

УДК 338.45:620.9
ББК 65.305.142

В.Ю. Рогов

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЭРОСТАТНОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ В БАЙКАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

Рассмотрена возможность развития ветровой энергетики в Байкальском регионе на основе использования привязных аэростатов на высотах до 1 тыс. м и в тропопаузе. Показана необходимость учета коэффициента использования установленной мощности ветрогенераторов для сравнительной оценки эффективности их применения. Определена эффективность использования ветроэнергетических генераторов, установленных на привязных аэростатах.

Ключевые слова: ветровая энергетика; привязные аэростаты; эффективность; коэффициент использования установленной мощности; тропопауза; Байкальский регион.

V.Yu. Rogov

ASSESSMENT OF BALLOON WINDPOWER ENGINEERING EFFICIENCY IN BAIKAL REGION

The article discusses the opportunity of developing windpower engineering based on using balloons fixed at heights up to 1000 m in tropopause. The author proves the necessity to consider the capacity factor of wind turbines when giving a comparative assessment of their efficiency, and determines the efficiency of wind turbines installed on fixed balloons.

Keywords: windpower engineering; fixed balloons; efficiency; capacity factor; tropopause; Baikal region.

В последние десятилетия ветровая энергетика (эоловая энергетика) стала бурно развивающейся отраслью. Суммарная установленная мощность ветроэнергоустановок в 2010 г. в мире составила 194,4 ГВт, в том числе в Китае — 42,3 ГВт, в США — 40,2 ГВт, в странах Евросоюза — 84,1 ГВт. В России промышленная (в форме ветропарков) ветроэнергетика находится в стадии становления.

В данной работе преследуется цель получить принципиальные, качественные оценки развития ветроэнергетики на основе использования привязных аэростатов.

Среди ряда заблуждений, возникающих при оценке эффективности инвестиций в ветроэнергетику, выделяется заниженная величина оценки капитальных вложений на единицу мощности. Действительно удельные капитальные вложения в 2010 г. составили в зоне евро 1,03 евро/Вт (1,4 дол./Вт) с тенденцией снижения. Однако с учетом коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), равного для ныне действующих ветрогенераторов в среднем около 20%, удельные капитальные вложения в 1 Вт отпущенной мощности составят примерно 7 дол. Для сравнения: удельные капитальные затраты на 1 Вт установленной мощности по угольным ТЭС в среднем по миру за период 2000–2010 гг. составили 1,15–1,47 дол. (примем среднюю цифру — 1,3). С учетом полных инвестиций в добычу угля, включая вложения в производственную инфраструктуру, эту величину следует увеличить на 0,65 дол./Вт; ито- го — 1,95 дол./Вт). С учетом среднемирового КИУМ по угольным ТЭС

в 2010 г., равного 0,87, получим удельные капитальные вложения в размере 2,24 дол./Вт мощности отпущенной электроэнергии, что почти в три раза меньше, чем для ветровых электростанций (ВЭС). Понятно, что показатель КИУМ влияет и на величину себестоимости отпущенной электроэнергии.

Среднемировая себестоимость отпускаемой электроэнергии на угольных ТЭС в период 2000–2010 гг. составила 0,024–0,033 дол./кВт·ч, в то время как себестоимость электроэнергии на ВЭС в зоне евро составляет 0,041–0,075 дол./кВт·ч, с тенденцией к снижению.

Из сказанного следует, что необходимо кардинально повысить КИУМ ветровых электростанций для обеспечения их конкурентоспособности по удельным капитальным вложениям с тепловыми электростанциями, составляющими основу российской энергетики, включая сибирскую.

Особенности ветровой ситуации. Среди ветронасыщенных континентальных регионов, граничащих с Байкальским, следует выделить Монгольское плато, в его китайской части, на конец 2011 г. установленная мощность ВЭС составила 1,5 ГВт. Себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на китайских ВЭС в 2006 г. составила 0,063–0,08 дол./кВт·ч, с тенденцией к снижению за счет роста производства электроэнергии на собственных (китайского производства) энергоустановках.

