

УДК 621.565.83

Расчет величины эффективной холодопроизводительности холодильной системы, использующей охлаждающий эффект небосвода

Канд. техн. наук А. П. ЦОЙ, А. С. ГРАНОВСКИЙ
teniz@bk.ru

Алматинский технологический университет
Республика Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Толе би, 100
Д-р техн. наук А. В. БАРАНЕНКО, д-р техн. наук А. Я. ЭГЛИТ
baranenko@mail.ifmo.ru
Университет ИТМО
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В статье рассматривается процесс изменения температуры в аккумуляторе холода холодильной системы, использующей эффективное излучение. Представлены результаты моделирования процесса охлаждения при различных отношениях емкости аккумулятора к площади радиаторов системы. Расчеты проведены при постоянном значении КПД радиатора на основе данных об изменении параметров воздуха в пять наиболее жарких летних ночей, наблюдавшихся в городе Алматы. Данные об изменении температуры воздуха, температуры точки росы, облачности и температуры в аккумуляторе холода при различных массах хладоносителя представлены в виде графиков. Было установлено, что при увеличении удельной емкости аккумулятора холода, увеличивается общее количество холода, производимое радиатором за ночь (эффективная холодопроизводительность). Наибольшее значение эффективной холодопроизводительности для представленного примера составило 1220 кДж/м^2 при удельной емкости аккумулятора холода 120 кг/м^2 . Предлагается формула для инженерного расчета эффективной холодопроизводительности за ночь по осредненным за ночь параметрам атмосферного воздуха и хладоносителя. Полученные результаты могут быть использованы для определения оптимальной емкости аккумулятора холодильной системы, использующей эффективное излучение.

Ключевые слова: эффективное излучение, холодильные системы, лучевое охлаждение ночного неба, нетрадиционные способы охлаждения.

Calculation of effective refrigeration capacity for refrigeration system using night sky radiant cooling

Ph. D. A. P. TSOY, A. S. GRANOVSKY
teniz@bk.ru

Almaty Technological University
Kazakhstan, 050012, Almaty, ul. Tole, 100
D. Sc. A. V. BARANENKO, D. Sc. A. Ya. EGLIT
baranenko@mail.ifmo.ru
ITMO University
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The article reviews the process of temperature change in the freeze collecting accumulator of the refrigeration system using effective radiation. The main elements of such a system are night sky radiating surface (radiator), freeze collecting accumulator and means of transporting cooling medium from accumulator to radiator. The calculation results of cooling process modelling under different ratios of accumulator volumetric capacity to the square of the radiator system are presented. The formula for engineering calculation of the effective amount of freeze, generated for one night, is given. It is shown that average effective radiation per night be calculated with a proper accuracy from average night air temperature, average temperature of the dew point and general cloud amount. The temperature of the radiating surface can be calculated as difference between average air temperature and expected cooling value, the latter depending on accumulator capacity.

Keywords: effective radiation, refrigerating systems, ray cooling from the night sky, non-traditional ways of cooling, night sky radiant cooling.

В ночное время, когда приток электромагнитного излучения от Солнца отсутствует, поверхность, обращенная к небу, излучает энергии больше, чем принимает обратно за счет теплового излучения от окружающей

атмосферы. Это явление можно использовать для отвода теплоты от различных объектов, т.е. для разработки холодильной системы, охлаждение в которой создается за счет эффективного излучения [1–5].

Основными элементами такой холодильной системы являются излучающая поверхность (радиатор), обращенная к ночному небу, аккумулятор холода и средства доставки хладоносителя из аккумулятора холода к радиатору.

Величина эффективного излучения является основным фактором, определяющим холодопроизводительность системы. Она зависит от многих параметров атмосферного воздуха и свойств излучающей поверхности радиатора. Ее можно рассчитать по одной из известных эмпирических формул. Например, можно использовать формулы, представленные в работах Брента [6], Паркера [7], Луцук [8] или Чена [9]. Для этой цели можно также использовать методику, предложенную авторами в статье [10].

