

УДК 620.92

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-53-61

Геометрическое и численное моделирование стационарной модульной ветроэлектростанции для регионов с широким диапазоном ветровых нагрузок

Ц.Г. Надараиа, И.Я. Шестаков, Л.А. Бабкина, А.А. Фадеев, А.И. Селиванов

Приведен обзор как традиционных источников энергии, их особенности использования и недостатки, а также и возобновляемых источников энергии: потенциал, перспективы их использования в различных областях экономики. На основе статистических данных по ветровой нагрузке в регионах Российской Федерации (Красноярском крае, районах рек Енисей и Ангара), а также данных по ветровой нагрузке (побережье США) показаны возможности использования ветроустановок на водных участках (морья, реки, озера). На основе расчетных данных и экспериментальных исследований для эффективной выработки электроэнергии предложена модульная конструкция с концентратором воздушного потока, состоящая из конфузора, ветроколеса, установленного в цилиндрической части модуля, диффузора, синхронного генератора с постоянными магнитами, каркасно-ферменных элементов конструкций и жалюзийных решёток, установленных на входе в конфузор и на выходе из диффузора, и размещаемая в долинах рек, на побережье озёр, морей и океанов. Разработанная модульная конструкция имеет преимущества перед другими традиционными ветроустановками, поскольку позволяет учитывать уникальный ветровой режим области размещения, что обеспечивает стабильную работу. Численное моделирование аэродинамического воздействия на элементы модуля конструкции показало распределение скоростей формирующиеся при обтекании конструкции ветровым потоком, давлений, силы и аэродинамические коэффициенты, подтвердившие правильность выбранного конструкторского решения. Данные расчеты являются основой для дальнейших исследований и оптимизации конструкции.

Ключевые слова: ветроустановка, конфузор, диффузор, возобновляемые источники энергии.

Для цитирования: Надараиа Ц.Г., Шестаков И.Я., Бабкина Л.А., Фадеев А.А., Селиванов А.И. Геометрическое и численное моделирование стационарной модульной ветроэлектростанции для регионов с широким диапазоном ветровых нагрузок // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 53—61. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-53-61.

Geometrical and Numerical Modeling of a Stationary Modular Windmill for Regions with a Wide Range of Wind Loads

C.G. Nadaraia, I.Ya. Shestakov, L.A. Babkina, A.A. Fadeev, A.I. Selivanov

The article contains an overview of both traditional energy sources, specific features and drawbacks associated with their utilization, and renewable energy sources, including their potential and prospects of using them in different sectors of the economy. The possibilities of using wind turbines in water areas (seas, rivers, and lakes) are shown proceeding from the statistical data on wind load in different regions of the Russian Federation (including the Krasnoyarsk region and the areas of the Yenisei and Angara Rivers), as well as data on the wind load in the United States coastal areas. Based on the calculated data and experimental investigations, a modular design with an air flow concentrator consisting of a converging cone, a wind wheel installed in the module cylindrical part, a diffuser, a permanent-magnet synchronous generator, frame-and-truss structural elements, and louvered gratings installed at the converging cone inlet and at the diffuser outlet, and placed in river valleys, on the coast of lakes, seas and oceans is proposed for efficient generation of electricity. The developed modular design has advantages over other traditional windmills, because it makes it possible to take into account the unique wind conditions in the placement area, due to which stable operation is ensured. Numerical simulation of the aerodynamic impact on the module structural elements gave the distribution of velocities produced by the wind flow as it streamlines the structure, as well as pressures, forces and aerodynamic coefficients, which have confirmed correctness of the chosen design solution. These calculations are the basis for further investigations and optimization of the design.

Key words: windmill, converging cone, diffuser, renewable energy sources.

For citation: Nadaraia C.G., Shestakov I.Ya., Babkina L.A., Fadeev A.A., Selivanov A.I. Geometrical and Numerical Modeling of a Stationary Modular Windmill for Regions with a Wide Range of Wind Loads. Bulletin of MPEI. 2019;5:53—61. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-53-61.

Введение

Возрастающий интерес к проблемам использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) связан с увеличением до невиданных ранее масштабов потребления ископаемого топлива.

В России ВИЭ используются мало, их доля в производстве электроэнергии составляет менее 1% (без учета крупных ГЭС).

К возобновляемым источникам энергии относится ветер. Ветроэнергетический потенциал нашей страны составляет около 1/4 общего потенциала всех видов ВИЭ и по данным Европейской ветроэнергетической ассоциации (EWEA) оценивается в 320 млрд тонн условного топлива в год [1 — 3]. В ближайшем будущем неизбежен значительный рост использования энергии ветра и других видов ВИЭ.

Считается, что для работы ветроустановок среднегодовая скорость ветра должна быть не менее 4...6 м/с [4].

По многолетним наблюдениям в г. Красноярске, центральных и южных районах края среднегодовая скорость ветра от 3 до 5 м/с [5]. Среднегодовая скорость ветра у Енисея, Ангары больше чем на суше на 0,4 и 1,2 м/с, соответственно [6]. Кроме этого известно, что в долине реки Енисей постоянно дует ветер со скоростью более 3 м/с [7].

Основной характеристикой ветра, определяющей его интенсивность и эффективность использования, является средняя скорость за определенный период времени, например за сутки, месяц, год или несколько лет.

Энергия ветра пропорциональна его скорости v в третьей степени и определяется [8]:

$$E = (\rho v^3 F) / 2,$$

где ρ — плотность воздуха, равная для нормальных условий 1,23 кг/м³ (при $t = 15$ °С и $p = 101,3$ кПа или 760 мм рт. ст.); F — площадь поперечного сечения потока ветра.

Увеличение скорости воздушного потока — способ повышения эффективности ветроэнергетических установок.

