

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩЕГО УЧАСТКА АВТОНОМНЫХ ВЕТРОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕГИОНОВ РЕЗКО КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА С МАЛЫМ ВЕТРОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ

В данной статье рассмотрен вариант проектирования энергогенерирующего участка многоярусного типа ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения, создание которой дает возможность получения наибольших значений КПД относительно известных аналогов с размещением в областях нестабильно низкого ветрового давления. Рассмотрены результаты математического моделирования и принципа действия ярусов элементов энергогенерирующего участка с вертикальной осью вращения как в отдельности, так и в совокупности друг с другом, образуя законченное исполнение. Предложено создание пятиканального конфузрного яруса концентрирования и переориентации воздушного потока, перемещающегося по траектории трехмерной логарифмической спирали. Спроектированы основная и добавочная зоны ускорения с размещением узла отбора мощности и зона рассеивания отработавшего воздушного потока. Определены суммарные величины средних коэффициентов ускорения воздушного потока, проходящего через энергогенерирующий участок при различной скорости набегающего потока. Проанализированный вариант конструкции не требует ориентации по ветру и обладает возможностями стабилизации набегающего воздушного потока.

Ключевые слова: конфузор, концентратор, ускорение воздушного потока, рассеивание воздушного потока, ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения, энергогенерирующий участок.

Введение. Условия непостоянства течения воздушных масс малых скоростей [1], характерные для районов малозатяжной застройки и районов, удалённых от протяжённой водной глади, требуют разрабатывать ветроэнергетические системы, способные стабилизировать и произвести отбор мощности ветрового потока. Это будет происходить за счёт использования специальных геометрических конструкций для установок вихревого типа. Предлагаемая разработка представляет собой энергоблок ветроэнергетической системы, позволяет совместить три яруса (концентрирование, ускорение и рассеивание) энергогенерирующего участка (ЭГУ) ветроэнергетической установки (ВЭУ) и получить при этом оптимальный эффект выработки мощности.

Постановка задачи. Целью работы является создание ветроэнергетических установок с концентратором ветровой энергии. Предлагаемая установка состоит из трёх модулей. Первый модуль предна-

значен для уплотнения и переориентирования потока с горизонтального на вертикальное направление. Во втором модуле происходит ускорение и дополнительная эжекция потока. Третий блок служит для создания зоны пониженного давления для дополнительного всасывания рабочего потока и его ускорения в зоне отбора мощности. По форме установка представляет собой песочные часы.

Одним из основных принципов работы ЭГУ, выносимых для анализа в рамках выполнения научного исследования, является условие однонаправленности входящего и выходящего в плоскости горизонта потоков. Для этого необходимо создание конструкции, в теле которой поток проходит либо по прямой, не меняя свое направление, либо поворачивается на 360 градусов.

Для определения оптимальной геометрии первого модуля будут исследованы конструкции, представляющие собой конус в основании, образу-

Основные составляющие (ярусы) энергогенерирующего участка

| Название яруса | Объекты и примеры использования конструктива |
|---------------------------------|---|
| 1. Конфузор-спираль | Градирни, аэраторы |
| 2.1. Камера эжекции и ускорения | Газо-жидкостные насосы |
| 2.2. Камеры доп. ускорения | Элементы фюзеляжей и крыла в области аэростроения |
| 3. Дефлектор | Системы вентиляции и кондиционирования |

щие пять конфузорных камер, и внешний кожух для формирования конфузорного канала.

При помощи второго модуля будут сформированы условия получения уплотнённого ламинарного потока с изменением основного направления движения. Отметим, что оба модуля так же должны быть сориентированы на дополнительный поворот потока относительно горизонтальной оси.

Третий модуль будет спроектирован с учётом рассеивания и окончательного поворота выходящего воздушного потока параллельно движению потока внешней среды.

