



Исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных установок внутри купольного строения в условиях Севера

© Н.П. Местников^{*,**}, П.Ф. Васильев^{*,**}, Г.И. Давыдов^{**},
А.М. Хоютанов^{**}, А.М.-Н. Альзаккар^{***}

^{*}Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

^{**}Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Россия

^{***}Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: Цель – исследование возможности размещения фотоэлектрических солнечных установок внутри купольного строения, находящегося на базе испытательного полигона Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в центральной части Республики Саха (Якутия), с сохранением значительной доли генерации мощности и определение оптимального расстояния между фотоэлектрической солнечной установкой и прозрачными стенами данного купольного строения. В исследовании применялись методики и способы определения снижения электроэнергетической эффективности фотоэлектрических солнечных установок при изменении среды размещения, было выявлено оптимальное расстояние размещения установки внутри прозрачных купольных строений с приведением графических интерпретаций и градиентов. Авторами статьи получены контрольные параметры снижения величины светового потока, мощности генерации фотоэлектрической солнечной установки при изменении среды эксплуатации и оптимальное расстояние размещения фотоэлектрической солнечной установки внутри купольного строения в целях значительного снижения поверхностного загрязнения фотоэлектрической солнечной установки. На основе проведенных исследований определено, что в случае эксплуатации фотоэлектрических солнечных установок внутри прозрачного купольного строения мощность генерации падает на 25,61% в сравнении с фактическими данными генерации на открытом пространстве. Определено, что с увеличением расстояния между прозрачными стенами строения и установкой мощность генерации падает на ~ 23,01%, светового потока – на 5,224% на расстоянии до 1,5 м. Кроме того, данный способ применения фотоэлектрических солнечных установок микромощности внутри купольного строения может применяться в рамках строительства и проектирования системы «Умный дом» и объектов автономной генерации электроэнергии и мощности на территории северных регионов России.

Ключевые слова: солнечная панель малой мощности, поверхностное загрязнение, мониторинг работы, купольное строение, здание, EPEVER

Благодарности: Результаты исследований, описанные в настоящей статье, подготовлены в рамках выполнения государственного задания по проекту «Исследования путей повышения эксплуатационной надежности и эффективности интеллектуальных электроэнергетических систем в условиях Севера и Арктики» ФНИ в РФ на 2021–2030 гг. по приоритетному направлению «Основы эффективного развития и функционирования энергетических систем на новой технологической основе в условиях глобализации, включая проблемы энергобезопасности, энергосбережения и рационального освоения природных энергоресурсов», и при финансовой поддержке публикационной активности СВФУ в рамках научного проекта № 20-11-00001.

Для цитирования: Местников Н.П., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хоютанов А.М., Альзаккар А.М.-Н. Исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных установок внутри купольного строения в условиях Севера. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 435–449. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>

Applicability of photoelectrical solar units inside domical structures in northern conditions

Nikolay P. Mestnikov***, Pavel F. Vasilyev***, Gennadiy I. Davydov**,
Aleksandr M. Khoyutanov**, Ahmad M.-N. Alzakkar***

* M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

**Institute of Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

***Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: The possibility of installing photoelectrical solar units inside domical structures with the maintenance of their power generation level was investigated; an optimal distance between a photoelectrical solar unit and the transparent walls of the respective domical structure was determined. The experiments were carried out at the North-Eastern Federal University in the central part of the Republic of Sakha (Yakutia) by determining reduction in the electrical energy efficiency of photoelectrical solar units when changing their location. An optimal distance for installing such units within transparent domical structures was found based on graphical interpretations and gradients. The authors obtained reference parameters for light flux reduction, the generation power of a photoelectrical solar unit when changing the operation medium, and the optimal distance of a photoelectrical solar unit inside a domical structure for reducing the surface contamination of the unit. It was found that, when photoelectrical solar units are operated within a transparent domical structure, the power generation falls by 25.61% as compared to actual results in open space. It was found that an increase in the distance between the transparent walls of the domical structure and the unit led to a decrease in the power generation by ~23.01% and the light flux power by 5.224% at 1.5 m. This method of installing photoelectrical solar units can be used in the construction and designing of smart home systems and autonomous power generation facilities in northern regions of Russia.

Keywords: low power solar panel, surface pollution, operation monitoring, dome structure, building, EPEVER

Acknowledgements: The research results described in the article were prepared as a part of fulfilling the state task on the project "Research into the methods to improve the operational reliability and efficiency of intelligent electric power systems in the North and the Arctic" of the Fundamental Scientific Researches of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030 in the priority direction "Fundamentals of the effective development and operation of energy systems on a new technological basis in globalization conditions including the problems of energy security, energy saving and rational development of natural energy resources". The publications of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University are funded in the framework of the scientific project no. 20-11-00001.

For citation: Mestnikov NP, Vasilyev PF, Davydov GI, Khoyutanov AM, Alzakkar AM-N. Applicability of photoelectrical solar units inside domical structures in northern conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):435–449. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>

ВВЕДЕНИЕ

В статье приведены результаты исследования о возможности эксплуатации фотоэлектрических солнечных установок внутри энергоэффективных купольных строений в условиях холодного климата Якутии посредством размещения фотоэлектрических установок внутри прозрачного строения купольной формы в целях снижения поверхностного загрязнения фотоэлектрической панели.

В настоящий момент научными сотрудниками Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (СВФУ) и Институтом физико-технических проблем Севера СО РАН активно изучается возможность

внедрения энергоэффективных купольных строений в населенные пункты Республики Саха (Якутия). В этой связи зимой 2019 г. ООО ГК «Синет» совместно с СВФУ им. М.К. Аммосова реализован пилотный проект строительства купольного здания, на рис. 1 представлен общий вид данного объекта [1].

На рис. 1 видно, что боковые стороны купольного строения выполнены из прозрачного теплоизоляционного и морозостойкого материала. Данный объект размещен на территории городского округа (ГО) «город Якутск» по следующим географическим координатам: 62.30236386052619 "N 129.91516946160922 "E.

Электроснабжение вышеуказанного объек-



Рис. 1. Внешний вид купольного здания
Fig. 1. Image of a dome building

та производится посредством эксплуатации дизель-генераторной установки малой мощности с определенным потреблением дизельного топлива и масла. Таким образом, внедрение возобновляемых источников энергии в электропитании вышеуказанного объекта является актуальной задачей, требующей проведения определенных исследований.

Кроме того, необходимо отметить, что вследствие поверхностного загрязнения фотоэлектрической установки (солнечной панели) фиксируется значительное снижение генерации мощности, вплоть до 44,15% [2]. Таким образом, поиск и исследование технических решений снижения степени поверхностного загрязнения фотоэлектрической установки являются одними из основных задач исследования.

