

СРЕДНЕСУТОЧНАЯ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ РАДИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

В. И. Карагусов¹, И. Н. Погуляев²

¹Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²Научно-технический комплекс «Криогенная техника»,
Россия, 198303, г. Санкт-Петербург, пр. Стачек, д. 105, корп. 5, лит. А, пом. 9Н

Актуальность — одно из главных достоинств радиационного охлаждения, заключается в автономности, т.е. независимости систем радиационного охлаждения от электрической и тепловой энергии. При эксплуатации радиационных систем жизнеобеспечения не требуются значительные затраты ни при создании, ни при эксплуатации. Цель исследования — определение возможности использования радиационной системы охлаждения для кондиционирования воздуха в жилых или офисных помещениях. Задача исследования — определить холодопроизводительность радиационной системы кондиционирования воздуха. Проведенные экспериментальные исследования показали, что радиационная система кондиционирования имеет холодопроизводительность в летнее время от 4 до 7 кВт с радиационным охладителем площадью 100 м².

Ключевые слова: системы радиационного охлаждения, системы жизнеобеспечения, тепловой поток, теплоизоляция, возобновляемая энергия, кондиционирование.

Введение

В настоящее время возрастают требования к качеству условий жизни и работы человека, что, в свою очередь, повышает требования к системам жизнеобеспечения жилых, офисных и производственных помещений. Одной из обязательных функций систем жизнеобеспечения является кондиционирование воздуха. Другой функцией систем жизнеобеспечения следует назвать реализацию технологий кратковременного и длительного хранения охлажденных или замороженных продуктов для сохранения ими высоких потребительских качеств. В последние десятилетия на обеспечение этих функций затрачивается значительная доля энергоресурсов, вырабатываемая человечеством [1]. Эти функции в системах жизнеобеспечения могут быть реализованы различными способами.

Радиационное охлаждение относится к экологически чистым и восстанавливаемым источникам энергии [2]. Одно из главных достоинств радиационного охлаждения заключается в автономности, т.е. независимости систем радиационного охлаждения от электрической и тепловой энергии. Для их функционирования не требуются электроэнергия, органическое топливо и иные невозобновляемые ресурсы [3].

Другим достоинством таких систем является возможность их размещения практически в любой местности, причем чем более удалены объекты с радиационными системами жизнеобеспечения от крупных населенных пунктов, тем лучше из-за более прозрачной атмосферы. Наиболее целесообразно размещать радиационные системы жизнеобеспечения в гористой местности [4].

Объект исследования

Объектом исследований является экспериментальное определение среднесуточной холодопроизводительности радиационной системы жизнеобеспечения для кондиционирования воздуха и влияние на нее температуры окружающего воздуха.

Радиационное охлаждение в системах жизнеобеспечения может быть задействовано в целях кондиционирования воздуха и для хранения охлажденных продуктов [5]. Для этого может быть реализована следующая технология: в ночное время радиационный охладитель захлаживает аккумулятор холода за счет излучения теплоты в небо, которое имеет температуру ниже температуры воздуха у поверхности земли [6]. Кроме того, для подохлаждения может быть использована температура ночного воздуха [7], которая в регионах с континентальным климатом может быть значительно холоднее, чем дневная [8].

В дневное время холод из аккумулятора при помощи циркуляционного контура кондиционирует воздух в помещениях или охлаждает продукты. Значительное влияние на производительность радиационных систем жизнеобеспечения влияет способность атмосферы пропускать тепловое излучение [9], следовательно, размещать их целесообразно вдали от промышленных центров и в гористой местности.

