

В. Черныш
29.11.2017 г.


На правах рукописи

Харитонов Антон Юрьевич



**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОТОПЛЕНИЯ
ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ**

05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2017

Работа выполнена на кафедре технической теплофизики
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бирюков Алексей Борисович,

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Трубаев Павел Алексеевич,
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова»,
профессор кафедры энергетики
теплотехнологии, РФ

кандидат технических наук, доцент
Топорен Сергей Сергеевич,
Академия строительства и архитектуры
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный
университет имени В.И. Вернадского»,
доцент кафедры теплогазоснабжения,
вентиляции, РФ

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.», РФ

Защита состоится «30» января 2018 года в 10-00 часов на заседании
диссертационного ученого совета Д 01.005.01 при ГОУ ВПО «Донбасская
национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 86123,
г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал ученого совета. Тел. факс: +38(0623) 22-77-19,
e-mail: d01.005.01@donnasa.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская
национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 86123,
г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>)

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 01.005.01

Удовиченко Злата Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Несмотря на существующие геополитические процессы планетарного масштаба, цена на энергоресурсы будет расти, и вопросы экономии энергии будут стоять перед человечеством.

Общественные здания являются особым классом объектов отопления, потому что находятся в управлении министерств и ведомств, которые централизованно регулируют подачу теплоты; однако, контроль за оптимизацией этого процесса осуществлять довольно затруднительно. В данном случае руководство должно найти и применять инструменты анализа энергоэффективности группы объектов для принятия рациональных решений.

Что касается типовых решений по энергосбережению, то мероприятия по реконструкции представлены заменами окон, утеплением стен. Дополнительным решением может быть отопление с циклически изменяющимся уровнем тепловой нагрузки. Для выбора зданий, которые нуждаются в энергосберегающих мероприятиях и определении их рациональных параметров, необходимо изучение эксплуатационных характеристик здания и определение критериев энергоэффективности. Поэтому использование оперативного анализа для повышения энергоэффективности отопления общественных зданий является актуальной задачей.

Степень разработанности темы.

Проблема эффективного потребления теплоты зданиями широко рассмотрена в работах В.Н. Богословского, Е.Я. Соколова, Л.А. Климова, В.Е. Козина.

В настоящее время проблемам анализа и управления эффективностью теплопотребления бытовых объектов посвящены работы следующих отечественных и зарубежных ученых – современников: И.А. Башмакова, А.В. Лукьянова, А.А. Олексюка, С.М. Сафьянца и др., которые внесли большой вклад в решение данных проблем.

Зарубежные авторы, такие как Е. Taylor, J. Heinz, J. Kurnitski, G. B. Hanna, занимаются оптимизацией отдельных составляющих процесса энергоэффективности.

Проблема рационального расхода энергоресурсов, выделяемых на отопление общественных зданий, не теряет актуальности и постоянно находит свое отражение в создании новых технологий и методов.

Цель работы. Повышение энергоэффективности отопления общественных зданий с помощью оперативного анализа потребления теплоты.

Задачи исследования:

- исследовать существующие способы анализа энергоэффективности отопления общественных зданий;
- обосновать целесообразность и эффективность оперативной идентификации критериев энергоэффективности для анализа отопления

общественных зданий и разработать методику оперативной идентификации критериев энергоэффективности на основании оперативного определения и обработки текущих значений основных параметров;

- разработать подходы к рациональному выбору изоляционных материалов для утепления зданий;

- создать математическую модель нестационарных тепловых процессов при отоплении зданий, учитывающую нестационарное тепловое состояние ограждающих конструкций, а также обосновать наиболее целесообразный способ адаптации данной модели к условиям конкретных зданий;

- установить возможность экономии теплоты за счет периодического снижения тепловой нагрузки отопления;

- создать и внедрить аппаратно-программный программный комплекс оперативного анализа для повышения энергоэффективности отопления общественных зданий.

Объект исследования – эффективность потребления теплоты системами отопления общественных зданий.

Предмет исследования – способы оперативного анализа для оценки критериев энергоэффективности отопления общественных зданий.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые научно обоснованы целесообразность и эффективность оперативной идентификации критериев энергоэффективности отопления общественных зданий на основании моментального сбора и расчетной обработки текущих значений температур наружного и внутреннего воздуха и показаний теплосчетчика, что позволяет получать информацию о условиях теплоснабжения зданий в режиме реального времени;

- впервые разработана методика оперативного анализа для повышения энергоэффективности отопления общественных зданий и сравнения ее показателей как различных зданий, так и одних и тех же в течение разных отопительных сезонов с помощью критериев энергоэффективности отопления общественных зданий. Это позволяет установить базовый уровень энергопотребления и анализировать соотношение значений соответствующих критериев с базовым уровнем энергопотребления;

- разработана математическая модель нестационарных тепловых процессов при отоплении зданий, описывающая изменение температуры воздуха внутри помещений, и процесс теплопередачи через ограждающие конструкции. Введено понятие полной теплоемкости внутреннего объема здания для адаптации рассматриваемой математической модели к условиям конкретных зданий;

- в результате адаптации разработанной математической модели к условиям школ г. Донецка установлено, что значение полной теплоемкости m_c внутреннего объема здания V может быть описано в виде определенной зависимости: $m_c = kV$, где k – коэффициент пропорциональности, равный $(4,5...4,8) \cdot 10^5$, Дж/(м³·К), что позволяет наиболее быстро осуществлять

адаптацию математической модели нестационарного теплообмена к условиям конкретных школ.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработана и внедрена система сбора экспериментальных данных в общественном здании с помощью датчиков температуры и модулей считывания данных с теплосчетчиков в автоматическом режиме;
- разработана методика оперативного анализа для повышения энергоэффективности отопления общественных зданий с помощью критериев энергоэффективности на основании оперативного определения и расчетной обработки текущих значений с датчиков температуры и теплосчетчиков и присвоения зданию определенного класса энергоэффективности;
- предложены подходы к выбору теплоизоляционных материалов для утепления общественных зданий на основе измеренных теплотехнических характеристик для конкретного здания;
- создана математическая модель нестационарных тепловых процессов при отоплении зданий и обоснован наиболее целесообразный параметр для адаптации модели к условиям конкретных зданий;
- разработанные модели и методы внедрены в информационное и программное обеспечения для отдела образования Администрации Куйбышевского района г. Донецка;
- разработанные модели и методы внедрены в учебный процесс при чтении курса лекций по дисциплинам «Теплоснабжение», «Отопление», для студентов направления 08.04.01 «Строительство» профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция».

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы автором применен системный подход к анализу энергоэффективности отопления общественных зданий. Для определения критериев энергоэффективности использовались методы обследования объектов, систематизация, выявление и анализ основных параметров, оказывающих влияние на процесс потребления теплоты зданиями. При помощи компьютерного моделирования с использованием основных принципов теплопередачи через многослойную ограждающую конструкцию решен вопрос выбора рациональных параметров теплоизоляционных материалов. С использованием метода математического моделирования построена детерминированная математическая модель нестационарных процессов потребления теплоты зданием, решение которой производится численным методом, а так же обоснован наиболее целесообразный способ адаптации данной модели к условиям конкретных зданий.

Личный вклад соискателя включает постановку цели и задач исследований, выбор критериев энергоэффективности отопления общественных зданий, систему сбора экспериментальных данных в общественном здании, подходы к выбору рациональных параметров изоляционных материалов для утепления зданий, математическую модель нестационарных тепловых процессов при отоплении зданий и аппаратно-

программный программный комплекс оперативного анализа для повышения энергоэффективности отопления общественных зданий.

Основные положения, выносимые на защиту:

- система сбора экспериментальных данных с датчиков температуры и теплосчетчиков в общественном здании;
- критерии энергоэффективности отопления общественных зданий;
- подходы к определению рациональных параметров теплоизоляционных материалов для утепления здания;
- математическая модель нестационарных тепловых процессов при отоплении зданий.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Тема диссертационной работы и полученные результаты отвечают проблематике хоздоговорных работ, которые выполнялись в Донецком национальном техническом университете. Диссертационная работа была выполнена в рамках НИР № 26-13 «Моделирование, мониторинг и информационные технологии при исследовании сложных динамических систем», НИР №8-16 «Методы и средства компьютерного моделирования объектов, систем и процессов», НИР №08-198 "Автоматизация учета потребления энергоресурсов объектов бюджетной сферы" (по договору с Донецким городским советом), НИР №09-275 «Развитие автоматизированной системы учета потребления энергоресурсов», кафедральной научно-исследовательской темы Н8-16 «Методы и средства компьютерного моделирования объектов, систем и процессов». Автор был ответственным исполнителем всех НИР. Также он является соавтором комплексной программы «Энергосбережение в г. Донецке на 2010-2014 гг.», утвержденной сессией Донецкого городского совета от 12.05.2010 г. № 44/6, которая была разработана для обеспечения энергосберегающей модели развития города, повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, а также полного использования имеющегося потенциала энергосбережения.

Степень достоверности и апробация результатов диссертации.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием основополагающих положений теории теплового баланса, современных методов математического моделирования. Достоверность обеспечивается широкой публикацией работ по данной теме и обсуждением их на конференциях различного уровня, а так же опытом практической эксплуатации.