Попробуем оценить количество холода, которое может быть получено в простейшей холодильной системе, использующей эффективное излучение, за одну ночь (эффективную холодопроизводительность). Для этого рассмотрим процесс охлаждения в такой системе.

Теплота, которую содержит хладоноситель в аккумуляторе холода, передается за счет конвективного теплообмена излучающей поверхности радиатора. Излучающая поверхность отдает часть поступившей к ней от хладоносителя теплоты в виде инфракрасного излучения. В результате процесса температура хладоносителя опускается ниже температуры окружающего воздуха.

При данном процессе к хладоносителю в радиаторе в тоже время поступает тепло за счет теплопередачи от атмосферного воздуха, что ограничивает возможную величину охлаждающего эффекта. Чем ниже опускается температура хладоносителя, тем большее количество теплоты поступает к поверхности радиатора от воздуха за счет конвективного теплообмена и тем меньше становится холодопроизводительность радиатора. С понижением температуры хладоносителя, уменьшается и температура излучающей поверхности, а с ней и величина потока эффективного излучения, что в итоге уменьшает холодопроизводительность радиатора.

Для расчета величины потока эффективного излучения примем, что температура излучающей поверхности радиатора равна температуре жидкости циркулирующей в системе. При этом радиатор будет создавать охлаждение:

$$q = \eta_p \cdot E_{\text{эф}}(t_b, t_{\text{ро}}, t_{\text{из}}, R) \cdot F_p \quad (1)$$

где: q — холодопроизводительность радиатора, Вт;

η_p — общий КПД радиатора, который представляет собой отношение количества теплоты, которое забирается от хладоносителя в радиаторе в единицу времени, к теоретически-возможной величине эффективного излучения. Для существующих конструкций радиаторов его значение находится в диапазоне от 0,5 до 0,9, о чем можно судить по результатам экспериментальных исследований [11];

F_p — площадь радиатора, м²;

$E_{\text{эф}}(t_b, t_{\text{ро}}, t_{\text{из}}, R)$ — поток эффективного излучения при температуре излучающей поверхности равной температуре хладоносителя и параметрах атмосферного воздуха, здесь t_b — температура воздуха, °С;

$t_{\text{ро}}$ — температура точки росы атмосферного воздуха, °С;

$t_{\text{из}}$ — температура излучающей поверхности радиатора, °С;

R — общая степень облачности в баллах, выраженная в десятых долях от единицы и находящаяся в диапазоне $0 \leq R \leq 1$.

Все дальнейшие вычисления данной величины будут проводиться по методике, описанной в работе [10].

Произведение $\eta_p \cdot E_{\text{эф}}(t_b, t_{\text{ро}}, t_{\text{из}}, R)$ представляет собой удельную холодопроизводительность радиатора, которую создает единица площади поверхности радиатора.

В данном примере для расчета $E_{\text{эф}}$ предлагается использовать температуру точки росы $t_{\text{ро}}$, на основе которой ведется учет влияния влагосодержания атмосферного воздуха на величину эффективного излучения. При использовании других формул для расчета эффективного излучения могут использоваться другие параметры атмосферного воздуха. Например, возможно использование относительной влажности воздуха ϕ или парциального давления водяных паров e .

При условии, что рассматриваемый интервал времени τ достаточно мал, можно считать параметры атмосферного воздуха в течение всего интервала постоянными.

Учитывая, что в процессе транспортирования хладоносителя до аккумулятора холода, неизбежно возникнут дополнительные теплопритоки, температура в аккумуляторе холода за n -ый интервал времени τ_n понизится на величину:

$$\Delta t_{an} = \frac{\eta_c q_n \tau_n}{M_a c_x} = \frac{\eta_c \eta_p E_{\text{эф}}(t_{bn}, t_{\text{ро}n}, t_{\text{из}n}, R_n) F_p \tau_n}{M_a c_x}, \quad (2)$$

где: M_a — масса хладоносителя в аккумуляторе холода, кг;
 q_n — холодопроизводительность радиатора при параметрах атмосферного воздуха, соответствующих началу интервала времени τ_n ;

c_x — изобарная теплоемкость хладоносителя, Дж/(кг·°С);

η_c — коэффициент, учитывающий теплопритоки к хладоносителю при его транспортировании до аккумулятора холода;

τ_n — продолжительность n -ого интервала времени, с.

