

УДК 628.8:681.5

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЙ

Ковальногов В.Н., Чамчиян Ю.Е.

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

Исследования выполнены при поддержке грантом РФФИ N 15-48-02275_p_a

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с системным анализом, моделированием, исследованием и разработкой эффективных энергетических систем обеспечения микроклимата зданий с окнами повышенной герметичности. Представлены результаты анализа потенциала энергосбережения здания в системах обеспечения микроклимата, моделирования и исследования режимов тепло- и воздухообмена в здании с окнами повышенной герметичности, полученные с использованием оригинального математического

аппарата и программных средств. Показано, что реальная экономия тепловой энергии, обеспечиваемая внедрением окон повышенной герметичности, снижается из-за скрытых тепловых потерь, связанных с ростом вентиляционной нагрузки для обеспечения комфортного микроклимата. Предложены условия и пути наиболее полной реализации технико-экономических преимуществ от использования окон повышенной герметичности.

ВВЕДЕНИЕ

Удорожание топливно-энергетических ресурсов побуждает их потребителей все более внимательно относиться к резервам ее экономии. Одним из таких резервов является оптимизация теплотребления на основе детального анализа структуры тепловых потерь, оптимизация конструкции стеклопакетов, устанавливаемых в световые проемы помещений и использования системы оптимизации теплотребления, предназначенной для автоматического регулирования теплотребления по фактической потребности в тепловой энергии, необходимой, например, для поддержания температуры в помещениях на заданном уровне. Для оптимизации теплотребления главного корпуса Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ) он оснащен системой оптимизации теплотребления (СОТ) и разработана его тепловая модель, предназначенная для использования в программном обеспечении СОТ, а также для расчетного анализа структуры тепловых потерь.

Также к вопросам энергосбережения и энергоэффективности в системах обеспечения микроклимата гражданских и промышленных зданий в последнее время привлечено значительное

внимание исследователей и разработчиков. Разработками в этой области заняты научные центры в Германии, Норвегии, Бельгии, США, Австралии, Франции, Гонконге, Эстонии, Финляндии, Ирландии, Китае, Сингапуре, Греции, Италии, Португалии и России.

При этом рассматриваются вопросы как влияния систем обеспечения микроклимата на внутреннюю среду здания, так и вопросы влияния людей, находящихся внутри здания и изменения технологической нагрузки помещений на внутренний микроклимат [1]. Моделируются и мониторятся изменения основных параметров микроклимата: температура внутреннего воздуха, относительная влажность и концентрация углекислого газа CO_2 в воздухе. А потенциал энергосбережения в системах управления микроклиматом здания с использованием в качестве одного из основных параметров концентрацию CO_2 очень велик [2]. При этом набирают популярность исследования в области адаптивного теплового комфорта [3]. В частности рассматриваются вопросы привыкания людей к разным параметрам микроклимата в административных и учебных заведениях.

В дополнение моделируются и исследуются внешние факторы, которые влияют на внутренний микроклимат здания. К таким факторам, например, относятся положения здания относительно других расположенных рядом зданий и зеленых насаждений или их отсутствие [4].

Также исследуются светопрозрачные наружные ограждающие конструкции, и моделируется влияние их конструктивных особенностей на отопительную нагрузку здания [5]. А также оценивается и рассматривается количество воздуха, которое проходит через открытое окно, имеющее различный тип открывания. [6]. При этом иногда необходимо исследовать, анализировать и моделировать процессы теплопередачи от отопительных приборов через наружные стены здания к наружному воздуху [7] и оценивать их вес в общем количестве теплотеря здания и рассматриваются способы их минимизации.

В Ульяновском государственном техническом университете (УлГТУ) в 2002 году в рамках программы «Энергосбережение Минобразования России» начал работать над проектом оснащения учебных корпусов и общежитий автоматизированными системами оптимизации теплопотребления, а уже в декабре 2004 года первая такая система была введена в эксплуатацию в главном учебном корпусе УлГТУ [8]. В ней был реализован целый ряд инновационных по тем временам научно-технических решений, разработанных специалистами кафедры теплоэнергетики УлГТУ и НПО «Лайф» (г. Новосибирск).

В настоящее время автоматизированная система управления теплопотреблением главного учебного корпуса УлГТУ является по-существу действующей исследовательской лабораторией, которая помимо обеспечения реальной экономии затрат на отопление,

позволяет выявлять и исследовать закономерности функционирования энергоэффективных зданий и анализировать эффективность отдельных энергосберегающих мероприятий. Так, в 2009 году было начато оснащение главного учебного корпуса УлГТУ окнами повышенной герметичности, одновременно кафедра тепловой и топливной энергетики начала исследования по анализу энергоэффективности оснащения жилых и общественных зданий такими окнами [9]. Уже предварительные результаты этого анализа, показали, что существующие системы вентиляции, спроектированные для условий инфильтрации наружного воздуха через неплотности в окнах традиционных конструкций, часто не готовы нести возросшую за счет герметизации окон вентиляционную нагрузку. Результаты непосредственного измерения регламентируемых показателей микроклимата в аудиториях главного учебного корпуса, оснащенных окнами повышенной герметичности, выявили пиковые превышения допустимых норм содержания углекислого газа и уровня комфортной температуры, уменьшение ниже допустимого уровня подвижности внутреннего воздуха [10]. Следствием этого (помимо дискомфорта обучающихся и сотрудников) является рост скрытых тепловых потерь за счет открывания и неконтролируемого проветривания, и преимущества от использования окон повышенной герметичности, а также от внедренной ранее автоматизированной системы управления теплопотреблением, реализуются не в полной мере.

Для изучения условий и путей повышения эффективности энергетических систем обеспечения микроклимата зданий с окнами повышенной герметичности было проведено специальное исследование, результатам которого посвящен материал данной статьи.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПOTЕРЬ ЧЕРЕЗ ОСТЕКЛЕННЫЕ ОКОННЫЕ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ

На удельные (отнесенные к единице площади поверхности) тепловые потери через остекленные проемы влияет значительное число факторов: температура наружного и внутреннего воздуха, скорость ветра, количество слоев и толщина листа стекла в пакете, толщина воздушной прослойки между стеклами, размеры проема. Для обоснованного выбора оптимальных решений по конструкции стеклопакета применительно к конкретным условиям необходимо иметь аналитическую модель процессов теплопередачи через остекленные проемы помещений. Анализ процессов теплопередачи осуществлялся для двух и трехслойного стеклопакета.

При моделировании процесса теплопередачи полагаем, что воздушные прослойки стеклопакетов не сообщаются с окружающей средой, температурное поле в стеклопакете одномерно, а процесс стационарный.

