

УДК 621.311

## Увеличение энергоэффективности гибких солнечных панелей интенсификацией их охлаждения в модифицированной конструкции лопастей гелиоветрогенератора

Д-р физ.-мат. наук Ю. П. ЗАРИЧНЯК, В. А. ЛУКИН<sup>1</sup>, Е. В. АЛЕКСЕЕВ

Университет ИТМО

<sup>1</sup>E-mail: vladimirlookvine@gmail.com

*В статье рассматривается устройство гелиоветрогенератора, предназначенное для выработки электроэнергии двумя способами одновременно: при помощи энергии ветра и солнца. Гибкие солнечные панели, установленные на лопастях гелиоветрогенератора, охлаждаются набегающими потоками воздуха при вращении лопастей, но этого недостаточно для достижения оптимального значения температуры фотоэлектрического преобразователя. Для дополнительного охлаждения модифицирована конструкция лопасти гелиоветрогенератора: лопасть изготавливается полой внутри и на двух ее концах с разных сторон выполняются отверстия определенной формы и размера. За счет разности давлений до и после ветроколеса поток воздуха засасывается через входное отверстие внутрь лопасти, проходит через ее полость и выбрасывается через выпускное отверстие. Следовательно, солнечные панели охлаждаются снаружи за счет вращения лопастей и изнутри за счет прохождения потока воздуха через внутреннюю полость лопасти. Скорость воздушного потока внутри лопасти достигает максимального значения равного 2 м/с, при этом температура солнечных панелей достигает среднего значения равного 37 °С, что приводит к увеличению КПД солнечных панелей до 21 %. Предметом исследования являются параметры, влияющие на энергоэффективность гибких солнечных панелей, установленных на лопастях гелиоветрогенератора. В работе приведен способ интенсификации охлаждения гибких фотоэлектрических преобразователей за счет модификации конструкции лопасти гелиоветрогенератора, представлены результаты исследования моделирования различных модификаций конструкций лопасти, определена конструкция, которая соответствует наибольшей скорости воздушного потока внутри лопасти. Также произведен тепловой расчет и исследованы гидродинамические свойства воздушного потока.*

**Ключевые слова:** гелиоветрогенератор, гибкие солнечные панели, интенсификация охлаждения, скорость воздушного потока, лопасть.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 04.06.2024, одобрена после рецензирования 22.06.2024, принята к печати 13.07.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-25-34

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Заричняк Ю. П., Лукин В. А., Алексеев Е. В. Увеличение энергоэффективности гибких солнечных панелей интенсификацией их охлаждения в модифицированной конструкции лопастей гелиоветрогенератора. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 3. С. 25–34. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-25-34

## Increasing energy efficiency of flexible solar panels by intensification of their cooling in the modified design of solar wind generator blades

D. Sc. Y. P. ZARICHNYAK, V. A. LUKIN<sup>1</sup>, E. V. ALEKSEEV

ITMO University

<sup>1</sup>E-mail: vladimirlookvine@gmail.com

*The article discusses a solar wind generator designed to generate electricity in two ways simultaneously: using wind and solar energy. Flexible solar panels installed on the blades of a solar wind generator are cooled by incoming air flows as the blades rotate, but this is not enough to achieve the optimal temperature of the photoelectric converter. For additional cooling, the design of the solar wind generator blade has been modified: the blade is made hollow inside and holes of a certain shape and size are made at its two ends on different sides. Due to the pressure difference before and after the wind wheel, the air flow is sucked through the inlet hole into the blade, passes through its cavity and is thrown out through the outlet hole. Consequently, solar panels are cooled from the outside due to the rotation of the blades and from the inside*

*due to the passage of air flow through the internal cavity of the blade. The air flow velocity inside the blade reaches a maximum value of 2 m/s, while the temperature of the solar panels reaches an average value of 37 °C, which leads to an increase in the efficiency of solar panels to 21 %. The subject of the study is the parameters affecting the energy efficiency of flexible solar panels installed on the blades of a solar wind generator. The paper presents a method for intensifying the cooling of flexible photovoltaic converters by modifying the design of a solar wind generator blade, the results of a study of modeling various modifications of blade designs, and determines a design that corresponds to the highest air flow speed inside the blade. Thermal calculations were also carried out and the hydrodynamic properties of the air flow were studied.*

**Keywords:** solar wind generator, flexible solar panels, cooling intensification, air flow speed, blade.

#### Article info:

Received 04/06/2024, approved after reviewing 22/06/2024, accepted 13/07/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-25-34

Article in Russian

#### For citation:

Zarichnyak Y. P., Lukin V. A., Alekseev E. V. Increasing energy efficiency of flexible solar panels by intensification of their cooling in the modified design of solar wind generator blades. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 3. p. 25-34. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-25-34

### Введение

В современном мире для выработки тепловой и электрической энергии, в основном, используется углеводородное топливо — нефть, газ и уголь.

В скором времени энергии, которая вырабатывается с помощью традиционных источников топлива, будет недостаточно. Следовательно необходимо переходить на использование альтернативных источников энергии [1].

Существует множество видов нетрадиционных источников энергии: энергия ветра, солнца, потока воды, геотермальных источников и многие другие. Одним из достоинств таких источников является то, что они практически неисчерпаемы [2].

На данный момент нетрадиционные источники энергии широко используются для повышения энергосбережения не только на производстве, но и в частном секторе. Выработка энергии, с помощью неисчерпаемых источников, позволяет осваивать труднодоступные энергорайоны страны и делать их энергонезависимыми, а также решает проблему снабжения электричеством уже существующих объектов.

Огромные территории с разнообразными климатическими условиями Российской Федерации дают большие возможности для использования нетрадиционных установок для выработки энергии. Например, в южных районах РФ целесообразно строить гелиоэлектростанции, в приморских областях отлично подойдет использование ветрогенераторов, а на Камчатке рационально эксплуатировать геотермальные станции. Перспективным направлением в этом плане является полуостров Крым со своим солнечным климатом и ветровым кадастром в районе Керченского пролива.

Основными достоинствами возобновляемых источников энергии, в частности ветрогенераторов и гелиоэнергетических установок, являются полная автономность и отсутствие затрат на транспортировку топлива. Однако, выработка энергии в этом случае напрямую зависит от климатических условий [3]. Ветер может изменять свою скорость и направление, что делает работу ветрогенератора периодичной. Ветрогенератор начинает вырабатывать электроэнергию при скорости ветра равной 4 м/с, при этом количество вырабатываемой энергии является минимальным.