К концу рассматриваемого интервала температура жидкости в аккумуляторе будет иметь температуру t_{an} :

$$t_{an} = t_{a(n-1)} - \Delta t_{a(n-1)} = t_{a(n-1)} - \frac{\eta_c \eta_p E_{\text{эф}}(t_{b(n-1)}, t_{\text{ро}(n-1)}, t_{\text{из}(n-1)}, R_{(n-1)}) F_p \tau_n}{M_a c_x}, \quad (3)$$

где: $t_{a(n-1)}$ — температура в аккумуляторе в начале интервала времени, °С;

t_{an} — температура в аккумуляторе в конце интервала времени, °С.

Определив температуру t_{an} по формуле (3), по параметрам атмосферного $t_{b(n-1)}, t_{\text{ро}(n-1)}, t_{\text{из}(n-1)}, R_{(n-1)}$ в момент времени $\tau_{(n-1)}$ можно определить температуру в аккумуляторе $t_{a(n+1)}$ в момент времени $\tau_{(n+1)}$ и так далее. Таким образом, в расчете используется рекурсивная функция, решение которой в замкнутой форме осложнено из-за нелинейного характера изменения параметров воздуха в течение ночи, а также тем, что для расчета величины эффективного излучения $E_{\text{эф}}$ используется уравнение четвертой степени [10].

В связи с этим для расчета конечного значения температуры хладоносителя в аккумуляторе холода будем последовательно рассчитывать температуры

$t_{a1}, t_{a2}, t_{a3} \dots t_{an}$ подставляя в уравнение (3) значения параметров атмосферного воздуха в моменты времени согласно данным о погоде в местности, где предполагается использовать холодильную систему.

Будем считать, что коэффициенты η_c и η_p постоянны в течение всей ночи. Площадь радиаторов для спроектированной системы является постоянной величиной. Параметры атмосферного воздуха изменяются по заранее известным закономерностям, согласно данным о погодных условиях в регионе, в котором предполагается использовать холодильную установку. Хладоноситель, используемый в холодильной системе выбирается в зависимости от условий эксплуатации системы и для каждой спроектированной системы значение его теплоемкости будет практически постоянной величиной. Величина интервала времени τ определяется из желаемой точности результата. Чем она меньше, тем выше конечная точность результата. Следовательно, в формуле (3) регулируемыми параметрами холодильной системы являются масса хладоносителя в аккумуляторе холода M_a и площадь радиаторов A_p . Величина Δt_{an} зависит от отношения M_a к A_p , которое в дальнейшем будем называть удельной массой хладоносителя m_a , приходящегося на 1 м^2 площади радиатора. Задаваясь значениями m_a, c_x , а также имея данные об изменениях температуры воздуха, его влажности и общей облачности, проводя расчеты в интервалом времени τ можно получить график изменения температуры в аккумуляторе холода за ночь.

Представим пример расчета. Начальную температуру жидкости в аккумуляторе холода t_{a0} примем равной $25 \text{ }^\circ\text{C}$, как наибольшую допустимую температуру воздуха в кондиционируемых помещениях в районах с жарким климатом. В нашем случае зададимся следующими параметрами: $\eta_p = 0,7$; $\eta_c = 0,9$. Продолжительность интервала времени $\tau = 1800 \text{ с}$. Относительная излучательная способность поверхности радиатора, используемая для расчета $E_{\text{эф}}$ в формулах (1) — (3): $\delta = 0,95$. Площадь радиатора $F_p = 1 \text{ м}^2$.

В аккумуляторе холода используется обычная вода с $c_x = 4100 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$. Расчеты проведем для массы хладоносителя 60 кг на 1 м^2 радиатора.

Параметры атмосферного воздуха примем согласно данным о погоде в пять летних ночей 2005 г. с наибольшей средней ночной температурой в г. Алматы (см. рис. 1 и 2).