Циркуляционные контуры с аккумуляторами теплоты и холода можно применять и в сочетании с тепловыми насосами для летнего охлаждения [10]. Тепловые насосы могут переносить теплоту из аккумулятора холода в аккумулятор теплоты, охлаждая первый и нагревая второй. Холод из аккумулятора холода используется для

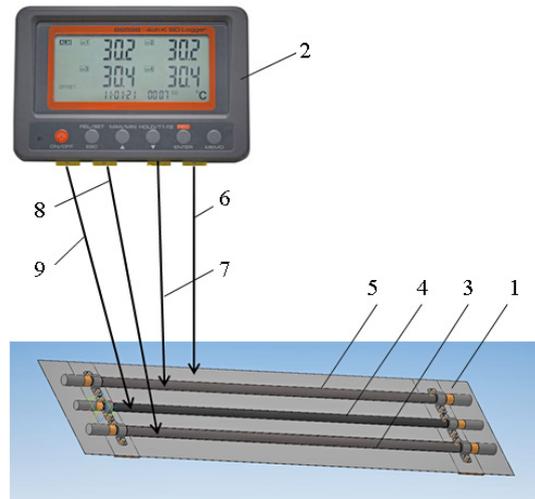


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 — измерительный модуль;
- 2 — четырехканальный логгер 88598;
- 3 — труба с вакуумной теплоизоляцией;
- 4 — труба без теплоизоляции;
- 5 — труба с воздушной теплоизоляцией;
- 6 — термопара t_{oc} ;
- 7 — термопара t_2 ; 8 — термопара t_3 ;
- 9 — термопара t_1

Fig. 1. The scheme of the experimental stand:

- 1 — measuring module;
- 2 — four-channel logger 88598;
- 3 — pipe with vacuum insulation;
- 4 — pipe without heat insulation;
- 5 — pipe with air insulation; 6 — thermocouple t_{oc} ;
- 7 — thermocouple t_2 ; 8 — thermocouple t_3 ;
- 9 — thermocouple t_1

кондиционирования помещений, а теплота из второго аккумулятора используется для отопления в ночное время, горячего водоснабжения либо отдается в окружающую среду путем теплообмена с окружающим воздухом или при помощи излучения в ночное небо [11].

Наиболее привлекательна эта технология для удаленных от крупных населенных пунктов отдельно расположенных малоэтажных строений, хозяйств, ферм, коттеджей и пр. Примеры принципиальных схем радиационных систем жизнеобеспечения приведены в [12].

Методы исследования

Для определения практической возможности реализации радиационного охлаждения был разработан и смонтирован экспериментальный стенд [13], показанный на рис. 1, на котором проведены экспериментальные исследования в условиях сибирской зимы, часть из которых опубликована в [14]. Дальнейшие эксперименты проводились в теплое время года.

Измерительный модуль 1 экспериментально-го стенда состоит из трех измерительных ячеек: 3 — медная черная труба с вакуумной теплоизоляцией (0,01...0,00001 МПа) между медной и стеклянными трубами, расположенными коаксиально; 4 — медная черная труба без теплоизоляции; 5 — медная черная труба с теплоизоляцией разреженным воздухом (0,06...0,09 МПа)

между медной и стеклянными трубами, расположенными коаксиально.

Степень черноты медных труб — 0,93...0,95 — определялась сравнительным методом. На всех трех медных трубах установлены хромель-алюмелевые термопары (тип К), четвертая такая же термопара укрыта многослойной экранно-ППЭ (пенополиэтилен) теплоизоляцией и измеряет температуру окружающего воздуха без влияния солнечного облучения и обдува ветром. Внутри медных труб находится разреженный воздух под давлением 0,06...0,09 МПа.

В качестве вторичного прибора измерения температур используется четырехканальный логгер 88598, обеспечивающий разрешающую способность измерения температуры не хуже 0,1 °С.

Логгер позволяет контролировать значение температуры в диапазоне от -60 °С до $+120$ °С, в данном диапазоне измерений погрешность составляет $\pm 0,02$ °С. Следует отметить, что главное достоинство 88598 логгера данных температуры заключается не столько в точности и диапазоне измерений, сколько в инструментах постобработки. Логгер 88598 по окончании измерений выдает массив данных измерения температуры с привязкой к реальной шкале времени.

Давление и влажность наружного воздуха измеряются локальной метеостанцией. Иней и снег с измерительного модуля убирался механически.

На рис. 2 показан внешний вид измерительной ячейки.

