

На правах рукописи



Миллер Юлия Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ ЗДАНИЯ В СУТОЧНОМ И ГОДОВОМ
ЦИКЛАХ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в ФБГУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук»

Научный руководитель: **Табунщиков Юрий Андреевич**
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН

Официальные оппоненты: **Кочев Алексей Геннадьевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет»,
заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение»

Гвоздков Александр Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный
архитектурно-строительный университет»,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение и
вентиляция»

Ведущая организация: Центральный научно-исследовательский и
проектный институт жилых и общественных
зданий (ЦНИИЭП жилища)

Защита состоится «30» сентября 2015 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 007.001.01 при ФБГУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» по адресу: 127238 г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21, светотехнический корпус, к. 205, тел. (495) 482-40-76, факс (495) 482-40-60, e-mail: niisf@niisf.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом фонде и на сайте ФБГУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» <http://niisf.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 007.001.01, к.т.н.

Н. П. Умнякова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время в отечественной и мировой строительной практике постоянно возрастают требования к экономии энергии, затрачиваемой на теплоэнергоснабжение зданий. Это обстоятельство вызвано стремлением сохранить невозобновляемые энергетические ресурсы и необходимостью защиты окружающей среды от загрязнения.

Практическая реализация мероприятий по экономии энергии связана со значительными капитальными вложениями. В этих условиях важно еще до разработки проектной и технической документации объекта выявить эффективность рассматриваемых энергосберегающих мероприятий и на стадии проектирования выбрать обоснованные технические решения по их реализации. Эта работа может быть выполнена с использованием метода математического моделирования теплотребления зданий на отопление и охлаждение в годовом цикле с учетом особенностей режима их эксплуатации, объемно-планировочных и инженерных решений, а также применяемых энергосберегающих технологий.

Степень разработанности темы диссертации. Теоретические основы математического моделирования теплового режима здания опираются на труды российских ученых, посвященные теории нестационарного теплового баланса помещений зданий (в алфавитном порядке): Богословского В.Н., Бродач М.М., Васильева Г.П., Гагарина В.Г., Гвоздкова А.Н., Гримитлина А.М., Гулабянца Л.А., Дацюк Т.А., Костина В.И., Кочева А.Г., Кувшинова Ю.Я., Ливчака В.И., Малявиной Е.Г., Наумова А.Л., Позина Г.М., Сотникова А.Г., Табунщикова Ю.А., Шилькрота Е.О., Шкловера А.М.

К настоящему времени известны зарубежные разработки в области математического моделирования теплотребления зданий на отопление и охлаждение в годовом цикле. Следует отметить то обстоятельство, что каждая страна стремится независимо создать собственные математические модели теплотребления зданий и реализующие их компьютерные программы, которые опираются на национальные нормативные документы и учитывают национальные особенности проектирования, строительства и эксплуатации зданий.

Анализ работ по теории математического моделирования теплотребления зданий на отопление и охлаждение в годовом цикле показал необходимость развития и совершенствования данной теории, в частности, в части использования почасовых значений параметров наружного климата, почасовых значений бытовых или технологических тепловыделений, почасовых значений величины вентиляционного воздухообмена, почасовых значений температуры воздуха помещений, возможности учета изменения во времени величины сопротивления теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций. Важнейшим направлением совершенствования математической модели теплотребления здания на отопление и охлаждение

является создание возможности учета широкого класса энергосберегающих инженерных решений и технологий.

Цель и задачи. Цель диссертационной работы – исследование теплотребления зданий на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах на основе усовершенствованной математической модели теплового баланса здания, учитывающей возможность оценки эффективности широкого класса энергосберегающих инженерных решений и технологий.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

- выполнен анализ отечественных и зарубежных методов расчета и нормирования теплотребления зданий на отопление и охлаждение;

- выполнен анализ работ по теории математического моделирования теплового баланса помещений зданий и определены пути ее совершенствования в соответствии с современными представлениями о режиме эксплуатации зданий и потребности в расчете теплотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах;

- усовершенствована математическая модель теплотребления здания на отопление и охлаждение в части учета изменения почасовых значений параметров наружного климата, почасовых значений бытовых или технологических тепловыделений, почасовых значений величины вентиляционного воздухообмена, почасовых значений температуры воздуха помещений, изменяющейся во времени величины сопротивления теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций;

- получено обобщенное уравнение теплового баланса воздуха помещения, позволяющее учитывать широкий класс энергосберегающих инженерных решений и технологий при определении теплотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах;

- выполнена экспертная оценка эффективности широкого класса энергосберегающих инженерных решений и технологий;

- разработана компьютерная программа расчета, реализующая предложенную математическую модель теплотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах;

- экспериментально подтверждена адекватность математической модели теплотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах и реализующей ее компьютерной программы расчета;

- исследовано теплотребление зданий на отопление и охлаждение с учетом изменения почасовых значений параметров наружного климата, почасовых значений бытовых или технологических тепловыделений, почасовых значений величины вентиляционного воздухообмена, почасовых значений температуры воздуха помещений, изменяемой во времени величины сопротивления теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций в суточном и годовом циклах с учетом эффективности энергосберегающих инженерных решений и технологий.