Также, в соответствии с исследованиями Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, определено, что степень пылевого загрязнения зависит от следующих причин, а именно: типа почвы и постоянного строительства городской или сельской инфраструктуры [3]. Необходимо отметить, что на территории ГО «город Якутск» уровень загрязнения атмосферного воздуха в марте–апреле оценивается как повышенный. Повышенная степень определена концентрациями взвешенных веществ (пыли) и фенола. Максимальная повторяемость пыли составила

6,6%, наиболее выраженная разовая концентрация (стандартный индекс) по сравнению с предельно допустимой максимальной разовой концентрацией достигала значения выше, чем в 1,3 раза, а среднемесячный показатель имел значение, превышающее в 1,6 раза значение предельно допустимой среднемесячной концентрации.

Повторяемость превышений ПДК по фенолу равнялась 1,9%, стандартный индекс составил 1,2 [4]. На рис. 2 представлен график состава загрязнения воздуха на территории г. Якутск, окрашенная рыжим цветом.

Таким образом, в г. Якутск наблюдается значительное загрязнение воздуха взвешенными веществами (параметр «ВВ», а именно: пыль, сажа, дым, сульфаты и т.д.), что также является одним из главных катализаторов повышения степени запыленности города.

На основании вышеизложенных материалов необходимо отметить, что в случае эксплуатации фотоэлектрических установок на территории ГО «город Якутск» высока вероятность значительного поверхностного загрязнения панелей, что приведет к значительному снижению мощности генерации, а, следовательно, поиск методов и способов снижения степени загрязнения поверхности фотоэлектрической солнечной установки является одной из приоритетных и актуальных задач.

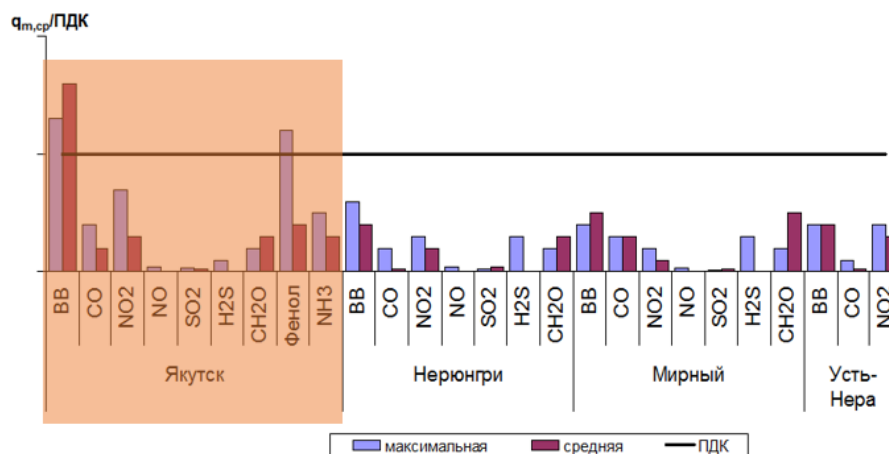


Рис. 2. График состава загрязнения воздуха в населенных пунктах Якутии
 Fig. 2. Graph of the air pollution composition in the settlements of Yakutia

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках выстраивания цели исследования проведен литературный обзор, где авторами рассмотрены различные научно-технические статьи по направлению «солнечная энергетика».

В настоящий момент существуют различные технические решения по снижению пылевого загрязнения фотоэлектрических установок в виде ее очистки, а именно – необходимо отметить результаты работ авторов, опубликованные в различных научных статьях, где приведены данные исследований, в том числе по влиянию пыли на функционирование объектов гелиоэнергетики:

1. Научная статья Малая Мазумдера и Марка Н. Хоренштейна из Бостонского университета, в которой установлено, что применение системы самоочистки фотоэлектрических установок на основе функционирования прозрачных электродинамических экранов, состоящих из рядов прозрачных параллельных электродов, заключенных в прозрачную диэлектрическую пленку, может использоваться для удаления пыли в качестве самоочищающихся солнечных коллекторов [5]. Таким образом, отмечается, что существуют системы самоочистки фотоэлектрических установок, но применение данной технологии в условиях холодного климата требует дальнейшего изучения с учетом высокой стоимости ее внедрения.

2. Научная статья Мухаммада Равшана Хабиба, Мухаммада Шахневаза Танвираиз

Университета Murdoch (Австралия), где ими была разработана система очистки солнечных панелей на базе программного обеспечения Arduino, которая имеет используемый в этой системе двухступенчатый механизм, состоящий из вытяжного вентилятора, работающего как нагнетатель воздуха, и стеклоочистителя, удаляющего пыль с поверхности панели. Также результаты экспериментов показывают, что предлагаемая система очистки может работать с эффективностью 87–96% для различных типов песка [6]. Однако предлагаемая технология имеет некоторые недостатки, а именно – высокую капитальную стоимость и необходимость в человеческих ресурсах в виде постоянного мониторинга за надлежащим техническим состоянием системы.

3. Научная статья В.А. Панченко, М.М. Сангжиева из ФГБОУ ВО Калмыцкого государственного университета им. Б.Б. Городовикова, где установлено, что в случае негерметичности солнечных панелей пыль может попадать внутрь солнечных панелей, а боковые панели (по периметру) могут собирать частички пыли. Загрязнение модулей механическим мусором, частицами песка, пылью, листьями и другими ненужными компонентами приводит к 10–15% потери КПД, а иногда и до 40% [7], что значительно снижает мощность генерации фотоэлектрических установок.

4. Научная статья М.Б. Пермякова, Т.В. Красновой из ФГБОУ ВО Магнитогорского



государственного технического университета им. Г.И. Носова, где указано, что купольные здания имеют значительные преимущества в отличие от обычных домов в виде наименьшей сопротивляемости ветру, уменьшение на 40% энергопотребления в плане теплоснабжения здания; авторами статьи также определено, что купольные дома могут рассматриваться как приемлемый вариант для размещения солнечных элементов на их фасадах для проведения исследований [8].

5. Другие научные статьи и практические рекомендации, где представлены результаты изучения влияния пылевого загрязнения (снижение генерации мощности именно на летний период вследствие сильного напыления), а также предложены технические решения в виде автоматизированных систем очистки солнечных панелей с помощью технических устройств или химических реагентов, позволяющих снизить налипание пылевых фракций на поверхности фотоэлектрической установки и т.д. [9–20].

На основании проведенного обзора литературных источников необходимо отметить, что существуют различные методы и способы снижения влияния пылевого загрязнения на функционирование фотоэлектрических установок. Однако мало изучена возможность проведения экспериментальных исследований по внедрению фотоэлектрических установок внутри прозрачных купольных зданий в целях снижения поверхностного загрязнения и электроснабжения данного здания.