По состоянию на 1 июля 2012 г. одноставочные тарифы на электроэнергию в пересчете на доллары составили: в Иркутской области — 0,024 дол./кВт·ч, в Республике Бурятия — 0,082 дол./кВт·ч, в Забайкальском крае — 0,068 дол./кВт·ч. Таким образом, если исходить из себестоимости производимой на ВЭС электроэнергии, создание ветропарков в Забайкалье можно было бы считать оправданным, однако, в Байкальском регионе среднегодовая скорость ветра существенно ниже, чем на прилегающем к нему регионам Монгольского плато. Так, если во Внутренней Монголии (Китай) среднегодовая скорость ветра составляет 4–6 м/с, в Монгольской Республике — 1,8–5,7 м/с, то в Чите — 2,3 м/с, в Улан-Удэ — 2,6 м/с, в Иркутске — 2,0 м/с.

Низкие среднегодовые скорости ветра в Байкальском регионе, как, впрочем, и в большинстве других регионов южной части Сибири, делает неэффективным использование горизонтальных (крыльчатых) ВЭС и обуславливают необходимость поиска новых подходов к развитию ветроэнергетики. Применение вертикальных ВЭС также не спасает ситуации, хотя они и начинают вращение с меньших, чем горизонтальные ветряки, скоростей ветра, однако, решающим фактором все равно остается стабильность и скорость ветра не ниже 7 м/с.

Понимая ограниченные возможности существующих ветроагрегатов, в последнее время исследователи и проектировщики все чаще обращают внимание на «летающие», «парящие» ВЭС различных конструкций. Решающее значение здесь имеет не столько сила ветра (ее можно повысить в различного рода концентраторах воздушных потоков), сколько постоянство, поскольку, как уже говорилось, важно повысить КИУМ ВЭС.

Рабочие слои атмосферы. На высоте 500 м сила ветра в один и тот же момент времени вдвое выше, чем на высоте флюгера (10 м), поскольку с высотой снижается сила трения воздуха о земную поверхность. Это означает, что среднегодовые значения ветров для Байкальского региона на данной высоте как минимум удваиваются и приближаются к границе рентабельного производства электроэнергии для наземных ВЭС.

Подавляющее большинство созданных практических образцов и проектов свободно летающих и привязных ВЭС ориентировано на использование энергии ветра на высоте порядка 500 м.

Приведем примеры «летающих» надувных ВЭС. В Канаде создан экспериментальный ветряк-дирижабль MARS (Magenn Power Air Rotor System) с КИУМ 40–50%. Данный дирижабль, реализует эффект Магнуса, обеспечивающий повышенную устойчивость конструкции. Предельная сила ветра, улавливаемого таким ветрогенератором, составляет 90 м/с. Вырабатываемая энергия передается на землю по кабелю, где установлена площадка с лебедкой и трансформаторная станция.

Примером ветряных турбин турбореактивного типа может служить предложенная FloDesign технология, основанная на захвате ветра ветряной турбиной, размещенной на дирижабле, через небольшое отверстие, что делает такую турбину, которая выглядит как реактивный двигатель, примерно в 4 раза эффективнее горизонтальных ВЭС.

Наряду с приповерхностной частью тропосферы (уровнем трения), представляет интерес и использование ветровых энергоресурсов зоны тропопаузы, находящейся на высоте 8–10 км, для которой характерно устойчивое наличие ветра (с повторяемостью 80–90%) с высокой скоростью (20–30 м/с). Таким образом, КИУМ существенно повышается, примерно до 80%. В зимний период скорость ветра увеличивается, а высота снижается примерно на 1,5 км, что также полезно для энергетического использования ветра. В данном слое уже нет необходимости использовать дополнительную подъемную силу крыла и следует ограничиться хорошо обтекаемыми, округлыми формами.

Базовые конструкции. В качестве основы для построения схемы конструкции ВЭС для слоя до 1 тыс. м может быть рассмотрен проект российской фирмы «СКИФ». В данной «парящей» ВЭС применен ряд воздухопроводов с полноповоротными воздухозаборными устройствами на концах (сопла Лаваля), сходящихся в общий конфузур и, далее, — в рабочий канал. Воздуховоды выполнены в виде части конструкции змея — дирижабля или наполненного водородом пневмокрыла для увеличения подъемной силы, а сама турбина размещена внутри корпуса. Применение поворотной параллельно-последовательной системы сопел Лаваля позволяет достичь околосвуковой скорости потока на лопатках турбины. При ометаемой площади вращения лопастей ветрогенератора 10 м² (диаметр — 5 м), скорости входного воздушного потока 5 м/с, при пяти входных воздуховодах, подаваемая на генератор мощность ветра составляет 48 МВт. Испытания экспериментальной установки подтвердили перспективность нового подхода.

