

УДК 621.565.83

Обзор проведенных экспериментальных исследований эффективного излучения холодильной системы в космическое пространство

Канд. техн. наук А. П. ЦОЙ¹, А. С. ГРАНОВСКИЙ²

¹teniz@bk.ru, ²granovskiy.a@rambler.ru

Алматинский технологический университет

Республика Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Толе би, 100

Д-р техн. наук Ю. И. МАЧУЕВ, А. С. ФИЛАТОВ

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В настоящее время, в связи с важностью внедрения энергоэффективных и экологически безопасных технологий, альтернативные источники энергии являются актуальными. Одним из важных возобновляемых источников энергии для холодильных систем является использование эффективного излучения в космическое пространство. Проведены экспериментальные исследования, направленные на определение возможностей применения эффективного излучения в холодильной технике. Представлены конструкции трех экспериментальных установок. Первая установка использовалась для определения температуры ночного неба. Вторая установка предназначена для определения влияния угла наклона излучающей поверхности на величину охлаждающего эффекта. Установлено, что температура наклонной поверхности отличается в среднем лишь на 1...1,5 К от температуры горизонтальной поверхности. При помощи третьей установки проводилось исследование холодопроизводительности радиатора. Радиатор, состоящий из стальных листов и полиэтиленового трубопровода, оказался малоэффективным и требует доработки. Для первой и второй установки представлены графики изменения температур воздуха и излучающих поверхностей. Для третьей установки дополнительно представлены результаты расчета теплового баланса системы. Описан эксперимент по исследованию влияния эффективного излучения на температуру льда на открытом ледовом катке «Медеу». Установлено, что температура льда в среднем на 10 К ниже температуры окружающего воздуха. Экспериментальные исследования показали, что системы хладоснабжения с использованием эффективного излучения позволяют аккумулировать холод в ночное время и применять его в дневное время в холодильных установках на плодоовощехранилищах, в системах кондиционирования, снимать пиковые нагрузки традиционные для перерабатывающих предприятий, открытых ледовых катков.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии, возобновляемые источники энергии, эффективное излучение, холодильная система.

Experimental research of refrigerating system effective radiation into space

Ph. D. A. P. TSOY¹, A. S. GRANOVSKIY²

¹teniz@bk.ru, ²granovskiy.a@rambler.ru

Almaty Technological University,

Republic of Kazakhstan, 050012, Almaty, Tole bi str., 100

D. Sc. Yu. I. MACHUEV, A. S. FILATOV

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

Alternative energy sources are of great importance due to introduction of energy efficient and green technologies. Effective radiation into space is one of the important renewable energy sources for a refrigerating system. Experimental research is carried out to investigate the possibility of effective energy application in refrigerating engineering. Three experimental units are described. The first one is used to determine night sky temperature. The second one is used to determine the influence of radiating surface slope angle on cooling effect value. The difference between the temperature of angled surface and the one of horizontal surface is shown to be from 1 to 1.5 K on the average. The third unit is used to analyze cooler refrigerating capacity. The cooler consisted from steel sheets and a plastic piping is shown to be ineffective and need updating. For the first and second units graphs of air and radiating surface temperature changes are given. For the third unit thermal balance calculations are given. The effective radiation effect on ice temperature is investigated at Medeu outdoor skating. The ice temperature is found to be, on the average, 10 K lower than the air temperature. Refrigerating systems with effective radiation are experimentally shown to enable cold accumulating during the night. Then, they can be used in refrigerating units in storage rooms for fruits and vegetables during day time; in air conditioning systems; and to take the swings at processing plants and outdoor skating.

Keywords: alternative energy sources, renewable energy sources, effective radiation, refrigerating system.

В настоящее время, в связи с важностью внедрения альтернативных и экологически безопасных технологий, исследование возобновляемых источников энергии является актуальной проблемой.

Эффективное излучение Земли может быть использовано как перспективный способ охлаждения, осуществляемый за счет возобновляемых источников энергии [1–3].