Таким образом, целью данной статьи является проведение экспериментальных исследований возможности применения фотоэлектрических установок внутри купольных зданий и поиск параметров ее размещения с обеспечением наиболее высокой доли электроэнергетической эффективности генерации электроэнергии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Перейдем к вопросу разработки экспериментальной установки солнечной энергетики малой мощности в целях размещения и технической апробации внутри прозрачного купольного строения (см. рис. 1). Авторами настоящей статьи для проведения натурных

исследований собрана фотоэлектрическая солнечная электростанция мощностью 10 Вт, названная в виде модели СЭ–10, которая состоит из следующих комплектующих и приборов:

1. Поликристаллическая солнечная панель мощностью 10 Вт марки ФСМ–10П (производитель Exmork, Россия), выбор данной модели панели обоснован возможностью работы агрегата при температурах от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$, что соответствует климатическим условиям холодного климата.

2. Контроллер заряда марки Tracer 2210 AN, выбор модели обоснован возможностью быстрого приобретения в г. Якутск.

3. Силовой аккумулятор марки Delta емкостью 75А·ч, выбор модели обоснован возможностью доступного приобретения в г. Якутск.

4. Нагрузка в виде 1 электрической лампы мощностью 7,5 Вт.

5. Стационарный порт сбора данных eLog марки EPEVER.

6. Персональный компьютер.

7. Программное обеспечение EPEVER для мониторинга данных.

8. Люксметр марки MS6610 (производитель MASTECH, Китай), выбор модели обоснован возможностью доступного приобретения в г. Якутск.

9. Вспомогательные комплектующие, в том числе смартфон с функцией измерения угла наклона панели относительно земли.

В ходе разработки СЭ–10 приняты условия в виде облегчения массы и габаритов установки, удельной стоимости и возможности мониторинга работы, так как планируются последующие испытания СЭ–10 в целях определения возможности электроснабжения сети, освещения объекта сельского хозяйства. Электроустановка СЭ–10 имеет преимущества в сравнении с существующим аналогом (комплект «зарядка в походе» компания «Delta») в виде системы накопления энергии (аккумуляторная батарея емкостью 75 А·ч) и возможности мониторинга параметров, а именно: по напряжению, току и мощности.

Далее внешний вид СЭ–10 представлен на рис.3.

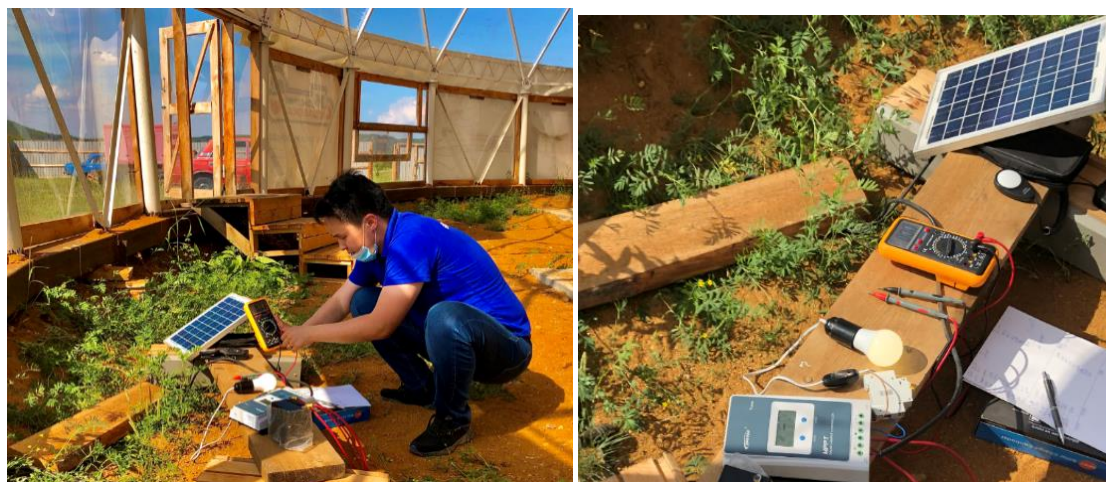


Рис. 3. Внешний вид СЭ–10 в ходе проведения экспериментальных работ
 Fig. 3. External view of a solar power station SE–10 in the course of experimental work

Проведены сравнительные испытания генерации солнечной электростанции при двух случаях: на открытой поверхности и внутри купольного строения в целях определения степени снижения выработки электрической энергии, а также для дальнейшей оценки эффективности обеспечения защиты от поверхностного загрязнения посредством установки систем солнечной генерации внутри прозрачных закрытых строений. Так как выше, в разделе «Введение», отмечено, что на территории г. Якутск установлено значитель-

ное загрязнение поверхности, а в разделе «Цель исследования» отмечено, что вследствие влияния пылевого загрязнения генерация электроэнергии от солнечных панелей снижается до 40%, то необходимо еще уточнить, что эксперименты произведены в течение июня 2021 г. на базе купольного строения СВФУ им. М.К. Аммосова (см. рис. 1) по следующим координатам: 62.30236386052619 "N 129.91516946160922 "E. Алгоритм проведения натурных исследований представлен в табл.1.

Таблица 1. Методика проведения эксперимента
 Table 1. Experiment procedure

№ пункта	Необходимые параметры и действия
1	Подготовка и монтаж экспериментальной установки СЭ–10
2	Подготовка регистратора данных системы EPEVER
3	Проверка исправности экспериментальной установки и люксметра
4	Проверка уровня заряда аккумуляторной батареи ($30\% < Q_{\text{заряда}} < 55\%$)
5	Включение нагрузки в виде электрической лампы мощностью 7,5 Вт, которая питается от силового аккумулятора через контроллер заряда
6	Размещение отполированной солнечной панели на открытом воздухе под углом 15° относительно поверхности земли
7	Включение экспериментальной установки и люксметра (ориентирование в сторону солнца) и начало регистрации показателей (напряжение, ток, мощность, освещенность) при солнечной погоде с 12:00 по 15:00 ч после полуночи. Количество шагов эксперимента – до 36 ед. (1 единица на 5 м)
8	Выключение экспериментальной установки и люксметра
9	Обработка результатов эксперимента в целях получения графической интерпретации по мощности и световому потоку (расчет светового потока производится по формуле (1) на лицензированной программе MS Office Excel)
10	Повтор эксперимента по пунктам 1–9, но внутри купольного здания.
11	Повтор эксперимента по пунктам 1–9 ведется внутри купольного строения при расстоянии от прозрачной стены от 0 до 1,5 м. Шаг расстояния – 0,1 м. На каждый шаг расстояния забор экспериментальных данных производится в отдельном порядке при солнечной погоде с 12:00 по 15:00 ч после полуночи
12	После повтора экспериментов по пункту 11 производится очистка солнечной панели от пылевого загрязнения и демонтаж экспериментальной установки СЭ–10

Необходимо отметить, что, в соответствии с пунктом 4 (табл. 1), уровень заряда аккумуляторной батареи должен составлять не менее 30% в целях обеспечения работоспособности оборудования и не более 55% в целях предотвращения быстрой зарядки батареи, недопущения включения холостой работы солнечной панели и, следовательно, получения достоверных экспериментальных данных.