Результаты диссертационной работы были представлены, обсуждены и одобрены на следующих научных и научно-технических конференциях, выставках и семинарах: III Международной научно-практической конференции-выставке “Экологические проблемы индустриальных мегаполисов” (г. Донецк, 2006 г.); выставке «Энергосбережение 2009» (г. Донецк, 2009 г.); выставке «Eco Solutions - New Technologies, 2010» (г. Львов, 2010 г.); Международной научной конференции «Техногенно-экологическая безопасность и гражданская защита» (г. Киев, 2010 г.); на I Форуме «IT-

industry 2012» (г. Донецк, 2012 г.); I-й Международной научной конференции «Энергетические, управляющие и информационные системы» (г. Белгород, 2016 г.); I-III Международном Научном Форуме ДНР (г. Донецк, 2015-2017 гг.); Региональной университетской научно-практической конференции КГУ (г. Калуга, 2017 г.); совещаниях по обучению ответственных за ввод данных в автоматизированную систему учета потребления энергоресурсов объектов бюджетной сферы г. Донецка.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором и в соавторстве в 12 печатных научных работах, общим объемом 10 п.л., в том числе 1 работа опубликована в издании, входящем в перечень специализированных научных журналов, утвержденный МОН Украины, 11 – в научных специализированных изданиях, индексируемых в базах данных РИНЦ (РФ). Технические решения, полученные автором в процессе работы, закреплены патентом Украины на изобретение № 88192 (опубликован 25.09.2009, бюллетень №18).

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы – 140 страниц, в том числе 123 страницы основного текста; содержит 55 рисунков, 14 таблиц, 14 страниц списка использованных источников; 16 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определены актуальность, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, показана связь работы с научными программами, планами, темами, представлено практическое значение результатов исследования, охарактеризованы публикации и апробация результатов диссертационной работы, а также описана ее структура.

В первом разделе описаны наиболее актуальные схемы теплоснабжения общественных зданий и подходы к повышению класса энергоэффективности отопления общественных зданий, а также описаны известные критерии анализа энергоэффективности отопления общественных зданий.

Анализ теплофикации общественных зданий, который отражен в Комплексной программе «Энергосбережение в г. Донецке на 2010-2014 гг.», соавтором которой является автор диссертационной работы, показывает, что 95% школ г. Донецка включены в радиальные тепловые сети (городская застройка). Остальные школы подключены к индивидуальным газовым или угольным котельным (частный сектор).

Анализ энергоэффективности предполагает определение критериев энергоэффективности, которые в дальнейшем используются для сравнения с неким эталоном либо друг с другом. Поскольку данные критерии будут использованы не только для анализа, но и для повышения энергоэффективности, они должны отвечать на вопросы оценки эффективности проводимых рациональных энергосберегающих мероприятий. При проведении анализа энергоэффективности отопления зданий необходимо, чтобы сравнение производилось при равных условиях.

Обосновано, что для объективного анализа необходимо проводить определение значений критериев энергоэффективности в режиме реального времени. До недавнего времени такой анализ был мало возможен, однако с развитием и удешевлением средств автоматического измерения появляется возможность определять данные критерии моментально с фиксацией теплового режима здания, а значит с более высокой точностью.

В качестве основных выбраны следующие критерии, учитывающие температуру наружного воздуха:

- валовый отпуск теплоты Q_0 , кВт, в зависимости от температуры наружного воздуха;

- удельная отопительная характеристика q_0 , Вт/(м³·К);

- параметр теплообменной системы Φ_0 , Вт/К.

Отбор вышеуказанных критериев обусловлен необходимостью выбора критериев, которые могут быть проанализированы с большей точностью на основании сбора данных в режиме реального времени с помощью современных средств автоматизированного сбора данных.

Обосновано, что полученные критерии позволяют провести анализ эффективности применения некоторых типовых решений по повышению энергоэффективности зданий. Проанализированы типовые подходы по повышению энергоэффективности зданий. Выявлено, что для выбора рациональных параметров утепления стен необходима разработка соответствующего научного инструмента. Также обосновано, что в дополнительном исследовании нуждается режим наладки работы систем отопления с циклически изменяющимся уровнем тепловой нагрузки.

Второй раздел посвящен методикам оперативного анализа потребления теплоты зданием в стационарном и нестационарном режимах с определением рациональных параметров изоляционных материалов для утепления здания.

Для построения моделей анализа потребления теплоты зданием необходимы статические и динамические параметры.

К статическим параметрам относятся: площадь постройки и отапливаемая площадь; общий и отапливаемый объемы помещений; этажность и год постройки; высота, периметр и длины здания по пяти сторонам, которые подвержены солнечной радиации: южной, юго-восточной, юго-западной, восточной, западной, м; температура подаваемого и обратного теплоносителя в системе теплоснабжения объекта в соответствии с календарным графиком; теплофизические свойства ограждающих конструкций.

К динамическим параметрам относятся: дата и время замера; наработка счетчика; общее количество потребленного тепла; мгновенное теплоснабжение; накопленный расход теплоносителя; мгновенный расход теплоносителя; температуры теплоносителя из тепловой сети и уходящего в тепловую сеть; средняя температура воздуха в рабочей зоне здания и температура наружного воздуха.

Данные динамических параметров были собраны с помощью датчиков температуры и теплосчетчиков (Рис. 1) с соблюдением метрологических норм и требуемых классов точности. При сборе данных о потреблении теплоты в теплосчетчиках использовались следующие типы тепловычислителей: SONOCAL, MULTICAL, INFOCAL, X 12. Все расходомеры, входящие в состав теплосчетчиков, относятся к ультразвуковым, с классами точности: 2, 3. Они измеряют расход ультразвуковым время-импульсным методом. На основании данных, полученных от датчиков температуры на подающем и обратном трубопроводе, а так же данных расхода теплоносителя, тепловычислители производят расчет количества переданной с его помощью теплоты.

Температура наружного воздуха и температура воздуха в помещениях были измерены спиртовыми термометрами расширения с соблюдением метрологических норм и требуемых классов точности. В случае автоматического измерения температуры используется аналоговый датчик измерения температуры LM335 (погрешность измерения 0,5). Схема измерения температуры в зданиях представлена на рисунке 1. Полученная информация собирается автоматическим постом, представляющим из себя компьютер.

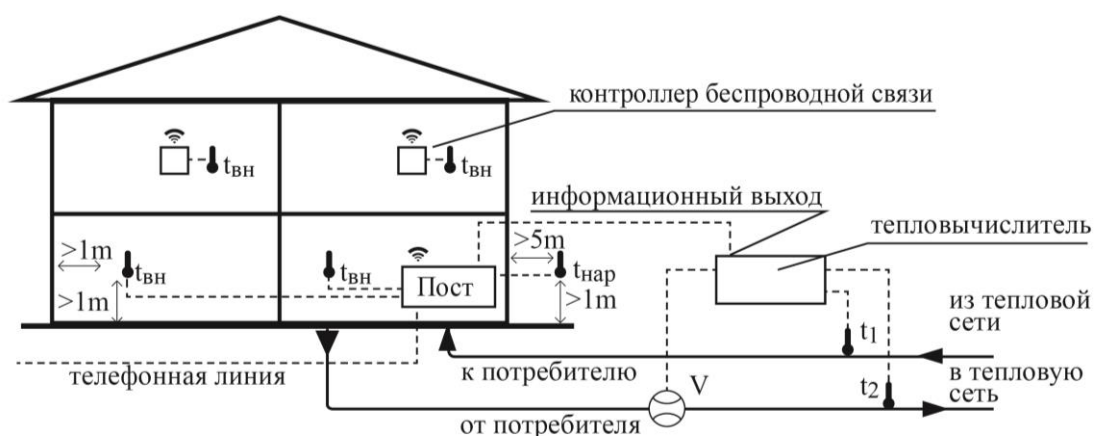


Рис. 1. Схема фиксации динамических параметров техническими средствами мониторинга в автоматическом режиме:

$t_{вн}$ — температура воздуха в помещении;
 $t_{нар}$ — температура наружного воздуха;
 t_1 — температура подаваемого теплоносителя;
 t_2 — температура обратного теплоносителя.

Описанные в разделе 1 критерии энергоэффективности определялись и исследовались на основании собранных в результате измерений данных с датчиков и счетчиков.

Валовый отпуск теплоты, Q_o , систематизированный в зависимости от температуры наружного воздуха (тепловая нагрузка здания) представляет из себя облако точек с трендом в виде обратно пропорциональной кривой. Кривая, полученная на основании статистической обработки точек данных за вынесенный в качестве базового промежуток времени, назначается базовой

линией энергопотребления. Анализ расположения точек относительно базовой линии (сравнение точек друг с другом, Рис. 2), базовых линий одного здания для разных отопительных периодов (Рис. 3) позволяет определять изменение теплотехнических характеристик ограждающих конструкций. В случае проведения энергосберегающих мероприятий появляется возможность выполнения количественной оценки полученного результата в натуральном или экономическом показателях (в случае проведения энергосберегающих мероприятий базовая линия опустится ниже).