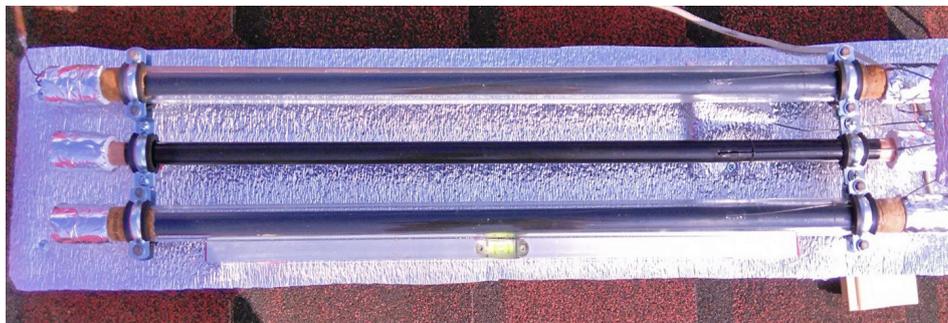


Рис. 2. Внешний вид измерительного модуля экспериментального стенда
Fig. 2. The appearance of the measuring module of the experimental stand

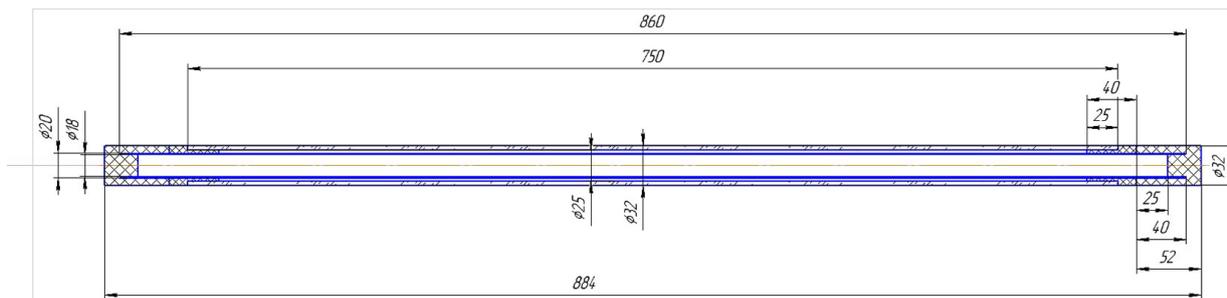


Рис. 3. Конструкция и размеры измерительной ячейки
Fig. 3. The design and dimensions of the measuring cell

На рис. 3 приведена конструкция и размеры измерительной ячейки.

Материалы измерительной ячейки: внутренняя труба — медь МЗ $\text{Ø}20 \times 1$; наружная труба — стекло $\text{Ø}32 \times 3,5$; герметизирующие пробки — кора пробкового дуба; покрывающие — ППС (пенополистирол) с защитой из майлара.

Измерения проводились в двух положениях измерительного модуля экспериментального стенда: горизонтальной и под углом $71,5$ градуса к горизонту, что соответствует направлению на Солнце в зените для данного времени и данного местоположения измерительного модуля. С целью уменьшения влияния загрязнений атмосферы экспериментальные исследования проводились на удалении от крупных городов более 100 км.

Результаты проведенных экспериментов показали принципиальную работоспособность экспериментального стенда и измерительной ячейки, интервал между измерениями — 1 мин.

Результаты и обсуждение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что зимнее использование радиационных систем охлаждения принципиально возможно, но не целесообразно, так как зимой в Сибири холода достаточно и без радиационных систем охлаждения.

Таким образом, представляет интерес проведение экспериментальных исследований в летний период с достаточно большой разностью между дневной и ночной температурами.

Экспериментальные исследования проводились на измерительной ячейке с вакуумной те-

плоизоляцией внутри стеклянной трубы. Изменялись температуры теплоизолированной трубы вакуумной ячейки и окружающего воздуха вблизи измерительной ячейки хромель-алюмелевыми термодарами.

