УДК 697.9

Использование окон с регулируемым сопротивлением теплопередаче для повышения энергетической эффективности систем динамического микроклимата помещений

Н.Н. Смирнов, В.К. Пыжов, В.М. Захаров, Е.Г. Авдюнин, Д.А. Лапатеев
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
г. Иваново, Российская федерация
E-mail: nsmirnov@bk.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Поддержание параметров внутреннего микроклимата, повышающих производительность труда работников промышленных предприятий, при минимальных затратах энергии является одним из важных инструментов по снижению себестоимости производимой продукции. Известны математические модели динамического микроклимата, позволяющие определить мощность и режим работы системы кондиционирования. Данные математические модели не учитывают применения таких энергосберегающих мероприятий, как использование теплоотражающих экранов в окнах и дополнительного понижения температуры воздуха в нерабочее время с предварительной осушкой воздуха. В связи с этим необходимо провести исследования, связанные с определением степени влияния от использования теплоотражающих экранов в окнах и предварительной осушки воздуха на энергетическую эффективность работы систем динамического микроклимата.
Материалы и методы: При проведении исследований использованы данные натурных испытаний окон с теплоотражающими экранами в сертифицированной климатической камере, а также данные, полученные с использованием математической модели процесса теплопередачи через окно. Метеорологические параметры наружного воздуха предоставлены Росгидрометом. Обработка данных произведена методами математической статистики.
Результаты: Разработана математическая модель динамического микроклимата промышленного здания с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон, учитывающая нелинейную зависимость сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции от параметров внутреннего и внешнего воздуха и изменяемой в течение суток конструкции окна. Предложены энергосберегающие процессы обработки воздуха в центральном кондиционере для помещений промышленных предприятий с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон. Разработанная математическая модель динамического микроклимата реализована в виде программы для ЭВМ. Определена энергетическая эффективность использования теплоотражающих экранов в окнах и дополнительного снижения температуры воздуха в нерабочее время для систем по поддержанию параметров динамического микроклимата производственных помещений промышленного предприятия.
Выводы: Снижение тепловых трансмиссионных потерь за счет применения экранов в окнах и понижения температуры воздуха в нерабочее время позволяет значительно повысить энергетическую эффективность работы систем по поддержанию динамического микроклимата и на 30–40 % понизить годовые затраты теплоты и холода.

Ключевые слова: математическая модель динамического микроклимата, окна с регулируемым сопротивлением, обработка воздуха, теплоотражающие экраны, тепловые трансмиссионные потери, динамический микроклимат.

Using windows with controlled heat transfer resistance to improve energy efficiency of dynamic indoor microclimate

N.N. Smirnov, V.K. Pyzhov, V.M. Zakharov, E.G. Avdyunin, D.A. Lapateyev
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: nsmirnov@bk.ru

Abstract

Background: Maintaining indoor microclimate, which increases productivity of industrial workers and minimizes energy costs, is an important tool to reduce production costs. The exisiting mathematical models of dynamic indoor microclimate determine the capacity and operation mode of the air conditioning system. But these models do not account for energy-saving devices such as heat-reflective shields in windows and additional air temperature reduction outside working hours after preliminary air drying. That is why it is important to assess the effect of heat-reflective shields and preliminary air drying on the energy efficiency of dynamic microclimate systems.
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 obtained by using the mathematical model of heat transfer through the window. The statistical climatic data were provided by RosHydroMet. The results were processed by the methods of mathematical statistics.
Results: A mathematical model has been developed simulating the dynamic internal microclimate of an industrial building with controlled heat transfer resistance windows. The model accounts for the non-linear dependence of heat transfer resistence of translucent structures on the parameters of internal and external air and window configuration changing during the day. It offers energy saving techniques of air processing in the central air conditioning unit for industrial buildings with controlled heat transfer resistance windows. The developed mathematical model of the dynamic internal mi-

© ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

croclimate is realized in the form of a computer program. The efficiency of using heat-reflective screens and additional temperature reduction outside working hours for industrial buildings has been determined.
Conclusions: Reduction of heat transmission losses through the use of window screens and lowering the indoor air temperature can significantly increase the energy efficiency of dynamic internal microclimate systems and gives a 30–40 % reduction in the annual consumption of heat and cold.

Key words: mathematical model of dynamic indoor microclimate, windows with controlled heat transfer resistance, air processing, heat-reflective screens, heat transmission losses, dynamic microclimate.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.6.026-042

Состояние вопроса. Согласно данным Российского информационного агентства и статистического отчета аналитиков международной компании «BP» о мировом энергопотреблении за 2011 год [1], в структуре потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в России лидирующие позиции занимает топливно-энергетический комплекс. На его долю приходится 312,4 млн тонн нефтяного эквивалента (млн т н. э.), что составляет 45 % от общего потребления ТЭР в России. Значительное потребление ТЭР наблюдается в коммунально-бытовом секторе (159,4 млн т н. э. или 23 %), а также в промышленности и строительстве (138,8 млн т н. э. или 20 %). Преобладающая часть потребления ТЭР в быту (более 70 %) приходится на поддержание необходимых параметров микроклимата.

Согласно данным научных сотрудников «ЦНИИЭП жилища» В.С. Беляева и С.К. Есенгабулова [2], значительная доля теплопотерь в жилых зданиях приходится на окна (световые проемы). Так, для достаточно распространенных 5-этажных жилых зданий (серии 1-511 и 1-447) тепловые трансмиссионные потери через окна составляют от 46 до 54 %, причем в общей структуре теплопотерь трансмиссионные составляют 57–59 %.

В структуре общих издержек предприятий средней и северной полосы России большой удельный вес занимают издержки на отопление, вентиляцию и кондиционирование производственных помещений [3, 4]. Так, среди затрат ТЭР на промышленном предприятии издержки на поддержание необходимых параметров микроклимата помещений составляют от 10 % (предприятия нефтеперерабатывающей, химической отраслей) до 40–50 % (машиностроительные, электротехнические предприятия).

В промышленном производстве с монотонным и напряженным характером работы стабильные параметры микроклимата повышают утомляемость персонала и отрицательно сказываются на производительности труда. Система динамического микроклимата (ДМ), повышающая работоспособность за счет возбуждения центральной нервной системы, подает в помещение воздух с параметрами, которые непрерывно меняются во времени. Наибольший эффект по снижению утомляемости и повышению работоспособности был получен в экспериментах при периодах менее 1,33 ч (при амплитуде колебаний температуры внутреннего воздуха $A_в$ = ± 2,5 °С).

Следовательно, разработка и применение энергосберегающих мероприятий при поддержании динамического микроклимата в промышленных зданиях позволит снизить себестоимость производимой в России продукции.

Материалы и методы. При проведении исследований использованы данные натурных испытаний окон с теплоотражающими экранами, проведенных в сертифицированной климатической камере АНО «Ивановостройиспытания», а также данные, полученные с использованием математической модели процесса теплопередачи через окно. Моделирование процесса теплопередачи через оконный блок производилось как с помощью метода конечных элементов (распределенная модель), так и методом конечных разностей (сосредоточенная модель). Метеорологические параметры наружного воздуха предоставлены Росгидрометом. Обработка данных произведена методами математической статистики.

Результаты. ***Разработка математической модели динамического микроклимата для зданий с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон.*** Теория расчета параметров динамического микроклимата в производственных помещениях и оценки теплового состояния человека создана трудами ученых ВНИИ охраны труда Л.В. Павлухина, В.Н. Тетерникова, Ю.Н. Хомутецкого, В.В. Ловцова [6], представителей Северо-Западного научного центра гигиены и общественного здоровья А.А. Дударева, А.Г. Сотникова [7], В.И. Панферова [8] и др. Среди зарубежных исследователей весомый вклад в решение проблем управления микроклиматом внесли О. Фангер [9–11] и его последователи [12, 13].

Разработкой математической модели динамического микроклимата для офисных и производственных помещений (и ее реализацией в виде программного комплекса) активно занимались также ученые ИГЭУ В.К. Пыжов, А.В. Гаранин [14]. В ходе исследований[1] была предложена математическая модель динамического микроклимата промышленного здания, дающая возможность рассчитать график на-

[1] Гаранин А.В. Разработка систем динамического микроклимата и создание на их основе энергосберегающих режимов работы оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2010. – 21 с.

© ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

грузки на систему кондиционирования с учетом динамического режима эксплуатации здания, был разработан алгоритм реализации математической модели динамического микроклимата на ЭВМ. В [14] также было выполнено моделирование применения энергосберегающих мероприятий, таких как утепление стен, рециркуляция воздуха и рекуперация теплоты вытяжного воздуха в теплоутилизаторах.

Недостатком разработанной математической модели является отсутствие учета зависимости коэффициентов теплоотдачи на наружной $\alpha_н$ и внутренних $\alpha_{вн}$ поверхностях ограждающих конструкций здания от параметров воздуха, таких как скорость ν и температура t, и от способа организации воздухообмена. В ходе проведенных исследований [15] было доказано, что данные коэффициенты не могут быть одинаковыми для систем естественной и механической вентиляции, причем в последнем случае $\alpha_{вн}$ значительно зависит от скорости воздуха на внутренней поверхности ограждения.

В математической модели[2] не учтено изменение во времени приведенного (и термического) сопротивления теплопередаче новых инновационных конструкций окон с теплоотражающими экранами. Сотрудниками ИГЭУ и INSA de Strasbourg [16, 17] были разработаны и запатентованы конструкции окон с теплоотражающими экранами рулонного (рис. 1), жалюзийного (рис. 2) и панельного (рис. 3) типа, выполненные из металла, которые значительно снижают тепловые трансмиссионные потери. Теплоотражающие экраны могут располагать внутри, снаружи и в межстекольном пространстве. Применение экранов целесообразно в темное время суток или в отсутствии людей. Экраны могут располагаться внутри помещения, снаружи или в межстекольном пространстве.