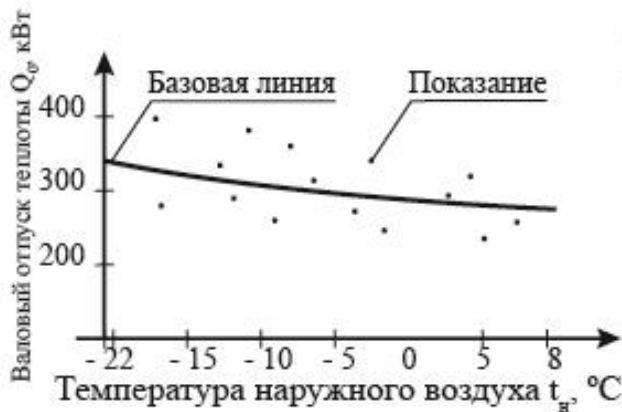


Рис. 2. Значения валового отпуска теплоты Q_0 , систематизированные относительно температуры наружного воздуха для одного здания

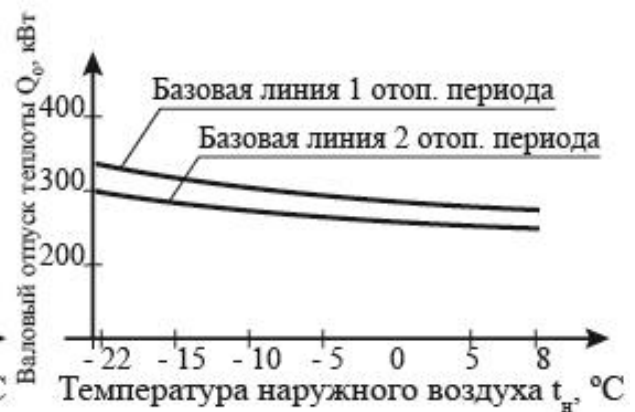


Рис. 3. Значения валового отпуска теплоты Q_0 для двух отопительных периодов

Для оценки уточнения, которое вносит использование идентифицированного в режиме реального значения q_0 , целесообразно использовать для сравнения расчетное значение валового отпуска теплоты Q_0^p , которое определяется выражением

$$Q_0^p = q_0^{\text{табл}} \cdot V_{\text{зд}} \cdot (t_{\text{вн}}^p - t_{\text{нар}}^{\text{тек}}), \quad (1)$$

где $V_{\text{зд}}$ – внутренний объем здания, м^3 ;

$q_0^{\text{табл}}$ – удельная отопительная характеристика по паспорту, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$;

$t_{\text{вн}}^p$ – расчетная температура в здании, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{нар}}^{\text{тек}}$ – текущая температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Удельная отопительная характеристика, q_0 , представляет собой характеристику термического сопротивления ограждающей конструкции здания и позволяет оценить уровень энергопотребления здания. Наложение уровней энергопотребления различных зданий на один график и сравнение с нормативным значением дает возможность задать классы энергопотребления зданий для внутреннего использования (Рис. 4).

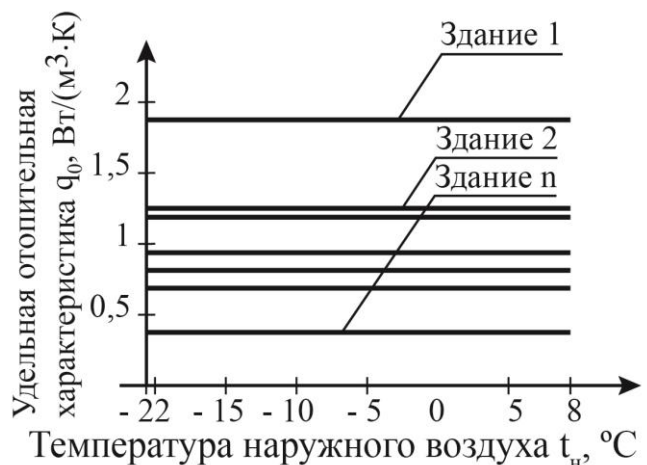


Рис. 4. Сравнение уровней энергопотребления различных зданий

Данная характеристика определяется по формуле

$$q_0 = \frac{Q_0}{V_{зд} \cdot (t_{вн} - t_{нар})}. \quad (2)$$

Действительный параметр отопительной системы, Φ_0 , который определяет теплоотдачу отопительной системы, определяется следующим образом

$$\Phi_0 = k \cdot F \cdot \left(\frac{t_{вн} - t_{нар}^p}{t_{вн} - t_{нар}} \right)^{0,2}, \quad (3)$$

где k – средний коэффициент теплопередачи от воды, циркулирующей в отопительных приборах к воздуху в помещениях, Вт/(м²·К);

F – площадь теплообменной поверхности отопительных приборов, установленных в здании, м²;

$t_{нар}^p$ – расчетная температура наружного воздуха, °С.

Расчетный параметр Φ'_0 отопительной системы рассчитывается следующим образом

$$\Phi'_0 = \frac{Q_0}{\Delta t_{ср}^p}, \quad (4)$$

где $\Delta t_{ср}^p$ – температурный напор, который должна создать система отопления здания при расчетных условиях, °С.

Определение параметра Φ_0 системы отопления и сравнение действительного параметра с расчетным позволяют анализировать поведение системы отопления из года в год и делать выводы о ее состоянии и изменениях в ее работе, а именно – достаточно ли существующей поверхности отопительных приборов для покрытия отопительной нагрузки здания, даже если тепловая сеть будет обеспечивать объект теплоснабжения в строгом соответствии с температурным графиком. При этом, отклонение на 10% уже является критичным, то есть, увеличив расход теплоносителя в допустимых пределах, невозможно добиться необходимого увеличения температурного напора.

Вышеописанные критерии позволяют дать энергетическую оценку зданий и назначить для них соответствующие энергосберегающие мероприятия.

Одно из типовых решений – утепление стен здания. В работе разработаны подходы к определению рациональных параметров теплоизоляционных материалов для утепления здания на основании реальных данных, которые дают возможность получить полные значения теплопотерь через ограждающие конструкции для разных добавленных термических сопротивлений слоев теплоизоляционных материалов, согласно формуле

$$q_{пот} = \frac{t_{вн} - t_{нар}}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{доб} + \frac{1}{\alpha_{нар}}}, \quad (5)$$

где $q_{\text{пот}}$ – тепловой поток, Вт/м²;

$q_{\text{пот}} = f(R_{\text{доб}})$ – функция добавленного сопротивления. Под термином добавленного термического сопротивления следует понимать сопротивление теплопередаче теплоизоляционного материала, добавляемого в процессе реконструкции;

$\alpha_{\text{вн}}$ – значение коэффициента теплоотдачи к внутренним поверхностям стен, Вт/(м²·К);

$\alpha_{\text{нар}}$ – конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности стен, Вт/(м²·К);

δ_i, λ_i – толщина, м, и коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), i -го слоя соответственно;

$R_{\text{доб}}$ – добавленное термическое сопротивление, (м²·К)/Вт.

Для изучения потребления теплоты на отопление здания составлена и реализована соответствующая детерминированная математическая модель. Данная модель представлена двумя дифференциальными уравнениями:

– уравнение 1-го порядка, описывающее изменение температуры воздуха в отапливаемом помещении, являющееся, по сути уравнением теплового баланса;

– дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в одномерной постановке, описывающее теплопередачу через ограждающие конструкции

$$\begin{cases} mc \frac{dt_{\text{в}}}{d\tau} = - \sum_{i=1}^n \alpha_{\text{в}} F_i (t_{\text{в}} - t_{\text{п}i}) - Q_{\text{инф}} + Q_0 + Q_{\text{ТВ}} \\ \frac{\partial t_{\text{ст}}}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t_{\text{ст}}}{\partial x^2} \right), \end{cases} \quad (6)$$

где m – масса внутреннего объема здания, кг;

c – средневзвешенная теплоемкость внутреннего объема здания, Дж/(кг·К);

$\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м²·К);

$\sum_{i=1}^n \alpha_{\text{в}} F_i (t_{\text{в}} - t_{\text{п}i})$ – сумма текущих тепловых потерь через все ограждающие поверхности, Вт;

F_i – площадь поверхности i -го элемента ограждающей конструкции, м²;

n – количество поверхностей ограждающих конструкций;

$Q_{\text{инф}}$ – количество теплоты, теряемой в единицу времени зданием на нагрев инфильтрирующегося в помещение воздуха, Вт;

Q_0 – количество теплоты, переданной зданию через отопительную систему за единицу времени, Вт;

$Q_{\text{ТВ}}$ – количество теплоты, переданной зданию за единицу времени в виде внутренних тепловыделений, Вт;

a – коэффициент температуропроводности материалов ограждающих конструкций, характеризующий тепловую инерцию материала, м²/с;

$t_{\text{п}i}$ – температура внутренней поверхности ограждающих конструкций.

Условием однозначности для первого уравнения системы (6) являются начальные условия:

$$\tau = 0: t_B = t_B^{\text{нач}},$$

где $t_B^{\text{нач}}$ – температура воздуха в начальный момент времени.