На этапе развития ветроэнергетики для повышения скорости воздушного потока предлагалось перед ветроколесом установить раструб (конфузор) [9]. Данное техническое решение не нашло применения из-за громоздкости конструкции, и продувки в ЦАГИ не подтвердили ощутимого увеличения мощности. Тем не менее, в отдельных случаях конфузор позволит уменьшить размеры ветроколеса при получении той же мощности. В [9] рассмотрен цилиндрический щелевой раструб, установленный за ветроколесом. При этом увеличиваются скорости потока за ветроколесом и перед ним, что приводит к росту мощности, развиваемой генератором. Однако, из-за увеличения габаритов подвижной конструкции это техническое решение не нашло применения

В США проводили исследования диффузора с управляемым пограничным слоем, был сделан вывод о том, что такая конструкция увеличивает мощность ветроэлектростанции в 1,5...2 раза [10].

Предложена ветроэнергетическая установка с аэродинамической трубой, в наименьшем сечении которой размещён воздушный винт, причём площади входного и выходного сечений равны [11]. В другом техническом решении [12] указываются недостатки предыдущего патента: слабая мощность получаемого потока, большое количество сложных устройств, громоздкость и неэффективность предлагаемого устройства. Авторы [13] предлагают использовать два корпуса, состоящих из конфузора и диффузора, установленные коаксиально. Во внутреннем корпусе располагаются турбина и генератор.

Анализ существующих технических решений показывает нераскрытость важных геометрических па-

раметров, таких как угол конусности конфузора и диффузора, их длина, не предусмотрены устройства, обеспечивающие работу ветроустановки при больших скоростях ветра (более 20 м/с).

С учетом природных особенностей ветра разработан модуль с концентратором воздушного потока для эффективной выработки электроэнергии. Он состоит из конфузора, ветроколеса крыльчатого типа, установленного в цилиндрической части модуля, диффузора, синхронного многополюсного бесщеточного генератора с постоянными магнитами, каркасно-ферменных элементов конструкций и жалюзийных решёток, установленных на входе в конфузор и на выходе из диффузора (рис. 1).

Источником энергии служит ветер в долинах рек, на побережье озёр, морей и океанов.

Благодаря жалюзийной решётке поток воздуха всегда направлен на ветроколесо, причём его скорость возрастает за счёт движения в конфузоре. Таким образом, ветровая нагрузка на лопасти ветроколеса увеличивается до необходимого минимума и гарантирует стабильную работу, давая преимущество над существующими, аналогичными ветровыми электростанциями (ВЭУ). Модули можно устанавливать на объектах, расположенных над рекой, и на сооружениях вблизи от русла реки (в зависимости от рельефа местности), возможно их сооружение и эксплуатация в прибрежных зонах морей и океанов, степных районах со среднегодовой скоростью ветра 2...4 м/с. На рисунке 1 изображен общий вид модульной ветроэлектростанции, на рис. 2 — вид сбоку, рис. 3 — фрагмент фасада.

Ветроэлектрическая станция включает рамный корпус 1, модули 2, состоящие из ветроколеса, конфузора, диффузора, жалюзийных решёток, установленные перед конфузуром и за диффузором, опоры 3, накопители энергии 4. Конфузор, согласно уравнению Бернулли, увеличивает скорость потока, что необходимо для увеличения мощности ветроэлектростанции, поэтому представлено численное моделирование воздушного потока при его движении в данном элементе модуля.

Численное моделирование аэродинамического воздействия на один конструктивный элемент модуля (конфузор) выполнено в интегрированном пакете газо- и гидродинамического анализа SolidWorks Flow Simulation в среде SolidWorks [14 — 17].

Трёхмерная геометрическая модель создана с использованием системы автоматизированного проектирования SolidWorks [18]. Упрощённая геометрическая модель состоит из сборочного узла винта с осью 1, диффузора 2, рамного элемента 3 и конфузора 4 (рис. 4).

Алгоритм численного расчета содержит определение типа решаемой задачи и характеристики течения, задание расчетной области, не исключая внутреннее пространство, настройку параметров глобальной сет-