Эффективное излучение в небесную сферу приводит в ночное время к переохлаждению обращенных к ней поверхностей относительно температуры окружающего воздуха. Земная поверхность излучает электромагнитные волны инфракрасного диапазона днем и ночью, но днем тепловое действие собственного излучения поверхности незаметно, так как потеря теплоты за счет излучения полностью перекрывается количеством теплоты, получаемым при поглощении лучей солнца.

Ночью охлаждение земной поверхности, благодаря излучению, явно присутствует. Часть испускаемых электромагнитных волн поглощается и переизлучается в обратном направлении, а другая часть безвозвратно уходит в космическое пространство. Основными веществами, поглощающими инфракрасное излучение в атмосфере Земли, являются водяные пары и углекислый газ. Остальные газы, входящие в состав атмосферы, почти не поглощают и не излучают энергию. В результате, температура поверхностей обращенных к небосводу, в ночное время понижается. Интенсивность этого процесса зависит от метеорологических условий. В случае высокой прозрачности атмосферы, что характерно для высокогорных районов, и отсутствия облачности, охлаждение за счет эффективного излучения происходит более интенсивно [4].

Знание процессов теплообмена с небосводом в ночное время имеет практическое значение для создания альтернативных систем холодоснабжения. Для изучения эффективного излучения холодильной системы, авторами была разработана экспериментальная установка [5, 6]. Установка состоит из двух плоских стальных листов, окрашенных белой масляной краской, размером 1000×1000×2 мм, разделенных третьим, теплоизолирующим неметаллическим листом — экраном из стеклопластика, на котором они закреплены с помощью кронштейнов. Металлические листы отдалены от экрана на 0,02 м. Верхний лист стенда облучается и «видит» небосвод, с которым участвует в лучистом теплообмене. От земной поверхности он защищен экраном и в теплообмене с ней не находится. Нижний лист обращен к поверхности

земли и обменивается теплом только с ней. Конструкция закрыта сбоку съемным кожухом, который защищает ее от набегающего ветрового потока воздуха, что значительно уменьшает влияние конвективного теплообмена. Температура в различных точках стенда измеряется с помощью электронных термометров. Температура воздуха также измеряется с помощью электронных термометров. Опытные исследования были проведены в Казахстане в г. Алматы на высокогорном спортивном комплексе «Медеу» [5].

Перепад температур между верхним и нижним листом стенда составляет величину порядка 4...5 К. Данные эксперимента, показаны на рис. 1, 2.

С помощью экспериментальных данных, полученных на данной установке, можно определить эффективную температуру небосвода в ночное время. Она определяется из уравнения теплового баланса для верхнего металлического листа, $\Sigma q_{\text{верх}} = 0$, а тепловой поток от подстилающей земной поверхности $\Sigma q_{\text{ниж}} = 0$ для металлического листа. В уравнения теплового баланса входят составляющие конвективного $q_{\text{конв}}$ и лучистого $q_{\text{неб}}$ теплообмена. Степень черноты ночного небосвода принимается равной $\epsilon = 1$. Незвестным в уравнении оказывается лишь температура небосвода $T_{\text{эф}}$.

Характеристики конвективного теплообмена определяются по известным из теории теплопередачи критериальным зависимостям: при продольном обтекании плоской пластины воздухом $Nu = 0,032Re^{0,8}$ для внешней поверхности верхнего листа или при естественной конвекции в прослойке $Nu = 0,47Gr^{0,25}$ для внутренней поверхности верхнего листа и обеих поверхностей нижнего листа, при наличии защитного короба. Здесь Nu , Re , Gr — критерии Нуссельта, Рейнольдса, Грасгофа.

Ввиду высокой теплопроводности и тонкостенности металлического листа, допустимо измерять его температуру с тыльной стороны. Действительно, критерий Био (Bi), характеризующий теплоперенос в стенке и на границе воздух-стенка, чрезвычайно мал и перепадом температуры по толщине металлической стенки можно пренебречь, в сравнении с перепадом температур между воздухом и поверхностью листа, что подтвердилось в эксперименте.

$$Bi = \delta\alpha/\lambda,$$

где λ — коэффициент теплопроводности стали или алюминия, $\lambda = 40...100$ Вт/(Км); δ — толщина стенки,



Рис. 1. Температуры пластин и воздуха (Эксперимент 16-17 февраля 2011 г.)