Условия однозначности для второго уравнения системы (6):

– начальные условия для уравнения, описывающего изменение температуры ограждающих конструкций

$$\tau = 0: t_{\text{ст}} = t_{\text{ст}}(x),$$

где $t_{\text{ст}}(x)$ – линейный закон изменения температуры по толщине ограждающих конструкций в начальный момент времени;

– граничные условия теплообмена на внутренней и наружной поверхностях ограждающих конструкций

$$x = 0: -\lambda \frac{dt}{dx} = \alpha_B (t_B - t_{\text{п}i}); \quad (7)$$

$$x = \delta: -\lambda \frac{dt}{dx} = \alpha_H (t_{\text{н}i} - t_{\text{ос}}), \quad (8)$$

где α_H – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м²·К);

$t_{\text{н}i}$ – температура наружной поверхности ограждающих конструкций;

$t_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды;

– теплофизические характеристики материалов ограждающих конструкций. Для построения модели предусмотрено наличие двух слоев ограждающих конструкций ($0 \dots \delta_1 \dots \delta$), с соответствующими теплопроводностью, плотностью и теплоемкостью для каждого слоя:

$$\begin{array}{lll} 0 \ll x \ll \delta_1: & \lambda_1 & \rho_1 \quad c_1 \\ \delta_1 \ll x \ll \delta: & \lambda_2 & \rho_2 \quad c_2 \end{array}$$

Уравнение (2) решается отдельно для каждого вида ограждающих конструкций. Для составления конечно-разностного аналога второго уравнения системы (6) использована явная схема аппроксимации (9) – для каждого узла искомая температура по толщине определяется (послойно) над известными температурами предыдущего временного слоя

$$t[j] = t^{\text{п}p}[j] + \frac{a[j]\tau}{\Delta x^2} (t^{\text{п}p}[j+1] - 2t^{\text{п}p}[j] + t^{\text{п}p}[j-1]), \quad (9)$$

где $t^{\text{п}p}[j]$ – известные температуры предыдущего временного слоя.

При выборе параметров пространственно-временной сетки учитывается соотношение (10), что обеспечивает устойчивость вычислительной процедуры

$$\Delta \tau_{\text{пред}} \leq 0,5 \frac{\Delta x^2}{a}, \quad (10)$$

где a – коэффициент температуропроводности материалов ограждающих конструкций, м²/с.

На каждом временном шаге вычисления уравнения обмениваются между собой данными.

Математическая модель может быть использована для изучения возможности экономии теплоты за счет периодического снижения тепловой нагрузки отопления.

В третьем разделе на примере школ г. Донецка изложен анализ энергоэффективности зданий с учетом использования критериев

энергоэффективности на основе описанных выше математических моделей и способов анализа (Рис. 5).

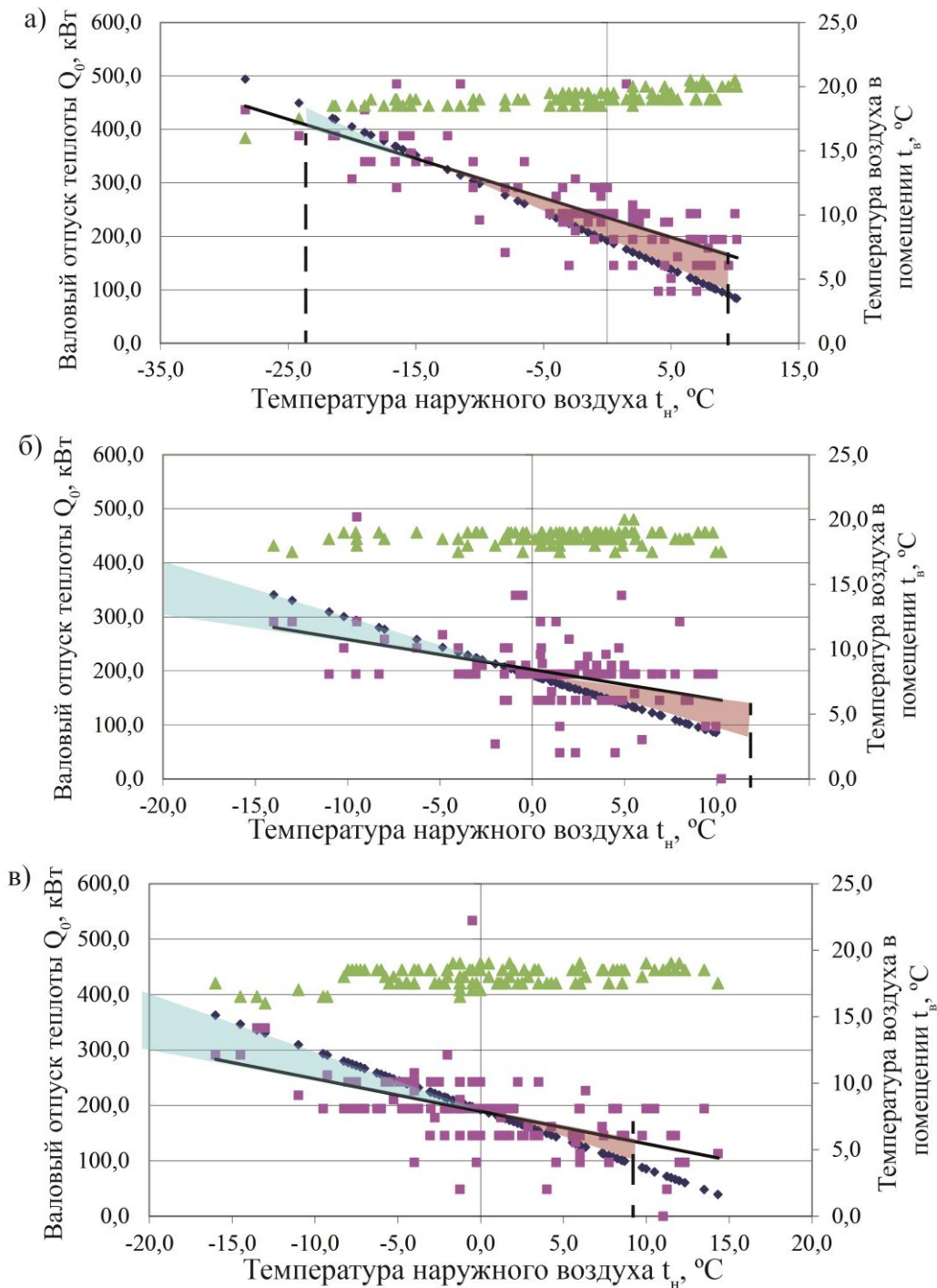


Рис. 5. Графики распределения нагрузки отопления. Сравнение действительной и расчетной тепловой нагрузки в школе №98 за три отопительных периода: а) 2005-2006 гг., б) 2006-2007 гг., в) 2007-2008 гг.:
 ■ – действительная тепловая нагрузка по счетчику (зависимость среднесуточной тепловой нагрузки от температуры наружного воздуха);
 ◆ – расчетная тепловая нагрузка здания (зависимость необходимой нагрузки от температуры наружного воздуха);
 ■ – область недостаточной подачи теплоносителя (слева);
 ■ – область чрезмерной подачи теплоносителя (справа);
 ▲ – температура воздуха в помещении.

При реализации способа оперативного анализа валового потребления теплоты были построены графики распределения тепловой нагрузки отопления здания в зависимости от температуры наружного воздуха в течение отопительного периода по всем рассматриваемым школам г. Донецка.

На графиках представлены значения действительной тепловой нагрузки, Q_0 , в зависимости от температуры наружного воздуха, $t_{\text{нар}}$. Данные графики упорядочены определенным образом, сопоставляя значения потребления температурам наружного воздуха, и учитывая температуры внутреннего воздуха, что является не моментальным графиком, а систематизацией по значениям температуры. Зависимость $Q(t)$, кВт, для данного здания, построенная для определенного отопительного периода времени, была принята как базовая.

Анализ показал, что в подавляющем большинстве школ измеренная температура в помещении удовлетворяет необходимой, а это значит, что количество теплоты подается правильно, и это есть идеальная и правильная зависимость валовой тепловой нагрузки от температуры окружающей среды. Соответственно, на графиках указаны области лишь недостаточной подачи теплоносителя или чрезмерной подачи теплоносителя. Поскольку удельная отопительная характеристика определена по справочным данным, то линия расчетной тепловой нагрузки здания позиционирована неправильно. Следовательно, целесообразным будет использовать не справочную, а расчетную величину удельной отопительной характеристики.

При анализе способа идентификации тепловых характеристик здания были получены уровни энергопотребления (Рис. 6). Уровень энергопотребления учитывает условия энергопотребления, в отличие от валового показателя. Данный способ позволяет провести сравнение зданий друг с другом. Предложено рассматривать эту величину как количественное выражение класса энергоэффективности, позволяющее проранжировать объекты (Рис. 7).

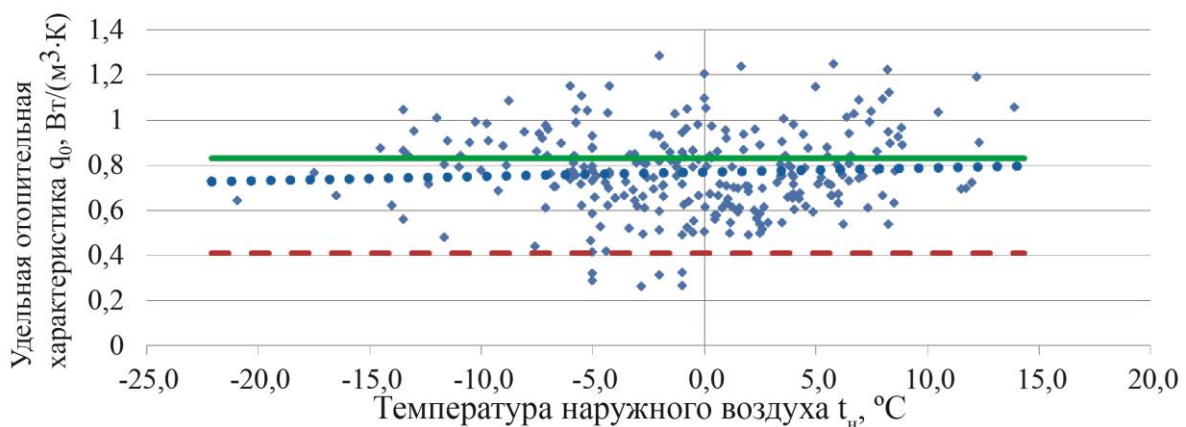


Рис. 6. Определение уровня энергопотребления гимназии №15 на основании идентификации тепловых характеристик здания:

- ◆ – тепловая характеристика здания при фактической нагрузке;
- ● ● ● – линейная регрессия характеристики;
- — — — — тепловая характеристика здания по паспорту;
- — — — — тепловая характеристика здания по расчетной отопительной нагрузке.

