров горизонтально-осевого ротора значительно увеличивается воздействие циклических гравитационных нагрузок на его лопасти, что является серьезным фактором ограничения размеров ВЭУ ГО [19]. Так, диаметр ротора – 126 м в ветроустановке REpower 5M мощностью 5МВт, созданной в 2005 году, остался практически без изменений и в ветроустановке Enercon e-126 мощностью 7,5 МВт, разработанной в 2012 году, что говорит о сложности проектирования лопастей горизонтально-осевого ротора больших размеров. EWEA отмечает [16], что с 2005 года диаметр роторов горизонтально-осевых ветроустановок уже увеличивается и остается на уровне 126 м (рис. 1).

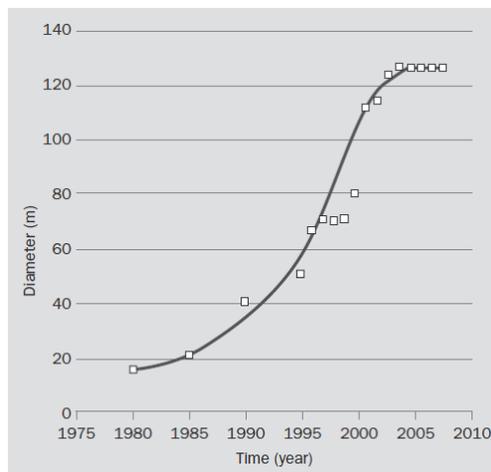


Рис.1. Тенденция роста размеров ротора горизонтально-осевых ветроустановок [16]

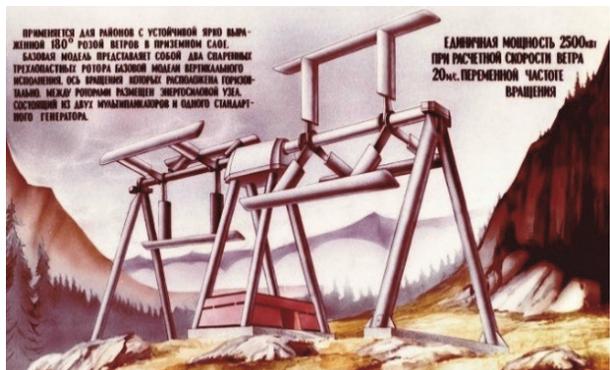
Рекомендації по предпочтительному применению ВЭУ ВО мощностью свыше 10 МВт для оффшорных ветростанций были также получены по результатам отдельных зарубежных разработок в рамках проектов VertAx (Великобритания), Nepurphar (Франция) (рис. 2, а), DeepWind (Дания) и исследований SNL (США). Авторы работы [5] считают, что вертикально-осевые ветроустановки с Н-ротатором могут в будущем стать основой сверхмощных сетевых агрегатов. Интересно отметить, что еще в 1980-х годах Московский ВПИ НИИ «Гидропроект» им. С. Я. Жука, учитывая, что конструктивный предел мощности ВЭУ ВО значительно выше, чем ВЭУ ГО, разработал концепцию вертикально-осевой ветроустановки с горизонтальным расположением Н-ротора Дарье для районов с постоянным направлением ветра, например ущелья Джунгарские ворота (рис. 2, б).

Таким образом, можно сделать вывод о двух перспективных направлениях развития вертикально-осевых ветроустановок с Н-ротором Дарье с неподвижными лопастями: агрегаты малой мощности, предназначенные для работы в городских условиях, и мультимегаваттные агрегаты, предназначенные для оффшорных и наземных ветростанций. Аналогичное мнение приведено в работе [10], где отмечено появление в последнее время интереса к Н-ротору для применения в малых городских ветроустановках мощностью до 100 кВт и оффшорных ветроустановках мощностью более 10 МВт.

Третьим направлением развития ВЭУ ВО с Н-ротором Дарье с неподвижными лопастями является повышение их аэродинамической эффективности до уровня ВЭУ ГО за счет оптимизации их геометрических параметров и рабочих характеристик. Сегодня для проектирования ВЭУ ВО применяют инженерные методики определения коэффициентов заполнения (отношение общей площади лопастей к ометаемой площади ротора) и быстроходности Н-ротора, при которых коэффициент мощности ротора будет иметь максимальное значение, а также некоторых характеристик ветроустановки (номинальная скорость ветра, ометаемая площадь, радиус ротора и др.), при которых для локальных ветровых условий площадки ее расположения будет обеспечиваться максимальная удельная выработка энергии [7]. Однако кроме характеристик, определяемых с помощью указанных методик, существует множество других геометрических и рабочих параметров, которые также влияют на эффективность Н-ротора, но из-за недостаточного объема фундаментальных исследований аэродинамики инженерные методики оптимизации



а



б

Рис.2. Мультимегаваттные вертикально-осевые ветроустановки:
а – ветроустановка «Nepurphar» [19]; б – ветроустановка ВПИ НИИ «Гидропроект»

