

**Холодильные системы с использованием потенциала
ночного радиационного охлаждения**

А.П. Цой¹, А.В. Бараненко², А.С. Грановский¹, И.А. Ким^{3,4}

¹Алматинский технологический университет,

¹050012 г.Алматы, ул. Толе би 100, Республика Казахстан,

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики (ИТМО),

²191002, г.Санкт-Петербург, ул. Ломоносова 9, Россия,

³ ТОО «Тениз»,

³050008, г. Алматы, Манаса 22Б, офис 37, Республика Казахстан,

⁴Алматы Менеджмент Университет,

⁴050060, г.Алматы, ул.Розыбакиева 227, Республика Казахстан

Резюме. Цель. Ночное радиационное охлаждение (Radiative cooling) основывается на явлении эффективного излучения Земли, при котором происходит отвод тепла в атмосферу и его частичный унос в космическое пространство, что приводит к понижению температуры объектов, находящихся на поверхности Земли ниже температуры воздуха в приземном слое. **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа, натурного и вычислительного моделирования. **Результат.** На основе разработанной авторами и существующей методики проведен расчетно-теоретический анализ радиационного охлаждения для Европейско-Азиатского континента. Определена закономерность изменения потенциала радиационного охлаждения в зависимости от географической широты, начиная от экватора до северной точки континента. Разработаны схемные решения и конструкции холодильных систем различного функционального назначения для различных регионов при круглогодичном использовании радиационного охлаждения. Приведены теоретические и экспериментальные исследования установок с радиационным охлаждением. **Вывод.** На основе разработанной компьютерной модели проведен анализ энергоэффективности холодильных систем для хранения пищевых продуктов и кондиционирования воздуха, в которых охлаждение объекта осуществляется за счет радиационного охлаждения и парокомпрессионной холодильной машины с применением моделирования годового цикла работы в континентальных климатических условиях.

Ключевые слова: эффективное излучение, радиационное охлаждение, холодильные системы, альтернативные возобновляемые источники энергии

Для цитирования: А.П. Цой, А.В. Бараненко, А.С. Грановский, И.А. Ким. Холодильные системы с использованием потенциала ночного радиационного охлаждения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(2):31-43. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-31-43

Efrigeration Systems using the Potential of night radiative cooling

A.P. Tsoy¹, A.V. Baranenko², A.S. Granovsky¹, I.A. Kim^{3,4}

¹Almaty Technological University,

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

²ITMO University,

²9 Lomonosov St., St. Petersburg 191002, Russia,

³LLP "Teniz",

³Manasa 22B, office 37, Almaty 3050008, Republic of Kazakhstan,

⁴Almaty Management University,

⁴227 Rozybakieva St., Almaty 050060, Republic of Kazakhstan

Abstract. Objective. Night radiative cooling (Radiative cooling) is based on the phenomenon of Earth's effective radiation, in which heat is removed into the atmosphere and partially carried away into outer space, which leads to a decrease in the temperature of objects located on the Earth's surface below the air temperature in the surface layer. **Method.** The research is based on methods of thermodynamic analysis, full-scale and computational modeling of processes and objects of refrigeration and cryogenic technology. On the basis of the method developed by the authors and the existing method, a computational and theoretical analysis of radiative cooling for the Euro-Asian continent was carried out. As a result, the regularity of the change in the radiative cooling potential depending on the geographic latitude was determined, starting from the equator to the northernmost point of the continent. Schematic solutions and designs of refrigeration systems of various functional purposes for various regions with year-round use of radiative cooling have been developed. Theoretical and experimental studies of installations with radiative cooling are presented. for food storage and air conditioning was carried out. **Conclusion.** On the basis of the developed computer model, an analysis of the energy efficiency of refrigeration systems for food storage and air conditioning, in which the object is cooled by radiative cooling and a vapor compression refrigeration machine, was carried out using the simulation of the annual operation cycle in continental climatic conditions.

Keywords: effective radiation, radiative cooling, refrigeration systems, alternative renewable energy sources

For citation: A.P. Tsoy, A.V. Baranenko, A.S. Granovsky, I.A. Kim. Efrigeration Systems using the Potential of night radiative cooling. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(2):31-43. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-31-43

Введение. Холодоснабжение промышленных объектов и систем кондиционирования воздуха в настоящее время стремительно развивается, что ведет к значительному повышению энергопотребления. Важным современным направлением развития холодильной техники является сокращение применения озоноразрушающих и парниковых газов и их замена на экологически безопасные рабочие тела.

В связи с этим поиск путей повышения энергоэффективности, разработка холодильных систем, направленных на сокращение применения экологически опасных холодильных агентов, являются актуальными и относятся к основным трендам развития холодильной техники.

Приоритетным направлением повышения энергоэффективности холодильных систем является применение альтернативных источников энергии. Альтернативные возобновляемые источники энергии в мировом рейтинге развития современной техники и технологии стоят на одном и ведущих мест, но они имеют свои ограничения по применению.

Например, солнечное излучение является одним из знаковых и известных видов возобновляемого источника энергии, однако его можно использовать только в дневное время. Подобным, но малоизученным возобновляемым источником энергии является холодное космическое пространство, которое можно использовать в ночное время.

Постановка задачи. Разработка методики расчета и способов повышения энергоэффективности холодильных систем с применением радиационного охлаждения в зависимости от региона.

Методы исследования. Коэффициент эффективного излучения Земной поверхности. Известно, что тепловое излучение, поднимающееся с Земли, уходит в атмосферу и называется Эффективным излучением Земли. В результате этого излучения происходит охлаждение поверхности Земли ниже атмосферного приземного слоя воздуха. Это физическое явление нашло применение в технике как радиационное охлаждение.

Из теории теплообмена излучением известно, что полный поток E_0 , направленный на тело, равен энергии поглощения E_A , пропускания через тело E_D и отражения E_R [1]:

$$E_0 = E_A + E_D + E_R. \quad (1)$$

Полный поток излучения E_0 равен энергии теплового излучения Земли:

$$E_0 = E_3. \quad (2)$$

По определению: эффективное излучение Земли – это разница между восходящим и нисходящим потоком [2]. Принимая во внимание коэффициенты поглощения A и пропускания D и отражения R можно принять, что эффективное излучение равно сумме потоков поглощения атмосферой и пропускания – уход в космическое пространство:

$$E_{эф} = E_A + E_D. \quad (3)$$

Введем новое понятие – коэффициент эффективного излучения Земной поверхности Z , для которого справедливо соотношение:

$$Z = A + D, \quad (4)$$

т.е. коэффициент эффективного излучения Земной поверхности Z равен сумме коэффициентов поглощения A и пропускания D .