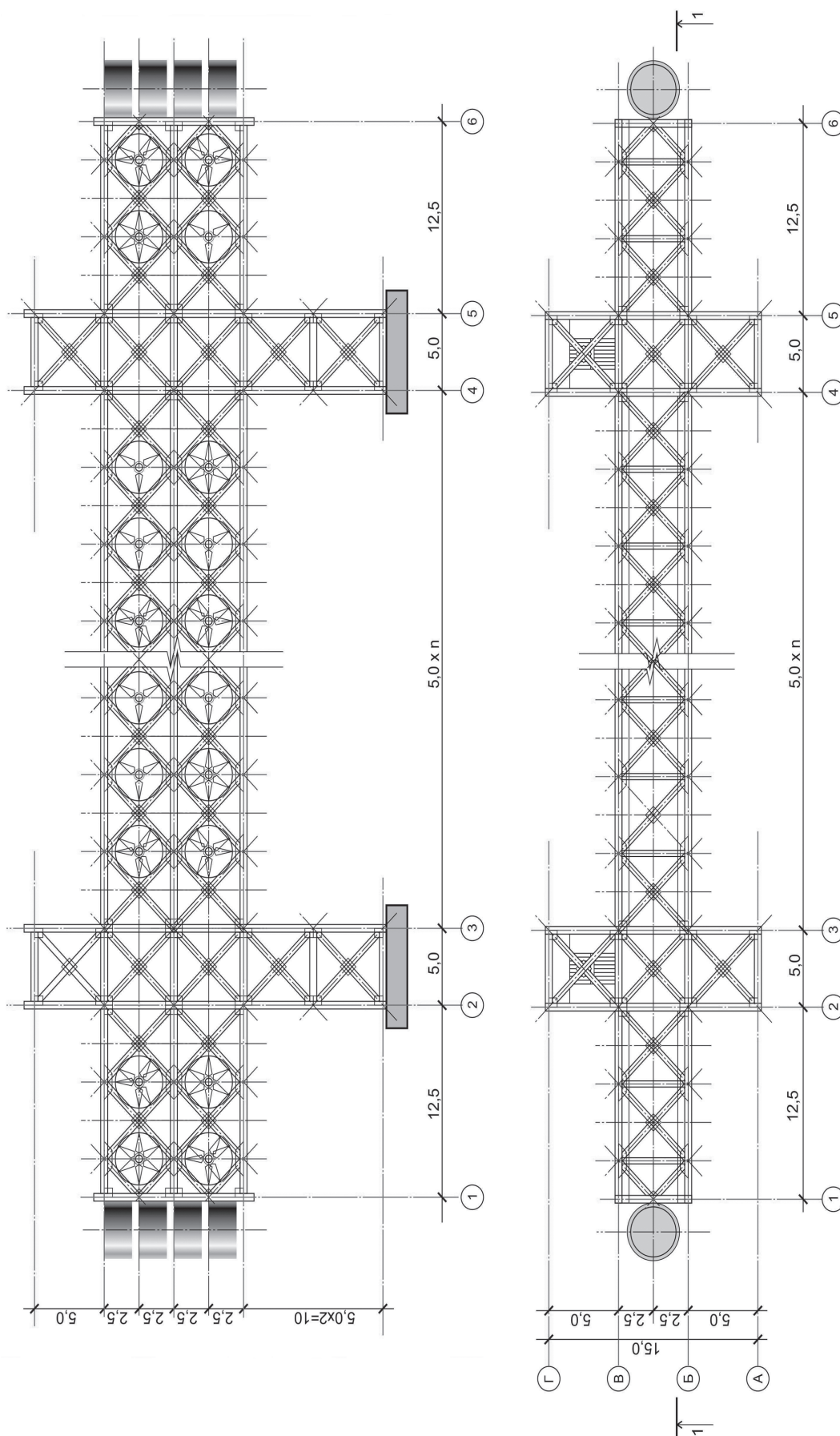


Рис . 1. Ветроэлектростанции. Общий вид

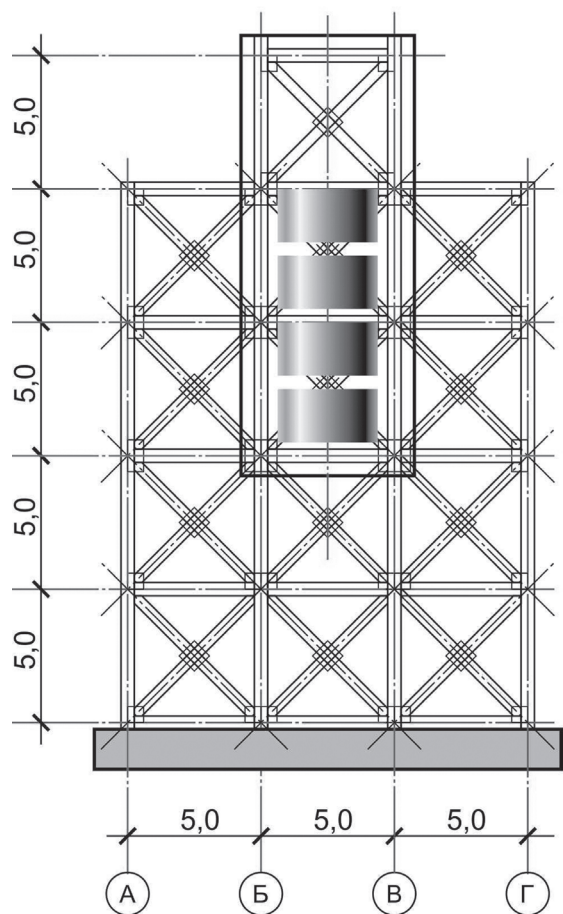


Рис. 2. Ветроэлектростанция. Вид с боку. Фасад в осях А — Г

ки, термодинамические параметры, задание граничных условий и целей проекта [19 — 24].

Решена внешняя задача, тип течения — смешанный (ламинарное и турбулентное). Расчетная область, в которую помещена трехмерная модель, представляет собой прямоугольный параллелепипед (рис. 5).

Рассмотрен случай фронтальной атаки ветра на конструкцию (вдоль оси Z). Исходное давление воздуха — 101 325 Па. Исследование проведено при скорости ветра 2 м/с (рис. 6).

Результатами аэродинамического расчета являются поля скоростей, формирующихся при обтекании конструкции ветровым потоком, распределение давления по поверхности конструкции, включая мелкие элементы, значения сил и аэродинамических коэффициентов. На рисунках 7, 8 продемонстрированы линии тока и распределение скорости воздушного потока при воздействии «ветер спереди».

Как следует из рис. 4 и 5, на входе в конфузор скорость воздушного потока равна исходной скорости ветра 2 м/с. Проходя по конструктивным элементам модуля, поток раскручивает лопасти винта, за винтом образуются завихрения. При выходе из конфузора скорость возрастает до 2,3...2,7 м/с, что позволяет увеличить мощность ветроэлектростанции более чем на 50%.

Заключение

В результате численного моделирования получены оптимальные соотношения угла раскрытия конфузора и его длины, в результате чего скорость возрастает. Следующим этапом будет решение оптимизационной задачи, в которой варьируются геометрия конфузора, диффузора, цилиндрической части модуля.

