

0.13.06
674

На правах рукописи



Анисимова Елена Юрьевна

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ОБЩЕСТВЕННО-
АДМИНИСТРАТИВНЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2008

Работа выполнена на кафедре «Теплогасоснабжение и вентиляция» ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор Панферов В.И.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Глухов В.Н.

кандидат технических наук Ветров В.И.

Ведущая организация – ОАО Проектный институт гражданского строительства, планировки и застройки городов и поселков «Магнитогорскгражданпроект»

Защита диссертации состоится «20» марта 2008 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д212.298.03 при ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина 76, аудитория 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет, тел. (351) 267-91-23, факс (351) 265-62-05.

Автореферат разослан « 11 » февраля 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор



А.Г. Щипицын

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В условиях рыночной экономики и значительного повышения цен на энергоресурсы особую значимость приобретает задача эффективного использования тепловой энергии в системах теплоснабжения зданий. В настоящее время большинство существующих систем отопления жилых, общественных и промышленных зданий работают практически в неуправляемом режиме и нагревательные приборы в течение длительного времени выделяют избыточное количество теплоты, что ведет к массовому перегреву воздуха в помещениях, то есть к снижению теплового комфорта, а также к перерасходу тепловой энергии. Вместе с тем отсутствие индивидуальных средств учета потребления тепла и воды, индивидуальных средств регулирования потребления теплоты, негерметичность наружных ограждающих конструкций, потери в теплотрассах приводят к тому, что потребитель при расчете за потребленные энергоресурсы дополнительно оплачивает 30-40% их потерь. Все эти вопросы достаточно широко и подробно освещены в работах многих ученых: Каменева П.Н., Одельского Э.Х., Богословского В.Н., Карписа Е.Е., Сканави А.Н., Чистовича С.А., Глухова В.Н., Ветрова В.И., Ливчака И.Ф., Строя А.Ф., Туркина В.П., Табунщикова Ю.А., Груздинского М.М. и др.

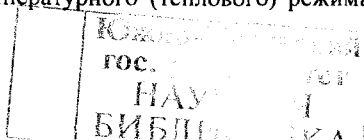
Современные требования к проектированию систем отопления направлены на повышение эффективности их функционирования, обязательную разработку и внедрение систем автоматического управления ими с привлечением для решения задач идентификации и управления процессами теплоснабжения новейших результатов теоретических и прикладных исследований.

Однако до сих пор не разработаны эффективные способы экономии тепловой энергии, затрачиваемой на отопление зданий, в частности, в нерабочее время. К сожалению, известные в литературе модели и алгоритмы управления температурными (тепловыми) режимами зданий получены, зачастую, путем использования ряда серьезных упрощений, вследствие этого они недостаточно точны и имеют ограниченную область применения, или же напротив, модели имеют настолько сложную структуру, что становятся практически неприемлемыми для целей регулирования. В связи с этим крайне необходимо выполнить решение задач синтеза уточненных структур (с детальным учетом физики процессов) и настройки моделей на «реальный процесс» с последующей разработкой оптимальных алгоритмов управления микроклиматом здания.

Цель работы: разработка алгоритмов оптимального управления тепловыми режимами общественно-административных и производственных зданий (ТРЗ) на основе структурной и параметрической идентификации модели, а также создание соответствующего алгоритмического и программного обеспечений.

Задачи исследования:

- 1) анализ существующих методов автоматического управления температурным (тепловым) режимом зданий;
- 2) построение математической модели температурного (теплого) режима зданий (ТРЗ);



3) разработка оптимальных алгоритмов управления температурным (тепловым) режимом зданий;

4) разработка программного обеспечения для расчета оптимального управления микроклиматом зданий.

Объект исследований. Объектом исследования является тепловой режим зданий.

Предмет исследований. Предметом исследования являются математические модели и алгоритмы управления тепловым режимом здания.

Методы исследований. Использованы численные методы решения обычных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, методы нелинейного программирования, теория идентификации математических моделей, экспериментальная проверка полученных результатов, вычислительные эксперименты и численные методы решения задач оптимизации.

Научная новизна работы:

1) В соответствии с физикой процессов предложена инженерная модель теплового режима зданий, разработан численный алгоритм реализации модели. Для автоматизации сбора экспериментальной информации разработана компьютерная измерительная система с соответствующим программным обеспечением;

2) Решена задача параметрической идентификации инженерной модели;

3) Разработан алгоритм оптимального управления тепловым режимом здания на основе инженерной модели, а также и на основе модели с распределенными параметрами;

4) Разработано программное обеспечение для моделирования и идентификации теплового режима зданий и расчета оптимального управления как для инженерной модели, так и для модели с распределенными параметрами. Программное обеспечение реализовано в средах программирования Basic, C++ и MatLab для операционных систем Windows;

5) Разработан алгоритм экономичного разогрева здания в холодный период года с температуры наружного воздуха за ограниченный период времени.

На защиту выносятся:

1) инженерная математическая модель теплового режима здания;

2) алгоритмы и результаты параметрической идентификации модели теплового режима здания, проверка адекватности модели;

3) алгоритмы оптимального управления микроклиматом зданий на основе инженерной модели;

4) условия оптимальности управления, сформулированные в форме принципа максимума для модели теплового режима зданий как объекта с распределенными параметрами. Общий вид оптимального управления. Вид субоптимального управления для модели с распределенными параметрами. Алгоритмы оптимального управления микроклиматом зданий на основе модели с распределенными параметрами.