Чтобы компенсировать недостаток выработки электроэнергии в безветренные или маловетренные часы на лопасти ветрогенератора устанавливаются гибкие солнечные панели.

Основным направлением исследований в области гелиоветрогенераторов является изучение процессов охлаждения фотоэлектрических преобразователей для повышения энергоэффективности устройства. В частности, работа [4] посвящена повышению производительности солнечной фотоэлектрической панели при помощи водяного охлаждения.

В статье [5] исследуется радиационный способ охлаждения солнечных панелей при помощи конструкции с V-образным зеркалом.

В работе [6] рассмотрен вариант принудительного воздушного охлаждения солнечных панелей при помощи спроектированной установки, прикрепленной к задней части фотоэлектрической панели.

В работе [7] изучена возможность использования геотермальной системы охлаждения для повышения эффективности солнечных фотоэлектрических панелей, основанная на низкоэнтальпийном геотермальном охлаждении. Перегрев от солнечной панели отводится однофазной системой охлаждения с замкнутым контуром, которая использует естественный подземный теплоотвод, имеющий постоянную и низкую температуру.

В статье [8] разработана расчетная модель лопасти гелиоветрогенератора с целью повышения КПД с использованием глобальной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Также была проведена оценка эффективности прямого и косвенного терморегулирования низкоконцентрированной (через составной параболический коллектор) солнечной панели с использованием системы охлаждения с использованием материала с фазовым переходом — плоской тепловой трубкой [9].

### Цели и задачи исследования

Целью работы является исследование модели модифицированной конструкции лопасти гелиоветрогенератора с целью увеличения энергоэффективности гибких солнечных панелей интенсификацией их охлаждения,

в результате которого будет достигнута максимальная средняя температура охлаждения лопасти равная 37 °С. Для этого необходимо провести анализ моделей модифицированной конструкции лопасти, в ходе которого будет выявлена максимальная скорость потока воздуха внутри лопасти равная 2 м/с. Затем необходимо произвести тепловой расчет для оценки эффективности охлаждения и исследовать гидродинамические свойства воздушного потока. Заключительной задачей является получение и обработка результатов исследования с целью определения наиболее эффективной конструкции лопасти гелиоветрогенератора.

### Методы и объекты исследования

Объектом исследований являлись модифицированные лопасти, а также гибкие солнечные панели, установленные на лопастях гелиоветрогенератора.

Вращение лопастей обуславливает возникновение принудительной конвекции лопастей, в результате отвод тепловой энергии в окружающую среду увеличивается. Однако, данный отвод теплоты не является достаточным. Оптимальное значение температуры не достигается. Для обеспечения эффективной работы такой конструкции требуется поддержание оптимального значения температуры солнечных панелей не выше 25 °С, так как при более высоких температурах снижается КПД солнечных панелей [10].

В связи с этим, в данной работе рассматривается вопрос дополнительного охлаждения солнечных панелей с помощью проведения части ветрового потока через внутреннюю полость лопасти. Лопасть ветрогенератора изготавливается полый внутри и на двух концах лопасти, с разных сторон соответственно, выполняются отверстия определенной формы и размера. Приближаясь к колесу ветрогенератора, воздушный поток тормозится, его скорость падает. При этом, по закону Бернулли, происходит возрастание статического давления на величину  $\Delta p'$  [11]. Поток ветра, который проходит через колесо ветрогенератора, преодолевает сопротивление, давление уменьшается на величину  $\Delta p$ . За счет разности давлений до и после ветроколеса поток воздуха засасывается через входное отверстие (расположено у комля лопасти, с ее лицевой стороны) внутрь лопасти, проходит через ее полость и выбрасывается через выпускное отверстие (расположено ближе к концу лопасти, со стороны торца). Следовательно, солнечная панель, установленная на поверхности лопасти ветрогенератора, охлаждается снаружи за счет вращения лопасти и изнутри за счет прохождения потока воздуха через ее внутреннюю полость.

Исследования проводились применительно к трехлопастной ветротурбине с горизонтальной осью вращения с гибкими солнечными панелями (рис. 1).

Гибкие солнечные панели 1 располагаются по всей длине лопастей 2, которые имеют входное 11 и выходное 12 отверстие у комля и на окончании лопасти, соответственно. Как и у стандартного ветрогенератора колесо лопастей 2 соединено механической передачей с ротором 3 с обмоткой возбуждения 4 электрического генератора 5.

В световую часть дня солнечный свет падает на солнечные панели 1, которые за счет фотоэлектрического

эффекта генерируют электрический ток, который подается в обмотку возбуждения. Так как ротор 3 под действием воздушного потока вращается, создается вращающееся магнитное поле возбуждения, которое индуцирует в витках обмотки переменного тока 6 статора ЭДС, под действием которой во внешней цепи ветрогенератора, состоящей из обмотки 6 переменного тока и аккумулятора 7, начинает протекать электрический ток. Этот ток либо заряжает аккумулятор 7, для этого дополнительно используется выпрямитель 8, либо, протекая через инвертор 9, идет на нагрузку 10.

### Моделирование лопасти

Для исследования влияния вращательного движения лопасти на скорость потока воздуха внутри лопасти был выбран SolidWorks [12].

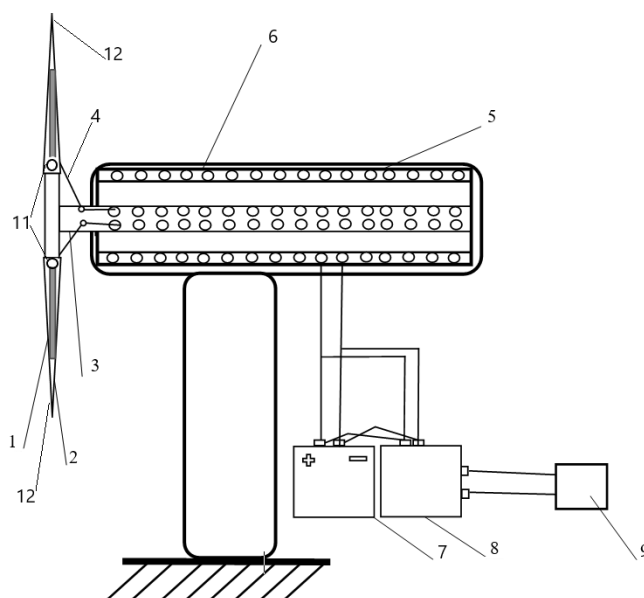


Рис. 1. Схема расположения элементов гелиоветрогенератора: 1 — гибкие солнечные панели, 2 — лопасти, 3 — ротор, 4 — обмотка возбуждения, 5 — электрический генератор, 6 — обмотка переменного тока, 7 — аккумулятор, 8 — выпрямитель, 9 — инвертор, 10 — нагрузка, 11 — входное и 12 — выходное отверстия