Холодильная система включается на закате. Этому моменту соответствует время 20:00. Процесс охлаждения идет до восхода солнца, которому соответствует время 06:00. Общая длительность процесса охлаждения составляет 10 ч.

Подставив в формулу (3) данные из графиков 1 и 2 (рис. 1) в момент времени 20:00, а также параметры, обозначенные выше, рассчитаем значение величины эффективного излучения. В нашем случае получилось $E_{\text{эф}} = 29 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Подставив данное значение в формулу (3) получим $\Delta t_{a0} = 0,28 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура в аккумуляторе холода к времени 20:30 составляет $t_{a1} = 24,72 \text{ }^\circ\text{C}$. По полученному значению t_{a1} и данных о параметрах атмос-

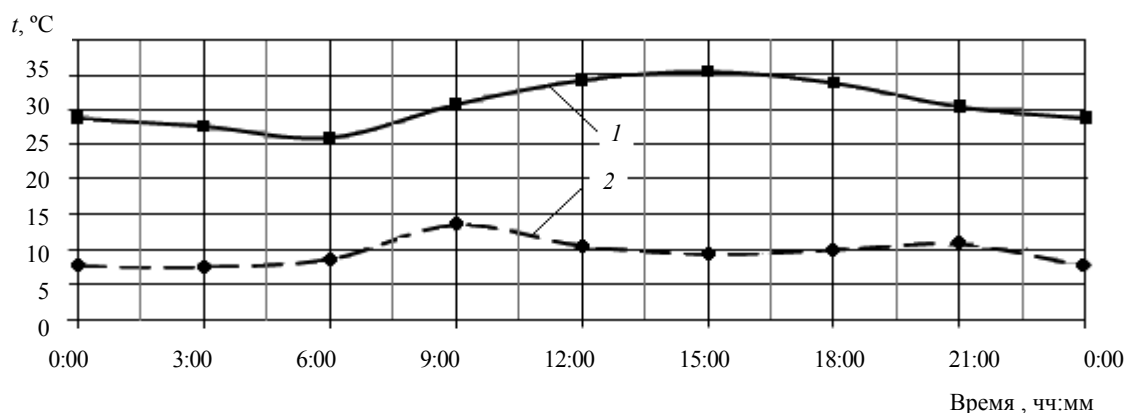


Рис. 1. Параметры атмосферного воздуха:
1 — температура воздуха t_a ; 2 — температура точки росы t_{po}

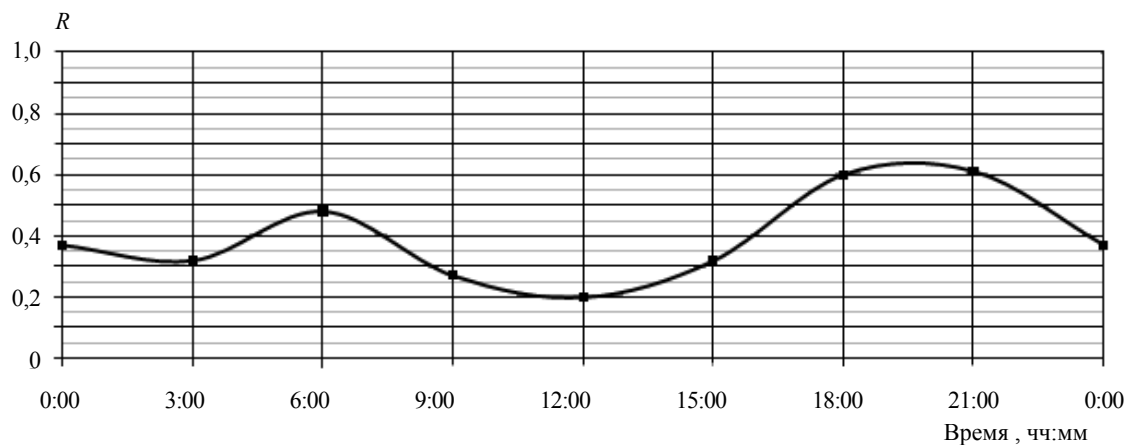


Рис. 2. График изменения степени облачности R

ферного воздуха в момент времени 20:30, рассчитаем величину $E_{эф}$. По значению $E_{эф}$ рассчитаем Δt_{a1} и t_{a2} в момент времени 21:00 и так далее. Аналогичные расчеты проведем для $m_a = 30$ и $m_a = 120$ кг/м². В результате получим кривые изменения температуры в аккумуляторе холода в течение ночи при различной удельной массе хладоносителя (см. рис. 3).