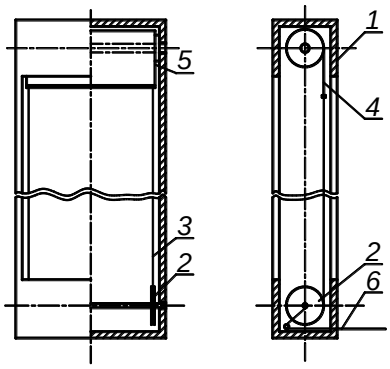

Рис. 1. Конструкция оконного блока с теплоотражающим непрозрачным металлическим сплошным экраном: 1 – корпус; 2 – шкив; 3 – направляющая; 4 – теплоотражающий экран; 5 – пружина; 6 – управляющий тросик

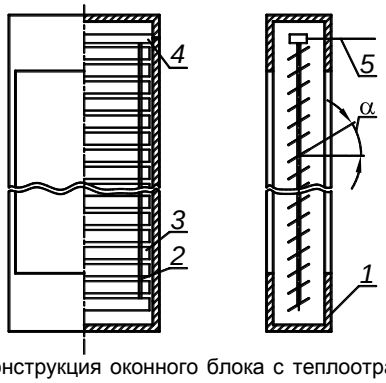

Рис. 2. Конструкция оконного блока с теплоотражающими непрозрачным металлическими жалюзи: 1 – корпус; 2 – направляющие; 3 – алюминиевый поворотный элемент; 4 – крепление; 5 – управляющий тросик; α – угол наклона поворотных элементов жалюзи относительно горизонта

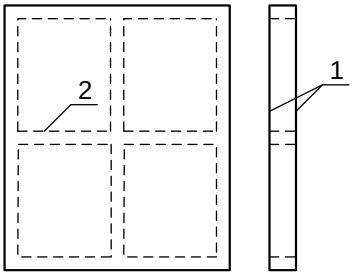

Рис. 3. Панель из двух теплоотражающих экранов: 1 – алюминиевая фольга; 2 – дистанционные планки

Было экспериментально (опыт в климатической камере и численное моделирование) доказано, что в окнах с теплоотражающими экранами предусмотрено двухпозиционное регулирование сопротивления теплопередаче R_o за счет поднятия-опускания экранов. Анализ данных моделирования (рис. 4) показывает, что приведенное (и термическое) сопротивление теплопередаче в большей степени зависит от разности температур между внутренним и наружным воздухом Δt, причем чем больше количество установленных экранов, тем более явно проявляется эта зависимость.

Наибольшее сопротивление теплопередаче получаем при минимальной разности температур и минимальной скорости наружного воздуха (рис. 4). Таким образом, сопротивление теплопередаче для окон с теплоотражающими экранами является нелинейной зависимостью.

Также было произведено моделирование теплообмена для окон с теплоотражающими экранами для условий, применяемых при процедуре сертифицирования в испытательных лабораториях [15]. Моделирование было произведено при расчетной скорости наружного воздуха $v_н$ = 5 м/с и разности температур Δt между внутренним и наружным воздухом, равной 35 °С ($t_в$ = 0 °С, $t_н$ = –15 °С).

[2] Там же.

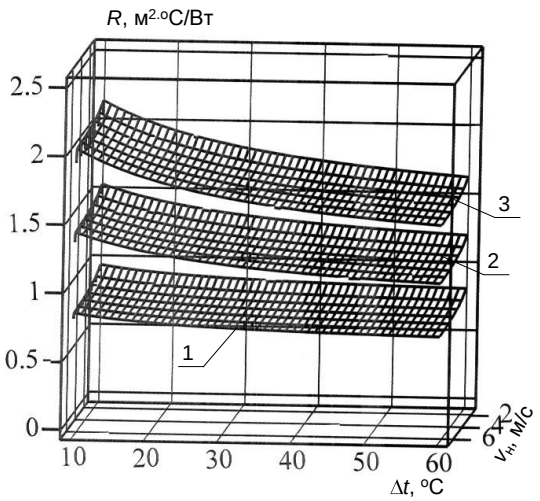

Рис. 4. Зависимость приведенного сопротивления теплопередаче центральной зоны окна при использовании стеклопакета (СП) 4М1х10х4М1х10х4М1 и установленных снаружи экранов: 1 – одного металлического экрана; 2 – двух экранов; 3 – трех экранов

Для двухкамерного стеклопакета (СП) и теплоотражающей панели, состоящей из трех алюминиевых экранов с воздушной прослойкой в 10 мм, приведенное сопротивление теплопередаче СП 4М1х10х4М1х10х4М1х10хМЭх10хМЭх10хМЭ составило 1,68 (м^2·°С)/Вт. В [15] было смоделировано и заполнение панели из трех теплоотражающих экранов малотеплопроводными газами, такими как аргон и криптон. В случае заполнения прослоек между экранами аргоном приведенное сопротивление светопрозрачной части окна при вышеуказанных условиях возрастало до 1,90 (м^2·°С)/Вт (или на 13 %), в случае с криптоном сопротивление увеличивалось до 2,25 (м^2·°С)/Вт (или на 34 %).

Пример установки экранов в окнах производственного помещения текстильного предприятия, на котором поддержание необходимых параметров динамического микроклимата осуществляется с помощью системы кондиционирования, представлен на рис. 5 (позиция 3). В данной системе кондиционирования реализуются такие энергосберегающие мероприятия, как рециркуляция внутреннего воздуха и утилизация теплоты удаляемого воздуха с помощью рекуператора.

На основе проведенных исследований [14–18] была разработана математическая модель динамического микроклимата промышленного здания с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон с теплоотражающими экранами. Модель учитывает: тепловые потоки через заполнение светового проема $Q_{ок}$; тепловые потоки, проходящие через многослойные стены $Q_{стен}$, пол $Q_{пол}$, покрытия $Q_{покр}$; потоки теплоты, вносимые и уносимые инфильтрационным $Q_{инф}$ и удаляемым воздухом $Q_{уд}$; тепловые потоки от работающего и неработающего оборудования $Q_{об}$; тепловые потоки от освещения $Q_{осв}$, от людей $Q_{л}$, от вносимых в помещение нагретых (охлажденных) предметов $Q_{предм}$, от солнечного излучения $Q_{инс}$ и на нагрев внутреннего воздуха $Q_{внутр.воздуха}$.

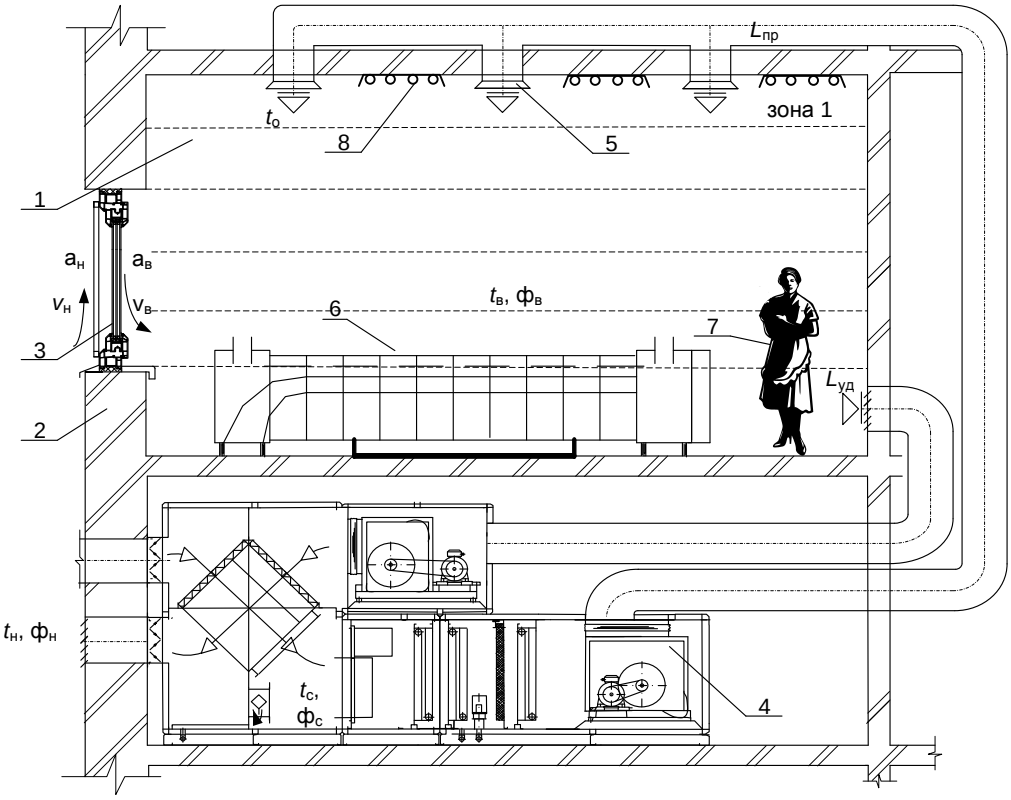

Рис. 5. Система динамического микроклимата для зданий с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон: 1 – производственное помещение; 2 – стена; 3 – окно с теплоотражающими экранами; 4 – кондиционер; 5 – воздухораспределитель; 6 – текстильное оборудование; 7 – персонал; 8 – осветительные приборы

Количество энергии, вносимое системой поддержания микроклимата в любой момент времени $Q_{СКВ}$, определяется из уравнения сохранения энергии

$$\frac{dQ_{ок}}{d\tau}+\frac{dQ_{стен}}{d\tau}+\frac{dQ_{пол}}{d\tau}+\frac{dQ_{покр}}{d\tau}+ \\ +\frac{dQ_{инф}}{d\tau}+\frac{dQ_{об}}{d\tau}+\frac{dQ_{осв}}{d\tau}+ \\ +\frac{dQ_{л}}{d\tau}+\frac{dQ_{предм}}{d\tau}+\frac{dQ_{инс}}{d\tau}+\frac{dQ_{уд}}{d\tau}+ \\ +\frac{dQ_{СКВ}}{d\tau}+\frac{dQ_{внутр.воздуха}}{d\tau}=0. \quad (1)$$

Описание теплового потока через окна с регулируемым сопротивлением теплопередаче. Тепловой поток, проходящий через окна, включает в себя две составляющие.

1. Текущие теплопоступления в результате солнечной радиации, поглощаемой заполнением и непосредственно проникающей в помещение, Вт:

$$Q_{ок_солн}(\tau)=J_{в}(\tau)\,r_{обл}\,\kappa_{СЗУ}(\tau)\,\kappa_{проп}\,A_{ок}, \quad (2)$$

где $J_{В}(\tau)$ – интенсивность потока солнечной радиации (прямой и рассеянной), падающей в момент времени τ на вертикальную поверхность при безоблачном небе, определяемая в зависимости от ориентации поверхности по сторонам света, Вт/м^2; $r_{обл}$ – коэффициент облачности, принимаемый по данным метеонаблюдений; $\kappa_{СЗУ}(\tau)$ – коэффициент теплопропускания солнцезащитных устройств (принимается по данным СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий»)[3]. При использовании теплоотражающих экранов, установленных снаружи, принимается 0,10-0,15; $\kappa_{проп}$ – коэффициент относительного пропускания солнечной радиации окон (принимается по данным СП 23-101-2004); $A_{ок}$ – площадь окон, м^2.

С учетом разных значений солнечной радиации $A_{ок}$ считается отдельно по каждой стороне света. Формула (2) считается отдельно для площади окон, размещенных по каждой стороне света.