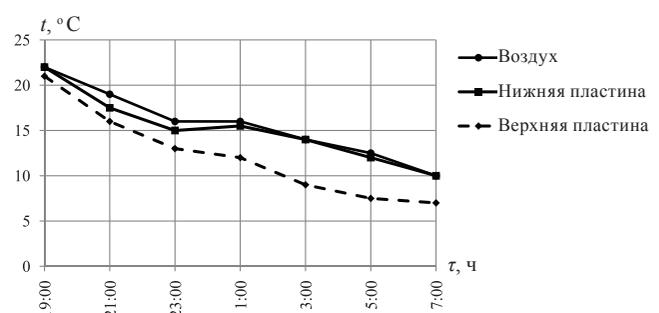


Рис. 2. Температуры пластин и воздуха (Эксперимент 4-5 мая 2011 г.)

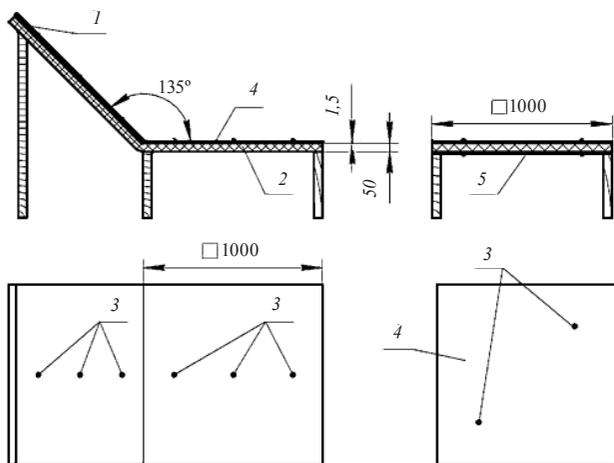


Рис. 3. Экспериментальная установка для определения эффекта охлаждения с изменяемым углом наклона излучающей пластины: 1 — верхняя наклонная пластина, 2 — теплоизоляция; 3 — датчик температуры; 4 — верхние горизонтальные пластины; 5 — нижняя горизонтальная пластина

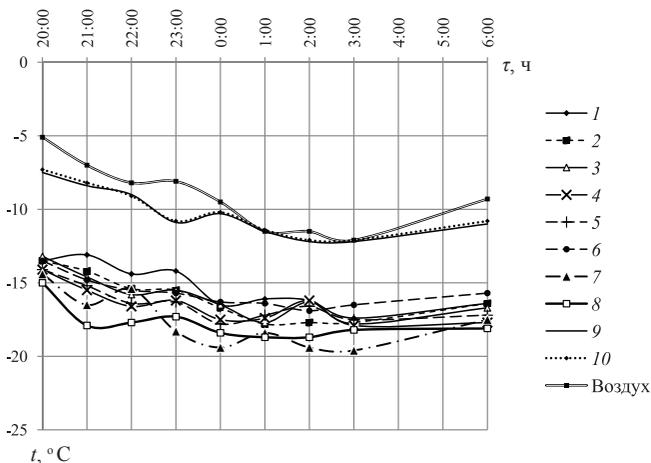


Рис. 4. График изменения температур горизонтальной и наклонной пластины: 1, 2, 3 — температура наклонной пластины; 4, 5, 6, 7, 8 — температура верхней горизонтальной пластины; 9, 10 — температура нижней горизонтальной пластины

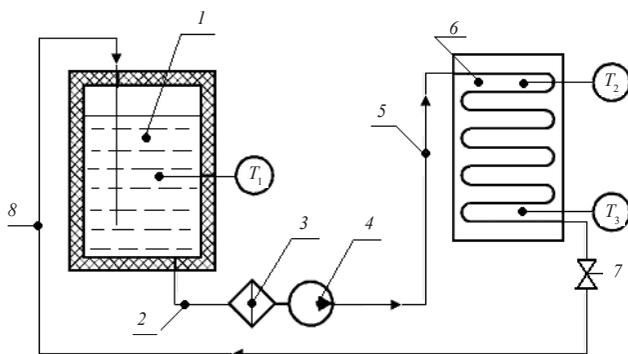


Рис. 5. Схема испытательного стенда: 1 — бак-аккумулятор; 2, 5, 8 — трубопроводы; 3 — фильтр; 4 — насос; 6 — радиатор; 7 — вентиль регулирования расхода

$\delta = (1...2) \cdot 10^{-3}$ м; α — коэффициент теплоотдачи к воздуху, $\alpha = 5...10$ Вт/(м²·К).