Методика расчета потока эффективного излучения. На данный момент существует множество методик для расчета потока эффективного излучения. Разработанная авторами методика расчета величины потока эффективного излучения в зависимости от климатических условий Евразии, основывается на анализе известных методик, обобщает все наиболее достоверные элементы остальных методик [2-7] и является наиболее универсальной.

$$q_{эф} = \delta_{ин} [\sigma \cdot (273,15 + t_b)^4 \cdot k_{вп} \cdot k_{об} + k_{ст}], \quad (5)$$

$\delta_{ин}$ – относительная излучательная способность поверхности радиатора;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴);

$T_{ин}$, T_b , $T_{ро}$ – соответственно температуры излучающей поверхности радиатора, воздуха и точки росы воздуха, К;

$k_{ст}$ – поправка на разницу между температурой излучающей поверхности и температурой воздуха, Вт/м²,

$$k_{ст} = \sigma [T_{ин}^4 - T_b^4]; \quad (6)$$

$k_{вп}$ – коэффициент, учитывающий влияние содержания водяного пара в воздухе приземного слоя атмосферы,

$$k_{вп} = (0,264 - 0,0052 (T_{ро} - 273,15)) / ^\circ\text{C}; \quad (7)$$

$k_{об}$ – коэффициент, учитывающий влияние общей облачности;

$$k_{об} = 1 - cR_1^2, \quad (8)$$

R_1 – общая степень облачности в долях единицы, $0 \leq R \leq 1$.

Для представленной методики составлена программа для расчетов (методика 1). Расчетами определена плотность теплового потока эффективного излучения для разных городов Европейской части России, Сибири, Дальнего востока, Казахстана [8-9].

Анализ расчетных показателей показал, что при удалении от экватора к северным широтам происходит повышение теплового потока эффективного излучения.

Для определения теплового потока эффективного излучения применялась также методика расчета по условной температуре ночного неба, обычно используемая зарубежными учеными (методика 2) [10]. Расчеты количества холода по обеим методикам дают сопоставимые результаты [8-9]. Количество теплоты, передаваемое за счет конвекции с поверхности площадью 1 м², определяется по формуле с эмпирическим коэффициентом для систем с радиационным охлаждением [11-13]:

$$q_{конв} = \alpha \cdot (T_{ин} - T_b) \quad (9)$$

$$\alpha = 1,78 (T_{ин} - T_b)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$q_{рад} = q_{эф} \pm q_{конв} \quad (11)$$

$$q_{эф} = \delta_{ин} \sigma (T_{ин}^4 - T_n^4) \quad (12)$$

$$T_n = T_b \cdot (\delta_n + CF_{al})^{0,25} \cdot CF_{cl}^{0,25} \quad (13)$$

$$\delta_n = 0,787 + 0,764 \ln \left(\frac{T_{po}}{273} \right) \quad (14)$$

$$CF_{al} = 0,12(p_{at} - 1); \quad (15)$$

$$CF_{cl} = 1 + 0,0224R_2 - 0,0035R_2^2 + 0,00028R_2^3 \quad (16)$$

Где: $q_{эф}$ – тепловой поток эффективным излучением;

$\delta_{ип}$ – относительная излучательная способность поверхности радиатора;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴);

$T_{ип}$, T_n , T_v , T_{po} – соответственно температуры излучающей поверхности радиатора, ночного неба, воздуха и точки росы воздуха, К;

δ_n – относительная излучательная способность безоблачного ночного неба;

CF_{al} – коэффициент, учитывающий высоту расположения излучающей поверхности над уровнем моря;

$p_{ат}$ – атмосферное давление, бар;

CF_{cl} – коэффициент, учитывающий влияние облачности;

R_2 – степень облачности ночного неба, баллов. Для безоблачного неба $R=0$, а для полностью закрытого облаками неба $R=10$;

$q_{конв}$ – конвективный теплоприток;

α – коэффициент теплоотдачи

В других работах оценено влияние климатических условий умеренного и континентального климата в различных городах России и Казахстана на процесс радиационного охлаждения [14-16]. Расчет потока эффективного излучения для различных регионов Евразии проведен авторами в работах [8-9, 17].

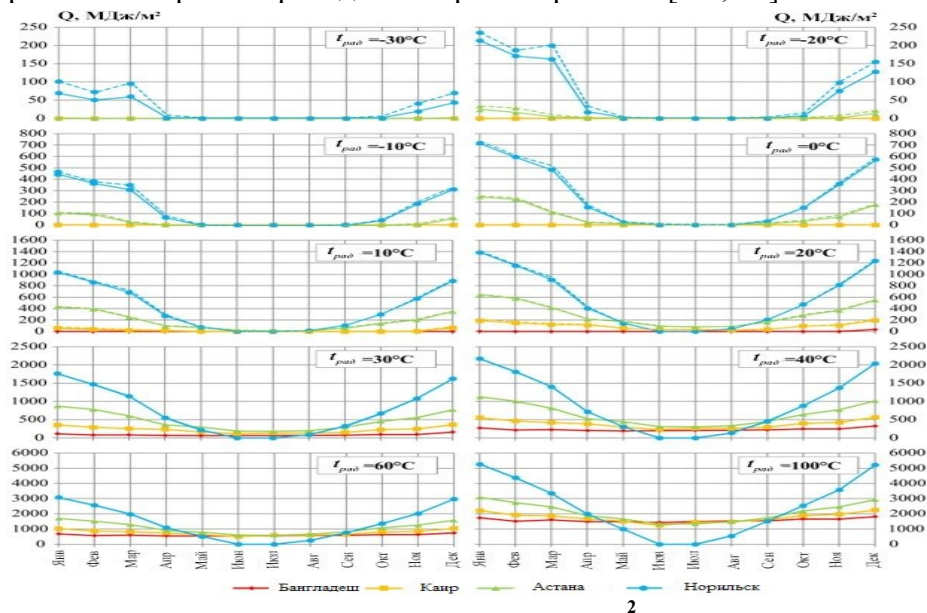


Рис. 1. Суммарное количество холода за месяц с 1 м² излучающей поверхности: пунктирными линиями обозначен – результат расчета по методике 1.

Сплошными линиями по методике 2.

Fig. 1. Total amount of cold per month from 1 m² of radiating surface: dotted lines indicate the result of calculation using method 1. Solid lines according to method 2.

Суммарное количество теплоты, отводимое радиационным охлаждением, в зависимости от географической широты от экватора (Бангкок, 13° северной широты) и до крайней северной точки материка (Норильск, 69° северной широты) с использованием двух методик расчета потока эффективного излучения показано на рис.1.