Рассмотрим насколько изменилась температура в аккумуляторе холода к концу процесса охлаждения. Понижение температуры в аккумуляторе холода за ночь определим по формуле:

$$\Delta t_n = t_{a0} - t_{ак} \quad (4)$$

где: t_{a0} — температура в аккумуляторе холода в начале процесса охлаждения (момент времени 20:00), °С; $t_{ак}$ — температура в аккумуляторе холода в конце процесса охлаждения (момент времени 6:00), °С;

Рассчитав значения Δt_n для каждого значения m_a , получим график, представленный на рис. 4.

Зная величины Δt_n , m_a и c_x можно определить какое количество холода было получено за ночь с 1 м² радиатора.

$$Q_n = m_a c_a \Delta t_n \quad (5)$$

Рис. 5 показывает, как изменение m_a влияет на общее количество холода, получаемого за ночь — эффективную холодопроизводительность Q_n .

При изменении удельной емкости аккумулятора холода от 30 до 120 кг/м², эффективная холодопроизводительность изменяется на 30% от 930 до 1220 кДж/м². Для охлаждения жидкости на 5 °С за ночь, в условиях климата г. Алматы, для условий нашего примера следует использовать аккумулятор емкостью не более 50 кг на 1 м² радиатора.

В случае отсутствия теплопритоков в радиаторы и трубопроводы холодильной системы за счет эффективного излучения ($\eta_p = 1$ и $\eta_c = 1$) теоретически возможно получить от 1480 до 1940 кДж холода.

Стоит отметить, что при охлаждении жидкости на 5 °С и ниже по сравнению с температурой воздуха, КПД радиаторов начинает резко снижаться из-за увеличения конвективных теплопритоков в радиатор и может оказаться ниже заложенного в представленных расчетах среднего значения $\eta_p = 0,7$. При этом действительная температура в аккумуляторе холода в конце процесса охлаждения окажется выше ожидаемой. Для устранения подобной ошибки

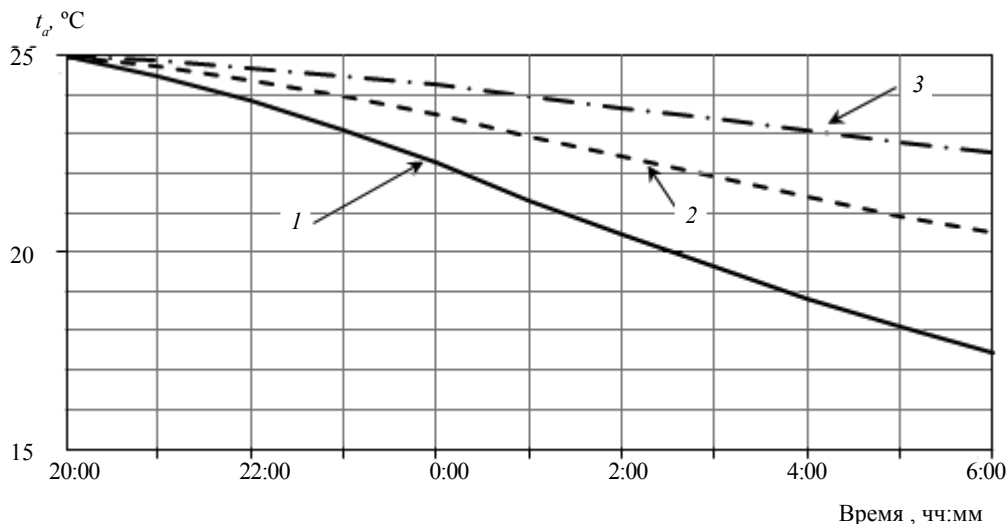


Рис. 3. Изменение температуры аккумулятора холода во времени:
1 — при $m_a = 30$ кг/м²; 2 — при $m_a = 60$ кг/м²; 3 — при $m_a = 120$ кг/м²

