

УДК 621.311.001

Энергосберегающий потенциал от использования теплоотражающих экранов с солнечными батареями в окнах для систем энергоснабжения зданий

В.М. Захаров¹, В.В. Тютиков¹, Н.Н. Смирнов¹, Д.А. Лапатеев¹, Б.Фламан², М.Барба²
¹ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

²Национальный институт прикладных наук, г. Страсбург, Франция

³Научно-технический комитет по промышленной климатологии, г. Сен Реми ле Шеврез, Франция
E-mail: nsmirnov@bk.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Известны новые энергосберегающие конструкции окон с теплоотражающими экранами, однако для практического использования необходима их интеграция в системы автоматического управления теплоснабжением зданий и определение эффективности их использования с учетом существующих энергосберегающих мероприятий.

Материалы и методы: Использованы результаты натурных испытаний окон с теплоотражающими экранами в сертифицированной климатической камере. Результаты обработаны методами математической статистики. Многовариантные расчеты показателей использования энергосберегающих окон в системах теплоснабжения зданий осуществлены с использованием программного комплекса Mathcad.

Результаты: Разработана методика по определению минимальной температуры воздуха внутри помещения при дежурном режиме отопления в случае использования в окнах теплоотражающих экранов. Разработаны многофункциональный энергоэффективный ставень с солнечной батареей и автоматизированная система регулирования теплоснабжения зданий с применением теплоотражающих экранов.

Выводы: Применение окон с теплоотражающими экранами и солнечной батареей дает тройной энергетический эффект: в отопительный период уменьшаются теплотери за счет увеличения сопротивления окна, снижаются затраты теплоты на нагрев помещения за счет понижения температуры воздуха внутри помещения, а также происходит выработка электрической энергии.

Ключевые слова: окна с теплоотражающими экранами, дежурный режим отопления, солнечные батареи, образование конденсата на окнах, температура точки росы, относительная влажность воздуха, экономия энергоресурсов, система регулирования теплоснабжения.

Energy-saving potential of using heat-reflective screens with solar batteries in windows for power supply systems of buildings

V.M. Zakharov¹, V.V. Tyutikov¹, N.N. Smirnov¹, D.A. Lapateev¹, B. Flament², M. Barbat³

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

²Institut National des Sciences Appliquees de Strasbourg, France

³Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques, Saint Rémy lès Chevreuse, France

E-mail: nsmirnov@bk.ru

Abstract

Background: The new energy saving windows with heat-reflecting shields are well known, but for their practical use, they need to be integrated into the automated heat supply control systems of buildings and should be efficient according to the standard energy-saving procedures.

Materials and methods: The study was based on the results of field tests of windows with heat-reflective shields in a certified climate chamber. The results were processed by the methods of mathematical statistics. Multivariant calculations of energy efficient windows performance in the heating of buildings were carried out using the Mathcad software.

Results: We have developed a method to determine the minimum indoor air temperature under standby heating with heat-reflective shields in the windows as well as a multifunctional energy-efficient shutter with a solar battery and an automated heat supply control system using heat-reflecting screens.

Conclusions: Windows with heat-reflecting screens and a solar battery have a triple power-saving effect: reduced heat losses during the heating season due to increased window resistance, lower cost of heating buildings due to lowering of indoor ambient temperature, and electric power generation.

Key words: windows with heat-reflective shields, standby heating mode, solar cells, condensation on windows, dew point temperature, relative air humidity, energy saving, heating control system.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.2.005-014

Введение. 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, законода-

тельные органы Европейского союза устанавливают коэффициент сопротивления теплопередаче окон к 2020 году на уровне $1,67 \div 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, а Российские органы власти к 2016 году – на уровне $1,0 \div 1,05 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. 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.

Авторами [1] разработаны и запатентованы [2, 3] 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 отсутствие людей. Экраны могут располагаться внутри помещения, снаружи или в межстекольном пространстве. Применение экранов не только снижает тепловые трансмиссионные потери, но и позволяет понизить температуру воздуха при «дежурном» режиме отопления. Возникла потребность в создании системы автоматизации управления экранов в окнах, а также в методике по определению температуры воздуха при «дежурном» режиме отопления.

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 4M1x10x4M1x10x4M1, а также стеклопакет 4M1x10x4M1x10x4И с нанесением на стекло низкоэмиссионного покрытия.

Исходя из полученных данных (см. таблицу) применение И-стекла (с низкоэмиссионным покрытием) дало увеличение сопротивления теплопередаче с $0,47$ до $0,61 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ (на 29 %), а применение со стороны холодного отделения камеры дополнительно панели из двух металлических экранов, размещенных на расстоянии 10 мм друг от друга, повысило сопротивление до $1,76 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ (на 274 % к контролю 1 или на 189 % к контролю 2).

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 °C – в жилых помещениях; 12 °C – в помещениях общественных и административно-бытовых зданий; 5 °C – в «сухих» производственных помещениях.

В понижении температуры воздуха во время дежурного режима отопления заложен большой энергосберегающий потенциал. В большой степени минимальная температура воздуха при применении дежурного режима отопления определяется исходя из условий недопущения образования конденсата на ограждающих поверхностях. Мы говорим о большой вероятности выпадения конденсата на окнах, так как именно светопрозрачные конструкции являются «слабым местом» в теплозащите зданий.

Стоит отметить, что появление влаги на стеклах является не только эстетическим дефектом, – в дальнейшем постоянное выпадение конденсата может привести к увлажнению конструкций [4, 5], которое способно стать причиной образования грибка и плесени на подоконниках. Особое внимание следует уделить окнам с горизонтальным и наклонным расположением, а также зенитным фонарям, так как, согласно Своду правил СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», температура на внутренней поверхности должна быть не ниже температуры точки росы внутреннего воздуха при расчетной температуре наружного воздуха в холодный период года.

Относительная влажность воздуха в помещении является нормируемой величиной (для общественно-административных и жилых – от 30 до 65 %), и именно от влажности воздуха, сопротивления теплопередаче окна, температуры наружного воздуха и зависит температура точки росы на внутреннем остеклении, а значит, и минимальная температура воздуха при дежурном режиме отопления (при известном коэффициенте теплоотдачи на внутренней поверхности окна).