С увеличением географической широты с юга на север происходит последовательное возрастание плотности теплового потока радиационного охлаждения (рис. 2).

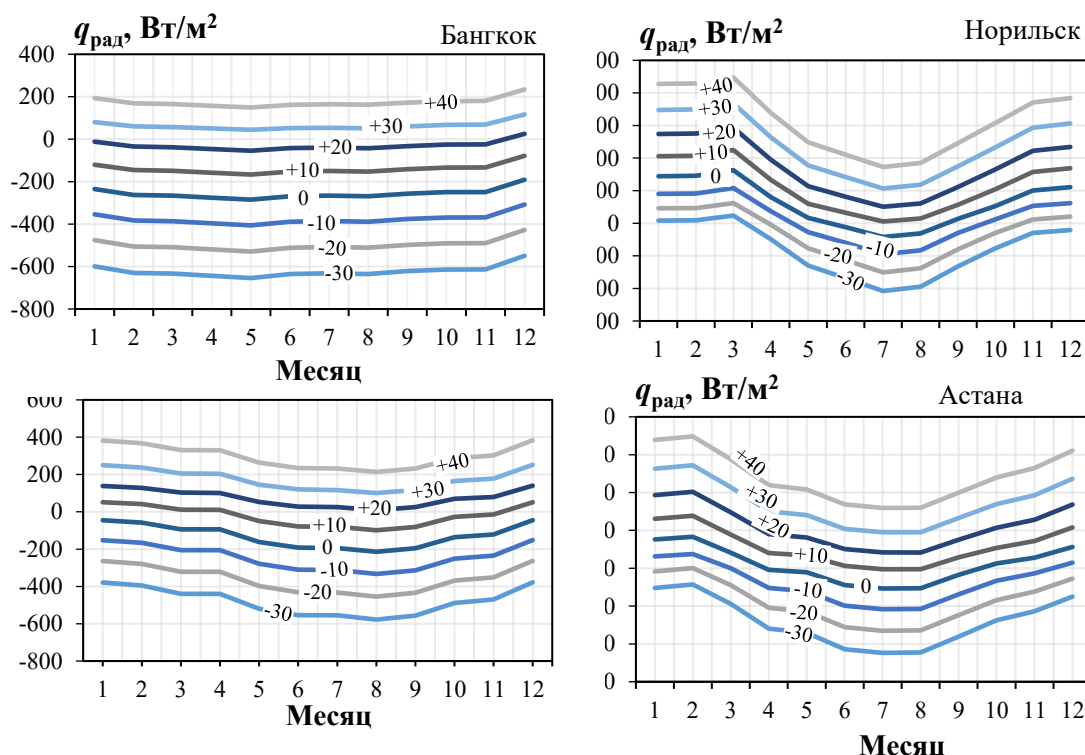


Рис. 2. Среднемесячная плотность теплового потока радиационного охлаждения

Fig. 2. Average monthly heat flux density of radiative cooling

Как видно по рис. 2, в г. Бангкок тепловой поток возможен с поверхности с температурой только выше 25°C , по мере увеличения широты температура поверхности, с которой происходит охлаждение, понижается: в Каире с $+10^{\circ}\text{C}$ в г. Астана с -10°C и в г. Норильск с -20°C . В зимний период величина плотности теплового потока при температуре поверхности 0°C увеличивается с 50 Вт/м^2 в Бангкоке до 250 Вт/м^2 в Норильске.

Обсуждение результатов. На основе разработанных методик расчетов эффективного излучения и радиационного охлаждения, сделаны выводы о том, что по мере удаления с юга на север происходит последовательное возрастание радиационного охлаждения.

Холодильные системы с радиационным охлаждением. Во многих странах, имеющих различные климатические условия, проводились исследования для определения возможностей использования радиационного охлаждения. Большинство исследований по изучению возможностей применения эффективного излучения выполнено применительно к регионам северного полушария: Северной Америки, Северной Африки, Юго-Восточной Азии [18-24]. В представленных работах основное внимание уделялось изучению возможностей применения эффективного излучения в системах кондиционирования воздуха в жилых и офисных зданиях в летнее время. Однако, возможности применения этой технологии охлаждения на территории умеренного и континентального пояса Европейско-Азиатской части северного полушария остались неизученными. Ученые университета АТУ, университета ИТМО и ТОО «Тениз» на протяжении более 10 лет проводят исследования установок с радиационным охлаждением (УРО) в условиях умеренного и континентального климата Евразии [25-29]. Разработан ряд схемных решений с учетом температурного режима в холодильной камере для северного (температура воздуха в среднем ниже -15°C) и южного (температура воздуха в среднем выше -15°C) регионов [15].

Для северной зоны:

1. Температурный режим $t_{\text{воз}} = -20^{\circ}\text{C}$ за счет радиационного охлаждения поддерживается в году 520 часов (14%). За это время может быть аккумулировано холода около 400 МДж/м^2 .

2. Температурный режим $t_{\text{воз}} = 0^\circ\text{C}$ поддерживается радиационным охлаждением в течение 2316 часов в году (61%). За это время происходит аккумулирование холода в количестве 575 МДж/м².

3. Температурный режим $t_{\text{воз}} = 20^\circ\text{C}$ обеспечивается в течение всего года, количество аккумулируемого холода может составить около 1930 МДж/м².

Для южной зоны:

1. Температурный режим $t_{\text{воз}} = 0^\circ\text{C}$ поддерживается в году в течении 1436 часов (38%), что обеспечит запас холода около 300 МДж/м².

2. Температурный режим $t_{\text{воз}} = 20^\circ\text{C}$ поддерживается в течение 3663 часов в году (97%), что обеспечит запас холода около 1450 МДж/м².

Существует достаточно много вариантов схемных решений систем охлаждения с использованием потенциала НРО. Разработаны схемы для круглогодичного использования радиационного охлаждения в холодное время для непосредственного охлаждения камер и в летнее время для понижения давления конденсации.

Выполненный анализ схемных решений показал, что независимо от региона расположения и режима работы охлаждаемого объекта для снижения энергопотребления целесообразно применять комбинированные холодильные системы, состоящие из холодильной машины и установки с РО с круглогодичным использованием радиационного охлаждения в соответствии с рис. 3.

