

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (05.14.02)

УДК 620.91

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-14-19

### Оптимизация конструкции конфузора ветроэнергетической установки для регионов с нестабильно-малым ветровым давлением

И.С. Лебедев, А.А. Бубенчиков, В.Н. Горюнов, К.В. Хацевский

Рассмотрен вариант проектирования концентратора ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения, позволяющий достичь наибольших значений КПД относительно известных аналогов в условиях размещения ветроэнергетической установки в регионах резко континентального климата. Проанализирован принцип действия конфузорно-диффузорных ускорителей воздушного потока для ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения. Предложены модели трех-, пяти- и семилопастных ускорителей потока с разной величиной единичного радиуса логарифмической спирали по основанию. Определены суммарные величины средних коэффициентов ускорения воздушного потока в теле конфузорного канала при различной скорости набегающего потока в случаях наличия и отсутствия направляющей конструкции. Выявлены варианты поиска оптимальной конструкции ускорителя потока для получения наибольшего КПД ветроэнергетической установки. Дан случай построения узла аккумуляции воздушного потока посредством установки друг на друга ярусных надстроек, наряду с процессами увеличения мощности и усреднения величины воздушного потока на выходе. Данный вариант способствует снижению вибрационных нагрузок как на сам конструктив, так и на местность расположения ветроэнергетических установок в целом. Предложенные конструкции не нуждаются в ориентации по ветру и обладают свойством усреднения набегающего порывистого воздушного потока.

*Ключевые слова:* конфузор, концентратор, ускорение воздушного потока, ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения, многоярусное исполнение.

*Для цитирования:* Лебедев И.С., Бубенчиков А.А., Горюнов В.Н., Хацевский К.В. Оптимизация конструкции конфузора ветроэнергетической установки для регионов с нестабильно-малым ветровым давлением // Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 14—19. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-14-19.

### Optimizing the Confuser Design of a Wind Power Plant for Regions with Unstably Low Wind Pressure

I.S. Lebedev, A.A. Bubenchikov, V.N. Goryunov, K.V. Khatsevsky

The article considers a concentrator design version for a wind power plant with a vertical rotation axis that makes it possible to obtain the highest efficiency values as compared with those shown by the known analogues under the wind power plant placement conditions in regions with a sharply continental climate. The operating principle of convergent-divergent airflow accelerators for wind power plants with a vertical rotation axis is analyzed. The models of three-, five-, and seven- paddle flow accelerators with different unit log spiral radius to the base are proposed. The resulting values of the average air flow acceleration coefficients in the converging duct body are determined at different incident flow velocities for the design versions with and without a guiding structure. Versions of searching for the optimal flow accelerator design for obtaining the maximum wind power plant efficiency are identified. The article presents an air flow concentration unit version obtained by placing tier superstructures one upon another along with the processes of increasing the power capacity and averaging the air flowrate at the outlet. The presented design version helps reduce the vibration loads

both on the wind power plant structure itself and on the location of the wind power plants as a whole. The proposed design versions do not require orientation in the wind direction and have the property of averaging the incident gusty air flow.

*Key words:* confuser, concentrator, air flow acceleration, wind power plants with a vertical rotation axis, multi-tier design.

*For citation:* Lebedev I.S., Bubenchikov A.A., Goryunov V.N., Khatsevsky K.V. Optimizing the Confuser Design of a Wind Power Plant for Regions with Unstably Low Wind Pressure. MPEI Vestnik. 2019;1:14—19. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-14-19.

## Введение

Непостоянство течения воздушных масс, пригодных для получения электрической энергии, характерное для открытых областей районов с незастроенной инфраструктурой, предполагает создание воздушных систем, стабилизирующих ветровой поток в установках концентраторного типа. За счет подобной конструкции среднее значение скорости ветрового потока увеличивается, что приводит к увеличению вырабатываемой мощности ветроэнергетической установки (ВЭУ).

## Постановка задачи

Для обеспечения возможности формирования непрерывного плотного закрученного воздушного потока на участках съема ветровой энергии предложен вариант моделирования концентраторной установки конфузорного типа в модульно-ярусном исполнении.