Как показали расчеты и опытные данные (см. таблицу), при применении в окнах теплоотражающих экранов, установленных снаружи, увеличивается сопротивление теплопередаче до $1,76 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ и значительно повышается температура на внутреннем стекле. Следовательно, мы можем дополнительно понизить температуру воздуха внутри помещения (в зависимости от влажности внутри помещения) во время отсутствия людей.

Нам было интересно выяснить, каким образом можно определить значение температуры (рис. 1), до которой система автоматизации сможет понизить температуру воздуха при дежурном режиме отопления при условии недопущения выпадения конденсата на внутренней поверхности стекла окна с повышенными теплозащитными свойствами (с применением теплоотражающих экранов).

Данные испытаний теплоотражающих экранов в окнах с низкоэмиссионным покрытием

Вариант	Тепловой поток q , [Вт/м ²]	Температура на внутреннем стекле t_w , [°C]	Приведенное сопротивление теплопередаче R , [м ² ·°C/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	–
2 экрана с холодной стороны	20,77	18,65	1,757	3,74	2,89

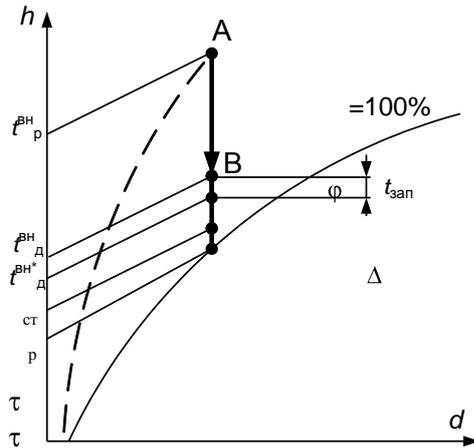


Рис. 1. К определению температуры воздуха при дежурном режиме отопления

Минимальную температуру внутреннего воздуха при дежурном режиме отопления можно определить следующим образом:

$$t_D^{BH} = t_D^{BH*} + \Delta t_{\text{зап}}; \tag{1}$$

$$t_D^{BH*} = \tau_{\text{ст}}^* + \frac{q}{\alpha_{\text{вн}}} = \tau_p + \frac{(t_D^{BH*} - t_n)}{\alpha_{\text{вн}} \cdot R_{\text{окна}}}, \tag{2}$$

где t_D^{BH*} – температура внутреннего воздуха, при которой на стекле начинает образовываться конденсат, т.е. когда $\tau_{\text{ст}}^* = \tau_p$, °C; τ_p – температура точки росы при параметрах воздуха в рабочее время, °C; $\tau_{\text{ст}}^*$ – температура на внутренней поверхности остекления, °C; $\Delta t_{\text{зап}}$ – температурный запас по недопущению конденсации (принимается в 1 °C); t_n – температура наружного воздуха, °C; q – удельный тепловой поток, Вт/м²; $R_{\text{окна}}$ – приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной зоны окна, м²·°C /Вт; $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к стеклу, принимаем 8,7 Вт /м²·°C.

Следовательно,

$$t_D^{BH*} \alpha_{\text{вн}} R_{\text{окна}} = \tau_p \alpha_{\text{вн}} R_{\text{окна}} + t_D^{BH*} - t_n \Rightarrow$$

$$t_D^{BH*} = \frac{\tau_p \alpha_{\text{вн}} R_{\text{окна}} - t_n}{\alpha_{\text{вн}} R_{\text{окна}} - 1}. \tag{3}$$

Температуру точки росы воздуха, находящегося в помещении в рабочее время, можно определить по формуле Магнуса–Тетенса [6] с погрешностью ±0,2 °C (в диапазоне температур от 5 до 25 °C и в диапазоне относительных влажностей от 10 до 70 %):

$$\tau_p = \frac{b \cdot \gamma(t_p^{BH}, \varphi_p^{BH})}{a - \gamma(t_p^{BH}, \varphi_p^{BH})}, \tag{4}$$

где $a = 17,27$; $b = 237,7$;

$$\gamma(t_p^{BH}, \varphi_p^{BH}) = \frac{a \cdot t_p^{BH}}{b + t_p^{BH}} + \ln \left(\frac{\varphi_p^{BH}}{100} \right). \tag{5}$$

Получаем

$$t_D^{BH} = \frac{\tau_p \alpha_{\text{вн}} R_{\text{окна}} - t_n}{\alpha_{\text{вн}} R_{\text{окна}} - 1} + \Delta t_{\text{зап}}. \tag{6}$$

Таким образом, зная приведенное сопротивление окна $R_{\text{окна}}$ в нерабочее время суток, температуру наружного воздуха, температуру и относительную влажность воздуха в рабочее время, можно определить минимальное значение температуры воздуха при дежурном режиме отопления.

Согласно полученным формулам, в вычислительных средах Mathcad и Excel нами была составлена программа по вычислению минимальной температуры воздуха при дежурном режиме отопления и использовании окон с теплоотражающими экранами.

Моделировалось изменение приведенного сопротивления светопрозрачной части окна R от 0,5 до полученных в результате эксперимента 1,757 м²·°C/Вт, температура наружного воздуха t_n 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 показаны на рис. 2.

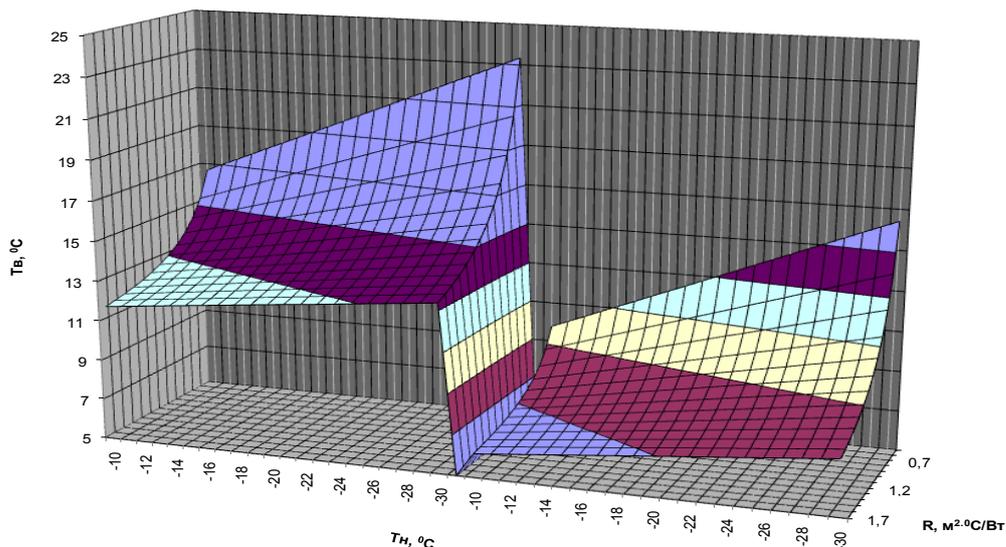


Рис. 2. Зависимость изменения минимально-допустимой температуры воздуха $T_{в}$ при дежурном режиме отопления от R и $t_{н}$: левая половина графика – при $\phi = 50\%$; правая – при $\phi = 35\%$