Для более глубокого изучения характеристик эффективного излучения были проведены экспериментальные исследования на установке с изменяемым углом наклона излучающей пластины (рис. 3).

Стенд состоит из двух стальных листов, размерами 1000×1000×1,50 мм расположенных горизонтально, разделённых между собой теплоизоляцией, а для определения влияния угла наклона на эффект охлаждения имеется дополнительный теплоизолированный лист, соединённый шарнирно, что позволяет изменять угол наклона. В результате эксперимента перепад температур между верхними и нижним листом составил 6...8 К, а переохлаждение верхнего листа относительно температуры атмосферного воздуха достигло 5...10 К.

Средняя разность между температурами наклонной и горизонтальной пластины составляет 1...1,5 К, что свидетельствует о незначительном влиянии угла наклона (45°...60°) на охлаждение пластины.

Результаты эксперимента, проведенного в районе города Алматы, показаны на рис. 4.

Для исследования реальных факторов, влияющих на холодильную систему, использующую эффективное излучение, была разработана следующая экспериментальная установка (рис. 5).

Основным элементом холодильной системы, использующей эффективное излучение, является радиатор. В нем происходит охлаждение хладоносителя и от его технических характеристик зависит работоспособность всей холодильной системы. В этом эксперименте испытывался радиатор, состоящий из двух соединенных стальных пластин, между которыми в виде змеевика с шагом 150 мм уложен полиэтиленовый трубопровод с внутренним диаметром 12 мм (рис. 6). Площадь радиатора 2 м². Излучающая пластина окрашена в черный цвет.

Величина охлаждения, создаваемая радиатором, зависит как от его конструктивных особенностей, так и от погодных условий, при которых проходят испытания. Методики расчета величины эффективного излучения разработаны множеством авторов. В частности, известно множество эмпирических формул для решения данной задачи [7, 8].

Известна попытка сравнения холодопроизводительности различных конструкции радиаторов [2]. Однако методика проведения испытаний в представленной работе описана не достаточно подробно. В ней не приводятся некоторые характеристики испытательного стенда. Например, не указывается, как осуществлена теплоизоляция бака-аккумулятора холода и трубопроводов системы. Эти параметры могут внести значительную погрешность в результаты испытаний.

Требуется разработка методики испытания радиаторов, которая в дальнейшем позволила бы оценить их холодопроизводительность в сравнении с другими конструкциями.

Испытательный стенд состоит из следующих основных элементов: бака-аккумулятора холода 1, системы трубопроводов 2, 5 и 8 для транспортирования хладоносителя, насоса 4, радиатора 6, регулятора расхода хладоносителя 7. Для задержания механических примесей перед насосом установлен фильтр 3.