Кроме того, расчет светового потока производится с помощью формулы (1) на основании экспериментальных данных (освещенность), полученных люксметром:

$$\Phi_{\Pi} = E_{\Pi} \cdot S_{\Pi}, \quad (1)$$

где Φ_{Π} – показатель светового тока, лм; E_{Π} – показатель освещенности, полученный люксметром в ходе эксперимента; S_{Π} – площадь поверхности солнечной панели ФСМ-10П, принимается как 0,7209 м².

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В течение июня 2021 г. авторами статьи были проведены натурные исследования по сравнению генерации солнечной электростанции при двух случаях: на открытом воздухе (случай № 1) и внутри купольного здания (случай № 2), расчет показателей влияния внешних параметров (световой поток и

температура воздуха) на функционирование экспериментальной установки СЭ-10 и определение оптимального расстояния от прозрачной стены купольного строения до фотоэлектрической установки (солнечной панели).

Кроме того, необходимо отметить, что в ходе проведения экспериментальных исследований получены дополнительные данные температуры воздуха на открытой поверхности +31°C и внутри купольного здания +45°C. Следовательно, необходим учет возможного влияния высокой температуры окружающей среды на функционирование солнечной панели ввиду того, что при высоких температурах свыше +30°C зафиксировано снижение мощности генерации объектов солнечной энергетики.

В связи с этим (с целью проведения исследований) на рис. 4 а представлен первый случай – размещение СЭ-10 на открытом воздухе, а на рис. 4 б – внутри купольного строения.

На рис. 5 представлен график светового потока относительно солнечной панели с учетом случаев № 1 и 2. Кроме того, установлен показатель снижения светового потока при переходе с открытой поверхности в купольное строение с использованием формулы (2):

$$K_o = \left(1 - \frac{\Phi_{\text{в}}}{\Phi_{\text{к}}}\right) \cdot 100\%, \quad (2)$$



a



b

Рис. 4. Размещение СЭ-10: а – на открытом воздухе; б – внутри купольного здания
Fig. 4. Location of a solar power station SE-10: a – outdoors; b – inside the dome building

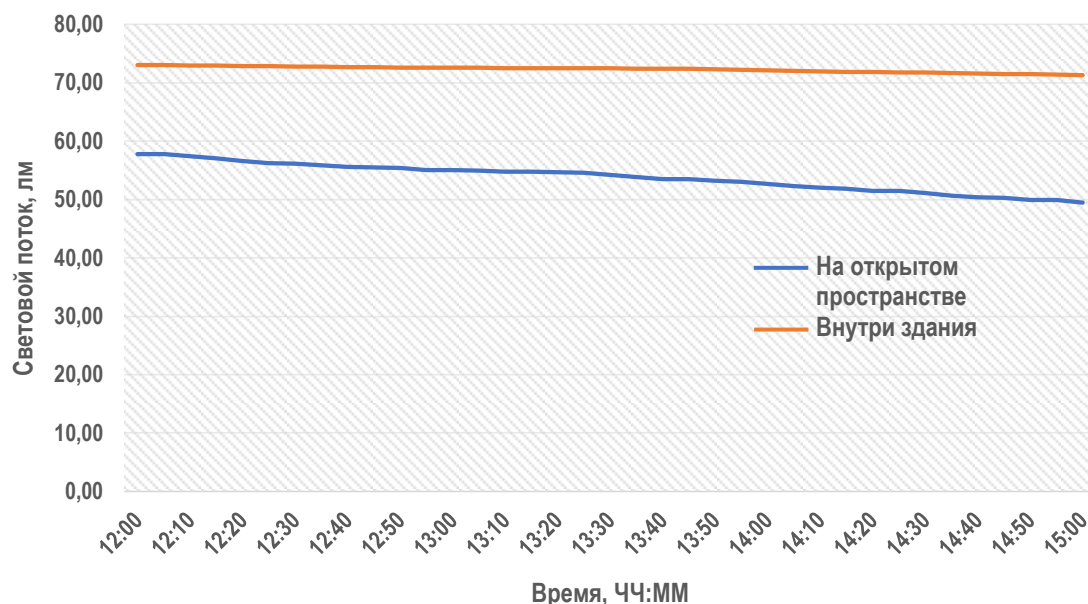


Рис. 5. График-сравнение светового потока в случаях № 1 и 2
 Fig. 5. Comparison graph of luminous flux in the cases no. 1 and no. 2

где K_o – показатель снижения светового потока, %; Φ_o – показатель светового потока на открытой поверхности, лм; Φ_k – показатель светового потока внутри купольного здания, лм.

Таким образом, на вышеуказанном графике видно, что показатель светового потока на открытом воздухе выше показателя светового потока внутри купольного здания на 21,88%. Необходимо отметить, что все процедуры экспериментальных исследований велись при одинаковых условиях для каждого образца.

В соответствии с формулой (3) производится расчет показателя снижения генерации мощности при переходе и размещении установки СЭ–10 внутри купольного строения.

$$K_{\Pi} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{36} P_{ik}}{\frac{36}{\sum_{i=1}^{36} P_{ib}}} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где K_{Π} – показатель снижения эффективности генерации мощности, о.е.; n – номер образца жидкого покрытия; P_{ik} – показатель мощности солнечной панели внутри купольного здания в определенный шаг измерения; i – номер шага измерения (i – от 1 до 36); P_{ib} – показатель мощности солнечной панели на открытом воздухе в определенный шаг измерения.

На рис. 6 представлен график-сравнение

генерации мощности установки СЭ–10 с учетом размещения на открытой поверхности и внутри купольного строения. Необходимо отметить, что на графике показатели мощности указаны в относительных единицах.

На вышеуказанном рис. наглядно видно, что при случае № 1 (открытая поверхность) показатель удельной мощности выше, чем показатель удельной мощности при случае № 2 (внутри купольного здания) на 25,61%, что является относительно «небольшим» снижением ввиду того, что при размещении солнечной панели внутри купольного строения устраняется вероятность запыления или образования тальников на поверхности панели.

