

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПАНЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

В. И. Карагусов

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Экологически чистые и возобновляемые источники энергии в настоящее время являются актуальными и востребованными. Одним из таких источников энергии является солнечное излучение, которое может передавать на один квадратный метр земной поверхности до 1,5 кВт тепловой энергии. Эту энергию можно преобразовать в электрическую при помощи солнечных батарей, которые имеют ряд недостатков. Основными из них являются низкий КПД и малый срок службы. Другой способ использования солнечной энергии — использование солнечных коллекторов, которые преобразуют излучение Солнца в тепловую энергию.

Ключевые слова: система жизнеобеспечения, радиационный нагреватель, солнечное излучение, тепловой поток, возобновляемые источники энергии, тепловая производительность, инсоляция.

Введение

Солнечные коллекторы представляют собой элементы радиационных систем жизнеобеспечения и предназначены для производства теплоты, которая может быть использована для отопления, горячего водоснабжения и пр. В радиационных системах жизнеобеспечения тепловой поток может иметь два направления: от окружающей среды к радиационной панели и от радиационной панели в окружающую среду. В первом случае происходит нагрев теплоносителя от солнечного излучения для обогрева помещений или подогрева воды. Во втором случае происходит охлаждение теплоносителя для кондиционирования воздуха и захлаживания камер для хранения, например, продуктов [1, 2].

Одно из достоинств радиационных систем жизнеобеспечения заключается в их независимости от невозобновляемых ресурсов: электроэнергии, органического и других видов топлива. В зависимости от региона, времени года и текущих погодных условий радиационные системы жизнеобеспечения могут работать либо самостоятельно, либо совместно с другими системами жизнеобеспечения. В первую очередь, это касается системы обогрева (отопления) помещений в регионах с холодной и длительной зимой, так как короткое светлое время суток и морозы определяют малую удельную тепловую производительность солнечных коллекторов, что приводит к необходимости увеличения их площади.

Радиационный обогрев заключается в нагреве солнечных коллекторов от Солнца в светлое время суток, передаче теплоты через теплоноситель в аккумулятор теплоты. Теплота из аккумулятора расходуется по мере необходимости для отопления и горячего водоснабжения [3, 4].

Радиационное кондиционирование воздуха реализуется следующим образом. В ночное время радиационный охладитель охлаждает теплоноситель за счет излучения теплоты от коллекторов в небо, которое имеет температуру ниже температуры воздуха у поверхности земли. Как дополне-

ние для охлаждения теплоносителя используется ночной воздух, температура которого в регионах с континентальным климатом значительно холоднее дневной. Теплоноситель захлаживает аккумулятор холода. В дневное время холод из аккумулятора кондиционирует воздух в помещениях или охлаждает продукты [5].

Еще одним преимуществом радиационных систем жизнеобеспечения является возможность использовать одни и те же коллекторы (их также называют радиационными панелями или пассивными радиаторами) как для нагрева, так и для охлаждения.

Наиболее привлекательно выглядят такие технологии для отдельно расположенных строений, коттеджей и других объектов, удаленных от тепловых и электрических коммуникаций.

Объект исследований

Эксплуатация радиационных систем жизнеобеспечения и их производительность в значительной степени зависят от ряда факторов, таких как регион, климатическая зона, время года, погодные условия, конструкция и размещение солнечных коллекторов на объекте [6]. Чаще всего панели размещают на крышах, следовательно, значительное влияние имеет ориентация крыши по сторонам света, а также конструкция крыши, число скатов и углы их наклонов.

В Сибири кондиционирование воздуха не требуется на протяжении большей части года. В холодную половину года возможно применение той же системы для производства теплоты, что и используемой в системе отопления. Если система будет работать в зимнее время, может оказаться экономически оправданным разделение системы на два контура. Первый контур проходит через радиаторы. В нем в качестве хладоносителя следует использовать незамерзающие жидкости. Во втором контуре, проходящем через теплообменники и аккумулятор холода, можно использовать воду [7, 8].