2. Текущие теплопотери (теплопоступления) вследствие разности температур внутреннего и наружного воздуха, Вт:

$$Q_{ок_\Delta t}(\tau)=\frac{t_{н}(\tau)-t_{в}(\tau)}{R_{о}(\tau)}A_{ок}, \quad (3)$$

где $t_{н}(\tau)$ – температура наружного воздуха на текущий момент времени τ, °С; $t_{в}(\tau)$ – динамическая температура внутреннего воздуха на текущий момент времени τ, °С. Закон изменения этой температуры задается исходя из динамических условий эксплуатации здания и применения «дежурного» режима отопления;

$R_{о}(\tau)=f(R_{о}^{ст}(\tau);R_{о}^{р}(\tau))$ – изменяемое сопротивление теплопередаче окна, (м$^{2}\cdot$°С)/Вт:

$$R_{о}(\tau)=\frac{A_{ок}}{\dfrac{A_{ок}^{ст}}{R_{о}^{ст}(\tau)}+\dfrac{A_{ок}^{р}}{R_{о}^{р}(\tau)}}, \quad (4)$$

где $R_{о}^{ст}(\tau)=R_{о}^{ст}(\tau,\text{констр},(t_{в}-t_{н}),\nu)$,

$R_{о}^{р}(\tau)=R_{о}^{р}(\tau,\text{констр},(t_{в}-t_{н}),\nu)$ – изменяемые сопротивления теплопередаче светопрозрачной и непрозрачной (рама и створки) зоны окна соответственно, (м$^{2}\cdot$°С)/Вт, зависящие от вида конструкции окна (с экранами или без них), разности температур внутреннего и наружного воздуха ($t_{в}$ – $t_{н}$) и скорости воздушных масс ν на текущий момент времени τ, (м$^{2}\cdot$°С)/Вт; $A_{ок}^{ст}$, $A_{ок}^{р}$ – площади остекления и непрозрачной части (рамы и створки) окна соответственно, м^2 (рис. 6).

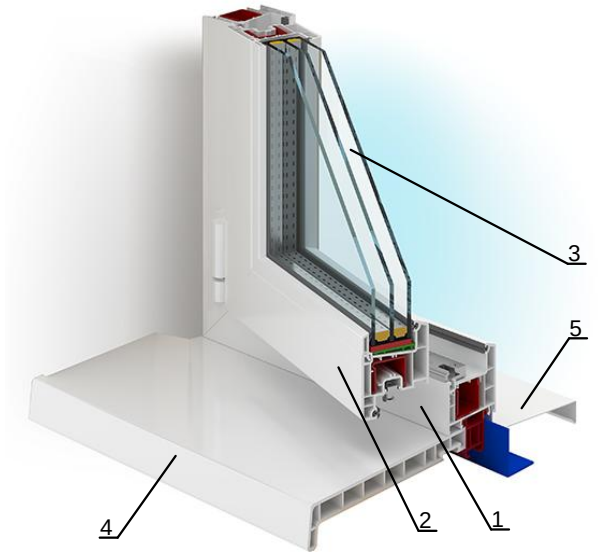

Рис. 6. Конструкция окна в разрезе: 1 – рама из ПВХ профиля; 2 – створка; 3 – двухкамерный стеклопакет (СП); 4 – подоконник; 5 – отлив

Под термином «окна с регулируемым сопротивлением теплопередаче» подразумевается использование в оконных конструкциях, помимо традиционных, светопрозрачной части в виде стеклопакета (слоев остекления) и деревянных, металлических, ПВХ переплетов, также металлических теплоотражающих экранов различных конструкций (см. рис. 1–3), перекрывающих световой поток в темное время суток или во время отсутствия людей. Как уже было сказано выше, использование экранов значительно увеличивает сопротивление теплопередаче заполнения светового проема. Следовательно, сопротивление теплопередаче заполнения светового проема не является постоянной величиной вследствие изменения конструкции окна во временных промежутках (1 вариант – окно без использования экранов; 2 вариант – окно с использованием экранов).

[3] СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. – Введ. 2004-06-01. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2007. – 320 с.

Сопротивление теплопередаче окон с теплоотражающими экранами является также нелинейной зависимостью от ряда факторов.

Для нахождения зависимости сопротивления теплопередаче окна от внешних факторов была создана математическая модель [15], описывающая процесс теплопередачи через окна с теплоотражающими экранами с учетом физико-геометрических параметров строительной конструкции, а также разработана компьютерная «Программа для расчета процесса теплопередачи для двухкамерного стеклопакета с металлическими теплоотражающими экранами» [19], получены данные численного моделирования теплообмена при различных параметрах внутреннего и наружного воздуха. На основе разработанной методики [15] получены выражения по определению приведенного сопротивления теплопередаче для конкретных типов стеклопакетов с теплоотражающими экранами.

Так, для двухкамерного стеклопакета 4М1х10х4М1х10х4М1 и трех теплоотражающих экранов, установленных снаружи на расстоянии 10 мм, в случае вынужденной конвекции у внутренней поверхности (при скорости воздуха $v_в$ более 0,3 м/с, если в помещении работает рециркуляционный вентиляционный аппарат или приток в помещение осуществляется механической вентиляцией) приведенное сопротивление теплопередаче зоны стеклопакета можно определить по формуле

$$R_о^{ст}\ \Delta t, v_в, v_н = 1{,}06 + \frac{1}{9{,}6 + 3{,}8 \cdot v_в} + \frac{22{,}3}{\Delta t + 17{,}9} + \frac{1}{7{,}34 \cdot v_н^{0{,}656} + 3{,}78 \cdot e^{-1{,}91 \cdot v_н}}, \quad (5)$$

где Δt – разность между температурами внутреннего и наружного воздуха, °С; $v_в$ – скорость воздуха на внутренней поверхности окна, м/с; $v_н$ – скорость воздуха на наружной поверхности окна, м/с. Данное выражение было получено при моделировании изменения параметров воздуха в следующих диапазонах: Δt = 10–70 °С; $v_в$ = 0,3–1,5 м/с; $v_н$ = 1–10 м/с.

Для двухкамерного стеклопакета 4М1х10х4М1х10х4М1 без использования экранов (контрольный вариант) приведенное сопротивление теплопередаче можно определить по формуле

$$R_о^{ст}\ v_в, v_н = 0{,}31 + \frac{1}{9{,}6 + 3{,}8 \cdot v_в} + \frac{1}{3{,}3 + 7{,}34 \cdot v_н^{0{,}656} + 3{,}78 \cdot e^{-1{,}91 \cdot v_н}}. \quad (6)$$

В случае естественной конвекции на внутренней поверхности окна зависимость сопротивления теплопередаче $R_о^{ст}$ от разности температур между внутренним и наружным воздухом Δt и скорости наружного воздуха $v_н$ также будет наиболее ярко выражена для случая использования трех теплоотражающих экранов (рис. 7). Удельные тепловые потери q, Вт/м^2, также будут значительно меньше в случае использования теплоотражающих экранов в окнах.

Для непрозрачной зоны окна (рама и створки) определение сопротивления $R_о^р(\tau)$ расчетным путем является непростой задачей в связи со сложной конфигурацией используемого профиля.

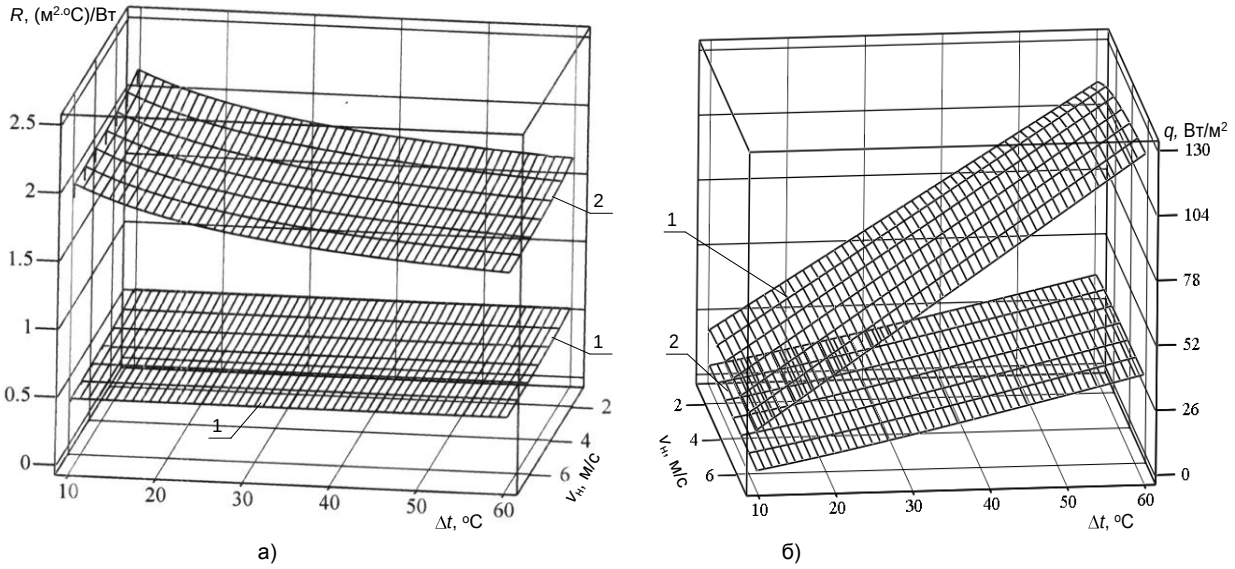

Рис. 7. Зависимость приведенного сопротивления теплопередаче $R_о^{ст}$ (а) и удельных тепловых потерь q (б) светопрозрачной зоны окна от разности температур внутреннего и наружного воздуха Δt и скорости ветра $v_н$ при использовании СП 4М1х10х4М1х10х4М1 в случае естественной конвекции на внутренней стороне: 1 – без экранов (контроль); 2 – снаружи установлены 3 металлических экрана

Согласно исследованиям [20] группы ученых Норвежского университета науки и технологии (Norwegian University of Science and Technology) под руководством А. Густавсена и Американской национальной лаборатории Беркли (Lawrence Berkeley National Laboratory), активно занимающихся разработкой новых энергосберегающих окон, определение сопротивления $R_O^p(\tau)$ может быть осуществлено путем проведения натурных испытаний в соответствующих лабораториях или с использованием программ CFD (computational fluid dynamics – вычислительная гидродинамика) моделирования, например программного комплекса Fluent, COMSOL и др. Так как в современных окнах площадь непрозрачной части (рама, створки) обычно составляет 20–30 % от общей площади окна [20], то влияние $R_O^p(\tau)$ на приведенное сопротивление теплопередаче всей оконной конструкции весьма существенно. Были проведены испытания пластиковых окон в сертифицированной лаборатории АНО «Ивановостройиспытания» и определены характеристики ПВХ профиля при использовании теплоотражающих экранов. Так, в случае использования 5-камерного ПВХ профиля (например, серии SOFTLINE фирмы VEKA) в качестве материала рамы и створки окна и при работе системы вентиляции сопротивление непрозрачной зоны окна можно описать следующим образом:

- без экранов

$$R_O^p\ v_в, v_н = 0{,}78 + \frac{1}{9{,}6 + 3{,}8 \cdot v_в} + \frac{1}{3{,}3 + 7{,}34 \cdot v_н^{0{,}656} + 3{,}78 \cdot e^{-1{,}91 v_н}}; \quad (7)$$

- при применении снаружи 3 теплоотражающих экранов

$$R_O^p\ \Delta t, v_в, v_н = 1{,}23 + \frac{1}{9{,}6 + 3{,}8 \cdot v_в} + \frac{24{,}8}{\Delta t + 20{,}1} + \frac{1}{7{,}34 \cdot v_н^{0{,}656} + 3{,}78 \cdot e^{-1{,}91 v_н}}. \quad (8)$$

Уменьшение эффекта от применения теплоотражающих экранов (приращение в сопротивлении) и более высокая зависимость от разности температур вызваны тем, что в краевых (граничных) зонах теплоотражающего экрана, приходящихся на области расположения рамы и створок, более сильно развита конвективная составляющая теплообмена (вследствие наличия изменения траектории линий тока конвективных потоков воздуха), присутствует дистанционная рамка, а также толщина воздушной прослойки, образованной поверхностью профиля и экраном, принимает меньшие значения.

Стоит отметить, что скорость воздуха на внутренней поверхности окна $v_в$ в случае применения механической вентиляции существенно зависит от места расположения и характеристик воздухораспределителя, а также от приходящегося на него расхода приточного воздуха. Но так как в системах кондиционирования наиболее распространено качественное регулирование нагрузки, поддерживается постоянный расход воздуха, то эпюру скоростей $v_в$ можно определить опытным путем и использовать полученные значения при определении приведенного сопротивления теплопередаче окна.

Задание закона изменения температуры внутреннего воздуха. Закон изменения температуры внутреннего воздуха определяется расчетом параметров ДМ с учетом требований технологического процесса и уровня энергосбережения.

Так, изменение текущей температуры внутреннего воздуха $t_в(\tau)$ в **рабочее время** можно описать с помощью функции

$$t_в(\tau) = \bar{t}_{ДДМ} + A_в \sin\ \omega\tau\ , \quad (9)$$

где $\bar{t}_{ДДМ}$ – средняя температура колебаний воздуха при ДМ, °С; $A_в$ – амплитуда колебаний температуры внутреннего воздуха, °С; ω – частота колебания температур, 1/ч.

Среднюю температуру колебаний воздуха при ДМ $\bar{t}_{ДДМ}$ можно определить[4] по формуле

$$\bar{t}_{ДДМ} = \bar{t}_{опт} + (0{,}2 \div 0{,}5) \cdot \Delta t_в, \quad (10)$$

где $\Delta t_в$ – отклонение средневзвешенной температуры воздуха от средних оптимальных значений, °С; $\bar{t}_{опт}$ – оптимальная температура при стабильных параметрах, °С.

В (10) бóльший множитель у $\Delta t_в$ принимается при бóльших значениях $\Delta t_в$.

Частоту колебаний температур ω и амплитуду $A_в$ можно задать следующими выражениями:

$$A_в = \frac{\Delta t_в}{2}; \quad (11)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{Z}, \quad (12)$$

где Z – период колебаний, ч.

Во время отсутствия людей **(нерабочее время**) пропадает необходимость поддерживать динамические параметры температуры воздуха, а также снижаются требования по поддержанию необходимой влажности воздуха. В «дежурный» режим работы системы кондиционирования помещения, исходя из требований энергосбережения, на первый план выходит задача по снижению температуры воздуха до минимально возможной.

Были проведены исследования [17] и разработана методика по определению минимальной температуры воздуха в нерабочее

[4] Гаранин А.В. Разработка систем динамического микроклимата и создание на их основе энергосберегающих режимов работы оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2010. – 21 с.

время исходя из условия недопущения выпадения конденсата на внутренней поверхности окна, в том числе с применением технологии предварительной осушки воздуха [21]. В ходе математических преобразований было установлено, что минимальную температуру внутреннего воздуха при «дежурном» режиме можно определить как

$$t_{\text{д}}^{\text{в}} = \frac{\tau_{\text{р}}\,\alpha_{\text{в}}\,R_{\text{окна}} - t_{\text{н}}}{\alpha_{\text{в}}\,R_{\text{окна}} - 1} + \Delta t_{\text{зап}}, \qquad (13)$$

где $\tau_{\text{р}}$ – температура точки росы при параметрах воздуха в рабочее время или в точке смешения [17], °С; $\Delta t_{\text{зап}}$ – температурный запас по недопущению конденсации, °С; $t_{\text{н}}$ – текущая температура наружного воздуха, °С; $R_{\text{окна}} = R_{\text{о}}^{\min}(\tau)$ – приведенное сопротивление теплопередаче, выбираемое как минимальное значение из сопротивлений светопрозрачной $R_0^{\text{ст}}(\tau)$ или непрозрачной $R_0^{\text{р}}(\tau)$ зон окна, (м^2·°С) /Вт; $\alpha_{\text{в}}$ – расчетный коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к внутренней поверхности оконного блока, Вт /(м^2·°С).

Согласно проведенным исследованиям [21], в случае естественной конвекции коэффициент $\alpha_{\text{в}}$ для холодного периода года для современных оконных блоков следует принимать не более 7,0 Вт /(м^2·°С), для окон с расположенным со стороны помещения теплоотражающим металлическим экраном $\alpha_{\text{в}}$ следует принимать в пределах 4,5 Вт /(м^2·°С).

В случае вынужденной конвекции (механическая вентиляция) расчетный коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к внутренней поверхности оконного блока следует рассчитывать по следующим формулам:

а) при отсутствии теплоотражающих экранов на внутренней поверхности окна

$$\alpha_{\text{в}} = 9{,}6 + 3{,}8 \cdot v_{\text{в}}; \qquad (14)$$

б) при наличии теплоотражающих экранов на внутренней поверхности окна

$$\alpha_{\text{в}} = 6{,}4 + 3{,}8 \cdot v_{\text{в}}. \qquad (15)$$

Температурный запас $\Delta t_{\text{зап}}$ определяется экспериментально и является функцией, зависящей от конструкции стеклопакета (материала дистанционной рамки, применения технологии «теплого» края, глубины затопления края стеклопакета в профиль и т.д.), термического сопротивления краевых зон стеклопакета, расчетной разности температур Δt внутреннего и наружного воздуха, изменяется в диапазоне от 1,5 до 4 °С.

Таким образом, в связи со значительной зависимостью приведенного сопротивления теплопередаче окна с экранами $R_{\text{окна}}$ от разности температур внутреннего и наружного воздуха для определения температуры $t_{\text{д}}^{\text{в}}$ необходимо решать систему уравнений, состоящую из формулы (13) и уравнений, описывающих $R_{\text{о}}^{\text{ст}}\ \Delta t, v_{\text{в}}, v_{\text{н}}$ или $R_{\text{о}}^{\text{р}}\ \Delta t, v_{\text{в}}, v_{\text{н}}$. Была составлена программа по нахождению минимальной температуры внутреннего воздуха при «дежурном» режиме отопления исходя из описанных выше требований. Следует отметить, что, в соответствии с нормативными требованиями, температура внутреннего воздуха не может быть меньше 5 °С[5].

Процесс обработки воздуха в центральном кондиционере для помещений промышленных предприятий с регулируемым сопротивлением окон. Для систем кондиционирования воздуха (СКВ), обеспечивающих необходимые параметры микроклимата для помещений промышленных предприятий, где разрешается рециркуляция воздуха, была разработана методика по определению положения точки С, описывающая состояние среды после смешения наружного и внутреннего воздуха (рис. 8). Центральный кондиционер с использованием процесса смешения потоков наружного и вытяжного воздуха и утилизацией теплоты части вытяжного воздуха в рекуператоре (процесс Н-НР) представлен на рис. 5. При дежурном режиме отопления в случае использования системы кондиционирования воздуха целесообразно использовать полную рециркуляцию воздуха (процесс $В_{деж1}$ – $О_{деж1}$). Но для понижения температуры воздуха в «дежурном» режиме мы предлагаем единовременно подмешать наружный воздух с низким влагосодержанием $d_{\text{Н}}$. Положение точки $С_{деж2}$ и, соответственно, степень рециркуляции $n_{\text{рец}}$ будут определяться минимальной температурой внутреннего воздуха в точке $В_{деж2}$, определенной по формуле (13), исходя из условия недопущения выпадения конденсата на окнах. После снижения влагосодержания и температуры воздуха также предлагается применять полную рециркуляцию (процесс $В_{деж2}$ – $О_{деж2}$). Разность температур (рис. 8) между приточным (точка О) и внутренним (точка В) 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.

[5] СП 60.13330.2012 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Введ. 2013-01-01.

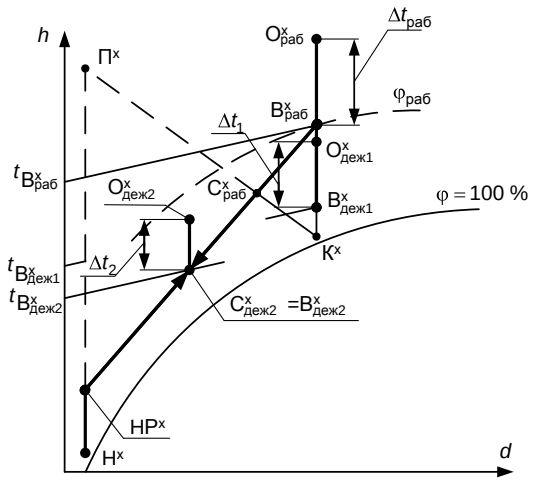

Рис. 8. Процесс снижения влагосодержания *d* и температуры воздуха *t* при «дежурном» режиме отопления с помощью системы кондиционирования в холодный период года (*h* – энтальпия воздуха) для помещений, в которых разрешена рециркуляция (случай недостатка теплоты)

Если рециркуляция воздуха в помещении промышленного предприятия не допускается (рис. 9), то затраты теплоты на поддержание необходимой температуры внутреннего воздуха (точка $В_{деж}$) в случае применения «дежурного» режима отопления будут ниже при использовании теплоотражающих экранов в окнах, так как разность температур между воздухом после подогревателя первой ступени (точка $О_{деж}$) и после рекуператора (точка НР) при использовании экранов Δt_2^* меньше, чем Δt_1^* (контроль). Точка $О_{деж1}$ характеризует параметры приточного воздуха при отсутствии экранов в окнах, точка $О_{деж2}$ – в случае использования экранов. Точка $О_{деж2}$ располагается ниже точки $О_{деж1}$ в связи с меньшими трансмиссионными потерями теплоты в случае использования экранов. Функционирование СКВ в нерабочее время необходимо в прямоточном режиме, если в помещении неизбежны выделения токсичных паров и газов 1 и 2 категорий опасности, болезнетворных организмов и неприятных запахов.