Практическая ценность работы. Результаты могут быть использованы для прогнозирования, контроля и эффективного управления тепловым режимом

зданий, в частности, для выбора наиболее экономичного варианта отопления в нерабочий период, а также в случае возникновения аварийных ситуаций. Разработан алгоритм экономичного разогрева здания в холодный период года с температуры наружного воздуха.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на 5-й Всероссийской научно-технической конференции «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России» (г. Магнитогорск, 2004 г.); на V всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (г. Новокузнецк, 2005 г.), на Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогоснабжения и вентиляции» (г. Москва, 2005 г.), на XLV Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» (г. Челябинск, 2006 г.), на Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по проблемам теплоэнергетики (г. Челябинск, 2006 г.), на 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России» (г. Магнитогорск, 2006 г.), на Межрегиональной научно-практической конференции «Энергоэффективность систем энергоснабжения» в рамках выставки «ПРОМЭНЕРГО» (г. Челябинск, 2006 г.), на XLVI Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» (г. Челябинск, 2007 г.), на 64-й Научно-технической конференции (г. Новосибирск, 2007 г.), на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (2005 – 2007).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 печатные работы, в том числе 3 публикации в журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК, кроме того, получено 2 свидетельства об отраслевой регистрации разработок (№ 50200800076 от 18.01.2008 г. и № 50200800068 от 18.01.2008 г.) в Отраслевом фонде алгоритмов и программ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 153 наименований и приложений. Объем работы составляет 172 страницы.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы работы и формулируются основные направления исследований.

В первой главе приводится анализ состояния проблемы и основных решаемых задач. Рассматриваются факторы теплового режима здания, регулируемые и возмущающие воздействия, задачи и методы автоматического регулирования микроклимата зданий (работы Каменева П.Н., Одельского Э.Х., Туркина В.П., Строя А.Ф., Сканава А.Н., Карписа Е.Е., Чистовича С.А., Грудзинского М.М., Ливчака И.Ф., Богословского В.Н., Глухова В.Н., Ветрова В.И., Казаринова Л.С., Устюгова М.Н., Кононовича Ю.В., Мухина О.А., Кувшинова Ю.Я., Махова Л.М., Бодрова В.И., Табунщикова Ю.А. и др.).

Показано, что современные системы управления тепловым режимом зданий не совсем надежны и основаны на упрощенных методах расчета (например, нормативный метод расчета ограждающих конструкций описывается уравнениями, характеризующими стационарный режим). В действительности процессы, происходящие в зданиях и помещениях при формировании теплового режима, как правило, нестационарные. Упрощенный подход к физическим процессам ведет, в конечном итоге, к неудовлетворительному тепловому режиму помещений, к повышенным затратам энергии и ресурсов на строительство, эксплуатацию и ремонт зданий. Чтобы разработать и создать высокоэффективную систему управления микроклиматом здания, необходимо тщательно изучить физические процессы, происходящие при управлении, описать их математически и предложить надежные методы расчета экономических систем управления. Схема возможной системы управления тепловым режимом (по мощности системы отопления W и времени τ) здания представлена на рис. 1.

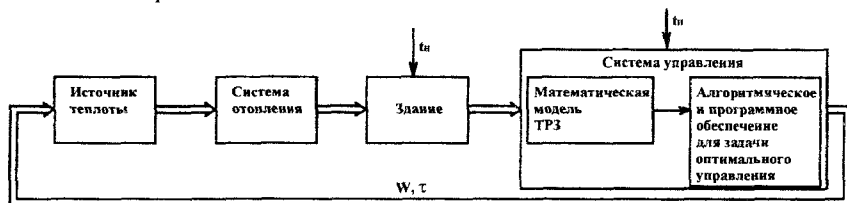


Рис.1 Схема системы управления тепловым режимом здания

Во второй главе на основе широко известных и вошедших в учебники разработок Е.Я. Соколова была решена задача уточнению математической модели теплового режима здания. Соколовым Е.Я. была предложена математическая модель, описывающая тепловой режим здания. Однако при построении этой модели Соколов Е.Я. предложил считать среднюю температуру наружной стены здания равной полусумме температур внутреннего и наружного воздуха. Вместе с тем, эта величина может быть определена значительно точнее, если детальнее учесть распределение температуры по толщине ограждения. Уточненная математическая модель теплового режима здания имеет вид:

$$\frac{c\rho F\delta}{q_0V} \left(\frac{\delta}{2R\lambda} + \frac{1}{\alpha_n R} \right) \frac{dt_n}{d\tau} + t_n = \frac{W_0}{q_0V} + \frac{c\rho F\delta}{q_0V} \left(\frac{\delta}{2R\lambda} + \frac{1}{\alpha_n R} \right) \frac{dt_n}{d\tau} + t_n, \quad (1)$$

или, если использовать понятие избыточной температуры $\theta = t_n - t_n$, тогда

$$T \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} + \theta(\tau) = kW_0, \quad (2)$$

где

$$T = T_1 \times \left(\frac{\delta}{R\lambda} + \frac{2}{R\alpha_n} \right), \quad (3)$$

и в формулах (1) – (3) t_n, t_n – соответственно температура внутреннего и наружного воздуха, δ, R – соответственно толщина и приведенное термическое

сопротивление теплопередаче ограждений здания, λ – коэффициент теплопроводности материала, α_n – коэффициент теплоотдачи для наружной поверхности стены здания, W_o – мощность системы отопления, q_o – удельная тепловая характеристика здания, V – объем здания, F – площадь наружной поверхности ограждений, ρ – плотность материала ограждений, $T_1 = \frac{c\rho F\delta}{q_o V}$ – постоянная времени по Соколову, T – уточненная постоянная времени, $k = \frac{I}{q_o V}$ – коэффициент передачи по каналу «мощность системы отопления – температура внутреннего воздуха».