Эффективная правомерность использования отдельных конструктивных элементов ЭГУ доказана практикой их эксплуатации, которые в первом приближении представлены отдельными областями производства (табл. 1): для первого модуля — охлаждающие установки ТЭЦ (градирни), для второго — элементы водозабора с больших глубин, для третьего — системы вентиляции.

В основе построения ЭГУ положено сочетание ранее известных идей эффективного использования элементов ускорителей воздушного потока [1–24]. Отличительной особенностью для данной статьи является полное расчётное исследование, представляющее численный анализ эффективности ускорения ветрового потока предложенной конструкцией.

Теория. В основу действия всех концентраторов ветровой энергии заложен эффект Вентури, как следствие действия закона Бернулли. Он заключается в падении давления и увеличении скорости при прохождении потока газа через суженную часть трубы [2]. Поэтому можно утверждать, что прирост мощности можно получить за счёт сокращения площади поперечного сечения потока с его одновременным увеличением скорости. Отсюда ускорение воздушного потока является основным направлением развития для повышения эффективности работы ветроэнергетических установок (ВЭУ).

Учитывая опыт проектирования и эксплуатации ветродинамических систем в условиях малого ветрового давления [4–11], можно утверждать, что наиболее оптимальными для рассматриваемых условий будут вертикально-осевые ВЭУ. При этом будет проверена гипотеза, доказывающая большую эффективность в случае применения концентрических поверхностей против прямоугольных тел в конструкции ЭГУ.

С целью повышения эффективности работы ВЭУ предполагается разработать конструкции и сопряжение трёх модулей, позволяющих при помощи закручивания потока увеличить скорость и его плотность [12–17].

Таковыми могут стать конфузорно-диффузорные каналы башенного типа, собирающие по-

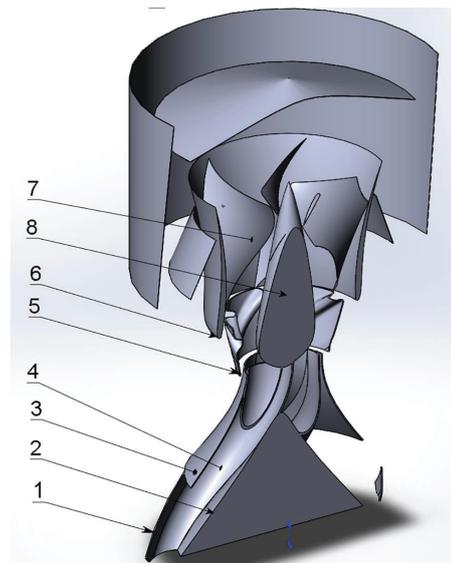


Рис. 1. Общий вид энергогенерирующего участка

ток воздуха с любой стороны своей конструкции вне зависимости от направления ветра и меняющие горизонтальное движение воздушного потока на вертикальное и после процесса отбора мощности преобразующие вертикальное движение в объём воздушных масс, перемещающихся вдоль основного направления ветра (рис. 1).

Принцип работы ЭГУ включает в себя: концентрирование, переориентацию направления, уплотнение, дополнительную эжекцию и рассеивание воздушного потока.

На пути движения ветра появляется преграда в виде статически расположенных лопастей 1, построенных по траектории трёхмерной логарифмической спирали, ограниченных концентрическими стенками 2 и 3, которые, замыкаясь по окружности, образуют внутренний и внешний конфузурные первого модуля. Происходит эффект концентрирования и переориентации направления движения ветра. Геометрия площади поперечного сечения каналов 4 напоминает полумесяц, пространство которого пропорционально уменьшается по мере прохождения воздушного потока кверху, тем самым создавая эффект уплотнения и закручивания самого себя.