этих параметров отсутствуют. К ним относятся число лопастей и быстроходность, профиль сечения и форма лопасти в плане, угол установки лопасти, форма законцовки лопасти, удлинение ротора и лопасти, динамический срыв потока, искривление набегающего на лопасть потока, приведенная частота колебаний лопасти и др. Отсутствие методик выбора указанных и других характеристик Н-ротора приводит к созданию ВЭУ ВО, существенно отличающихся друг от друга своими параметрами и, как следствие, коэффициентами мощности. Значения характеристик современных коммерческих ВЭУ ВО могут значительно отличаться [2]: удлинение ротора (отношение диаметра ротора к длине лопастей – до 8 раз (от 0,6 до 5); удлинение лопасти (отношение длины лопасти к хорде) – до 22 раз (от 2,2 до 50); быстроходность – до 3 раз (от 1,1 до 3,4); заполнение – до 5 раз (от 0,14 до 0,72). Поэтому диапазон значений коэффициента мощности рассмотренных ветроустановок находится в широких пределах от 0,18 до 0,43. В отчете EWEA [17] отмечается, что основной причиной низкой эффективности малых ветроустановок являются не особенности их аэродинамики, а отсутствие оптимизации конструкции. Поэтому даже незначительное увеличение (в пределах нескольких процентов) коэффициента мощности в результате оптимизации каждого из множества параметров может существенно повысить эффективность Н-ротора Дарье с неподвижными лопастями и приблизить величину коэффициента мощности ВЭУ ВО к уровню ВЭУ ГО.

В настоящее время практически во всех коммерческих ВЭУ ВО применяют ротор Дарье с неподвижными лопастями. Этот факт объясняется тем, что разработчикам без регулирования угла лопастей удавалось создавать относительно простые и надежные конструкции вертикально-осевых ветроустановок с несколько пониженной, по сравнению с ВЭУ ГО, эффективностью. Однако на современном этапе развития ветроэнергетики повышение эффективности ветроустановок мегаваттной мощности становится одним из основных факторов снижения себестоимости производимой электроэнергии. А, как было показано выше, существенным резервом повышения аэродинамической эффективности ротора Дарье является регулирование угла атаки поворотных лопастей в зависимости от их азимутального положения на траектории вращения. При этом в каждой точке траектории устанавливается такой угол атаки лопасти, при котором достигается максимальный отбор энергии ветрового потока

Проведенные немногочисленные теоретические и экспериментальные исследования показали, что регулирование угла атаки лопастей позволяет увеличить коэффициенты вращающего момента и мощности маломасштабных моделей Н-ротора до 50% [3]. Сегодня Н-ротор с регулируемым питчем лопастей находится на начальном этапе исследования и развития. Для его реализации в ветроустановках необходимо проведение как большого объема теоретических исследований оптимального закона изменения угла атаки лопасти в зависимости от азимутального положения лопасти, заполнения, быстроходности и других геометрических и рабочих характеристик ротора для различных профилей лопасти, так и проектно-конструкторских работ по созданию надежных поворотных механизмов лопастей полноразмерных агрегатов. Отметим, что системы поворота консольных лопастей горизонтально-осевых ветроустановок (включая ВЭУ ГО мегаваттной мощности с лопастями, испытывающими значительные циклические гравитационные нагрузки) доведены до высокого технического уровня, что подтверждает возможность создания подобных систем поворота вертикальных лопастей Н-ро-

тора Дарье, находящихся, по сравнению с горизонтально-осевым ротором, в более благоприятных условиях нагружения. Таким образом, можно констатировать, что отдельным перспективным направлением развития ВЭУ ВО является повышение эффективности ротора Дарье за счет регулирования угла атаки поворотных лопастей в соответствии с его оригинальной конструкцией по патенту Дарье.

Выводы. 1. Общее сравнение ВЭУ ГО и ВЭУ ВО с точки зрения технического и экономического приоритета какого-то одного типа ветроустановок представляется некорректным по следующим причинам:

- сложное сочетание технических решений ветроустановок обоих типов не позволяет провести их сравнение методами качественной оценки;
- в современных ветроустановках обоих типов на высоком техническом уровне решены все конструктивные, функциональные и технологические проблемы;
- в настоящее время происходит процесс заимствования обоими типами ветроустановок технических решений друг у друга;
- отсутствует существенная разница между влиянием ветроустановок обоих типов на окружающую среду.

Поэтому выбор схемы ветроустановки для заданного объекта определяется только конкретными условиями ее применения.

2. На современном этапе развития ветроэнергетики коэффициент мощности ВЭУ ГО достиг уровня 0,54, а ВЭУ ВО – 0,435. При одном принципе работы более высокая эффективность ВЭУ ГО объясняется принципиальным отличием аэродинамических схем преобразования энергии ветрового потока роторами обоих типов.

3. Перспективными направлениями развития ВЭУ ВО на современном этапе можно считать городские ветроустановки малой мощности, высокоэффективные ветроустановки средней мощности с регулируемым питчем лопастей и сверхмощные оффшорные ветроустановки.