Разработанная модель точнее учитывает теплоинерционные свойства ограждений, в частности, постоянная времени T вычисляется уже по формуле (3), где T_1 – коэффициент тепловой аккумуляции по Соколову. Кроме того, в модели Соколова температура наружного воздуха принята постоянной, найденная структура модели позволяет учитывать изменения наружной температуры во времени.

Приемлемая точность расчетов по модели была достигнута в результате настройки модели на «реальный процесс». С этой целью по экспериментальным данным (эксперимент проводился в лаборатории кафедры ТГСив) была решена задача параметрической идентификации данной модели. Для определения постоянной времени T был рассмотрен режим охлаждения помещения. Параметрическая идентификация модели проводилась методом наименьших квадратов, т.е. исходя из минимума следующего критерия:

$$I = \sum_{i=1}^n [\ln\theta^{\circ}(\tau_i) - \ln\theta(0) + \tau_i/T]^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

здесь θ° – экспериментальные значения избыточной температуры, τ_i – используемые при идентификации моменты времени, n – число экспериментальных точек. Здесь с целью упрощения решения задачи идентификации модель процесса охлаждения была записана в логарифмическом масштабе, т.е. применили соответствующее линеаризующее преобразование модели.

В результате решения задачи параметрической идентификации, было получено, что наилучшее значение постоянной времени определяется по формуле:

$$T = -\sum_{i=1}^n \tau_i^2 / \sum_{i=1}^n [\ln\theta^{\circ}(\tau_i) - \ln\theta(0)] \cdot \tau_i. \quad (5)$$

Для нахождения параметра k использовали следующее соотношение (6), где Δt_a^{ycm} – установившееся приращение температуры внутреннего воздуха, вызванное приращением мощности системы отопления на величину ΔW_o .

$$k = \frac{\Delta t_a^{ycm}}{\Delta W_o}. \quad (6)$$

Качество решения задачи параметрической идентификации иллюстрируется рис. 2 и 3.

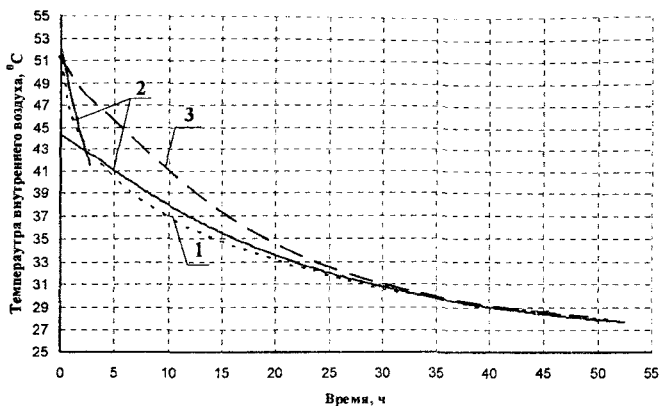


Рис. 2. Результаты параметрической идентификации в режиме охлаждения
 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретическая кривая, построенная при различных постоянных времени ($T_1 = 5,3$ ч, $T_2 = 21,9$ ч); 3 – теоретическая кривая, построенная при одной постоянной времени ($T = 18,2$ ч)

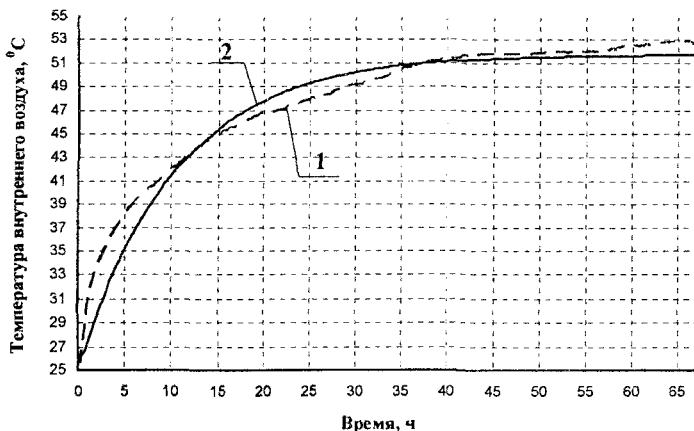


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные изменения температуры внутреннего воздуха в режиме нагрева
 1 – экспериментальные данные; 2 – расчетная кривая

Для автоматизации эксперимента, то есть автоматического сбора экспериментальной информации была собрана установка, измеряющая минимум четыре температуры: температуры внутреннего и наружного воздуха, а также температуры внутренней и наружной поверхности наружной стены. С целью

полной автоматизации сбора и хранения информации написана компьютерная программа.

Для оценки качественной адекватности найденной математической модели была проведена серия расчетов по определению различных тепловых режимов здания в зависимости от характера изменения температуры наружного воздуха и режима подачи теплоты. Для этого разработан численный алгоритм реализации модели с помощью метода Рунге-Кутты. Полученные кривые соответствуют реальным наблюдениям.

В работе также рассмотрено решение задачи для случая, когда управляющим воздействием является температура теплоносителя на входе в систему отопления. Новая модель теплового режима здания (7), учитывает зависимость внутренней температуры от внешних климатических условий, характеристик здания и параметров системы отопления и позволяет осуществлять качественное регулирование отпуски теплоты.

$$T \frac{dt_n}{dt} + t_n(1 + kb) = T \frac{dt_n}{dt} + t_n + kbt_n, \quad \dots \quad (7)$$

где $b = \frac{KF}{1 + \frac{KF}{2cG_m}}$, при условии, что массовый расход теплоносителя, G_m ,

величина постоянная, K – коэффициент теплопередачи, F – площадь отопительного прибора, c – теплоемкость теплоносителя, t_n – температура теплоносителя на входе в отопительный прибор, t_s – температура внутреннего воздуха.