Если в «дежурном» режиме работы СКВ разрешается полная рециркуляция, то воздух будет только нагреваться в подогревателе (процесс $В_{деж}$- $О_{деж}$) до параметров точки $О_{деж1}$ в случае отсутствия экранов и до точки $О_{деж2}$ в случае применения экранов, причем разность температур Δt_2 меньше, чем Δt_1 (без экранов). Следовательно, также будут меньше затраты теплоты в случае использования экранов в окнах.

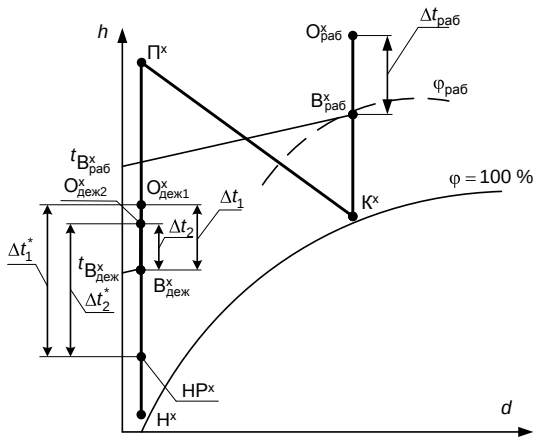

Рис. 9. Процесс снижения температуры воздуха *t* при «дежурном» режиме отопления с помощью системы кондиционирования в холодный период года (*h* – энтальпия воздуха) для помещений, в которых запрещена рециркуляция (случай недостатка теплоты)

Реализация модели ДМ на ЭВМ. Разработанная математическая модель динамического микроклимата для помещений промышленного здания с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон была реализована на ЭВМ на основе программы, созданной А.В. Гараниным и В.К. Пыжовым [14] в среде программирования MS Visual Basic 6.0. В данную программу были внесены вычислительные блоки, определяющие приведенное сопротивление теплопередаче окна и минимальную температуру воздуха при «дежурном» режиме отопления в случае использования теплоотражающих экранов. Блок-схема модели динамического микроклимата для СКВ с заданной температурой внутреннего воздуха представлена на рис. 10.

Разработанная модель позволяет определить эффективность применяемых энергосберегающих мероприятий: рециркуляции воздуха из рабочей зоны, установки пластинчатого рекуператора, использования теплоотражающих экранов в окнах, применения предварительной осушки воздуха для дополнительного понижения температуры воздуха при дежурном режиме отопления, изменения толщины и типа ограждающих конструкций здания. Стоит отметить, что процедура расчета распределения температур внутри ограждающей конструкции (рис. 10) с учетом теплопроводности λ, теплоемкости $c_р$, плотности ρ материала слоя применяется для стен, покрытий, которые являются достаточно инерционными элементами здания.

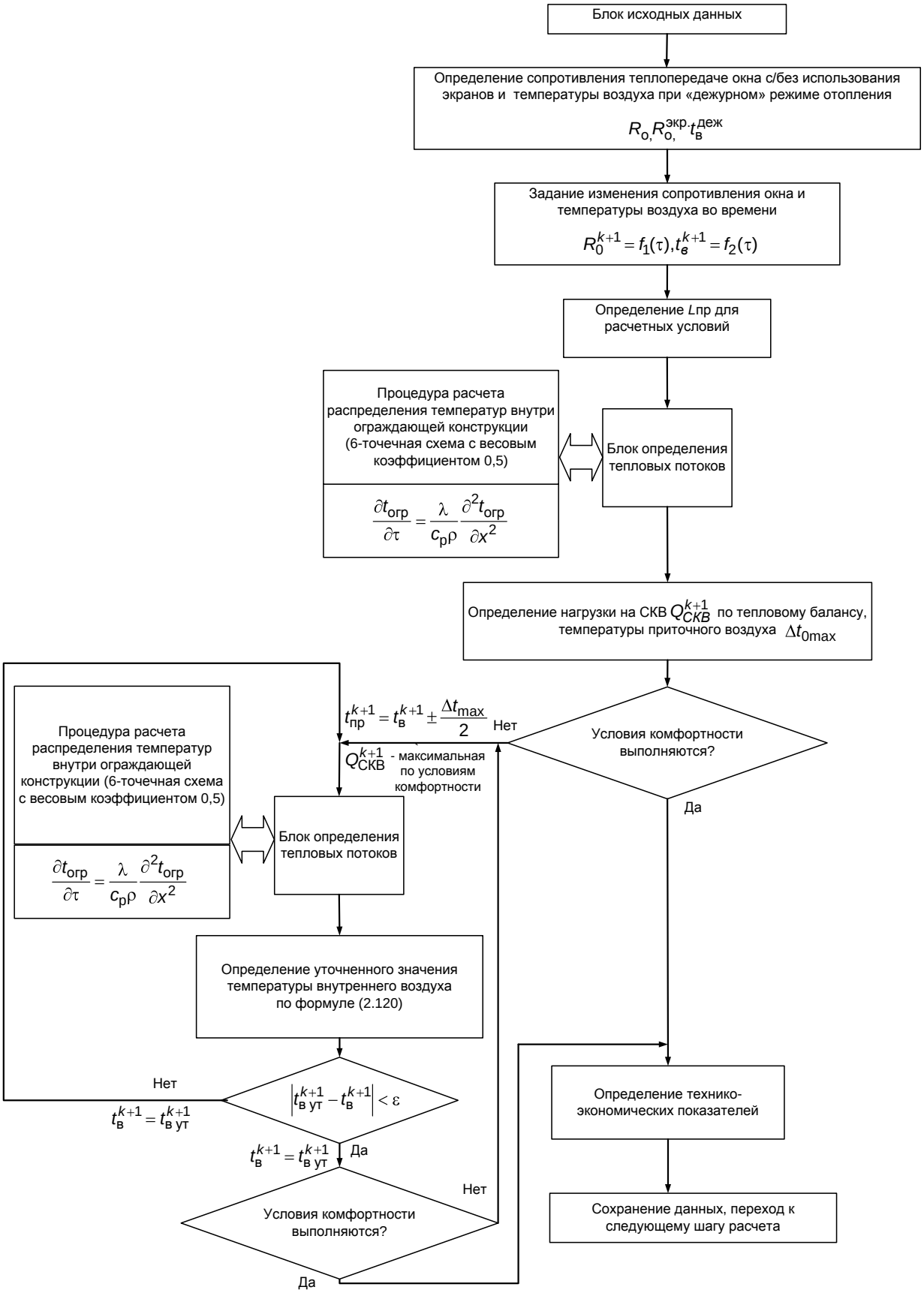

Рис. 10. Блок–схема модели динамического микроклимата СКВ для промышленного здания с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон

Определение тепловых потерь при регулируемом сопротивлении теплопередаче окон при изменяющейся температуре наружного воздуха. Как известно, температура наружного воздуха в холодный период года в течение суток достаточно сильно меняется (рис. 11), причем в темное время она принимает минимальные значения. Был проведен

анализ изменения продолжительности светлого времени суток и температуры наружного воздуха по месяцам для условий г. Москвы (рис. 12). Наибольшая амплитуда температур дня и ночи наблюдается для условий июня и июля (10 °С). Но для холодного периода года амплитуда температур тоже весьма существенна, причем в зимние месяцы мы можем наблюдать короткий световой день. Так, для условий января среднемесячная температура воздуха изменяется от –12 °С ночью до –6 °С днем (амплитуда в 6 °С), а продолжительность светлого времени суток составляет всего 7,2 часа. Следовательно, в темное время, которое занимает большую часть суток в зимний период, тепловой поток через окна больше, чем днем, поэтому использование теплоотражающих экранов в окнах в темное время суток еще больше снижает суточные трансмиссионные тепловые потери. Следует также отметить, что сопротивление теплопередаче окон с экранами также в значительной степени зависит от температур наружного и внутреннего воздуха (см. формулы (5) и(8)).