Теплота в окружающее пространство излучалась черной медной трубой с площадью излучающей поверхности $0,02 \text{ м}^2$ и степенью черноты $0,93 \dots 0,95$. Измерительная ячейка экспериментального стенда размещена на покатоной южной крыше с уклоном 15 градусов отдельно стоящего здания, размещение самой ячейки горизонтальное, выставлялось по уровню. Ориентация измерительной ячейки — направление медной трубы — север-юг (излучающая поверхность ориентирована восток-зенит-запад, рис. 2) и восток-запад, соответственно, излучающая поверхность ориентирована юг-зенит-север.

Поверочные эксперименты показали, что в ночное время при горизонтальном размещении измерительной ячейки результаты измерений практически не зависят от ее ориентации по сторонам света. Различия проявляются только на рассвете и закате, в этих случаях предпочтительна ориентация восток-запад.

По результатам измерения температур и по известным геометрическим и теплофизическим характеристикам ячейки радиационного охладителя были произведены расчеты холодопроизводительности радиационной системы жизнеобеспечения. На рис. 4–6 приведены графики среднесуточных за темное время температур вакуумной ячейки радиационного охладителя и окружающего воздуха. На рис. 7–9 представлена удельная холодопроизводительность ради-

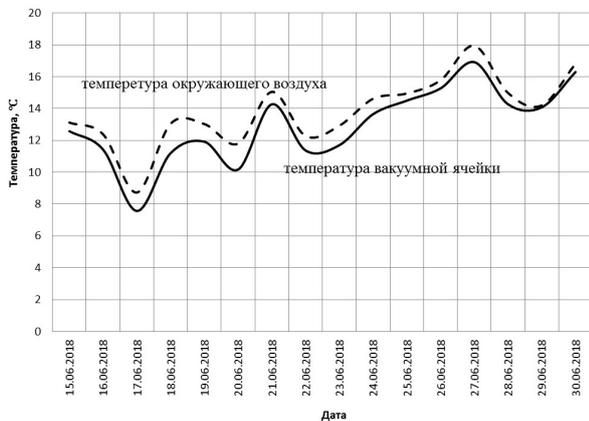


Рис. 4. Среднесуточные за темное время в июне 2018 года температуры вакуумной ячейки радиационного охладителя и окружающего воздуха
Fig. 4. The average daily temperatures of a vacuum cell of radiation cooler and ambient air for a dark time in June 2018



Рис. 5. Среднесуточные за темное время в июле 2018 года температуры вакуумной ячейки радиационного охладителя и окружающего воздуха
Fig. 5. The average daily temperatures of a vacuum cell of radiation cooler and ambient air for a dark time in July 2018

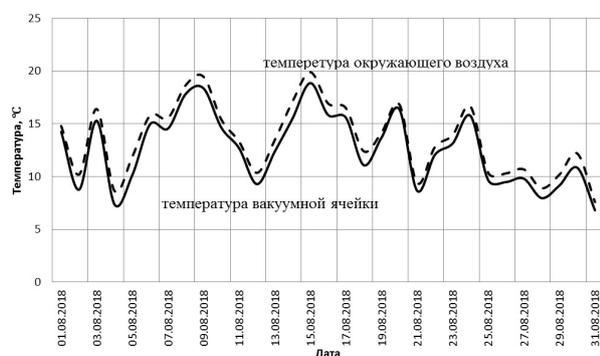


Рис. 6. Среднесуточные за темное время в августе 2018 года температуры вакуумной ячейки радиационного охладителя и окружающего воздуха
Fig. 6. The average daily temperatures of a vacuum cell of radiation cooler and ambient air for a dark time in August 2018

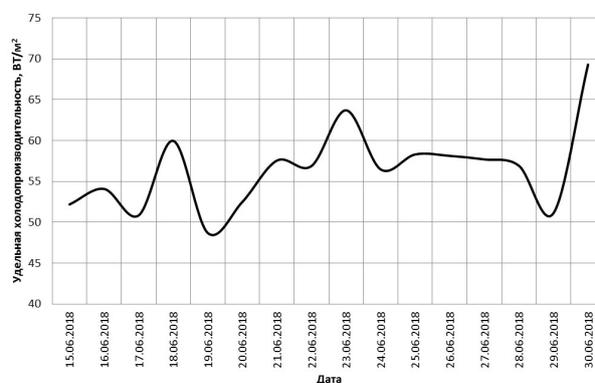


Рис. 7. Среднесуточная за темное время в июне 2018 года удельная холодопроизводительность радиационного кондиционера воздуха
Fig. 7. The average daily for a dark time in June 2018 is the average daily specific cooling performance of the radiation air conditioner

ационного кондиционера воздуха в летний период. Давление и влажность наружного воздуха измерялись локальной метеостанцией, а также извлекались из архивов погоды [8].