В табл. 2 представлены показатели влияния внешних параметров на функционирование солнечной панели с учетом применения формулы (4) в целях обеспечения расчета влияния высокой температуры внутри купольного строения на работу солнечной панели:

$$K_T = K_{\Pi} - K_o, \quad (4)$$

где K_T – показатель влияния высокой температуры внутри купола на работу солнечной панели, о.е.; K_{Π} – показатель снижения генерации солнечной панели вследствие перевода с



открытой поверхности внутрь купольного здания, о.е.; K_0 – показатель снижения светового потока вследствие замера люксметром с учетом случая № 1 (на открытой поверхности) и случая № 2 (внутри купольного здания).

В ходе проведения экспериментов определено, что при переходе СЭ–10 внутрь купольного здания мощность генерации снижается на 25,61%, при этом показатели светового потока при аналогичном переходе снизились на 21,88%, что является фактической причиной снижения мощности установки СЭ–10. Вместе с тем зафиксировано резкое увеличение температуры воздуха при переходе с открытого пространства внутрь купольного здания с +31°С до +45°С. Данное увеличение температуры воздуха также является одной из причин снижения генерации солнечной электростанции СЭ–10, где коэффициент ее влияния составил 3,73%.

В ходе определения оптимального расстояния от прозрачной стены купольного здания до фотоэлектрической установки от 0 до 1,5 м с шагом 0,1 м получены средние значения мощности генерации СЭ–10 и показатели светового потока. На рис. 7 представлены графики зависимости удельной мощности генерации и светового потока в зависимости от расстояния до прозрачной стены купольного строения.

На вышеуказанных графиках видно, что зависимость удельной мощности генерации от расстояния прозрачной стены купольного здания имеет линейную зависимость, где при изменении расстояния от 0 до 1,5 м удельная мощность снижается на 23,007%, а зависимость светового потока имеет полиномиальную зависимость, где показатель светового потока при изменении расстояния от 0 до 1,5 м снижается на 5,224%.

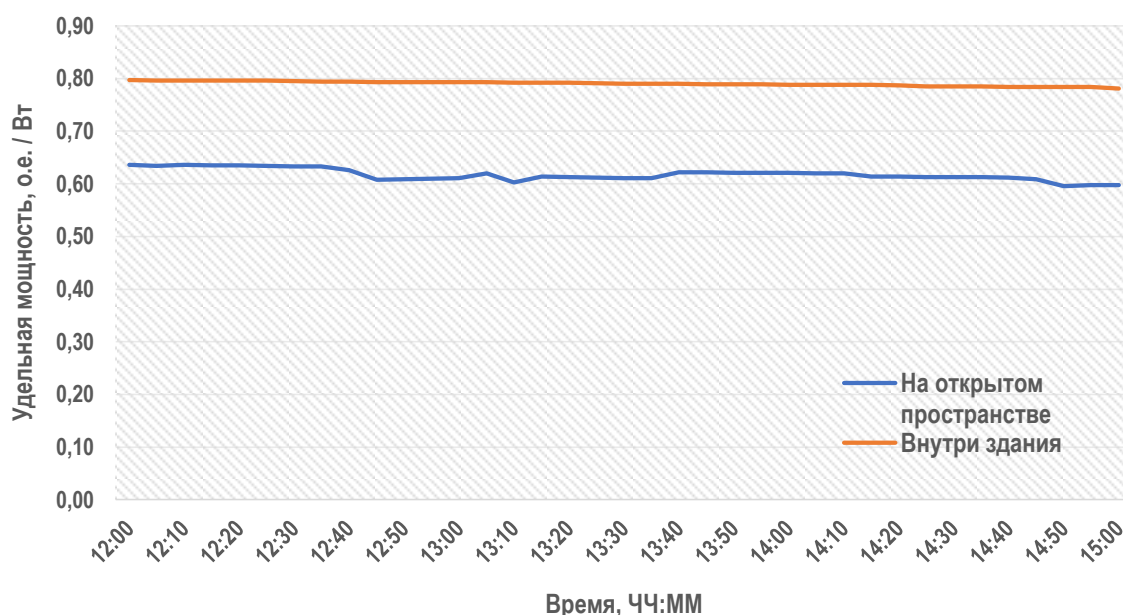


Рис. 6. График-сравнение генерации установки СЭ–10 с учетом случаев № 1 и 2
Fig. 6. Comparison graph of solar power plant SE-10 generation taking into account the cases no. 1 and no. 2

Таблица 2. Показатели влияния внешних параметров на функционирование солнечной панели
Table 2. Indicators of external parameters effect on solar panel operation

№	Название влияния	Количественный параметр, %
1	Снижение мощности по системе «открытая поверхность – купольное здание»	25,61
2	Снижение светового потока по системе «открытая поверхность – купольное здание»	21,88
3	Снижение мощности из-за высокой температуры	3,73

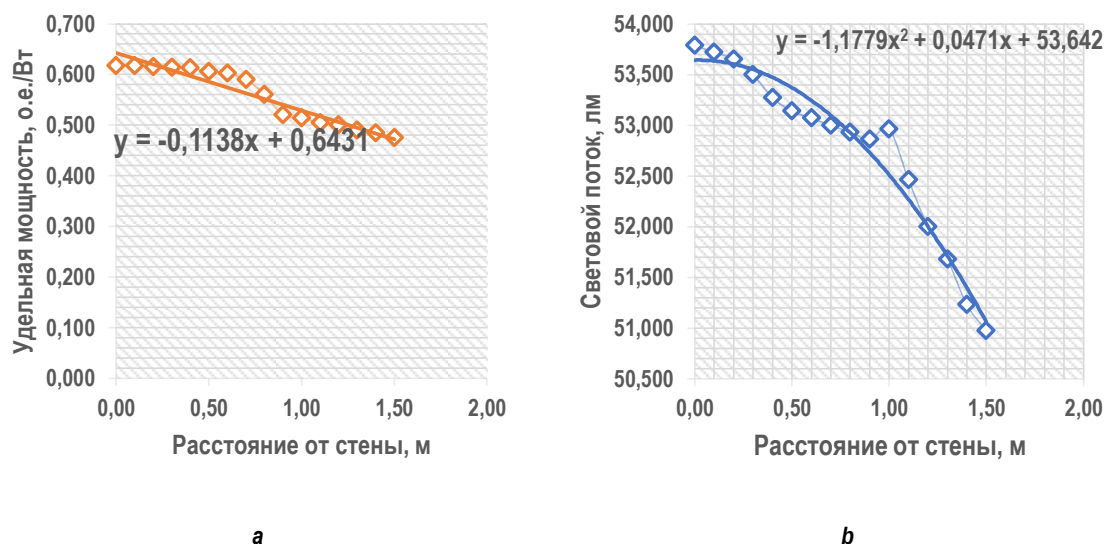


Рис. 7. Графики зависимости удельной мощности СЭ–10 (а) и светового потока (б) от расстояния от прозрачной стены купольного здания
 Fig. 7. Dependency graphs of solar power plant SE-10 specific power (a) and luminous flux (b) vs distance from the transparent wall of the dome building

Таким образом, оптимальным расстоянием размещения между фотоэлектрическими установками и прозрачной стеной купольного здания составляет 0 м, а именно – размещение солнечной панели вплотную со стеной, где, в соответствии с рис. 7 а, формируется наивысшая мощность генерации.