В ее основу заложены уже существующие модели и прототипы конфузорных концентраторов ветровой энергии [1]. Отличительной особенностью является возможность уплотнения сформированного ранее воздушного потока посредством добавления дополнительного потока воздуха благодаря сбору энергии со смежных приточных областей съема и захвата воздушного потока, находящихся в одной проекции с базовой областью. Принцип преобразования направлений дополнительных (смежных) воздушных каналов аналогичен базовому и описан в [1].

## Теоретические данные

Принцип действия всех концентраторов ветровой энергии основан на эффекте Вентури, следствии действия закона Бернулли и заключается в падении давления и увеличении скорости при прохождении потока газа через суженную часть трубы [2].

В соответствии с законом Бернулли сумма давления или потенциальной и кинетической энергий в идеальной несжимаемой жидкости неизменна:

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{const},$$

где  $p$  — давление;  $\rho$  — плотность жидкости (газа);  $V$  — скорость потока.

Падение давления в сужении выглядит следующим образом:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 = \text{const};$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 - \frac{1}{2}\rho V_1^2 = \frac{1}{2}\rho(V_2^2 - V_1^2).$$

Данный закон объясняет эффект Вентури: в узкой части трубы скорость течения газа выше, а давление меньше, чем на участке трубы большего диаметра, в итоге чего имеется разница давлений.

Увеличение скорости одного и того же потока в сужающейся точке концентратора дает отбор большего количества мощности [3]:

$$P = \frac{1}{2}\rho s V^3,$$

где  $P$  — мощность ветрового потока;  $\rho$  — плотность воздуха;  $s$  — площадь поперечного сечения потока;  $V$  — скорость ветра.

Таким образом, справедливо предположение, что мощность возрастает за счет сокращения площади поперечного сечения потока с одномоментным увеличением его скорости, поэтому ускорение воздушного потока является основным направлением развития для повышения эффективности работы ВЭУ.

Учитывая опыт проектирования и эксплуатации ветродинамических систем в условиях малого ветрового давления [4—11], можно утверждать, что вертикально-осевые ВЭУ наиболее оптимальны для поставленных условий.

С целью повышения эффективности работы ВЭУ следует разработать дополнительную конструкцию, увеличивающую скорость и плотность потока при помощи его закручивания [12—17]. Таковыми могут стать конфузорно-диффузорные каналы башенного типа, собирающие поток воздуха с любой стороны своей конструкции вне зависимости от направления ветра и меняющие горизонтальное движение воздушного потока на вертикальное (рис. 1).

На выходе воздушного потока из конфузора 1 устанавливается ветроколесо 2, закрытое в горизонтальном направлении цилиндрическим кожухом. Кинетическая энергия воздушного потока преобразуется во вращательное движение ветроколеса за счет лопастей. Вращающий момент посредством валопровода 3, на котором смонтировано ветроколесо, передается в коробку передач, а затем к генератору, расположенному в основании конфузора.

Сформированный поток воздуха в каждом из каналов поступает в камеру (трубу) центральной оси

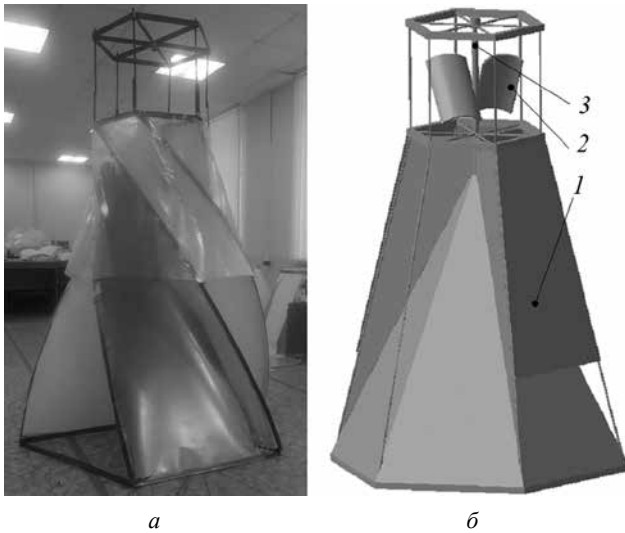


Рис. 1. Конфузор экспериментальной модели ВЭУ (а) и вариант исполнения концентратора с ветроколесом (б):