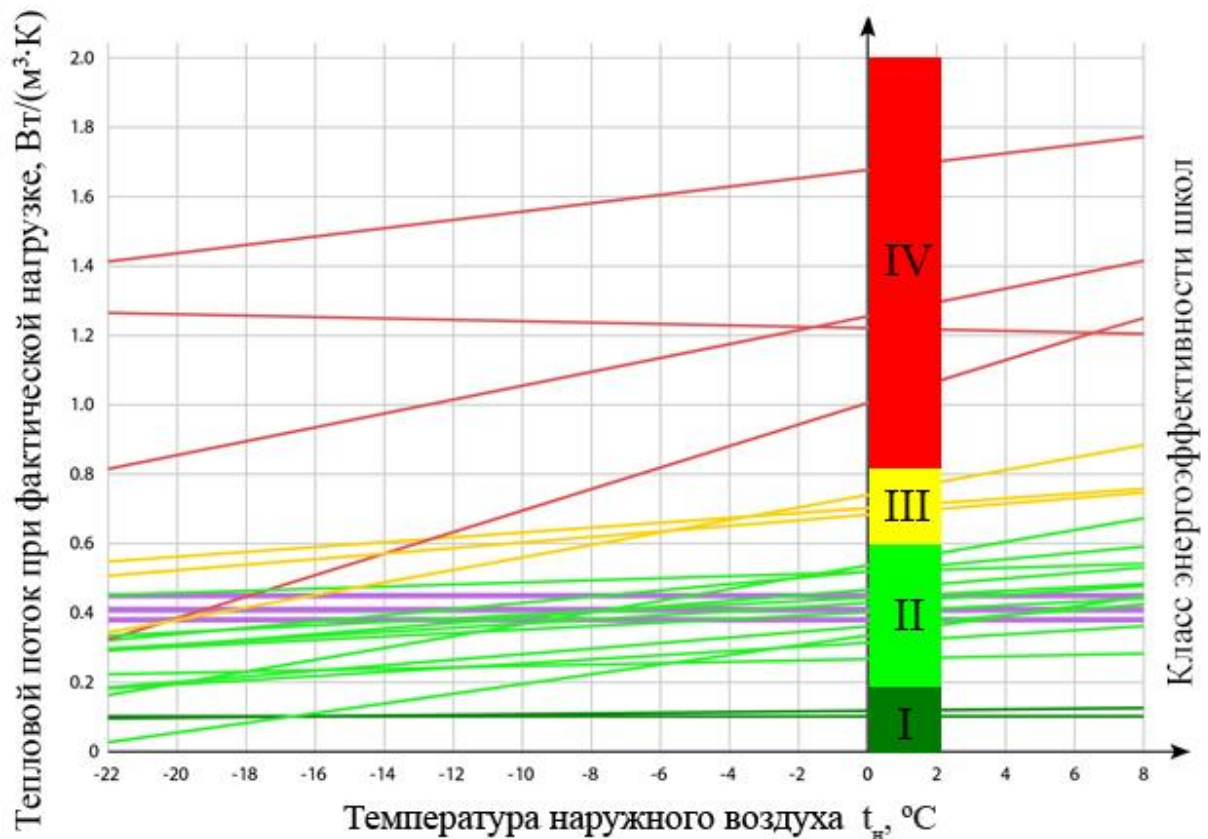


Рис. 7. Получение классов энергоэффективности зданий с использованием способа идентификации тепловых характеристик здания

Полученные данные были сведены в таблицу для назначения соответственных энергосберегающих мероприятий.

Способ определения параметра Φ_0 системы отопления и сравнения действительного параметра с расчетным параметром системы отопления позволил анализировать поведение системы отопления из года в год и делать выводы о ее состоянии (Рис.8) .

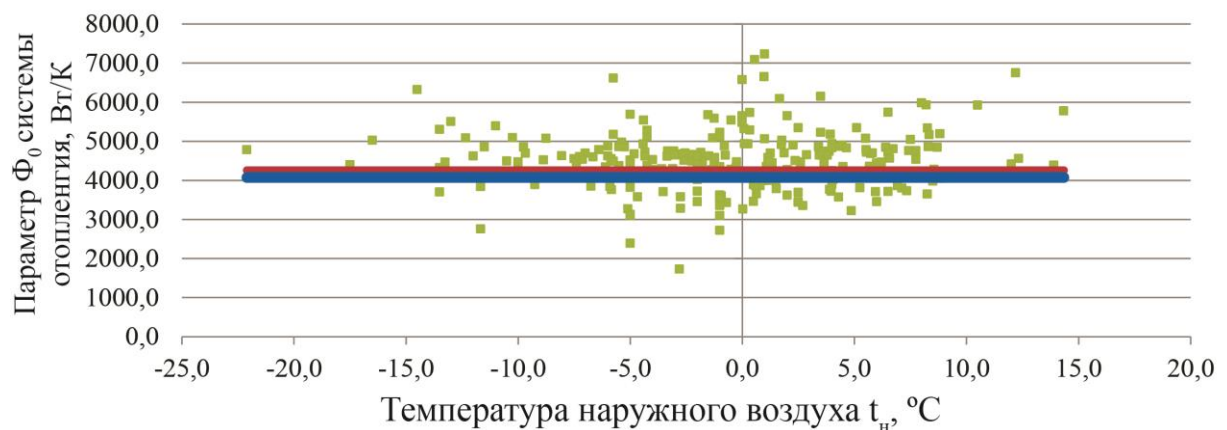


Рис. 8. Сравнение фактического, паспортного и расчетного параметра Φ_0 системы отопления на примере гимназии №15:

- – фактическое Φ_0 , Вт/К;
- — достоверное фактическое Φ_0 , Вт/К;
- — паспортное Φ_0 для температурного графика 95/70, Вт/К.

Сравнение действительного значения параметра Φ_0 с расчетным значением параметра Φ_0 для школ г. Донецка позволило сделать следующие выводы: у большинства исследованных школ (65% от рассмотренных) действительное значение параметра Φ_0 больше чем расчетное значение, рассчитанное согласно их паспортного температурного графика. Это свидетельствует о том, что система отопления этих школ имеет достаточную тепловую мощность для покрытия необходимой тепловой нагрузки.

Для таких школ возможны следующие мероприятия:

- снижение расхода теплоносителя относительно проектного значения;
- переход на пониженный температурный график по отношению к проектному.

Анализ остальных школ показывает, что существующей поверхности отопительных приборов недостаточно для покрытия отопительной нагрузки здания, даже если тепловая сеть будет строго придерживаться температурного графика. Кроме этого, в трех школах отклонение действительное значение параметра Φ_0 от расчетного составляет более 10%, что является критическим. В данных школах невозможно добиться необходимого увеличения температурного напора, увеличивая расход теплоносителя в допустимых пределах. Причины этому следующие:

- загрязнение трубопроводов и приборов отопительной системы;
- гидравлическая разрегулировка отопительного контура;
- наличие декоративных панелей и других сооружений, ухудшающих конвективный и радиационный теплообмен между поверхностью отопительного прибора и помещением.

Анализ энергоэффективности с помощью вышеописанных критериев выявил школы, к которым необходимо применить определенные энергосберегающие мероприятия (Рис. 9).

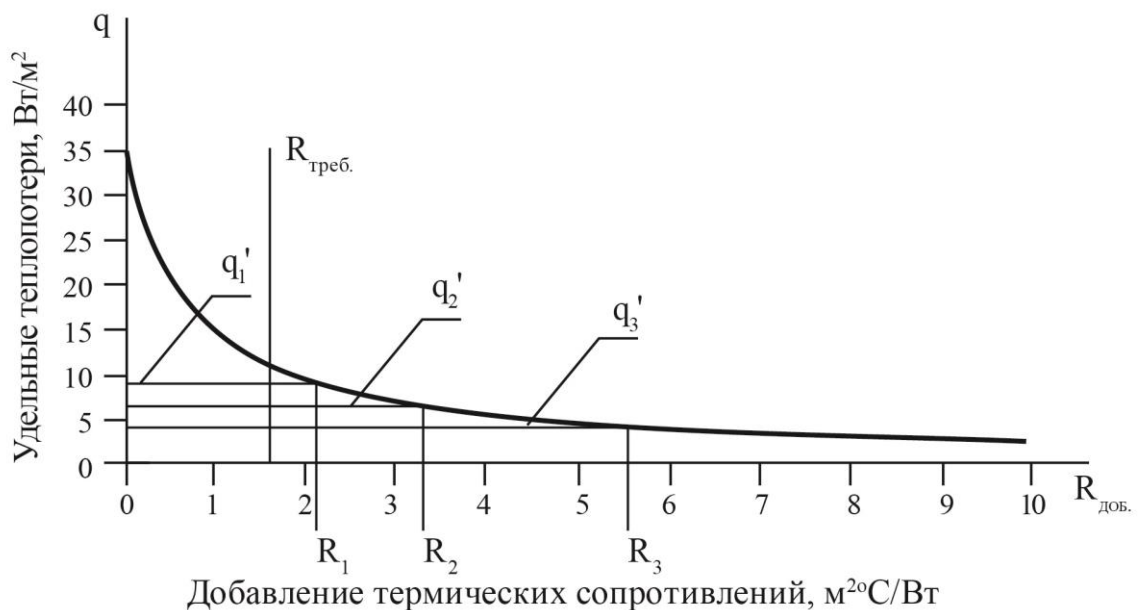


Рис. 9. Определение рациональных параметров теплоизоляционных материалов:

$R_{\text{треб}}^{\text{доб}} = 1,6 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ (требуемое добавленное термическое сопротивление для гимназии №15);

$R_1, R_2, R_3 = 2,1; 3,2; 5,5 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ (для минеральной ваты, пенополистирола, пенополиуретана соответственно);

$q'_1, q'_2, q'_3 = 9,1; 7,3; 4,2 \text{ Вт/м}^2$ (плотности теплового потока в следствие утепления минеральной ватой, пенополистиролом, пенополиуретаном соответственно).