Оценки специалистов ООО «СКИФ» показывают низкую стоимость установленной мощности — не более 0,6 дол./Вт; себестоимость 1 кВт·ч вырабатываемой электроэнергии оценивается не более 0,01 дол. По мнению разработчиков, данная конструкция позволяет в 5–6 раз снизить материалоемкость энергоустановки, а значит и ее стоимость.

Для освоения энергоресурсов тропопаузы представляет интерес проект, разработанный в 1960-х гг. группой советских инженеров (Р. Гохман, И. Спицын, Л. Константинов, Г. Вайнштейн и А. Полянкер), которые предложили варианты тропопаузных ветроэлектростанций. Скомпонованный с ветроколесом и электрогенератором такой аэростат поднимается в тропопаузу на длительное время. ТВЭС мощностью 2 МВт, использующая ветроколесо, охватывающее аэростат, передает энергию на землю по кабелю — тросу. Годовая выработка электроэнергии — 16 млн кВт·ч, полный вес ТВЭС с тросом-кабелем — 45 т, материалоемкость 30–40 кг/кВт (в 6–10 раз меньше, чем материалоемкость наземных ветроэлектростанций, и в сотни раз меньше, чем материалоемкость тепло- и гидроэлектростанций) [5].

Попробуем самостоятельно оценить хотя бы порядок уровня затрат и выявить состояние и пути решения ключевых элементов и проблем рассматриваемых ВЭС.

Электрогенератор. На действующих ВЭС применяются асинхронные (реже синхронные) электрогенераторы. Вес электрогенератора мощностью 2 МВт и мультипликатора, объединенными в гандолу, составляет около 30 т.

В случае применения сопел Лавала и высокооборотных электрогенераторов необходимость в мультипликаторе отпадает. Снизить вес электрогенератора на порядок возможно с использованием высокоскоростных так называемых вентильных (индукционных, реактивных) генераторов (точнее, в нашем случае, генераторов-двигателей, называемых также обратными генераторами, поскольку в режиме двигателя с их помощью возможен самоподъем привязной аэростатной ВЭС).

В роторах вентильных реактивных генераторов (двигателях) (ВРГ) нет обмоток, в статорной обмотке используется меди на 40–50% меньше, чем в асинхронных электромашинках. Управление ВРГ осуществляется с помощью импульсных полевых транзисторов в сочетании с высокоскоростными процессорами. Так, один из электроинструментов, производимых ООО «Свободинский электромеханический завод, мощностью 10 кВт, имеет вес 25 кг, тогда как ближайший (асинхронный) аналог — 250 кг [2]. Данный пример позволяет предположить, что высокоскоростной ВРГ, будет также, примерно в 10 раз легче своего ближайшего аналога (для мощности 2 МВт может составить примерно 1,3 т).

Стоимость выпускаемых НИЦ «ВИНДЭК» и НИИЦ «ВИНДЭК-энерг» вентильных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов на основе Nd-Fe-B для работы в составе ветроэнергетических установок и МикроГЭС номинальной мощностью 5 кВт составляет 4 тыс. дол. Поскольку стоимость ВРД оценивается в 4 раза дешевле, то аналогичный генератор мощностью 2 МВт может стоить 0,4 млн дол.

При использовании технологии магнитной левитации (электромагнитных подшипников) возможно не только дополнительно снизить вес, но и практически исключить затраты, связанные с обслуживанием генератора в механической части.

Поскольку важнейшим параметром ветрогенератора в данном случае является вес, в числе направлений по дальнейшему снижению массогабаритных характеристик вентильных электрогенераторов 2–3 раза в сравнении с базовыми моделями является применение аморфных сплавов для изготовления ротора и нанотрубок для производства обмоток.