Сформированный поток воздуха в каждом из каналов поступает во второй модуль — зону размещения гофрированного к верхней стороне первого диффузорного кольца 5. Гофрирование представлено пятью прямоугольными желобами с их смещением на 72 градуса, совпадающим

с траекторией движения воздушного потока, по окружности диффузора. Затем поток движется в зону второго диффузорного кольца 6, область которого рассечена пятью закрученными на 126 градусов лопастями 7, направленными также вдоль основной траектории движения воздуха. Профиль обоих колец выполнен согласно известным экспериментальным исследованиям эжектора смещения [18], доказавшим свою конструктивную эффективность. На выходе из второго диффузорного кольца воздушный поток попадет в модуль 3 — зону рассеивания, построенную по принципу работы дефлектора ЦАГИ.

На выходе воздушного потока из конфузора перед гофрированным диффузором 5 устанавливается ветроколесо (на рис. 1 не указано), которое приобретает дополнительную динамику движения благодаря эффекту эжекции посредством приоткрытия к фигурно-гофрированному диффузору 5 — он же конусообразный кожух в горизонтальном направлении. Дополнительное улучшение качества закручивания потока и его распределение система получает за счёт размещения в диффузоре 5 сердечника в виде капли 8. Вторая половина последней закрывается вторым диффузором 6 с выходом на узел рассеивания потока. Кинетическая энергия воздушного потока преобразуется во вращательное движение ветроколеса за счёт лопастей. В дальнейшем вращающий момент посредством валопровода, на котором смонтировано ветроколесо, передаётся

в коробку передач, а затем к генератору (на рис. 1 не указаны), расположенные в основании конфузора первого модуля.

Диаметры модулей концентрирования, ускорения и рассеивания также определяются следующими конструктивными элементами (параметрами):

1. Масштабом витков спирали статичной лопасти (влияет на угол поворота ветрового потока и ширину канала) — в нашем случае равный 72° согласно проведённым лабораторно-натурным испытаниям [19].

2. Числом витков закручивания (влияет на ширину канала) определено ранее, на основании проведённых исследований [19] можно определить с оптимальным количеством секций для первого яруса (модуля) в количестве пяти штук.

3. Геометрией направляющего лотка (моста) канала (влияет на угол поворота ветрового потока) — смоделирован согласно геометрии построения трехмерной логарифмической спирали.

4. Формой сопряжения выступающей статичной лопасти, обеспечивающей плавное вхождение ветрового потока в конфузор ветроустановки (влияет на площадь входа потока в концентратор) — предложено два варианта: прямые и скруглённые.

5. Формой и углами (от 126 до 211 градусов) поворота направляющих в теле второго модуля (влияет на плотность и скорость потока).

6. Высотой конфузора — определён неизменный параметр 1500 мм.