Для отдельных школ, которые нуждаются в утеплении наружных стен, продемонстрировано использование разработанных подходов к определению теплоизоляционных материалов для утепления здания, где удельная плотность теплового потока, через наружные стены, зависит от величины добавленного термического сопротивления при температуре наружного воздуха -5°C . Это позволяет оперировать информацией о снижении величины тепловых потерь в зависимости от параметров теплоизоляции одновременно с учетом их стоимости в процессе технико-экономического обоснования энергосберегающих мероприятий. Результатом является выбор наиболее экономически обоснованного утеплителя.

С помощью математической модели динамики изменения температуры в здании были проанализированы тепловые режимы школ г. Донецка. По каждому объекту были отобраны периоды функционирования, при которых объект находился в нестационарных тепловых условиях (Рис. 10).

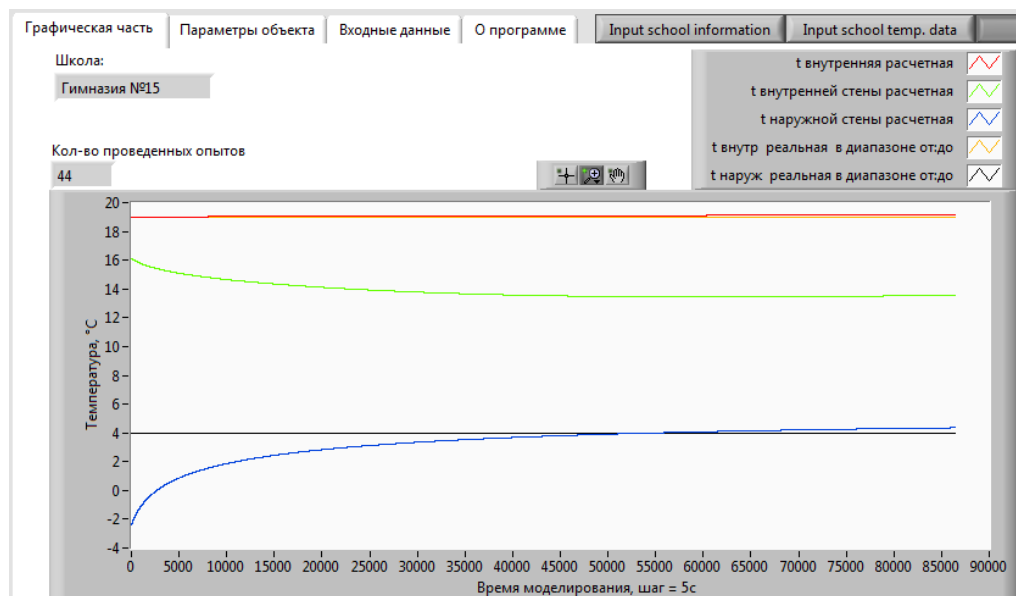


Рис.10. Визуализация одного опыта: достижение сходимости расчетных и реальных значений температур внутреннего и наружного воздуха соответственно

Идентификация модели была произведена по параметру полной теплоемкости m_c внутреннего объема здания. Данный параметр не является заданным инженерным параметром. Его рекомендуется подбирать так, чтобы совпали кривые реального изменения температуры внутреннего и наружного

воздуха и переданной зданию теплоты с рассчитанными данными изменения температуры воздуха в помещении. При правильном подборе параметра mc модель будет считаться идентифицированной и адаптированной под конкретную школу. Были получены уравнения регрессии зависимости параметра mc от конструктивных характеристик зданий (объема и общей площади отапливаемых помещений).

Адекватность модели проверялась путем сравнения расчетных значений температур воздуха в помещении и наружной поверхности ограждающих конструкций здания с измеренными значениями температур наружного воздуха и воздуха в помещении. Для каждого опыта моделирования разница соответствующих расчётных и измеренных значений температур составила до $\pm 1^\circ\text{C}$.

Данная модель была применена для получения сведений о состоянии здания в период регулировки или в процессе изменения температуры. При условно фиксированной температуре наружного воздуха был промоделирован процесс снижения отопительной нагрузки в выходные дни, с выключением отопления в пятницу после окончания рабочего дня, включением частичной доли нагрузки в субботу и включением полной нагрузки в понедельник ночью. Результаты моделирования показали, что данное снижение отопительной нагрузки позволяет получить экономию теплоты до 10% (Рис. 11).

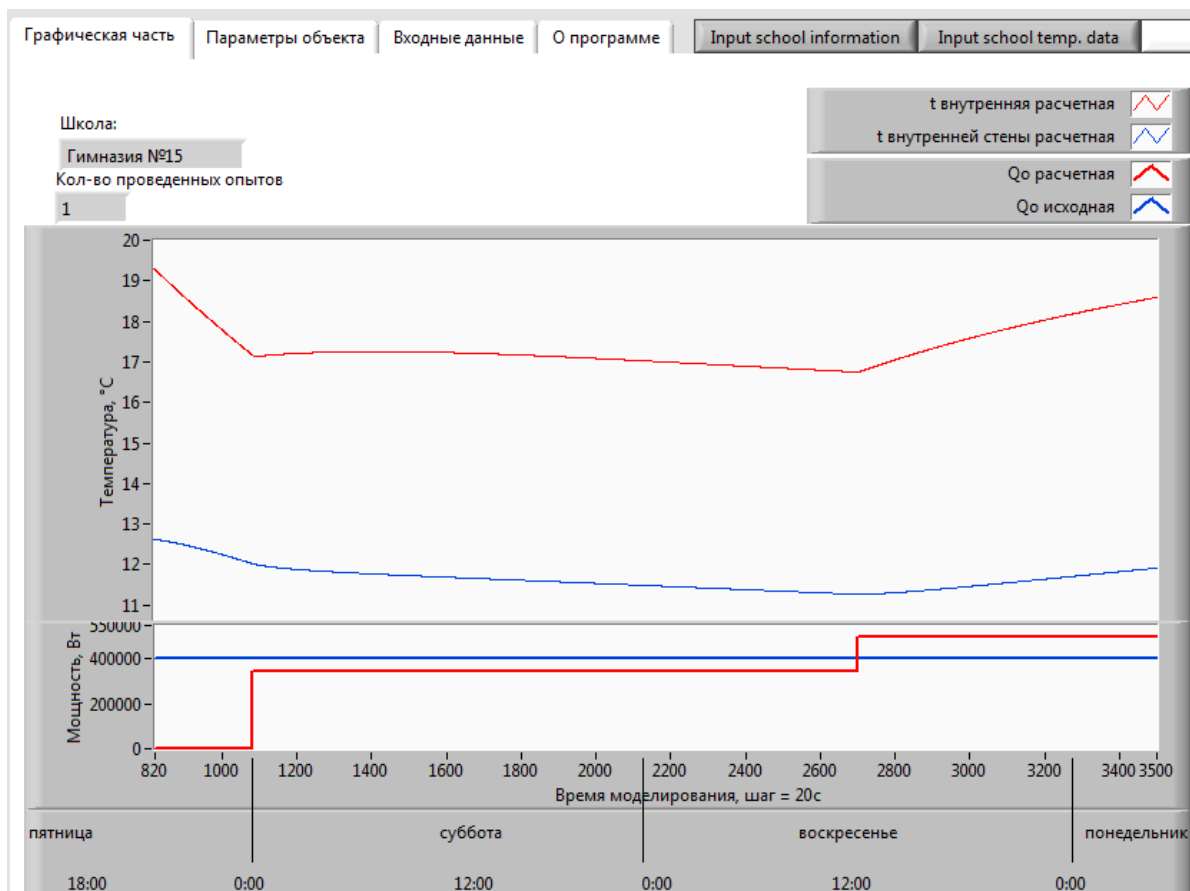


Рис. 11. Результат моделирования процесса отопления при снижении отопительной нагрузки в выходные дни

Также данная модель, в качестве инструмента, позволяет исследовать поведение зданий в нештатных ситуациях, связанных с аварийным отключением отопления.

В четвертом разделе описывается создание автоматизированной системы учета и анализа потребления энергоресурсов бюджетной сферы г. Донецка.