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 в минус 30 °С и использовании окон с И-стеклом и двумя теплоотражающими экранами минимально-допустимая температура воздуха при дежурном отоплении уменьшится с 16,4 до 7,8 °С относительно контроля 1, т. е. более чем на 8 °С, а при относительной влажности 50 % разница в температурах составит более 10 °С.

Нами была разработана и запатентована конструкция панели из теплоотражающих эк-

ранов с применением с наружной стороны солнечной батареи [7]. Использование солнечной батареи позволяет вырабатывать электрическую энергию [8], обеспечивающую не только автономную работу окна с теплоотражающими экранами, но и частично (или полностью) покрывающую электрическую нагрузку потребителя, а также, при больших объемах генерации, подаваемую во внешнюю электрическую сеть, причем КПД преобразования солнечного света в электроэнергию достигает 20 %.

На рис. 3 приведен наружный ставень с четырьмя теплоотражающими экранами.

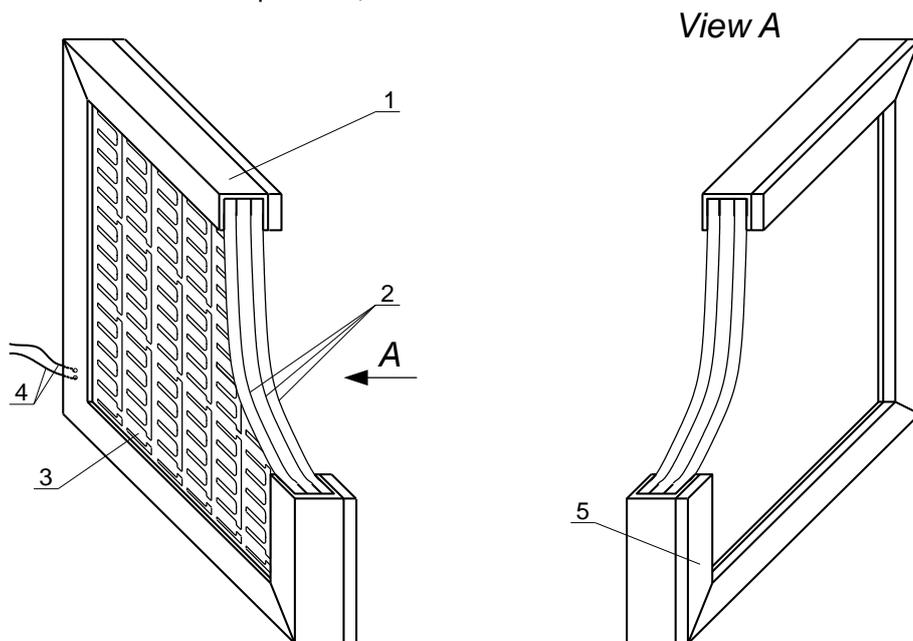


Рис. 3. Многофункциональный энергоэффективный ставень

Наружный ставень содержит раму 1, выполненную, например, из пластикового материала, и теплоотражающие экраны 2, выполненные, например, из алюминиевой фольги. Расстояние между соседними теплоотражающими экранами 2 может составлять от 5 до 10 мм. Наружные теплоотражающие экраны 2 выполнены из алюминиевого листа толщиной не менее 200 мк, для обеспечения надежности конструкции и целостности экранов, внутренние теплоотражающие экраны выполнены из алюминиевой фольги толщиной 7–15 мк. С наружной стороны ставень снабжен солнечной батареей 3, состоящей, например, из тонкопленочных фотоэлементов [8], которая подключается к контроллеру (или к модульному центру) при помощи токопроводов 4. По периметру рамы 1 со стороны закрываемого проема закреплен уплотняющий шнур 5. Наружный ставень устанавливается таким образом, чтобы в положении, когда проем закрыт, он плотно примыкал к наружной поверхности стены здания и обеспечивал исключение конвекции. Предусмотрено автоматическое (посредством электропривода) управление, обеспечивающее экономию времени на перемещение ставень при большом

количестве окон, например, в производственных помещениях.

Получаем, что при применении окон с теплоотражающими экранами и солнечной батареей наблюдается тройной энергетический эффект: в отопительный период уменьшаются теплопотери за счет увеличения сопротивления окна, снижаются затраты теплоты на нагрев помещения за счет понижения температуры воздуха внутри помещения, а также происходит выработка электрической энергии.

Автоматизированная система регулирования теплоснабжения зданий с применением теплоотражающих экранов. Принимая во внимание последние инновации в области регулирования теплового режима здания с учетом быстрых и медленных тепловых потерь через наружные ограждающие конструкции [9], также была разработана и запатентована автоматизированная система регулирования теплоснабжения зданий с применением теплоотражающих экранов (рис. 4), которая поддерживает оптимальную (заданную или рассчитываемую) температуру в жилых или производственных помещениях.