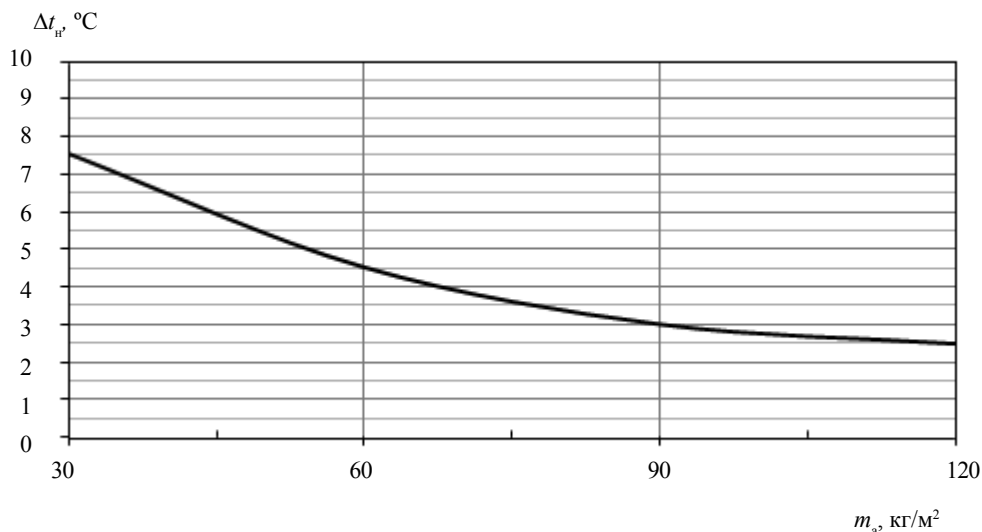


Рис. 4. Зависимость понижения температуры в аккумуляторе холода за ночь от удельной массы хладоносителя

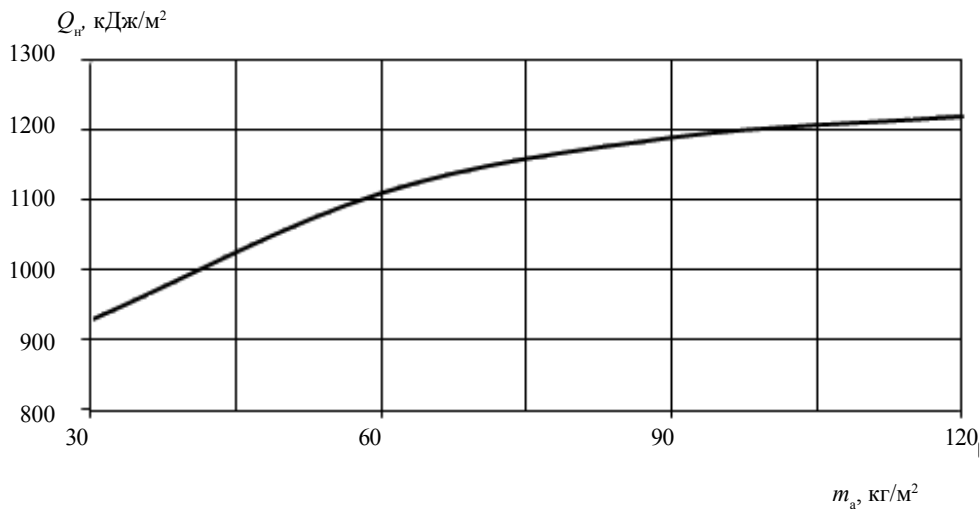


Рис. 5. Зависимость эффективной холодопроизводительности $Q_{ночь}$, полученной с 1 м² радиатора, от удельной емкости аккумулятора холода

при малой емкости аккумулятора следует рассматривать η_p как функцию от перепада между температурой воздуха и температурой хладоносителя. Это предположение вытекает из решения уравнений теплового баланса радиатора, описание которого выходит за рамки данной статьи.