Объектом исследования являются жилые и общественные (офисные и административные) здания на стадии проектирования, эксплуатации, реконструкции.

Предметом исследования являются показатели теплопотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Уточнена математическая модель теплопотребления здания на отопление и охлаждение с учетом изменения почасовых значений параметров наружного климата, почасовых значений бытовых или технологических тепловыделений, почасовых значений величины вентиляционного воздухообмена, почасовых значений температуры воздуха помещений, изменяемой во времени величины сопротивления теплопередаче светопроницаемых ограждающих конструкций в суточном и годовом циклах.

2. Предложена математическая модель и методология учета широкого класса энергосберегающих инженерных решений и технологий при определении теплопотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах.

3. Получены новые научные результаты исследования влияния почасовых изменений параметров наружного климата, почасовых изменений бытовых или технологических тепловыделений, почасовых изменений величины вентиляционного воздухообмена, почасовых изменений температуры воздуха помещений и изменяемой во времени величины сопротивления теплопередаче светопроницаемых ограждающих конструкций на величину теплопотребления здания на отопление и охлаждение и продолжительности периодов отопления и охлаждения.

4. Предложена методика учета почасовых изменений технологических тепловыделений в тепловом балансе помещений общественных (офисных и административных) зданий для расчета теплопотребления этих зданий на отопление и охлаждение.

Теоретическую и практическую значимость диссертационной работы составляют:

- Математическая модель и компьютерная программа расчета теплопотребления здания на отопление и охлаждение с возможностью учета эффективности широкого класса энергосберегающих инженерных решений и технологий и с учетом изменения почасовых значений параметров наружного климата, почасовых значений бытовых или технологических тепловыделений, почасовых значений величины вентиляционного воздухообмена, почасовых значений температуры воздуха помещений, изменяемой во времени величины сопротивления теплопередаче светопроницаемых ограждающих конструкций в суточном и годовом циклах. Данная математическая модель может быть использована для прогнозирования теплопотребления зданий на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах, продолжительности периодов отопления и охлаждения и оценки расчетной производительности систем отопления, вентиляции и охлаждения в годовом цикле с целью подбора оборудования и выбора целесообразного режима его функционирования.

- Метод учета широкого класса энергосберегающих инженерных решений и технологий при определении теплопотребления здания на отопление

и охлаждение в суточном и годовом циклах, который может быть использован специалистами и проектировщиками для выполнения многовариантного анализа и обоснования целесообразности применения энергосберегающих инженерных и архитектурных решений, влияющих на теплопотребление здания на отопление и охлаждение.

- Установленное влияние составляющих теплового баланса на величину теплопотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах и на продолжительность периодов отопления и охлаждения, что может быть использовано при разработке рекомендаций по обеспечению энергетической эффективности зданий и нормативных документов в области энергосбережения.

Методология и методы диссертационного исследования. Для достижения поставленной цели в работе использовались теоретические исследования, выполненные методом математического моделирования посредством разработанной компьютерной программы расчета теплопотребления здания на отопление и охлаждение.

Положения, выносимые на защиту:

– Математическая модель теплопотребления здания на отопление и охлаждение с учетом изменения почасовых значений параметров наружного климата, почасовых значений бытовых или технологических тепловыделений, почасовых значений величины вентиляционного воздухообмена, почасовых значений температуры воздуха помещений, изменяемой во времени величины сопротивления теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций в суточном и годовом циклах;

– Математическая модель и методология учета широкого класса энергосберегающих инженерных решений и технологий при определении теплопотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах;

– Выявленные зависимости влияния составляющих теплового баланса на величину теплопотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах и на продолжительность периодов отопления и охлаждения.

Степень достоверности результатов. При разработке математической модели теплопотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах использовались положения системного представления здания как единой энергетической системы. Адекватность разработанной математической модели подтверждена экспериментально.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались:

1. Ежегодная международная конференция и выставка «Программное обеспечение для систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, тепло- и холодоснабжения, водоснабжения и водоотведения. Проектирование, расчет, подбор оборудования, автоматизация систем», НП «АВОК», Москва, 2011–2015 гг.

