

УДК 621.311.001

Эффективность совместного применения теплоотражающих экранов в окнах и технологии предварительной осушки воздуха для систем прерывистого отопления зданий в различных регионах России и Франции

В.М. Захаров¹, В.К. Пыжов¹, Н.Н. Смирнов¹, Д.А. Лапатеев¹, Б.Фламан²
¹ ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

²Национальный институт прикладных наук в Страсбурге, Франция
E-mail: nsmirnov@bk.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Известны новые энергосберегающие конструкции окон с теплоотражающими экранами, однако для их практического использования необходимо определение эффективности их применения с учетом существующих энергосберегающих мероприятий, в том числе прерывистого режима отопления.

Материалы и методы: Используются результаты натурных испытаний окон с теплоотражающими экранами в сертифицированной климатической камере, а также данные математической модели процесса теплопередачи через окно. Статистические климатические данные по регионам России и Франции предоставлены Росгидрометом и INSA de Strasbourg. Обработка результатов осуществлена с использованием методов математической статистики. Многовариантные расчеты показателей использования энергосберегающих окон в системах теплоснабжения зданий произведены с использованием программного комплекса Mathcad.

Результаты: Разработаны методика по определению минимальной температуры воздуха внутри помещения при дежурном режиме отопления в случае использования в окнах теплоотражающих экранов с учетом внешних и внутренних факторов, а также методика по определению величины осушки воздуха (с применением рециркуляции) в целях обеспечения дополнительного понижения допустимой температуры внутреннего воздуха для влажных помещений. Разработана методика определения эффективности использования теплоотражающих экранов в окнах, рассчитана экономия топливно-энергетических ресурсов при применении теплоотражающих экранов для различных регионов России и Франции.

Выводы: Использование разработанных конструкций окон и рекомендаций по организации работы систем прерывистого отопления зданий поможет значительно снизить потребление топливно-энергетических ресурсов как в ЖКХ, так и в промышленном секторе.

Ключевые слова: окна с теплоотражающими экранами, прерывистый режим отопления, образование конденсата, температура точки росы, относительная влажность воздуха, осушка воздуха, коэффициенты теплоотдачи, экономия энергоресурсов.

Efficiency of joint application of heat-reflecting shields in windows and air pre-drying technology in intermittent heating systems of buildings in various regions of Russia and France

V.M. Zakharov¹, V.K. Pyzhov¹, N.N. Smirnov¹, D.A. Lapateev¹, B. Flament²
¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
²Institut National des Sciences Appliquees de Strasbourg, France
E-mail: nsmirnov@bk.ru

Abstract

Background: New energy-saving windows with heat-reflecting shields are well known but their practical application requires determining the efficiency of their use together with the existing energy-saving measures, including intermittent heating.

Materials and methods: The study was based on the results of field tests of windows with heat-reflective shields in a certified climate chamber, as well as data about the mathematical model of heat transfer through the window. The statistical climatic data about the Russian and French regions were provided by RosHydroMet and INSA de Strasbourg. The results were processed by the methods of mathematical statistics. Multivariant calculations of energy efficient windows performance in heating of buildings were carried out using the Mathcad software.

Results: Two methods have been developed: the first one is aimed at determining the minimum indoor air temperature under standby heating in buildings with heat-reflective shields in the windows, taking into account external and internal factors, while the second one – at identifying the degree of air dryness (through recirculation) to facilitate further reduction of permissible interior air temperature in damp buildings. A technique has been developed to assess the efficiency of using heat-reflective shields in windows. It was then used to calculate energy saving achieved by using heat-reflective shields in different regions of Russia and France.

Conclusions: The use of the developed heat-reflective shield windows and recommendations for intermittent heating system operation in buildings can significantly reduce the consumption of fuel and energy resources in the utility branch and in the industrial sector.

Key words: windows with heat-reflective shields, intermittent heating, condensation on windows, dew point temperature, relative air humidity, air drying, heat transfer coefficients, energy saving.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.016-025

Введение. Согласно российским законам, с 1 января 2020 года годовая удельная величина расхода энергетических ресурсов в зданиях, строениях и сооружениях должна уменьшиться на 40 % по отношению к базовому уровню.

Во Франции были приняты тепловые регламенты RT, устанавливающие поэтапное снижение потребления энергии в зданиях. В качестве регламентируемой величины выступает годовое потребление энергии в расчете на 1 квадратный метр площади здания Q , кВтч/(кв.м·год). На основании требований Закона Гренель (Loi Grenelle) от 03 августа 2009 года и теплового регламента RT 2012, с 1 января 2013 года разрешается строить только здания с низким потреблением энергии (BBC, $Q < 50$ кВтч/(м²·год) в зависимости от региона Франции), а с 1 января 2020 года – только здания с «положительной энергией» (Bâtiment à énergie positive, BEPos), т.е. с положительным балансом, например при производстве электроэнергии у потребителя (часто фотогальваническим способом), что соответствует требованиям EPBD. Данным зданиям присваивается класс энергетической эффективности «А».

Существующие европейские и российские нормы в области энергосбережения предъявляют высокие требования к годовому потреблению энергоресурсов и, в частности, к коэффициенту сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций. Так, законодательные органы Европейского союза устанавливают коэффициент сопротивления теплопередаче окон к 2020 году на уровне 1,67–2,0 м²·°C/Вт, а российские органы власти – к 2016 году на уровне 1,0–1,05 м²·°C/Вт.

Сотрудниками ИГЭУ, COSTIC и INSA Strasbourg были разработаны и запатентованы конструкции окон с теплоотражающими экранами панельного, рулонного и жалюзийного типа, выполненные из металла, которые значительно снижают тепловые потери. Применение экранов целесообразно в темное время суток или в отсутствии людей.

Определение минимальной температуры воздуха при «дежурном» режиме отопления. В сертифицированной климатической камере АНО «Ивановостройиспытания» были проведены исследования [1] по изучению влияния применения теплоотражающих экранов в окнах на повышение сопротивления теплопередаче окон и снижение тепловых потерь. В качестве контроля использовался двухкамерный стеклопакет

4М1х10х4М1х10х4М1, а также стеклопакет 4М1х10х4М1х10х4И с нанесением на стекло низкоэмиссионного покрытия.

Отопление зданий и помещений может быть постоянным или прерывистым (периодическим). При прерывистом отоплении снижается или полностью отключается подача теплоты в здание или помещение.