В третьей главе осуществлялась разработка оптимального режима прерывистого отопления. Как известно, режим прерывистого отопления заключается в следующем: в нерабочее время – ночью или праздничные дни, когда здание не эксплуатируется, согласно СНиП, в жилых, общественных, административно-бытовых и производственных помещениях можно снижать температуру внутреннего воздуха, но необходимо обеспечивать требуемую температуру к моменту использования помещения. При этом возникает вопрос: как вообще нужно управлять отоплением здания, чтобы внутренняя температура в начале и в конце нерабочего периода соответствовала нормированному значению, и расход тепловой энергии при этом был бы минимальным?

Эта задача ставилась в литературе неоднократно, но отчетливых и обоснованных решений, согласно выполненному обзору, не было получено.

Формально задача представлялась следующим образом: требовалось найти такое управление мощностью системы отопления $W_0(\tau)$, которое переводило бы объект управления из заданного начального состояния $\theta(0) = \theta_0$ в заданное конечное состояние $\theta(\tau_n) = \theta_0$ за заданное время τ_n , при этом расход теплоты I системой отопления был бы минимальным, при этом считалось, что $t_n = const$.

Количество теплоты, израсходованной системой отопления, оценивалось функционалом

$$I = \int_0^{\tau_k} W_0(\tau) d\tau \rightarrow \min, \quad (8)$$

где τ_k – заданное время – все нерабочее время.

При этом мощность системы отопления должна была удовлетворять следующему ограничению:

$$W_0^{\min} \leq W_0(\tau) \leq W_0^{\max}, \quad (9)$$

где W_0^{\max} – установленная мощность системы отопления, W_0^{\min} – минимальная мощность системы отопления, которая должна обеспечить поддержание температуры внутреннего воздуха на уровне $12 \div 15^\circ\text{C}$. Данное ограничение по внутренней температуре определено из условия не выпадения конденсата на внутренних поверхностях наружных ограждений.

Особенность режима прерывистого отопления заключается в том, что в начале и в конце рассматриваемого промежутка времени избыточная температура $\theta(\tau)$ должна быть равна одному и тому же значению θ_0 , то есть $\theta(0) = \theta(\tau_k)$.

Для решения поставленной задачи использовалась теория оптимального управления (принцип максимума Л.С. Понтрягина), согласно которой оптимальное управление будет представляться кусочно-постоянной функцией, принимающей граничные значения.

Сначала для приближенного решения задачи оптимизации считалось, что интервалов постоянства два и длительность их одинаковая.

Для первого отрезка времени: $W_0 = W_{01} = \text{const}$ для $0 < \tau < 0,5\tau_k$.

Для второго отрезка времени: $W_0 = W_{02} = \text{const}$ для $0,5\tau_k < \tau < \tau_k$.

Для всего промежутка времени: $I = \int_0^{\tau_k} W_0(\tau) d\tau = W_{01} \frac{\tau_k}{2} + W_{02} \frac{\tau_k}{2}$.

При таком походе исходная вариационная задача сводилась к условной задаче нелинейного программирования, далее методом подстановки эту задачу сводили к безусловной задаче нелинейного программирования, в частности, были получены следующие выражения для критерия, оценивающего расход теплоты в режиме прерывистого отопления:

$$I = \theta_0 \frac{(2-a)}{k} + aW_{01} \rightarrow \min, \quad (10)$$

$$I = \theta_0 \frac{2-a}{k(1-a)} - W_{02} \frac{a}{(1-a)} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Анализируя выражение (10), с учетом того, что $a = 1 - e^{-\frac{\tau_k}{T}}$ и $1 > a > 0$, можно сказать, что чем меньше мощность системы отопления на первом интервале постоянства, тем экономичнее режим. Из уравнения (11) следует: чем больше величина W_{02} , тем меньше величина I , следовательно, на втором интервале мощность системы отопления должна быть максимальной. Таким образом, установили следующее: чем меньше мощность системы отопления на первом интервале времени, и чем больше она во втором интервале, тем экономичнее режим прерывистого отопления.

Далее эта задача рассматривалась в уточненной постановке, т.е. считалось, что длительность интервалов постоянства неодинаковая и неизвестна.

Формально эта задача представлялась следующими соотношениями:

$$I = W_{01}\tau_1 + W_{02}\tau_2 \rightarrow \min, \quad (12)$$

причем $\tau_1 + \tau_2 = \tau_n$;

$$\begin{cases} kW_{02}\left(1 - e^{-\frac{\tau_2}{T}}\right) + kW_{01}\left(e^{-\frac{\tau_2}{T}} - 1 + a\right) = a\theta_0, \\ 0 \leq W_{01} \leq W_0^{\max}, 0 \leq W_{02} \leq W_0^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

Решая эту задачу методом подстановки, получили выражение для критерия:

$$I = W_{01} \left[\tau_n + T \cdot \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_{01}}{W_{01} - W_{02}} \right) \right] + W_{02} \left[-T \cdot \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_{01}}{W_{01} - W_{02}} \right) \right]. \quad (14)$$

К этому критерию необходимо было присоединить область допустимых решений, вытекающую из постановки задачи.

Область допустимых решений была определена следующими условиями:

- 1) аргумент логарифма должен быть больше нуля;
- 2) продолжительность временных интервалов должна быть больше или равной нулю; $\tau_1 \geq 0, \tau_2 \geq 0$

3) температура внутреннего воздуха в начале и конце нерабочего промежутка времени должна равняться одному и тому же требуемому значению.

В результате учета всех ограничений была найдена область допустимых решений, которая показана на рис. 4 (заштрихованная область).