2. Международный симпозиум «Устойчивая архитектура: настоящее и будущее», МАРХИ, НП «АВОК», Москва, 2011 г.

3. Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов «Наука, исследование и экспериментальное проектирование», МАРХИ, Москва, 2012 г.

4. V Международный форум градостроительства, архитектуры и дизайна «A City», Санкт-Петербург, 2012 г.

5. Международная научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов «Наука, образование и экспериментальное проектирование», МАРХИ, Москва, 2013–2014 гг.

6. V Международная научно-техническая конференция «Теоретические основы теплогасоснабжения и вентиляции», МГСУ, Москва, 2013 г.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение: п.5 «Тепловой, воздушный и влажностный режимы зданий различного назначения, тепломассообмен в ограждениях и разработка методов расчета энергосбережения в зданиях».

Результаты работы внедрены при разработке ГОСТ Р 54964–2012 «Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости» в части установления минимальных экологических требований и рекомендуемых показателей расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий; при разработке раздела «Энергосбережение и энергоэффективность» стандарта СТО НОСТРОЙ 2.35.4–2011 «Зеленое строительство». Здания жилые и общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания» и разработке приложения «Корректирующие региональные коэффициенты по критерию 30 «Расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания»» стандарта СТО НОСТРОЙ 2.35.68–2012 «Зеленое строительство». Здания жилые и общественные. Учет региональных особенностей в рейтинговой системе оценки устойчивости среды обитания»; при разработке учебного задания и методических указаний к дипломному проекту при защите на степень бакалавра «Оценка архитектурного проекта многоэтажного жилого дома по принципам устойчивого развития. Раздел «Инженерное оборудование зданий»» для Московского архитектурного института (государственная академия); при разработке Руководства АВОК «Расчет теплотребления зданий на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах» для ООО ИИП «АВОК-ПРЕСС»; при разработке проектов уникальных зданий, среди которых «Меркурий Сити Тауэр», Москва, Корпоративный университет Сбербанка, Московская область, многоэтажные жилые здания с низким энергопотреблением, Северное Измайлово, Москва.

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 6 работ, в том числе 2 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 121 источников, в том числе 33 на иностранных языках. Работа изложена на 144 страницах, включая 43 иллюстрации, 14 таблиц; объем приложений составляет 5 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности работы, сформулирована ее цель и задачи, определены научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены роль и значимость показателей теплотребления в оценке энергетической эффективности зданий. Рассмотрены требования к показателям теплотребления зданий, установленные в законодательных актах, нормативных документах и рейтинговых системах оценки «зеленых» зданий.

С учетом важности оценки энергетической эффективности зданий сформулированы следующие требования к методам расчета теплотребления здания на отопление и охлаждение:

1. Математическая модель и метод ее реализации должны учитывать тепловой баланс помещений здания, позволяющий рассчитывать теплотребление как на отопление, так и на охлаждение в суточном и годовом циклах.

2. В методе расчета должно быть заложено системное представление здания как единой энергетической системы.

3. Метод расчета должен опираться на почасовые изменения параметров наружного климата и учитывать переменный режим эксплуатации помещений в суточном и годовом циклах.

4. Метод расчета должен позволять учитывать составляющие теплового баланса помещений здания в аналитическом и табличном видах.

5. Метод расчета должен предусматривать возможность учета вклада энергосберегающих инженерных решений и технологий в снижение теплотребления здания на отопление и охлаждение.

Приведен анализ отечественных методов расчета теплотребления здания на отопление и охлаждение и ряда зарубежных компьютерных программ, позволяющих произвести расчет теплотребления здания на отопление и охлаждение в годовом цикле. Установлено, что в настоящее время отсутствует отечественный метод расчета, удовлетворяющий всем вышеперечисленным требованиям, а методы расчета, положенные в основу расчетных алгоритмов зарубежных компьютерных программ ориентированы на соответствующие зарубежные нормативные документы и опираются на зарубежный опыт проектирования и эксплуатации зданий, что затрудняет их корректное применение в отечественной проектной практике.

Рассмотрены основные пути снижения теплотребления здания на отопление и охлаждение.

Анализ рассмотренной литературы и ряда компьютерных программ позволил изучить состояние вопроса и сформулировать задачи исследования.