Действующие нормы СП 60.13330.2012 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» в холодный период года в помещениях отапливаемых зданий, когда они не используются и в нерабочее время, позволяют снижать температуру внутреннего воздуха ниже нормируемой, но не ниже 15 °С – в жилых помещениях; 12 °С – в помещениях общественных и административно-бытовых зданий; 5 °С – в «сухих» производственных помещениях. Во Франции, согласно Регламентам, понижение температуры допускается не ниже 16 °С для жилых, общественных и административно-бытовых зданий.

Авторами [1] была разработана методика по определению минимальной температуры внутреннего воздуха при дежурном режиме отопления при выполнении условия недопущения выпадения конденсата на внутренней поверхности стекла окна с повышенными теплозащитными свойствами (с применением теплоотражающих экранов). В ходе математических преобразований было выведено, что минимальную температуру внутреннего воздуха при дежурном режиме отопления можно определить следующим образом:

$$t_{д}^{вн} = \frac{\tau_p \alpha_B R_{окна} - t_n}{\alpha_B R_{окна} - 1} + \Delta t_{зап}, \quad (1)$$

где τ_p – температура точки росы при параметрах воздуха в рабочее время, °С; $\Delta t_{зап}$ – температурный запас по недопущению конденсации (принимается в 1 °С); t_n – температура наружного воздуха, °С; $R_{окна} = R_0$ – приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной зоны окна, м²·°C /Вт; $\alpha_{вн}$ – коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к стеклу, Вт /м²·°C.

Определение приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной зоны окна в зависимости от внутренних и внешних параметров среды. Следует отметить, что приведенное сопротивление теплопередаче для окон с теплоотражающими экранами в реальных условиях эксплуатации не является постоянной величиной.

Таблица 1. Данные испытаний теплоотражающих экранов в окнах с низкоэмиссионным покрытием

Вариант	Тепловой поток q , Вт/м ²	Температура на внутреннем стекле $t_{вн}$, °С	Приведенное сопротивление теплопередаче R , м ² ·°С/Вт	$R/R_{\text{Контроль1}}$	$R/R_{\text{Контроль2}}$
Контроль 1 4М1х10х4М1х10х4М1	76,1	12,5	0,47	–	–
Контроль 2 4М1х10х4М1х10х4И (с покрытием)	58,9	14,15	0,61	1,29	–
Экран с холодной стороны (2 слоя)	20,77	18,65	1,757	3,74	2,89

Для большинства стеклопакетов приведенное сопротивление теплопередаче для теплотехнических расчетов принимается постоянным, причем данные взяты из результатов сертификационных испытаний¹. Приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной части окна R_0 , м²·°С/Вт, определяется по формуле

$$R_0 = R_{\text{в}} + \sum R_i + R_{\text{н}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{в}}$, $R_{\text{н}}$ – сопротивления теплообмену на внутренней и внешней поверхностях ограждения, соответственно, м²·°С/Вт; $\sum R_i$ – сумма термических сопротивлений отдельных слоев стеклопакета и экранов, называемая термическим сопротивлением светопрозрачной части окна $R_{\text{т}}$, м²·°С/Вт.

После подстановки выражений для сопротивлений теплообмену на внутренней и внешней поверхностях ограждения получим

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = \frac{1}{\alpha_{\text{к.в}} + \alpha_{\text{к.л}}} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_{\text{к.н}} + \alpha_{\text{л.н}}}, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях ограждения соответственно, Вт/м²·°С; $\alpha_{\text{к.в}}$, $\alpha_{\text{к.н}}$ – коэффициенты теплоотдачи конвекцией на внутренней и наружной поверхностях ограждения соответственно, Вт/м²·°С; $\alpha_{\text{л.в}}$, $\alpha_{\text{л.н}}$ – коэффициенты теплоотдачи излучением на внутренней и наружной поверхностях ограждения соответственно, Вт/м²·°С.

При теплотехнических расчетах коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях ограждения принимают постоянными, независимыми от внешних факторов и распределения температур. Согласно [2], для окон $\alpha_{\text{в}} = 8,0$ Вт/м²·°С, $\alpha_{\text{н}} = 23$ Вт/м²·°С.

Нами была составлена математическая модель процесса теплопередачи через светопрозрачную часть окна с использованием теплоотражающих экранов (рис. 1).

Расчеты для теплообмена на наружной поверхности производились на основе рекомендаций В.К. Савина [3], К.Ф. Фокина [4], Е.Г. Малявиной [2] по формуле Франка (4) и Стефана-Больцмана (5):

$$\alpha_{\text{к.н}} = 7,34 \cdot v^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91v}, \quad (4)$$

$$\alpha_{\text{л.н}} = 5,67 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \frac{\left(\frac{\tau_{\text{н}} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{\text{н}} + 273}{100}\right)^4}{\tau_{\text{н}} - t_{\text{н}}}, \quad (5)$$

где v – скорость ветра, м/с; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения; $\tau_{\text{н}}$, $t_{\text{н}}$ – температура поверхности экрана и наружного воздуха, соответственно, °С.

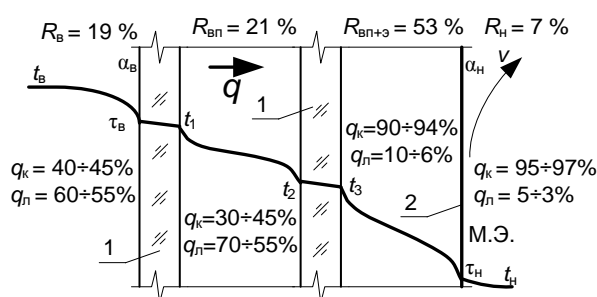


Рис. 1. Графическое представление процесса теплопередачи через окно с экранами: 1 – стекла толщиной 4 мм; 2 – металлический экран

После проведения математического моделирования было отмечено, что в случае использования с наружной стороны окна теплоотражающих экранов, выполненных из алюминия, коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{л.н}}$ будет ничтожно мал, по сравнению с конвективным теплообменом (рис. 2, табл. 2), и будет лежать (при задаваемой разности температур $\tau_{\text{н}} - t_{\text{н}}$ от 2 до 15 °С) в пределах от 0,5 до 3,43 Вт/(м²·°С) в случае отсутствия экранов; в пределах от 0,66 до 0,71 Вт/(м²·°С) в случае использования экранов из сильно окисленного алюминия; в пределах от 0,13 до 0,14 Вт/(м²·°С) при использовании экранов из полированного алюминия. В случае использования экранов коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{л.н}}$ будет составлять всего лишь 2–6 % от $\alpha_{\text{н}}$ (табл. 2).

¹ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. – М.: Аналитик, 2012. – 96 с.