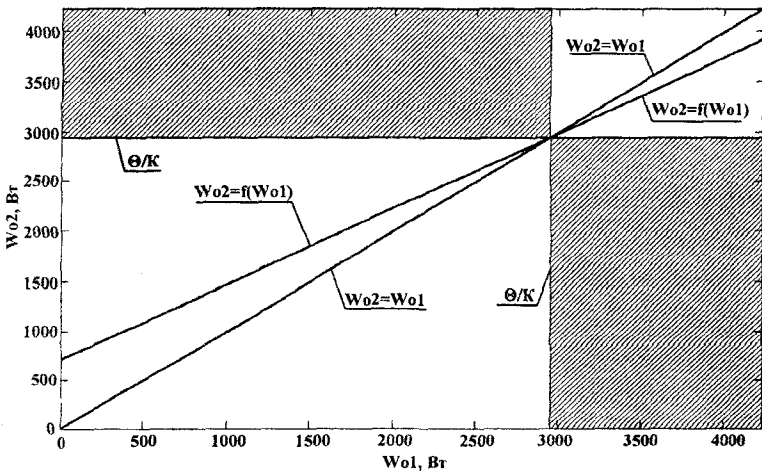


Рис. 4. Область допустимых решений уравнения для $t_n = -18^\circ\text{C}$

Установлено, что область допустимых решений сильно зависит от температуры наружного воздуха. Если наружная температура очень низкая, то область допустимых решений мала, и практически нет свободы в выборе регулирования. Если наружная температура не низкая, то область допустимых решений расширяется и появляется дополнительная свобода при регулировании.

Как уже отмечалось критерий оптимальности – это нелинейная функция аргументов W_{01}, W_{02} . Решить задачу оптимизации критерия I аналитическим путем не представлялось возможным, поэтому для решения этой задачи была написана программа на языке C++, в которой применялись методы покоординатного спуска и золотого сечения. Оптимальное управление в каждом конкретном случае находится путем использования разработанной программы. Программа по определению оптимального режима прерывистого отопления имеет удобный пользовательский интерфейс. В качестве исходных данных заносятся: продолжительность нерабочего времени, избыточная температура, диапазон изменения мощности системы отопления. Результаты расчетов выводятся в большом окне. В результате вычислительных экспериментов подтвердился ранее полученный вывод о том, что функционал, I , оценивающий количество теплоты, израсходованной системой отопления, имеет наименьшие значения, когда тепловая мощность на первом промежутке времени, минимальна, а на втором – максимальна.

Далее для различных температур наружного воздуха была определена эффективность разработанного режима прерывистого отопления для случая, когда здание имеет автономный источник теплоты. Оказалось, например, что при температуре наружного воздуха -18°C и продолжительности нерабочего периода 15 часов оптимальный режим прерывистого отопления для выбранного здания экономичнее по расходу теплоты на 6,4% по сравнению с обычным режимом отопления. При температуре наружного воздуха -5°C эта экономия составит 9,3%. При этом установлено, что применение режима прерывистого отопления в зданиях, подключенных к центральным тепловым сетям, не дает существенной экономии тепловой энергии.

График отопления здания в течение суток, включая режим оптимального управления в нерабочее время, приведен на рис. 5. График мощности системы отопления: до 18 часов мощность системы отопления равна текущим теплотерям здания 3004 Вт при наружной температуре -18° , после 18 часов происходит снижение тепловой мощности до 0 Вт и поддержания ее на этом уровне в течение 5 часов. Далее в 23 часа начинается натоп здания максимально возможной тепловой мощностью 4236 Вт в течение почти 10 часов. В 9 часов утра мощность снижается до значения текущих теплотерей здания – 3004 Вт. Температура внутреннего воздуха при режиме прерывистого отопления меняется следующим образом: до 18 часов она равна 21°C , затем из-за выключения системы отопления в течение 5 часов происходит снижение температуры до $17,5^{\circ}\text{C}$, после начинается разогрев здания, и температура начинает расти, и к 9 часам утра она равна требуемому значению 21°C . Причем расход теплоты в этом режиме меньше, чем в случае подключения этого же здания к тепловым сетям.

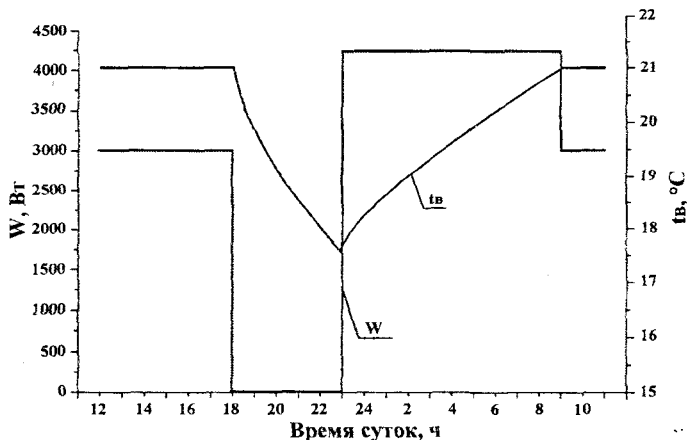


Рис. 5 Изменение мощности системы отопления и температуры внутреннего воздуха при оптимальном управлении

Разработан алгоритм расчета натопа при пуске системы отопления. Нередко возникают ситуации, когда за определенный промежуток времени в холодный период года необходимо нагреть здание с температуры наружного воздуха до требуемого температуры внутреннего воздуха. Чаще всего это происходит при пуске в эксплуатацию вновь построенного здания, участка тепловой сети после долгосрочных ремонтных работ, какого-либо производственного здания перед началом работ или по каким-нибудь другим технологическим причинам. Поэтому достаточно интересной является задача: как в холодный период года спроектировать режим натопа здания за определенный заданный промежуток времени с температуры наружного воздуха, чтобы при этом расход теплоты был бы минимальным.