Сравним результаты вычислений по описанной методике с вычислениями по средним за ночь значениям параметрам атмосферного воздуха. Для нашего примера средняя температура воздуха $\bar{t}_в = 28,2$ °C, $\bar{t}_{ро} = 8,9$ °C, $\bar{R} = 0,45$. Средняя температура излучающей поверхности может быть определена по формуле:

$$\bar{t}_{из} = \bar{t}_{a0} - \frac{\Delta t_n(m_a)}{2}, \quad (6)$$

где: $\bar{t}_{из}$ — средняя ночная температура излучающей поверхности, °C;

\bar{t}_{a0} — температура в аккумуляторе холода в начале процесса охлаждения, которому соответствует момент 20:00 по местному времени.

$\Delta t_n(m_a)$ — величина ожидаемого охлаждения аккумулятора холода за ночь, определяемая как функция от m_a (см. рис. 3).

Так при использовании аккумулятора холода с $m_a = 30$ кг/м² хладоносителя $\bar{t}_{из} = 21,4$ °C; при $m_a = 60$ кг/м²: $\bar{t}_{из} = 22,7$ °C; при $m_a = 120$ кг/м²: $\bar{t}_{из} = 23,8$ °C.

Общее количество холода, полученное за ночь с 1 м² площади поверхности радиатора можно определить по формуле:

$$Q_n = 3,6 E_{эф}(\bar{t}_в, \bar{t}_{ро}, \bar{t}_{из}, \bar{R}) \eta_p \eta_c \tau_n, \quad (7)$$

где: $E_{эф}(\bar{t}_в, \bar{t}_{ро}, \bar{t}_{из}, \bar{R})$ — поток эффективного излучения при параметрах, Вт/м²;

τ_n — продолжительность ночи, ч;

$\bar{t}_в$ — средняя за ночь температура воздуха за ночь, °C;

$\bar{t}_{ро}$ — средняя температура точки росы, °C;

\bar{R} — среднее значение общей облачности, $0 \leq R \leq 1$.

Подстановка перечисленных значений в формулу (7) дает следующие результаты. При $m_a = 30$ кг/м²: $Q_n = 980$ кДж; при $m_a = 60$ кг/м²: $Q_n = 1140$ кДж; при $m_a = 120$ кг/м²:

$Q_n = 1270$ кДж. Полученные значения Q_n несколько больше, представленных на рис. 5. Результат расчета Q_n по средним параметрам для $m_a = 30$ кг/м² завышен на 5,4%, для $m_a = 60$ кг/м² на 2,7%, для $m_a = 120$ кг/м² на 4,4%.

По результатам вычислений, можно сказать, что среднюю за ночь величину эффективного излучения с достаточной степенью точности можно рассчитывать по средней ночной температуре воздуха, средней температуре точки росы и общей облачности. Температура излучающей поверхности при этом может быть рассчитана как разность между средней температурой воздуха и ожидаемой величиной охлаждения, определяемой в зависимости от емкости аккумулятора.

Данный способ определения средней температуры излучающей поверхности $\bar{t}_{из}$ не является универсальным, так как требует наличия заранее построенных графиков, учитывающих значения КПД конкретных конструкций радиаторов, а также климата местности, для которой проектируется холодильная установка.

Список литературы

1. 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.
2. Цой А. П., Филатов А. С., Бараненко А. В., Эглит А. Я. Исследование влияния солнечной радиации и ночного излучения на работу холодильной машины. II-я Международная научно-техническая конференция «Казахстан-Холод 2012» // Вестник АТУ. 2012. №2 С. 90–92.
3. Цой А. П., Эглит А. Я. Работа холодильных установок с воздушными конденсаторами в климатических условиях Казахстана. // Холодильная техника. 2013. №6. С. 24–27
4. Цой А. П., Грановский А. С., Цой Д. А. Применение холодильных систем, использующих эффективное излучение в космическое пространство в кондиционировании // Известия КАХАК. 2013. №3 (42). С. 77–82.
5. D. G. Leo Samuel. Passive alternatives to mechanical air conditioning of building: A review [Text]/D. G. Leo Samuel, S. M. Shiva Nagendra, M. P. Maiya // Building and Environment. 2013. №66. P. 54–64.