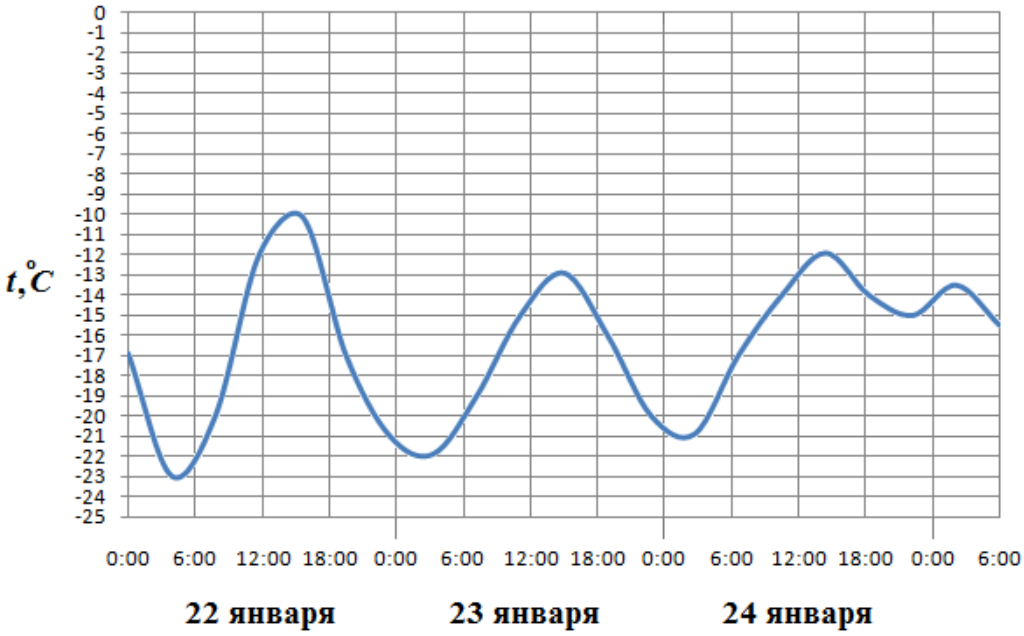

Рис. 11. Изменение температуры наружного воздуха в течение трех зимних суток

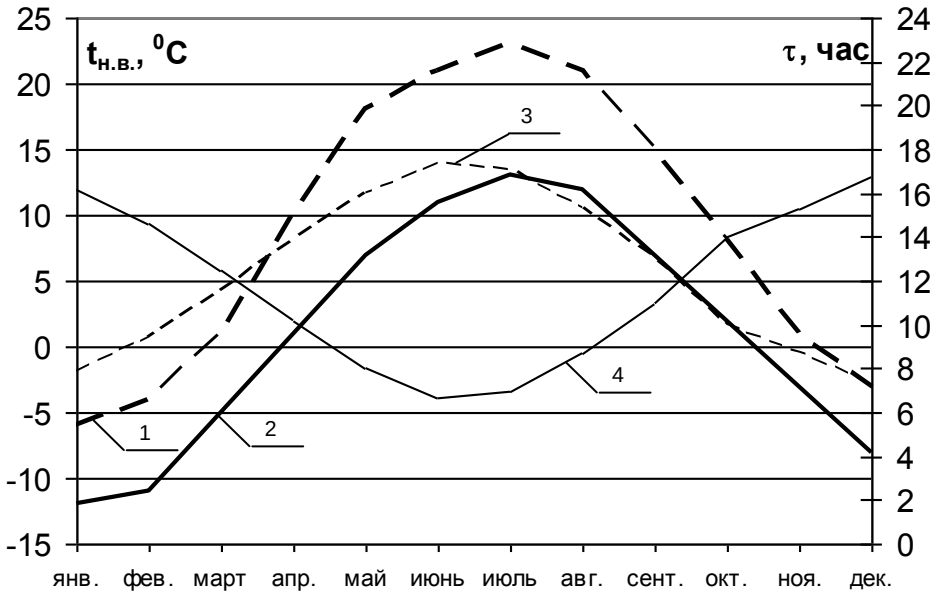

Рис. 12. Изменение среднемесячных температур и продолжительности суток для г. Москвы в течение года: 1, 2 – температура наружного воздуха для светлого и темного времени суток соответственно; 3, 4 – продолжительность светлого и темного времени суток соответственно

Для определения энергетической эффективности использования теплоотражающих экранов в окнах в системах поддержания динамического микроклимата было произведено моделирование изменения температуры наружного воздуха для промышленного здания, расположенного в г. Москве (рис. 13–15). В качестве контроля принято окно с СП 4М1х10х4М1х10х4М1. Теплоотражающая панель, выполненная из трех листов алюминия, используется снаружи на расстоянии 10 мм. График работы предприятия принят с 8 до 17 часов. Восход в 9 часов; заход в 16 часов (условия января). Относительная влажность внутри производственного помещения принята равной 40 %. Заданный закон изменения температуры внутреннего воздуха в рабочее время предусматривает ее колебания от минимального значения 18,5 °С до максимального 23,5 °С ($A_в$ = 2,5 °С) при заданной средней температуре внутреннего воздуха $\bar{t}_{ддм} = 21\,^{o}C$. Частота колебаний температуры внутреннего воздуха при периоде Z = 1,0 ч равна ω = 6,28 1/ч. При таком заданном ДМ скорость изменения температуры внутреннего воздуха составляет 5,0 °С/ч, что больше минимально допустимого значения (4 °С/ч) [18]. В нерабочее время поддерживается минимально допустимая температура, определяемая путем решения системы уравнений, состоящей из формулы (13) и выражений, описывающих $R_o^{ст}$ $\Delta t, v_в, v_н$. Согласно ранее проведенным экспериментальным исследованиям [16], выход окна на стационарный режим теплообмена после поднятия-опускания экрана достигается за 15–20 минут, в зависимости от конструкции.

Моделировалось шесть режимов работы системы поддержания динамического микроклимата в производственном помещении промышленного предприятия: поддержание температуры воздуха в нерабочее время, равной $t_{деж} = \bar{t}_{ддм} = 21\,^{o}C$ (контроль); то же с использованием теплоотражающего экрана в окнах; понижение температуры $t_{деж}$ до нормируемых 12 °С (рис. 8, процесс $О^{х}_{деж1} - В^{х}_{деж1}$); то же с применением экрана; использование экрана с понижением $t_{деж}$ до минимально возможной; то же с предварительной осушкой воздуха (рис. 8, процесс $О^{х}_{деж2} - В^{х}_{деж2}$). Анализ графика изменения температур в течение суток (рис. 13) показывает, что температура внутреннего воздуха в рабочее время изменяется по синусоидальному закону, в нерабочее время минимальная температура воздуха опускается до значения 8,1 °С, а в случае предварительной осушки воздуха – до 5,3 °С.

Сопротивление теплопередаче светопрозрачной части окна (рис. 14) значительно отличается в течение суток (относительно контрольного сопротивления $R_o^{ст}$ = 0,47 (м^2·°С) /Вт) не только из-за использования экранов в окнах, но и из-за непостоянной разности температур внутреннего и наружного воздуха Δt, которая принимает различные значения вследствие разных вариантов задания температуры воздуха в нерабочее время $t_{деж}$ и изменения температуры наружного воздуха. Для окна со стеклопакетом без экранов (рис. 14, график 1) сопротивление теплопередаче во времени будет постоянным. Как только в конструкции окна появляется теплоотражающий экран, то сопротивление теплопередаче окна становится достаточно зависимым от температуры внутреннего и наружного воздуха, поэтому на рис. 14 мы можем наблюдать в нерабочий период 4 вариации изменения сопротивления $R_o^{ст}$ (рис. 14, графики 2–5). Максимальное сопротивление теплопередаче окна, равное 1,93 (м^2·°С) /Вт, достигается в случае использования экрана и минимальной температуры внутреннего воздуха (при предварительной осушке) в ближайшее время после окончания рабочей смены, что также связано с температурой наружного воздуха, которая принимает свои максимальные значения в эти часы.

Текущие трансмиссионные потери теплоты через квадратный метр остекления (рис. 15) также явно показывают энергетическую эффективность применения как понижения температуры воздуха в нерабочее время (график 2), так и экранов (график 3). Совместное использование экранов и понижения температуры внутреннего воздуха (графики 4–6) вызывает еще большее снижение текущих тепловых потерь. Максимальные потери теплоты, равные 70 Вт/м^2, достигаются в контроле (график 1) в темное время суток при минимальной температуре наружного воздуха. В случае использования экрана, предварительной осушки воздуха и понижения температуры внутреннего воздуха до минимального значения текущие тепловые потери уменьшаются до 9 Вт/м^2, т.е. более чем в 7 раз.

Была определена эффективность применения теплоотражающих экранов и понижения температуры воздуха в нерабочее время в течение суток (рис. 16) как для 1 м^2 окна, так и для наружной стены с заданным приведенным сопротивлением теплопередаче R = 3,50 (м^2·°С) /Вт.

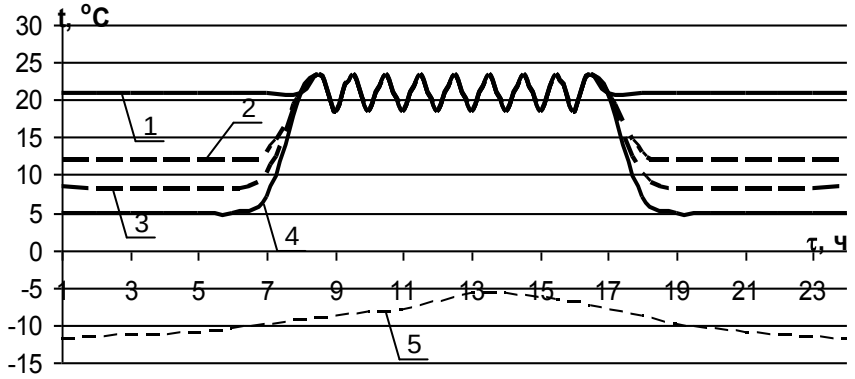

Рис. 13. Изменение температуры внутреннего и наружного воздуха в течение суток: 1 – температура внутреннего воздуха в контроле ($t_{деж} = \bar{t}_{ддм} = 21$ °С); 2 – при понижении температуры воздуха до $t_{деж}$ = 12 °С; 3 – то же при понижении $t_{деж}$ до минимально возможной температуры исходя из условия недопущения выпадения конденсата; 4 – то же с предварительной осушкой воздуха; 5 – температура наружного воздуха

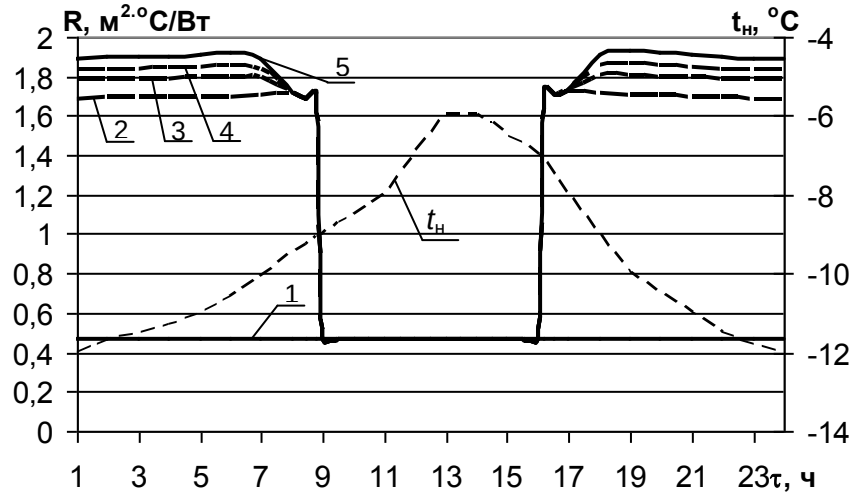

Рис. 14. Изменение приведенного сопротивления теплопередаче окна *R* в течение суток: 1 – контроль; 2 – при использовании в темное время суток экранов; 3 – при использовании в темное время суток экранов и понижении температуры воздуха до $t_{деж}$ = 12 °С; 4 – при использовании в темное время суток экранов и минимальной температуры внутреннего воздуха $t_{деж.\ мин}$; 5 – то же с предварительной осушкой; $t_н$ – график изменения температуры наружного воздуха