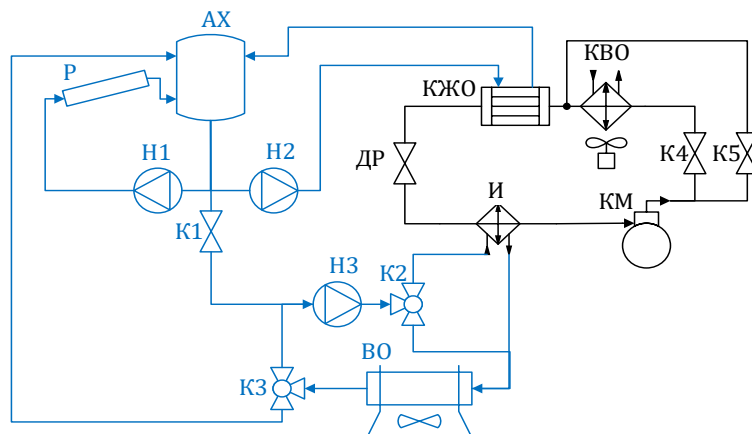


Рис. 3. Принципиальная схема комбинированной холодильной системы: Р – радиатор; АХ – аккумулятор холода; Н1 ... Н3 – насосы; ВО – воздухоохладитель; К1 ... К5 – краны; КМ – компрессор; КВО – конденсатор воздушного охлаждения; КЖО – конденсатор жидкостного охлаждения; ДР – дросселирующее устройство; И – испаритель.

Fig. 3. Schematic diagram of a combined refrigeration system: R – radiator; AH – cold accumulator; H1...H3 – pumps; VO – air cooler; K1 ... K5 – taps; KM – compressor; KVO – air-cooled condenser; KZhO – liquid cooling condenser; DR – throttling device; I – evaporator

Данная принципиальная схема показывает лишь основные элементы системы, необходимые для понимания её принципа действия. Комбинированная холодильная система будет работать в следующих режимах работы:

1. Непосредственное охлаждение холодильной камеры УРО при температуре атмосферного воздуха ниже чем в камере.

2. Отвод теплоты конденсации УРО парокомпрессионной холодильной машины при температуре атмосферного воздуха выше, чем в холодильной камере.

Предлагаемая холодильная система содержит контур парокомпрессионной холодильной машины (чиллер), состоящий из компрессора КМ, конденсатора воздушного охлаждения КВО, конденсатора жидкостного охлаждения КЖО, дросселирующего устройства ДР и испарителя И. Также холодильная система содержит контуры для теплоносителя, включающие в себя аккумулятор холода АХ, радиаторы Р, насосы Н1, Н2, Н3,

воздухоохладитель ВО, краны К1, К2 и К3. Холодильная система работает следующим образом. В летнее время включен компрессор КМ. Парокомпрессионная холодильная машина производит охлаждение теплоносителя, поступающего в испаритель И. При этом включен насос Н3. Он подает теплоноситель через трехходовой кран К2 в испаритель И. Далее охлажденный теплоноситель поступает в воздухоохладитель ВО, где забирает тепло от охлаждаемого объекта. Далее теплоноситель возвращается через трёхходовой кран К3 во всасывающий патрубок насоса Н3. При этом кран К1 закрыт.

В ночное время включается насос Н1. Он забирает теплоноситель из аккумулятора холода АХ и подает его в радиатор Р. Здесь теплоноситель охлаждается, после чего возвращается в аккумулятор холода АХ. Ожидается, что за ночь теплоноситель в аккумуляторе холода будет охлаждаться примерно до минимальной температуры атмосферного воздуха за ночь (например, $+20^{\circ}\text{C}$).

В дневное время, если температура конденсации становится больше заданного значения (например, $+40^{\circ}\text{C}$), включается насос Н2. Он забирает охлажденный теплоноситель из аккумулятора холода АХ и подает его в конденсатор жидкостного охлаждения КЖО. В результате температура конденсации хладагента снижается. Далее теплоноситель возвращается в аккумулятор холода.

В зимнее время отвод тепла от КЖО не требуется, так как температура конденсации весь день поддерживается достаточно низкой за счет температуры атмосферного воздуха. Однако, если температура атмосферного воздуха станет достаточно низкой (например -10°C) относительно температуры в камере хранения продуктов, теплоноситель будет охлаждаться до требуемой температуры в радиаторах и собираться в аккумуляторе холода АХ без включения парокомпрессионной холодильной машины. В таких условиях кран К1 открывается. Насос Н3 забирает охлажденный теплоноситель из аккумулятора холода АХ и подает его через трехходовой кран К2 непосредственно в воздухоохладитель ВО. Здесь теплоноситель забирает тепло от охлаждаемого объекта, а сам нагревается. Далее теплоноситель через трехходовой кран К3 возвращается в аккумулятор холода АХ.

Экспериментальное исследование установки с РО с радиатором пластинчато-трубной конструкции из меди. Для экспериментального исследования установки с радиационным охлаждением (УРО) в климатических условиях г. Алматы была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Принципиальная гидравлическая схема УРО представлена на рис. 4.

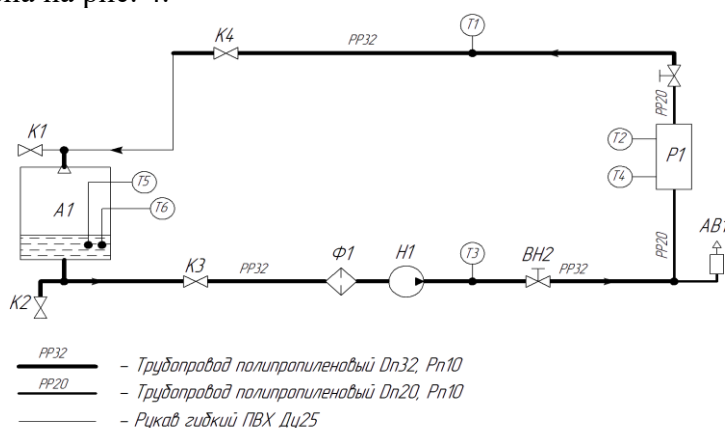


Рис. 4. Принципиальная гидравлическая схема установки с радиационным охлаждением: P1 – радиатор; A1 – аккумулятор холода; H1 – насос; AB1 – автоматический воздушный клапан; Ф1– фильтр; K1...K4 – кран шаровой; T1...T6 – датчики температуры

Fig. 4. Schematic hydraulic diagram of an installation with radiation cooling: P1 – radiator; A1 – cold accumulator; H1 – pump; AB1 – automatic air valve; F1 – filter; K1...K4 – ball valve; T1...T6 – temperature sensors

Основными элементами экспериментальной установки с радиационным охлаждением являются охлаждающее устройство - радиатор P1, аккумулятор холода A1 и насос H1 для циркуляции теплоносителя. Установка с РО оборудована контроллером АСУНРО-1.К, позволяющим записывать данные с датчиков температуры, а также управлять насосом H1 холодильной системы.