Для рассматриваемых условий плотность теплового потока (тепловой поток, приходящийся на единицу поверхности) через стеклопакет выражается соотношением:

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{n\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\delta_i}{\lambda_i \varepsilon_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной по-верхности стеклопакета соответственно, Вт/(м²·К); t_{f1}, t_{f2} – температуры внутреннего и наружного воздуха соответственно, °С; δ_{cm} – толщина стеклянного листа, м; λ_{cm}, λ_i – коэффициенты теплопроводности стекла и воздуха соответственно, Вт/(м·К); δ_δ, δ_i – толщина воздушной прослойки в двухслойном и произвольном стеклопакете соответственно, м; ε – коэффициент конвекции в воздушной прослойке стеклопакета; n – количество слоев стекла в рассматриваемом стеклопакете.

Величины t_{f1}, t_{f2} полагаются заданными, λ_{cm}, λ_i – находятся в справочнике теплофизических свойств [11] по средним температурам стеклянного листа и воздушной прослойки соответственно, $\delta_\delta, \delta_{cm}$ – выбираются по результатам параметрического анализа для интересующих условий.

При фиксированном температурном напоре $t_{f1} - t_{f2}$ удельные теплотопотери через остекленный проем, как это видно из выражения (1), уменьшаются при уменьшении коэффициентов теплоотдачи α_1, α_2 , коэффициента конвекции ε и при увеличении количества слоев в стеклопакете n , толщины воздушной прослойки δ и толщины стекла δ_{cm} .

Коэффициенты теплоотдачи α_1, α_2 , коэффициент конвекции ε сложным образом зависят от температуры поверхностей стекла $t_1 \dots t_4, t', t''$ и температуры окружающих сред t_{f1}, t_{f2} , скорости ветра u , толщины воздушной прослойки δ , высоты h и ширины l проема.

Температуры поверхности стекла $t_1 \dots t_4, t', t''$ определяются в рассматриваемых условиях соотношениями:

$$\begin{aligned} t_1 &= t_{f1} - q/\alpha_1, \\ t_2 &= t_1 - q\delta_{cm}/\lambda_{cm}, \\ t' &= t_2 - q\delta/(\varepsilon\lambda_{cm}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} t_4 &= t_{f2} + q/\alpha_2, \\ t_3 &= t_4 + q\delta_{cm}/\lambda_{cm}, \\ t'' &= t' + q\delta/(\varepsilon\lambda_{cm}). \end{aligned} \quad (3)$$

Теплоотдача внутреннего воздуха протекает в условиях свободной конвекции, а коэффициент теплоотдачи α_1 можно определить с помощью эмпирического уравнения подобия [12]:

$$Nu_m = c(Gr Pr)_m^k \quad (4)$$

где Nu – число Нуссельта; Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля; g – ускорение свободного падения, м/с²; ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м²/с; β – коэффициент объемного расширения воздуха, К⁻¹; Δt – температурный напор,

К; μ – динамический коэффициент вязкости воздуха, Па·с; c_p – удельная изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); c, k – числовые коэффициенты, зависят от числа Рэлея $Ra = Gr \cdot Pr$; индекс m означает, что теплофизические свойства воздуха ($\lambda, \nu, \mu, \beta, c_p$), входящие в числа подобия Nu, Gr, Pr , выбираются по средней температуре t_m .

Число Нуссельта определяется выражением:

$$Nu = \alpha_1 h/\lambda$$

Число Грасгофа определяется следующим выражением:

$$Gr = \frac{gh^3}{\nu^2} \beta \Delta t$$

Число Прандтля определяется выражением:

$$Pr = \mu c_p / \lambda$$

Средняя температура определяется по формуле:

$$t_m = (t_{f1} + t_{f2})/2$$

При отсутствии ветра теплоотдача наружного воздуха также протекает в условиях свободной конвекции, а для определения коэффициента теплоотдачи α_2 остается пригодным уравнение подобия (4), если сделать замены:

$$\begin{aligned} Nu &= \alpha_2 h/\lambda, \\ \Delta t &= t_4 - t_{f2}, \\ t_m &= (t_4 + t_{f2})/2 \end{aligned} \quad (5)$$

При наличии ветра теплоотдача протекает в условиях вынужденной конвекции. В случае, когда направление ветра совпадает с плоскостью проема, коэффициент теплоотдачи α_2 можно определить по уравнению подобия [12]:

$$Nu_f = 0.037 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (6)$$

где Re – число Рейнольдса; индекс f означает, что теплофизические свойства воздуха (λ, ν, μ, c_p), входящие в числа подобия Nu, Pr , выбираются по средней температуре t_{f2} .

Число Рейнольдса определяется выражением:

$$Re = ul/\nu$$

Входящее в уравнение (6) число Nu определяется выражением:

$$Nu = \alpha_1 l/\lambda$$

Если направление ветра не совпадает с плоскостью светового проема, то для расчета

коэффициента α_2 должны быть использованы более сложные методы [13].

Коэффициент конвекции ε можно определить по эмпирическому уравнению подобия [12]:

$$\varepsilon = cRa_m^n \quad (7)$$

Числовые коэффициенты c и n зависят от числа Ra , выбираемого по средней температуре в воздушном зазоре t_m .

В зависимости от количества слоев стекла и номера воздушной прослойки в трехслойном стеклопакете, для которой определяется коэффициент конвекции, температура t_m определяется по одному из следующих выражений:

$$\begin{aligned} t_m &= (t_2 + t_3)/2, \\ t_m &= (t_2 + t')/2, \\ t_m &= (t'' + t_3)/2 \end{aligned} \quad (8)$$

Совместное решение системы уравнений (1) – (7) позволяет определить удельные теплотери через стеклопакет в конкретных условиях. Поскольку температуры t_1, \dots, t_4, t', t'' заранее не известны, то это решение выполняется методом последовательных приближений.

По изложенной методике проведено расчетное параметрическое исследование влияния различных факторов на удельные теплотери через двухслойный и трехслойный стеклопакеты. В расчеты закладывались следующие значения влияющих параметров:

$$\begin{aligned} t_{f1} &= 20 \text{ }^\circ\text{C}; \\ t_{f2} &= -20 \text{ }^\circ\text{C}; \\ h &= 1.5 \dots 2.5 \text{ м}; \\ l &= 1.5 \dots 2.5 \text{ м}; \\ \delta_{cm} &= 3 \dots 5 \text{ мм}; \\ \delta_g &= 10 \dots 300 \text{ мм}; \\ u &= 0 \dots 10 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

На рис. 1 представлены результаты исследования влияния толщины воздушной прослойки δ_g на удельные теплотери q , полученные для условий: $h = 1 = 1,5$ м; $\delta_{cm} = 3$ мм; $u = 0$; а также результаты расчетов, иллюстрирующие влияние скорости ветровой нагрузки на удельные теплотери

помещений здания через двухслойный и трехслойный стеклопакеты. Эти результаты соответствуют толщине воздушной прослойки $\delta_g = 80$ мм. Как видно из рис. 1, дополнительный слой стекла существенно (до 50% и более) снижает тепловые потери через остекленный проем, причем это снижение происходит главным образом за счет уменьшения коэффициента конвекции ε в воздушной прослойке, а не за счет термического сопротивления дополнительного листа стекла.