Во второй главе разработана математическая модель теплотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах в соответствии с принципами, изложенными в работах Ю.А. Табунщикова, о системном

представлении здания как единой энергетической системы с тремя основными взаимосвязанными энергетическими подсистемами:

- энергетическим воздействием наружного климата на оболочку здания;
- энергией, содержащейся в оболочке здания, то есть тепловые потоки через светонепроницаемые и светопроницаемые ограждающие конструкции;
- энергией, содержащейся внутри объема здания, то есть бытовые или технологические тепловыделения, лучистый и конвективный теплообмен, воздухообмен, теплоемкое оборудование и мебель и т.д.

В диссертационной работе математическая модель наружного климата опирается на почасовые значения параметров наружного климата в формате «типового года». При проведении расчетов теплотребления на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах для зданий Москвы и Московской области предполагается использование «типового года» № 5, разработанного НИИ Строительной физики, а для других городов России, для которых к настоящему моменту не разработан отечественный «типовой год», использование международного «типового года», разработанного ASHRAE.

Использование почасовых изменений параметров наружного климата в годовом цикле позволяет оценить во второй энергетической подсистеме нестационарные тепловые потоки через ограждающие конструкции.

Светонепроницаемые ограждающие конструкции (стены, покрытия, перекрытия и т.д.), как правило, являются многослойными. Сделано допущение, что температурное поле таких ограждающих конструкций является одномерным, теплофизические характеристики материалов слоев не зависят от температуры наружного воздуха и являются постоянными в пределах слоя, а теплопередача описывается уравнением теплопроводности с разрывными коэффициентами:

$$c(y)\gamma(y) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(y) \frac{\partial t}{\partial y} \right] \text{ при } 0 < y < \delta, \quad (1)$$

где $c(y)\gamma(y)$ – произведение удельной теплоемкости материала слоя ограждающей конструкции, Вт·ч/(кг·°С), на его плотность, кг/м³; $\lambda(y)$ – коэффициент теплопроводности материала слоя ограждающей конструкции, Вт/(м·°С); δ – толщина ограждающей конструкции, м.

Тепловые потоки через светопроницаемые ограждающие конструкции (окна, витражи, зенитные фонари и т.д.) вследствие разницы температур воздуха помещения и наружного воздуха определяются по формуле, Вт:

$$Q_{ок.м} = \frac{1}{R_{ок}(\tau)} (t_{в}^{усл} - t_{н}) F_{ок}, \quad (2)$$

где $R_{ок}(\tau)$ – приведенное сопротивление теплопередаче заполнения светового проема, переменное в течение суток при применении энергосберегающих инженерных решений и технологий, например, устройстве теплозащитных «ночных» штор м²·°С/Вт; $t_{в}^{усл}$ – условная температура воздуха помещения, °С,

учитывающая лучистый и конвективный теплообмен в помещении; t_H – температура наружного воздуха, °С; $F_{ок}$ – площадь заполнения светового проема, м².

Теплопоступления вследствие воздействия солнечной радиации определяются как:

– сквозные теплопоступления, Вт:

$$Q_{скв} = (I_{np}k_{1np}(\tau) + I_p k_{1p}(\tau))(F_{ок} - F_{притв}) \quad (3)$$

– поглощенные теплопоступления, Вт:

$$Q_{ноз} = (I_{np}k_{2np}(\tau) + I_p k_{2p}(\tau))(F_{ок} - F_{притв}), \quad (4)$$

где I_{np} , I_p – интенсивность прямой и рассеянной солнечной радиации соответственно, Вт/м²; $k_{1np}(\tau)$, $k_{1p}(\tau)$ – коэффициент сквозных теплопоступлений от прямой и рассеянной солнечной радиации соответственно; $k_{2np}(\tau)$, $k_{2p}(\tau)$ – коэффициент поглощенных теплопоступлений от прямой и рассеянной солнечной радиации соответственно; $F_{притв}$ – площадь притворов заполнения светового проема, м².

Третья энергетическая подсистема представляет собой уравнение теплового баланса воздуха помещения, которое включает в себя теплообмен с ограждающими конструкциями, теплопотери или теплопоступления вследствие вентиляционного воздухообмена, теплообмен с внутренним оборудованием или мебелью, бытовые или технологические тепловыделения.

Теплопотери или теплопоступления вследствие вентиляционного воздухообмена определяются по формуле, Вт:

$$Q_{вент} = m(\tau)Vc_в\gamma_в(t_в - t_{np}(\tau)), \quad (5)$$

где $m(\tau)$ – кратность вентиляционного воздухообмена, ч⁻¹; V – объем помещения, м³; $c_в$ – удельная теплоемкость воздуха, Вт·ч/(кг·°С); $\gamma_в$ – плотность воздуха, кг/м³; $t_в$ – температура воздуха помещения, °С; $t_{np}(\tau)$ – температура приточного воздуха, °С.