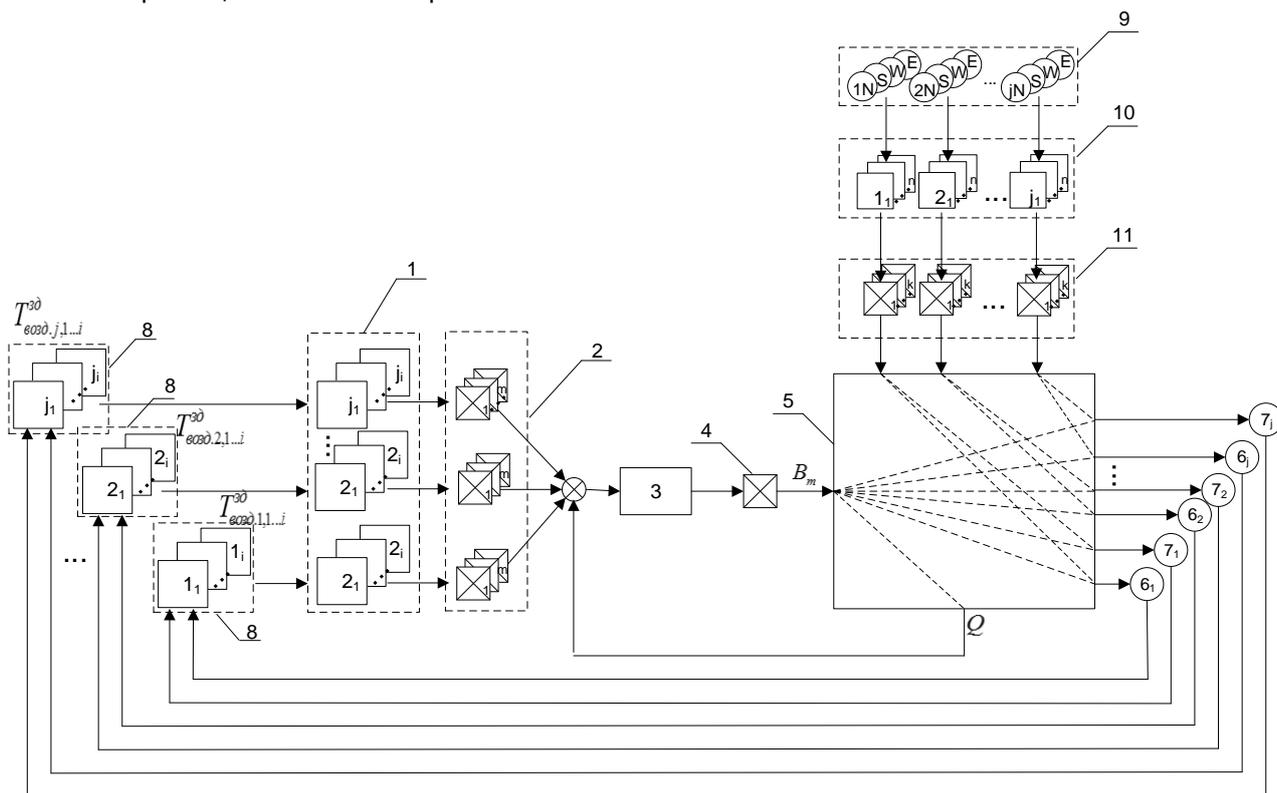


Рис. 4. Автоматизированная система регулирования теплоснабжением зданий с применением теплоотражающих экранов: 1 – регуляторы температуры воздуха в помещениях; 2 – регулирующие клапаны отопительных приборов; 3 – регулятор расхода топлива на котел; 4 – регулирующий орган подачи топлива на котел; 5 – объект управления; 6 – датчики температуры воздуха в помещениях; 7 – датчики влажности в помещениях; 8 – блоки расчета температуры воздуха дежурного отопления или блоки задатчиков; 9 – датчики наружной освещенности, расположенные по фасадам; 10 – регуляторы положения теплоотражающих экранов; 11 – электроприводы теплоотражающих экранов; $1 \dots j$ – номер помещения/комнаты; $1 \dots j$ – номер здания; $1 \dots n$ – номер регулятора положения теплоотражающих экранов; $1 \dots k$ – номер электропривода теплоотражающих экранов; $1 \dots m$ – номер регулирующего клапана отопительного прибора; N, S, W, E – северный, южный, западный и восточный фасады здания соответственно

Теплоотражающие экраны оконных блоков опускаются в темное время суток и во время отсутствия людей в помещениях по заданному графику или сигналу от датчиков наружной освещенности в зависимости от выбранного алгоритма управления. Сигнал по уровню освещенности снаружи здания поступает от датчиков наружной освещенности, расположенных по фасаду. При опускании теплоотражающих экранов уменьшаются тепловые потери через оконные проемы, увеличивается температура внутри помещения, что позволяет уменьшить расход топлива на отопление.

Разработанная система позволяет поддерживать различную температуру воздуха во всех помещениях здания за счет регулирования расхода теплоносителя в отопительный прибор. Изменение же расхода топлива в котел влияет на изменение температуры воздуха во всех помещениях. Расход топлива соответствует максимально заданной температуре воздуха в здании.

Система регулирования для промышленных зданий дополнительно реализует дежурный режим отопления, при котором задаваемая температура воздуха внутри помещения рассчитывается по формуле (6).

Система может быть реализована на основе оборудования домашней автоматизации, работающего по открытому протоколу KNX (например, Siemens Synco Living) или промышленных контроллерах.

Заключение

В использовании в качестве энергосберегающих мероприятий не только теплоотражающих экранов с солнечными батареями, системы автоматизации теплоснабжения здания с применением дежурного режима отопления, утилизации теплоты вытяжного воздуха посредством теплообменников-рекуператоров [10, 11], но и новых разработок и результатов исследований научных сотрудников COSTIC и INSA в области «гибридной» вентиляции, в области повышения герметичности зданий и контролируемой подачи свежего воздуха в зависимости от концентрации углекислого газа в помещении заложен большой энергосберегающий потенциал для систем энергоснабжения зданий как в ЖКХ, так и в промышленном секторе.

Применение предложенных конструкций окон поможет добиться значений потребления энергоресурсов, устанавливаемых для зданий Российскими и Европейскими нормами [1].

Список литературы

1. **Разработка** и испытание автоматизированных окон с теплоотражающими экранами, отвечающих Российским и Европейским требованиям в области энергосбережения / С. Бомон, Э. Хольтсвейлер, В.М. Захаров и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 13–24.

2. **Свидетельство** на полезную модель Российской Федерации 16011 от 07.03.2000 г. Оконный блок / В.М. Захаров, В.М. Яблоков, Н.М. Ладаев. – М., 2000.