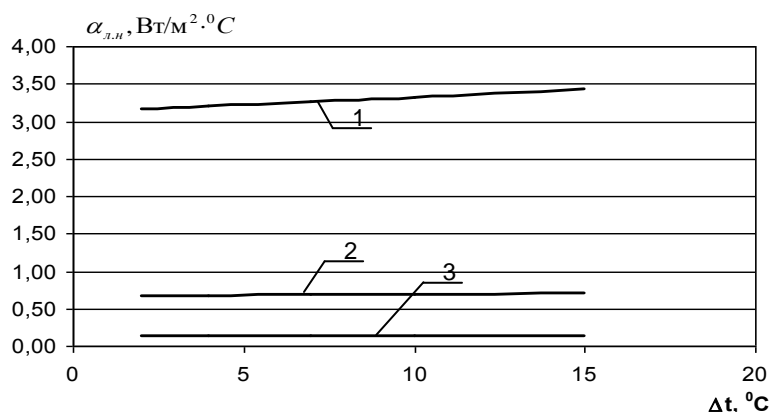


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи излучением $\alpha_{л.н}$ от разности температур на наружной поверхности окна t_n и температуры наружного воздуха t_n : 1 – при отсутствии экрана, $\epsilon_{ст} = 0,96$; 2 – при использовании экрана, выполненного из сильно окисленного алюминия, $\epsilon_{экp} = 0,2$; 3 – при использовании экрана, выполненного из полированного алюминия, $\epsilon_{экp} = 0,04$ (температура наружного воздуха t_n принята равной минус 30°C)

Таблица 2. Рассчитанные значения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления теплопередаче на наружной поверхности окна в зависимости от вариантов применения экранов и скорости ветра

Параметры	Единица изм.	Скорость ветра, м/с			
		2	4	6	8
Коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_{к.н}$	Вт/(м ² ·°C)	11,6	18,2	23,8	28,7
Коэффициент теплоотдачи α_n без экранов	Вт/(м ² ·°C)	14,9	21,4	27,0	31,9
Коэффициент теплоотдачи α_n с экранами из окисленного алюминия	Вт/(м ² ·°C)	12,3	18,9	24,4	29,4
Коэффициент теплоотдачи α_n с экранами из полированного алюминия	Вт/(м ² ·°C)	11,8	18,4	23,9	28,8
Отношение $\alpha_{л.н}$ к α_n без экранов	%	22	15	12	10
Отношение $\alpha_{л.н}$ к α_n с экранами из окисленного алюминия	%	5,5	3,6	2,8	2,3
Отношение $\alpha_{л.н}$ к α_n с экранами из полированного алюминия	%	1,2	0,8	0,6	0,5
Сопротивление теплопередаче R_n без экранов	(м ² ·°C)/Вт	0,067	0,047	0,037	0,031
Сопротивление R_n с экранами из окисленного алюминия	(м ² ·°C)/Вт	0,081	0,053	0,041	0,034
Сопротивление R_n с экранами из полированного алюминия	(м ² ·°C)/Вт	0,085	0,054	0,042	0,035

Необходимо отметить, что величиной, определяющей наружный конвективный теплообмен и, следовательно, сопротивление теплопередаче R_n , является скорость ветра. Согласно полученным данным (табл. 2, рис. 3), при увеличении скорости ветра с 2 до 8 м/с сопротивление теплообмену на внешней поверхности окна R_n соответственно уменьшится с 0,085 до 0,034 (м²·°C)/Вт в случае применения экрана, выполненного из алюминия разной степени полировки и окисления. Из этого следует, что окисление алюминия со стороны окружающей среды вследствие естественных причин не приведет к заметному снижению

общего сопротивления теплопередаче. Данное обстоятельство является важным моментом, так как, например, в процессе теплопередачи через воздушные прослойки, согласно исследованиям вышеназванных авторов и на основании данных составленной математической модели, до 50–70 % теплового потока приходится на теплоотдачу излучением, поэтому для поддержания высокого сопротивления теплопередаче внутренних воздушных прослоек с использованием теплоотражающих экранов важно поддерживать низкие значения степени черноты металла.

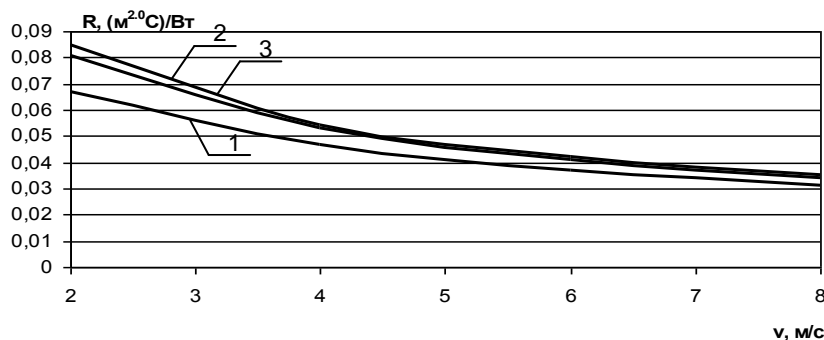


Рис. 3. Зависимость сопротивления теплообмену на внешней поверхности окна R_n от скорости ветра: 1 – при отсутствии экрана, $\epsilon_{ст} = 0,96$; 2 – при использовании экрана, выполненного из сильно окисленного алюминия, $\epsilon_{экp} = 0,2$; 3 – при использовании экрана, выполненного из полированного алюминия, $\epsilon_{экp} = 0,04$

Теплообмен с внутренней стороны окна в большей степени определяется видом течения воздушных масс, обтекающих внутреннюю поверхность остекления, и разностью температур между внутренним воздухом $t_{вн}$ и на поверхности стекла $\tau_в$.

Для вертикальных внутренних поверхностей $\alpha_{к.в}$ в отапливаемых помещениях В.Н. Богословским [2] предложено определять по формуле

$$\alpha_{к.в} = 1,66 \cdot \sqrt[3]{(t_{вн} - \tau_в)}. \quad (6)$$

Если в помещении работает рециркуляционный вентиляционный аппарат или приток в помещение осуществляется механической вентиляцией, конвекцию можно считать вынужденной и коэффициент конвективного теплообмена можно определить по формуле или по зависимости, рекомендуемой ASHRAE 1985b [2]:

$$\alpha_{к.в} = 5,6 + 3,9 \cdot v^2, \quad (7)$$

где v – скорость воздуха у внутренней поверхности ограждения, м/с.

Согласно полученным данным (табл. 3), теплоотдача излучением составляет от 54 до 67 % в теплообмене у внутренней поверхности стекла, а сопротивление теплопередаче незначительно меняется в пределах от 0,14 до 0,16 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт.