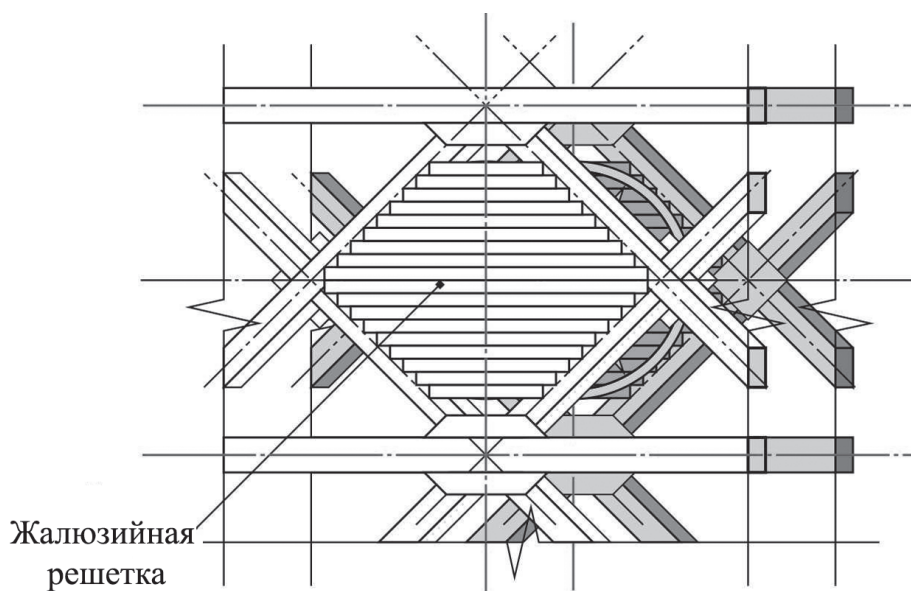


Рис. 3. Ветроэлектростанция. Фрагмент фасада

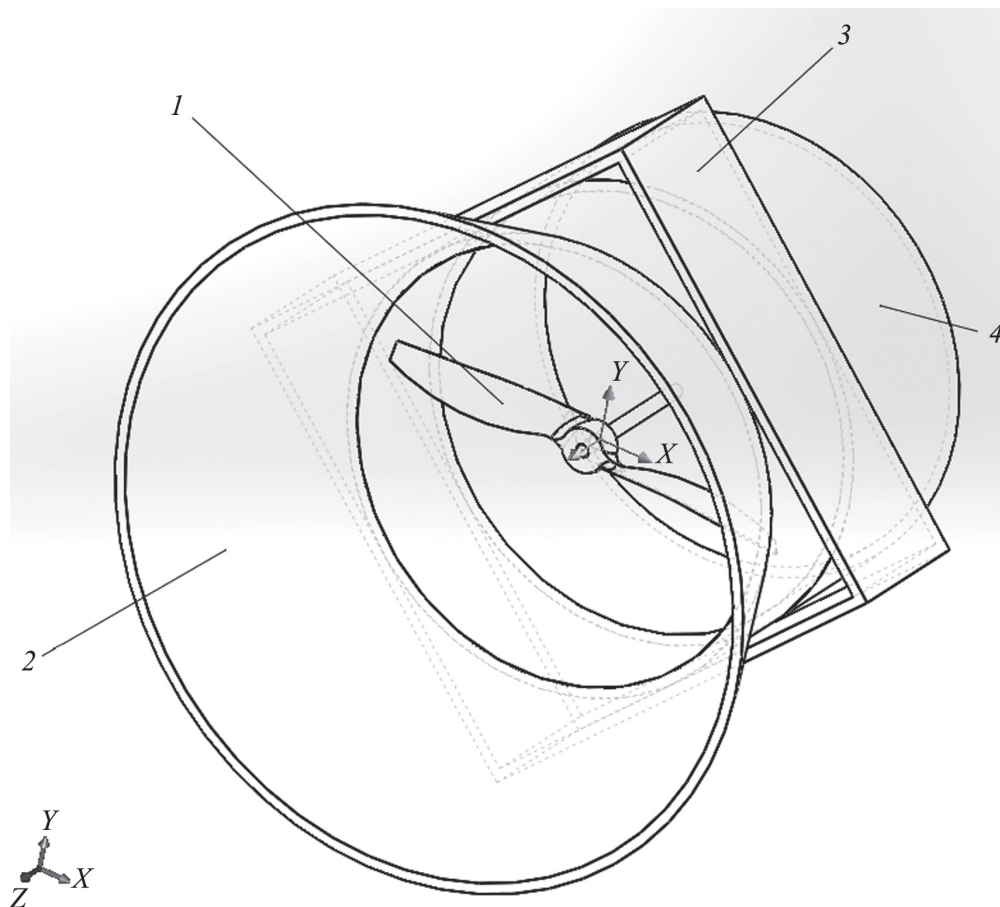


Рис. 4. Трехмерная твердотельная модель:
 1 — ось с винтом; 2 — конфузор; 3 — рамный элемент; 4 — диффузор