3. **Пат.** на полезную модель №135696. Автоматизированный оконный блок / В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов, А.А. Яблоков, Д.А. Лапатева. Заявка №2013130095/12, приоритет от 01.07.2013 г. Зарегистр. 01.07.2013 г. Опубл. 20.12.2013 г. Бюл. № 35.

4. **Merrill J.L., TenWolde A.** Overview of moisture-related damage in one group of Wisconsin manufactured houses // ASHRAE Transactions. – 1989. – Vol. 95, issue 1.

5. **Muneer T., Abodahab N.** Frequency of condensation occurrence on double-glazing in the United Kingdom // Energy conversion and management, Elsevier. – 1998. – Vol. 39, issue 8. – P. 717–726.

6. **Barenburg A.W.T.** Psychrometry and Psychrometric Charts, 3rd Edition. – Cape Town, S.A.: Cape and Transvaal Printers Ltd., 1974.

7. **Патент** на полезную модель. Многофункциональный энергоэффективный ставень / В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов, А.А. Яблоков, Д.А. Лапатева, Ю.С. Колосова, Д.С. Трухин. Заявка №2014137231, приоритет от 15.09.2014 г.

8. **Pagliaro M., Ciriminna R., Palmisano G.** Flexible Solar Cells // ChemSusChem. – 2008. – Vol. 1, issue 11. – P. 880–891.

9. **Чистович С.А.** Автоматическое регулирование теплового режима здания с учетом быстрых и медленных тепловых потерь через наружные ограждающие конструкции // Теплоэнергоэффективные технологии. – 2013. – № 3–4 (7–72). – С. 73–76.

10. **Missenard M., Blandin C., Feldmann C.** Climatique, COSTIC. – Paris, 2010.

11. **Solutions de regulation dans les petits batiments**, SEBTP, COSTIC. – Paris, 2000.

References

1. Beaumont, C., Holtzweiler, E., Zakharov, V.M., Smirnov, N.N., Yablokov, A.A., Lapateev, D.A. Razrabotka i ispytanie avtomatizirovannykh okon s teplootrazhayushchimi ekranami, otvechayushchikh Rossiyskim i Evropeyskim trebovaniyam v oblasti energosberezheniya [Designing and testing of automated windows with heat-reflective shields meeting the Russian and European requirements in the field of energy saving]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 13–24.

2. Zakharov, V.M., Yablokov, V.M., Ladaev, N.M. *Okonnyy blok* [Window unit]. Svidetel'stvo RF na poleznuyu model' 16011 [Utility model certificate of the Russian Federation 16011 of March 7, 2000. Window unit], 2000.

3. Zakharov, V.M., Smirnov, N.N., Lapateev, D.A., Yablokov, A.A. *Avtomatizirovanny okonnyy blok* [Utility model patent No 135696. Automated window unit]. Patent RF, no. 135696, 2013.

4. Merrill, J.L., TenWolde, A. Overview of moisture-related damage in one group of Wisconsin manufactured houses. *ASHRAE Transactions*, 1989, vol. 95, issue 1.

5. Muneer, T., Abodahab, N. Frequency of condensation occurrence on double-glazing in the United Kingdom. *Energy conversion and management*, Elsevier, 1998, vol. 39, issue 8, pp. 717–726.

6. Barenburg, A.W.T., Psychrometry and Psychrometric Charts, third edition, Cape and Transvaal Printers Ltd., Cape Town, S.A., 1974.

7. Zakharov, V.M., Smirnov, N.N., Yablokov, A.A., Lapateev, D.A., Kolosova, Yu.S., Trukhin, D.S. *Mnogofunktsional'nyy energoeffektivnyy staven'* [Multifunctional energy efficient shutters]. Patent RF, no. 2014137231, 2014.

8. Pagliaro, M., Ciriminna, R., Palmisano, G. Flexible Solar Cells. *ChemSusChem*, 2008, vol. 1, issue 11, pp. 880–891.

9. Chistovich, S.A. Avtomaticheskoe regulirovanie teplovogo rezhima zdaniya s uchetom bystrykh i medlennykh teplovykh poter' cherez naruzhnye ograzhdayushchie konstruksii [Automatic control of the thermal regime of the building, taking into account the fast and slow heat loss through the building envelope]. *Teploenergoeffektivnye tekhnologii*, 2013, issue 3–4, pp. 73–76.

10. Missenard, M., Blandin, C., Feldmann, C. Climatique, COSTIC. Paris, 2010.

11. Solutions de regulation dans les petits batiments, SEBTP, COSTIC. Paris, 2000.

Introduction. Existing European and Russian energy efficiency regulations stipulate strict requirements regarding annual energy consumption, and particularly, the heat transfer resistance coefficient of translucent structures. Thus, European Union legislatures stipulate a coefficient of heat transfer resistance for windows by 2020 of $1,67 \div 2,0 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$, while Russian official bodies stipulate $1,0 \div 1,05 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$ by 2016. Pursuant to Russian legislation, annual specific consumption of energy in buildings as of 1 January 2020 shall be reduced by 40 % of the basic level.

The authors [1] developed and patented [2, 3] window designs with panel, roll and louvre type heat-reflecting screens, which are made of metal and significantly reduce heat losses. The use of screens is desirable during nighttime or in the absence of people. Screens may be placed inside or outside buildings, or between window panes. The use of screens not only reduces losses related to heat transfer but also permits ambient temperature reduction in setback heating mode. There is a need for creating a system of automated window screen control, and also for methods of determining ambient temperature in setback heating mode.

Determining minimal ambient temperature in setback heating mode. A certified environmental chamber belonging to «Ivanovostroiispytaniya» (an independent non-profit making organization engaged in construction engineering) was used [1] to study the impact of using heat reflecting window screens on raising heat transfer resistance in windows and reducing heat losses. For control purposes, two double-glazed windows, made according to formula $4M1 \times 10 \times 4M1 \times 10 \times 4M1$ and $4M1 \times 10 \times 4M1 \times 10 \times 4i$, respectively, with low-emission coating, were used.

According to the given data (refer with Table), the use of low-emission I-glass increased heat transfer resistance from $0,47 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$ to $0,61 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$ (by 29 %), while adding a panel consisting of two metal screens positioned at a distance of 10 mm from each other on the cold side of the environmental chamber increased resistance to $1,76 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$ (by 274 % of control value 1, or 189 % of control value 2).