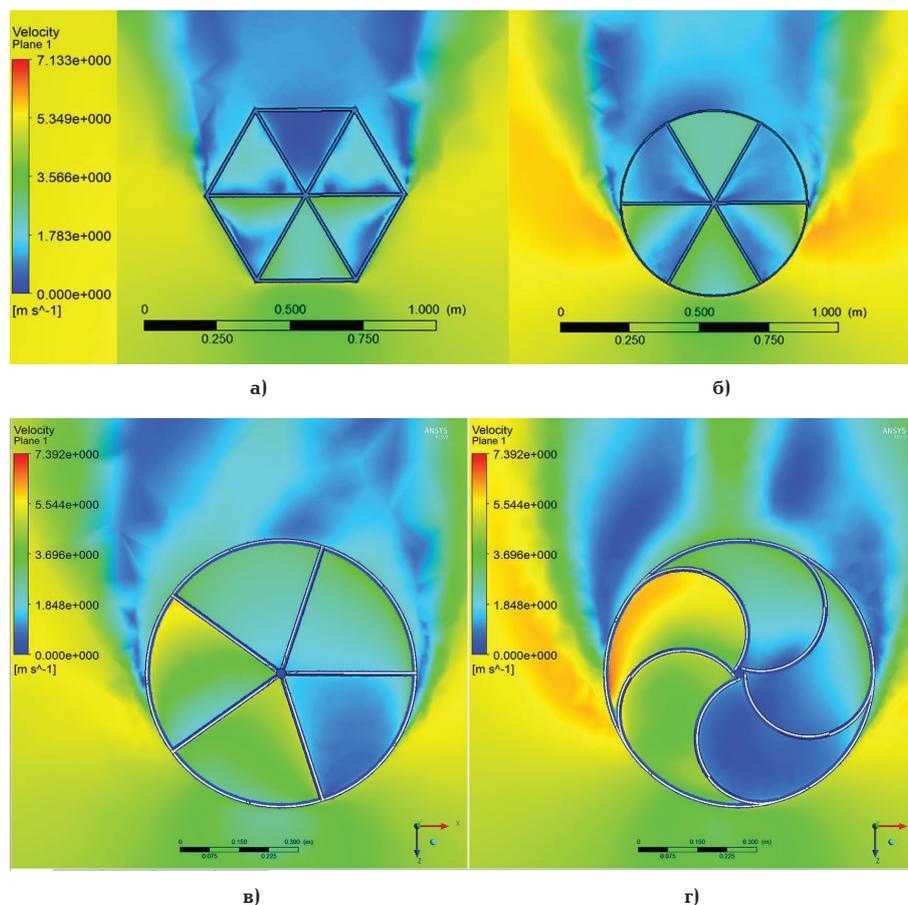


Рис. 2. Горизонтальное сечение плоскости выхода воздушного потока из концентратора: а) внешний конструктив конфузора представлен прямыми плоскостями; б) внешний конструктив конфузора представлен гладкотельными плоскостями; в) внутренний конструктив конфузора представлен прямыми плоскостями; г) внутренний конструктив конфузора представлен гладкотельными плоскостями

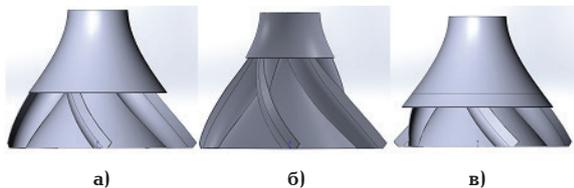


Рис. 3. Общий вид вариантов предварительного исполнения конических куполов первого модуля

Таблица 2

Определение коэффициента ускорения воздушного потока нижнего яруса (модуля) в зависимости от габаритных параметров

| | | | | |
|-------------------------|-------------------------------|--------|---------|---------|
| Высота юбки от пола, мм | 450 | 600 | 1000 | |
| | Диаметр нижней образующей, мм | 1567,8 | 4,9 м/с | 5,8 м/с |

Таблица 3

Результаты измерений

| Название яруса | Величины полученных коэффициентов ускорения потока | | Основное направление воздушного потока, градусы | |
|---------------------------------|--|-----------|---|----------------------------|
| | отдельно | в системе | вдоль горизонта | ортогонально оси горизонта |
| 1. Конфузор-спираль | 1,2 | 1,3 | 72 | 90 |
| 2.1. Камера эжекции и ускорения | 1,8 | | 72 | 0 |
| 2.2. Камеры доп. ускорения | 0,8 | | 126 | 0 |
| 3. Дефлектор | 0,75 | | 90 | -90 |

7. Высотой над поверхностью земли нижней границы купола конфузора — предложены варианты: от 500 до 1000 мм.

8. Габаритами и углами сопряжения элементов второго и третьего яруса энергогенерирующего участка [19].

9. Для обеспечения оптимального значения КПД установки необходимо соблюсти условие выхода отработанного воздушного потока параллельно внешнему. Этот фактор необходим при учёте построения геометрии модулей, разворачивающих поток на определённые значения углов, итоговая сумма которых должна иметь значение близкое к 360 градусам.