Таблица 3. Рассчитанные значения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления теплопередаче на внутренней поверхности окна в зависимости от разности температур ($t_{вн} - \tau_в$)

Параметры	Разность температур, °C			
	2	4	6	8
Коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{л.в}$, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)	4,02	3,97	3,92	3,88
Коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_{к.в}$, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$), по формуле (5)	2,09	2,64	3,02	3,32
Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{в}$, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)	6,11	6,60	6,94	7,20
Сопротивление теплопередаче $R_{в}$, ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт	0,16	0,15	0,14	0,14

При использовании в окнах двойной панели из теплоотражающих экранов, установленных с наружной стороны, в ходе расчетов и экспериментальных исследований было установлено, что разность температур ($t_{вн} - \tau_в$) лежит в пределах от 3 до 7 °C (в зависимости от температуры наружного и внутреннего воздуха), поэтому, на основании данных табл. 3, для проведения теплотехнических расчетов можно принять наименьшее из полученных значений $R_{в}$, равное 0,14 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт, а $\alpha_{в} = 7,0$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$).

Таким образом, для определения температуры дежурного отопления по выражению (1) приведенное сопротивление теплопередаче R_0 можно определить по формуле

$$R_0 = \frac{1}{7} + R_{т} + \frac{1}{(7,34 \cdot v^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v}) \cdot 1,03}. \quad (8)$$

Термическое сопротивление $R_{т}$, которое зависит от материалов, конструкции окна и разницы температур внутри и снаружи помещения, рекомендуется брать из сертификационных испытаний окон с теплоотражающими экранами при соблюдении разности между температурой внутреннего воздуха и расчетной температурой наружного воздуха для данного региона. Также, в крайнем случае, можно использовать результаты численного моделирования процесса теплопередачи через окно с экранами, реализованные, например, в средах Phoenix или Comsol.

Снижение допустимой температуры дежурного отопления за счет осушки воздуха. Моделировалось изменение приведенного сопротивления светопрозрачной части окна R_0 от 0,5 до полученных в результате эксперимента 1,757 $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, температура наружного воздуха $t_{н}$ задавалась от минус 10 до минус 30 °C, температура воздуха в рабочее время фиксировалась на уровне 20 °C. Расчет был произведен для относительной влажности φ , равной 35 и 50 %. Результаты расчетов иллюстрирует рис. 4.

Как и следовало ожидать, $t_{д}^{вн}$ будет значительно выше при более высокой влажности внутри помещения. Применение экранов также дает значительный эффект. Так, из расчетов следует, что при относительной влажности 35 %, наружной температуре минус 30 °C и использовании окон с И-стеклом и двумя теплоотражающими экранами минимально-допустимая температура воздуха при дежурном отоплении уменьшится с 16,4 до 7,8 °C относительно контроля 1, т. е. более чем на 8 °C, а при относительной влажности 50 % разница в температурах составит более 10 °C.

Однако стоит отметить, что при температуре наружного воздуха в минус 30 °C и повышенном сопротивлении окон с экранами минимальная температура воздуха, исходя из условия недопущения образования конденсата, при влажности в 50 % составит 13,4 °C, а при влажности 35 % – 7,8 °C (рис. 4). При меньшей температуре воздуха в случае применения дежурного режима отопления будут и меньшие затраты тепловой энергии для поддержания параметров микроклимата в помещении. Следовательно, в случае применения дежурного режима отопления и экранов в окнах было бы целесообразно дополнительно понизить влажность воздуха.

Высокая относительная влажность воздуха особенно характерна для производственных помещений таких текстильных предприятий [5], как хлопчатобумажные фабрики ($\varphi = 45\text{--}70\%$), шелковые фабрики ($\varphi = 50\text{--}70\%$), предприятия шерстяной промышленности ($\varphi = 60\text{--}75\%$), а также предприятий деревообработки и бумажной промышленности. Данные высокие значения влажности поддерживаются системами кондиционирования воздуха.

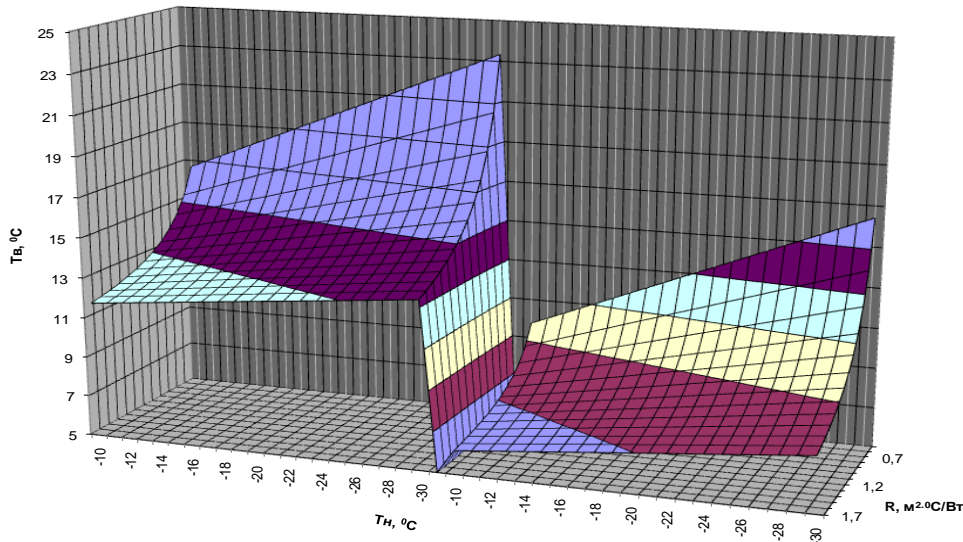


Рис. 4. Зависимость изменения минимально-допустимой температуры воздуха $T_{в}$ при дежурном режиме отопления от R и $t_{н}$: левая половина графика – при $\varphi = 50\%$; правая – при $\varphi = 35\%$

Были рассмотрены такие варианты осушки воздуха [6], применяемые в системах кондиционирования, как взаимодействие с охлажденным сорбентом (адсорбционный метод), организация контакта влажного воздуха с жидкой или твердой поверхностью, имеющей температуру ниже точки росы (конденсационный метод), а также процесс смешения с наружным воздухом (ассимиляция). В ходе проведенного анализа был сделан вывод, что наименее энерго- и ресурсозатратным вариантом будет случай со смешением воздуха, так как он не требует регенерации сорбента и больших расходов охлаждающей воды или электроэнергии, а наружный воздух в холодный период года обладает весьма низким влагосодержанием d (рис. 5, точка H).