Current regulations (SP 60.13330.2012. «Heating, ventilation and air conditioning») with reference to buildings during the cold season when not in use or during non-working hours permit reducing indoor ambient temperature below the regulation value, but not below $15 \text{ }^\circ\text{C}$ in residential buildings, $12 \text{ }^\circ\text{C}$ in public buildings and $5 \text{ }^\circ\text{C}$ in the case of industrial premises.

Ambient temperature reduction in the setback heating mode creates a high energy saving potential. Minimal ambient temperature in setback heating mode is to a large extent determined by the conditions necessary to prevent condensation on enclosing structure surfaces. We note the high probability of condensation on windows, because translucent structures are the weak spot in heat insulation of buildings.

It should be noted that the appearance of moisture on glass surfaces is not only an esthetic defect, as continuing condensation may eventually result in moistening of the structures [4, 5], with possible formation of fungi and mildew on window sills. Particular attention should be paid to horizontally positioned and slanting windows, also skylights, as pursuant to Current regulations (SP 50.13330.2012 «Buildings Heat Insulation»), inner surface temperature should not be lower than indoor ambient dew-point temperature at the assumed outdoor ambient temperature during the cold season.

Relative humidity inside buildings RH is a regulated value (30 % to 65 % for public and residential buildings), while air humidity, window heat transfer resistance and outdoor ambient temperature are the factors determining dew-point temperature along internal glazing, and therefore minimal ambient temperature in setback heating mode (at a given heat transfer coefficient for inner window surfaces).

As shown by calculations and experimental data (refer with Table), the use of external heat-reflecting screens increases heat transfer resistance up to $1,76 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$ with a significant increase in internal glass temperature, thereby enabling us to further lower indoor ambient temperature (depending on indoor humidity) in the absence of people.

Results of tests on heat-reflecting screens in windows with low-emission coating

Item	Heat flow, W/m^2	Inner glass temperature t_w , $^\circ\text{C}$	Heat transfer resistance R , $\text{m}^2 \cdot \text{C/W}$	$R/R_{\text{control 1}}$	$R/R_{\text{control 2}}$
Control 1 $4M1 \times 10 \times 4M1 \times 10 \times 4M1$	76,1	12,5	0,47	–	–
Control 2 $4M1 \times 10 \times 4M1 \times 10 \times 4i$ (coated)	58,9	14,15	0,61	1,29	–
2 cold side screens	20,77	18,65	1,76	3,74	2,89

We were interested to know how to determine the value (refer with Fig. 1) to which an automated window control system may lower ambient temperature in setback heating mode while excluding condensation on internal window glass surfaces with enhanced heat insulation properties (using heat-reflecting screens).

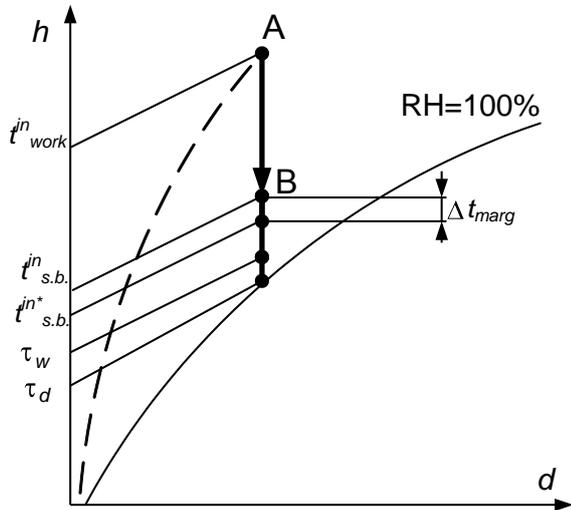


Fig. 1. Determining ambient temperature in setback heating mode

Minimal indoor ambient temperature in setback heating mode may be determined by:

$$t_{s.b.}^{in} = t_{s.b.}^{in*} + \Delta t_{marg}, \quad (1)$$

$$t_{s.b.}^{in*} = \tau_w^* + \frac{q}{\alpha_{in}} = \tau_d + \frac{(t_{s.b.}^{in*} - t_{out})}{\alpha_{in} R_{window}}, \quad (2)$$

where $t_{s.b.}^{in*}$ – indoor ambient temperature at which condensation begins on glass surfaces, i.e. when $\tau_w^* = \tau_d$, °C; τ_d – dew-point temperature at working hour ambient conditions, °C; τ_w^* – internal glass surface temperature, °C; Δt_{marg} – temperature margin for preventing condensation (assumed to be 1 °C); t_{out} – outdoor ambient temperature, °C; q – specific heat flow, W/m²; R_{window} – heat transfer resistance of window translucent area, m²·°C/W; α_{in} – coefficient of heat transfer from indoor air to glass, assumed to be 8,7 W/m²·°C.

Therefore,

$$t_{s.b.}^{in*} \alpha_{in} R_{window} = \tau_d \alpha_{in} R_{window} + t_{s.b.}^{in*} - t_{out} \Rightarrow t_{s.b.}^{in*} = \frac{\tau_d \alpha_{in} R_{window} - t_{out}}{\alpha_{in} R_{window} - 1}. \quad (3)$$

Dew-point temperature of indoor ambient air during working hours may be determined by the Magnus-Tetens formula [6] with an accuracy of ±0,2 °C (within a temperature range of from 5 to 25 °C, and with humidity ranging from 10 % to 70 %):

$$\tau_d = \frac{b \cdot \gamma(t_{work}^{in}, RH_{work}^{in})}{a - \gamma(t_{work}^{in}, RH_{work}^{in})}, \quad (4)$$

where $a = 17,27$; $b = 237,7$;

$$\gamma(t_{work}^{in}, RH_{work}^{in}) = \frac{a \cdot t_{work}^{in}}{b + t_{work}^{in}} + \ln\left(\frac{RH_{work}^{in}}{100}\right). \quad (5)$$

Resulting in

$$t_{s.b.}^{in} = \frac{\tau_d \alpha_{in} R_{window} - t_{out}}{\alpha_{in} R_{window} - 1} + \Delta t_{marg}. \quad (6)$$

Thus, knowing the window resistance value R_{window} during non-working hours, outdoor ambient temperature, ambient temperature and humidity during working hours we can determine minimal ambient temperature in setback heating mode.