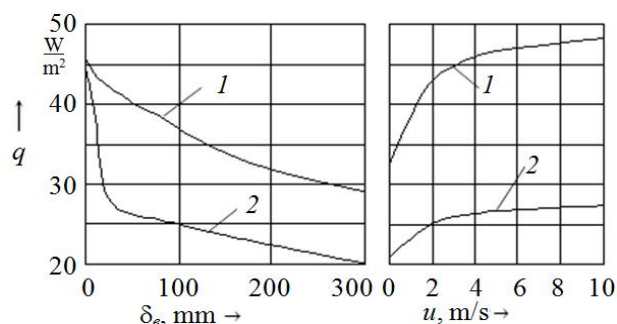


Рис. 1. Влияние толщины воздушной прослойки в стеклопакете и скорости ветра на удельные теплотери: 1 – двухслойный стеклопакет; 2 – трехслойный стеклопакет

Наиболее значимое (на 52%) снижение удельных тепловых потерь в рассматриваемых условиях имеет место при толщине воздушной прослойки $\delta_g = 80$ мм.

Как видно, скорость ветра также существенно влияет на теплотери. Так в рассматриваемых условиях при увеличении скорости ветра от 0 до 10 м/с удельные теплотери увеличиваются на 15% для двухслойного и на 23% для трехслойного стеклопакета. Наиболее интенсивное изменение теплотери имеет место при изменении скорости ветра от 0 до 4 м/с.

Расчеты показали также, что изменение толщины стеклянного листа и размеров светового проема в исследованном диапазоне оказывает незначительное (в пределах 1...1.5%) влияние на удельные теплотери.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКОН ПОВЫШЕННОЙ ГЕРМЕТИЧНОСТИ НА ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ЗДАНИЯ

Для моделирования теплообмена в здании использованы разработанные ранее математический аппарат для построения модели тепловосостояния здания [14, 15] и реализующий его программный продукт [16] с учетом влияния на тепловой баланс окон повышенной герметичности. Тепловой баланс

отдельного помещения или здания в целом, складывается из следующих составляющих:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6 + Q_7, \quad (9)$$

где Q_1 – тепловая мощность системы отопления, Вт; Q_2 – совокупная тепловая мощность осветительных приборов, Вт; Q_3 – теплопоступление от людей, Вт;

Q_4 – теплопоступление за счет инсоляции, Вт; Q_5 – тепловые потери за счет теплопередачи через ограждающие конструкции, Вт; Q_6 – тепловые потери, связанные с инфильтрацией наружного воздуха, Вт; Q_7 – тепловые потери, связанные с вентиляцией помещения, Вт.

Мониторинг теплового состояния главного учебного корпуса [17], выполненный в отопительный период 2007-2008 года (до оснащения окнами повышенной герметичности), показал, что до 60 % потерь приходится на Q_5 и не менее 40 % приходится на Q_6 и Q_7 [18]. Внедрение окон повышенной герметичности оказывает влияние на составляющую Q_6 теплового баланса, сводя ее практически к нулю, и опосредованное влияние на составляющие Q_1 , Q_4 и Q_7 . Именно вследствие опосредованного влияния реальная экономия тепловой энергии, обеспечиваемая внедрением окон повышенной герметичности, оказывается существенно меньше ожидаемой.

Рассмотрим особенности этого влияния подробнее. Если Q_1 не адаптирована к изменению Q_6 , это приведет к повышению температуры. Так, после оснащения главного учебного корпуса окнами повышенной герметичности, зафиксировано превышение комфортного уровня температура в помещениях в среднем на 5...6 °С [9]. Следствием является рост скрытых тепловых потерь за счет проветривания помещений, который сводит к нулю положительный эффект от уменьшения Q_6 . Поэтому очевидно, что реализовать преимущества от использования окон повышенной герметичности можно только при условии соответствующего уменьшения Q_1 . Одним из вариантов является внедрение автоматизированных систем управления теплопотреблением зданий на основе его регулирования по времени суток, по фасадам и по этажам здания [19].

Опосредованное влияние данных окон на Q_7 баланса (1) заключается в возрастании нагрузки на вентиляцию при нулевой инфильтрации наружного воздуха. Дополнительная нагрузка на вентиляцию определяется по допустимым концентрациям вредностей. В большинстве помещений общественных и жилых зданий воздухообмен обеспечивает общеобменная естественная система вентиляции, функционирующая за счет притока наружного воздуха через неплотности в оконных конструкциях и его удаления через вытяжные каналы. Для таких помещений энергетическая система микроклимата должна обеспечивать удаление избыточных теплопоступлений, влаги и углекислого газа CO_2 .

Концентрация CO_2 в воздухе помещения является одним из ключевых факторов управления системами обеспечения микроклимата здания [2].

Так, применительно к CO_2 дополнительный расход воздуха, удаляемого из помещения, может быть рассчитан по формуле:

$$\Delta G_v = \frac{G_{CO_2}}{n_2 - n_1} - G_{v0}, \quad (10)$$

где G_{CO_2} – объемный расход углекислого газа, выделяющегося в помещении, $см^3/ч$; n_1 и n_2 – допустимые концентрации углекислого газа в наружном воздухе и в воздухе помещения, $см^3/м^3$; G_{v0} – объемная производительность действующей системы вентиляции в помещении, $м^3/ч$.

На рис. 2 представлены некоторые результаты экспериментального и расчетного исследования изменения концентрации углекислого газа в воздухе в одной (репрезентативной) аудитории здания главного учебного корпуса с окнами повышенной герметичности [10].