Аэростат. В последние годы дирижаблестроение в России и за рубежом перешло в практическую плоскость с использованием новых материалов. В России налажено производство дирижаблей в ФГУП «Долгопрудненское конструкторское бюро автоматики» (ДКБА) (аэростатный комплекс «Пересвет»), ЗАО «Воздухоплавательный центр «Авгурь» (дирижабль Аи-30 и др.).

В качестве ориентира по грузоподъемности и стоимости примем V-образный дирижабль «Ascender» длиной 53 м, объемом 150 тыс. м³, с полезной нагрузкой 2 т, стоимостью 0,5 млн дол. [4]. Предлагается включить элемент крыла с воздухозаборником и генератором в конструкцию этого дирижабля.

Система «электрокабель — трубка газоснабжения». В России разработана технология производства нанокompозитных проводов [5], которые прочнее стали примерно в 5 раз при электропроводности примерно 70% от электропроводности чистой меди. Используя такие гибкие на-

потрубочные кабели-тросы, привязные аэростаты могут оставаться на большой высоте в течение весьма продолжительного времени, опускаясь на землю только для проведения ремонта и обслуживания.

Для обеспечения долговременного нахождения аэростата с ВЭС в работе без дозаправки газом (гелием) целесообразно использовать вместо канатов соответствующие тонкие трубки, например, из кевлара (трос из кевлара длиной 10 км диаметром 9 мм весит 800 кг).

Проблема обледенения. Для противодействия процессам обледенения необходимо покрывать все элементы конструкции рассматриваемых ВЭС соответствующими наноматериалами. В работе [1] выявлен механизм возникновения уникальной способности покрытий с бор-нитридными нанотрубками самопроизвольно восстанавливать высокогидрофобное состояние, который может найти применение при создании новых материалов, смачивание которых может циклически изменяться при внешних воздействиях. Среди практических направлений решения проблемы обледенения, отметим создание совместного предприятия с участием корпорации Alcoa и ОАО «Холдинг межрегиональных распределительных сетевых компаний» (МРСК) по производству нанопокрытий для сетей передачи электроэнергии.

Таким образом, проблема обледенения к настоящему времени подошла к своему эффективному решению.

Инвестиции в авиаэнергокомплекс в атмосферном слое до 1 тыс. м. Основу аэростата составляет наполняемое гелием «летающее крыло», включающее воздухозаборник с поворачивающимися соплами Лавала.

Учитывая существенную разность рабочих высот (для дирижабля «Ascender» — это 30 км, для нашего аэростата — 1 км), будем считать, что имеется запас подъемной силы, позволяющий дополнить эту V-образную конструкцию планером, включающему «летающее крыло» со встроенным воздухозаборником, и получить удвоение полезного веса (до 4 т) при увеличении стоимости аэростата-планера в 1,5 раза.

Полезная нагрузка в 4 т включает: 0,5 т для системы поворотных сопел; 3,5 — в электрогенератор, мощностью 5,4 МВт, стоимостью 0,8 млн дол. Таким образом, инвестиции в аэростат-планер составят примерно 0,8 млн дол. Инвестиции в систему «кабель-трубка газоснабжения» достаточно низкие — на уровне 0,05 млн дол. Всего — примерно 1,7 млн дол. Итого, с учетом инвестиций в наземное оборудование (условно, в размере 30% от стоимости авиаэнергетической системы) получаем 2,2 млн дол.

Принимая КИУМ равным 0,5, получаем инвестиции в 1 Вт отпущенной мощности в размере 4,4 дол., что в 1,6 раза ниже, чем для наземных ВЭС.

Инвестиции в авиаэнергокомплекс тропосферного слоя. Также примем полезную нагрузку в 4 т, из которых 2,6 т предназначено для генератора, 0,4 т — для ветроколеса, 1 т — для системы «кабель-трубка газоснабжения». Затраты на аэростат составят 1 млн дол, на электрогенератор, мощностью 4 МВт с ветроколесом также порядка 1 млн дол., на систему «кабель-трубка газоснабжения» около 0,5 млн дол., всего — 2,5 млн дол., с учетом инвестиций в наземное оборудование — 3,25 млн дол. Принимая КИУМ в размере 0,8, получаем инвестиции в 1 Вт отпущенной мощности в размере 4,06 дол., что в 1,7 раза ниже, чем для наземных ВЭС.