В результате решения поставленной задачи был определен алгоритм оптимального разогрева здания с температуры наружного воздуха за заданный ограниченный промежуток времени. Данный алгоритм заключается в натопе здания максимально возможной мощностью системы отопления, при этом происходит уменьшение времени разогрева и снижение затрат тепловой энергии.

В четвертой главе разрабатывалось оптимальное управление тепловым режимом здания как процессом с распределенными параметрами. Ранее, в работе тепловой режим зданий и задача оптимального управления данным объектом рассматривались в классе систем с сосредоточенными параметрами. Однако, строго говоря, данный объект управления является объектом с распределенными параметрами, поэтому есть смысл рассмотреть задачу об оптимальном управлении для данного представления объекта: возможно, что при этом обнаружатся какие-то новые интересные особенности оптимального управления, какие не наблюдались ранее.

Проведенный анализ литературы показал, что математическое описание теплового режима здания может быть удовлетворительно представлено следующим образом:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, 0 < x < L, \tau > 0; \quad (15)$$

$$t(x, 0) = t^0(x), 0 \leq x \leq L; \quad (16)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_b [t_b(\tau) - t(0, \tau)], \tau > 0; \quad (17)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(L, \tau)}{\partial x} = \alpha_n [t(L, \tau) - t_n(\tau)], \tau > 0; \quad (18)$$

$$c_b m_b \frac{dt_b(\tau)}{d\tau} = u(\tau) - \alpha_b F_{CT} [t_b(\tau) - t(0, \tau)] - k_{OK} F_{OK} [t_b(\tau) - t_n(\tau)], \tau > 0; \quad (19)$$

$$t_b(0) = t_b^0, \quad (20)$$

где $t(x, \tau)$ – температура в точке с координатой по толщине стены здания в момент времени τ , $t(0, \tau)$ – температура на внутренней поверхности стены в момент времени τ , $t(L, \tau)$ – температура на наружной поверхности стены в момент времени τ .

На множестве допустимых решений был определен функционал I , первая составляющая которого определяет близость начальной и конечной температуры внутреннего воздуха, а вторая – расход тепловой энергии.

$$I = [t_b(\tau_k) - t_b^0]^2 + \beta \int_0^{\tau_k} G[u(\tau)] d\tau, \quad (21)$$

где τ_k – заданный промежуток времени, G – функция, оценивающая текущий расход теплоты зданием на отопление, β – некоторый весовой коэффициент.

В теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, согласно проведенному анализу литературы, нет достаточно общей формулировки принципа максимума, позволяющей решать все возможные постановки задач. Поэтому в работе отыскивались условия оптимальности управления для поставленной задачи. Условия оптимальности представлены следующими соотношениями:

Для формулировки условий оптимальности вводится функция

$$H = \psi_0(\tau) u(\tau) - \beta G[u(\tau)], \quad (22)$$

где $\psi_0(\tau)$ удовлетворяет следующей системе уравнений:

$$-c_b m_b \frac{d\psi_0(\tau)}{d\tau} + (\alpha_b F_{CT} + k_{OK} F_{OK}) \psi_0(\tau) - \frac{\alpha \alpha_b}{\lambda \psi(0, \tau)} = 0; \quad (23)$$

$$\frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial \tau} + a \frac{\partial^2 \psi(x, \tau)}{\partial x^2} = 0; \quad (24)$$

с начальными условиями

$$c_B m_B \psi_0(\tau k) = -2[t_B(\tau k) - t_B^0]; \quad (25)$$

$$\psi(x, \tau k) = 0. \quad (26)$$

Граничные условия для функции $\psi(x, \tau)$ задавались в виде

$$\alpha \times \frac{\alpha_B}{\lambda} \psi(0, \tau) - \alpha \times \frac{\partial \psi(0, \tau)}{\partial x} - \alpha_B F_{CT} \times \psi_0(\tau) = 0; \quad (27)$$

$$-\lambda \frac{\partial \psi(L, \tau)}{\partial x} = \alpha_H \psi(L, \tau). \quad (28)$$

Доказано утверждение, что если допустимое управление $u(\tau)$ доставляет минимум критерию (21), то оно должно максимизировать функцию H , определенную соотношениями (22) – (28), т.е.

$$u^*(\tau) = \arg \{ \sup H \{ W_0^{\min} \leq u(\tau) \leq W_0^{\max} \} \}.$$

Доказательство утверждения приведено в тексте диссертации.

Аналитически решить данную задачу ввиду ее сложности не представлялось возможным. Вместе с тем, большим достоинством доказанной теоремы является то, что она позволяет во многих случаях оценить структуру оптимального управления, его общий вид, не решая самой оптимальной задачи. Например, в линейных оптимальных задачах, т.е. в задачах, уравнения которых содержат управление в первой степени, оптимальное управление представляется кусочно-постоянной функцией, принимающей поочередно значения W_0^{\min} и W_0^{\max} , т.е. она будет представлять такую функцию

$$u^*(\tau) = \frac{W_0^{\min} + W_0^{\max}}{2} + \frac{W_0^{\max} - W_0^{\min}}{2} \times \text{sign}[\psi_0(\tau) - \beta]. \quad (29)$$

Дальше учитывая полученные результаты и практические соображения полагали, что приближенно-оптимальное управление имеет два интервала постоянства. В связи с этим оценивалась эффективность следующих алгоритмов управления:

I режим: в течение первого периода времени мощность системы отопления равна максимальному (установленному) значению, а во второй период – минимальному, то есть $W_{01} = W_0^{\max}$, $W_{02} = W_0^{\min}$, причем длительность периодов отыскивалась моделированием процесса;

II режим: в течение первого периода времени мощность системы отопления равна минимальному значению, а во второй период – максимальному (установленному), то есть $W_{01} = W_0^{\min}$, $W_{02} = W_0^{\max}$, а длительность периодов отыскивалась также моделированием процесса, при этом условия задачи таковы, что ограничение по температуре внутреннего воздуха не нарушается, то есть внутренняя температура не опускается ниже 12 °С;

Для решения этой задачи была проведена конечно-разностная аппроксимация математической модели и разработано программное обеспечение в среде MatLab. В результате расчетов было получено, что расход теплоты во втором режиме прерывистого отопления существенно ниже, что

подтверждает ранее полученный вывод об оптимальности режима прерывистого отопления.