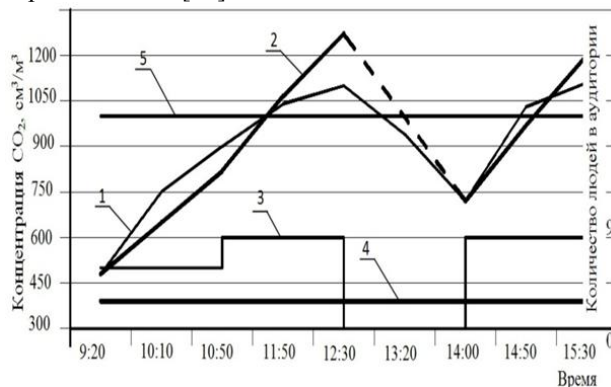


Рис. 2. Изменение концентрации углекислого газа в аудитории с окнами повышенной герметичности: 1 – эксперимент; 2 – расчет по (2); 3 – нагрузка аудитории; 4, 5 – концентрация углекислого газа соответственно предельно допустимая и в свежем воздухе ($G_{v0} = 580 м^3/ч$, $n_1 = 1000 см^3/м^3$, $n_2 = 380 см^3/м^3$)

Баланс избыточной теплоты, влаги и углекислого газа в помещении описывается следующими уравнениями:

$$Q_{II} + \sum_{i=1}^n G_{II_i} \cdot I_{II_i} - \sum_{j=1}^m G_{y_j} \cdot I_{y_j} = 0 \quad (11)$$

$$M_{вл} + \sum_{i=1}^n G_{II_i} \cdot d_{II_i} \cdot 10^{-3} - \sum_{j=1}^m G_{y_j} \cdot d_{y_j} \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

$$M_{CO_2} + \sum_{i=1}^n G_{\Pi_i} \cdot \frac{c_{\Pi_i}}{\rho_{\Pi_i}} - \sum_{j=1}^m G_{y_j} \cdot \frac{c_{y_j}}{\rho_{y_j}} \quad (13)$$

где Q_{Π} – избыток теплоты, выделяющийся в помещении, Дж/ч; G_{Π_i}, G_{y_j} – соответственно расход приточных и вытяжных систем вентиляции в помещении, кг/ч; I_{Π_i}, I_{y_j} – соответственно энтальпия приточного и удаляемого воздуха, Дж/кг; $M_{вл}$ – влага, выделяющаяся в помещении, кг/ч; d_{Π_i}, d_{y_j} – соответственно степень сухости приточного и удаляемого воздуха, г/кг; M_{CO_2} – двуокись углерода, выделяющаяся в помещение, л/ч; $c_{\Pi_i}, c_{y_j}, \rho_{\Pi_i}, \rho_{y_j}$ – концентрация и плотность приточного и удаляемого воздуха соответственно.

При установке окон повышенной герметичности G_{Π_i} прекращается, соответственно, G_{y_j} стремится к нулю, поэтому выделяемые вредности $Q_{\Pi}, M_{вл}, M_{CO_2}$ накапливаются в помещении.

Для учебных аудиторий и кабинетов поступающие вредности описываются следующими уравнениями:

$$Q_{\Pi} = q \cdot n + \Delta Q \quad (14)$$

$$M_{вл} = m_{вл} \cdot n \quad (15)$$

$$M_{CO_2} = m_{CO_2} \cdot n \quad (16)$$

где q – теплота, выделяемая одним человеком, Дж/ч; n – количество людей в помещении; ΔQ – экономия теплоты за счет установки окон повышенной герметичности, Дж/ч; $m_{вл}$ – влага, выделяемая одним человеком, кг/ч; m_{CO_2} – двуокись углерода, выделяемая одним человеком, л/ч.

Количество воздуха необходимое для рассеивания такого избытка вредностей определяется по следующим зависимостям:

$$\Delta G_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi}}{I_{y_j} - I_{\Pi_i}} \quad (17)$$

$$\Delta G_{вл} = \frac{M_{вл}}{(d_{y_j} - d_{\Pi_i}) \cdot 10^{-3}}, \quad (18)$$

$$\Delta G_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{(n_2 - n_1) \cdot 10^{-3}} \quad (19)$$

Для исследования динамики накопления и рассеивания CO_2 рассмотрена репрезентативная аудитория (рис. 3). Принято, что наибольшая загруженность аудитории происходит в середине

дня и что выдыхаемый вместе с воздухом углекислый газ накапливается в помещении в полном объеме без рассеивания.

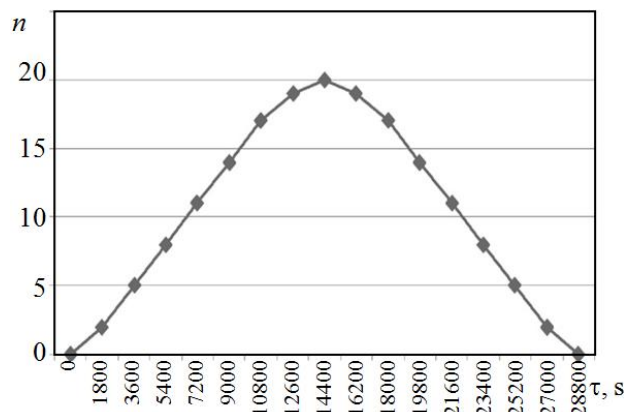


Рис. 3. Фактическое распределение людей в аудитории в зависимости от времени

Для данной зависимости исследовано изменение расхода воздуха, необходимого для рассеивания CO_2 , выдыхаемого людьми. Из рис. 4 по зависимости изменения концентрации CO_2 по времени видно уменьшение расхода воздуха во времени, а также рост концентрации CO_2 в воздухе помещения.

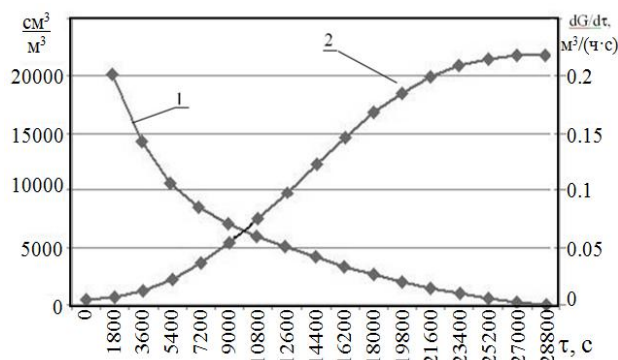


Рис. 4. Изменение расхода воздуха для рассеивания CO_2 и концентрации CO_2 по времени: 1 – график изменения расхода воздуха во времени; 2 – график изменения концентрации CO_2 во времени

Для своевременного рассеивания CO_2 в воздухе в помещениях с окнами повышенной герметичности с естественной вытяжной вентиляцией необходимо проветривание. Расход воздуха при проветривании должен быть таким, что бы рассеивать самый пик вредностей, т.е. на данном примере при значении времени 10800 с (рис. 5).