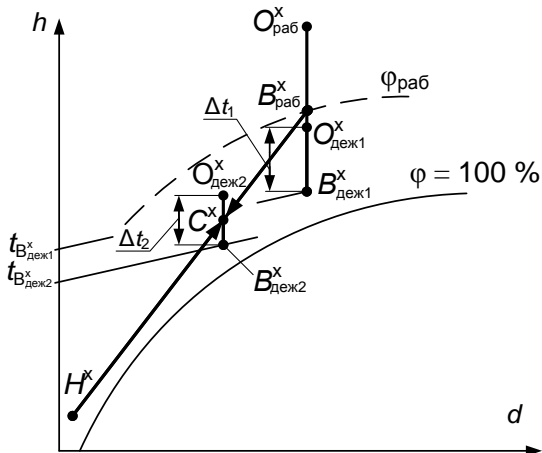
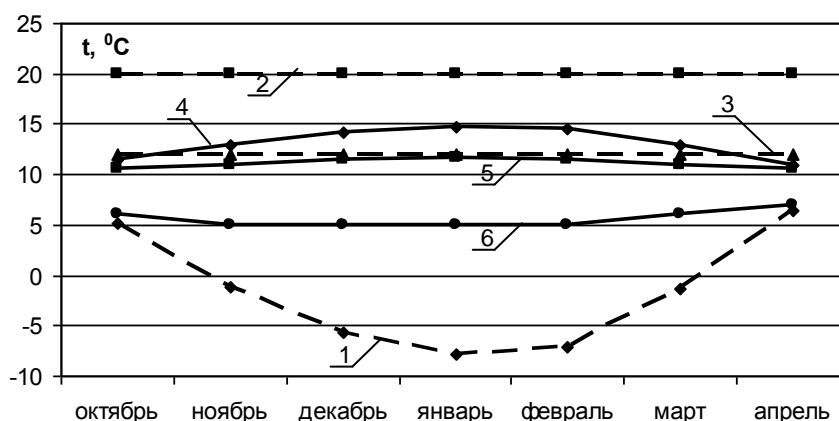


Рис. 5. Процесс снижения влагосодержания d и температуры воздуха t при дежурном режиме отопления с помощью системы кондиционирования в холодный период года (h – энтальпия воздуха)

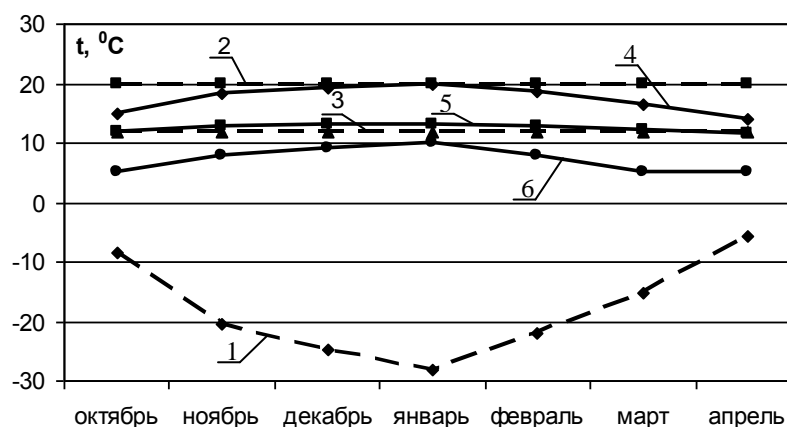
Была разработана методика по определению положения точки C , описывающей состояние среды после смешения наружного и внутреннего воздуха. Как известно, при дежурном

режиме отопления в случае использования системы кондиционирования воздуха целесообразно использовать полную рециркуляцию воздуха (процесс $B_{деж1} - O_{деж1}$). Но для понижения температуры воздуха в дежурном режиме мы предлагаем одновременно подмешать наружный воздух с низким влагосодержанием d . Положение точки C и, соответственно, степень рециркуляции $n_{рец}$ будут определяться минимальной температурой внутреннего воздуха в точке $B_{деж2}$, определенной по формуле (1), исходя из условия недопущения выпадения конденсата на окнах. Причем данная температура, учитывая требования нормативных документов, не должна быть ниже плюс $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. После снижения влагосодержания и температуры воздуха также предлагается применять полную рециркуляцию (процесс $B_{деж2} - O_{деж2}$). Разница температур (рис. 5) между приточным (точка O) и внутренним (точка B) воздухом при понижении влагосодержания Δt_2 будет меньше, чем в контроле (Δt_1), что объясняется меньшим количеством тепловой энергии, затрачиваемой в подогревателе кондиционера на компенсацию потерь через оболочку здания. Возврат к параметрам воздуха, поддерживаемым в рабочее время, будет осуществляться за счет обратного увлажнения воздуха в секции орошения и подогрева его в воздухонагревателе. К достоинствам данного способа осушки также следует добавить тот факт, что в помещение после рабочей смены будет подаваться свежий воздух, что сможет повысить чистоту внутреннего воздуха и благоприятно скажется на микрофлоре помещения и самочувствии людей.

Были произведены расчеты по вышеуказанной методике для помещений с высокой влажностью ($t_{раб} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi_{раб} = 50\%$), с использованием теплоотражающих экранов в окнах для условий Москвы и Норильска. Результаты расчетов температур приведены на рис. 6.



а)

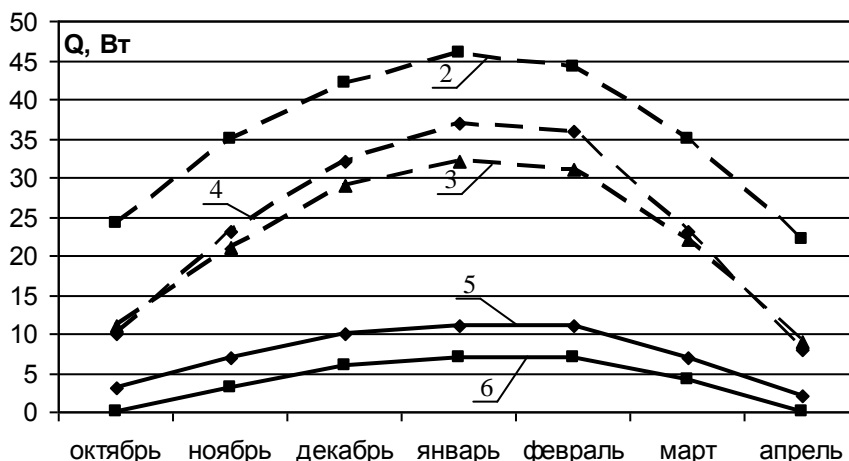


б)