Методика проведения экспериментов следующая. В ночное время, определяемое по часам реального времени в интервале между закатом и рассветом, контроллер холодильной установки включает насос. В радиаторе теплоноситель охлаждается за счет совместного действия конвективного и радиационного теплообмена и возвращается в аккумулятор холода. Датчики температуры Dallas DS18B20 имеют абсолютную погрешность $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Данные с термодатчиков в цифровом виде передаются по протоколу OneWire (трехпроводная схема) к контроллеру АСУТИВКП-1.К, изготовленному на базе аппаратной платформы ArduinoMega 2560 с микроконтроллером ATmega 2560. Результаты эксперимента показаны на рис. 5.

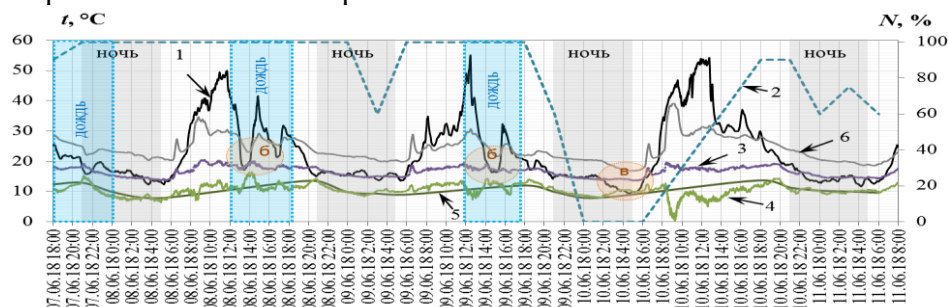


Рис. 5. Сравнение температуры излучающей поверхности с температурой воздуха:
 1 – температура излучающей поверхности; 2 – общий уровень облачности по данным с метеостанции; 3 – расчетная температура воздуха по мокрому термометру;
 4 – расчетная температура точки росы воздуха; 5 – температура точки росы воздуха по данным с метеостанции; 6 – температура атмосферного воздуха

Fig. 5. Comparison of the temperature of the radiating surface with the air temperature:
 1 – temperature of the radiating surface; 2 – general cloud level according to data from the weather station; 3 – calculated air temperature according to a wet thermometer; 4 – calculated air dew point temperature; 5 – air dew point temperature according to data from the weather station;
 6 – ambient air temperature

Температура излучающей поверхности в ночное время была в среднем на $6,5\text{ K}$ ниже температуры атмосферного воздуха, несмотря на дождь и высокий уровень облачности. Удельный тепловой поток радиатора имеет значение $43,8 \pm 15\text{ Вт/м}^2$.

Компьютерное моделирование холодильной системы с радиационным охлаждением. Система хладоснабжения с радиационным охлаждением обладает множеством физических параметров. Процессы, протекающие в системе, динамически изменяются во времени и зависят как от параметров окружающей среды, так и от внутреннего состояния системы. Получить точные аналитические уравнения, позволяющие рассчитать обобщенные характеристики системы в заданный момент времени (холодопроизводительность, энергопотребление и т.п.) не представляется возможным. Поэтому для исследования переходных процессов, происходящих в системе хладоснабжения, используется метод явного численного решения. Компьютерная модель была разработана в среде Scilab 6.0 [26,27,29], в которой интервал времени между расчетами составлял 5 минут.

При моделировании работы установки РО использованы данные о климатических условиях полученные с архива метеостанции [30].

На основе проведенного анализа было установлено, что для обеспечения круглогодичного хладоснабжения необходимо использовать комбинированную холодильную систему, состоящую из УРО и холодильной машины. В более теплые периоды года, когда УРО не обеспечивает требуемую температуру, охлаждение камеры для хранения

продуктов следует производить за счёт работы обычной парокомпрессионной холодильной машины. Анализ энергоэффективности комбинированной холодильной системы проведен для городов: Алматы, Костанай, Санкт-Петербург при её круглогодичной эксплуатации и поддержании температуры на уровне 0 ± 1 °С в холодильной камере с низким значением эксплуатационных теплопритоков, в которой хранятся яблоки с выделением теплоты. Такая комбинированная холодильная система в зимний период должна обеспечить охлаждение с низким потреблением электроэнергии без использования холодильного компрессора, а в годовом цикле работы сократить износ более дорогостоящей в данной системе холодильной машины, что повысит её долговечность [28]. Рассматриваемая система хладоснабжения представлена на рис. 6. В ней имеются аккумулятор холода и три замкнутых гидравлических контура для циркуляции теплоносителя.

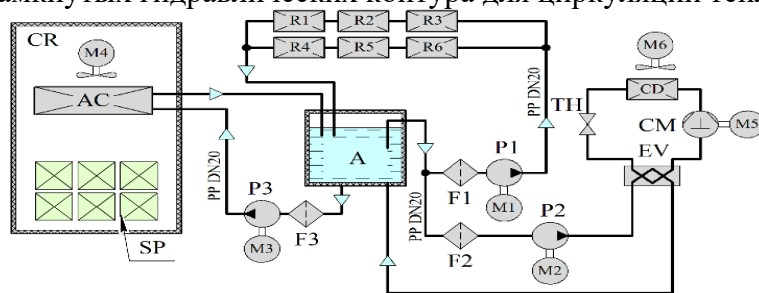


Рис. 6. Принципиальная схема комбинированной холодильной системы хладоснабжения камеры

Fig. 6. Schematic diagram of the combined refrigeration system for the cold supply of the chamber

По первому контуру с насосом P1 теплоноситель подается к радиаторам, размещенным на крыше холодильной камеры. По второму контуру с насосом P2 теплоноситель подается к испарителю EV парокомпрессионной холодильной машины. По третьему контуру с насосом P3 теплоноситель поступает в воздухоохладитель AC, охлаждающий воздух в холодильной камере CR. Принципиальная схема комбинированной холодильной системы хладоснабжения камеры состоит из: А – аккумулятора холода; CD – конденсатора воздушного охлаждения; CM – компрессора; F1...F3 – фильтров; M1...M3 – электродвигателей насосов; M4, M6 – электродвигателей вентиляторов; M5 – электродвигателя компрессора; R1...R6 – радиаторов; SP – хранимого продукта; TH – дросселирующего устройства. Результаты расчета энергопотребления представленной комбинированной системы системы в сравнении со стандартной холодильной машиной дает следующую экономию электроэнергии:

- в Алматы – 340,4 кВт·ч за год, что составляет 7,8%;
- в Костанай – 242 кВт·ч за год, что составляет 7,6%;
- в Санкт-Петербурге – 657 кВт·ч за год, что составляет 15,9%.