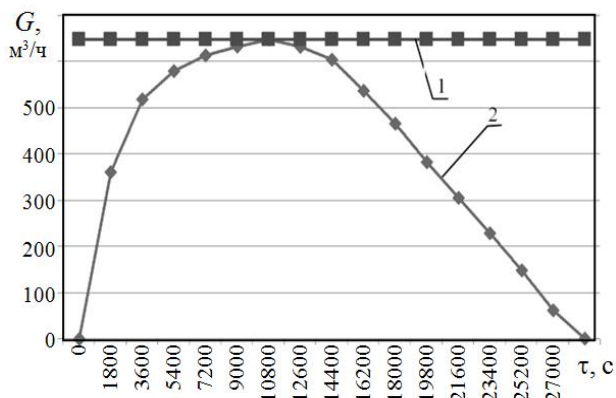


Рис. 5. Изменение расхода воздуха во времени: 1 – график требуемого расхода для рассеивания CO_2 , 2 – максимальный расход воздуха требуемый для рассеивания CO_2

Из рис. 5 видно, что расход воздуха при проветривании должен достигать значения около $650 \text{ м}^3/\text{ч}$. Для обеспечения проветривания предполагается использовать разрабатываемую автоматическую систему вентиляции помещения, осуществляющую проветривание через определенные промежутки времени.

Оценка температурно-влажностного режима здания с окнами повышенной герметичности показала несоответствие температуры воздуха нормативным значением в контрольных точках, температура превышает верхний порог допустимой нормативной температуры в среднем на $1.5 \dots 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

При расчете количества необходимого воздуха для проветривания предлагается учитывать коэффициент рассеивания вредностей рассчитываемых по формулам (14)-(16). Так как стандартная учебная аудитория или кабинет не полностью герметичен, данные вредности, поступающие в такие помещения, накапливаются не полностью. Существует определенное рассеивание. Таким образом, расход вредностей, которые накапливаются в помещении, предлагается определять по следующим выражениям:

$$Q_{II}^n = Q_{II} \cdot \beta_1$$

$$M_{вл}^{II} = M_{вл} \cdot \beta_2$$

$$M_{\text{CO}_2}^{II} = M_{\text{CO}_2} \cdot \beta_3$$

где Q_{II}^n – избыток теплоты, накапливающийся в помещении, Дж/ч; $M_{вл}^{II}$ – влага, накапливающаяся в помещении, кг/ч; $M_{\text{CO}_2}^{II}$ – двуокись углерода, накапливающаяся в помещении, л/ч.

По углекислому газу выведена зависимость коэффициента рассеивания β_3 от концентрации CO_2 в воздухе (рис. 6).

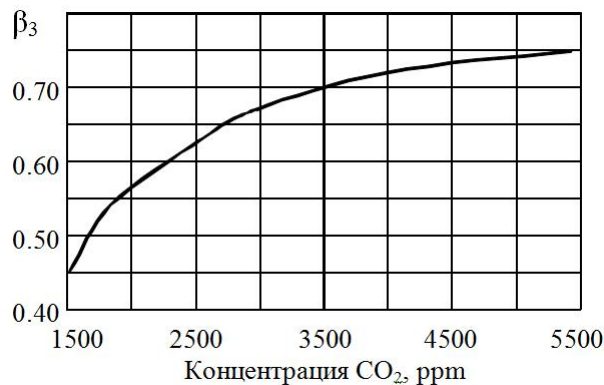


Рис. 6. Зависимость коэффициента рассеивания β_3 от концентрации CO_2 в воздухе помещения

Энергоэффективность адаптивного сопряженного управления вентиляцией (проветриванием) и теплопотреблением здания с окнами повышенной герметичности исследовали на примере главного учебного корпуса с пофасадным регулированием теплопотребления посредством автоматического изменения коэффициента подмешивания g . При постоянстве всех прочих параметров и поддержании заданной температуры внутреннего воздуха, изменение кратности воздухообмена K , обеспечивающей допустимые концентрации загрязняющих веществ в воздухе, повлечет изменение температуры теплоносителя системы отопления, удовлетворяющее следующему условию:

$$c_T G_T (t_1 + t_2) \frac{dg}{d\tau} = c_B \rho_B V (t_{вн} - t_n) \frac{dK}{d\tau} \quad (20)$$

где t_1 – температура теплоносителя прямого трубопровода, К; t_2 – температура теплоносителя обратного трубопровода, К; G_T – массовый расход теплоносителя системы отопления; $\frac{dg}{d\tau}$ – удельное

изменение коэффициента подмешивания в единицу времени; V – объем помещения или группы помещений; c_B – изобарная массовая теплоемкость воздуха; $\frac{dK}{d\tau}$ – удельное изменение кратности воздухообмена в единицу времени; c_T – теплоемкость воды (теплоносителя системы отопления).

На рис. 7 представлены некоторые результаты моделирования адаптивного сопряженного управления теплопотреблением и вентиляцией главного учебного корпуса при поддержании комфортной температуры на отметке $23 \text{ }^\circ\text{C}$ и

концентрации углекислого газа в помещениях не более $1000 \text{ см}^3/\text{м}^3$.

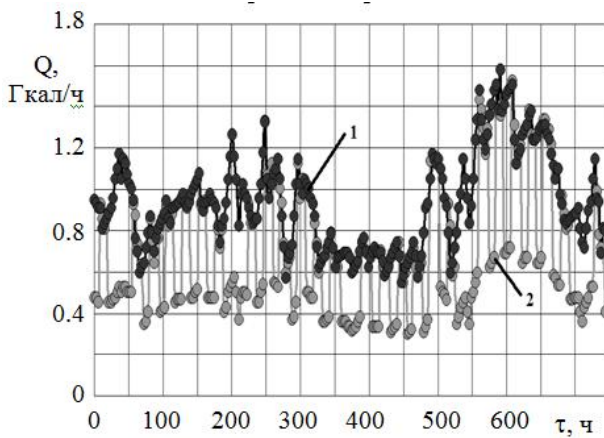


Рис. 7. Теплопотребление главного учебного корпуса с окнами повышенной герметичности при наличии

сопряженного управления вентиляцией (1) и без нее (2)

Установлено, что с применением такого управления экономия тепловой энергии, обеспечиваемая за счет окон повышенной герметичности, может достигать 30 % тепловой энергии, потребляемой зданием.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ ЗДАНИЯ

Тепловая модель учебного корпуса позволяет для заданных условий окружающей среды (температуры наружного воздуха, направления и скорости ветра, атмосферного давления и т.п.) при заданном графике центрального качественного регулирования температуры теплоносителя (сетевой воды) определить требуемую тепловую мощность на отопление, температуру внутреннего воздуха в каждом помещении главного корпуса и их зависимость от положения исполнительных механизмов СОТ, определяющих значение коэффициента подмешивания G воды в подающей магистрали к воде в обратной магистрали при их подаче в отопительные приборы. Под помещением понимается замкнутый объем пространства (аудитория, комната, кабинет, лестничная клетка, санузел, вентиляционные и лифтовые шахты и т.д.), сообщающийся с другими помещениями как на одном этаже, так и на выше- и нижерасположенных этажах, а также с окружающей средой через стены, окна и дверные проемы.