1 — конфузор; 2 — ветроколесо; 3 — валопровод

установки через соответствующие отверстия в ее теле. Геометрия отверстий напоминает полумесяц с округленным низом и заостренным верхом. В теле камеры располагаются направляющие бороздки для упорядочивания потоков, выводя суммарную непрерывную плотную закрученную воздушную струю воздуха непосредственно к зоне съема ветровой энергии. Воздушная система имеет множество входов (каналов) и один выход. Диаметр камеры определяется следующими конструктивными элементами (параметрами):

- масштабом витков спирали статичной лопасти (влияет на угол поворота ветрового потока и ширину канала);
- числом витков закручивания (влияет на ширину канала);
- геометрией направляющего лотка (моста) канала (влияет на угол поворота ветрового потока);
- величиной и характером наклона грани внешней образующей статичной лопасти, обеспечивающей плавное вхождение ветрового потока в конфузор вет-

роустановки (влияет на площадь входа потока в концентратор);

- формой и углами поворота направляющих ребер внутри воздушного канала концентратора (влияет на плотность и скорость потока);
- количеством ярусов системы (влияет на плотность и скорость потока);
- углами поворотов нанизываемых ярусов относительно друг друга;
- формой и углами поворота направляющих ребер центральной трубы (канала) концентратора (влияет на плотность и скорость потока);
- высотой конфузора.

### Результаты практического исследования

Данные экспериментальных исследований показали, что величина оптимальных значений угла поворота ветрового потока варьируется от  $51^{\circ}25'43''$  до  $120^{\circ}$  (таблица).

Были испытаны конфузорные конструкции с использованием трех вариантов для трех-, пяти- и семилопастных моделей различных масштабов витков, разница которых заключалась в длине внешней образующей статической лопасти в зависимости от величины единичного радиуса спирали. Построение лопасти проводили по проекции спирали, а плоскость лопасти формировало направление и характер воздушного потока, скользящего в ее границах (рис. 2);

Оптимальное количество витков, соответствующих количеству каналов, — 5 штук (рис. 3).

Величина скорости потока для пятилопастного конфузора (как наиболее эффективного в случае получения наибольшего ускорения) на участке формирования закрученной струи воздуха может увеличиваться от 1,13 до 1,33 раза в зависимости от плавности входа (направления входящего потока) и движения воздушных масс в концентраторе по мосту в канале конструкции (рис. 4).

Определение оптимальных соотношений всех вышеперечисленных конструктивных параметров позволяет получить наибольший КПД ветроустановки.

### Величины коэффициентов ускорения для различных ускорителей

Номер модели	Величина единичного радиуса логарифмической спирали по основанию, м	Количество лопастей	Скорость набегающего воздушного потока, м/с			Скорость набегающего потока при наличии направляющего моста, м/с	Суммарная величина среднего коэффициента ускорения
			3	5	1,5		
1	1,30	3	2,92	2,90	1,71	1,32	3,84
2	0,65		3,29	2,63	—*	—*	—
4	1,30	5	3,26	3,55	3,59	1,23	1,01
5	0,65		3,08	3,18	2,39	1,15	3,54
7	1,30	7	2,42	2,39	2,48	1,33	3,21
8	0,65		3,01	3,42	2,52	—*	—

\*не рассматривается, поскольку величина коэффициента близка к единице

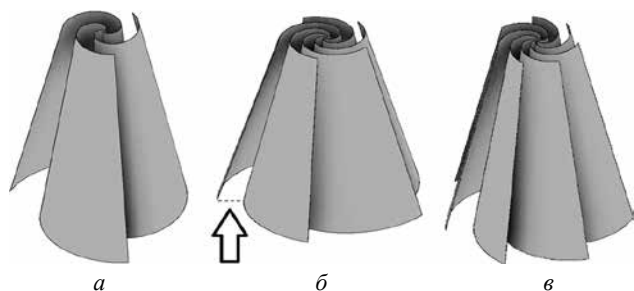


Рис. 2. Модели трех- (а), пяти- (б) и семилопастных (в) ускорителей с отображением направления входящего потока для одного из них

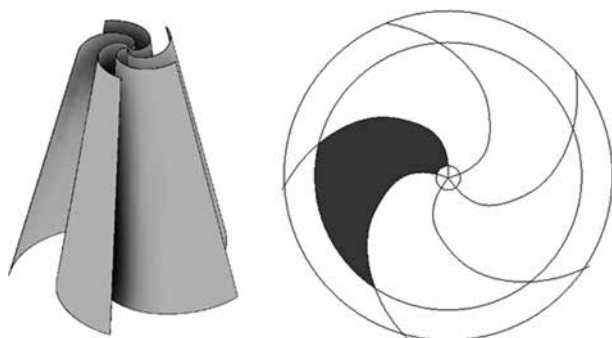


Рис. 3. Модель структуры и проекция построения основания пятилопастного ускорителя