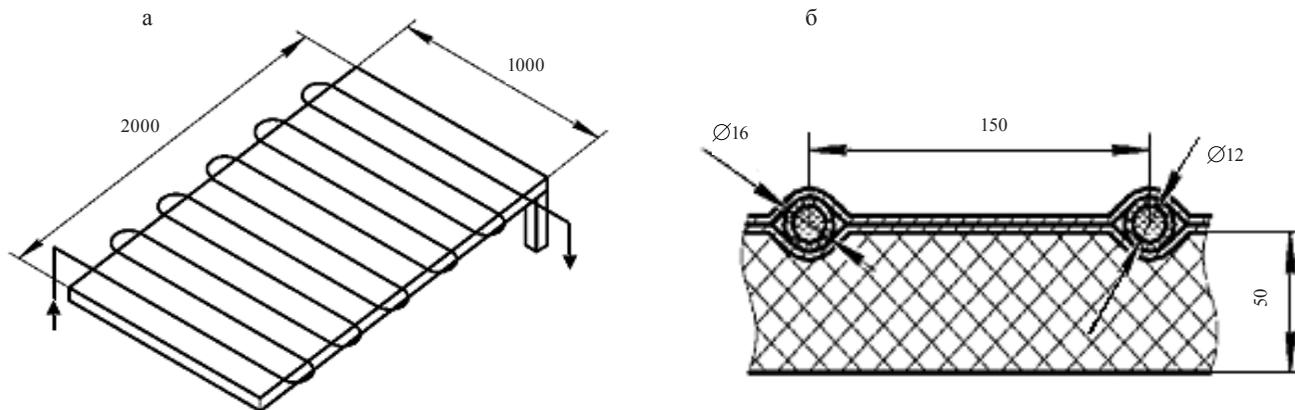


Рис. 6. Радиатор эффективного излучения: а – схема трубопровода; б – разрез радиатора

Хладоноситель из бака-аккумулятора насосом подается в радиатор.

Пройдя через радиатор, хладоноситель охлаждается и возвращается обратно в бак-аккумулятор. Регулятор расхода хладоносителя 7 может быть использован для изучения влияния скорости движения хладоносителя на холодопроизводительность.

В качестве бака-аккумулятора используется пластмассовый бак объемом 200 л, теплоизолированный слоем поролона толщиной 5 см. Соединительные трубопроводы изготовлены из полиэтиленовой трубы с внутренним диаметром 16 мм. Они теплоизолированы по всей длине слоем вспененного полиэтилена толщиной 5 мм. В системе используется циркуляционный насос мощностью 38 Вт.

Теплообмен с окружающей средой происходит не только в радиаторе и баке-аккумуляторе, но и в трубопроводах, соединяющих элементы системы.

Дополнительным источником теплоты может стать насос, используемый в системе. Для проведения лабораторных испытаний рекомендуется использовать насос с сухим ротором, конструкция которого позволяет значительно снизить поступления тепла от обмоток электродвигателя к хладоносителю.

Работа системы контролируется по показаниям электронных термометров. Производилось измерение температуры хладоносителя в баке аккумулятора T_1 , температура излучающей поверхности у входящего T_2 и исходящего трубопроводов радиатора T_3 .

Дополнительно проводились записи температуры воздуха, его относительной влажности, а также общей облачности и скорости ветра. По этим данным можно рассчитать теоретически возможную величину эффективного излучения, а также конвективные теплопритоки к элементам системы. Перед проведением эксперимента также определялся расход хладоносителя через систему.

По данным об изменении температуры хладоносителя в баке аккумулятора за ночь можно судить о конечном значении холодопроизводительности системы:

$$q_c = \frac{mc\Delta t_a}{\tau},$$

где m — масса хладоносителя в системе, кг; c — массовая теплоемкость хладоносителя, Дж/(кг·К); Δt_a — изменение температуры в аккумуляторе холода за рассматриваемый

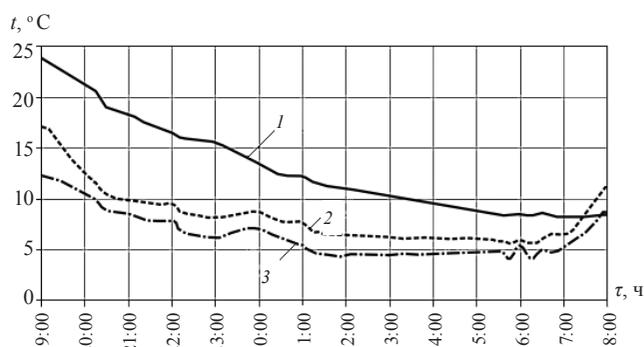


Рис. 7. График изменения температур: 1 — хладоносителя в аккумуляторе холода; 2 — воздуха; 3 — излучающей поверхности

интервал времени, °С; τ — продолжительность рассматриваемого интервала времени, с.

Тепловой баланс системы:

$$q_c = \pm q_6 \pm q_{тр} + q_n - q_p,$$

где q_6 — теплоприток в бак-аккумулятор холода, Вт; $q_{тр}$ — теплоприток в трубопроводы, Вт; q_n — теплоприток от насоса, Вт; q_p — холодопроизводительность радиатора, Вт.