Для каждого помещения в электронной базе данных тепловой модели заданы следующие параметры: объем V , м^3 ; площадь S , м^2 ; толщины всех стен δ_i , окон δ_{1i} и дверных проемов δ_{2i} , м; перечень всех помещений, сообщающихся с рассматриваемым на одном этаже, с указанием площади общих стен F_{0j} , окон F_{1j} и дверных проемов F_{2j} ; перечень всех помещений вышерасположенного этажа, сообщающихся с рассматриваемым помещением, с указанием площади F_k общего перекрытия; то же, нижерасположенного этажа; площади стен, окон и дверных проемов, сообщающихся с наружной

средой, м^2 ; количество людей n_i ; мощность осветительных приборов N_{oi} , Вт и т.п. Кроме того, для каждого помещения по методикам [12, 20-25] производится расчет массового расхода инфильтрующегося G_{inf} и вентилируемого G_{vnt} воздуха, кг/с; параметра отопительного прибора $k_b F_b$, Вт/К; средней температуры теплоносителя в отопительном приборе t_{mf} , $^{\circ}\text{C}$; коэффициентов теплоотдачи к внутренней α_1 и наружной α_2 поверхности каждой стены или перекрытия, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$).

Температура воздуха в помещении определяется путем решения системы балансовых уравнений, составленных для каждого из помещений. Балансовое уравнение для произвольного помещения имеет вид:

$$t = \frac{k_b F_b t_{mf} + 87.5n + N_0 + 1005(G_{inf} t_{out} + G_{vnt} t_{vnt}) + \sum_{i=1}^M (kF)_i t_i}{k_b F_b + 2.5n + 1005(G_{inf} + G_{vnt}) + \sum_{i=1}^M (kF)_i} \quad (21)$$

Здесь t_{out} — температура наружного воздуха; t_{vnt} — температура приточного вентиляционного воздуха; M — количество помещений, смежных с анализируемым, которые расположены на том же этаже, а также на выше- и нижерасположенных этажах; k — коэффициент теплопередачи.

Зависимость температур теплоносителя в подающей и обратной магистралях от температуры наружного воздуха выражается уравнениями:

$$t_f = t + \Delta t' \left(\frac{t - t_{out}}{t - t_{out0}} \right)^{0.8} +$$

$$+ (\Delta \tau' - 0.5\Theta') \left(\frac{t - t_{out}}{t - t_{out0}} \right)$$

$$t_b = t + \Delta t' \left(\frac{t - t_{out}}{t - t_{out0}} \right)^{0.8} -$$

$$- 0.5\Theta' \left(\frac{t - t_{out}}{t - t_{out0}} \right)$$

Здесь t_f , t_b – соответственно температура теплоносителя в подающей и обратной магистралях при температуре наружного воздуха t_{out} ; t_{out0} – расчетная температура наружного воздуха (для Ульяновска $t_{out0} = -31$ °C); $\Delta t'$ – расчетный температурный напор нагревательного прибора; $\Delta \tau'$ – расчетный перепад температур теплоносителя в тепловой сети; Θ' – расчетный перепад температуры теплоносителя в нагревательных приборах.

$$\Delta \tau' = t'_f - t'_b; \quad (24)$$

$$\Theta' = t'_{f\ in} - t'_b \quad (25)$$

$$\Delta t' = \frac{t'_f + t'_b}{2} \quad (26)$$

где t'_f , t'_b – соответственно температура теплоносителя в подающей и обратной магистралях при расчетной температуре наружного воздуха t_{out0} ; $t'_{f\ in}$ – расчетная температура теплоносителя на входе в нагревательный прибор.

Фактическая температура теплоносителя на входе в отопительный прибор определяется соотношением:

$$t_{f\ in} = t_f G + t_b (1 - G) \quad (27)$$

где коэффициент подмешивания G определяется положением исполнительного механизма.

Средняя температура жидкости в отопительном приборе выражается зависимостью:

$$t_{mf} = 0.5(t_{f\ in} + t_b) \quad (28)$$

Значение средней температуры теплоносителя определяет температуру внутреннего воздуха в помещениях и расход тепловой энергии. Таким образом, выражение (28) представляет собой уравнение регулирования. Задача оптимизации теплотребления заключается в обеспечении минимального расхода тепловой энергии на отопление здания при условии поддержания на заданном уровне температуры внутреннего воздуха

за счет автоматического выбора необходимого значения коэффициента G .

Оценка эффективности использования системы управления теплотреблением предполагает сравнение количества потребленной объектом тепловой энергии за определенный промежуток времени при наличии такой системы и ее отсутствии. При отсутствии автоматизированной системы, регулирование теплотребления осуществляется в элеваторных узлах, где путем смешивания в определенной (неизменной во времени) пропорции теплоносителей из подающей и обратной магистралей готовится теплоноситель, поступающий в нагревательные приборы. Температуру смеси (теплоносителя, поступающего в нагревательные приборы), пренебрегая зависимостью плотности и удельной теплоемкости теплоносителя (воды) от температуры, можно выразить балансовым соотношением (28). Таким образом, при отсутствии автоматизированной системы управления в элеваторных узлах обеспечивается реализация такого постоянного во времени коэффициента подмешивания G_0 , при котором для принятого графика центрального регулирования достигается расчетная температура теплоносителя на входе в нагревательный прибор (в рассматриваемых условиях 95 °C). Для графика центрального качественного регулирования 150÷70 значение $G_0 = 0.3125$. При этом температура воздуха в помещениях в течение всего отопительного периода не должна опуститься ниже значения, регламентированного санитарными нормами. Очевидно, что в этом случае будут существовать периоды, в течение которых температура воздуха в помещениях окажется выше нормативного значения, теплотребление окажется выше необходимого и произойдет перерасход тепловой энергии.

В настоящее время в условиях постоянного дефицита топлива нередко поставщик тепловой энергии не обеспечивает расчетных параметров теплоносителя в подающей магистрали. В этом случае потребители тепловой энергии вынуждены работать при максимально возможном значении коэффициента G_0 , равном 1, чтобы поддерживать температуру в помещениях на максимально возможном уровне. Практически это означает, что теплоноситель из подающей магистрали напрямую подается на нагревательные приборы.