Для первого модуля (яруса) в ходе экспериментальных исследований в [19] было определено значение оптимального угла поворота потока, величина которого варьируется от 51 до 120 градусов. Для третьего модуля — узла рассеивания, были за-

ложены значения углов закручивания потока согласно экспериментальным данным, полученным в ходе эксплуатации натуральных моделей и готовых узлов. В нашем случае заимствования достаточно известной конструкции дефлектора ЦАГИ интервал закручивания потока составил от 5 до 90 градусов.

Отсюда, с учётом двух предыдущих модулей, величина закручивания потока для второго яруса должна быть в пределах от 126 до 211 градусов. Примем значение равным 126 градусов.

Для того, чтобы определиться с конечной конструкцией ЭГУ, необходимо на предварительных этапах испытаний выявить наиболее оптимальные конструктивные решения отдельных узлов модулей. При этом необходимо учитывать условия наилучших параметров работоспособности каждого узла в отдельности. Однако существует высокая вероятность и того факта, что в некоторых случаях работа элементов в отдельности просто невозможна [20].

Практика. Уход от прямолинейных геометрий, несмотря на достаточную простоту монтажа и изготовления в пользу использования концентрических тел в составе элементов конструкций ЭГУ, обусловлено практикой сравнения результатов математического моделирования с целью получения наилучших коэффициентов ускорения (рис. 2).

Из рис. 2а, б видно, что при изменении внешнего построения конфузора с прямыми плоскостями на концентрическо-гладкотельные величины скоростей внутри тела конфузора получают большие значения.

Более равномерное распределение скоростей потока внутри конфузора доказало необходимость разбиения внутриконтрукционного пространства на пять каналов (рис. 2б, в).

Организация внутреннего пространства каналов заменой острых углов на статические лопасти позволила локализовать рабочий канал и увеличить значение скоростей внутри него (рис. 2в, г).

Для выбранной геометрии произведём выборку высоты внешнего усечённого цилиндрического купола (рис. 3). Полученные данные представим в табл. 2.

Исходя из полученных данных, выберем наиболее оптимальную конфигурацию первого модуля (яруса) для дальнейшего построения энергогенерирующего участка.

Геометрия построения второго модуля аналогична предложенным характеристикам научного исследования эжектора смешения [18].

Третий модуль имеет близкую аналогию с дефлектором ЦАГИ и рассчитывается с учётом переходного диаметра между модулем 2 и 3.

После измерения всех параметров полученные данные занесены в табл. 3, а пример измерения представлен на рис. 4. Полученные данные говорят о работоспособности системы, но с небольшим КПД. Она обеспечивает поддержание, распределение и ускорение набегающего потока, но, безусловно, требует дальнейшей доработки. Выявление оптимальных соотношений всех вышеперечисленных конструктивных параметров даст возможность получения наибольшего КПД ветроустановки.

Наряду с внутренними конструктивными особенностями технологической единицы всегда существуют внешние факторы, появление которых может влиять на эффективность работы системы в целом. Поэтому должное внимание следует уделить адаптации концентраторной установки к некоторым особенностям местности.

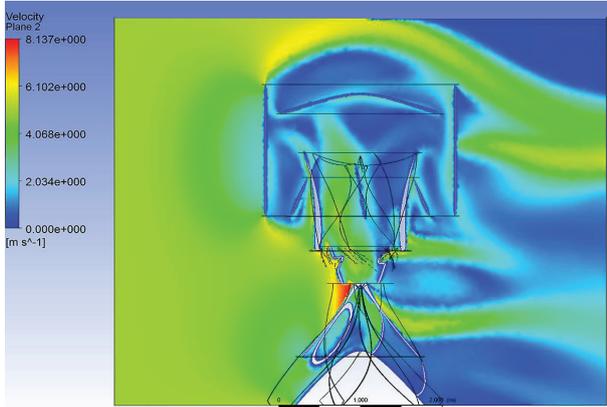


Рис. 4. Карта скоростей математического позиционирования разработанной модели в общем потоке со скоростью 5 м/с

Смена разнотемпературных экстремальных волн на территории России, в частности Западной Сибири, за последние годы возросла [21], что повлекло изменение процессов ветродинамики, характеристика которых, соответственно, проявила более нестабильную природу.