Теплопритоки q_6 и $q_{тр}$ могут быть рассчитаны теоретически по хорошо изученным на данный момент закономерностям [10]. В зависимости от температуры хладоносителя они могут иметь как положительное, так и отрицательное значение. В данном случае знак «плюс» говорит о том, что тепло поступает к хладоносителю, а знак «минус», что тепло отводится от хладоносителя в окружающую среду.

Данные об изменении температур (см. рис. 7) в системе приняты согласно результатам эксперимента в ночь с 31 августа на 1 сентября 2013 г., проведенном вблизи от города Алматы (г. Иссык, высота 625 м над уровнем моря).

Представленный на рис. 8 график показывает изменение тепловых потоков в системе в течение ночи.

Сравнение холодопроизводительности радиатора с величиной теоретически-возможного потока эффективного излучения показывает, что испытанная конструкция радиатора обладает невысокими энергетическими показателями и может быть улучшена. Значительная

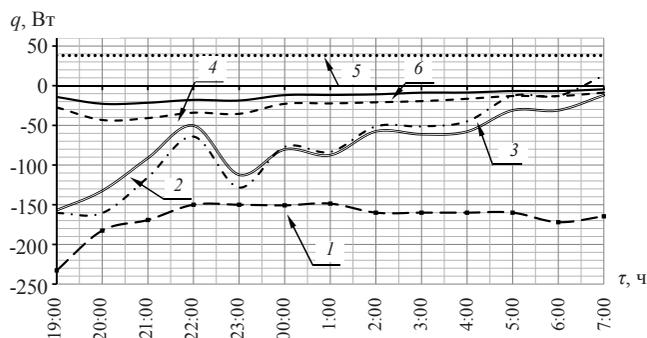


Рис. 8. Изменение теплопритоков в систему за ночь:

- 1 — теоретически возможный поток эффективного излучения, Вт/м²;
- 2 — холодопроизводительность радиатора;
- 3 — общая холодопроизводительность системы;
- 4 — теплоприток в трубопроводах;
- 5 — теплоприток от насоса;
- 6 — теплоприток в баке-аккумуляторе холода



Рис. 10. График изменения температур воздуха и бетона:

- 1 — температура воздуха;
- 2 — температура бетона

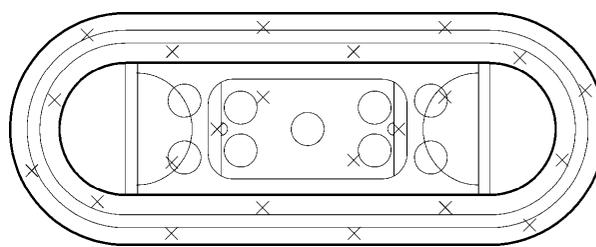
разница между температурой излучающей поверхности и температурой хладонносителя (в среднем 6,6 °С) вызвана высоким термическим сопротивлением конструкции. При достаточно низком термическом сопротивлении эти температуры должны быть примерно равны.

Полученные в ходе эксперимента данные могут быть в дальнейшем использованы при теоретических расчетах теплового баланса радиатора. Для сравнения эффективности радиаторов различных конструкций можно использовать методику, предложенную в работе [11].

Проведено, также экспериментальное исследование эффективного излучения поверхности льда высокогорного катка «Медеу» [12]. Схема расположения температурных датчиков на ледовом поле показана на рис. 9.

Экспериментальные данные показали, что максимальная разность между температурой воздуха и температурой бетона ледового поля составляет 12 К, средняя 10 К (рис. 10).