Fig. 1. Solar wind generator elements: 1 — flexible solar panels, 2 — blades, 3 — rotor, 4 — field winding, 5 — electric generator, 6 — AC winding, 7 — battery, 8 — rectifier, 9 — inverter, 10 — load, 11 — input and 12 — output holes

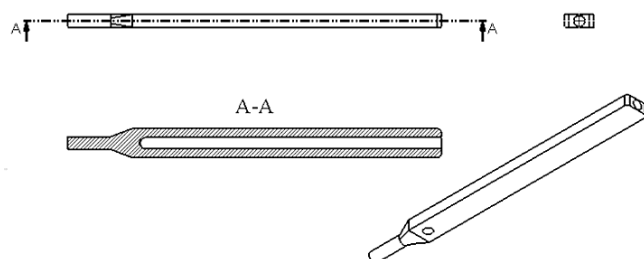


Рис. 2. Разрез лопасти гелиоветрогенератора  
Fig. 2. Cross section view of solar wind generator blade

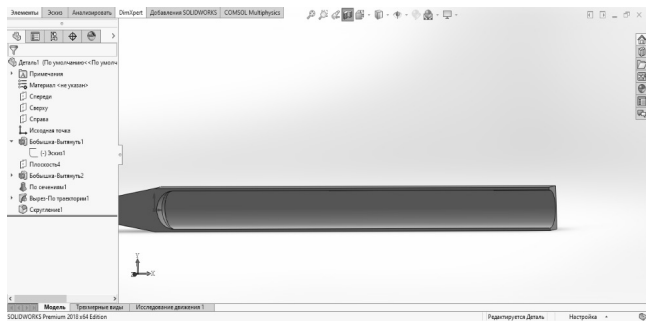


Рис. 3. Разрез лопасти в форме параллелепипеда с полостью внутри

Fig. 3. Cross section view of the blade in the form of a parallelepiped hollow inside



Рис. 4. Лопасть с длиной «колена», равной 0,15L и загнутой под углом 30°

Fig. 4. A blade with an «elbow» of 0.15L length and bent at 30° angle

Первым этапом вычисления скорости потока воздуха внутри лопасти является моделирование самой лопасти, а также полости внутри нее.

Несмотря на то, что лопасть представляет собой сложную многослойную неоднородную конструкцию, в дальнейших расчетах она будет предполагаться однородным твердым телом. Так как нас интересует аэродинамические свойства потока воздуха внутри лопасти, то формой лопасти снаружи можно пренебречь. Пусть лопасть имеет форму прямоугольного параллелепипеда (рис. 3).

Исследование скорости воздушного потока внутри лопасти в зависимости от ее модифицированной конструкции

Для увеличения скорости воздушного потока была изменена конструкция лопасти гелиоветрогенератора, а затем был произведен расчет данной конструкции.

Чтобы увеличить тягу потока воздуха было предложено на конец лопасти добавить так называемое «колено»,

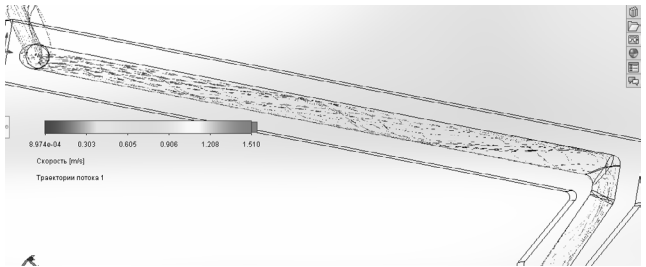


Рис. 5. Результаты расчета

Fig. 5. Calculation results

Таблица 1  
Результаты проведенного исследования

Table 1

Results of the study

| Длина колена от длины лопасти, % | Угол наклона колена, ° | Максимальная скорость воздушного потока, м/с |
|----------------------------------|------------------------|----------------------------------------------|
| 5                                | 90                     | 0,83                                         |
| 10                               | 90                     | 1,20                                         |
| 15                               | 90                     | 1,43                                         |
| 20                               | 90                     | 1,45                                         |
| 5                                | 30                     | 0,70                                         |
| 10                               | 30                     | 1,10                                         |
| 15                               | 30                     | 1,51                                         |
| 20                               | 30                     | 1,45                                         |
| 5                                | -30                    | 1,20                                         |
| 10                               | -30                    | 1,27                                         |
| 15                               | -30                    | 1,25                                         |
| 20                               | -30                    | 1,40                                         |
| 5                                | 45                     | 0,90                                         |
| 10                               | 45                     | 1,12                                         |
| 15                               | 45                     | 1,25                                         |
| 20                               | 45                     | 1,15                                         |
| 5                                | -45                    | 0,85                                         |
| 10                               | -45                    | 1,00                                         |
| 15                               | -45                    | 1,17                                         |
| 20                               | -45                    | 1,40                                         |

которое имеет определённую длину и загнуто под определенным углом. Обозначим длину лопасти —  $L$ .

Исследуемые виды конструкций лопасти ветрогенератора представлены в табл. 1. Конструкция лопасти с «коленом» длиной, равной 0,15L, загнутым под углом 30° изображена на рис. 4.

Результаты расчета показаны на рис. 5.

В этом случае наблюдается течение воздушного потока при его скорости  $V \approx 1,51$  м/с. Результаты исследования различных конструкций лопастей сведены в табл. 1.

Исходя из полученных результатов исследования можно сделать вывод, что наиболее эффективной конструкцией является лопасть с «коленом», имеющим длину 0,15L и загнутым под углом 30°. Скорость воздушного потока во внутренней полости лопасти достигает максимального значения, равного  $V \approx 1,51$  м/с. Полученный результат превышает скорость воздушного потока внутри лопасти при «прямой» лопасти примерно в 8 раз.