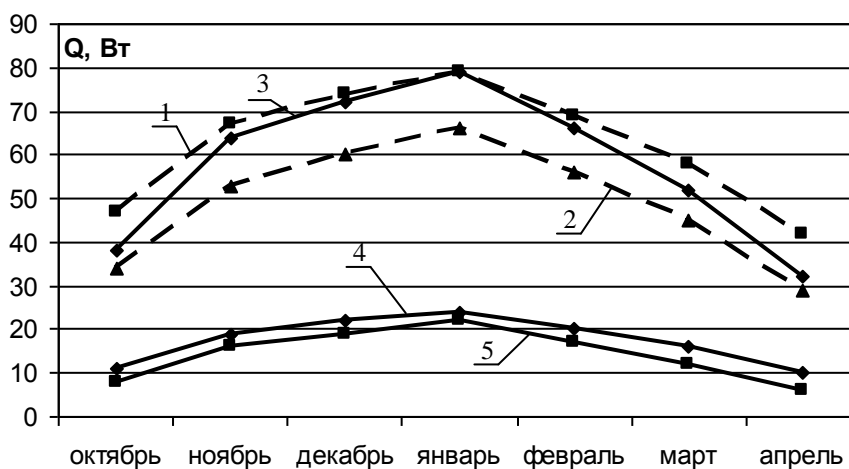
Рис. 6. Изменение температур воздуха в помещении t при «дежурном» режиме отопления для среднемесячных условий отопительного периода в Москве (а) и Норильске (б) в зависимости от вариантов использования экранов и осушки воздуха: 1 – среднемесячная температура наружного воздуха; 2 – температура внутреннего воздуха при рабочем режиме ($t_{\text{вн. деж. ст}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$); 3 – то же при стандартных условиях «дежурного» режима отопления в $t_{\text{вн. деж. ст}} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – то же при минимальной температуре «дежурного» режима исходя из условия недопущения конденсации без использования экранов $t_{\text{вн. деж. б/э}}$; 5 – то же при использовании экранов в окнах $t_{\text{вн. деж. с/э}}$; 6 – то же при использовании экранов в окнах и осушки воздуха $t_{\text{вн. деж. с/э+осуш}}$

Согласно расчетам и полученным данным (рис. 6,а), для условий Москвы при заданной начальной влажности воздуха в помещении, равной $\varphi_{\text{раб}} = 50\%$, и сопротивлению теплопередаче светопрозрачной части окна, равном $0,61\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, в период с ноября по март месяц допустимая температура воздуха при «дежурном» режиме отопления будет несколько выше нормируемого значения в $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. В случае использования теплоотражающего экрана в окнах температуру воздуха в некоторые месяцы можно будет понизить до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при дополнительном применении предварительной осушки воздуха температуру воздуха можно будет снизить до $5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для суровых климатических условий г. Норильска (рис. 6,б) получается еще более наглядная картина. Так, в случае отсутствия теплоотражающего экрана в окнах температуру при «дежурном» режиме отопления в январе нельзя будет опускать ниже значения $t_{\text{раб}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в остальные месяцы она будет значительно выше нормируемой $t_{\text{вн. деж. ст}} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$; использование экранов в окнах позволяет поддерживать температуру в пределах нормируемой и только совместное использование экранов и осушки воздуха позволяет понизить температуру воздуха до значений $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в октябре, марте, апреле, и до $8\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в оставшиеся месяцы холодного периода.



а)



б)

Рис. 7. Изменение тепловых потоков через окно при «дежурном» режиме отопления для среднемесячных условий отопительного периода в Москве (а) и Норильске (б) в зависимости от использования экранов и осушки воздуха: 1 – при температуре внутреннего воздуха при рабочем режиме ($t_{вн} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2 – то же при стандартных условиях «дежурного» режима отопления в $t_{вн. деж. ст} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – то же при минимальной температуре «дежурного» режима исходя из условия недопущения конденсации без экрана $t_{вн. деж. б/э}$; 4 – то же при использовании экранов в окнах $t_{вн. деж. с/э}$; 5 – то же при использовании экранов в окнах и осушке воздуха $t_{вн. деж. с/э+осуш}$

Согласно полученным данным (рис. 7), в январе для условий Москвы можно снизить тепловые потери через 1 м^2 светопрозрачной части окна с 46 Вт при стандартных условиях ($t_{вн} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) до 11 Вт (или на 76 %) в случае использования экранов в окнах или до 7 Вт (или на 85 %) в случае совместного использования экранов и осушки воздуха; для Норильска произойдет снижение со «стандартных» 79 до 24 Вт (или на 70 %) в первом случае и до 22 Вт (на 73 %) во втором. Необходимо отметить, что относительное снижение тепловых потерь больше для условий Москвы, но для потребителя важным критерием является снижение в натуральных величинах, так как оно неразрывно связано с потреблением тепловой энергии и затратами на топливно-энергетические ресурсы (ТЭР), поэтому экономия теплоты для условий Норильска является более существенной.

Для остальных месяцев холодного периода вышеуказанные тенденции сохраняются.

Определение экономии тепловой энергии за отопительный период. После обработки статистических данных, полученных с Росгидромета и метеослужб Франции, были определены продолжительности светового дня по месяцам для различных городов РФ. Как известно, экраны целесообразно использовать в темное время суток и во время отсутствия людей. График работы персонала принят с 8 до 17 часов. В декабре месяце в г. Норильске наступает полярная ночь, солнце не поднимается над горизонтом, поэтому экраны используются круглосуточно.

Был проведен анализ времени использования экранов для городов РФ и Франции, представляющих различные климатические зоны (табл. 4).

Таблица 4. Число рабочих дней и продолжительность времени неиспользования теплоотражающих экранов в течение суток (среднее по месяцам) в окнах для различных городов РФ и Франции

Город	Число часов в течение суток неиспользования экранов (среднее по месяцам)											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Мурманск	2	7,50	9	9	9	9	9	9	9	9	4,5	0
Норильск	2	7,50	9	9	9	9	9	9	9	9	4,5	0
Москва	7,50	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8,5	7
Сочи	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Страсбург	8,5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8,5
Париж	8,5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8,5
Лион	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Марсель	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Рабочих дней в 2015 году, Россия/Франция	$\frac{15}{20}$	$\frac{19}{20}$	$\frac{21}{22}$	$\frac{22}{21}$	$\frac{18}{17}$	$\frac{21}{22}$	$\frac{23}{22}$	$\frac{21}{21}$	$\frac{22}{22}$	$\frac{22}{22}$	$\frac{20}{21}$	$\frac{22}{22}$

Для определения экономии тепловой энергии потребовались также дополнительные характеристики по городам, в том числе географическая широта S , количество дней отопительного периода $n_{от.пер}$, число часов неиспользования и использования экранов в течение отопительного периода n_1 и n_2 соответственно, расчетная температура наружного воздуха $t_{расч}$ и средняя температура наружного воздуха за отопительный период $t_{ср.от}$. Данные для рассматриваемых городов приведены в табл. 5.