Библиографические ссылки

1. **Абрамовский, Е. Р.** Расчетный анализ параметров ветродвигателей, предназначенных для использования в застроенной зоне городов [Текст] / Е. Р. Абрамовский, С. В. Тарасов, И. Ю. Костюков // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: сб. наук. пр. ДНУ.– Т. 13.– Д., 2012.– С. 3–15.
2. **Дзензерский, В. А.** Ветроустановки малой мощности [Текст] / В. А. Дзензерский, С. В. Тарасов, И. Ю. Костюков.– К.: Наук. думка, 2011.– 592 с.
3. **Каян, В. П.** Оптимизация рабочих характеристик полномасштабного макета ветроротора Дарье с прямыми управляемыми лопастями [Текст] / В. П. Каян, А. Т. Лебедь // Прикладна гідромеханіка.– 2010.– Том 12, № 4.– С. 16–35.
4. **Костюков, И. Ю.** Ретроспектива и перспектива вертикально-осевой ветроэнергетики. Статья I. История и мотивация развития вертикально-осевых ветроустановок как нового направления ветроэнергетики [Текст] / И. Ю. Костюков, С. В. Тарасов // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Історія і філософія науки і техніки. Вип. 22.– Д., 2013.– № 1/2, т. 22 – С. 3–18.
5. **Кукушкин, В.** Малая энергетика [Текст] / В. Кукушкин, А. Левенко.– Д.: Арт-пресс, 2005.– 99 с.
6. О целесообразности создания вертикально-осевых ветроэлектрических установок мегаваттного класса [Текст] / И. Ю. Костюков, М. И. Галась, Ю. П. Дымковец, Н. А. Акаев // Энергетическое строительство.– 1991.– № 3.– С. 33–37.
7. Расчетный анализ аэродинамических и энергетических характеристик ветродвигателей мегаваттного класса, предназначенных для размещения на мелководных акваториях Украины [Текст] // С. В. Тарасов, И. Ю. Костюков, Е. Р. Абрамовский, Н. Н. Лычагин //

- Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. пр.– Т. 14.– Д., 2012.– С. 97–108.
8. Ретроспектива и перспектива вертикально-осевой ветроэнергетики. Стаття II. Развитие вертикально-осевого направления ветроэнергетики в Украине [Текст] / Е. Р. Абрамовский, И. Ю. Костюков, С. В. Тарасов, А. И. Яковлев // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Історія і філософія науки і техніки.– Вип. 22.– Д., 2013 – № 1/2, т. 22 – С. 18–31.
 9. **Brothers C.** Vertical axis wind turbine for cold climate application [Text] / C. Brothers // Proc. Renewable Energy Technologies in Cold Climate.– Montreal, 1998.
 10. **Ferreira, C. S.** The near wake of the VAWT. 2D and 3D views of the VAWT aerodynamics [Text] / C. S. Ferreira.– PhD thesis, Delft University of Technology, 2009.– 304 p.
 11. **Gipe, P.** Wind energy comes of age [Text] / P. Gipe.– New York: John Wiley & Sons, 1995.– 539 p.
 12. **Jha, A. R.** Wind Turbine Technology [Text] / A. R. Jha.– London: CRC Press, 2010.– P. 46–47.
 13. Market, cost and technical analysis of vertical and horizontal axis wind turbines. Task 2: VAWT vs. HAWT technology [Electronic resource] / Lawrence Berkeley National Laboratory.– Berkeley.– 2003.– P. 131–152.– Mode of access: <http://www-eng.lbl.gov/~rasson/windsail/gec/Task2report-17Sept03.doc>.
 14. **Sagrillo, M.** Putting wind power's effect on birds in perspective [Electronic resource] / M. Sagrillo, American Wind Energy Association.– 2003.– Mode of access: <http://www.awea.org/faq/sagrillo/swbirds.html>.
 15. Umweltshonende Energiegewinnung in der Antartis [Text] / G. Heidelberg, H. Kohnen, D. Lehmann, F. Zastrov // Geowissenschaften.– 1993.– № 11 (12).– P. 419–420.
 16. Wind Energy – the Facts [Text] / European Commission, Directorate General for Energy, 2008.– P. 76, 79, 89, 125.
 17. Wind Energy – the Facts / Programme «Intelligent Energy – Europe», EWEA, 2009.– 568 p.– [Electronic resource]: <http://www.wind-energy-the-facts.org>.
 18. Wind farms designed for the offshore environment / Nenuphar, Lille.– 2010.– 19. p.– [Electronic resource]: <http://nenuphar-wind.com/files/presse/9.pdf>
 19. **Wood, C.** Sandia Labs investigates new offshore wind turbine designs [Electronic resource] / C. Wood.– 2012.– Mode of access: <http://www.gizmag.com/sandia-labs-off-shore-wind-turbine/23544/>.

Надійшла до редколегії 20.09.2014