Увеличение скорости воздушного потока внутри лопасти с помощью дефлектора

Дефлектор — это аэродинамическое устройство, которое предназначено для усиления тяги в канале за счет эффекта Вентури: чем больше скорость движения воздушного потока при уменьшении поперечного сечения канала, тем меньше статическое давление в этом сечении [13].

Таким образом, дефлектор будет увеличивать тягу в вентиляционном канале лопасти.

С помощью программы SolidWorks была подготовлена модель дефлектора в виде обрубленной пирамиды, полый внутри (рис. 6).

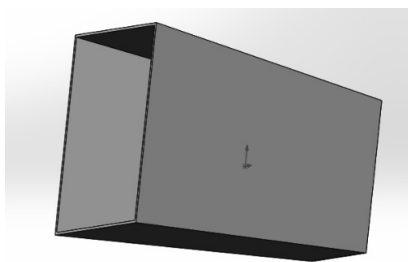


Рис. 6. Дефлектор  
Fig. 6. Deflector

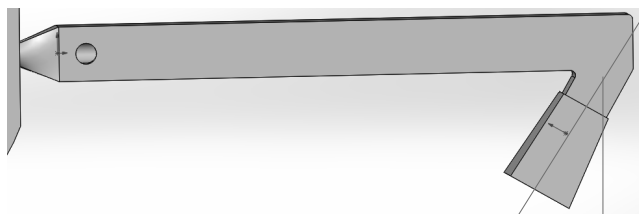


Рис. 7. Лопасть с дефлектором  
Fig. 7. A blade with deflector

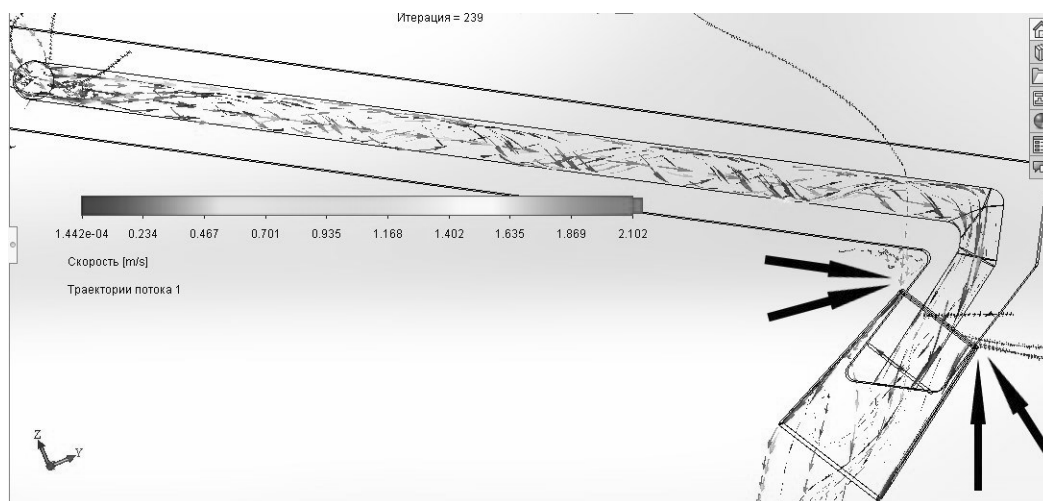


Рис. 8. Результаты расчета лопасти с дефлектором  
Fig. 8. Calculation results for a blade with deflector

Для «Сборки» была взята лопасть с наиболее эффективным результатом по скорости воздушного потока внутри лопасти. На окончание лопасти с «коленом», имеющим длину  $0,15L$  и загнутым под углом  $30^\circ$  был установлен дефлектор (рис. 7).

С помощью добавления Flow Simulation программы SolidWorks был произведен аэродинамический расчет лопасти с дефлектором. Результаты расчета представлены на рис. 8.

Размер дефлектора подбирается таким образом, чтобы между внешней стенкой лопасти и внутренней стенкой дефлектора был зазор. Это делается для того, чтобы поток воздуха из окружающей среды проходил через этот зазор и забирал с собой поток воздуха, который выходит из внутренней полости лопасти.

На рис. 8 видно, что на окончании лопасти наблюдаются присосы воздуха из окружающей среды между дефлектором и стенкой лопасти (обозначены черными стрелками). В момент прохождения потока воздуха из окружающей среды через зазор между дефлектором и лопастью скорость проходящего воздушного потока увеличивается. Благодаря этому более медленный поток воздуха, выходящий из лопасти, подхватывается быстрым воздушным потоком.

Таким образом, средняя по длине лопасти скорость воздушного потока увеличилась в 1,3 раза и достигла среднего значения, равного  $V \approx 2$  м/с.

### Тепловой расчет

Несмотря на то, что лопасть представляет собой сложную многослойную неоднородную конструкцию, для упрощения исследований, в дальнейшем она будет предполагаться однородным твердым телом. Поэтому в основу анализа процесса ее нагрева была положена теория нагрева идеального однородного твердого тела, под которым здесь понимается тело, обладающее равномерным рассеянием тепла со всей поверхности и бесконечно большой теплопроводностью, вследствие чего все точки тела имеют одинаковую температуру. Составим дифференциальное уравнение нагрева такого тела, описывающее его тепловой баланс [14].

Пусть в единицу времени в лопасти под действием солнечных лучей выделяется количество теплоты  $Q$ .

$$Q = Q_{sol} S (1 - \mu), \quad (1)$$

где  $Q_{sol}$  — поток солнечного излучения (табл. 2), Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  — площадь поверхности лопасти, м<sup>2</sup>;  $\mu$  — коэффициент отражения поверхности лопасти, принимаем его для темного-синего цвета (цвет солнечных панелей), равным 0,1.

Данные расчетов поглощаемого количества теплоты лопастью под действием солнечных лучей приведены в табл. 3.

По истечению достаточно длительного времени (можно считать при  $t = \infty$ ) температура лопасти достигнет установившегося значения и больше изменяться не будет,

Таблица 2  
Значения потока солнечного излучения по месяцам  
(с мая по октябрь), в районе Тамани

Table 2  
Solar radiation flux per month (starting on May and  
continuing through October inclusive) in the Taman region

| Месяц    | Поток солнечного излучения, $Q_{sol}$ , Вт/м <sup>2</sup> |
|----------|-----------------------------------------------------------|
| Май      | 600                                                       |
| Июнь     | 750                                                       |
| Июль     | 800                                                       |
| Август   | 650                                                       |
| Сентябрь | 590                                                       |
| Октябрь  | 470                                                       |

т. е.  $d\Theta=0$  и  $\Theta=\Theta_{\infty}$ . Установившееся значение температуры лопасти можно найти из уравнения (2):

$$\Theta_{\infty}=Q/(S\lambda), \tag{2}$$

где  $Q$  — количество теплоты, поглощаемое лопастью под действием солнечных лучей (табл. 3), Вт;  $S$  — площадь поверхности лопасти, м<sup>2</sup>;  $\lambda$  — коэффициент теплоотдачи с поверхности лопасти, равный 15,5. Данные по расчетам температуры нагрева лопасти сведены в табл. 4.