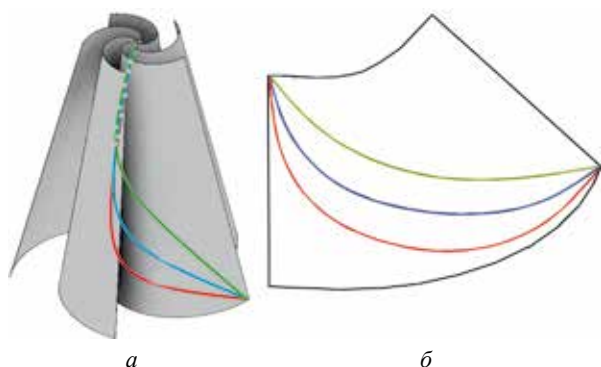


Рис. 4. Проекция примыкания мостов к лопасти конфузора: а — общий вид; б — развертка одной из лопастей

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

Частота экстремальных волн тепла и холода на территории России, а в частности, в Западной Сибири, за последние годы возросла [18], что повлекло за собой

изменение ветродинамических процессов, характеристика которых проявляет более нестабильную природу. Упорядоченная динамика движения воздушных масс (плавность изменения величины воздушного давления) после контакта ветра с конфузором ВЭУ при перемене скорости ветра и минимизация потерь величины КПД конфузора, при изменении направления ветра заставили предположить, что наиболее вероятный конструктив, отвечающий этим требованиям, будет иметь вид, изображенный на рис. 5.

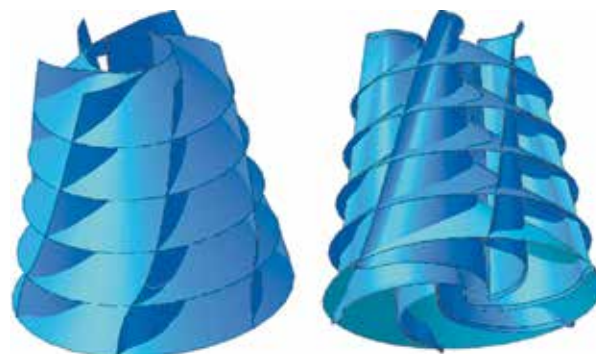


Рис. 5. Прототип варианта конфузора ВЭУ большей мощности

### Заключение

Смоделированная конструкция помогла выровнять величину сформированного в концентраторной установке воздушного потока воздуха, увеличить ее мощность вне зависимости от ветров, характерных для определенных сезонов года [19], преобладающих в областях резкоконтинентального климата [18] и при резкой смене температурного режима в течение одних суток.

Построение узла аккумуляции ветрового потока посредством установки друг на друга ярусных надстроек, наряду с процессом увеличения мощности и усреднения величины воздушного потока на выходе, способствует снижению вибрационных нагрузок как на сам конструктив, так и на местность расположения ВЭУ в целом [20]. Это является одним из немаловажных факторов при расположении ВЭУ вблизи социальных объектов и жилой инфраструктуры.

В ходе проведенных экспериментальных исследований на физической модели скорректированы данные, полученные путем аналитического и математического моделирования. Они лягут в основу дальнейших исследований предлагаемых конструкций с учетом влияния дополнительных элементов геометрии в теле конфузорного канала.

## Литература

## References

1. **Bubenchikov A.A., Bubenchikova T.V., Artamonova E.Y., Shepelev A.O.** Flow Accelerator for Wind Power Installations with the Vertical Rotation Axis // IEEE Intern. Conf. Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Syst. Europe. Milan, 2017. Pp. 1—8.

2. **Филиппов В.Е., Гаврильев Д.М.** Исследование погружения плоской частицы в стоячей воде // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 11. С. 198—200.

3. **Бубенчиков А.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.** Wind Energy Conversion Systems // Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Syst. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2014.

5. **Винт** ветрогенератора [Электрон. ресурс] <http://x-vint.ru/index4.html> (дата обращения 14.10.2017).