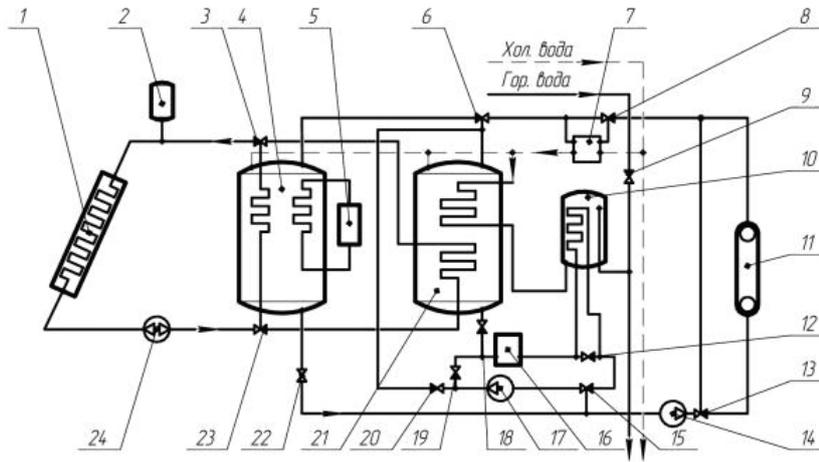


Рис. 1. Комбинированная система радиационной системы жизнеобеспечения:
 1 — радиатор; 2 — расширительный бачок; 3, 6, 8, 13, 15, 23 — гидораспределители;
 4 — аккумулятор холода; 5 — холодильная машина; 7 — система предварительного
 нагрева водопроводной воды; 9, 12, 18, 19, 20, 22 — вентили;
 10 — аккумулятор горячей воды; 11 — система кондиционирования воздуха;
 14, 17 — насосы непереворачиваемые; 16 — проточный водонагреватель;
 21 — аккумулятор теплой воды; 24 — насос реверсивный.
Fig. 1. Combined radiation life support system:
 1 — radiator; 2 — expansion tank; 3, 6, 8, 13, 15, 23 — hydraulic valves; 4 — cold
 accumulator; 5 — refrigerating machine; 7 — system for preliminary heating of tap water;
 9, 12, 18, 19, 20, 22 — valves; 10 — hot water accumulator; 11 — air conditioning system;
 14, 17 — non-reversible pumps; 16 — instantaneous water heater;
 21 — warm water accumulator; 24 — reversible pump

На рис. 1 показан вариант выполнения комбинированной радиационной системы жизнеобеспечения.

Такая система способна самостоятельно поддерживать требуемую температуру в осенне-весенний период времени. В зимний период времени система будет обеспечивать отопление, а также производить теплую воду для бытовых нужд [9].

Комбинированные радиационные системы жизнеобеспечения обладают рядом положительных качеств:

- при их использовании значительно сокращается потребление электроэнергии, необходимой для системы кондиционирования помещений;
- экологическая безопасность подобных систем (не используют вредных, опасных или озоноразрушающих веществ, не выделяют парниковые газы);
- по сравнению с испарительными охлаждающими установками (градирнями), преимуществом радиационных систем заключается в отсутствии расхода воды, используемой для создания охлаждения;
- низкие эксплуатационные затраты.

Недостатком таких комбинированных систем являются относительно большие капитальные затраты.

Для исследования характеристик радиационных систем жизнеобеспечения был разработан экспериментальный стенд [10]. В рамках данной работы этот стенд был модернизирован с целью улучшения характеристик. Экспериментальные исследования проводились на экспериментальном стенде, показанном на рис. 2, измерительная ячейка которого была смонтирована на южном скате пологой крыши одноэтажного строения с уклоном 15° относительно горизонта (рис. 3).