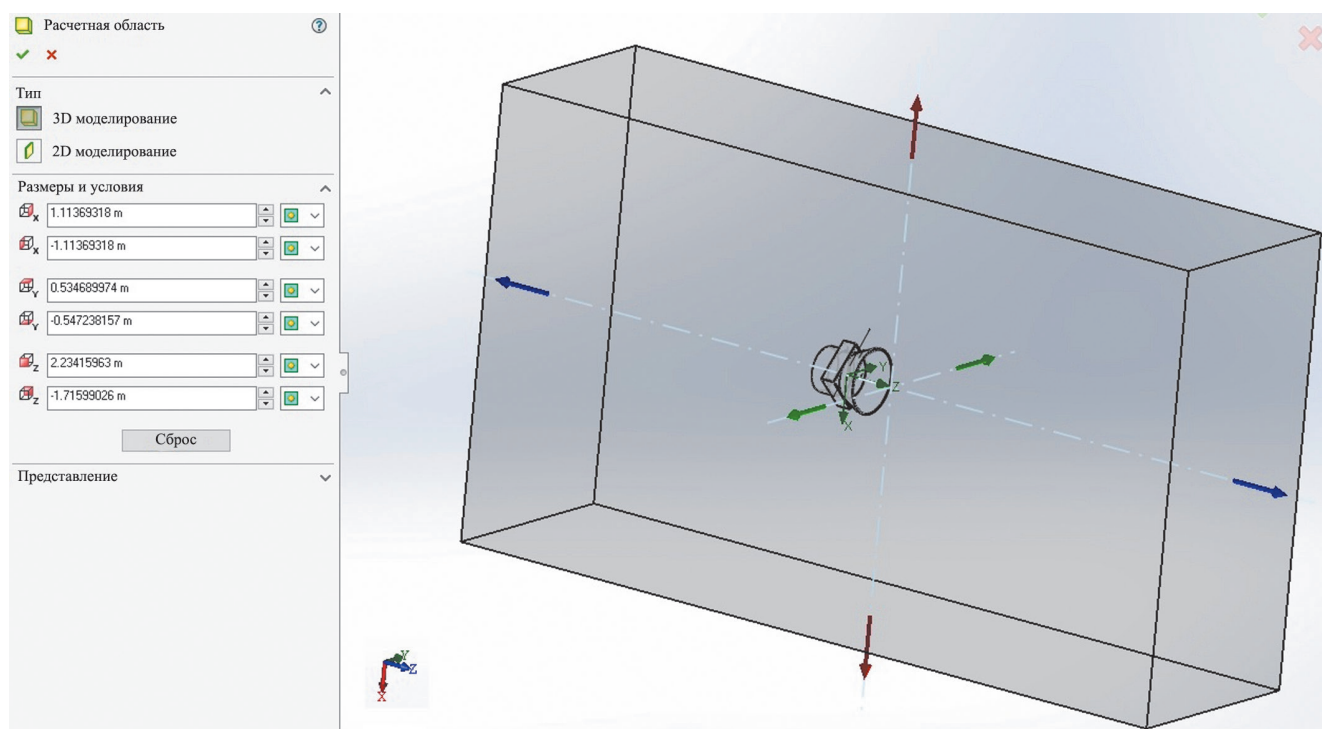


Рис. 5. Модель в расчетной области

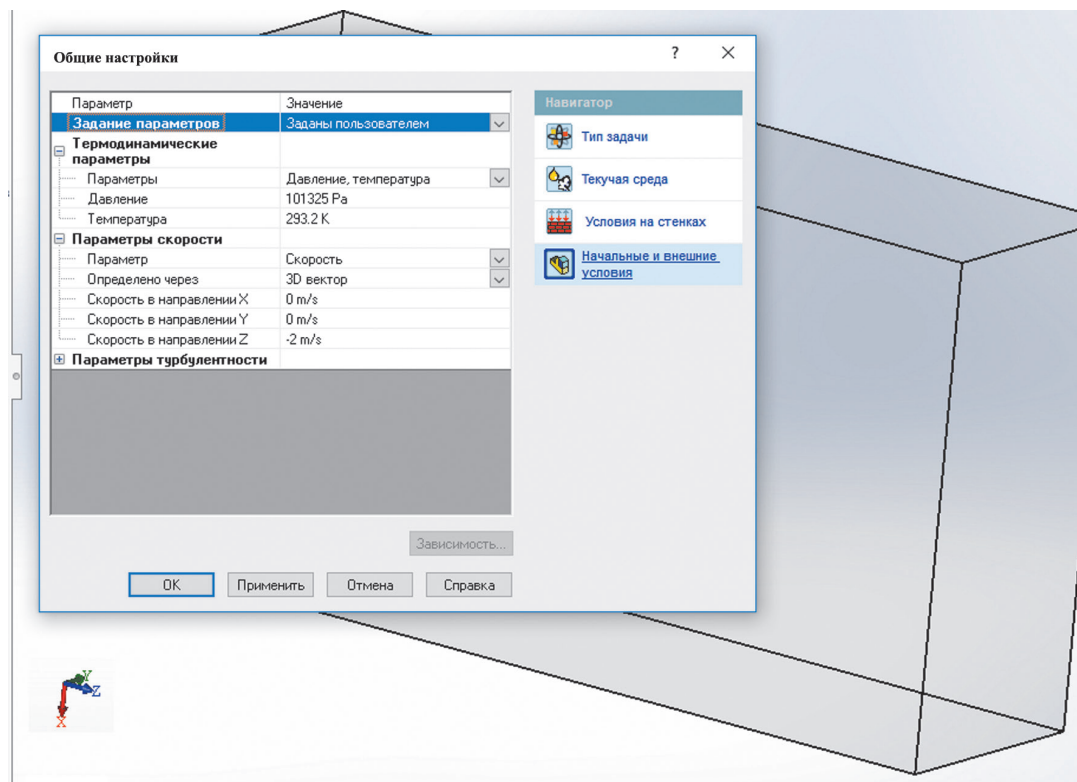


Рис. 6. Настройка параметров воздушной среды