Удельная холодопроизводительность радиационного кондиционера воздуха в июне 2018 года имела разброс значений около 20%, в июле — 75%, в августе — до 100%. Изменение удельной холодопроизводительности радиационного кондиционера связано с погодными условиями, в первую очередь с облачностью и осадками. Наибольший разброс на рис. 7 и 9 связан с неустойчивой погодой в конце июля и в августе, в этот период ясные ночи чередовались с пасмурными и дождливыми.

Выводы и заключение

1. Радиационная система способна кондиционировать воздух в помещениях в широком диапазоне среднесуточных температур в темное время.

2. В ночное время при горизонтальном размещении измерительной ячейки результаты измерений практически не зависят от ее ориентации по сторонам света.

3. Предпочтительна ориентация труб восток-запад из-за влияния инсоляции на рассвете и закате.

4. Удельная холодопроизводительность радиационного кондиционера воздуха составляет от примерно 50 Вт/м² до примерно 60 Вт/м² для июня, от примерно 40 Вт/м² до примерно 70 Вт/м² для июля и от примерно 35 Вт/м² до примерно 65 Вт/м² для августа.

5. Радиационный охладитель площадью 100 м² имеет холодопроизводительность 4...7 кВт для целей кондиционирования воздуха, что вполне достаточно для жилых помещений небольшого коттеджа.

6. В более крупных строениях для увеличения холодопроизводительности радиационные охладители могут занимать два или четыре ската крыши в зависимости от ее типа.

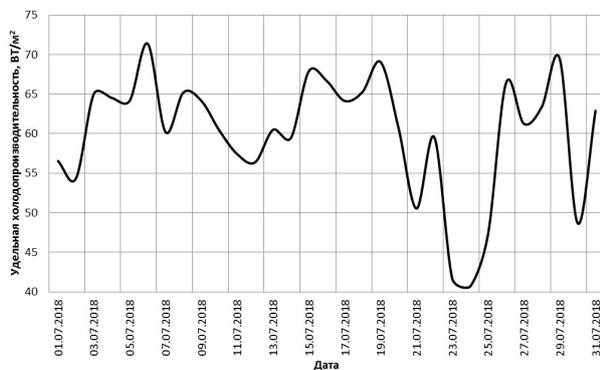


Рис. 8. Среднесуточная за темное время в июле 2018 года удельная холодопроизводительность радиационного кондиционера воздуха
Fig. 8. The average daily for a dark time in July 2018 is the average daily specific cooling performance of the radiation air conditioner

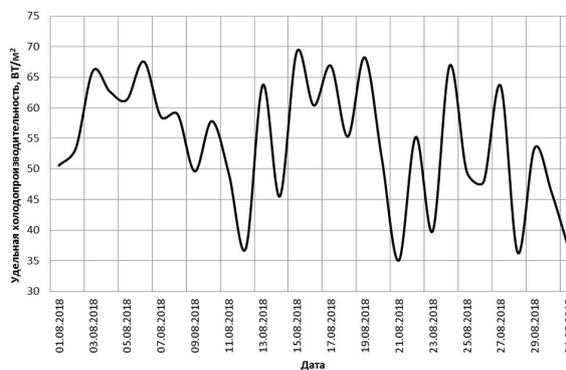


Рис. 9. Среднесуточная за темное время в августе 2018 года удельная холодопроизводительность радиационного кондиционера воздуха
Fig. 9. The average daily for a dark time in August 2018 is the average daily specific cooling performance of the radiation air conditioner