Можно видеть, что установившееся значение температуры лопасти  $\Theta_{\infty}$  тем больше, чем больше тепла солнечных лучей поглощается поверхностью лопасти (рис. 9), также можно заметить, что ухудшение теплоотдачи ( $S\lambda$ ) способствует росту температуры лопасти.

Для исследования влияния движения воздушного потока внутри лопасти на тепловое состояние солнечных панелей был выбран пакет COMSOL Multiphysics.

На данном этапе расчета теплового режима предполагается, что лопасть выполнена однородной по толщине. Материал, из которого изготовлена лопасть — эпоксидная смола, армированная стеклопластиком. Частота вращения лопасти — постоянна и равна  $\omega=1,57$  рад/с. Нагреву солнечными лучами подвергается верхняя (лицевая, ориентированная перпендикулярно световому потоку) сторона. Теплоотвод конвекцией осуществляется только с верхней части, на нижней и боковой гранях лопасти — поставлены условия теплоизоляции.

Все нижеприведенные расчеты были выполнены для июля — самого жаркого месяца в районе Керченского пролива. Параметры для июля приведены на рис. 10.

Для начала теплового расчета был использован интерфейс «Heat Transfer in Solids», предназначенный для исследования теплопередачи в твердых телах.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T + \nabla q = Q + Q_{ted}; \tag{3}$$

$$q=-k\nabla T, \tag{4}$$

где  $q$  — плотность теплового потока, передаваемого от поверхности тела в окружающую среду, Вт;  $C_p$  — удельная теплоемкость, Дж/кг·°C;  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\nabla$  — градиента температурного поля;  $\frac{\partial T}{\partial t}$  — изменение по времени температурного поля;  $Q$  — тепловой поток, Вт;  $-k$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C), где минус показывает, что тепловой поток направлен в противоположенную вектору сторону.

Таблица 3  
Количество теплоты, поглощаемое лопастью  
по месяцам (май-октябрь)

Table 3  
Heat absorbed by a blade per month  
(May-October)

| Месяц    | Количество теплоты $Q$ , Вт |
|----------|-----------------------------|
| Май      | 74970                       |
| Июнь     | 91035                       |
| Июль     | 107100                      |
| Август   | 85680                       |
| Сентябрь | 69615                       |
| Октябрь  | 58905                       |

Таблица 4  
Результаты расчетов по формуле (2)

Table 4  
Calculation results according to formula (2)

| Месяц    | Установившееся значение температуры $\Theta_{\infty}$ , °C |
|----------|------------------------------------------------------------|
| Май      | 39,52                                                      |
| Июнь     | 47,98                                                      |
| Июль     | 56,45                                                      |
| Август   | 45,16                                                      |
| Сентябрь | 36,69                                                      |
| Октябрь  | 31,05                                                      |

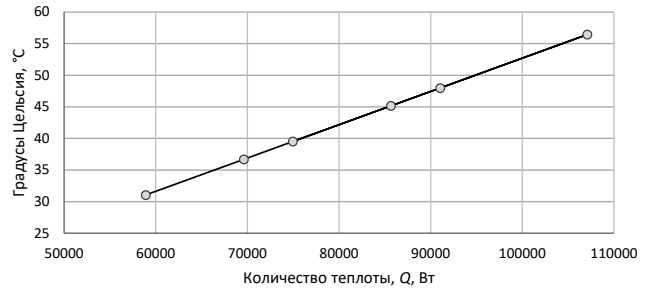


Рис. 9. Зависимость установившейся температуры лопасти от получаемого тепла солнечных лучей  
Fig. 9. Dependency for the stable temperature of the blade on the solar heat absorbed

| Parameters |            |                      |             |
|------------|------------|----------------------|-------------|
| Name       | Expression | Value                | Description |
| T0         | 23.8[degC] | 296.95 K             |             |
| V0         | 2[m/s]     | 2 m/s                |             |
| QQ         | 800[W/m^2] | 800 W/m <sup>2</sup> |             |

Рис. 10. Параметры для июля  
Fig. 10. Parameters for July

Относительно граничных условий можно отметить следующее.  
Для верхней границы воздушного потока было указано граничное условие под названием «Open boundary».

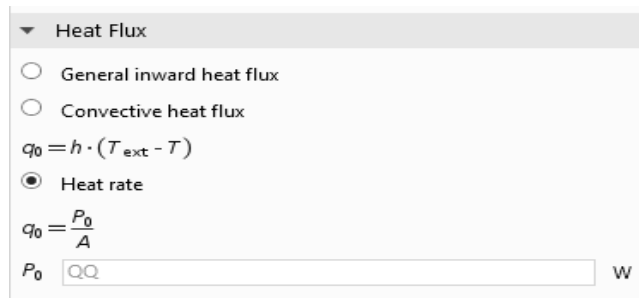


Рис. 11. Скорость нагрева «Heat rate»  
Fig. 11. Heat rate

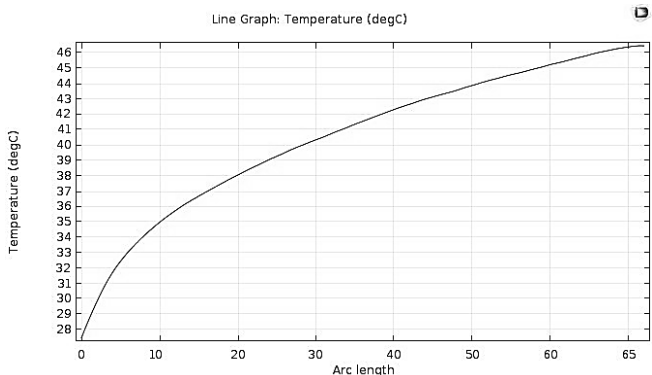


Рис. 12. Результаты теплового расчета для июля  
Fig. 12. Heat calculation for July

Оно учитывало температуру воздушного потока, которая равнялась температуре окружающей среды.