Трехлетняя эксплуатация экспериментального стенда показала, что ячейка с вакуумной теплоизоляцией требует регулярного обслуживания, заключающегося в откачивании воздуха из теплоизоли-

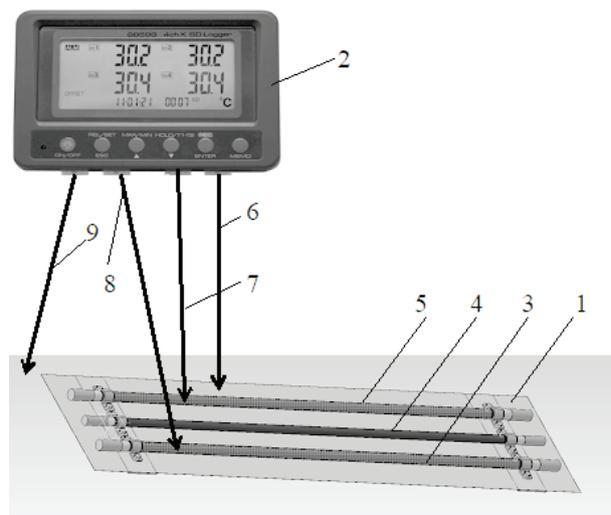


Рис. 2. Схема экспериментального стенда:
 1 — измерительный модуль;
 2 — четырехканальный логгер 88598; 3 — ячейка III — труба с вакуумной теплоизоляцией; 4 — ячейка I — труба без теплоизоляции; 5 — ячейка II — труба с воздушной теплоизоляцией; 6 — термопара $t_{\text{подложки}}$; 7 — термопара t_2 ; 8 — термопара t_3 ; 9 — термопара $t_{\text{ос}}$.
Fig. 2. Experimental stand layout:
 1 — measuring module;
 2 — four-channel logger 88598;
 3 — cell III — vacuum-insulated pipe; 4 — cell I — pipe without thermal insulation; 5 — cell II — air-insulated pipe; 6 — thermocouple $t_{\text{substrate}}$; 7 — thermocouple t_2 ; 8 — thermocouple t_3 ; 9 — thermocouple t_{os} .

рующего объема. Так как стенд функционировал практически непрерывно круглые сутки и круглый год с резервным электропитанием, то значительную часть времени он находился в необслуживаемом режиме, при котором давление в вакуумной теплоизоляции было переменным.



Рис. 3. Измерительный модуль с измерительными ячейками
Fig. 3. Measuring module with measuring cells