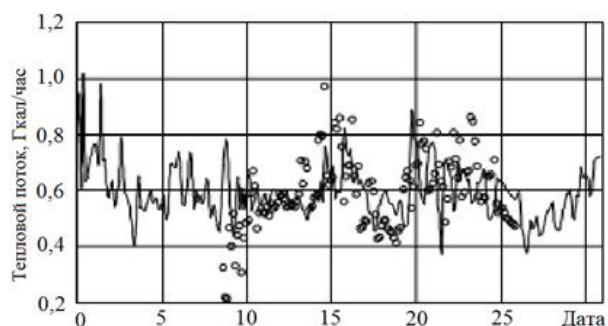
При наличии автоматизированной системы, коэффициент подмешивания G автоматически изменяется таким образом, чтобы температура теплоносителя $t_{f\ in}$ принимала значение, обеспечивающее заданную температуру внутреннего воздуха в помещениях. Таким образом, относительная экономия тепловой энергии η в рассматриваемых условиях за промежуток времени

$\Delta\tau$, обусловленная наличием системы автоматического регулирования, может быть определена выражением:

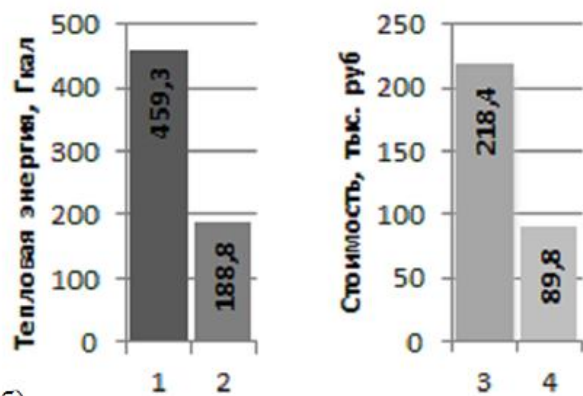
$$\eta = \frac{1}{\Delta\tau} \int_0^{\Delta\tau} \left(\frac{\bar{t}_{fin} - t_{fin}}{\bar{t}_{fin} - t_b} \right) d\tau \quad (29)$$

где τ – текущее время; \bar{t}_{fin} – значение температуры смеси, соответствующее значению коэффициента подмешивания G_0 .

С использованием изложенной методики выполнен анализ теплотребления и экономии тепловой энергии для главного корпуса УлГТУ, некоторые результаты которого приведены на рис. 8.



а)



б)

Рис. 8. а) Тепловой поток, потребляемый зданием: \circ – измерен с помощью приборов учета; линия – расчет на основе показаний автоматизированной СОТ

б) Потребление и экономия тепловой энергии за декабрь 2014 г.: 1 – потребленная тепловая энергия; 2 – сэкономленная тепловая энергия; 3 – стоимость потребленной энергии; 4 – стоимость сэкономленной энергии

Экономия тепловой энергии составляет более 40%. Необходимо отметить, что для главного учебного корпуса УлГТУ имеются существенные резервы экономии тепловой энергии, поскольку приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций оказалось 2...4 раза меньшим регламентируемого [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Анализ результатов исследования позволяет отметить, что, как правило, у зданий старой постройки существует большой потенциал для экономии тепловой энергии, который можно выявить в наружных ограждающих конструкциях и в энергетических системах обеспечения микроклимата здания.
- Реальная экономия тепловой энергии, обеспечиваемая внедрением окон повышенной герметичности, как правило, оказывается существенно меньше ожидаемой из-за

сопутствующего увеличения скрытых тепловых потерь за счет проветривания помещений, либо вследствие возрастающей вентиляционной нагрузки в системе обеспечения микроклимата. Технично-экономические преимущества от использования окон повышенной герметичности могут быть реализованы только при условии комплексного выполнения следующих мероприятий:

- комплексное управление системами обеспечения микроклимата здания;

- учет меняющийся технологической нагрузки помещений здания;
- уменьшение тепловой мощности системы отопления пропорционально уменьшению инфильтрационной составляющей теплового баланса в помещениях здания;
- адаптивное управление тепловой мощностью системы отопления на основе регулирования по времени суток, по фасадам и по этажам здания;

- оптимизация режима функционирования и структуры системы вентиляции с учетом изменения составляющих теплового баланса помещений и возросшей вентиляционной нагрузки;
- учет эмиссии углекислого газа CO₂, при управлении системами вентиляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rune K. Andersen, Valentina Fabi, Stefano P. Corngati. Predicted and actual indoor environmental quality: Verification of occupants' behaviour models in residential buildings // *Energy and Buildings*. Elsevier, Volume 127, 1 September 2016, Pages 105–115; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.074>.
2. Alexandros Pantazaras, Siew Eang Lee, Mattheos Santamouris, Junjing Yang. Predicting the CO2 levels in buildings using deterministic and identified models // *Energy and Buildings*. Volume 127, 1 September 2016, Pages 774–785; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.029>.
3. Maohui Luo, Xiang Zhou, Yingxin Zhu, Dongqian Zhang, Bin Cao. Exploring the dynamic process of human thermal adaptation: A study in teaching building // *Energy and Buildings*. Volume 127, 1 September 2016, Pages 425–432; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.096>.
4. Anna Laura Pisello, Veronica Lucia Castaldo, John Eric Taylor, Franco Cotana. The impact of natural ventilation on building energy requirement at inter-building scale // *Energy and Buildings*. Volume 127, 1 September 2016, Pages 870–883; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.023>.
5. Martin Thalfeldt, Jarek Kurmitski, Hendrik Voll. Detailed and simplified window model and opening effects on optimal window size and heating need // *Energy and Buildings*. Elsevier, Volume 127, 1 September 2016, Pages 242–251; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.002>.
6. Hildebrando Cruz, João Carlos Viegas. On-site assessment of the discharge coefficient of open windows // *Energy and Buildings*. Volume 126, 15 August 2016, Pages 463–476; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.051>.
7. A.J. Robinson. A thermal model for energy loss through walls behind radiators // *Energy and Buildings*. Elsevier, Volume 127, 1 September 2016, Pages 370–381; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.086>.
8. Ковальногов, Н.Н. Автоматизированная система оптимального управления отоплением учебного заведения / Н.Н. Ковальногов, А.С. Ртищева, Е.А. Цынаева // *Известия вузов. Проблемы энергетики*, 2007. – № 3/4. – С. 140-147.
Kovalnogov, N.N. Avtomatizirovannaya sistema optimalnogo upravleniya otopleniem uchebnogo zavedeniya / N.N. Kovalnogov, A.S. Rtishcheva, E.A. Tsynaeva // *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2007. – № 3/4. – S. 140-147.
9. Пазушкин, П.Б. Особенности проектирования систем микроклимата главного учебного корпуса УЛГТУ / П.Б. Пазушкин, Д.С. Калашников, Ю.Е. Чамчиян // *Новые технологии в теплоснабжение и строительстве: Сборник работ аспирантов и студентов – сотрудников НИЛ «Теплоэнергетические системы и установки»*. – Выпуск 7. – Ульяновск: УЛГТУ, 2009. – С. 323-333.
Pazushkin, P.B. Osobennosti proektirovaniya sistem mikroklimate glavnogo uchebnogo korpusa UIGTU / P.B. Pazushkin, D.S. Kalashnikov, Yu.E. Chamchiyan // *Novye tekhnologii v teplosnabzhenie i stroitelstve: Sbornik rabot aspirantov i studentov – sotrudnikov NIL «Teploenergeticheskie sistemy i ustanovki»*. – Vypusk 7. – Ulyyanovsk: UIGTU, 2009. – S. 323-333.
10. Ковальногов В.Н. Системный анализ, моделирование и исследование эффективности энергетических систем обеспечения микроклимата городских зданий / Ковальногов В.Н., Чамчиян Ю.Е. // *Труды Академэнерго*, 2014. – № 2. – С. 87-95.
Kovalnogov V.N. Sistemnyy analiz, modelirovanie i issledovanie effektivnosti energeticheskikh sistem obespecheniya mikroklimate gorodskikh zdany / Kovalnogov V.N., Chamchiyan Yu.E. // *Trudy Akademenergo*, 2014. – № 2. – S. 87-95.
11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey. M.: Nauka, 1972.