Представлены физико-математические закономерности расчета удельной мощности для поликристаллических фотоэлектрических установок и светового потока в зависимости от расстояния от стен внутри прозрачного купольного здания в виде формул (5) и (6).

$$P_y = -0,1138 \cdot L + 0,6431, \quad (5)$$

где P_y – удельная мощность генерации поликристаллической фотоэлектрической установки, о.е./Вт; L – расстояние фотоэлектрической установки от ближайшей стены прозрачного купольного здания, м.

$$F_c = -1,1779 \cdot L^2 + 0,0471 \cdot L + 53,642, \quad (6)$$

где F_c – световой поток внутри прозрачного купольного здания, лм; L – расстояние фотоэлектрической установки от ближайшей стены прозрачного купольного здания, м.

При проведении натурных исследований авторами анализируются следующие гипотезы:

1. Возможность эксплуатации элементов солнечной энергетики внутри прозрачных строений на территории Севера.

2. Прямая зависимость расстояния размещения между фотоэлектрической установкой и ближайшей прозрачной стеной прозрачного строения.

В рамках доказательства вышеуказанных гипотез авторами статьи представлены следующие контрольные точки:

1. Выполнен ряд экспериментов с приведением графических интерпретаций в виде сравнения показателей светового потока (см. рис. 5) при размещении солнечной панели на открытом воздухе (случай № 1) и внутри купольного здания (случай № 2), где определено, что снижение светового потока в случае перехода из случая № 1 в случай № 2 составляет 21,88%.

2. Получена графическая интерпретация сравнения удельной мощности генерации (см. рис. 6) солнечной панели в случаях № 1 и № 2, где определено, что снижение мощности генерации в случае перехода из случая № 1 в случай № 2 составляет 25,61%; дополнительно рассчитан показатель влияния высокой температуры, которая составила 3,73% (см. табл. 2).

3. Установлены физико-математические закономерности расчета удельной мощности



для поликристаллических фотоэлектрических установок и светового потока в зависимости от расстояния от стен внутри прозрачного купольного строения (см. формулы (5) и (6)).

4. Определено оптимальное расстояние размещения фотоэлектрических установок от ближайшей стены прозрачного строения, которая составила 0 м, и, следовательно, рекомендуется устанавливать солнечные панели вплотную со стеной.

5. В случае увеличения вышеуказанного расстояния от 0 до 1,5 м зафиксированы снижения показателя светового потока на 5,224% и удельной мощности генерации на 23,007%.

Таким образом, посредством проведения экспериментальных исследований авторами статьи доказаны гипотезы о возможности эксплуатации объектов солнечной энергетики внутри прозрачного строения и прямой зависимости расстояния размещения между фотоэлектрической установкой и ближайшей прозрачной стеной.

Кроме того, вычисленные показатели снижения мощности генерации солнечной панели и светового потока в случае размещения фотоэлектрических солнечных панелей внутри прозрачных строений в целях защиты от поверхностного загрязнения имеют возможность использования при эксплуатации объектов гелиоэнергетики в условиях Севера генерирующими предприятиями, частными лицами и организациями.

ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения экспериментальных исследований и после их обсуждения необходимо особо выделить дальнейшие направления последующих исследований:

Направление № 1. Изучение и исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных установок на трекерных установках внутри купольного строения с разделением на периоды наблюдений, а именно: лето, осень, зима и лето.

Направление № 2. Проведение экспериментальных исследований по изучению возможности дополнительного применения жидких покрытий в целях нанесения на поверхность фотоэлектрической солнечной уста-

новки с последующим размещением внутри купольного строения для значительного снижения вероятности поверхностного загрязнения установки.

Направление № 3. Исследование перспективы внедрения гибридной электростанции на основе параллельного функционирования фотоэлектрической солнечной установки внутри купольного строения и вертикальной ветровой энергетической установки на верхней части купольного строения.

Направление № 4. Исследование показателей снижения электроэнергетической эффективности фотоэлектрической солнечной установки внутри купольного строения с разделением на периоды наблюдений, а именно: лето, осень, зима и лето.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ определил, что исследования о возможности эксплуатации солнечных электроустановок внутри купольных строений в условиях Севера имеют актуальность и малую изученность.

2. В ходе проведения обзора литературы зафиксировано, что в случае значительного поверхностного загрязнения солнечной панели мощность генерации может снижаться до 40% и более, что делает актуальной разработку новых методов и способов снижения влияния поверхностного загрязнения.

3. В результате проведения ряда экспериментов авторами статьи получены показатели снижения мощности генерации фотоэлектрической установки в случае размещения внутри закрытого прозрачной пленкой строения – 25,61%, а светового потока – на 21,88% (см. табл. 2).

4. Авторами статьи определено, что в случае размещения фотоэлектрической установки при расстоянии 1,5 м от ближайшей прозрачной стены строения мощность генерации падает на 23,007%, а светового потока – на 5,224%.

5. Также вычислено, что оптимальное расстояние размещения фотоэлектрических установок от ближайшей стены прозрачного строения составило 0 м, и, следовательно, рекомендуется устанавливать солнечные панели вплотную со стеной.

6. В ходе обработки экспериментальных данных получены закономерности расчета удельной мощности для поликристаллических фотоэлектрических установок и светового потока в зависимости от расстояния от стен внутри прозрачного купольного здания (см. формулы (5) и (6)).

7. Необходимо проведение дальнейших исследований влияния поверхностных загрязнений панелей на их эффективность с определением доли тех или иных источников загрязнения, а также причин и условий возникновения.