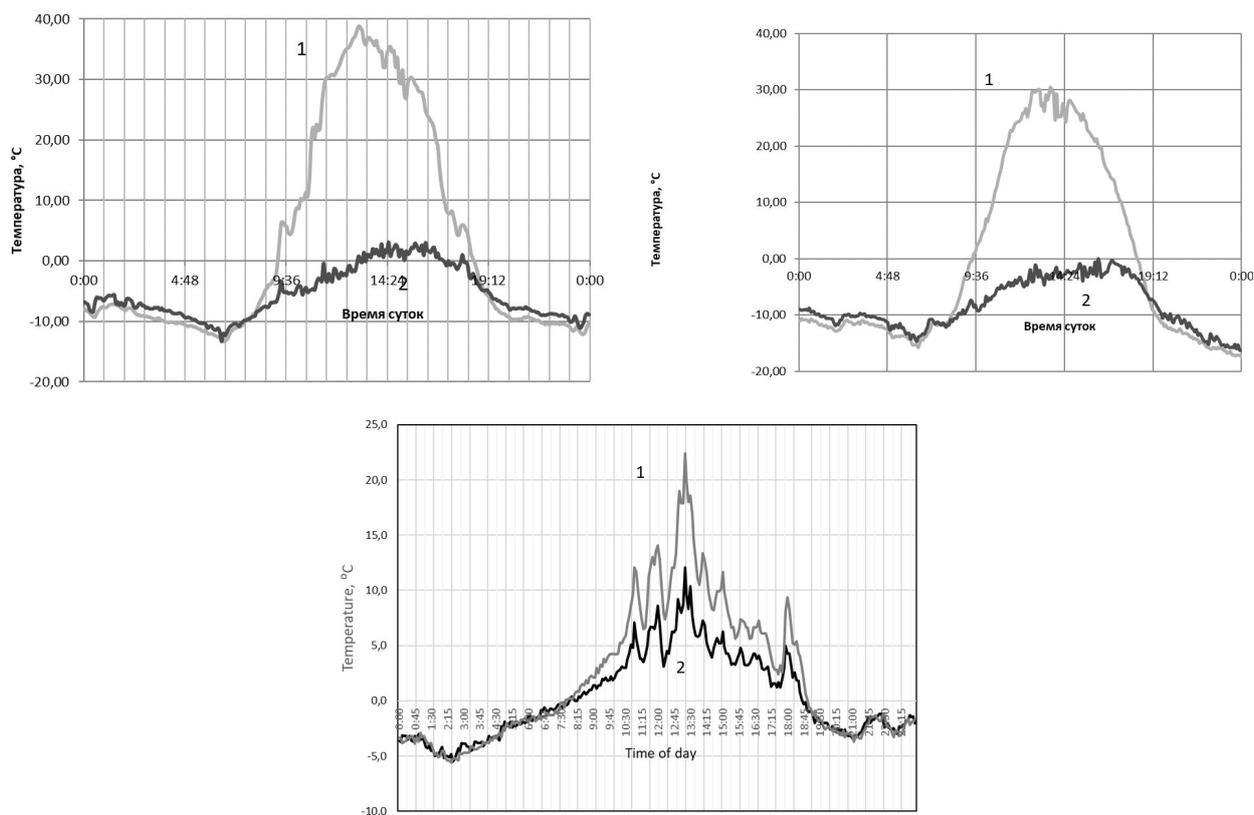


Рис. 4. Температуры измерительной ячейки 1 и окружающего воздуха 2 17 марта 2018, 2019, 2020 гг.
Fig. 4. Temperatures for measuring cell 1 and ambient air 2 March 17, 2018, 2019, 2020

Нестабильное давление в вакуумной теплоизоляции вносило дополнительную погрешность в результаты измерений. Результаты предыдущих экспериментов показали [10], что разница в тепловой производительности ячеек с вакуумной и воздушной теплоизоляцией не превышает 10...20 % на различных режимах. С другой стороны, первоначальные и эксплуатационные затраты отличаются на сотни процентов, поэтому сделан вывод об экономической и эксплуатационной целесообразности применения радиационных панелей с воздушной теплоизоляцией и увеличенной на 10...20 % площадь теплообменной поверхности.

Методы исследования

Модернизация стенда заключалась в следующем. Была удалена ячейка I (позиция 4 на рис. 2),

термопара с нее перенесена на подложку и закрыта от Солнца отражающим алюминиевым экраном с вентиляционными отверстиями, подложка из фольгированного пенополиэтилена, которая не выдержала климатических воздействий, заменена на алюминиевую фольгу.

Ячейки II и III были выполнены с воздушной изоляцией между черненой медной и прозрачной стеклянной трубами. Нижняя половина стеклянной трубы ячейки III покрыта зеркальной краской, а труба ячейки II — нет.

Таким образом, экспериментальные исследования проводились на ячейках с воздушной теплоизоляцией. Внутри стеклянной трубы размещалась черненная медная труба с площадью теплообменной поверхности 0,02 м². Ориентация измерительной ячейки — медной трубы — восток-запад, излучающая поверхность ориентирована юг-север.