Список источников

1. Муравлева Е. А. Оценка использования энергии солнечного излучения на территории России // Вестник аграрной науки Дона. 2015. № 1 (29). С. 38–45.
2. Goforth M. A., Gilchrist G. W., Sirianni J. D. Cloud effects on thermal down welling sky radiance // Proc. SPIE 4710, Thermosense XXIV, Mar. 15, 2002. Orlando, 2002. P. 203–213. DOI: 10.1117/12.459570.
3. Авезов Р. Р., Барский-Зорин М. А., Васильева И. М. [и др.]. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения. М.: Стройиздат, 1990. 324 с. ISBN 5-274-00605-1.
4. Sima J., Sikula O., Kosutova K. [et al.]. Theoretical Evaluation of Night Sky Cooling in the Czech Republic // Energy Procedia. 2014. Vol. 48. P. 645–653. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.02.075.
5. Tsoy A. P., Granovskiy A. S., Baranenko A. V. [et al.]. Effectiveness of a night radiative cooling system in different geographical latitudes // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. DOI: 10.1063/1.4998880.
6. Enderlin A. R. Radiative cooling to the night sky // Chemical Engineering Undergraduate Honors. Task 4. University of Arkansas. Fayetteville, Arkansas. 2015. 30 p.
7. Chen Z., Zhu L., Raman A. [et al.]. Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day-night cycle // Nature Communications. 2016. Vol. 7. P. 1–5. DOI: 10.1038/ncomms13729.
8. Погода и климат. URL: www.pogodaiklimat.ru (дата обращения: 07.02.2019).
9. Лаповок Е. В., Ханков С. И. Влияние пропускания атмосферой теплового излучения земной поверхности на климат Земли // Вестник Международной академии холода. 2017. № 1. С. 62–65. DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-1-62-65.
10. Karagusov V. I., Serdyuk V. S., Kolpakov I. S. [et al.]. Experimental determination of rate and direction of heat flow of the radiation life-support system with vacuum heat insulation // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007, Issue 1. DOI: 10.1063/1.5051876.
11. 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.

12. 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.
13. Karagusov V. I., Goshlya R. Yu., Serdyuk V. S. [et al.]. Experimental stand for investigation of the radiation life-support systems: First experiments // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007, Issue 1. DOI: 10.1063/1.5051875.
14. Карагусов В. И., Колпаков И. С. Влияние облачности и температуры воздуха на производительность радиационной системы обогрева // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф., 26–28 февр. 2019 г. / ОмГТУ. Омск, 2019. С. 140–141.

КАРАГУСОВ Владимир Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник (Россия), профессор кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета, г. Омск.
 SPIN-код: 7624-3122
 AuthorID (РИНЦ): 176942
 ORCID: 0000-0002-7268-649X
 Адрес для переписки: karvi@mail.ru
ПОГУЛЯЕВ Иван Николаевич, инженер 2-й категории НТК «Криогенная техника», г. Санкт-Петербург.
 Адрес для переписки: aimtcoin@gmail.com

Для цитирования

Карагусов В. И., Погуляев И. Н. Среднесуточная холодопроизводительность радиационной системы кондиционирования // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 2. С. 37–43. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-37-43.

Статья поступила в редакцию 18.03.2019 г.
 © В. И. Карагусов, И. Н. Погуляев

AVERAGE DAILY COOLING CAPACITY OF RADIATION CONDITIONING SYSTEM

V. I. Karagusov¹, I. N. Pogulyaev²

¹Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

²Scientific and Technical Complex «Cryogenic technique»,
Russia, Saint Petersburg, Stacheck Ave., 105/5, letter A, office 9H, 198303

Relevance of the main advantages of radiation cooling is autonomy, i.e. independence of radiation cooling systems from electrical and thermal energy. The operation of radiation life support systems does not require significant costs, either during creation or during operation. The purpose of the study is to determine the possibility of using a radiation cooling system for air conditioning in residential or office premises. The task of the study is to determine the cooling capacity of the radiation air conditioning system. Experimental studies have shown that the radiation conditioning system has a cooling capacity in summer from 4 to 7 kW with a radiation cooler of 100 m².

Keywords: radiation cooling systems, life-support systems, heat flow, heat insulation, renewable energy, conditioning.

