

УДК 621.565.83: 004.42

Моделирование и математическая программа для расчета величины эффективного излучения

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
baranenko@mail.ifmo.ru

Университет ИТМО
Институт холода и биотехнологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В статье описана методика моделирования и математическая программа для проектирования холодильных систем, использующих эффективное излучение. Представлены результаты сравнения различных формул для расчета эффективного излучения. Разработана компьютерная программа, которая рассчитывает поток эффективного излучения по задаваемым пользователем параметрам температуры воздуха, температуры излучающей поверхности, температуры точки росы атмосферного воздуха, степени облачности, относительной излучательной способности поверхности и географической широте местности, для которой производятся измерения.

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

Simulation and a mathematical program for calculating the value of effective radiation

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
baranenko@mail.ifmo.ru

University ITMO
Institute of Refrigeration and Biotechnologies
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The article discusses a modeling technique and a mathematical program to be used in designing refrigerating systems where effective radiation is employed. Various formulae for calculating effective radiation have been compared and the results are presented. A computer program has been developed to precalculate the flux of effective radiation according to the user's parameters of air temperature, emitting surface temperature, atmospheric dew point temperature, degree of cloudiness, relative emissivity of the surface and geographic latitude of the area for which the measurements are being made.

Keywords: simulation, mathematical program, refrigerating systems, effective radiation.

Земля, как и всякое другое тело, отдает тепловую энергию вследствие инфракрасного излучения. Данный процесс идет постоянно, но днем тепловое действие излучения незаметно, так как потеря тепло-

ты за счет излучения полностью перекрывается количеством теплоты, получаемым при поглощении лучей солнца. Ночью охлаждение земной поверхности благодаря излучению хорошо заметно. Излучение энергии в небесную сферу приводит в ночное время к переохлаждению обращенных к ней поверхностей относительно температуры окружающего воздуха. В случае высокой прозрачности атмосферы, что характерно для регионов Казахстана и России с резко-континентальным климатом, эффект охлаждения поверхности земли явно присутствует.

Эффективное излучение земной поверхности — это разность между собственным излучением земной поверхности и той энергией, которую поверхность земли получает обратно от противоизлучения атмосферы.

Эффективная температура аппаратов, расположенных на поверхности земли, определяется по формуле [1]:

$$t_{\text{эф}} = t_{\text{в}} - \Delta t_{\text{эф}}, \quad (1)$$

где: $t_{\text{в}}$ — температура воздуха;

$\Delta t_{\text{эф}}$ — изменение температуры за счет эффективного излучения (5–12 °С).

Эффективное излучение в зависимости от метеорологических условий региона можно использовать для охлаждения.

Для оценки теоретически возможной холодопроизводительности холодильных систем, использующих эффективное излучение, требуется методика определения величины эффективного излучения.

На данный момент известно значительное количество формул для расчета эффективного излучения. Были проанализированы формулы для расчета эффективно-

го излучения, представленные в работах Ефимовой [2], Чена [3, 4], Паркера [5], Брента [2] и Луцука [6].

Следующие графики (см. рис. 1, 2) иллюстрируют зависимость эффективного излучения от температуры воздуха для различной величины относительной влажности воздуха, рассчитанной по формулам Бинг Чена и Брента. В расчетах было принято, что температура излучающей поверхности равна температуре окружающего воздуха, степень облачности равна нулю, относительная излучательная способность равна единице.

Формулы Ефимовой и Брента были разработаны для моделирования теплового баланса в атмосфере и не использовались при проектировании холодильных систем, использующих эффективное излучение. Тем не менее, они дают результаты сопоставимые с результатами расчетов по формулам Чена, Паркера и Луцука, которые выводились специально для данной цели.

Для определения того, как влияние различных параметров учитывается перечисленными формулами, все они были приведены к общему виду. В нашем случае

было принято решение привести все формулы к виду формулы Брента [2]:

$$E_{\text{эф}} = \delta[\sigma(273,15+t_{\text{в}})^4 k_{\text{вп}} k_{\text{об}} + k_{\text{ст}}], \quad (1)$$

где: $E_{\text{эф}}$ — эффективное излучение, Вт/м²;

δ — относительная излучательная способность поверхности установки;

σ — постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·град⁴);

$k_{\text{ст}}$ — поправка на разницу между температурой излучающей поверхности и температурой воздуха, Вт/м²;

$t_{\text{в}}$ — температура воздуха на высоте 2 м над уровнем земной поверхности, °С;

$k_{\text{вп}}$ — коэффициент, учитывающий влияние содержания водяного пара в воздухе приземного слоя атмосферы;

$k_{\text{об}}$ — коэффициент, учитывающий влияние общей облачности.