Разработанная программа позволяет для конкретного здания рассчитать различные режимы управления мощностью системы отопления в нерабочий период для целей проведения качественного и количественного сравнения их. Таким образом, для здания были запроектированы еще 3 различных тепловых режима. Анализ этих режимов на основе вычислительного эксперимента был необходим для отыскания оптимального режима, по возможностям обеспечения требуемой температуры внутреннего воздуха помещения и по количеству энергозатрат при этом.

III режим аналогичен II-му режиму, только дополнительно внутренняя температура выходит на свою границу 12°C . Вообще вопрос о том выйдет ли система на ограничение по внутренней температуре зависит от длительности режима прерывистого отопления, а также от установленной мощности системы отопления. Чем продолжительнее нерабочий период, и чем выше установленная тепловая мощность, тем больше вероятность выхода на ограничение по температуре внутреннего воздуха.

IV режим, когда температура внутри помещения поддерживается стабилизирующим регулятором на своем заданном значении. В этом случае мощность системы отопления определяется регулятором температуры.

V режим, когда здание подключено к тепловым сетям и производится центральное регулирование отпуска теплоты на источнике, т.е. мощность, необходимая для разогрева здания, является функцией температуры наружного воздуха. Этот режим является наиболее распространенным в настоящее время.

В результате расчетов и сравнения было установлено, что экономичным является режим, когда интенсивный натоп здания осуществляется только на конечном участке нерабочего времени (режимы II и III). Неэкономичным, оказался наиболее распространенный в настоящее время режим, когда здание подключено к центральным тепловым сетям и осуществляется регулирование отпуска теплоты только на источнике.

Расход тепловой энергии и величина экономии для рассмотренных режимов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расход и экономия тепловой энергии при различных алгоритмах управления тепловой мощностью системы отопления

Название режима	Оптимальный режим прерывистого отопления с выходом на ограничение по тв	Оптимальный режим прерывистого отопления	Со стабилизирующим регулятором температуры внутреннего воздуха	При подключении здания к центральным тепловым сетям, при регулировании отпуска теплоты на источнике
Расход тепловой энергии, Вт*ч	20289,6	31159,2	43597,1	45060
Экономия, %	55	30,8	3,2	≈0

Разработана блок-схема связей реального теплового режима здания (ТРЗ) с математическим, алгоритмическим и программным обеспечением оптимального управления температурным режимом, показанная на рис. 6.

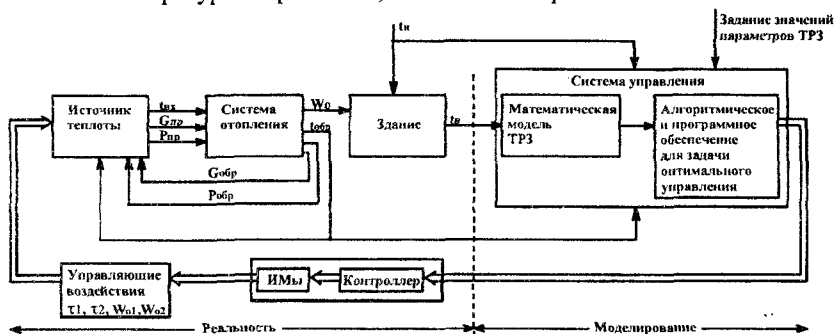


Рис. 6 Блок-схема связей реального теплового режима здания с математическим, алгоритмическим и программным обеспечением оптимального управления

Основные выводы и результаты

1. В соответствии с физикой процесса теплопередачи предложена математическая модель теплового режима здания, которая точнее описывает теплоинерционные свойства ограждений и позволяет учитывать изменения наружной температуры во времени; выполнена ее параметрическая идентификация, разработан численный алгоритм ее реализации и проведены расчеты тепловых режимов, позволяющие оценить качественную адекватность модели.

2. Разработан алгоритм оптимального управления режимом прерывистого отопления, заключающийся в поддержании мощности системы отопления на минимально возможном значении в течение первого интервала и на максимально возможном значении в течение второго интервала управления.

3. Для сокращения времени разогрева и затрат тепловой энергии разработан алгоритм расчета натопа здания (до требуемой $t_{в}$) при пуске системы отопления с температуры наружного воздуха в холодный период года за ограниченный промежуток времени, позволяющий организовать разогрев здания максимально возможной мощностью системы отопления.

4. Для модели объекта с распределенными параметрами определены условия оптимальности, сформулированные в форме принципа максимума. Установлен общий вид оптимального управления. Разработано соответствующее программное обеспечение в среде MatLab. Подтверждена эффективность управления, найденного на основе инженерной модели. Установлено, что интенсивный натоп здания на конечном участке нерабочего времени (режимы II и III) экономит до 30-55% теплоты. Доказана неэкономичность

распространенного в настоящее время режима, когда здание подключено к центральным тепловым сетям.

5. Разработан режим экономичного разогрева здания в холодный период года с температуры наружного воздуха за ограниченный период времени.