- 721 s.
12. Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1991. 480 с.
Mukhachev G.A., Shchukin V.K. Termodinamika i teploperedacha. M.: Vysshaya shkola, 1991. 480 s.
 13. Ковальногов Н.Н. Пограничный слой в потоках с интенсивными воздействиями. Ульяновск: УлГТУ, 1996. 246 с.
Kovalnogov N.N. Pogranichnyy sloy v potokakh s intensivnymi vozdeystviyami. Ulyyanovsk: UIGTU, 1996. 246 s.
 14. Ковальногов, Н.Н. Тепловая модель главного учебного корпуса УлГТУ, оборудованного системой оптимизации теплоснабжения / Н.Н. Ковальногов, В.Н. Ковальногов, А.С.Ртищева, А.Н. Афонин // Континуальные алгебраические логики, исчисления и нейроинформатика в науке и технике: тр. междунар. конф.– Ульяновск: УлГТУ, 2004. – Т. 7. – С. 102-106.
Kovalnogov, N.N. Teplovaya model glavnogo uchebnogo korpusa UIGTU, oborudovannogo sistemoy optimizatsii teplopotrebleniya / N.N. Kovalnogov, V.N. Kovalnogov, A.S.Rtishcheva, A.N. Afonin // Kontinualnye algebraicheskie logiki, ischisleniya i neyroinformatika v nauke i tekhnike: tr. mezhdunar. konf.– Ulyyanovsk: UIGTU, 2004. – Т. 7. – С. 102-106.
 15. Vladislav N. Kovalnogov, Yuri E. Chamchiyan and Dmitry V. Suranov. Modeling, research and development of the system for optimal heat consumption of a building // AIP Conference Proceedings, 1648, 850031 (2016); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4952242>
 16. Расчет теплового состояния здания высшего учебного заведения: програм. продукт: № 6006 / Ковальногов Н.Н., Ковальногов В.Н., Ртищева А.С.; Ульян. гос. техн. ун-т. – ИнФР № 50200600553, рег. 26.04.2006.
Raschet teplovogo sostoyaniya zdaniya vysshego uchebnogo zavedeniya: program. produkt: № 6006 / Kovalnogov N.N., Kovalnogov V.N., Rtishcheva A.S.; Ulyyan. gos. tekhn. un-t. – InFR № 50200600553, reg. 26.04.2006.
 17. Ртищева, А.С. Исследование теплоизоляционных свойств ограждающих конструкций здания // Труды VI Школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», 16-18 сентября. Казань, 2008. – С.423-425.
Rtishcheva, A.S. Issledovanie teploizolyatsionnykh svoystv ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniya // Trudy VI Shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov akademika RAN V.E. Alemasova «Problemy teplomassoobmena i gidrodinamiki v energomashinostroenii», 16-18 sentyabrya. Kazan, 2008. – S.423-425.
 18. Ртищева А.С., Чамчиан Ю.Е. Численное исследование экономии тепловой энергии в зданиях в условиях управления вентиляцией // АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ АПК/ Материалы V Международной научно-практической конференции. Под редакцией В.А. Трушкина. Саратов, 2014. – С. 271-272.
Rtishcheva A.S., Chamchiyan Yu.E. Chislennoe issledovanie ekonomii teplovoy energii v zdaniyakh v usloviyakh upravleniya ventilyatsiyey // AKTUALNYE PROBLEMY ENERGETIKI APK/ Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Pod redaktsiyey V.A. Trushkina. Saratov, 2014. – S. 271-272.
 19. Ковальногов В.Н., Ртищева А.С., Чамчиан Ю.Е. Моделирование и исследование влияния окон повышенной герметичности на энергосбережение и тепловой баланс здания // Тезисы докладов и сообщений. Научное издание XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену 10-13 сентября 2012 г. В 2-х томах. - Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, 2012. Т. 2. Ч. 1. - С. 289-291
Kovalnogov V.N., Rtishcheva A.S., Chamchiyan Yu.E. Modelirovanie i issledovanie vliyaniya okon povyshennoy germetichnosti na energosberezhenie i teplovy balans zdaniya // Tezisy dokladov i soobshcheniy. Nauchnoe izdanie XIV Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplo- i massoobmenu 10-13 sentyabrya 2012 g. V 2-kh tomakh. - Minsk: Institut teplo- i massoobmena im. A.V. Lykova, 2012. T. 2. Ch. 1. - S. 289-291
 20. СНиП 2.04.05-91. Отопление, вентиляция и кондиционирование. М.: 1997.
SNiP 2.04.05-91. Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie. M.: 1997.
 21. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. М.: 1999.
SNiP 23-01-99. Stroitel'naya klimatologiya. M.: 1999.
 22. СНиП II-3-01-79. Строительная теплотехника. М.: 1998.
SNiP II-3-79. Stroitel'naya teplotekhnika. M.: 1998.
 23. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ. 2001.
Sokolov E.Ya. Teplofikatsiya i teplovye seti. M.: Izd-vo MEI. 2001.
 24. Апарцев М.М. Наладка водяных систем централизованного теплоснабжения. М.: 2001.

Энергоатомиздат. 1983.

Apartsev M.M. Naladka vodyanykh sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya. M.: Energoatomizdat. 1983.

25. Программно-информационный комплекс для расчета микроклимата здания с окнами повышенной герметичности: програм. продукт: № 2014661475 / Ковальногов В.Н., Чамчиян

Ю.Е., Федоров Р.В.; Ульян. гос. техн. ун-т., рег. 30.10.2014.

Programmno-informatsionnyy kompleks dlya rascheta mikroklimate zdaniya s oknami povyshshchennoy germetichnosti: program. produkt: № 2014661475 / Kovalnogov V.N., Chamchiyan Yu.E., Fedorov R.V.; Ulyyan. gos. tekhn. un-t., reg. 30.10.2014.