Формула (1) была выбрана из тех соображений, что в ней выделены отдельные группы параметров, влияющих на величину эффективного излучения, которые удобно рассматривать по отдельности.

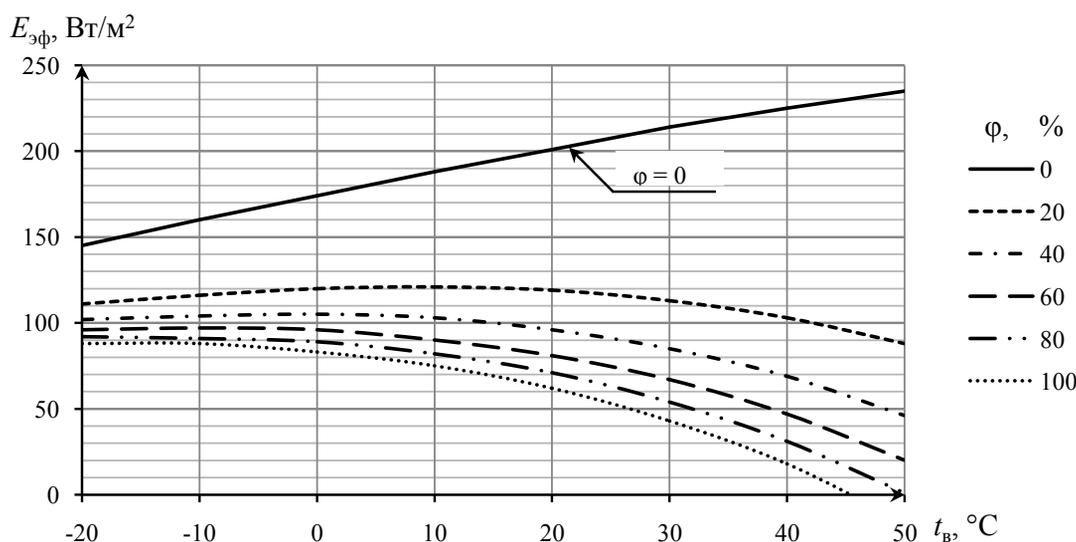


Рис. 1. Величина эффективного излучения, рассчитанная по формуле Бинг Чена

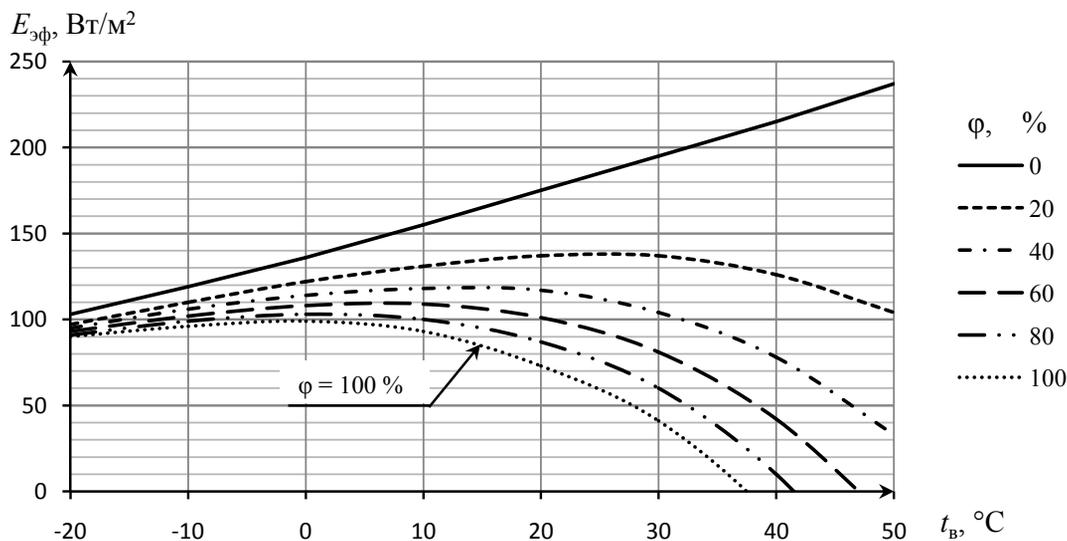


Рис. 2. Величина эффективного излучения, рассчитанная по формуле Брента

Формулы перечисленных авторов используют различные исходные параметры атмосферного воздуха для определения величины эффективного излучения. Несмотря на это, после приведения всех формул к единой системе единиц измерения выяснилось, что в диапазоне температур от 10 до 30 °С при относительной влажности воздуха от 10 до 100% результаты вычислений коэффициента $k_{\text{вп}}$ отличаются не более чем на 25%. Поэтому, в инженерных расчетах можно использовать любую из них. Однако формула, представленная в работе Бинг Чена, основана на результатах наиболее современных экспериментальных исследований и должна давать наиболее точные результаты. Коэффициент $k_{\text{вп}}$, выведенный из формулы Бинг Чена, имеет следующий вид:

$$k_{\text{вп}} = 0,202 - 0,0044t_{\text{ро}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{ро}}$ — температура точки росы воздуха, °С.