Таким образом, в результате действия эффективного излучения может происходить понижение температуры поверхности льда открытого катка ниже нормативной температуры. Используя данный эффект охлаждения



Установочная коробка датчика температуры на границе бетон-лед

Закладная для датчика температуры PE LM DN 25

LG-Ni 1000

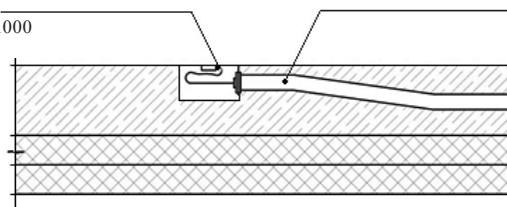


Рис. 9. Схема расположения температурных датчиков

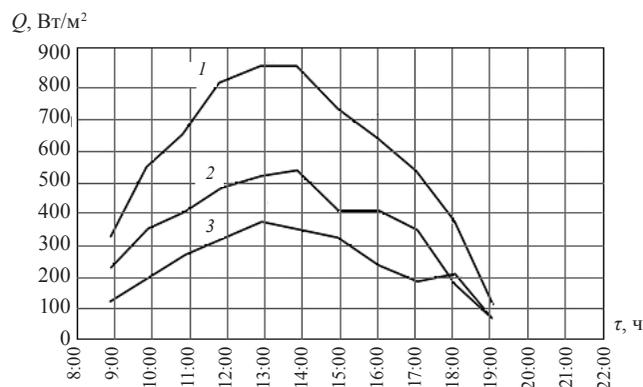


Рис. 11. Солнечная радиация, формирующая теплопритоки к поверхности льда:

- 1 — $q_{\text{пад}}$ (падающая);
- 2 — $q_{\text{л}}$ (поглощенная льдом);
- 3 — $q_{\text{отр}}$ (отраженная)

и аккумулируя холод, можно повысить энергоэффективность холодильной системы катка.

Опытные замеры метеорологических параметров в дневное время на высокогорном спортивном комплексе «Медеу» показали, что основным теплопритоком, повышающим тепловую нагрузку на ледовое поле, является солнечная радиация. Тепловой приток от падающей солнечной радиации изменяется примерно от $Q = 200$ до 900 Вт/м² (рис. 11) [13].

Солнечная падающая радиация с 12 до 14 ч дня вызывает пиковую тепловую нагрузку, которая требует увеличения холодопроизводительности системы.

Как было показано ранее, эффективное излучение позволяет аккумулировать холод в ночное время, которым можно снимать пиковую тепловую нагрузку, образованную в результате действия солнечной радиации.

На основе проведенных исследований можно предположить, что эффективное излучение может быть использовано не только в системах кондиционирования, как это предлагалось ранее, но и в холодильных системах плодоовощехранилищ и перерабатывающих предприятий, что должно быть изучено подробнее в последующих работах.

Список литературы

1. Samuel D. G. L., Nagendra S. M. S., Maiya M. P. Passive alternatives to mechanical air conditioning of building: A review // *Build. Environ.* Elsevier Ltd, 2013. Vol. 66. P. 54–64.
2. Цой А. П., Грановский А. С., Бараненко А. В., Эглит А. Я. Анализ холодильных систем, использующих тепловое излучения земной поверхности в космическое пространство // *Вестник АТУ.* 2013. № 1. С. 57–59.
3. Potentials of night sky radiation to save water and energy in the state of New Mexico: report / Governor Richardson's water innovation fund; Mark Chalom, Bristol Stickney, Kate Snider — New Mexico, 2006. 100 p. — PSC #05–341–1000–0035.
4. Кондратьев К. Я. Актинометрия. — Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1965. 693 с.
5. Цой А. П., Бараненко А. В., Эглит А. Я., Мачуев Ю. И. Исследование влияния охлаждающего эффекта небосвода на ледовое поле открытого катка // V Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». — СПб.: СПбГУНИИПТ, 2011.
6. Гиммельман В. Г., Мачуев Ю. И. Охлаждающий эффект в высокогорье // Актуальные проблемы механики, прочности и теплопроводности при низких температурах. Теория и методы замораживания грунтов: Материалы XII-ой научно-технической конференции под редакцией доктора технических наук, профессора В. В. Улитина. — СПб.: СПбГУНИИПТ, 2010.
7. Zhang S., Niu J. Cooling performance of nocturnal radiative cooling combined with microencapsulated phase change material (MPCM) slurry storage // *Energy Build.* Elsevier B. V., 2012. Vol. 54. P. 122–130.
8. Theoretical evaluation of the nightcool nocturnal radiation cooling concept: contract report / Solar Energy Center; Parker D. S. — Florida, April 2005. — 40 p. — FSEC–CR-1502–05. — FSEC Contract No. 20126003. — DOE Award No. DE-FC26-99GO10478.
9. Bing Chen. Measurement of night sky emissivity in determining radiant cooling / Bing Chen, John Kasher, John Maloney, David Clark, Wai Ning Mei. — Omaha: University of Nebraska, 1991.
10. Мухачев Г. А., Щукин В. К. Термодинамика и теплопередача: Учеб. для авиац. вузов. — 3-е изд., перераб. — М.: Высш. шк., 1991. — 480 с.
11. Kimball B. Cooling performance and efficiency of night sky radiators // *Sol. energy.* 1985. Vol. 34, № 1. P. 19–33.
12. Цой А. П., Бараненко А. В., Эглит А. Я. Использование эффективного излучения в холодильной системе открытого ледового катка // *Вестник Международной академии холода*, 2012. № 4. с. 8–11.
13. Цой А. П. Исследование режимных параметров холодильной установки катка «Медео» // *Пищевая технология и сервис.* АТУ, 1999. № 4. С. 31–35.