6. **Горелов Д.Н.** Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения. Омск: Полиграфический центр КАН, 2012.

7. **Доржиев С.С., Базарова Е.Г., Горинов К.А.** Осевые ускорители низкопотенциальных ветровых потоков // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2015. № 7. С. 48—54.

8. **Мирошник В.В. и др.** Исследование аэродинамики и энергетических характеристик ротора Дарье // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 12 (54). С. 134—141.

9. **Куренский А.В., Бондаренко А.А., Кончakov 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: Сборник статей V Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2017. С. 36—42.

11. **Типы** ветротурбин, их мощность, эффективность [Электрон. ресурс] <http://www.solarhome.ru/basics/wind/> (дата обращения 14.10.2017).

12. **Janajreh I., Simiu E.** Large Eddy Simulation of Wind Loads on a Low-rise Structure and Comparison with Wind Tunnel Results // Appl. Mechanics and Materials. 2012. V. 152—154. Pp. 1806—1813.

13. **Lee Y.T., Lim H.C.** Power Performance Improvement of 500W Vertical Axis Wind Turbine with Salient Design Parameters // Intern. J. Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Eng. 2016. V. 10. No. 1. Pp. 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.

1. **Bubenchikov A.A., Bubenchikova T.V., Artamonova E.Y., Shepelev A.O.** Flow Accelerator for Wind Power Installations with the Vertical Rotation Axis. IEEE Intern. Conf. Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Syst. Europe. Milan, 2017:1—8.

2. **Filippov V.E., Gavril'ev D.M.** Issledovanie Pogruzheniya Ploskoy Chastitsy v Stoyachey Vode. Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten'. 2011;11:198—200. (in Russian).

3. **Bubenchikov A.A. i dr.** Problemy Primeneniya Vetroenergeticheskikh Ustanovok v Regionah s Maloy Vetrovoy Nagruzkoj. Mezhdunarodnyy Nauchno-issledovatel'skiy Zhurnal. 2015;5–2(36):39—43. (in Russian).

4. **Heier S.** Wind Energy Conversion Systems. Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Syst. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2014.

5. **Vint** Vetrogeneratora [Elektron. Resurs] <http://x-vint.ru/index4.html> (Data Obrashcheniya 14.10.2017). (in Russian).

6. **Gorelov D.N.** Aerodinamika Vetrokoles s Vertikal'noy Os'yu Vrashcheniya. Omsk: Poligraficheskiy Tsentr KAN, 2012. (in Russian).

7. **Dorzhiyev S.S., Bazarova E.G., Gorinov K.A.** Osevyje Uskoriteli Nizkopotentsial'nyh Vetrovykh Potokov. Al'ternativnaya Energetika i Ekologiya (ISJAEE). 2015;7:48—54. (in Russian).

8. **Miroshnik V.V. i dr.** Issledovanie Aerodinamiki i Energeticheskikh Charakteristik Rotora Dar'e. Mezhdunarodnyy Nauchno-issledovatel'skiy Zhurnal. 2017;12 (54):134—141. (in Russian).

9. **Kuren'skiy A.V., Bondarenko A.A., Konchakov E.I.** Eksperimental'nye Issledovaniya Aerodinamicheskikh Karakteristik Vetroturbin s Vertikal'noy Os'yu Vrashcheniya. Vologd'skie Chteniya. 2007;65:94—95. (in Russian).

10. **Lisitsyn A.N., Zadorozhnaya N.M.** O perspektivah Vetroenergetiki v Sovremennom Mire. Innovatsionnye Tekhnologii v Nauke i Obrazovanii: Sbornik Statey V Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. Penza, 2017:36—42. (in Russian).

11. **Tipy** Vetroturbin, ih Moshchnost', Effektivnost' [Elektron. Resurs] <http://www.solarhome.ru/basics/wind/> (Data Obrashcheniya 14.10.2017). (in Russian).

12. **Janajreh I., Simiu E.** Large Eddy Simulation of Wind Loads on a Low-rise Structure and Comparison with Wind Tunnel Results. Appl. Mechanics and Materials. 2012;152—154:1806—1813.

13. **Lee Y.T., Lim H.C.** Power Performance Improvement of 500W Vertical Axis Wind Turbine with Salient Design Parameters. Intern. J. Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Eng. 2016;10;1:84—88.