Следующим шагом были рассмотрены методики расчета влияния общего уровня облачности на поток эффективного излучения. В результате было установлено, что в работах по расчету потока эффективного излучения специально для проектирования холодильных систем, отсутствует достаточное количество экспериментальных данных о влиянии общей степени облачности. Поэтому предлагается использовать для этой цели формулу, предложенную в работах Будыко М. И., Берлянд Т. Г. и Зубенок Л. И. [2]

$$k_{\text{об}} = 1 - cR^2, \quad (3)$$

где: c — коэффициент, показывающий как изменяется влияние облачности на величину эффективного излучения в зависимости от географической широты местности, для которой проводятся расчеты (рис. 3);

R — общая степень облачности в долях от единицы, $0 \leq R \leq 1$.

Поправка $k_{\text{ст}}$ в формуле (1) может быть определена следующим образом:

$$k_{\text{ст}} = \sigma[(t_{\text{ин}} + 273,15)^4 - (t_{\text{в}} + 273,15)^4], \quad (4)$$

где: $t_{\text{ин}}$ — температура излучающей поверхности, °С.

Для вычисления величины охлаждающего эффекта за ночь с 1 м² излучающей поверхности достаточно рассчитать величину эффективного излучения по средним значениям $\bar{t}_{\text{в}}$, $\bar{t}_{\text{ин}}$, $\bar{t}_{\text{ро}}$, \bar{R} и полученное значение умножить на продолжительность работы системы в течение ночи.

$$Q = 3,6 \cdot \eta \cdot E_{\text{эф}}(\bar{t}_{\text{в}}, \bar{t}_{\text{ин}}, \bar{t}_{\text{ро}}, \bar{R}) \cdot \tau, \quad (5)$$

где Q — охлаждающий эффект за ночь, кДж/м²;

η — общий КПД системы охлаждения;

τ — продолжительность ночи, час.

Приведем пример расчета Q для условий климата города Алматы, расположенного на широте 43°. В наиболее жаркие летние дни имеем: $\bar{t}_{\text{в}} = 28,7$ °С; $\bar{t}_{\text{ин}} = 22,9$ °С; $\bar{t}_{\text{ро}} = 8,8$ °С; $\bar{R} = 0,44$. Средняя величина эффективного излучения $\bar{E}_{\text{эф}} = 49$ Вт/м². Продолжительность ночи $\tau = 10$ ч. При $\eta = 0,6$ охлаждающий эффект $Q = 1058$ кДж/м².

Все перечисленные в данной работе формулы являются эмпирическими и учитывают не все параметры атмосферы, влияющие на поток эффективного излучения. Например, в них не учитывается распределение температур по высоте в тропосфере. В связи с этим, в отдельные моменты времени результаты расчетов по каждой из формул могут давать ошибки.

Другим значительным недостатком всех рассмотренных методик расчета потока эффективного излучения является то, что ни одна из них не учитывает влияния высоты расположения излучающей поверхности над уровнем моря. Так по этим методикам невозможно определить, как изменится величина потока эффективного излучения при расположении холодильной установки в горной местности на высоте 1–2 км над уровнем моря.

Описанная в данной работе методика дает результаты, точность которых достаточна для инженерных расчетов при проектировании холодильной системы, которую предполагается использовать на высоте уровня моря.

С целью упрощения расчетов на основе описанной методики была разработана специальная компьютерная программа [7].

Данная программа рассчитывает поток эффективного излучения по задаваемым пользователем параметрам температуры воздуха, температуры излучающей поверхности, температуры точки росы атмосферного воздуха, степени облачности, относительной излучательной способности поверхности и географической широте местности, для которой производится измерения.

Программа автоматически отслеживает ввод недопустимых значений. Интерфейс программы — консольный. Среда программирования: Free Pascal 2.6 для ОС Windows.