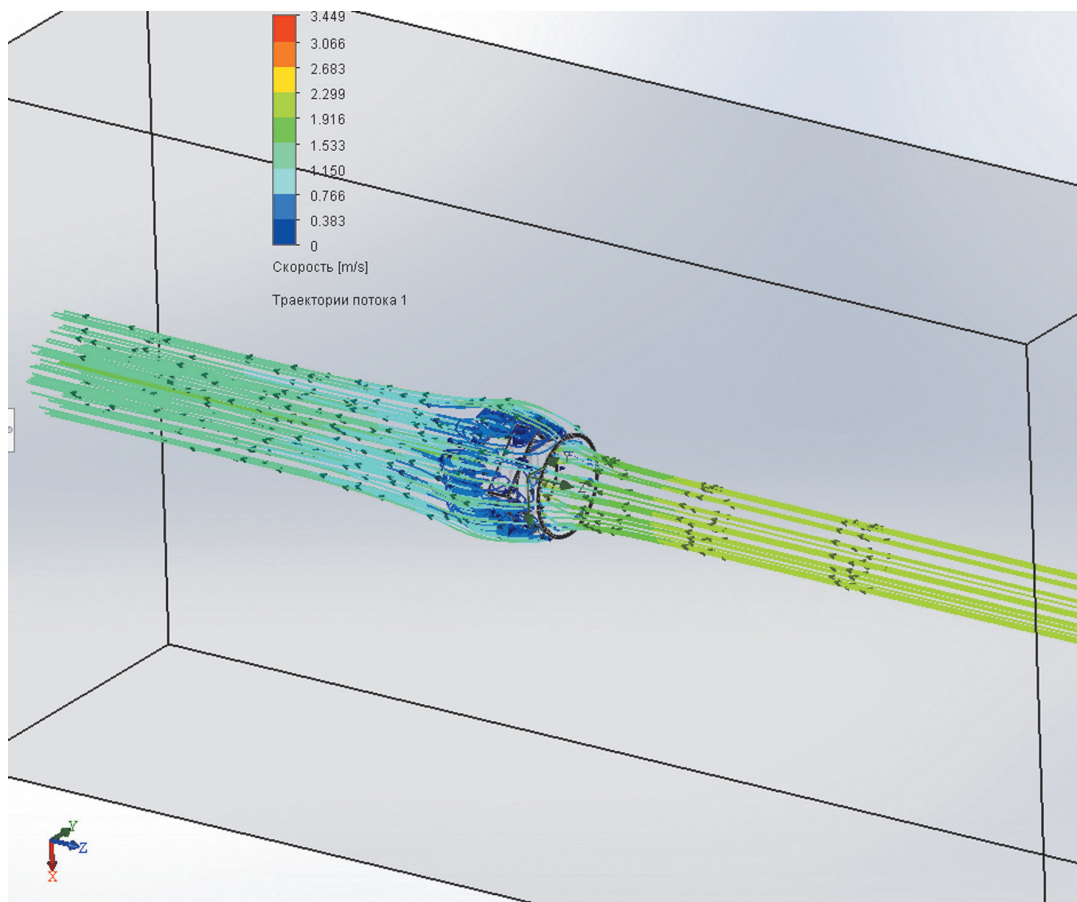


Рис. 7. Линии тока при воздействии «ветер спереди»

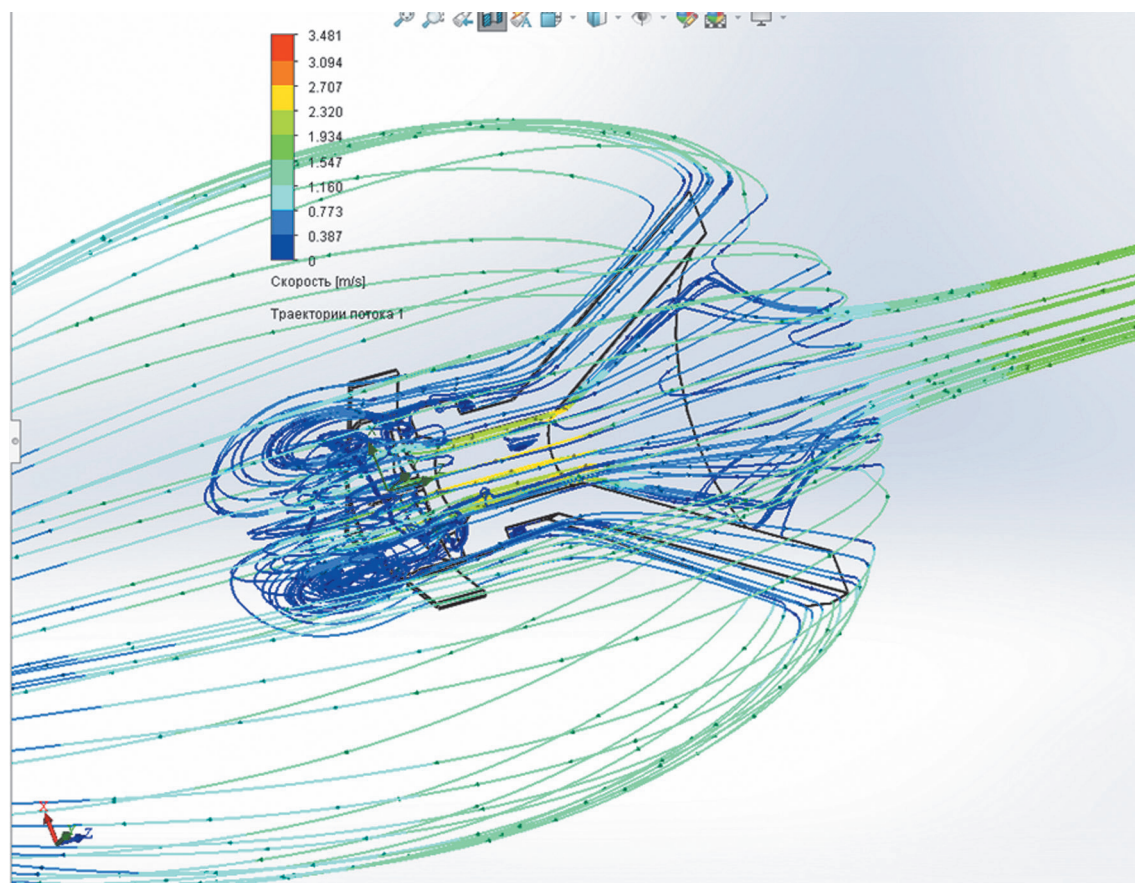
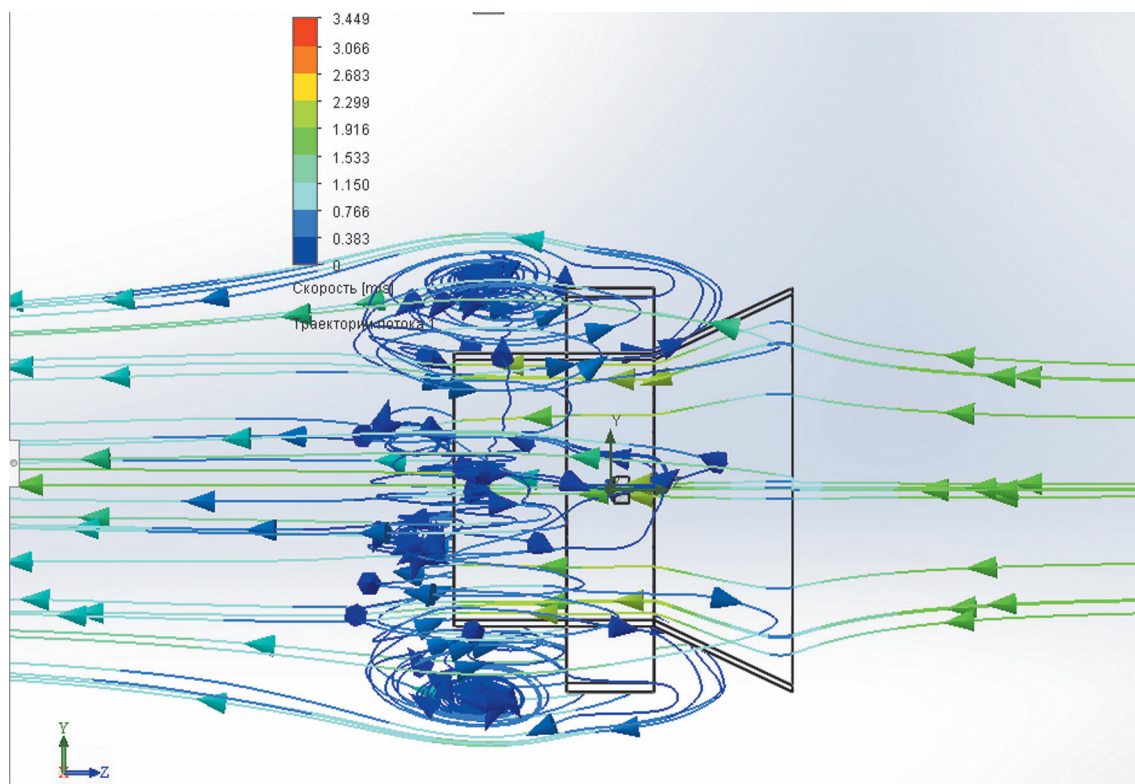