14. **Bayramov F.D., Galimov N.S., Ivanov V.A.** Puti Povysheniya Effektivnosti Vetrodvigateley Rotornogo Tipa s Vertikal'noy Os'yu Vrashcheniya v Megapolise. Nauchno-tekhnicheskij Vestnik Povolzh'ya. 2014;2:99—102. (in Russian).

15. **Говорова А.И.** Математическое моделирование нестационарного отрывного обтекания разомкнутого контура: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Омск: Омский гос. ун-т им. Ф.М. Достоевского, 2015.

16. **Серебряков Р.А., Доржиев С.С., Базарова Е.Г.** Современное состояние, проблемы и перспективы развития ветроэнергетики // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 3. С. 13—20.

17. **Соколовский Ю.Б., Соколовский А.Ю.** Повышение эффективности ветровых энергетических установок // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 9 (127). С. 28—37.

18. **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 политехн. ун-та. Серия «Инжиниринг георесурсов». 2017. Т. 328. № 1. С. 62—74.

19. **Карта ветровых районов России** [Электрон. ресурс] <http://www.angar21.ru/map-veter> (дата обращения 14.10.2017).

20. **Казакевич М.И., Кулябко В.В.** Введение в виброэкологическую среду зданий и сооружений. Днепропетровск: ПГАСА, 1996.

15. **Govorova A.I.** Matematicheskoe Modelirovanie Nestatsionarnogo Otryvnogo Obtekaniya Razomknutogo Kontura: Diss. ... Kand. Fiz.-mat. Nauk. Omsk: Omskiy Gos. Un-t im. F.M. Dostoevskogo, 2015. (in Russian).

16. **Serebryakov R.A., Dorzhiev S.S., Bazarova E.G.** Sovremennoe Sostoyanie, Problemy i Perspektivy Razvitiya Vetroenergetiki. Aktual'nye Problemy Gumanitarnykh i Estestvennykh Nauk. 2016;3:13—20. (in Russian).

17. **Sokolovskiy Yu.B., Sokolovskiy A.Yu.** Povysheniye Effektivnosti Vetrovykh Energeticheskikh Ustanovok. Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit. 2014;9 (127):28—37. (in Russian).

18. **Paromov V.V., Zemtsov V.A., Kopysov S.G.** Klimat Zapadnoy Sibiri v Fazu Zamedleniya Potepleniya (1986 — 2015 gg.) i Prognozirovaniye Gidroklimaticheskikh Resursov na 2021 — 2030 gg.. Izvestiya Tomskogo Politekhn. Un-ta. Seriya «Inzhiniring Georesursov». 2017;328;1:62—74. (in Russian).

19. **Karta Vetrovykh Rayonov Rossii** [Elektron. Resurs] <http://www.angar21.ru/map-veter> (Data Obrashcheniya 14.10.2017). (in Russian).

20. **Kazakevich M.I., Kulyabko V.V.** Vvedeniye v Vibroekologiyu Zdanij i Sooruzheniy. Dnepropetrovsk: PGASA, 1996. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Лебедев Игорь Сергеевич** — кандидат технических наук, художественный руководитель музыкальной студии студенческого клуба Омского государственного технического университета, e-mail: [lisnick@bk.ru](mailto:lisnick@bk.ru)

**Бубенчиков Антон Анатольевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Омского государственного технического университета, e-mail: [privetomsk@mail.ru](mailto:privetomsk@mail.ru)

**Горюнов Владимир Николаевич** — доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий Омского государственного технического университета

**Хацевский Константин Владимирович** — доктор технических наук, профессор секции промышленной электроники кафедры электрической техники Омского государственного технического университета

#### Information about authors:

**Lebedev Igor S.** — Ph.D. (Techn.), Artistic Director of the Music Studio of the Student Club, Omsk State Technical University, e-mail: [lisnick@bk.ru](mailto:lisnick@bk.ru)

**Bubenchikov Anton A.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Power Supply of Industrial Enterprises Dept., Omsk State Technical University, e-mail: [privetomsk@mail.ru](mailto:privetomsk@mail.ru)

**Goryunov Vladimir N.** — Dr.Sci. (Techn.), Head of Power Supply of Industrial Enterprises Dept., Omsk State Technical University

**Khatsevsky Konstantin V.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Section of Industrial Electronics of Electrical Engineering Dept., Omsk State Technical University

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 15.02.2018

**The article received to the editor:** 15.02.2018