Список литературы

1. Филиппов Д.В., Васильев П.Ф., Петрова А.Н., Григорьев Б.В. Эксперимент «Дом под куполом» // Климат 2021: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы: матер. VI Всерос. науч.-техн. конф. (г. Геленджик, 20–21 мая 2021 г.). Геленджик: Изд-во ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова, 2021. С. 17–25.
2. Васильев П.Ф., Местников Н.П. Исследование влияния резко-континентального климата Якутии на функционирование солнечных панелей // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 57–64. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-57-64>
3. Макаров В.Н., Торговкин Н.В. Загрязнение атмосферы города Якутска взвешенными веществами // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25. № 1. С. 43–50.
4. Торговкин Н.В., Макаров В.Н. Влияние современных климатических изменений на геохимические особенности мерзлотных почв г. Якутск // Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне: матер. Всерос. конф. с междунар. участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (г. Якутск, 28–30 сентября 2020 г.). Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2020. С. 182–184.
5. Mazumder M.K., Horenstein M.N., Stark J.W., Girouard P., Sumner R., Henderson B., et al. Characterization of electrodynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators // IEEE Transactions on Industry Applications. 2013. Vol. 49. Iss. 4. P. 1793–1800. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2258391>
6. Habib M.R., Tanvir M.S., Suhan A.Yo., Vadher A., Alam S., Shawmee T.T., et al. Automatic solar panel cleaning system based on Arduino for dust removal // International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS). 2021. <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9395937>
7. Панченко В.А., Дегтярев К.С., Сангджиев М.М. Влияние пыли и песка на возобновляемые источники энергии в Калмыкии // Инновации в сельском хозяйстве: VII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 13–14 декабря 2016 г.). М.: Изд-во ВИАЭСХ, 2016. С. 176–183.
8. Пермяков М.Б., Краснова Т.В., Иванченко Т.А. Использование солнечной энергии в комплексе энергоэффективных зданий-полигонов // Строительные материалы, конструкции и технологии XXI века: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. М.Б. Пермякова. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2019. С. 28–35.
9. Местников Н.П. Исследование влияния резкоконтинентального климата Севера на работу поликристаллической солнечной панели // Eurasia Science: сб. ст. XXXVII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 15 мая 2021 г.). М.: ООО «Актуальность. РФ», 2021. С. 72–74.
10. Местников Н.П., Васильев П.Ф., Альхадж Ф.Х. Разработка гибридных систем электроснабжения для энергоснабжения удаленных потребителей в условиях Севера и Арктики // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 47–56. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-47-56>
11. Местников Н.П., Нуруллин Э.Г. Исследование и моделирование процесса генерации ветровой и солнечной электростанции мощностью 650 Вт // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы 2019 (МНТК «ИМТОМ–2019»): матер. X Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. (г. Казань, 5–6 декабря 2019 г.). Казань, 2019. С. 436–439.
12. Hossain M., Rabbi F., Zaman S., Rahman F., Islam M.S. Study of dust effect on PV panel's efficiency during winter for Dhaka, Bangladesh // 2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI). 2020. <https://doi.org/10.1109/STI50764.2020.9350391>
13. Elangovan H., Ranjan U., Jagdish A.K., Ramamurthy P.C., Chattopadhyay K. Performance of monocrystalline silicon solar cell- influence of dust on ultra-violet and visible region during early stage of deposition // IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 2017. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366172>
14. Darwish Z.A., Sopian K., Kazem H.A., Alghoul M.A., Alawadhi H. Investigating the effect of titanium dioxide (TiO₂) pollution on the performance of the monocrystalline solar module // World Renewable Energy Congress-17: E3S Web Conference. 2017. Vol. 23. P. 01005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172301005>
15. Kavya V., Keshav R.M.R. Solar dust detection system // International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC). 2018. <https://doi.org/10.1109/PEEIC.2018.8665410>
16. Tiwari S., Rani P., Patel R.N. Examining the economic viability of a solar panel dust cleaning // IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). 2019. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2019.8869011>
17. Чарыев Я., Сарыев К., Ходжанепесов К.,



Пенджиев А. Техничко-экономическое обоснование использования солнечных фотоэлектрических модулей в Туркменистане // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 5. С. 214–218.

18. Басан Д., Коломиец Ю.Г., Сулейманов М.Ж. Исследование влияния запыления на эффективность работы солнечных модулей с учетом природных особенностей Монголии // Возобновляемая энергетика – XXI век: энергетическая и экономическая эффективность REENCON-XXI: матер. IV Междунар. конгр. (г. Москва, 5–6 июня

2018 г.). М.: Изд-во ОИВТ РАН, 2018. С. 21–25.

19. Зацаринная Ю.Н., Амиров Д.И., Земскова Л.В., Рахматуллин Р.Р. Исследование эффективности работы солнечной панели при воздействии на нее загрязнителей // Труды Академэнерго. 2019. № 1. С. 81–92. <https://doi.org/10.34129/2070-4755-2019-54-1-81-92>

20. Симакин В.В., Смирнов А.В., Тихонов А.В., Тюхов И.И. Современная система автономного электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии // Энергетик. 2013. № 3. С. 21–25.

References

1. Filippov DV, Vasil'ev PF, Petrova AN, Grigor'ev BV. An experiment 'A dome house.' In: *Klimat 2021: sovremennye podhody k ocenke vozdejstviya vneshnih faktorov na materialy i slozhnye tekhnicheskie sistemy: materialy VI Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Climate 2021: modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems: materials of VI All-Russian scientific and technical conference*. 20–21 May 2021, Gelendzhik. Gelendzhik: G.V. Akimov Gelendzhik Center for Climate Testing, All-Russian scientific research institute of aviation materials; 2021, p. 17–25. (In Russ.)

2. Vasilyev PF, Mestnikov NP. Research of the effect of the sharply continental climate of Yakutia on the functioning of solar panels. *Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal = The International Technical-Economic Journal*. 2021;1:57–64. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-57-64>

3. Makarov VN, Torgovkin NV. Yakutsk atmosphere pollution by suspended substances. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki = Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(1):43–50.

4. Torgovkin NV, Makarov VN. Climate change influence on geochemical features of cryosoles in Yakutsk. *Ustojchivost' prirodnyh i tekhnicheskikh sistem v kriolitozone: materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 60-letiyu obrazovaniya Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk = Stability of natural and engineering systems in the cryolithozone: materials of All-Russian conference with international participation dedicated to the 60th anniversary of the formation of the P.I. Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*. 28–30 September 2020, Yakutsk. Yakutsk: P.I. Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020, p. 182–184. (In Russ.)

5. Mazumder MK, Horenstein MN, Stark JW, Girouard P, Sumner R, Henderson B, et al. Characterization of electrodynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2013;49(4):1793–1800. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2258391>

6. Habib MR, Tanvir MS, Suhan AYO, Vadher A, Alam S, Shawmee TT, et al. Automatic solar panel cleaning system based on Arduino for dust removal. In: *International Conference on Artificial Intelligence and Smart*

Systems (ICAIS). 2021.

<https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9395937>

7. Panchenko VA, Degtyarev KS, Sangdzhiyev MM. Influence of dust and sand on renewable energy sources in Kalmykia. In: *Innovacii v sel'skom hozyajstve: VII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya = Innovation in agriculture: VII International scientific and technical conference*. 13–14 December 2016, Moscow. Moscow: All-Russian research institute of agriculture mechanisation, 2016; p. 176–183. (In Russ.)