References

1. Muravleva E. A. Otsenka ispol'zovaniya energii solnechnogo izlucheniya na territorii Rossii [Estimation of the use of solar radiation energy in the territory of Russia] // *Vestnik agrarnoy nauki Dona. Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2015. Vol. 1, no. 29. P. 38–45. (In Russ.).
2. Goforth M. A., Gilchrist G. W., Sirianni J. D. Cloud effects on thermal down welling sky radiance // *Proc. SPIE 4710, Thermosense XXIV*, Mar. 15, 2002. Orlando, 2002. P. 203–213. DOI: 10.1117/12.459570. (In Engl.).
3. Avezov R. R., Barskiy-Zorin M. A., Vasil'yeva I. M. [et al.]. *Sistemy solnechnogo teplo- i khladosnabzheniya* [Solar heat and cold supply systems]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1990. 324 p. ISBN 5-274-00605-1. (In Russ.).
4. Sima J., Sikula O., Kosutova K. [et al.]. Theoretical Evaluation of Night Sky Cooling in the Czech Republic // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 48. P. 645–653. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.02.075. (In Engl.).
5. Tsoy A. P., Granovskiy A. S., Baranenko A. V. [et al.]. Effectiveness of a night radiative cooling system in different geographical latitudes // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1876, Issue 1. DOI: 10.1063/1.4998880. (In Engl.).
6. Enderlin A. R. Radiative cooling to the night sky // *Chemical Engineering Undergraduate Honors. Task 4*. University of Arkansas. Fayetteville, Arkansas. 2015. 30 p. (In Engl.).
7. Chen Z., Zhu L., Raman A. [et al.]. Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day-night cycle // *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. P. 1–5. DOI: 10.1038/ncomms13729. (In Engl.).
8. *Pogoda i klimat* [Weather and climate]. URL: [www.pogodaiklimat.ru](http://pogodaiklimat.ru) (accessed: 07.02.2019). (In Russ.).
9. Lapovok Ye. V., Khankov S. I. Vliyaniye propuskaniya atmosferoy teplovogo izlucheniya zemnoy poverkhnosti na klimat Zemli [Earth's climate and the transmission of earth's heat radiation through the atmosphere] // *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. Journal of International Academy of Refrigeration*. 2017. No. 1. P. 62–65. DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-1-62-65. (In Russ.).
10. Karagusov V. I., Serdyuk V. S., Kolpakov I. S. [et al.]. Experimental determination of rate and direction of heat flow of the radiation life-support system with vacuum heat insulation // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2007, Issue 1. DOI: 10.1063/1.5051876. (In Engl.).
11. 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.).
12. 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. Aviatsionno-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. (In Russ.).
13. Karagusov V. I., Goshlya R. Yu., Serdyuk V. S. [et al.]. Experimental stand for investigation of the radiation life-support systems: First experiments // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2007, Issue 1. DOI: 10.1063/1.5051875. (In Engl.).
14. Karagusov V. I., Kolpakov I. S. Vliyaniye oblachnosti i temperatury vozdukh na proizvoditel'nost' radiatsionnoy sistemy obogreva [Influence of clouds and air temperature on the performance of a radiation heating system] // *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva. Oil and gas engineering*. Omsk, 2019. P. 140–141. (In Russ.).

KARAGUSOV Vladimir Ivanovich, Doctor of Technical Science, Senior Researcher, Professor of Refrigeration and Compressor Engineering and Techno-

logy Department, Omsk State Technical University,
Omsk.

SPIN-code: 7624-3122; AuthorID (RSCI): 176942

ORCID: 0000-0002-7268-649X

Address for correspondence: karvi@mail.ru

POGULYAEV Ivan Nikolaevich, Engineer of Scientific and Technical Complex «Cryogenic technique»,
Saint Petersburg.

Address for correspondence: aimtcoin@gmail.com

For citations

Karagusov V. I., Pogulyaev I. N. Average daily cooling capacity of radiation conditioning system // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2019. Vol. 3, no. 2. P. 37–43 DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-37-43.

Received 18 March 2019.

© V. I. Karagusov, I. N. Pogulyaev