References

1. Samuel D. G. L., Nagendra S. M. S., Maiya M. P. Passive alternatives to mechanical air conditioning of building: A review. *Build. Environ.* Elsevier Ltd, 2013. Vol. 66. P. 54–64.
2. Tsoy A. P., Granovsky A. S., Baranenko A. V., Eglit A. Ya. The analysis of the refrigerating systems using thermal radiations of a terrestrial surface in a space. *Vestnik ATU.* 2013. No 1. p. 57–59.
3. Potentials of night sky radiation to save water and energy in the state of New Mexico: report / Governor Richardson's water innovation fund; Mark Chalom, Bristol Stickney, Kate Snider — New Mexico, 2006. 100 p. — PSC #05–341–1000–0035.
4. Kondrat'ev K. Ya. Actinometry. — Leningrad: Hydro-meteorological publishing house, 1965. 693 p.
5. Tsoi A. P., Baranenko A. V., Eglit A. Ya., Machuev Yu. I. Research of influence of the cooling effect of a firmament on an ice field of an outdoor ice rink / V International scientific and technical conference «Low-temperature and Food Technologies in the XXI Century». St. Petersburg 2011.
6. Gimmel'man V. G., Machuev Yu. I. The cooling effect in highlands//Actual problems of mechanics, durability and heat conductivity at low temperatures. Theory and methods of freezing of soil: Materials of the XII-th scientific and technical conference. St. Petersburg. 2010.
7. Zhang S., Niu J. Cooling performance of nocturnal radiative cooling combined with microencapsulated phase change material (MPCM) slurry storage. *Energy Build.* Elsevier B. V., 2012. Vol. 54. P. 122–130.
8. Theoretical evaluation of the nightcool nocturnal radiation cooling concept: contract report / Solar Energy Center; Parker D. S. — Florida, April 2005. — 40 p. — FSEC–CR-1502–05. — FSEC Contract No. 20126003. — DOE Award No. DE-FC26-99GO10478.
9. Bing Chen. Measurement of night sky emissivity in determining radiant cooling / Bing Chen, John Kasher, John Maloney, David Clark, Wai Ning Mei. — Omaha: University of Nebraska, 1991.
10. Mukhachev G. A., Shchukin V. K. Thermodynamics and heat transfer: The textbook for higher education institutions. Moscow, 1991. 480 p.
11. Kimball B. Cooling performance and efficiency of night sky radiators. *Sol. energy.* 1985. Vol. 34, № 1. P. 19–33.
12. Tsoy A. P., Baranenko A. V., Eglit A. Ya. Use of effective radiation in the refrigerating system of an open-air ice skating rink. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*, 2012. No 4. p. 8–11.
13. Tsoi A. P. Research of regime parameters of the refrigeration unit of a skating rink of «Medeo». *Food technology and service.* ATU, 1999. No 4. p. 31–35.

Статья поступила в редакцию 26.06.2014