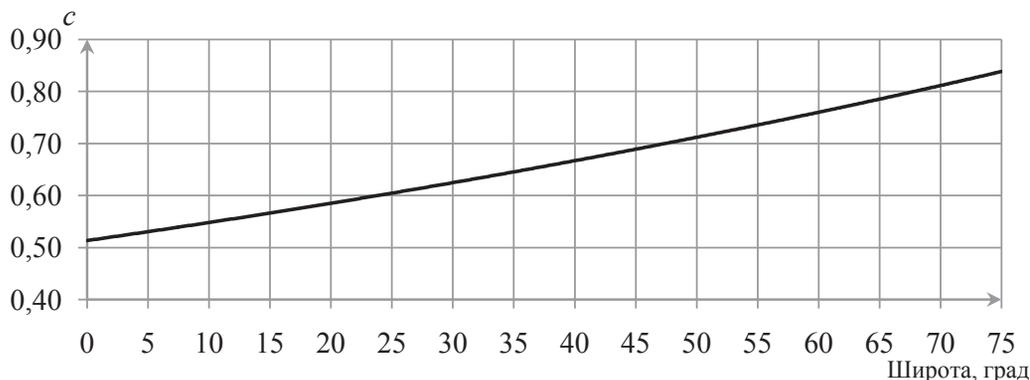


Рис. 3. Значения коэффициента c в зависимости от географической широты

Список литературы

References

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. Кондратьев К. Я. Актинометрия. — Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1965.
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. Parker D. S. Theoretical evaluation of the nightcool nocturnal radiation cooling concept: report: FSEC-CR-1502-05/Florida Solar Energy Center, — Clearlake Rd., 2005.
6. Night radiative cooling. The effect of clouds and relative humidity. [Электронный ресурс]/Luciuk M. — Cranford: William Miller Sperry Observatory, 2005. — Режим доступа: <http://www.asterism.org/>.
7. Программа расчета потока эффективного излучения [Электронный ресурс] — Алматы: ТОО Тениз, 2013. Режим доступа: http://maxteniz.kz/iak_in_rk/article_iac/ercalc/
8. Цой А. П., Филатов А. С., Цой Д. А. Замена хладагента R22 на альтернативный в регионах с высокой температурой окружающей среды // Вестник Международной академии холода. 2012. №2. С. 13–18.
9. Киссер К. В. Особенность холодоснабжения открытых катков сезонной эксплуатации. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. №1.

1. Tsoy A. P., Baranenko A. V., Jeglit A. Ja. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2012. No 4, pp. 8–11.
2. Kondrat'ev K. Ja. *Aktinometrija*. — L.: Gidrometeorologicheskoe izd-vo, 1965.
3. Determination of the clear sky emissivity for use in cool storage roof [Jelektronnyj resurs]/Bing Chen. — Omaha: University of Nebraska, 1991. — Rezhim dostupa: <http://www.ceen.unomaha.edu/solar/>.
4. Measurement of night sky emissivity in determining radiant cooling. [Jelek-tronnyj resurs]/Bing Chen. — Omaha: University of Nebraska, 1991. — Rezhim dostupa: <http://www.ceen.unomaha.edu/solar/>.
5. Parker D. S. Theoretical evaluation of the nightcool nocturnal radiation cooling concept: report: FSEC-CR-1502-05/Florida Solar Energy Center, — Clearlake Rd., 2005.
6. Night radiative cooling. The effect of clouds and relative humidity. [Jelek-tronnyj resurs]/Luciuk M. — Cranford: William Miller Sperry Observatory, 2005. — Rezhim dostupa: <http://www.asterism.org/>.
7. Programma rascheta potoka jeffektivnogo izluchenija [Jelektronnyj re-surs] — Almaty: TOO Teniz, 2013. Rezhim dostupa: http://maxteniz.kz/iak_in_rk/article_iac/ercalc/
8. Tsoy A. P., Filatov A. S., Tsoy D. A. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2012. No 2. pp. 13–18.
9. Kisser K. V. *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie»*. 2013. No 1.

eLIBRARY.RU

ИМПАКТ-ФАКТОР РИНЦ – численный показатель важности научного журнала

Импакт-фактор рассчитывается на основе данных по цитированию журнала в РИНЦ за предыдущие два года (или пять лет) и отражает среднее число цитирований одной статьи в журнале.

Рекомендации для авторов журнала «Вестник МАХ»

Для повышения библиометрических показателей, публикационной активности авторов и журнала в рейтинговой таблице РИНЦ, для увеличения импакт-фактора издания необходимо:

- ✓ обращать внимание на приоритетные направления и востребованные ведущими отраслями материалы, научно-технические разработки в данных областях;
- ✓ ссылаться в размещаемой в Вестнике МАХ статье на работы, опубликованные ранее в Вестнике МАХ, как самого автора, так и коллег. Это повысит индекс самоцитирования журнала и импакт-фактор журнала в целом;
- ✓ размещать научные материалы в сторонних журналах с высоким импакт-фактором, ссылаясь на работы, соответствующие тематике и опубликованные ранее в Вестнике МАХ, как самим автором, так и другими авторами.

Вестник МАХ включен в предварительный список 1500 наиболее рейтинговых изданий, который составлен по итогам проведенного анализа НЭБ.