Экономия электроэнергии в Алматы и Костанай сопоставима. При этом, в городе Костанай с наиболее холодным климатом экономия электроэнергии оказалась минимальной, так как в зимнее время здесь очень часто включение системы хладоснабжения вообще не требуется.

Таким образом, наибольшей экономии электроэнергии за счёт совместного использования УРО и ХМ, удалось достигнуть в городе Санкт-Петербург – 15,9 %. Это объясняется тем, что здесь дольше всего наблюдаются температуры атмосферного воздуха, близкие к 0°С, когда требуется охлаждение камеры и УРО может производить охлаждение. Сравнение энергопотребления комбинированной системы в различных городах показывает, что наименьшее количество электроэнергии потребляла установка, расположенная в г. Костанай, где в зимнее время наблюдается наиболее низкая температура.

Анализ результатов моделирования установки с радиационным охлаждением системы кондиционирования воздуха. Анализ энергоэффективности установки

с РО системы кондиционирования воздуха проведен на основе компьютерного моделирования в соответствии с рис.7.

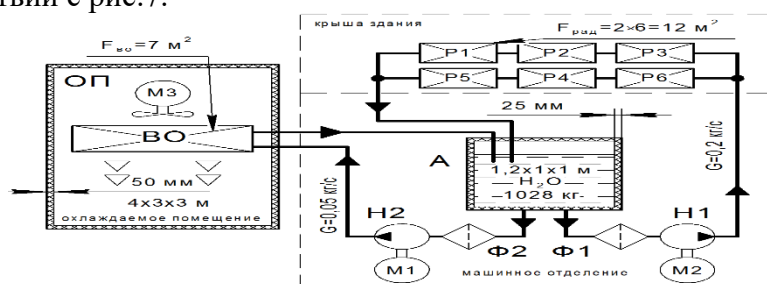


Рис. 7. Принципиальная гидравлическая схема моделируемой установки РО:

А – аккумулятор холода; ВО – воздухоохладитель; Н1, Н2 – насосы; М1, М2, М3 – электродвигатели, ОП – охлаждаемое помещение; Р1...Р6 – радиаторы; Ф1, Ф2 – фильтры

Fig. 7. Schematic hydraulic diagram of the simulated RO installation: А – cold accumulator; ВО – air cooler; Н1, Н2 – pumps; М1, М2, М3 – electric motors, ОП – refrigerated room; Р1...Р6 – radiators; Ф1, Ф2 – filters

В качестве теплоносителя в установке используется подготовленная вода [35].

В результате компьютерного моделирования установки радиационного охлаждения на основе данных о погоде за лето 2018 года в городе Алматы установлено, что в охлаждаемом помещении комфортная температура в диапазоне до $+25^{\circ}\text{C}$ может поддерживаться до 86,8 % времени от общей продолжительности сезона (79 из 91 дней). При этом установка с радиационным охлаждением потребляет 69,5 кВт·ч электроэнергии, что показывает её энергоэффективность по сравнению с кондиционером, имеющим парокомпрессионную холодильную машину. Для условий эксперимента сокращение потребления электроэнергии составило 56 %.

Вывод. 1. Комплекс выполненных теоретических и экспериментальных исследований показал эффективность холодильных систем различного назначения с использованием потенциала ночного радиационного охлаждения и доказал целесообразность их применения в регионах с достаточными величинами плотностей излучаемого теплового потока и продолжительности действия.

2. Разработаны методики для расчетов эффективного излучения Земли и радиационного охлаждения, проведен их теоретический анализ. Получены новые данные о потенциале эффективного излучения и ночного радиационного охлаждения в различных регионах Евразийского материка.

3. Разработаны методики, алгоритмы и компьютерные модели расчета и проектирования установок радиационного охлаждения и комбинированных холодильных систем различного функционального назначения в зависимости от метеорологических условий с применением моделирования годового цикла работы.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований для Европейско-Азиатского региона показали наличие достаточного потенциала радиационного охлаждения для его применения в системах кондиционирования воздуха и промышленного холодоснабжения. Наибольший эффект обеспечивает использование комбинированных холодильных систем, включающих в себя холодильные машины и установки радиационного охлаждения.

5. Экспериментальные исследования установки радиационного охлаждения в г. Алматы (43° с. ш.) показали, что температура излучающей поверхности радиатора в ночное время в среднем на 6,5К ниже температуры атмосферного воздуха и выше температуры точки росы воздуха на (5-8) К при плотности излучаемого теплового потока $43,8 \pm 15 \text{ Вт/м}^2$.

6. Выполненными исследованиями установлено, что минимальная плотность теплового потока ночного радиационного охлаждения, при которой целесообразно

разрабатывать и применять комбинированные холодильные системы, составляет 40-50 Вт/м², при продолжительности работы не менее трех месяцев в течение года.

7. В результате компьютерного моделирования различных систем хладоснабжения установлено, что в г. Алматы в летний период применение установки с радиационным охлаждением по сравнению с кондиционером с компрессорной холодильной машиной обеспечивает сокращение потребления электроэнергии на 56%, при поддержании в помещении температуры до +25°C в течение 87% времени от общей продолжительности сезона.

8. Применение комбинированных холодильных систем для обеспечения температуры в камере 0±1°C показало возможность сокращения энергопотребления в г. Алматы 7.8%, Костанай на 7.6% и в Санкт-Петербурге на 15.9% по сравнению с компрессорной холодильной машиной. При этом плотность излучаемого теплового потока составляет 90-115 Вт/м².

Благодарности. Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант AP09258901/ГФ).

Acknowledgments The research is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (grant AR09258901/GF).