6. Кондратьев К. Я. Актинометрия. — Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1965.

7. 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.

8. Night radiative cooling. The effect of clouds and relative humidity. [Электронный ресурс]/Luciuk M. — Cranford: William Miller Sperry Observatory. — Режим доступа: <http://www.asterism.org/>.

9. 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/>.

10. Цой А. П., Грановский А. С., Бараненко А. В. Моделирование и математическая программа для расчета величины эффективного излучения // Вестник Международной академии холода. 2014. №1. С. 7–10.

11. Mark Chalom, Bristol Stickney. Potentials of night sky radiation to save water and energy in the state of New Mexico/Governor Richardson's water innovation fund. — New Mexico, 2006.

References

1. 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. №4. p. 8–11. (in Russian).

2. Tsoy A. P., Filatov A. S., Baranenko A. V., Eglit A. Ya. Research of influence of solar radiation and night radiation on refrigerator operation. II-nd International scientific and technical conference «Kazakhstan Cold 2012». *Vestnik ATU*. 2012. No 2. p. 90–92. (in Russian).

3. Tsoy A. P., Eglit A. Ya. Operation of refrigeration units with air capacitors in climatic conditions of Kazakhstan. *Kholodil'naya tekhnika*. 2013. No 6. p. 24–27. (in Russian).

4. Tsoy A. P., Granovsky A. S., Tsoy D. A. Use of the refrigerating systems using effective radiation in a space in conditioning. *Izvestiya KAKhAK*. 2013. No 3 (42). p. 77–82. (in Russian).

5. D. G. Leo Samuel. Passive alternatives to mechanical air conditioning of building: A review [Text]/D. G. Leo Samuel, S. M. Shiva Nagendra, M. P. Maiya. *Building and Environment*. 2013. No 66. P. 54–64.

6. Kondrat'ev K. Ya. *Actinometry*. — Leningrad, 1965. (in Russian).

7. 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.

8. Night radiative cooling. The effect of clouds and relative humidity. [Elektronnyi resurs]/Luciuk M. — Cranford: William Miller Sperry Observatory. <http://www.asterism.org/>.

9. Measurement of night sky emissivity in determining radiant cooling. [Elektronnyi resurs]. *Bing Chen*. — Omaha: University of Nebraska, 1991. <http://www.ceen.unomaha.edu/solar/>.

10. Tsoy A. P., Granovsky A. S., Baranenko A. V. Simulation and a mathematical program for calculating the value of effective radiation. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2014. No 1. p. 7–10. (in Russian).

11. Mark Chalom, Bristol Stickney. Potentials of night sky radiation to save water and energy in the state of New Mexico. *Governor Richardson's water innovation fund*. — New Mexico, 2006.



The **Tanzania Foodex 2014**, International Trade Exhibition to be held from **31 October - 02 November 2014** at Mlimani Conference Centre, Dar-Es-Salaam, Tanzania. The event attracts visitors from all over East & Central Africa while exhibitors participate from over 20 countries. Visitors from the African countries would include Kenya, Sudan, Ethiopia, Mozambique & Zaire, Nigeria, Egypt & South Africa. A vast range of products would be displayed from the below sectors:

Contact Details

Profex Exhibition Organizers
M - 38, Arabilla Building, Al Mamzar
P.O.Box : 122571, Dubai
United Arab Emirates
Tel : 00971 4 2546285
Fax : 00971 4 2546286
Email : info@profexexhibitions.com

Exhibitor Profile

- » Food
- » Poultry
- » Agriculture
- » Packaging
- » Bakery & Equipment
- » Beverages
- » Catering & Equipment
- » Hospitality
- » Refrigeration
- » Display & Storage

www.profexexhibitions.com