Для левой границы предназначалось граничное условие «Inflow». Это граничное условие указывало на начало (вход) воздушного потока.

Граничное условие «Outflow» предназначалось для правой границы и соответственно обозначало окончание (выход) воздушного потока.

Для внешней границы стенки было указано граничное условие «Heat flux», которое обозначает теплый поток воздуха. Чтобы задать тепловому потоку воздуха скорость была использована команда «Heat rate» (рис. 11).

Также для потока воздуха были заданы: скорость воздушного потока, условие для давления «Suppress backflow», что означает давление, подавляющее обратный поток. Результаты теплового расчета представлены на рис. 12.

Как видно на графике (рис. 12) распределение температуры лопасти по длине лопасти носит параболический характер, симметричный оси ОХ. Минимальная температура нагрева стенки в начале лопасти равна  $T_{min}=27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а максимальная температура нагрева стенки в конце лопасти  $T_{max}\approx 46,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Средняя температура нагрева по длине лопасти будет равна:

$$T_{cp} = (27 + 46,5) / 2 \approx 37\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

При этом установившаяся температура лопасти без внутреннего охлаждения в июле равна  $\Theta_{\infty} \approx 56,45\text{ }^{\circ}\text{C}$  (табл. 4).

Таким образом, можно сделать вывод, что поток воздуха, проходящий через внутреннюю полость лопасти, приводит к понижению температуры стенки лопасти в июле примерно на  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Результаты тепловых расчетов с мая по октябрь сведены в табл. 5.

На рис. 13 представлена зависимость установившегося значения температуры лопасти по месяцам, а также средняя температура лопасти, полученная в результате охлаждения по месяцам.

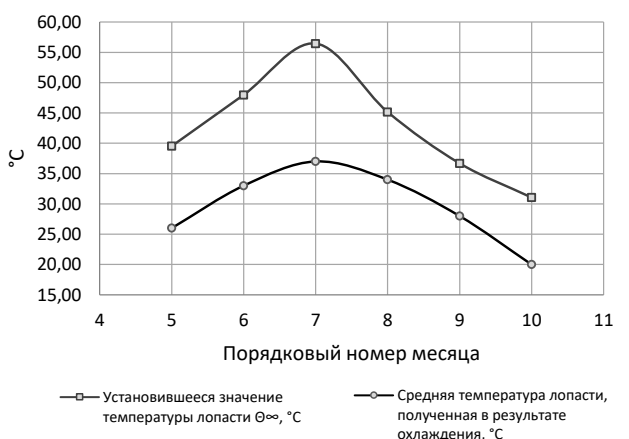


Рис. 13. Зависимость температур по месяцам  
Fig. 13. Temperature dependencies by month

Результаты тепловых расчетов по месяцам (с мая по октябрь) в районе Тамани

Таблица 5

Heat calculation results per month (starting on May and continuing through October inclusive) in the Taman region

Table 5

| Месяц    | Значения $t$ воздуха окр. среды, $^{\circ}\text{C}$ | Поток солнечного излучения, $Q_{sol}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Установившееся значение $t \Theta_{\infty}$ , $^{\circ}\text{C}$ | Средняя $t$ лопасти, полученная в результате охладж., $^{\circ}\text{C}$ | Охлаждение лопасти, $^{\circ}\text{C}$ |
|----------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Май      | 15,80                                               | 600                                                       | 39,52                                                            | 26                                                                       | 14                                     |
| Июнь     | 20,60                                               | 750                                                       | 47,98                                                            | 33                                                                       | 15                                     |
| Июль     | 23,80                                               | 800                                                       | 56,45                                                            | 37                                                                       | 20                                     |
| Август   | 23,30                                               | 650                                                       | 45,16                                                            | 34                                                                       | 11                                     |
| Сентябрь | 18,30                                               | 590                                                       | 36,69                                                            | 28                                                                       | 9                                      |
| Октябрь  | 12,50                                               | 470                                                       | 31,05                                                            | 20                                                                       | 11                                     |

В заключение можно сказать, что принудительный продув внутренней полости лопасти гелиоветрогенератора потоком воздуха приводит к снижению температуры лопасти.

Гидродинамические свойства потока воздуха  
снаружи и внутри лопасти

Совершая 15 об/мин, лопасть движется с частотой вращения равной 0,25 с<sup>-1</sup>. По формуле (6) рассчитана скорость вращения определенных точек лопасти, удаленных на различное расстояние от основания лопасти:

$$V=2\pi R\nu,$$
 (6)

где  $R$  — радиус вращения ветроколеса (длина лопасти), м;  $\nu$  — частота вращения, с<sup>-1</sup>.

Результаты расчета представлены в табл. 6.

Из результатов расчета, представленных в табл. 6, можно увидеть, что скорость воздушного потока, который обтекает окончание лопасти, достигает значения равного 102 м/с.

Чтобы охарактеризовать поток воздуха, омывающий лопасть при вращении, был определен критерий подобия Рейнольдса:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu},$$
 (7)

Таблица 6

Скорость вращения лопасти  
на различном расстоянии от основания

Blade rotation velocity  
at various distances from the root

| Расстояние от основания лопасти $R$ , м | Скорость вращения участка лопасти $V$ , м/с | Скорость вращения участка лопасти $V$ , км/ч |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 5                                       | 7,85                                        | 28,26                                        |
| 10                                      | 15,7                                        | 56,52                                        |
| 20                                      | 31,4                                        | 113                                          |
| 30                                      | 47,1                                        | 170                                          |
| 40                                      | 62,8                                        | 226                                          |
| 50                                      | 78,5                                        | 282,6                                        |
| 60                                      | 94,2                                        | 340                                          |
| 65                                      | 102                                         | 367,2                                        |

Table 6

где  $V$  — скорость движения воздуха, м/с;  $L$  — ширина лопасти, м;  $\nu=15,1\cdot10^{-6}$  — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Как можно заметить из результатов расчета число Рейнольдса превышает критическое значение  $Re_{кр}=2300$ , что свидетельствует о турбулентности потока воздуха, который обтекает лопасть [15].

$$Nu=0,037\cdot Re^{0,8}Pr^{0,43},$$
 (8)

где  $Pr=0,7$  — число Прандтля.