Среди основных функций автоматизированной системы можно выделить:

- сбор информации с датчиков и счетчиков потребления энергии и ресурсов;
- передачу данных и их первичную обработку с целью контроля достоверности, выдачу сообщений об ошибках;
- долгосрочное хранение информации о собранных данных;
- анализ параметров и проверку средств измерения;
- оперативный доступ к информации;
- выполнение расчётных и информационных задач системы, организацию и поддержку баз данных, формирование справочных данных.

Была разработана принципиальная схема экспериментального образца и обобщенная структура аппаратных средств системы. В соответствии со схемой, информация с измерительных приборов поступает на контроллер, который производит предварительную обработку, формирует пакет данных и отправляет их на компьютер. Компьютер окончательно обрабатывает информацию с контроллера и отправляет данные на FTP-сервер.

Программное обеспечение системы верхнего уровня обеспечивает обработку, хранение и представление информации. Для осуществления этой задачи выделены основные функции:

- непрерывная работа по приему данных;
- ввод, преобразование, хранение, отображение и обработку информации, получаемой как с автоматических постов, так и вводимых в ручном режиме;
- формирование и выдача справочных данных;
- вывод на печать сводок и отчетов;
- выполнение расчетных и информационных задач комплекса;
- организация поддержки баз данных;
- организация информационного обмена между комплексом и удаленными пользователями через сеть Интернет;
- организация взаимодействия интерфейса с оператором комплекса;
- обеспечение визуализации информации в виде графических зависимостей;
- организация резервного копирования баз данных;
- защита информации от несанкционированного доступа.

Субъекты мониторинга имеют возможность доступа к автоматизированной системе учета потребления энергоресурсов и работы с соответствующими базами данных.

Информационная интеграция системы учета потребления энергоресурсов на всех уровнях и координация работ субъектов мониторинга энергоресурсов осуществляется отделом энергоменеджмента Донецкого городского совета.

Информационная модель автоматизации передачи данных представлена на рисунке 12. Здания оснащены счетчиками и термометрами. С датчиков в автоматическом либо ручном режиме регулярно снимаются показания. Показания передаются через Интернет в базу данных системы.

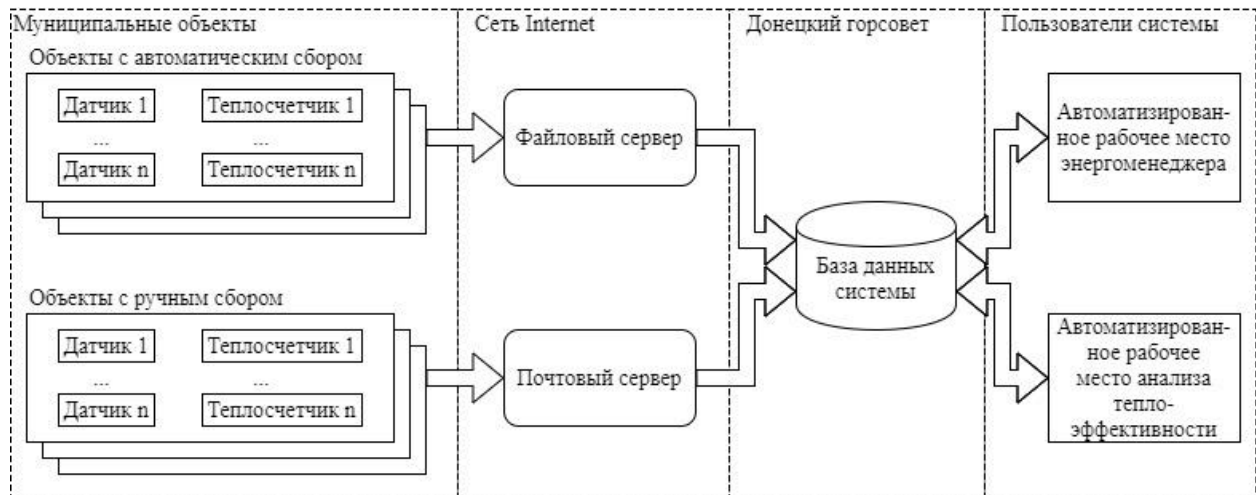


Рис. 12. Схема автоматизации передачи данных

Интерфейс программного обеспечения системы представлен на рисунке 13. Интерфейс программного обеспечения анализа теплоэффективности представлен на рисунке 14.

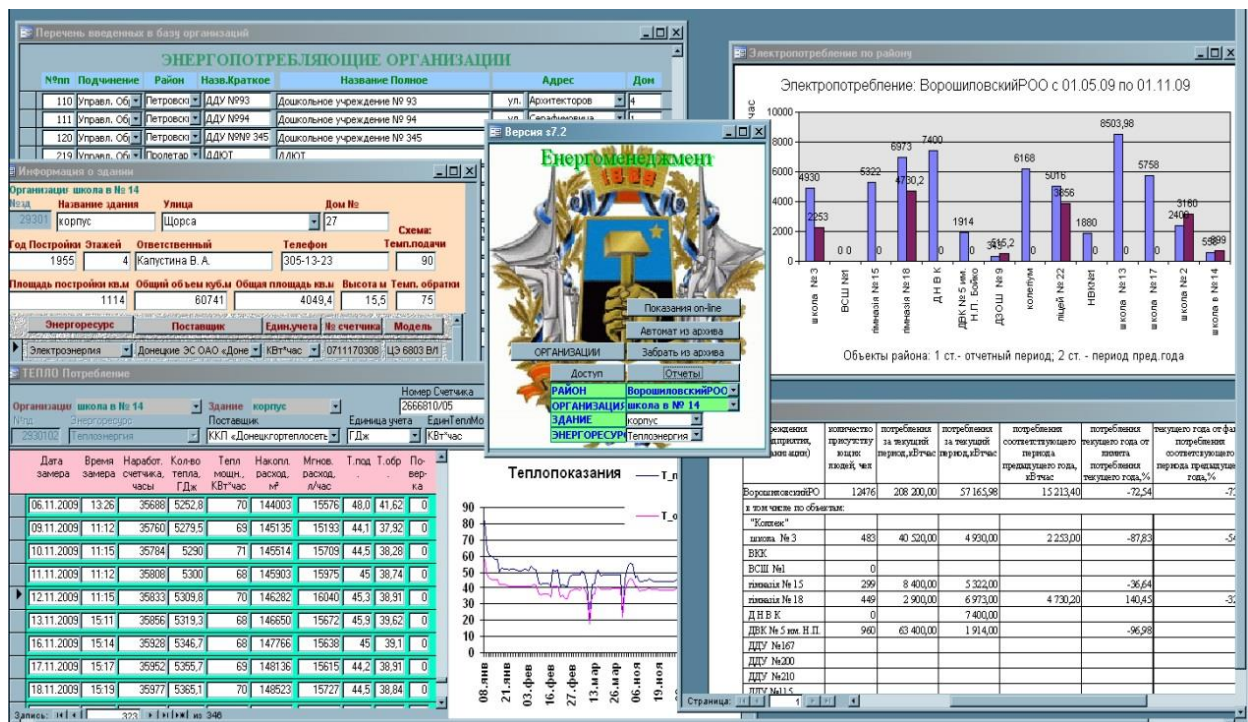


Рис. 13. Интерфейс программного обеспечения системы

Данная система была внедрена в отделе образования Администрации г. Донецка. Для школ г. Донецка было проведено обследование по трем критериям, которые выявили следующие отклонения фактических измерений от расчетных значений. Данные школы были разделены на классы для внутреннего потребления в зависимости от первоочередности энергосберегающих мероприятий.

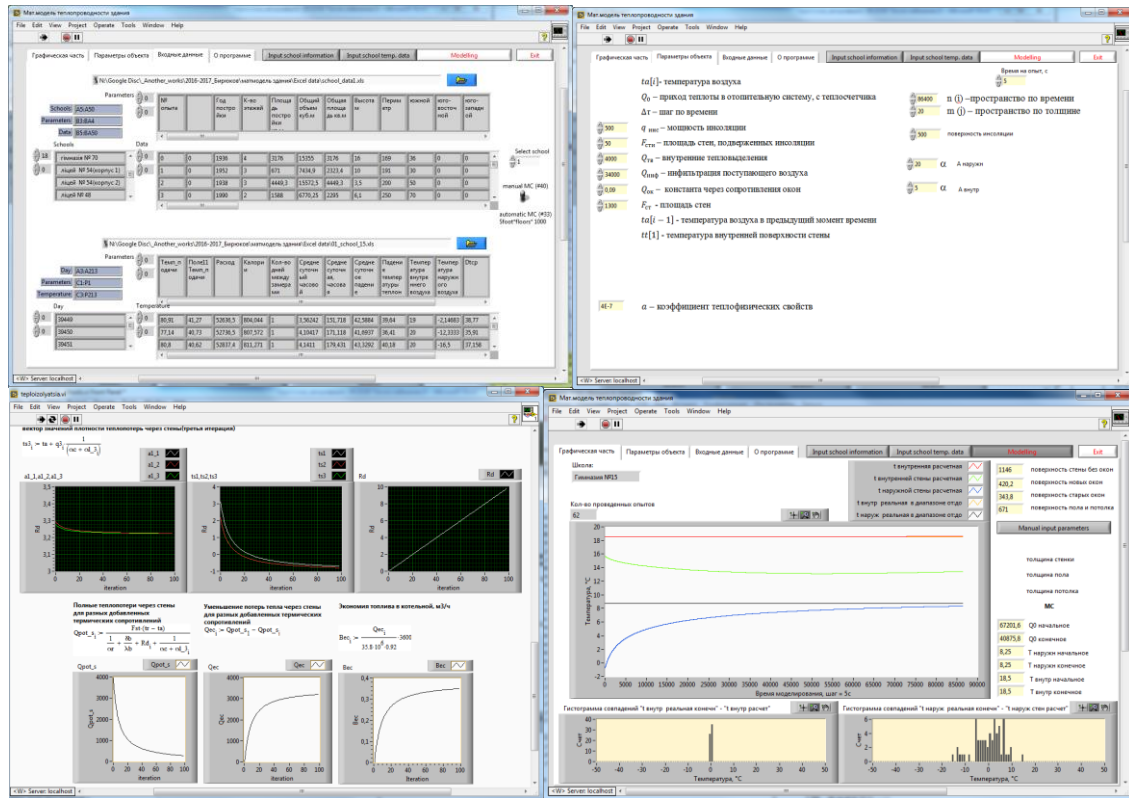


Рисунок 14. Интерфейс программного обеспечения анализа теплоэффективности

В результате работы в двух пилотных районах города был получен следующий экономический эффект от внедрения системы:

– в Ворошиловском районе г. Донецка были проведены мероприятия по утеплению зданий в пяти школах, была проведена модернизация отопления в шести школах. Ожидаемая экономия тепла составила 1046,7 МВт (14%), экономический эффект – 2 160 000 руб;

– в Киевском районе г. Донецка были проведены мероприятия по утеплению зданий в семи школах, была проведена модернизация отопления в семи школах. Ожидаемая экономия тепла составила 814,7 МВт (10%), экономический эффект – 1 680 000 руб.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена прикладная научно-техническая задача по повышению энергоэффективности систем отопления общественных зданий с использованием оперативного анализа потребления теплоты.

1. Исследованы существующие способы анализа для повышения энергоэффективности отопления общественных зданий и критерии энергоэффективности. Из рассмотренных, были выбраны критерии: валовый отпуск теплоты Q_0 в зависимости от температуры наружного воздуха, кВт; удельная отопительная характеристика q_0 , Вт/(м³·К), параметр теплообменной системы Φ_0 , Вт/К. Отбор вышеназванных критериев обусловлен необходимостью выбора критериев, которые могут быть проанализированы с большей точностью на основании сбора данных в режиме реального времени с помощью современных средств автоматизированного сбора данных.

2. Предложен способ анализа для повышения энергоэффективности отопления общественных зданий и сравнения показателей энергоэффективности зданий как в течение разных отопительных сезонов, так и между собой с помощью критериев энергоэффективности отопления общественных зданий, что позволяет установить базовый уровень энергопотребления и анализировать соотношение значений критериев энергоэффективности с базовым уровнем энергопотребления.

3. Предложены подходы к выбору параметров теплоизоляционных материалов для утепления общественных зданий на основе измеренных теплотехнических характеристик для конкретного здания, которые позволяют рассмотреть использование информации о снижении величины тепловых потерь в зависимости от параметров теплоизоляции одновременно с учетом их стоимости.

4. Создана математическая модель нестационарных тепловых процессов при отоплении зданий, описывающая изменение температуры воздуха внутри помещений, и процесс теплопередачи через ограждающие конструкции. Обосновано, что наиболее целесообразным параметром для адаптации модели к условиям конкретных зданий является полная теплоемкость внутреннего объема здания. В результате адаптации разработанной математической модели к условиям школ г. Донецка установлено, что значение полной теплоемкости внутреннего объема здания, может быть описано в виде определенной зависимости: $mc = kV$, где k - коэффициент пропорциональности, равный $(4,5 \dots 4,8) \cdot 10^5$, Дж/(м³·К), что позволяет наиболее быстро осуществлять адаптацию математической модели нестационарного теплообмена к условиям конкретных школ.

5. Модель была применена для получения сведений о состоянии здания при нестационарном режиме отопления. Результаты моделирования показали, что данное снижение отопительной нагрузки в определенных условиях позволяет получить экономию теплоты до 10%. Также данная модель, в качестве инструмента, позволяет исследовать поведение зданий в нештатных ситуациях, связанных с аварийным отключением отопления.

6. Данная система была внедрена в отделе образования Администрации г. Донецка. В результате работы в двух пилотных районах города был получен следующий экономический эффект от внедрения системы:

– в Ворошиловском районе г. Донецка были проведены мероприятия по утеплению зданий в пяти школах, была проведена модернизация отопления в

шести школах. Ожидаемая экономия тепла составила 1046,7 МВт (14%), экономический эффект – 2 160 000 руб;

– в Киевском районе г. Донецка были проведены мероприятия по утеплению зданий в семи школах, была проведена модернизация отопления в семи школах. Ожидаемая экономия тепла составила 814,7 МВт (10%), экономический эффект – 1 680 000 руб.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. **Харитонов, А.Ю.** Автоматизация передачи данных и анализ энергоэффективности в распределенном программно-аппаратном комплексе энергоменеджмента муниципальных объектов [Текст] / А.Ю. Харитонов, Р.А. Родригес Залепинос / Наукові праці Донецького Національного технічного університету. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування» (МАП-2011). Випуск 9 (179). – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – с. 171-183. *(Разработан анализ энергоэффективности в программно-аппаратном комплексе энергоменеджмента муниципальных объектов).*

– патенты:

2. Патент на изобретение № 88192 Украина, F24B 3/02(3/06) «Спосіб одержання теплової і гідравлічної енергії та опалювальна установка для його здійснення» [Текст] // Аверін Г.В., Харитонов А.Ю., заяв. 08.10.2007, опубл. 25.09.2009, бюл.№18.

– публикации в других изданиях:

3. **Харитонов, А.Ю.** К вопросу создания эффективных автоматизированных систем для получения энергии [Текст] / А.Ю. Харитонов // Наук. праці Донецького Національного технічного університету. – 2008. – №9. – С.292 – 295.

4. Карпушев, С.А. Автоматизированная система мониторинга энергоэффективности муниципальных объектов г. Донецка [Текст] / С.А. Карпушев, А.Ю. Харитонов // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист/ Інститут навколишнього середовища НАН та МНС України. Київ-Кременчук – 2010. – №1. – С.55 – 67. *(Разработана автоматизированная система мониторинга энергоэффективности муниципальных объектов г. Донецка).*

5. **Харитонов, А.Ю.** Анализ энергоэффективности зданий на основе автоматизированной системы мониторинга энергопотребления муниципальных объектов [Текст] / А.Ю. Харитонов, Н.В. Колесниченко // Наукові праці донецького національного технічного університету. Серія "Системний аналіз та інформаційні технології у науках про природу та суспільство". - (САІТ-2010). - Вип. 1(133) - Донецьк: ДонНТУ. -2011. - С. 194 - 202. *(Разработана автоматизированная система мониторинга энергопотребления муниципальных объектов).*

6. **Харитонов, А.Ю.** Анализ энерго- и ресурсопотребления муниципальных объектов с помощью методов системной динамики [Текст] / А.Ю. Харитонов // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. Сборник научных трудов. №1 (2) 2 (3) '2012. Донецк, 2013.- С. 107-112.

7. **Kharytonov, A.** Automation of data transfer and analysis of the effectiveness in the energy management of municipal institutions [Текст] / A. Kharytonov // Наукове видання «Системний аналіз та інформаційні технології у науках про природу та суспільство». Всеукраїнський збірник наукових праць (українською, російською, англійською мовами) №1(4)–2(5)'2013. - С. 100-106.

8. **Kharitonov, A.** The analysis of municipal object's energy efficiency with methods of system dynamics [Текст] / A. Kharytonov // Наукове видання «Системний аналіз та інформаційні технології у науках про природу та суспільство». Всеукраїнський збірник наукових праць (українською, російською, англійською мовами) №1(6)–2(7)'2014. - С. 91-97.

9. **Харитонов, А.Ю.** Обзор современных систем учета и анализа потребления ресурсов и энергии [Текст] / А.Ю. Харитонов // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, – 2015. – № 1. – С. 117-125

10. Бирюков, А.Б. Методика оперативного сбора данных для анализа энергоэффективности теплоснабжения общественных зданий [Текст] / А.Б. Бирюков, **А.Ю. Харитонов** // Энергетические, управляющие и информационные системы: сб. докладов I-ой межд. научно-техн. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. – с. 40-45. *(Разработана методика оперативного сбора данных для анализа энергоэффективности теплоснабжения общественных зданий)*.

11. **Харитонов, А.Ю.** Вероятностный анализ потребления энергии зданиями школ [Текст] / А.Ю. Харитонов // Электронные информационные системы. М.– 2016. № 3 (10) 2016. – с. 103-108

12. Бирюков, А.Б. Математическая модель нестационарных процессов потребления теплоты зданием [Текст] / А.Б. Бирюков, **А.Ю. Харитонов** // Научные труды Калужского государственного университета имени К.Э. Циолковского. Серия: Естественные науки. 2017. – Калуга: Издательство КГУ имени К.Э. Циолковского, 2017. – с. 76-84. *(разработана математическая модель нестационарных процессов потребления теплоты зданием)*

– публикации в зарубежных изданиях:

13. Birukov, A. Mathematical model of building's heat consumption with non-stationary processes [Текст] / A. Birukov, **A. Kharytonov** // The Way of Science. International scientific journal, № 6 (40), 2017. – с. 22-28. *(применена математическая модель нестационарных процессов потребления теплоты к зданиям школ г. Донецка)*