Интересно было отметить, что для городов, находящихся практически на одной широте (68–69 ° сев. широты), климатические данные значительно отличаются: в Мурманске отопительный период длится 275 дней, в Норильске – круглый год, расчетная температура наружного воздуха для Мурманска составляет минус 30 °С, а для Норильска – минус 40 °С. Несмотря на то, что Франция располагается южнее 52° северной широты (южнее Российского Белгорода) и климат значительно более теплый, отопительный период дольше, чем для большинства городов Центрального федерального округа России.

Расчет производили для окна со стеклопакетом 4М1х10х4М1х10х4И (с теплоотражающим «И» покрытием) с использованием панельного экрана, состоящего из двух металлических листов, разделенных малотеплопроводной рамкой (табл. 1). Стоит особо отме-

тить, что при расчетах не учитывалась инерционная составляющая ограждающих конструкций зданий (стен, окон и т.д.) и систем энергообеспечения, что дает несколько завышенные, «теоретические» значения экономии тепловой энергии. Объективные расчеты необходимо производить для конкретных зданий по общеизвестным методикам.

Внутри помещения в рабочее время суток принималась расчетная температура в 20 °С и относительная влажность 40 %. В нерабочее время (и темное время) суток предусматривалось применение экранов, снижение температуры воздуха при дежурном отоплении в двух вариантах – до нормируемых 12 °С (16 °С – для условий Франции) и до минимально-допустимой температуры воздуха при выполнении условия недопущения образования конденсата на светопрозрачных конструкциях. Определялись потери теплоты за отопительный период с 1 квадратного метра окна. Данные расчетов представлены в табл. 6, 7.

Максимальную экономию тепловой энергии получаем во всех городах в случае использования панельного теплоотражающего экрана и системы автоматизации, рассчитанной на поддержание в нерабочее время дежурного режима отопления с минимально-допустимой температурой воздуха, исходя из условия недопущения конденсации, причем максимальную экономию (0,235 Гкал) получили для условий города Норильска.

Таблица 5. Климатические характеристики городов

Город	S , град. сев. широты	$n_{от.пер}$, дней	$t_{ср.от}$, °С	$t_{расч}$, °С	n_1 , ч	n_2 , ч
Мурманск	68	275	-3,4	-30	1237	5363
Норильск	69	365	-11,5	-40	1786	6974
Москва	55	205	-2,2	-25	1162	3758
Сочи	43	94	6,6	-2	549	1707
Страсбург	48	232*	5,8	-15	1410	4158
Париж	48	232*	7,4	-7	1410	4158
Лион	45	232*	7,4	-8	1431	4137
Марсель	43	232*	11,1	-5	1431	4137

* Во Франции отопительный период для всех городов установлен с 01 октября по 20 мая.

Таблица 6. Потери теплоты за отопительный период с одного квадратного метра светопрозрачных конструкций, Гкал

Город	Контроль, Q_k	С применением дежурного режима отопления ($t_{\text{деж}} = 12^\circ\text{C}$ и 16°C), $Q_{\text{деж}}(12/16)$	С применением экрана, Q_3	С применением экрана и дежурного режима отопления ($t_{\text{деж}} = 12^\circ\text{C}$ и 16°C), $Q_{\text{деж}}(12/16)+\varepsilon$	С применением экрана и дежурного режима отопления с пониженной температурой, $Q_{\text{деж}}(\text{min})+\varepsilon$
Норильск	0,389	0,315	0,237	0,168	0,154
Мурманск	0,217	0,162	0,124	0,098	0,084
Москва	0,154	0,112	0,096	0,075	0,062
Сочи	0,043	0,023	0,027	0,017	0,011
Страсбург	0,111	0,088	0,057	0,049	0,028
Париж	0,099	0,076	0,051	0,042	0,025
Лион	0,099	0,076	0,052	0,044	0,026
Марсель	0,07	0,046	0,036	0,028	0,018

Таблица 7. Экономия теплоты за отопительный период с одного квадратного метра светопрозрачных конструкций, Гкал / %

Город	Контроль, Q_k	С применением дежурного режима отопления ($t_{\text{деж}} = 12^\circ\text{C}$ и 16°C), $Q_{\text{деж}}(12/16)$	С применением экрана, Q_3	С применением экрана и дежурного режима отопления ($t_{\text{деж}} = 12^\circ\text{C}$ и 16°C), $Q_{\text{деж}}(12/16)+\varepsilon$	С применением экрана и дежурного режима отопления с пониженной температурой, $Q_{\text{деж}}(\text{min})+\varepsilon$
Норильск	–	0,074 / 19	0,152 / 39	0,221 / 57	0,235 / 61
Мурманск	–	0,055 / 25,4	0,093 / 43	0,119 / 55	0,133 / 62
Москва	–	0,042 / 27	0,058 / 38	0,079 / 51,4	0,092 / 60
Сочи	–	0,02 / 45	0,016 / 37,2	0,026 / 60	0,032 / 74
Страсбург	–	0,023 / 21	0,054 / 49	0,062 / 56	0,083 / 75
Париж	–	0,023 / 23	0,048 / 48	0,057 / 58	0,074 / 75
Лион	–	0,023 / 23	0,047 / 47	0,055 / 56	0,073 / 74
Марсель	–	0,024 / 34	0,034 / 49	0,042 / 60	0,052 / 74

Для южных городов России и большинства населенных пунктов Франции в случае использования предложенных энергосберегающих мероприятий годовое потребление тепловой энергии на компенсацию трансмиссионных потерь будет минимально (от 0,11 до 0,28 Гкал/м²).

Для определения реальной экономии тепловой энергии в случае использования прерывистого режима отопления, согласно рекомендациям ученых, занимающихся данным вопросом [2, 7–9], важно учитывать инерционные возможности отопительных приборов (конвекторы – обладают малой инерционностью, чугунные радиаторы и нагревательная панель в стене – высокой), способы отопления (водяное отопление – инерционная, воздушное – малоинерционная система), теплоустойчивость по-

мещений, способы организации «натопа» помещений.