Рис. 8. Линии тока (увеличенный фрагмент)

Литература

References

1. Каргиев В.М., Мартиросов С.Н., Муругов В.П., Пинов А.Б. Метод проектирования ветрофотоэлектрических энергоустановок для автономного сельского дома // Техника в сельском хозяйстве. 2004. № 3. С. 20—22.

2. Европейская ветроэнергетическая ассоциация (EWEA) [Электрон. ресурс] www.ewea.org/ (дата обращения 01.12.2018).

3. Жагина С.Н., Тимашев И.Е. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) северных регионов России: состояние и перспективы развития // Вестник ВГУ. Серия «География. Геоэкология». 2015. № 4. С. 53—58

4. Каргиев В.М. и др. Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности. М.: ИнтерСоларЦентр, 2001.

5. Атласы ветрового и солнечного климатов России. СПб.: Изд-во им. А.И. Воейкова, 1997.

6. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1 — 6. Вып. 21. Красноярский край, Тувинская АССР. Кн. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1990.

7. Информационный бюллетень [Электрон. ресурс] <http://eniseyrechtrans.rf> (дата обращения 27.11.2018).

8. Безруких П.П. Ветроэнергетика. М.: Энергия, 2010.

9. Шефтер Я.И., Рождественский И.В. Изобретателю о ветродвигателях и ветроустановках. М.: Министерство сельского хозяйства СССР, 1967.

10. Рензо Д. Ветроэнергетика. М.: Энергоатомиздат, 1982.

11. Пат. № 2103545 РФ. Ветроэнергетическая установка (варианты) / И.М. Глазунов // Бюл. изобрет. 1998. № 4.

12. Пат. № 2450158 РФ. Воздушно-потокосная электростанция / В.А. Кушченко // Бюл. изобрет. 2012. № 13.

13. Пат. № 2492353 РФ. Высокоэффективная ветроэнергетическая установка модульного типа и модуль ветрогенератора для неё / О.С. Сироткин, К.Н. Зюзя, В.В. Плихунов, И.С. Карпейкин // Бюл. изобрет. 2013. № 25.

14. SolidWorks Simulation [Электрон. ресурс] <http://solidworks.tpu.ru/chapter.php?cid=76> (дата обращения 10.01.2019).

15. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. СПб.: БХВ-Петербург, 2012.

16. Бабкина Л.А., Сорокин Д.В. Моделирование течения жидкостей и газа в пакете SolidWorks Flow Simulation. Красноярск: Изд-во Сибирского гос. аэрокосмического ун-та, 2012.

17. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия.

18. Алямовский А.А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.

1. Kargiev V.M., Martirosov S.N., Murugov V.P., Pinov A.B. Metod Proektirovaniya Vetrofotoelektricheskikh Energoustanovok dlya Avtonomnogo Sel'skogo Doma. Tekhnika v Sel'skom Khozyaystve. 2004;3:20—22. (in Russian).

2. Evropeyskaya Vetroenergeticheskaya Assotsiatsiya (EWEA) [Elektron. Resurs] www.ewea.org/ (Data Obrashcheniya 01.12.2018). (in Russian).

3. Zhagina S.N., Timashev I.E. Vozobnovlyaemye Istochniki Energii (VIE) Severnykh Regionov Rossii: Sostoyanie i Perspektivy Razvitiya. Vestnik VGU. Seriya «Geografiya. Geoekologiya». 2015;4:53—58 (in Russian).

4. Kargiev V.M. i dr. Vetroenergetika. Rukovodstvo po Primeneniyu Vetroustanovok Maloy i Sredney Moshchnosti. M.: InterSolarTSentr, 2001. (in Russian).

5. Atlasy Vetrovogo i Solnechnogo Klimatov Rossii. SPb.: Izd-vo im. A.I. Voeykova, 1997. (in Russian).

6. Nauchno-prikladnoy Spravochnik po Klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie Dannye. Ch. 1 — 6. Vyp. 21. Krasnoyarskiy Kray, Tuvinskaya ASSR. Kn. 1. L.: Gidrometeoizdat, 1990. (in Russian).

7. Informatsionnyy byulleten' [Elektron. Resurs] <http://eniseyrechtrans.rf> (Data Obrashcheniya 27.11.2018). (in Russian).

8. Bezrukikh P.P. Vetroenergetika. M.: Energiya, 2010. (in Russian).

9. Shefter Ya.I., Rozhdestvenskiy I.V. Izobretatelyu o Vetrodvigatelyakh i Vetroustanovkakh. M.: Ministerstvo Sel'skogo Khozyaystva SSSR, 1967. (in Russian).