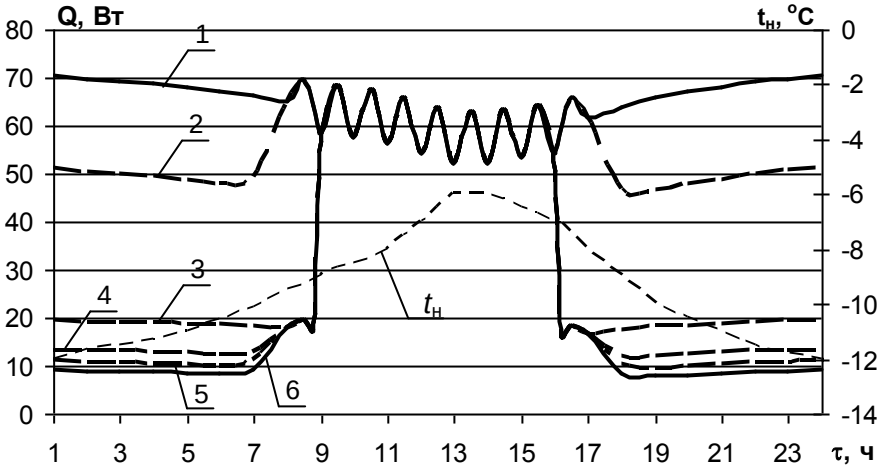

Рис. 15. Изменение тепловых потерь *Q* через 1 м² окна в течение суток: 1 – контроль; 2 – при понижении температуры внутреннего воздуха до $t_{деж}$ = 12 °С; 3 – при использовании в темное время суток экранов; 4 – при использовании в темное время суток экранов и понижении температуры внутреннего воздуха до $t_{деж}$ = 12 °С; 5 – при использовании в темное время суток экранов и минимальной температуры внутреннего воздуха $t_{деж.\ мин}$; 6 – при использовании в темное время суток экранов, $t_{деж.\ мин}$ и предварительной осушки воздуха; $t_н$ – график температуры наружного воздуха

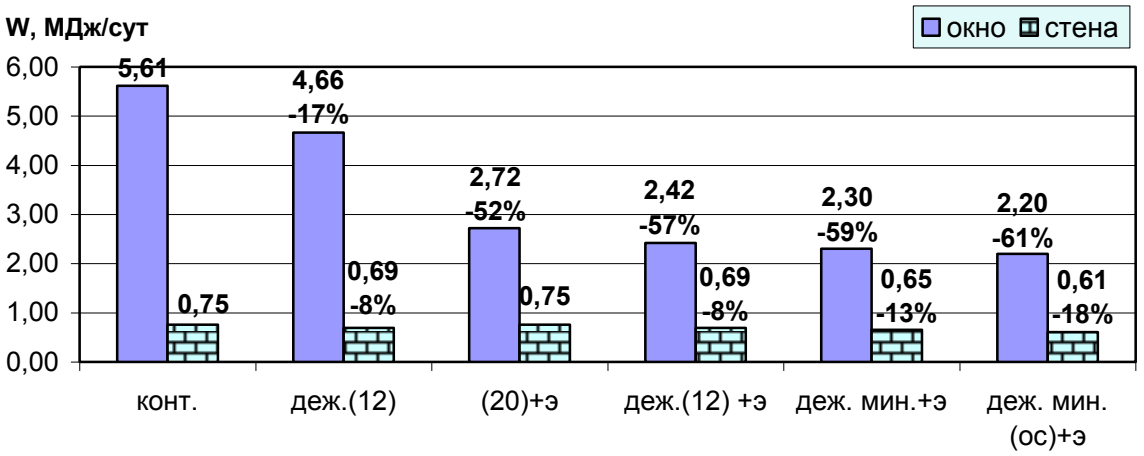

Рис. 16. Затраты энергии *W* на компенсацию тепловых потерь через 1 м^2 окна и стены в течение суток: конт. – контроль; деж.(12) – при понижении температуры внутреннего воздуха до $t_{деж}$ = 12 °С; (20)+э – при использовании в темное время суток экранов; деж.(12)+э – при использовании в темное время суток экранов и понижении температуры внутреннего воздуха до $t_{деж}$ = 12 °С; деж.мин.+э – при использовании в темное время суток экранов и понижении до минимальной температуры внутреннего воздуха $t_{деж.\ мин}$; деж.мин.(ос.)+э – при использовании в темное время суток экранов, предварительной осушки воздуха и понижения до минимальной температуры внутреннего воздуха $t_{деж.\ мин}$

В контрольном варианте затраты тепловой энергии на компенсацию трансмиссионных потерь составили 5,61 МДж/сут для 1 м^2 окна и 0,75 МДж/сут для 1 м^2 стены. Применение экранов в окнах снизило затраты энергии *W* до 2,72 МДж/сут (или на 52%), что значительно эффективнее, чем только понижение температуры внутреннего воздуха до значения 12 °С (4,66 МДж/сут или на 17%). Совместное применения понижения температуры и использования экранов дало дополнительный энергетический эффект. Так, при понижении температуры воздуха до 12 °С затраты *W* уменьшились до 2,42 МДж/сут (или на 57 %) для окна и до 0,69 МДж/сут (или на 8 %) для стены; в случае понижения до 8,1 °С – до 2,30 МДж/сут (или на 59 %) и до 0,65 МДж/сут (или на 13 %) соответственно. При понижении температуры внутреннего воздуха в случае предварительной осушки до значения 5,3 °С затраты теплоты уменьшились до 2,20 Дж/сут (или на 61 %) для окна и до 0,61 МДж/сут (или на 18 %) для стены. Последний вариант является наиболее энергоэффективным из рассматриваемых. Затраты энергии на компенсацию тепловых потерь через стену имеют более низкий процент снижения относительно окон в связи с постоянным сопротивлением теплопередаче стены и ее более высокой теплоустойчивостью[6].

На основе разработанной программы (рис. 10) было выполнено численное моделирование годового цикла эксплуатации промышленного здания с учетом создания в нем динамического микроклимата, а также применения теплоотражающих экранов в окнах и пониженной температуры внутреннего воздуха в нерабочее время. Моделирование выполнялось для производственного здания компрессорной газоперекачивающей станции КС «Ивановская». Рассмотренное производственное здание имеет большую площадь остекления. Регулирование сопротивления теплопередаче окна достигалось за счет использования с наружной стороны теплоотражающей панели, выполненной из трех алюминиевых листов. При организации динамического микроклимата используется частичная рециркуляция внутреннего воздуха в рабочее время и полная рециркуляции – в нерабочее (см. рис. 8). Наружный воздух частично подогревается в рекуператоре за счет теплоты вытяжного воздуха.

График работы предприятия принят с 8 до 17 часов. Относительная влажность внутри помещения принята равной 40 %. Заданный закон изменения температуры внутреннего воздуха в рабочее время предусматривает ее колебания от минимального значения 18,5 °С до максимального 23,5 °С ($A_в$ = 2,5 °С) при заданной средней температуре внутреннего воздуха $\bar{t}_{ддм} = 21$ °С. Частота колебаний температуры внутреннего воздуха при периоде *Z* = 1,0 ч равна ω = 6,28 1/ч. Сравнение основных показателей эффективности всех вариантов моделирования представлено в таблице.

[6] Гаранин А.В. Разработка систем динамического микроклимата и создание на их основе энергосберегающих режимов работы оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2010. – 21 с.

Сравнение основных показателей эффективности вариантов моделирования динамического микроклимата

№ и краткая характеристика варианта	Годовые затраты теплоты СКВ, ГДж/год (% к базовому варианту)	Годовые затраты холода СКВ, ГДж/год (% к базовому варианту)
1. Контрольный вариант	6112 (100)	512 (100)
2. Понижение температуры воздуха $t_{деж}$ в нерабочее время холодного периода года до 12 °С	5423 (88,7)	511 (100)
3. Применение теплоотражающих экранов в окнах	4934 (80,7)	407 (79,5)
4. Применение теплоотражающих экранов в окнах и понижение температуры воздуха в нерабочее время $t_{деж}$ до 12 °С	4318 (70,6)	407 (79,5)
5. Применение теплоотражающих экранов в окнах и понижение температуры воздуха в нерабочее время $t_{деж}$ до минимальной	4096 (67,0)	407 (79,5)
6. Применение теплоотражающих экранов в окнах и понижение температуры воздуха в нерабочее время $t_{деж}$ до минимальной с предварительной осушкой воздуха	3812 (62,4)	407 (79,5)

За базовый взят вариант расчета, учитывающий поддержание в рабочее и нерабочее время средней температуры внутреннего воздуха $t_{деж} = \bar{t}_{ддм} = 21\,^{o}C$. Теплозащита здания принята в соответствии с проектом. По отношению к этому варианту определены затраты теплоты и холода в % остальных вариантов моделирования.

Самый эффективный вариант из всех рассмотренных – это применение теплоотражающих экранов и понижение температуры воздуха в нерабочее время до минимальной с предварительной осушкой воздуха. Затраты теплоты СКВ снижаются с 6112 до 3812 ГДж/год (или на 37,6 %). В данном варианте за счет использования экранов в окнах в теплый период значительно снижаются теплопоступления с инсоляцией, что приводит к снижению годовых затрат холода СКВ с 512 до 407 ГДж/год (или на 20,5 %).

Выводы. Разработанная математическая модель динамического микроклимата промышленного здания с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон, учитывающая нелинейную зависимость сопротивления светопрозрачной конструкции от параметров внутреннего и внешнего воздуха и изменяемой в течение суток конструкции окна, позволяет определить эффективность использования теплоотражающих экранов и дополнительного снижения температуры воздуха в нерабочее время. Разработанная методика по определению минимальной температуры внутреннего воздуха, исходя из условия недопущения образования конденсата на внутренней поверхности окна, позволяет задавать закон изменения температуры воздуха, обеспечивающей поддержание необходимых параметров динамического климата, с учетом повышенных свойств окон с экранами.

Снижение тепловых трансмиссионных потерь за счет применения экранов в окнах и понижения температуры воздуха в нерабочее время позволяет значительно повысить энергетическую эффективность работы систем по поддержанию динамического микроклимата, что в свою очередь приводит к снижению себестоимости выпускаемой продукции.

Список литературы

1. **Dudley B.** BP statistical review of world energy, June 2012. – London, 2012. – 48 p.

2. **Беляев В.С., Есенгабулов С.К.** Повышение тепловой эффективности окон и улучшение воздушного режима помещений // Строительная физика в XXI веке: материалы научно-технической конференции. – М.: НИИСФ РААСН, 2006. – С. 88–90.

3. **Синилова А.В.** Предпосылки и необходимость реструктуризации промышленных комплексов в современных условиях // Российский внешнеэкономический вестник. – 2012. – № 10. – С. 86–93.