На основании общеизвестной методики по моделированию теплового режима помещений при прерывистом отоплении была определена годовая экономия тепловой энергии, расходуемой на отопление административного здания компрессорной газоперекачивающей станции КС «Ивановская» (табл. 8). Расчет был произведен в случае использования воздушного отопления здания. В здании установлены окна со стеклопакетом 4M1x10x4M1x10x4И, предлагается применить теплоотражающую панель из двух теплоотражающих экранов. Согласно расчетам, в случае использования в темное время суток и во время отсутствия людей экранов без применения прерывистого режима отопления затраты тепловой энергии снижались с 611 до 465 ГДж (или на 24 %).

Таблица 8. Затраты и экономия тепловой энергии, расходуемой на отопление административного здания компрессорной газоперекачивающей станции КС «Ивановская» (за отопительный период)

Физическая величина	Варианты				
	Контроль	С применением дежурного режима отопления ($t_{\text{деж}} = 12^\circ\text{C}$)	С применением экранов в окнах	С применением экрана и дежурного режима отопления ($t_{\text{деж}} = 12^\circ\text{C}$)	С применением экрана и дежурного режима отопления с пониженной температурой
Суммарные теплопотери через ограждающие конструкции, ГДж	611	486	465	380	279
Экономия теплоты за отопительный период через ограждающие конструкции, ГДж / %	–	125 / 20	146 / 24	231 / 38	332 / 54

В случае использования экранов в окнах и пониженной температуры воздуха в помещении при применении прерывистого режима отопления (во время отсутствия людей) тепловые затраты снижались до 279 ГДж (или на 54 %). Такая экономия тепловой энергии весьма значительна и удовлетворяет вышеуказанным требованиям по энергосбережению (сокращение на 40 % потребления энергии).

Заключение

Применение предложенных конструкций окон с теплоотражающими экранами, прерывистого режима отопления с предварительной осушкой воздуха, методики по определению минимально-допустимой температуры воздуха исходя из условия недопущения выпадения конденсата поможет добиться значений потребления энергоресурсов, устанавливаемых для зданий российскими и европейскими нормами [1]. Предложенные технологии являются весьма актуальными и доступными для объектов ЖКХ, общественно-административных и производственных зданий.

Список литературы

1. **Энергосберегающий** потенциал от использования теплоотражающих экранов с солнечными батареями в окнах для систем энергоснабжения зданий / В.М. Захаров, В.В. Тютиков, Н.Н. Смирнов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 5. – С. 13–24.
2. **Малявина Е.Г.** Теплотери здания. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. – 144 с.
3. **Савин В.К.** Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение. – М.: Лазурь, 2007. – 432 с.
4. **Фокин К.Ф.** Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
5. **Пыжов В.К.** Энергетические системы обеспечения жизни и деятельности человека. – Иваново, 2014. – 524 с.
6. **Тюрина Е.В., Ивашкевич А.А.** Осушение воздуха в помещении бассейна // Труды НИРС ТТГВ ТОГУ. – Хабаровск: ТОГУ, 2010. – С. 35–43.

Р.С. Авторы выражают благодарность заведующему кафедрой русского и французского языков ИГЭУ канд. филол. наук А.П. Шумаковой за профессиональную помощь в переводе материалов статьи при ее написании сотрудниками COSTIC и ИГЭУ.

Захаров Вадим Михайлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики,
телефон (4932) 26-97-24,
e-mail: colia@rambler.ru

Пыжов Валерий Константинович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики,
телефон (4932) 26-97-24,
e-mail: pvk@pte.ispu.ru

Смирнов Николай Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доцент кафедры промышленной теплоэнергетики,
телефон (4932) 26-97-89,
e-mail: nsmirnov@bk.ru

7. **Табунщиков Ю.А., Бродач М.М.** Экспериментальные исследования оптимального управления расходом энергии // АВОК. – 2006. – № 1. – С. 32–40.
8. **Табунщиков Ю.А., Бродач М.М.** Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
9. **Панферов В.И., Анисимова Е.Ю.** Анализ возможности экономии тепловой энергии при прерывистом режиме отопления // Вестник ЮУрГУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2008. – Вып. 6. – № 12. – С. 30–37.

References

1. Zakharov, V.M., Tyutikov, V.V., Smirnov, N.N., Lapateev, D.A., Flaman, B., Barba, M. Energosberegayushchiy potentsial ot ispol'zovaniya teplootrazhayushchikh ekranov s solnechnymi batareyami v oknakh dlya sistem energosnabzheniya zdaniy [Energy-saving potential of heat-reflective shields with solar batteries in windows for power supply systems of buildings]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 2, pp. 5–14.
2. Malyavina, E.G. *Teplopoteri zdaniya* [Heat loss of the building]. Moscow, AVOK-PRESS, 2007. 144 p.
3. Savin, V.K. *Stroitel'naya fizika: energopereenos, energoeffektivnost', energosberezhenie* [Building physics: energy transfer, energy efficiency, energy saving]. Moscow, Lazur', 2007. 432 p.
4. Fokin, K.F. *Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniy*. [Building thermal engineering of walling]. Moscow, Stroyizdat, 1973. 287 p.
5. Pyzhov, V.K. *Energeticheskie sistemy obespecheniya zhizni i deyatel'nosti cheloveka* [Power engineering systems of human life and activity support]. Ivanovo, 2014. 524 p.
6. Tyurina, E.V., Ivashkevich, A.A. *Osushenie vozdukh v pomeshchenii basseyna* [Indoor dehumidification in pools]. *Trudy NIRS TTGV TOGU*. Khabarovsk, 2010, pp. 35–43.
7. Tabunshchikov, Yu.A., Brodach, M.M. *Ekspериментal'nye issledovaniya optimal'nogo upravleniya raskhodom energii* [Experimental study of optimal control of energy consumption]. *AVOK*, 2006, no. 1, pp. 32–40.
8. Tabunshchikov, Yu.A., Brodach, M.M. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teplovoy effektivnosti zdaniy* [Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings]. Moscow, AVOK-PRESS, 2002. 194 p.
9. Panferov, V.I., Anisimova, E.Yu. *Analiz vozmozhnosti ekonomii teplovoy energii pri preryvistom rezhime otopleniya* [Analysis of potential saving of thermal energy in the intermittent heating mode]. *Vestnik YuUrGU: Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2008, issue 6, no. 12, pp. 30–37.

Лапатеев Денис Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики,
телефон (4932) 26-97-89,
e-mail: l.denis7789@yandex.ru

Flament Bernard,
Institut National des Sciences Appliquees de Strasbourg,
Ph.D., responsable des formations d'ingénieur en Génie Climatique et Energétique,
e-mail: bernard_flament@insa-strasbourg.fr