Для минимизации этих явлений, влекущих снижение КПД установки, видится необходимым создание упорядоченной динамики движения воздушных масс (плавность изменения величины воздушного давления).

Это возможно выполнить также при проектировании энергогенерирующего участка с условием ориентации научного поиска на создание более совершенных элементов конструкции и использования более современных узлов, например, таких как: дополнительное конфигурирование элементов первого и второго модуля по принципу трубы Шауберга и установка турбодефлекторных элементов для третьего модуля.

Заключение. Смоделированная конструкция даёт возможность оценки величины коэффициента ускорения воздушного потока. Она позволяет провести анализ отдельных узлов концентрирования: переориентации направления, уплотнения, дополнительной эжекции и рассеивания воздушного потока. При этом на функциональность предложенной системы ускорения потока будут минимально оказывать влияние такие факторы, как температура, интенсивность и частота изменения направлений ветров [22–23].

Построение узла аккумуляции ветрового потока посредством оптимального совмещения модулей и дополнительных надстроек наряду с процессом увеличения мощности и усреднения величины воздушного потока на выходе, также будет способствовать снижению вибрационных нагрузок как на сам конструктив, так и на прилегающие к ВЭУ территории. Это является одним из немаловажных факторов при расположении ВЭУ вблизи социальных объектов и жилой инфраструктуры.

В ходе проведённых исследований посредством математического моделирования были скорректированы данные, полученные путем предварительного гипотетического анализа. Эти данные лягут в основу дальнейших исследований предлагаемых конструкций с учетом влияния дополнительных элементов геометрии в теле энергогенерирующего участка.

Библиографический список

1. Bubenchikov A. A., Bubenchikova T. V., Artamonova E. Y., Shepelev A. O. Flow accelerator for wind power installations with the vertical rotation axis // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), June 6–9, 2017. Milan, 2017. P. 1–8. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977402.
2. Гаврильев Д. М., Филиппов В. Е. Исследование погружения плоской частицы в стоячей воде // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журн.). 2011. № 11. С. 198–200.
3. Бубенчиков А. А., Артамонова Е. Ю., Дайчман Р. А. [и др.]. Проблемы применения ветроэнергетических установок в регионах с малой ветровой нагрузкой // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 5-2 (36). С. 39–43.
4. Heier S. Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems. UK: John Wiley & Sons Inc., 2014. 520 p. ISBN 978-1-119-96294-6.
5. Винт ветрогенератора // Эффективная ветроэнергетика. URL: <http://x-vint.ru/index4.html> (дата обращения: 10.09.2018).
6. Горелов Д. Н. Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения. Омск: Полиграфический центр КАН, 2012. 66 с. ISBN 978-5-9931-0168-2.
7. Доржиев С. С., Базарова Е. Г., Горинов К. А. Осевые ускорители низкопотенциальных ветровых потоков // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). 2015. № 7 (171). С. 48–54. DOI: 10.15518/isjaee.2015.07.003.
8. Мирошник В. В., Подберезкин Д. А., Копейкин Д. А. [и др.]. Исследование аэродинамики и энергетических характеристик ротора Дарье // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 12-3 (54). С. 134–141.
9. Куренский А. В., Бондаренко А. А., Кончаков Е. И. Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик ветротурбины с вертикальной осью вращения // Вологодские чтения. 2007. № 65. С. 94–95.
10. Лисицын А. Н., Задорожная Н. М. О перспективах ветроэнергетики в современном мире // Инновационные технологии в науке и образовании: сб. ст. V Международной науч.-практ. конф., 25 авг. 2017 г. Пенза, 2017. С. 36–42. ISBN 978-5-906973-72-6.
11. Типы ветротурбин, их мощность, эффективность // Ваш солнечный дом. URL: <http://www.solarhome.ru/basics/wind/> (дата обращения: 10.09.2018).
12. Janajreh I., Simiu E. Large Eddy Simulation of Wind Loads on a Low-Rise Structure and Comparison with Wind Tunnel Results // Applied Mechanics and Materials. 2012. Vol. 152-154. P. 1806–1813. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.152-154.1806.
13. Lee Y.-T., Lim H.-C. Power Performance Improvement of 500W Vertical Axis Wind Turbine with Salient Design Parameters // World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 2016. Vol. 10, no. 1. P. 84–88.
14. Байрамов Ф. Д., Галимов Н. С., Иванов В. А. Пути повышения эффективности ветродвигателей роторного типа с вертикальной осью вращения в мегаполисе // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 2. С. 99–102.
15. Говорова А. И. Математическое моделирование нестационарного отрывного обтекания разомкнутого контура: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Омск, 2015. 92 с.
16. Серебряков Р. А., Доржиев С. С., Базарова Е. Г. Современное состояние, проблемы и перспективы развития ветроэнергетики // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 10-1. С. 95–102.
17. Соколовский Ю. Б., Соколовский А. Ю., Лимонов Л. Г. Повышение эффективности ветровых энергетических уста-