Себестоимость электроэнергии. Для оценки себестоимости, примем текущие затраты, включая стоимость гелия, в размере 2% от стоимости основных фондов, как это принято для наземных ВЭС. Принимая срок

службы оборудования в 5 лет, получаем норму амортизационных отчислений в 20%.

При фонде рабочего времени в году 8 760 ч, с учетом КИУМ, получим объем отпущенной электроэнергии в первом варианте 23 600 МВт · ч, во втором — 28 тыс. МВт · ч. Себестоимость годовой продукции в первом случае — 0,48 млн дол., во втором — 0,81 млн дол.; себестоимость киловатт часа электроэнергии составит соответственно 0,02 и 0,03 дол., что соответствует себестоимости на угольных электростанциях, однако, вдвое ниже, чем на наземных ВЭС, и указывает на рентабельность применения аэростатных ВЭС в Забайкалье. Что касается Иркутской области, то при существующих тарифах такой способ производства является безубыточным, однако, учитывая ежегодный рост тарифов, можно говорить о его рентабельности уже в ближайшие годы.

Указанные аэростатные энергоустановки следует рассматривать как первые этажи системы привязных дирижаблей, следующим (верхним) этажом которой является стратосферный дирижабль, несущий радиотехнический комплекс, систему виденаблюдения и газоанализаторов гражданского и военного назначения и др.

Список использованной литературы

1. Алиев А.Д. Супергидрофобные покрытия на основе нанотрубок нитрида бора: механизм супергидрофобности и самовосстановление высокогидрофобных свойств / А.Д. Алиев, Л.Б. Бойнович, В.Л. Буховец [и др.] // Российские нанотехнологии. — 2011. — Т. 6, № 9–10.
2. Ганин И.А. Энергосберегающее оборудование на основе вентильно-реактивных технологий / И.А. Ганин // Энергосвет: электрон. журн. — 2012. — С. 12–15.
3. Мясников В. Возвращение дирижабля. В XXI веке ожидается бум строительства воздухоплавательных аппаратов военного назначения / В. Мясников // Независимое военное обозрение. — 2005. — 23 сент.
4. Путилов А.В. Создание высокопрочных наноструктурных микрокомпозиционных CuNb электротехнических проводов с использованием методов деформации / А.В. Путилов, В.И. Панцырный, А.К. Шиков [и др.] // Цветные металлы. — 2008. — № 3. — С. 77–83.

References

1. Aliev A.D. Supergidrofobnye pokrytiya na osnove nanotrubok nitrída bora: mekhanizm supergidrofobnosti i samovosstanovlenie vysokogidrofobnykh svoystv / A.D. Aliev, L.B. Boinovich, V.L. Bukhovets [i dr.] // Rossiiskie nanotekhnologii. — 2011. — Т. 6, № 9–10.
2. Ganin I.A. Energoberegayushchee oborudovanie na osnove ventil'no-reaktivnykh tekhnologii / I.A. Ganin // Energosovet: elektron. zhurn. — 2012. — S. 12–15.
3. Myasnikov V. Vozvrashchenie dirizhablya. V XXI veke ozhidaetsya bum stroitel'stva vozdukhoplavatel'nykh apparatov voennogo naznacheniya / V. Myasnikov // Nezavisimoe voennoe obozrenie. — 2005. — 23 Sept.
4. Putilov A.V. Sozdanie vysokoprochnykh nanostrukturnykh mikrokompozitsionnykh CuNb elektrotekhnicheskikh provodov s ispol'zovaniem metodov deformatsii / A.V. Putilov, V.I. Pantsyrnyi, A.K. Shikov [i dr.] // Tsvetnye metally. — 2008. — № 3. — S. 77–83.

Информация об авторе

Рогов Виктор Юрьевич — доктор экономических наук, профессор, кафедры экономики предприятия и предпринимательской деятельности, Байкальский государственный университет экономики и права, г. Иркутск, e-mail: rogovvu@mail.ru.

Author

Rogov Victor Yurievich — Doctor of Economics, Professor, Chair of Enterprise Economy and Entrepreneurship, Baikal State University of Economics and Law, Irkutsk, e-mail: rogovvu@mail.ru.