10. Renzo D. Vetroenergetika. M.: Energoatomizdat, 1982. (in Russian).

11. Pat. № 2103545 RF. Vetroenergeticheskaya Ustanovka (Varianty). I.M. Glazunov. Byul. izobret. 1998; 4. (in Russian).

12. Pat. № 2450158 RF. Vozdushno-potokovaya Elektrostantsiya. V.A. Kushchenko. Byul. izobret. 2012;13. (in Russian).

13. Pat. № 2492353 RF. Vysokoeffektivnaya Vetroenergeticheskaya Ustanovka Modul'nogo Tipa i Modul' Vetrogeneratora dlya Nee. O.S. Sirotkin, K.N. Zyuzya, V.V. Plikhunov, I.S. Karpeykin. Byul. izobret. 2013;25. (in Russian).

14. SolidWorks Simulation [Elektron. Resurs] <http://solidworks.tpu.ru/chapter.php?cid=76> (Data Obrashcheniya 10.01.2019). (in Russian).

15. Alyamovskiy A.A. SolidWorks Simulation. Kak Reshat' Prakticheskie Zadachi. SPb.: BKHV-Peterburg, 2012. (in Russian).

16. Babkina L.A., Sorokin D.V. Modelirovanie Teheniya Zhidkostey i Gaza v Pakete SolidWorks Flow Simulation. Krasnoyarsk: Izd-vo Sibirskogo Gos. Aero-kosmicheskogo Un-ta, 2012. (in Russian).

17. SP 20.13330.2016. Nagruzki i Vozdeystviya. (in Russian).

18. Alyamovskiy A.A. i dr. SolidWorks. Komp'yuternoe Modelirovanie v Inzhenernoy Praktike. SPb.: BKHV-Peterburg, 2005. (in Russian).

19. Редькин А.В., Обыденков В.А., Козлов О.В. Компьютерное моделирование ветровой нагрузки с помощью метода конечных элементов // Известия ТулГУ. Серия «Технические науки». 2009. Вып. 2–1. С. 127–132.

20. Филатов Е.Ю. Расчет ветровой нагрузки на здания и сооружения с помощью многопроцессорного компьютера // Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности: Сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. Иваново: ИГТА, 2006. С. 319–320.

21. Филатов Е.Ю. Математическое моделирование с помощью многопроцессорных вычислительных систем ветровой нагрузки, действующей на одиночные здания и строительные комплексы // Применение многопроцессорных суперкомпьютеров в исследованиях, наукоемких технологиях и учебной работе: Сб. материалов региональной науч.-техн. конф. Иваново: ИГТА, 2008. С. 41–42.

22. Рахматулин, Х.А., Демьянов Ю.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. М.: Университетская книга, Логос, 2009.

23. Енджиевский Л.В., Терешкова А.В. История аварий и катастроф. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального ун-та, 2013.

24. Компаниец Л.А. и др. Аналитические решения для задач стационарного ветрового движения жидкости. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального ун-та, 2012.

19. Red'kin A.V., Obydenov V.A., Kozlov O.V. Komp'yuternoe Modelirovanie Vetrovoy Nagruzki s Pomoshch'yu Metoda Konechnykh Elementov. Izvestiya TulGU. Seriya «Tekhnicheskie nauki». 2009;2–1:127–132. (in Russian).

20. Filatov E.Yu. Raschet Vetrovoy Nagruzki na Zdaniya i Sooruzheniya s Pomoshch'yu Mnogoprotsessornogo Komp'yutera. Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii i Perspektivnye Materialy Tekstil'noy i Legkoy Promyshlennosti: Sb. Materialov Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Ch. 1. Ivanovo: IGTA, 2006;319–320. (in Russian).

21. Filatov E.Yu. Matematicheskoe Modelirovanie s Pomoshch'yu Mnogoprotsessornykh Vychislitel'nykh Sistem Vetrovoy Nagruzki, Deystvuyushchey na Odinochnye Zdaniya i Stroitel'nye Kompleksy. Primenenie Mnogoprotsessornykh Superkomp'yuterov v Issledovaniyakh, Naukoemkikh Tekhnologiyakh i Uchebnoy Rabote: Sb. Materialov Regional'noy Nauch.-tekhn. Konf. Ivanovo: IGTA, 2008;41–42. (in Russian).

22. Rakhmatulin, Kh.A., Dem'yanov Yu.A. Prochnost' pri Intensivnykh Kratkovremennykh Nagruzkakh. M.: Universitetskaya Kniga, Logos, 2009. (in Russian).

23. Endzhiievskiy L.V., Tereshkova A.V. Istoriya Avariyy i Katastrof. Krasnoyarsk: Izd-vo Sibirskogo Federal'nogo Un-ta, 2013. (in Russian).

24. Kompaniets L.A. i dr. Analiticheskie Resheniya dlya Zadach Statsionarnogo Vetrovogo Dvizheniya Zhidkosti. Krasnoyarsk: Izd-Vo Sibirskogo Federal'nogo Un-ta, 2012. (in Russian).

Сведения об авторах:

Надараиа Цезари Георгиевич — главный конструктор ООО «КВОНТ», Красноярск, e-mail: svo_y_2010@list.ru

Шестаков Иван Яковлевич — доктор технических наук, профессор кафедры электронной техники и телекоммуникаций Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, e-mail: yakovlevish@mail.ru

Бабкина Людмила Алексеевна — кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерного моделирования Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, e-mail: l_babkina@mail.ru

Фадеев Александр Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, e-mail: fadeev.77@mail.ru

Селиванов Андрей Ильич — инженер ООО «КВОНТ», Красноярск, e-mail: svo_y_2010@list.ru

Information about authors:

Nadaraia Tsezari G. — Chief Designer of LLC «KVONT», Krasnoyarsk, e-mail: svo_y_2010@list.ru

Shestakov Ivan Ya. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electronic Engineering and Telecommunications Dept., Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, e-mail: yakovlevish@mail.ru

Babkina Lyudmila A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Computer Simulation Dept., Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, e-mail: l_babkina@mail.ru

Fadeev Aleksandr A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Manufacturing Engineering Dept., Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, e-mail: fadeev.77@mail.ru

Selivanov Andrey I. — Engineer of LLC «KVONT», Krasnoyarsk, e-mail: svo_y_2010@list.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 10.12.2018

The article received to the editor: 10.12.2018