На рис. 14 представлено распределение числа  $Nu$  по длине лопасти. По данным графика можно сделать вывод, что лопасть обдувается сильным конвективным тепловым потоком, что свидетельствует о турбулентном течении воздушного потока. Особенно отчетливо это наблюдается на расстоянии 40, 30 и 60 м от основания лопасти.

При частоте вращения лопасти 15 об/мин, скорость воздушного потока во внутреннем проходном канале диаметром  $d=1$  м достигает 2 м/с и принимается постоянной по всей длине лопасти.

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = 132\,450.$$
 (9)

В свою очередь число  $Nu$  определяется по формуле:

$$Nu = 0,0225 \cdot Re^{0,8} \left( 1 - \frac{6 \cdot 10^5}{Re^{1,8}} \right) Pr^{0,4} = 244.$$
 (10)

Таким образом, критерий  $Re$  характеризует поток воздуха во внутреннем проходном канале как турбулентный, а параметр  $Nu$  свидетельствует об интенсивном конвективном теплообмене между поверхностью тела и потоком воздуха.

Заключение

Для достижения необходимой оптимальной температуры фотоэлектрических преобразователей была модифицирована конструкция лопасти гелиоветрогенератора. Методом моделирования была подобрана наилучшая конструкция лопасти гелиоветрогенератора, а также приспособление для увеличения эффективности конструкции лопасти — дефлектор. Лопасть с наиболее эффективной конструкцией имеет на конце колено длиной, равной 15 % от длины лопасти и наклоненное под углом в 30°. На окон-

Таблица 7

Результаты расчета критерия подобия  $Re$

Table 7

Re number calculation results

| Расстояние от основания лопасти $R$ , м | Ширина лопасти $L$ , м | Скорость движения воздуха $V$ , м/с | Re         |
|-----------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------|
| 5                                       | 2,5                    | 7,85                                | 1 300 000  |
| 10                                      | 3                      | 15,7                                | 3 120 000  |
| 20                                      | 3                      | 31,4                                | 6 240 000  |
| 30                                      | 3                      | 47,1                                | 9 360 000  |
| 40                                      | 2,5                    | 62,8                                | 10 400 000 |
| 50                                      | 1,5                    | 78,5                                | 7 800 000  |
| 60                                      | 1,5                    | 94,2                                | 9 360 000  |
| 65                                      | 1                      | 102                                 | 6 760 000  |

Таблица 8

Результаты расчета критерия подобия Нуссельта  $Nu$

Table 8

Nu number calculation results

| Re         | Nu     |
|------------|--------|
| 1 300 000  | 2 470  |
| 3 120 000  | 4 976  |
| 6 240 000  | 8 664  |
| 9 360 000  | 11 984 |
| 10 400 000 | 13 038 |
| 7 800 000  | 10 357 |
| 9 360 000  | 11 984 |
| 6 760 000  | 9 237  |

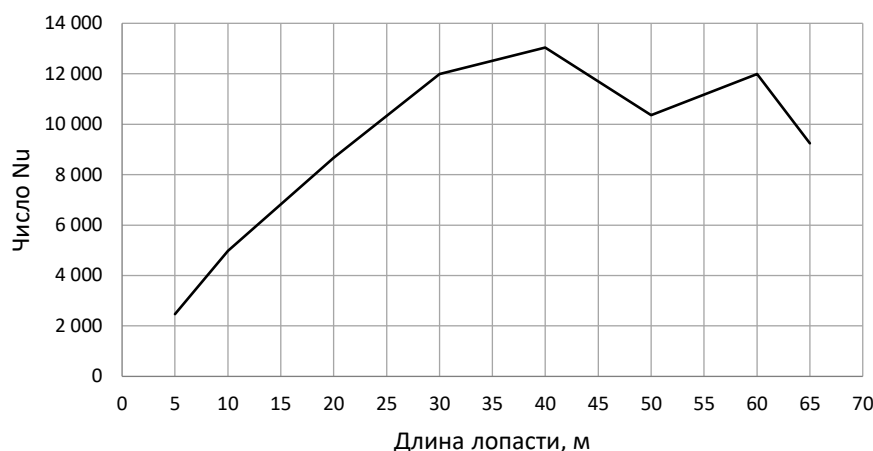


Рис. 14. Распределение числа  $Nu$  по длине лопасти

Fig. 14.  $Nu$  number distribution along the blade length

чании лопасти установлен дефлектор. При данной модели конструкции лопасти скорость воздушного потока внутри лопасти достигает значения 2 м/с. За счет протекания турбулентного воздушного потока внутри лопасти со скоростью 2 м/с стенки лопасти охлаждаются изнутри на 20 °С. За счет теплопроводности материалов лопасти гибкие солнечные панели, установленные на поверхности лопастей, также охлаждаются на 20 °С.

В дальнейшем планируется установить коэффициент температурного сопротивления материалов лопасти

и гибких солнечных панелей, интенсифицировать теплообмен внутри воздушного канала за счет оребрения поверхности проходного канала, улучшить аэродинамические показания лопасти гелиоветрогенератора и, возможно, исключить дополнительное аэродинамическое устройство без потери скорости внутреннего воздушного потока. Целью дальнейшего исследования является увеличение интенсификации теплообмена и улучшение аэродинамических и гидродинамических свойств воздушного потока.