In accordance with formulae obtained in Mathcad and Excel computing environments, we prepared a programme for calculating minimal ambient temperature in setback heating mode and using windows with heat-reflecting screens.

We simulated changes in the resistance of the translucent part of Window R from 0,5 to the resulting experimental value of 1,757 m²·°C/W, while setting outdoor ambient temperature t_{out} from – 10 to – 30 °C, and ambient temperature during working hours at 20 °C. The calculation was made for relative humidity RH equal to 35 and 50 %. The results of these calculations may be seen in Fig. 2.

As expected, $t_{s.b.}^{in}$ will be significantly higher with higher indoor humidity. A significant difference also results from the use of screens. Thus, according to calculations, with relative humidity of 35 %, outdoor ambient temperature of – 30 °C and the use of I-glass windows with two heat-reflecting screens, minimum permissible ambient temperature in setback heating mode falls from 16,4 °C to 7,8 °C, that is, by more than 8 °C, while with relative humidity of 50 % the difference in temperature is more than 10 °C.

The authors also developed and patented [7] a panel design featuring heat-reflecting screens using a solar battery on the external side, consisting, for example, of thin-film photocells. The use of a solar battery permits generation of electric power [8] which not only ensures independent operation of windows with heat-reflecting screens but also partially or completely serves the consumer's electrical load, and in the event of large-scale generation may be fed into the exterior electrical network. Moreover, the conversion efficiency of solar batteries reaches 20 %.

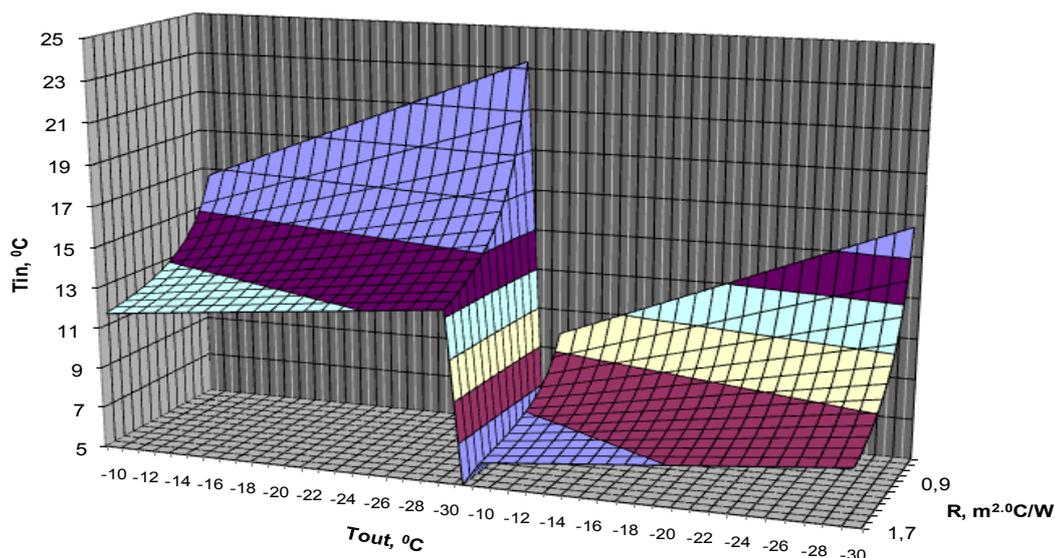


Fig. 2. Dependence of changes in minimal permissible ambient temperature t_{in} in setback heating mode on R and t_{out} , given RH = 50 % in the left half of the graph and RH = 35 % in the right half.

Fig. 3 shows an outer shutter with four heat-reflecting screens.

The outer shutter comprises frame 1, made of plastic or other material, and heat-reflecting screen 2, which may be of aluminum foil. The distance between neighbouring heat-reflecting screens 2 may be 5–10 mm. Outer screens 2 are made of aluminium sheet at least 200 micrometers thick to ensure reliable screen structure and integrity, while inner heat-reflecting screens are made of aluminium foil of 7–15 micrometers thickness. On the outside the shutter is provided with solar cell panel 3, which may consist of thin-film photo cells [8] and is connected to a controller (or module centre) by means of current leads 4. A packing cord 5 is attached along the perimeter of frame 1 adjoining the window aperture to be closed. The outer shutter is mounted so as to tightly adjoin the outer surface of the building's wall and preclude convection when the window aperture is closed. Automatic (electrically driven) control is provided, which saves time spent in moving shutters for large numbers of windows, for example, in industrial buildings.

Thus, using windows with heat-reflecting screens and a solar battery results in a triple power effect: reduced heat losses during the heating season due to increased window resistance; lower cost of heating buildings due to lowering of indoor ambient temperature; also electric power generation.

Automated system for controlling heat supply in buildings using heat-reflecting screens. The authors took into account the latest innovations in controlling temperature conditions in buildings, including rapid and slow heat losses

via exterior enclosure structures [9], and further developed and patented an automated system for controlling heat supply in buildings using heat-reflecting screens (Fig. 4), which maintains an optimal (preset or calculated) temperature in residential buildings and industrial premises. The window units' heat-reflecting screens are lowered at night and in the absence of people on the premises according to a set schedule or a signal from external light sensors depending on the selected control algorithm. Exterior light signals are sent by exterior light sensors, located along the building's façade. Lowering heat-reflecting screens results in lower heat losses through window apertures and higher indoor temperatures, and consequently lower fuel consumption for heating.

The system developed by us enables various ambient temperatures to be maintained in all parts of a building due to control of heat conductor consumption in the heating unit. Varying boiler fuel consumption influences changes in ambient temperature on all premises, fuel consumption corresponding to maximum preset interior ambient temperature.

As intended for industrial premises, the control system further facilitates a setback heating mode, in which the preset indoor ambient temperature is determined according to formula (6).

The system may be implemented using domestic automation equipment functioning according to a KNX open protocol (e.g. Siemens Synco Living) or industrial controllers.