6. Разработаны две программы (на основе инженерной модели и модели с распределенными параметрами) расчета оптимального режима прерывистого отопления для различных зданий и условий. На данные программы получены свидетельства об отраслевой регистрации разработок зарегистрированные в Отраслевом фонде алгоритмов и программ (ОФАП).

Научные публикации по теме диссертации в ведущих рецензируемых журналах ВАК

1. Панферов, В.И. Идентификация и управление тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина* // Вестник УГТУ-УПИ. Строительство и образование: сб. науч. тр. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2005.– Вып.14. – № 14(66). – С. 351–353.

2. Панферов, В.И. Решение задачи оптимального управления отоплением здания в нерабочее время / В.И. Панферов, Е.Ю. Пашнина // Вестник УГТУ-УПИ. Строительство и образование: сб. науч. тр. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2006 г. – Вып.12. – № 12(83). – С. 355–358.

3. Панферов, В.И. К теории математического моделирования теплового режима зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Вестник ЮУрГУ Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2006. –Вып. 4. – №16 (69). – С. 128–133.

Другие публикации по теме диссертационной работы

4. Магнитова, Н.Т. Оценка теплового и воздушного режимов чердачного помещения здания челябинской областной филармонии /Н.Т. Магнитова, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина// Вестник УГТУ-УПИ. Строительство и образование: сб. науч. тр. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – Вып.6. – № 11(41). – С. 128–132.

5. Панферов, В.И. Математическая модель теплового режима зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: тез. докл. 5–й Всероссийской науч.-техн. конф. Магнитогорск: МГТУ, 2004г. – С.23.

6. Панферов, В.И. О структуре математической модели теплового режима здания / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // VIII Международная науч.-практич. конф.: Экология и жизнь: сб. науч. тр. – Пенза, 2005. – С. 135–138.

7. Панферов, В.И. Применение математической модели для разработки алгоритма управления отоплением здания / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды 5-й Всероссийской науч.-практич. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – С. 280–282.

8. Панферов, В.И. Экспериментальное исследование процесса охлаждения помещения при отключении системы отопления / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: тез. докл. 6-й Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – С. 31.

9. Панферов, В.И. Моделирование и управление тепловым режимом здания / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Материалы Международной науч.-техн. конф. «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции»: Сб. тр. – М.: Московский государственный строительный университет, 2005. – С. 94–98.

10. Панферов, В.И. Минимизация затрат энергии в процессе разогрева помещения при прерывистом отоплении / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Материалы Юбилейной XIV Международной науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству»: сб. тр., Ч.4. Челябинск: ЧГАУ, 2006 г. – С. 165–168.

11. Панферов, В.И. Параметрическая идентификация модели теплового режима зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Материалы Юбилейной XIV Международной науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству»: сб. тр., Ч.4. Челябинск: ЧГАУ, 2006 г. – С. 168–172.

12. Панферов, В.И. Оптимальный режим прерывистого отопления / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Материалы Пятой Российской науч.-техн. конф. «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности»: Том 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. С. – 186–189.

13. Панферов, В.И. Экономия тепловой энергии при различных режимах прерывистого отопления / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: тез. докл. 7-й Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – С. 11–16.

14. Панферов, В.И. Оптимизация режима прерывистого отопления / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Проблемы теплоэнергетики. Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Челябинск Изд-во ЮУрГУ, 2006 – С. 31.

15. Панферов, В.И. Экспериментальное определение удельной тепловой характеристики здания / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Материалы международной науч.-практич. конф. «Коммунальное хозяйство, энергосбережение, градостроительство и экология на рубеже третьего тысячелетия»: сб., докл. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – С. 34–36.

16. Панферов, В.И. Экспериментальное определение параметров динамической модели теплового режима помещения при воздушном отоплении / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // Материалы международной науч.-практ. конф. «Коммунальное хозяйство, энергосбережение, градостроительство и экология на рубеже третьего тысячелетия»: сб., докл. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – С. 36–38.

17. Панферов, В.И. Алгоритм расчета натопа помещения при пуске системы отопления / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Анисимова // Материалы Юбилейной XLVI Международной науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству»: сб. тр., Ч.3. Челябинск: ЧГАУ, 2007 г. – С. 210–215.

18. Панферов, В.И. Управление тепловым режимом здания / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова // Тез. докл. 64-й науч.-техн. конф. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2007 г. – С. 105–106.

19. Панферов, В.И. Оптимизация режима натопа здания / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: тез. докл. 8-й Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Магнитогорск: МГТУ, 2007. – С. 41–45.

20. Панферов, В.И. Оптимальное управление тепловым режимом здания / В.И. Панферов, Е.Ю. Пашнина // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: сб. рефер. науч.-исследоват. работ аспирантов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 153–154.

21. Панферов, В.И. Энергоэффективное управление тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: Труды Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов 13-15 ноября. Тольятти: ТГУ, 2007. – С. 102–103.

22. Панферов, В.И. Об оптимальном управлении тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова, А.Н. Нагорная // Вестник ЮУрГУ Серия «Энергетика». – 2007. – Вып. 8. №20 (92) С 3–9.

23. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки зарегистрированное в Отраслевом фонде алгоритмов и программ (ОФАП). Программа для расчета оптимальных режимов управления микроклиматом зданий / Е.Ю. Анисимова. – № 50200800076 от 18.01.2008 г.

24. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки зарегистрированное в Отраслевом фонде алгоритмов и программ (ОФАП). Программа для расчета оптимальных режимов прерывистого отопления зданий / Е.Ю. Анисимова. – № 50200800068 от 18.01.2008 г.

* Пашнина Е.Ю. с ноября 2006 г. сменила фамилию на Анисимову.