4. **Слесаренко Г.В.** Особенности проведения реструктуризации промышленных предприятий // Вестник Удмуртского университета. – 2010. – № 4. – С. 65–70.

5. **Марченко Е.М., Белова Т.Д.** Энергосервис как механизм повышения энергоэффективности в легкой промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2014. – № 4. – С. 82–86.

6. **Ловцов В.В., Хомутецкий Ю.Н.** Системы кондиционирования динамического микроклимата помещений. – Л.: Стройиздат, 1991. – 150 с.

7. **Дударев А.А., Сотников А.Г.** Микроклиматический комфорт и воздухораспределение: несколько шагов навстречу // Инженерные системы. АВОК Северо-запад. – 2013. – № 1. – С. 2–9.

8. **Дегтярь А.Б., Панферов В.И.** Построение алгоритма импульсного отопления зданий и исследование режимов его работы // Вестник ЮУрГУ. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2008. – № 17. – С. 41–44.

9. **Fanger P.O.** Human requirements in future air-conditioned environments // International Journal of Refrigeration. – 2001. – Vol. 24, issue 2. – P. 148–153.

10. **Air** turbulence and sensation of draught / P.O. Fanger, H. Melikov, H. Hanzawa, J. Ring // Energy and Buildings. – 1988. – № 12. – P. 21–39.

11. **Fang L., Clausen G., Fanger O.** Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality // Indoor Air. – 1998. – Vol. 8, issue 2. – P. 80–90.

12. **Van Hoof J.** Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? // Indoor Air. – 2008. – Vol. 18, issue 3. – P. 182–201.

13. **De Dear R.J., Brager G.S.** (1998) Developing an adaptive model of thermal comfort and preference // ASHRAE Transactions. – 1998. – Issue 104. – P. 145–167.

14. **Гаранин А.В., Пыжов В.К.** Моделирование теплоустойчивости многослойных ограждающих конструкций // Вестник ИГЭУ. – 2004. – Вып. 6. – С. 20–24.

15. **Разработка**, программная реализация и проверка адекватности математической модели процесса теплопередачи через окно с теплоотражающими экранами / В.М. Захаров, Е.Г. Авдюнин, Н.Н. Смирнов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 3. – С. 13–26.

16. **Свид.** 16011 Российская Федерация. Свидетельство на полезную модель. Оконный блок / В.М. Захаров, В.М. Яблоков, Н.М. Ладаев. – М., 2000.

17. **Энергосберегающий** потенциал от использования теплоотражающих экранов с солнечными батареями в

окнах для систем энергоснабжения зданий / Н.Н. Смирнов, Б. Фламан, М. Барба и др. // Вестник ИГЭУ. – 2015. – № 2. – С. 5–14. doi: 10.17588/2072-2672.2015.2.005-014.

18. Гаранин А.В., Пыжов В.К. Моделирование динамического микроклимата // Юбилейный сборник научных трудов к 100-летию со дня рождения профессора Черкасского Владимира Михайловича. – Иваново, 2005. – С. 108–116.

19. Свид. 2016615250 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета процесса теплопередачи для двухкамерного стеклопакета с металлическими теплоотражающими экранами / А.А. Яблоков, В.В. Тютиков, Н.Н. Смирнов В.М., Захаров, Д.А. Лапатеев. Заявка № 2016612420. Зарегистрировано 19.05.2016 г.

20. Developing low-conductance window frames: capabilities and limitations of current window heat transfer design tools – State-of-the-art review / A. Gustavsen, D. Arasteh, B.P. Jelle, C. Curcija, C. Kohler // Journal of Building Physics. – 2008. – Vol. 32, no. 2. – P. 131–153.

21. 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. Захаров, В.К. Пыжов, Н.Н. Смирнов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 5. – С. 16–26. doi: 10.17588/2072-2672.2015.5.016-025.

References

1. Dudley, B. BP statistical review of world energy. London, 2012. 48 p.

2. Belyayev, V.S., Esengabulov, S.K. Povyshenie teplovoy effektivnosti okon i uluchshenie vozdushnogo rezhima pomeshcheniy [Increasing of thermal efficiency of windows and improving of indoor air regime]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Stroitel'naya fizika v XXI veke»* [Proceedings of the conference «Construction physics in the XXI century»]. Moscow, NIISF RAASN, 2006, pp. 88–90.

3. Sinilova, A.V. Predposylki i neobkhodimost' restrukturizatsii promyshlennykh kompleksov v sovremennykh usloviyakh [Why it is necessary to restructure the industrial complex in modern conditions]. *Rossiyskiy vneshneekonomicheskiy vestnik*, 2012, no. 10, pp. 86–93.

4. Slesarenko, G.V. Osobennosti provedeniya restrukturizatsii promyshlennykh predpriyatiy [Restructuring of industrial enterprises]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*, 2010, no. 4, pp. 65–70.

5. Marchenko, E.M., Belova, T.D. Energoservis kak mekhanizm povysheniya energoeffektivnosti v legkoy promyshlennosti [Energy service as a mechanism of improving energy efficiency in light industry]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2014, no. 4, pp. 82–86.

6. Lovtsov, V.V., Khomutetsky, Yu.N. Sistemy konditsionirovaniya dinamicheskogo mikroklimata pomeshcheniy [Systems of indoor dynamic climate conditioning]. Leningrad, Stroyizdat, 1991. 150 p.

7. Dudarev, A.A., Sotnikov, A.G. Mikroklimaticheskiy komfort i vozdukhoraspredelenie: neskol'ko shagov navstrechu [Microclimatic comfort and air distribution: a few steps forward]. *Inzhenernye sistemy. AVOK Severo-zapad*, 2013, no. 1, pp. 2–9.

8. Degtyar', A.B., Panferov, V.I. Postroenie algoritma impul'snogo otopleniya zdaniy i issledovanie rezhimov ego raboty [Developing of an algorithm for pulsed heating of buildings and studying of its operation modes]. *Vestnik YuUrGU. Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2008, no. 17, pp. 41–44.

9. Fanger, P.O. Human requirements in future air-conditioned environments. *International Journal of Refrigeration*, 2001, vol. 24, issue 2, pp. 148–153.

10. Fanger, P.O., Melikov, H., Hanzawa, H., Ring, J. Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings*, 1988, no. 12, pp. 21–39.

11. Fang, L., Clausen, G., Fanger, O. Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality. *Indoor Air,* 1998, vol. 8, issue 2, pp. 80–90.

12. Van Hoof, J. Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? *Indoor Air*, 2008, vol. 18, issue 3, pp. 182–201.

13. De Dear, R.J., Brager, G.S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 1998, issue 104, pp. 145–167.

14. Garanin, A.V., Pyzhov, V.K. Modelirovanie teploustoychivosti mnogosloynykh ograzhdayushchikh konstruktsiy [Modeling of heat-resistance of multilayer walls]. *Vestnik IGEU*, 2004, issue 6, pp. 20–24.

15. Zakharov, V.M., Avdyunin, E.G., Smirnov, N.N., Yablokov, A.A., Lapateev, D.A. Razrabotka, programmnaya realizatsiya i proverka adekvatnosti matematicheskoy modeli protsessa teploperedachi cherez okno s teplootrazhayushchimi ekranami [Development, software implementation and verification of the mathematical model of heat transfer through windows with heat-reflecting screens]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 3, pp.13–26.

16. Zakharov, V.M., Yablokov, V.M., Ladaev, N.M. Okonnyy blok [Window unit]. *Svidetel'stvo RF na poleznuyu model' № 16011* [RF Useful Model Certificate No. 16011]. Moscow, 2000.

17. Smirnov, N.N., Flaman, B., Barba, M., Zakharov, V.M., Tyutikov, V.V., Lapateyev, D.A. Energosberegayushchiy potentsial ot ispol'zovaniya teplootrazhayushchikh ekranov s solnechnymi batareyami v oknakh dlya sistem energosnabzheniya zdaniy [Energy-saving potential of using heat-reflective screens with solar batteries in windows for power supply systems of buildings]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 2, pp. 5–14. doi: 10.17588/2072-2672.2015.2.005-014

18. Garanin, A.V, Pyzhov, V.K. Modelirovanie dinamicheskogo mikroklimata [Simulation of dynamic climate], *Yubileynyy sbornik nauchnykh trudov k 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora Cherkasskogo Vladimira Mikhaylovicha* [Jubilee collection of scientific works for the 100th anniversary of Professor Vladimir Mikhailovich Cherkassky]. Ivanovo, 2005, pp. 108–116.

19. Yablokov, A.A., Tyutikov, V.V., Smirnov, N.N., Zakharov, V.M., Lapateyev, D.A. Programma dlya rascheta protsessa teploperedachi dlya dvukhkamernogo steklopaketa s metallicheskimi teplootrazhayushchimi ekranami [Program for calculation of heat transfer for the triple-pane windows with metal heat-reflecting screens]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2016615250* [Certificate of state registration of the computer software program № 2016615250], 2016.

20. Gustavsen, A., Arasteh, D., Jelle, B.P., Curcija, C., Kohler, C. Developing low-conductance window frames: capabilities and limitations of current window heat transfer design tools – State-of-the-art review. *Journal of Building Physics*, 2008, vol. 32, no. 2, pp. 131–153.

21. Smirnov, N.N., Zakharov, V.M., Pyzhov, V.K., Lapateyev, D.A., Flaman, B. Effektivnost' sovmestnogo primeneniya teplootrazhayushchikh ekranov v oknakh i tekhnologii predvaritel'noy osushki vozdukha dlya sistem preryvistogo otopleniya zdaniy v razlichnykh regionakh Rossii i Frantsii [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]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 5, pp.16–25. doi: 10.17588/2072-2672.2015.5.016-025.

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

Smirnov Nikolai Nikolayevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department,
tel. (4932) 26-97-89,
e-mail: nsmirnov@bk.ru

Пыжов Валерий Константинович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики,
телефон (4932) 26-97-24.

Pyzhov Valery Konstantinovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering, Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department,
tel. (4932) 26-97-24.

Захаров Вадим Михайлович,
ФГБОУВО «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

Zakharov Vadim Mikhailovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering, Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department,
tel. (4932) 26-97-24,
e-mail: colia@rambler.ru

Авдюнин Евгений Геннадьевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики,
телефон (4932) 26-97-24,
e-mail: avdunin@pte.ispu.ru

Avdyunin Evgeny Gennadyevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering, Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department,
tel. (4932) 26-97-24,
e-mail: avdunin@pte.ispu.ru

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

Lapateyev Denis Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
postgraduate student of Industrial Thermal Power Engineering Department,
tel. (4932) 26-97-89,
e-mail: l.denis7789@yandex.ru