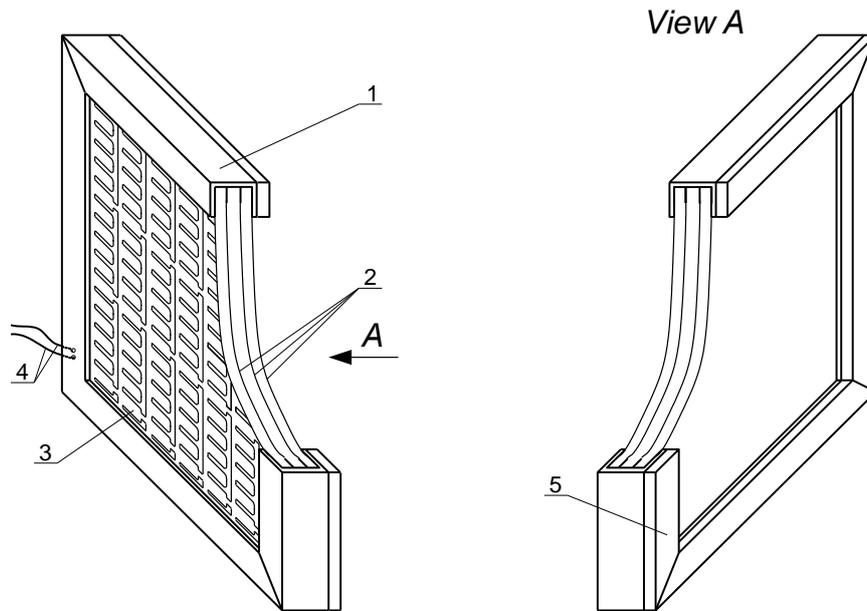


Fig. 3. Multifunctional energy-efficient shutter

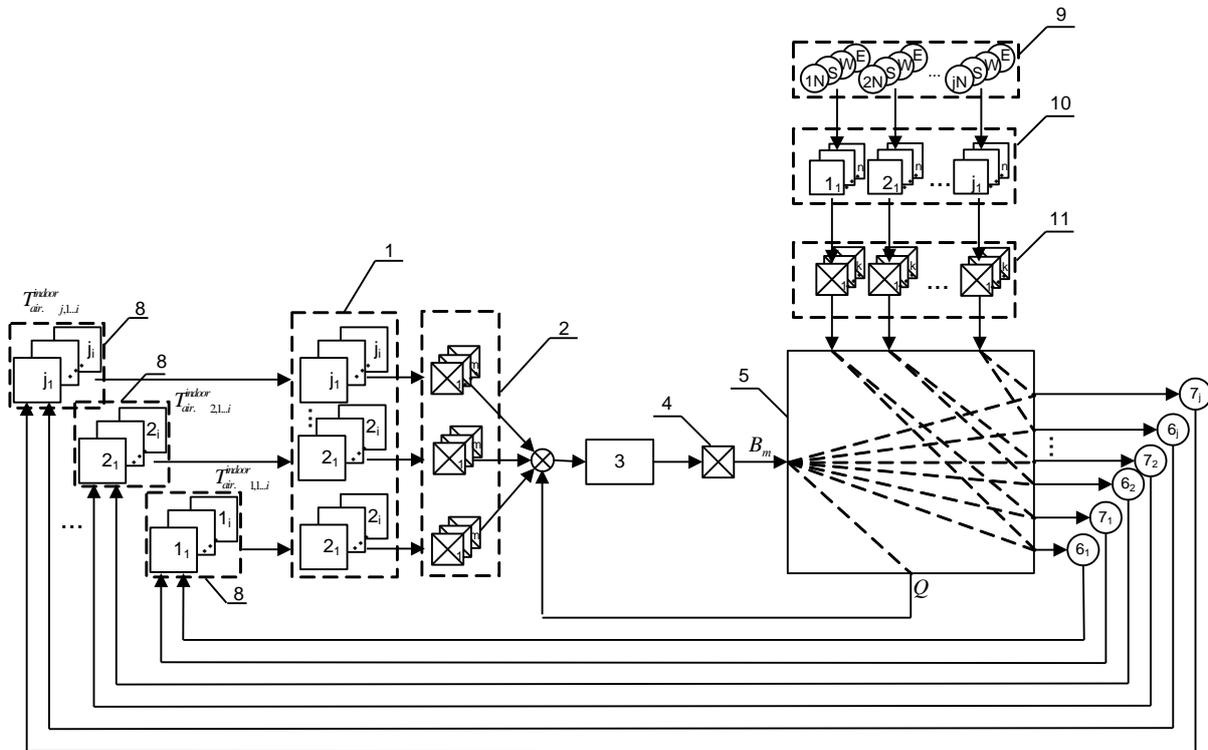


Fig. 4. Automated system for controlling heat supply in buildings using heat-reflecting screens: 1 – indoor ambient temperature control; 2 – heating instruments control valves. 3 – boiler fuel consumption control; 4 – boiler fuel supply control; 5 – controlled object; 6 – indoor ambient temperature sensors; 7 – indoor humidity sensors; 8 – units for calculating ambient temperature in setback heating mode or setting device unit; 9 – exterior light sensors, located along the facade; 10 – heat-reflecting screen position controls; 11 – heat-reflecting screen electric drive; 1...*l* – premises/room No.; 1...*j* – building No.; 1...*n* – heat-reflecting screen position control No.; 1...*k* – heat-reflecting screen electric drive No.; 1...*m* – heating unit control valve No.; *N, S, W, E* – building's north, south, west and east façades, respectively

Conclusion

The application for energy-efficient purposes not only of heat-reflecting screens with solar cell panels, automated heating systems using setback heating mode, heat recovery in exhaust air with the aid of regenerative heat exchangers [10, 11], but

also of new designs and the results of research by COSTIC and INSA staff in the fields of «hybrid» ventilation, improved building air tightness and controlled fresh air supply depending on carbon dioxide levels in buildings has created a big energy-efficiency potential for systems supplying energy to both residential and industrial buildings.

Using the recommended window designs will help to achieve the energy consumption levels

stipulated for buildings by Russian and European regulations [1].

Авторы выражают благодарность заведующему кафедрой русского и французского языков ИГЭУ к.ф.н. Шумаковой А.П. 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

Тютиков Владимир Валентинович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов,
телефон (4932) 38-57-57,
e-mail: tvv@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

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

Barbat Muriel,
Comite Scientifique et Technique des Industries Climatiques,
Ph.D., Ingénieur Projet,
e-mail: mbarbat@costic.com