8. Permyakov MB, Krasnova TV, Ivanchenko TA. Use of solar energy in a complex of energy-efficient testing buildings. In: Permyakov MB (eds.). *Stroitel'nye materialy, konstrukcii i tekhnologii XXI veka: mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov = Building materials, structures and technologies of the XXI century: interuniversity collection of scientific articles*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2019, p. 28–35. (In Russ.)

9. Mestnikov NP. Study of the influence of the sharp continental climate of the North on the operation of a polycrystalline solar panel. In: *Eurasia Science: sbornik statej XXXVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Eurasia Science: collected articles of XXXVII International scientific and practical conference*. 15 May 2021, Moscow. Moscow: ООО "Aktual'nost'. RF"; 2021, p. 72–74. (In Russ.)

10. Mestnikov NP, Vasilyev PF, Al'hadzh FH. Development of hybrid power supply systems for power supply of remote consumers in North and Arctic conditions. *Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal = The International Technical-Economic Journal*. 2021;1:47–56. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-47-56>

11. Mestnikov NP, Nurullin G. Research and modeling of 650W wind and solar power plant generation. In: *Innovacionnye mashinostroitel'nye tekhnologii, oborudovanie i materialy 2019 (MNTK «IMTOM-2019»): materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Innovative machine-building technologies, equipment and materials 2019 (ISTC 'IMTEM-2019'): materials of X International scientific and technical conference*. Part 2. 5–6 December 2019, Kazan'. Kazan'; 2019, p. 436–439. (In Russ.)

12. Hossain M, Rabbi F, Zaman S, Rahman F, Islam MS. Study of dust effect on PV panel's efficiency during winter for Dhaka, Bangladesh. In: *2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/STI50764.2020.9350391>

13. Elangovan H, Ranjan U, Jagdish AK, Ramamurthy PC, Chattopadhyay K. Performance of monocrystalline silicon solar cell- influence of dust on ultra-violet and visible region during early stage of deposition. In: *IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. 2017. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366172>
14. Darwish ZA, Sopian K, Kazem HA, Alghoul MA, Alawadhi H. Investigating the effect of titanium dioxide (TiO₂) pollution on the performance of the mono-crystalline solar module. In: *World Renewable Energy Congress-17: E3S Web Conference*. 2017;23:01005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172301005>
15. Kavva V, Keshav RMR. Solar dust detection system. In: *International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*. 2018. <https://doi.org/10.1109/PEEIC.2018.8665410>
16. Tiwari S, Rani P, Patel RN. Examining the economic viability of a solar panel dust cleaning. In: *IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2019.8869011>
17. Charyev Ya, Saryev K, Hodzhanepesov K, Pendzhiev A. Feasibility study of the use of solar photovoltaic modules in Turkmenistan. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2016;5:214–218. (In Russ.)
18. Basan D, Kolomic YuG, Sulejmanov MZh. Investigation of the effect of dust pollution on the operation efficiency of solar modules taking into account the natural features of Mongolia. *Vozobnovlyаемая энергетика–XXI век: energeticheskaya i ekonomicheskaya effektivnost' REENCON-XXI: materialy IV Mezhdunarodnogo kongressa = Renewable energy – XXI century: energy and economic efficiency REENCON-XXI: materials of IV International Congress*. 5–6 June 2018, Moscow. Moscow: Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences; 2018, p. 21–25. (In Russ.)
19. Zacarinnaya YuN, Amirov DI, Zemskova LV, Rahmatullin RR. Study of solar panel operation efficiency when exposed to pollutants. *Transactions of Academenergo*. 2019;1:81–92. <https://doi.org/10.34129/2070-4755-2019-54-1-81-92>
20. Simakin VV, Smirnov AV, Tihonov AV, Tyuhov II. Modern system of stand-alone power supply using renewable energy sources. *Energetik*. 2013;3:21–25. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Местников Николай Петрович,
аспирант,
ассистент кафедры электроснабжения,
Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова,
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58,
Республика Саха (Якутия);
ведущий инженер отдела электроэнергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
СО РАН,
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,
Республика Саха (Якутия);
✉ e-mail: sakhacase@bk.ru

Васильев Павел Филиппович,
кандидат технических наук,
заведующий кафедрой электроснабжения,
Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова,
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58,
Республика Саха (Якутия);
заведующий Отделом электроэнергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
СО РАН,
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,
Республика Саха (Якутия);
e-mail: kb-8@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay P. Mestnikov,
Postgraduate student,
Assistant Professor of the Department of Power Supply,
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
58 Belinsky St., Yakutsk 677000,
Republic of Sakha
(Yakutia);
Leading Engineer of the Department of Electric Power,
Institute of Physical-Technical Problems of the North of
the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
42 Kulakovsky St., Yakutsk 677007,
Republic of Sakha (Yakutia);
✉ e-mail: sakhacase@bk.ru

Pavel F. Vasilyev,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Department of Power Supply,
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
58 Belinsky St., Yakutsk 677000, Republic of Sakha
(Yakutia);
Head of the Electric Power Engineering Department,
Institute of Physical-Technical Problems of the North of
the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
42 Kulakovsky St., Yakutsk 677007,
Republic of Sakha (Yakutia);
e-mail: kb-8@mail.ru



Давыдов Геннадий Иванович,
научный сотрудник Отдела электроэнергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
СО РАН,
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, Республика Саха
(Якутия);
e-mail: dav_gen@mail.ru

Хоютанов Александр Михайлович,
научный сотрудник Отдела электроэнергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
СО РАН,
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, Республика Саха
(Якутия);
e-mail: shuriklater@mail.ru

Альзаккар Ахмад Мухаммед-Насер,
аспирант,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Яруллина, 6, Россия;
e-mail: ahmadalzakkar86@gmail.com

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.06.2021; одобрена после рецензирования 15.07.2021; принята к публикации 18.08.2021.

Gennadiy I. Davydov,
Researcher of the Department of Electric Power
Engineering,
Institute of Physical-Technical Problems of the North of
the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic of Sakha
(Yakutia);
e-mail: dav_gen@mail.ru

Aleksandr M. Khoyutanov,
Researcher of the Department of Electric Power
Engineering,
Institute of Physical-Technical Problems of the North of
the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic of Sakha
(Yakutia);
e-mail: shuriklater@mail.ru

Ahmad M.-N. Alzakkar,
Postgraduate student,
Kazan State Power Engineering University,
6 Yarullin St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: ahmadalzakkar86@gmail.com

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 06.06.2021; approved after reviewing 15.07.2021; accepted for publication 18.08.2021.