Таблица 1. Оценочные расчеты площади радиационных панелей
Table 1. Estimated calculations of radiation panels area

| Параметр | Март 2019 | Апрель 2019 | Май 2019 |
|---|-----------|-------------|----------|
| Среднемесячная температура наружного воздуха, °С | -6 | +5 | +12 |
| Среднемесячная удельная тепловая производительность панелей, Вт·час/м ² | 0,8 | 2,0 | 5,0 |
| Необходимая месячная тепловая производительность, кВт·час | 2340 | 1350 | 720 |
| Требуемая площадь радиационных панелей для обеспечения месячной потребности, м ² | 97,5 | 22,5 | 4,8 |

Температуры измерялись и записывались четырехканальным логгером 88598 у ячеек с воздушной теплоизоляцией, у окружающего воздуха в затененном от Солнца месте вблизи измерительной ячейки и у светоотражающей подложки (экрана) с интервалом между измерениями 5 мин.

Место проведения экспериментальных исследований было выбрано в Западной Сибири на значительном удалении от городов с координатами 54°28'39.0"N 74°21'54.6"E [4].

В данной работе рассматриваются исследования радиационной системы жизнеобеспечения в весенние периоды 2018, 2019 и 2020 гг.

Результаты и обсуждение

Как указывалось выше, ряд факторов влияет на функционирование радиационной системы жизнеобеспечения. Конструктивные и установочные параметры зависят от местоположения на земной поверхности (координаты и высота над уровнем моря), от помех, создаваемых близко стоящими объектами, от объекта размещения системы жизнеобеспечения, конструкции его крыши, а также от оборудования, конструкции радиационных панелей и площади их теплообменной поверхности.

Если эти факторы возможно учесть на этапах проектирования и монтажа, то погодные (климатические) факторы на среднесрочной и долгосрочной перспективе учесть практически невозможно. Даже в краткосрочных прогнозах, которые соответствующие службы дают достаточно достоверно, невозможно учесть тень от каждого облака, которая падает на радиационную панель и изменяет величину теплового потока.

Погодные условия оказывают значительное влияние на работу радиационной системы жизнеобеспечения как в светлое, так и в темное время суток. В условиях резко континентального климата Западной Сибири погодные условия в один и тот же календарный день в разные годы могут заметно отличаться.

На рис. 4 приведены результаты экспериментальных измерений температуры ячейки с воздушной теплоизоляцией и окружающего воздуха вблизи ячейки для 17 марта 2018 г., 2019 г. и 2020 г. (измерения проведены на одном и том же модуле до модернизации стенда).

На основе обработки экспериментальных данных, полученных на описанном стенде и опубликованных в [10], были проведены оценочные расчеты площади радиационных панелей, необходимой для обогрева коттеджа с жилой площадью 100 м². Расчетный период был взят за март–май 2019 г. Для оценки размеров радиационных панелей в зимний период проводятся экспериментальные исследования радиационных панелей зимой 2020–2021 гг., которая по погоде ближе к многолетним данным

и зимние оценки будут проведены после ее окончания.

Исходные данные и результаты расчетов приведены в табл. 1.

Мощность, необходимая для отопления строения с высотой потолков не более 3,0 м при температуре на улице минус 20 °С, выбиралась в соответствии со Строительными нормами и правилами в размере 100 Вт/м².

Расчеты проводились для угла наклона крыши, близкого к оптимальному.

В каждом конкретном случае следует учитывать этот угол, а также ориентацию ската крыши по сторонам света. Отклонения в любую сторону приведут к увеличению требуемой площади радиационных панелей.

Среднемесячная удельная тепловая производительность панелей рассчитывалась по разности температур наружного воздуха и ячейки с воздушной теплоизоляцией, теплота от которой передавалась газообразным теплоносителем (воздухом). Поддерживаемая температура в помещениях была выбрана 22 °С. Интегрирование проводилось методом трапеций, так как при таком большом количестве измерений с малыми интервалами по времени точность интегрирования достаточно высока.

При расчете тепловой мощности учитывались только те значения, которые превышали температуру 22 °С.