Библиографический список:

1. Теплоэнергетика и теплотехника: Общие вопросы. Справочник/Под общей редакцией В.А. Григорьева и В.М. Зорина. –М.: Энергия, 1980. –528 с., ил. – (Теплоэнергетика и теплотехника)
2. Кондратьев К.Я. Актинометрия. – Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1965. – 693 с.
3. Determination of the clear sky emissivity for use in cool storage roof [Электронный ресурс] / Bing Chen. – Omaha: University of Nebraska, 1991. – Режим доступа: <http://www.ceen.unomaha.edu/solar/>.
4. Measurement of night sky emissivity in determining radiant cooling. [Электронный ресурс] / Bing Chen. – Omaha: University of Nebraska, 1991. – Режим доступа: <http://www.ceen.unomaha.edu/solar/>.
5. Night radiative cooling. The effect of clouds and relative humidity. [Электронный ресурс] / Luciuk M. – Cranford: William Miller Sperry Observatory, 2001 – Режим доступа: <http://www.asterism.org/>.
6. Parker D.S. Theoretical evaluation of the nightcool nocturnal radiation cooling concept: report : FSEC-CR-1502-05 / Florida Solar Energy Center, – Clearlake Rd., 2005. – 44 p.
7. Parker D.S., Sherwin J.R., Hermelink A.H., Moyer N., NightCool : Nocturnal Radiation Cooling Efficiency Concept, Cocoa, 2009.
8. Цой А.П., Грановский А.С., Цой Д.А., Бараненко А.В. Влияние климата на работу холодильной системы, использующей эффективное излучение в космическое пространство (часть 1/2) // Холодильная техника. – 2014. – № 12. – С. 36–41.
9. Цой А.П., Грановский А.С., Цой Д.А., Бараненко А.В. Влияние климата на работу холодильной системы, использующей эффективное излучение в космическое пространство (часть 2/2) // Холодильная техника. – 2015. – № 1. – С. 43–46.
10. 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. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.04.016.
11. Исаев С.И., Кожинов И.А., Кофанов В.И. Теория тепломассообмена: Учебник для вузов / под ред. Леонтьев А.И. – Москва: Высшая школа, 1979. – 495 с.
12. Ларионов Н.Н. Теплотехника: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1985. – 432 с.
13. Anderson T., Duke M., Carson J. Performance of an unglazed solar collector for radiant cooling // Australian Solar Cooling 2013 Conference. – Sydney: Australian solar cooling interest group, 2013.
14. Tsoy A.P. Cooling process modeling of a periodically incoming liquid, using night radiation cooling / A.P. Tsoy, A.K. Alimkeshova, A.S. Granovskiy // AIP Conf. Proc. – 2018. – Vol. 2007.
15. Tsoy A.P., Baranenko A.V., Tsoy D.A. Refrigeration systems with the night radiative cooling effect for different regimes and climatic conditions // AIP Conf. Proc. – 2018. – Vol. 2007.
16. Tsoy A.P., Granovsky A.S., Tsoy D.A. Modelling of the operation of a refrigeration unit using radiative cooling to maintain the storage temperature in the cold room // MATEC Web of Conferences. – 2020. – Vol. 324. – 02006. – DOI: 10.1051/mateconf/202032402006. Scopus процентиль: 34.
17. Tsoy, A.P., Granovskiy, A.S., Baranenko, A.V., Tsoy, D.A., 2017. Effectiveness of a night radiative cooling system in different geographical latitudes. AIP Conference Proceedings. 1876, 020060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.4998880>.

18. Degnes-Ødemark H. A study of night sky radiation, and heating and cooling of buildings with thermal solar collectors [Text] : Master thesis – Oslo: University of Oslo, Department of Physics, 2009. – <https://www.duo.uio.no>
19. Dobson R.T. Thermal Modelling Of A Night Sky Radiation Cooling System. / Dobson R.T. // Journal of Energy in Southern Africa. – 2005. – Vol 16, № 2. – p. 20–31. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.04.016.
20. Etzion Y., Erell E. Thermal storage mass in radiative cooling systems // Build. Environ. 1991. Vol. 26, № 4. P. 389–394.
21. Golaka A.R.T., Exell R.H.B. Night radiative cooling and underground water storage in a hot humid climate: a preliminary investigation // Proc. 2nd Reg. Conf. Energy Technol. Towar. a Clean Environ. Phuket, 2003. Vol. 012
22. Hollick J. Nocturnal Radiation Cooling Tests. *Energy Procedia*. 2012; 30: 930–936.
23. Potentials of night sky radiation to save water and energy in the state of New Mexico [Text]: report / Governor Richardson's water innovation fund; Mark Chalom, Bristol Stickney, Kate Snider. – New Mexico
24. Qingyuan, Z., Yu L. Potentials of Passive Cooling for Passive Design of Residential Buildings in China / Z. Qingyuan, L. Yu *Energy Procedia*. 2014. – Vol. 57. – p. 1726–1732.
25. Цой А.П., Бараненко А.В., Грановский А., Грановский А.С., Цой Д.А., Корецкий Д., Джамашева Р. Компьютерное моделирование годового цикла работы комбинированной системы хладоснабжения с использованием ночного радиационного охлаждения // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение -2020. – Т. 4. – № 3. – с. 28-37
26. Цой А.П., Грановский А.С., Бараненко А.В. Моделирование и математическая программа для расчета величины эффективного излучения // Вестник МАХ.– 2014. –№ 1. – с. 7–10.
27. Цой А.П., Грановский А.С., Программа расчета потока эффективного излучения [Электронный ресурс] – Алматы: ТОО Тениз, –2013. – Режим доступа: http://maxteniz.kz/iak_in_rk/article_iac/ercalc/
28. Цой А.П., Грановский А.С., Цой Д.А. Исследование работы холодильной установки ночного радиационного охлаждения в условиях резко-континентального климата. VII международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (17-20 ноября 2015 г.). – Санкт-Петербург: Университет ИТМО. – 2015. – с. 99-101.
29. Цой А.П., Грановский А.С., Цой Д.А., Бараненко А.В. Моделирование работы установки с радиационным охлаждением для кондиционирования воздуха // Вестник Международной Академии Холода. – 2019. – №3. – с. 314.
30. Погода и климат [Электронный ресурс]. – Архив погоды по городам мира. – 2015. –Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/>

References:

1. Thermal power engineering and heating engineering: General issues. Directory/Under the general editorship of V.A. Grigoryeva and V.M. Zorina. M.: Energy, 1980; 52 (Thermal power engineering and heating engineering) (In Russ)
2. Kondratyev K.Ya. Actinometry. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, 1965; 693 (In Russ)
3. Determination of the clear sky emissivity for use in cool storage roof [Electronic resource] / Bing Chen. – Omaha: University of Nebraska, 1991. Access mode: <http://www.ceen.unomaha.edu/solar/>.
4. Measurement of night sky emissivity in determining radiant cooling. [Electronic resource] / Bing Chen. – Omaha: University of Nebraska, 1991. Access mode: <http://www.ceen.unomaha.edu/solar/>
5. Night radiative cooling. The effect of clouds and relative humidity. [Electronic resource] / Luciuk M. – Cranford: William Miller Sperry Observatory, 2001 – Access mode: <http://www.asterism.org/>.
6. Parker D.S. Theoretical evaluation of the nightcool nocturnal radiation cooling concept: report : FSEC-CR-1502-05 / Florida Solar Energy Center, Clearlake Rd., 2005; 44.
7. Parker D.S., Sherwin J.R., Hermelink A.H., Moyer N., NightCool: Nocturnal Radiation Cooling Efficiency Concept, Cocoa, 2009.
8. Tsoi A.P., Granovsky A.S., Tsoi D.A., Baranenko A.V. The influence of climate on the operation of a refrigeration system using effective radiation into outer space (part 1/2) *Refrigeration technology*. 2014;12: 36–41. (In Russ)
9. Tsoi A.P., Granovsky A.S., Tsoi D.A., Baranenko A.V. The influence of climate on the operation of a refrigeration system using effective radiation into outer space (part 2/2). *Refrigeration technology*. 2015; 1: 43–46. (In Russ)
10. Samuel D.G.L., Nagendra S.M.S., Maiya M.P. Passive alternatives to mechanical air conditioning of building-ing: A review. *Build. Environ. Elsevier Ltd*, 2013; 66: 54–64. DOI: 10.1016/j.buildenv. 2013.04.016.
11. Isaev S.I., Kozhinov I.A., Kofanov V.I. Theory of heat and mass transfer: Textbook for universities / ed. Leontyev A.I. Moscow: Higher School, 1979; 495. (In Russ)
12. Larikov N.N. Thermal engineering: Textbook for universities. 3rd ed., revised. and additional. Moscow: Stroyizdat, 1985; 432. (In Russ)
13. Anderson T., Duke M., Carson J. Performance of an unglazed solar collector for radiant cooling. Australi-an Solar Cooling 2013 Conference. – Sydney: Australian solar cooling interest group, 2013.

14. Tsoy A.P. Cooling process modeling of a periodically incoming liquid, using night radiation cooling / A.P. Tsoy, A.K. Alimkeshova, A.S. Granovskiy. *AIP Conf. Proc.* 2018; 2007.
15. Tsoy A.P., Baranenko A.V., Tsoy D.A. Refrigeration systems with the night radiative cooling effect for different regimes and climatic conditions. *AIP Conf. Proc.* 2018; 2007.
16. Tsoy A.P., Granovsky A.S., Tsoy D.A. Modeling of the operation of a refrigeration unit using radiative cooling to maintain the storage temperature in the cold room. *MATEC Web of Conferences.* 2020; 324. – 02006. – DOI: 10.1051/mateconf/202032402006. Scopus percentile: 34.
17. Tsoy, A.P., Granovskiy, A.S., Baranenko, A.V., Tsoy, D.A., 2017. Effectiveness of a night radiative cooling system in different geographical latitudes. *AIP Conference Proceedings.* 1876, 020060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.4998880>.
18. Degnes-Ødemark H. A study of night sky radiation, and heating and cooling of buildings with thermal solar collectors [Text]: Master thesis Oslo: University of Oslo, Department of Physics, 2009. <https://www.duo.uio.no>
19. Dobson R.T. Thermal Modeling Of A Night Sky Radiation Cooling System. / Dobson R.T. *Journal of Energy in Southern Africa.* 2005;16(2): 20–31. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.04.016.
20. Etzion Y., Erell E. Thermal storage mass in radiative cooling systems. *Build. Environ.* 1991; 26(4): 389–394.
21. Golaka A.R.T., Exell R.H.B. Night radiative cooling and underground water storage in a hot humid climate: a preliminary investigation. *Proc. 2nd Reg. Conf. Energy Technol. Product. a Clean Environ.* Phuket, 2003; 012
22. Hollick J. Nocturnal Radiation Cooling Tests. *Energy Procedia.* 2012; 30:930–936.
23. Potentials of night sky radiation to save water and energy in the state of New Mexico [Text]: report / Governor Richardson's water innovation fund; Mark Chalom, Bristol Stickney, Kate Snider. New Mexico
24. Qingyuan, Z., Yu L. Potentials of Passive Cooling for Passive Design of Residential Buildings in China / Z. Qingyuan, L. Yu *Energy Procedia.* 2014; 57:1726–1732.
25. Tsoi A.P., Baranenko A.V., Granovsky A., Granovsky A.S., Tsoi D.A., Koretsky D., Dzhamasheva R. Computer modeling of the annual cycle of operation of a combined refrigeration system using night-time radiation cooling. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation, missile and power engineering.* 2020;4(3): 28-37 (In Russ)
26. Tsoi A.P., Granovsky A.S., Baranenko A.V. Modeling and mathematical program for calculating the value of effective radiation. *Bulletin of the MAX.* 2014; 1: 7–10. (In Russ)
27. Tsoi A.P., Granovsky A.S., Program for calculating the effective radiation flux [Electronic resource] - Almaty: Teniz LLP, 2013. – Access mode: http://maxteniz.kz/iak_in_rk/article_iac/ercalc/
28. Tsoi A.P., Granovsky A.S., Tsoi D.A. Study of the operation of a refrigeration unit for night-time radiation cooling in conditions of a sharply continental climate. VII international scientific and technical conference “Low-temperature and food technologies in the 21st century” (November 17-20, 2015). St. Petersburg: ITMO University. 2015; 99-101. (In Russ)
29. Tsoi A.P., Granovsky A.S., Tsoi D.A., Baranenko A.V. Modeling the operation of an installation with radiation cooling for air conditioning. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration.* 2019; 3: 314.
30. Weather and climate [Electronic resource]. Weather archive for cities of the world. 2015 Access mode: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/>

Сведения об авторах:

Цой Александр Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор; tsoyteniz@bk.ru,
ORCID: 0000-0002-3073-6698

Бараненко Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор; avbaranenko@itmo.ru,
ORCID: 0000-0003-3675-9513

Александр Сергеевич Грановский, младший научный работник; granovskiy.a@rambler.ru;
ORCID: 0000-0002-1191-038X

Ким Инара Александровна, кандидат технических наук, директор; kim.inara@mail.ru; ТОО «Тениз»
ORCID: 0009-0009-8695-0739

Information about authors:

Alexander P. Tsoi, Dr. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Prof.; tsoyteniz@bk.ru, ORCID: 0000-0002-3073-6698

Alexander V. Baranenko, Dr. Sci. (Eng), Prof.; avbaranenko@itmo.ru, ORCID: 0000-0003-3675-9513

Alexander S. Granovsky, Junior Scientific worker; granovskiy.a@rambler.ru; ORCID: 0000-0002-1191-038X

Inara A. Kim, Cand. Sci. (Eng), Director of Teniz LLP; kim.inara@mail.ru; LLP "Teniz" ORCID: 0009-0009-8695-0739

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 13.02.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 19.03.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 19.03.2024.