новок // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 9 (127). С. 28–37.

18. DE-EE0003276 Next Generation Wind Turbine. Final Report, September 1, 2012. // Western New England University. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1326374> (дата обращения: 14.09.2018).

19. Исследование энергетических характеристик ветроколес с вертикальной осью вращения: отчет о НИР (промежуточн.) / Омский гос. техн. ун-т; рук. Бубенчиков А. А. Омск, 2017. 53 с. Рег. № АААА-А16-116092210075-8. № ИКРБС АААА-Б17-217053040004-0.

20. Тайна «бутылки Клейна». Челябинские ученые с помощью квантовой теории поля пытаются разгадать секреты мироздания // Южноуральская панорама. URL: <https://ur74.ru/articles/obshchestvo/87614/> (дата обращения: 14.09.2018).

21. Паромов В. В., Земцов В. А., Копысов С. Г. Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 1. С. 62–74.

22. Разработка ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения, способных эффективно работать в регионах с относительно низким уровнем ветровой энергии: отчет о НИР (заключит.) / Омский гос. техн. ун-т; рук. Бубенчиков А. А. Омск, 2018. 33 с. Рег. № АААА-А16-116092210075-8. № ИКРБС АААА-Б18-218060190082-2.

23. Карта ветровых районов России // СпецСтройСтандарт. URL: <http://www.angar21.ru/map-veter> (дата обращения: 14.09.2018).

ЛЕБЕДЕВ Игорь Сергеевич, магистрант гр. ЭЭМ-173 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: lisnick@bk.ru

БУБЕНЧИКОВ Антон Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 4357-5273

AuthorID (РИНЦ): 512777

ORCID: 0000-0002-2923-1123

AuthorID (SCOPUS): 57188871772

ResearcherID: D-7850-2014

Адрес для переписки: privetomsk@mail.ru

ЗАХАРОВ Андрей Андреевич, студент гр. ЭТМ-151 факультета транспорта, нефти и газа.

Адрес для переписки: a.n.dr.e.w@mail.ru

БУБЕНЧИКОВА Татьяна Валерьевна, аспирантка кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

AuthorID (SCOPUS): 57190581588

Адрес для переписки: antech-energo@mail.ru

Для цитирования

Лебедев И. С., Бубенчиков А. А., Захаров А. А., Бубенчикова Т. В. Разработка энергогенерирующего участка автономных ветровых энергетических систем для регионов резко континентального климата с малым ветровым давлением // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 154–159. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-154-159.

Статья поступила в редакцию 08.11.2018 г.

© И. С. Лебедев, А. А. Бубенчиков, А. А. Захаров,

Т. В. Бубенчикова