Выводы и заключение

Сравнение показаний логгера на ячейках II и III показало, что нанесение зеркального покрытия на нижнюю сторону стеклянной трубы ячейки III уменьшает температуру медной трубы и, следовательно, тепловой поток. Кроме того, зеркальное покрытие не выдержало погодных воздействий и начало осыпаться, в результате чего температура ячейки III с течением времени стала приближаться к температуре ячейки II. Поэтому показания температуры ячейки III было решено не учитывать.

Экспериментально-расчетные исследования показали следующее:

- требуемая площадь радиационных панелей для марта (около 100 м²) несколько велика для строения отапливаемой площадью 100 м², тем более что реальная площадь радиационных панелей может быть увеличена из-за ориентации и наклона ската крыши;

- для апреля достаточно требуемая площадь (около 22 м²) радиационных панелей, которые могут быть размещены на крыше строения даже с учетом увеличения их площади из-за ориентации и наклона ската крыши;

- для мая достаточно требуемая площадь (около 5 м²) радиационных панелей, которые свободно могут быть размещены на южном скате крыши даже

с учетом увеличения их площади из-за ориентации и наклона ската крыши;

— результаты экспериментов и расчетов площади радиационных панелей показали, что в условиях Западной Сибири даже в весенний период проблематично реализовать отопление коттеджа или аналогичных строений только радиационными панелями, необходима дополнительная система, например, котел для работы в сильные морозы и пасмурные дни;

— в осенний, зимний и весенний период в условиях Западной Сибири кондиционирование воздуха в помещениях не требуется.

Список источников

1. Hashim W. M., Shomran A. T., Jurmut H. A. [et al.]. Case study on solar water heating for flat plate collector // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018. Vol. 12. P. 666–671. DOI: 10.1016/j.csite.2018.09.002.
2. Enderlin A. R. Radiative Cooling to the Night Sky. *Chemical Engineering Undergraduate Honors*. 2015. Vol. 5. 30 P.
3. Chen Z., Furbo S., Perers B. [et al.]. Efficiencies of Flat Plate Solar Collectors at Different Flow Rates // *Energy Procedia*. 2012. Vol. 30. P. 65–72. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.11.009.
4. Karagusov V. I., Kolpakov I. S. Influence of Clouds and Air Temperature on the Performance of the Radiation Heating System // *AIP Conf. Proc.* 2019. Vol. 2141, Issue 1. 030041. DOI: 10.1063/1.5122091.
5. Goforth M. A., Gilchrist G. W., Sirianni J. D. Cloud effects on thermal down welling sky radiance // *Proc. SPIE 4710, Thermosense XXIV*, March 15, 2002. Orlando, 2002. Vol. 4710. P. 203–213. DOI: 10.1117/12.459570.
6. Tsoy A. P., Granovskiy A. S., Baranenko A. V., Tsoy D. A. Effectiveness of a night radiative cooling system in different geographical latitudes // *AIP Conf. Proc.* 2017. Vol. 1876, Issue 1. 020060. DOI: 10.1063/1.4998880.

7. Qingyuan Z., Yu L. Potentials of Passive Cooling for Passive Design of Residential Buildings in China // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 57. P. 1726–1732. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.10.161.

8. Chen Z., Zhu L., Raman A., Fan S. Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day–night cycle // *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. 13 p. DOI: 10.1038/ncomms13729.

9. Bhowmika H., Amin R. Efficiency improvement to flat plate solar collector using reflector // *Energy Reports*. 2017. Vol. 3. P. 119–123. DOI: 10.1016/j.egypr.2017.08.002.

10. Карагусов В. И., Колпаков И. С., Немыкин В. А., Погуляев И. Н. Экспериментальное исследование радиационной системы жизнеобеспечения с вакуумной и воздушной теплоизоляцией // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2018. Т. 2. № 1. С. 26–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-1-26-32.