## Литература

## References

1. Richard Heinberg. Powerdown: Options and Actions for a Post-Carbon World. // New Society Publishers, 2004. 288 p.
2. Лукутин Б. В. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 184 с.
3. Горяев А. А., Шепель Г. А. Возобновляемые источники энергии: учеб. Пособие. Архангельск: САФУ, 2010. 120 с.
4. Lemthong Chanphavong, Vongsavanh Chanthaboune, Sounthisack Phommachanh, Xayalak Vilaida, Phetsaphone Bounyanite. Enhancement of performance and exergy analysis of a water-cooling solar photovoltaic panel. // Total Environment Research Themes. 2022. Vol. 3–4. DOI: 10.1016/j. totert. 2022.100018.
5. Huangyu Fang, Lyu Zhou, Lujia Xu, Saichao Dang, Stefaan De Wolf, Qiaoqiang Gan. Radiative cooling for vertical solar panels. // iScience. 2024. Vol. 27, Issue 2. DOI: 10.1016/j. isci. 2024.108806.
6. Malagouda Patil, Alur Sidramappa, Sunil Kumar Shetty, Ajit M. Hebbale. Experimental study of solar PV/T panel to increase the energy conversion efficiency by air cooling. // Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 92, Part 1. DOI: 10.1016/j. matpr. 2023.05.007.
7. Lopez-Pascual D., Valiente-Blanco I., Manzano-Narro O., Fernandez-Munoz M., Diez-Jimenez E. Experimental characterization of a geothermal cooling system for enhancement of the efficiency of solar photovoltaic panels. // Energy Reports. 2022. Vol. 8, Supplement 15. DOI: 10.1016/j. egyr. 2022.10.154.
8. Ананченко С. С., Галов В. В. Выбор конструктивных решений профиля лопасти гелиоветрогенератора с целью повышения КПД работы. // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы
1. Richard Heinberg. Powerdown: Options and Actions for a Post-Carbon World. // New Society Publishers, 2004. 288 p.
2. Lukutin B. V. Renewable sources of electricity: a textbook. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2008. 184 p. (in Russian)
3. Goryaev A. A., Shepel G. A. Renewable energy sources: studies. Stipend. Arkhangelsk: SAFU, 2010. 120 p. (in Russian)
4. Lemthong Chanphavong, Vongsavanh Chanthaboune, Sounthisack Phommachanh, Xayalak Vilaida, Phetsaphone Bounyanite. Enhancement of performance and exergy analysis of a water-cooling solar photovoltaic panel. *Total Environment Research Themes*. 2022. Vol. 3–4. DOI: 10.1016/j. totert. 2022.100018.
5. Huangyu Fang, Lyu Zhou, Lujia Xu, Saichao Dang, Stefaan De Wolf, Qiaoqiang Gan. Radiative cooling for vertical solar panels. *iScience*. 2024. Vol. 27, Issue 2. DOI: 10.1016/j. isci. 2024.108806.
6. Malagouda Patil, Alur Sidramappa, Sunil Kumar Shetty, Ajit M. Hebbale. Experimental study of solar PV/T panel to increase the energy conversion efficiency by air cooling. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 92, Part 1. DOI: 10.1016/j. matpr. 2023.05.007.
7. Lopez-Pascual D., Valiente-Blanco I., Manzano-Narro O., Fernandez-Munoz M., Diez-Jimenez E. Experimental characterization of a geothermal cooling system for enhancement of the efficiency of solar photovoltaic panels. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8, Supplement 15. DOI: 10.1016/j. egyr. 2022.10.154.
8. Ananchenko S. S., Galov V. V. The choice of design solutions for the blade profile of a solar wind generator in order to increase the efficiency of operation. Transport: problems, ideas, prospects: proceedings of the LXXXII VNTC of students, postgraduates

- тивы: сборник трудов LXXXII ВНТК студентов, аспирантов и молодых ученых, в двух томах. Т. 1. СПб.: ПГУПС, 2022. С. 95–98.
9. Ramadan Gad, Hatem Mahmoud, Hamdy Hassan. Performance evaluation of direct and indirect thermal regulation of low concentrated (via compound parabolic collector) solar panel using phase change material-flat heat pipe cooling system. // *Energy*. 2023. Vol. 274. DOI: 10.1016/j. energy. 2023.127323.
  10. Бессель В. В., Кучеров В. Г., Мингалева Р. Д. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: учебно-методическое пособие. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2016. 90 с.
  11. Баскаков А. П., Мунц В. А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебник для вузов. М.: Издательский дом «БАСИЕТ», 2013. 368 с.
  12. Ватулин Я. С., Копылов А. З. Исследование гидро-газодинамических процессов в оборудовании подвижного состава средствами модуля FlowSimulation (SolidWorks): Методические указания, часть 1. Петерб. гос. ун-т. путей сообщ. СПб., 2013. 37 с.
  13. Завадцев А. А. и др. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника: высокочастотные дефлекторы: учебное пособие для вузов. 2-е изд. М.: Издательство Юрайт, 2019. 179 с.
  14. Дорфман Л. А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. 260 с.
  15. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 88 с.
  - and young scientists, in two volumes. Vol. 1. St. Petersburg: PGUPS, 2022. pp. 95–98. (in Russian)
  9. Ramadan Gad, Hatem Mahmoud, Hamdy Hassan. Performance evaluation of direct and indirect thermal regulation of low concentrated (via compound parabolic collector) solar panel using phase change material-flat heat pipe cooling system. // *Energy*. 2023. Vol. 274. DOI: 10.1016/j. energy. 2023.127323.
  10. Bessel V. V., Kuchеров V. G., Mingaleeva R. D. The study of solar photovoltaic cells: an educational and methodological guide. Moscow: Publishing Center of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU), 2016. 90 p. (in Russian)
  11. Baskakov A. P., Munts V. A. Non-traditional and renewable energy sources: textbook for universities. Moscow: BASIET Publishing House, 2013. 368 p. (in Russian)
  12. Vatulin Ya. S., Kopylov A. Z. Investigation of hydrogasdynamic processes in rolling stock equipment by means of the FlowSimulation module (SolidWorks): Methodological guidelines, part 1. St. Petersburg State University. ways of communication. St. Petersburg, 2013. 37 p. (in Russian)
  13. Zavadtsev A. A. et al. Physics of charged particle beams and accelerator technology: high-frequency deflectors: a textbook for universities. 2nd ed. Moscow: Yurait Publishing House, 2019. 179 p. (in Russian)
  14. Dorfman L. A. Hydrodynamic resistance and heat transfer of rotating bodies, Moscow: State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 1960. 260 p. (in Russian)
  15. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Heat transfer. Textbook for universities. 3rd edition, revised. and additional M.: Energiya, 1975. 88 p. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Заричняк Юрий Петрович

Д. ф.-м. н., профессор, доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, zarich4@gmail.com, SPIN-код: 9093–3990; ORCID: 0000-0001-8713-3583

#### Лукин Владимир Алексеевич

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, vladimirlookvine@gmail.com, ORCID: 0009-0004-9013-6370

#### Алексеев Евгений Валентинович

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, evgeniaalekseev1996@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6179-3345

### Information about authors

#### Zarichnyak Yurii P.

D. Sc., Professor, Associate Professor of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, zarich4@gmail.com, SPIN-код: 9093–3990, ORCID: 0000-0001-8713-3583

#### Lukin Vladimir A.

Graduate student of the Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, vladimirlookvine@gmail.com, ORCID: 0009-0004-9013-6370

#### Alekseev Evgenii V.

Graduate student of the Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, evgeniaalekseev1996@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6179-3345



Статья доступна по лицензии  
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»