КАРАГУСОВ Владимир Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник (Россия), профессор кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

SPIN-код: 7624-3122

AuthorID (РИНЦ): 176942

ORCID: 0000-0002-7268-649X

Адрес для переписки: karvi@mail.ru

Для цитирования

Карагусов В. И. Экспериментально-расчетные исследования радиационных панелей системы жизнеобеспечения // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2021. Т. 5, № 1. С. 28–33. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-28-33.

Статья поступила в редакцию 15.02.2021 г.

© В. И. Карагусов

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL STUDIES OF RADIATION PANELS OF LIFE SUPPORT SYSTEM

V. I. Karagusov

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

Environmentally friendly and renewable energy sources are currently relevant and in demand. One of such energy sources is solar radiation, which can transmit up to 1,5 kW of thermal energy per square meter of the earth's surface. This energy can be converted into electrical energy using solar panels, which have several disadvantages. The main one are low efficiency and short service life. Another way to harness solar energy is by using solar collectors, which convert the sun radiation into thermal energy.

Keywords: life support system, radiation heater, solar radiation, heat flux, renewable energy sources, thermal performance, insolation.

References

1. Hashim W. M., Shomran A. T., Jurmut H. A. [et al.]. Case study on solar water heating for flat plate collector // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018. Vol. 12. P. 666–671. DOI: 10.1016/j.csite.2018.09.002. (In Engl.).
2. Enderlin A. R. Radiative Cooling to the Night Sky. *Chemical Engineering Undergraduate Honors*. 2015. Vol. 5. 30 p. (In Engl.).
3. Chen Z., Furbo S., Perers B. [et al.]. Efficiencies of Flat Plate Solar Collectors at Different Flow Rates // *Energy Procedia*. 2012. Vol. 30. P. 65–72. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.11.009. (In Engl.).
4. Karagusov V. I., Kolpakov I. S. Influence of Clouds and Air Temperature on the Performance of the Radiation Heating System // *AIP Conf. Proc.* 2019. Vol. 2141, Issue 1. 030041. DOI: 10.1063/1.5122091. (In Engl.).
5. Goforth M. A., Gilchrist G. W., Sirianni J. D. Cloud effects on thermal down welling sky radiance // *Proc. SPIE 4710, Thermosense XXIV*, March 15, 2002. Orlando, 2002. Vol. 4710. P. 203–213. DOI: 10.1117/12.459570. (In Engl.).
6. Tsoy A. P., Granovskiy A. S., Baranenko A. V., Tsoy D. A. Effectiveness of a night radiative cooling system in different geographical latitudes // *AIP Conf. Proc.* 2017. Vol. 1876, Issue 1. 020060. DOI: 10.1063/1.4998880. (In Engl.).
7. Qingyuan Z., Yu L. Potentials of Passive Cooling for Passive Design of Residential Buildings in China // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 57. P. 1726–1732. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.10.161. (In Engl.).
8. Chen Z., Zhu L., Raman A., Fan S. Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day–night cycle // *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. 13 P. DOI: 10.1038/ncomms13729. (In Engl.).
9. Bhowmika H., Amin R. Efficiency improvement to flat plate solar collector using reflector // *Energy Reports*. 2017. Vol. 3. P. 119–123. DOI: 10.1016/j.egy.2017.08.002. (In Engl.).
10. Karagusov V. I., Kolpakov I. S., Nemykin V. A., Pogulyaev I. N. Eksperimental'noye issledovaniye radiatsionnoy sistemy zhizneobespecheniya s vakuumnoy i vozdušnoy teploizolyatsiyey [Experimental investigation of radiation life support system with vacuum and air heat insulation] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2018. Vol. 2, no. 1. P. 26–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-1-26-32.

KARAGUSOV Vladimir Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department.
SPIN-code: 7624-3122
AuthorID (RSCI): 176942
ORCID: 0000-0002-7268-649X
Address for correspondence: karvi@mail.ru

For citations

Karagusov V. I. Experimental and computational studies of radiation panels of life support system // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 28–33. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-28-33.

Received February 15, 2021.
© V. I. Karagusov