Принципиальной особенностью математической модели является отдельный учет лучистого и конвективного теплообмена в помещении, а также учет наличия теплоемкого оборудования и мебели, которые можно рассматривать как дополнительную теплоемкость, повышающую теплоаккумулирующую способность помещения:

$$c_{об}G_{об} \frac{dt_{об}}{d\tau} = \alpha_{об}(t_{об} - t_в), \quad (6)$$

где $c_{об}$ – удельная теплоемкость материала оборудования или мебели, Вт·ч/(кг·°С); $G_{об}$ – масса оборудования или мебели, отнесенная к единице площади пола, кг/м²; $t_{об}$ – температура оборудования или мебели, °С; $\alpha_{об}$ –

коэффициент теплоотдачи оборудования или мебели, учитывающий конвективный теплообмен с внутренним воздухом и лучистый теплообмен с окружением, Вт/(м²·°С).

В настоящее время известен широкий класс энергосберегающих инженерных решений и технологий, влияние которых необходимо учитывать при определении теплотребления зданий на отопление и охлаждение.

Поскольку энергосберегающие инженерные решения или технологии в том или ином виде влияют на тепловой баланс воздуха помещения, их вклад можно оценить путем введения в уравнение теплового баланса воздуха помещения так называемых коэффициентов эффективности энергосберегающих инженерных решений и технологий. Эти коэффициенты характеризуют относительную величину снижения теплотребления на отопление или охлаждение рассматриваемого здания за счет применения конкретного энергосберегающего инженерного решения или технологии.

Например, применение утилизации теплоты вытяжного воздуха для подогрева приточного воздуха посредством пластинчатого теплообменника может быть охарактеризовано следующим коэффициентом эффективности:

$$\alpha_{\text{вент.ут}}(\tau) = 1 - \frac{Q_{\text{вент2}}}{Q_{\text{вент1}}}, \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{вент.ут}}(\tau)$ – коэффициент эффективности применения утилизации теплоты вытяжного воздуха посредством пластинчатого теплообменника для подогрева приточного воздуха, д.ед; $Q_{\text{вент1}}$ – теплотребление на нагрев вентиляционной нормы наружного воздуха до применения утилизации теплоты вытяжного воздуха для подогрева приточного воздуха, Вт; $Q_{\text{вент2}}$ – теплотребление на нагрев вентиляционной нормы наружного воздуха при применении утилизации теплоты вытяжного воздуха для подогрева приточного воздуха, Вт.

В связи с тем, что эффективность некоторых энергосберегающих инженерных решений и технологий, среди которых утилизация теплоты вытяжного воздуха для подогрева приточного воздуха, зависит от параметров наружного климата и от характеристик теплового режима помещения, которые изменяются в суточном и годовом циклах, коэффициент эффективности энергосберегающего инженерного решения или технологии есть функция от времени.

Таким образом, теплотребление на нагрев вентиляционной нормы наружного воздуха с учетом энергосберегающих инженерных решений или технологий можно оценить по формуле, Вт:

$$Q_{\text{вент2}} = Q_{\text{вент1}}(1 - \alpha_{\text{вент.ут}}(\tau)). \quad (8)$$

Аналогичным образом можно оценить вклад в тепловой баланс воздуха помещений других энергосберегающих инженерных решений и технологий.

В диссертационной работе значения коэффициентов эффективности энергосберегающих инженерных решений и технологий выявлены методом экспертных оценок и представлены в табличном виде. Экспертная оценка осуществлялась методом «Дельфи» – многоэтапным количественным методом групповых оценок, который предполагает независимость мнений экспертов друг от друга.

В качестве экспертов были приглашены специалисты, имеющие опыт разработки, проектирования, применения и эксплуатации различных энергосберегающих инженерных решений и технологий.

С учетом вышесказанного, обобщенное уравнение теплового баланса воздуха помещения, учитывающее широкий класс энергосберегающих инженерных решений и технологий, можно представить в виде:

$$c_g \gamma_g V \frac{dt_g}{dt} = [(1 - \alpha_{огр}(\tau)) Q_{огр} + (1 - \alpha_{ок}(\tau)) Q_{ок} + (1 - \alpha_{вент}(\tau)) Q_{вент} \pm Q_{вн}(\tau) + Q_{об}] (1 - \alpha_{от/ох}(\tau)) \times (1 - \alpha_{тепл/хол}(\tau)), \quad (9)$$

где $Q_{огр}$ – трансмиссионные теплотери или теплопоступления через наружные светонепроницаемые ограждающие конструкции, Вт; $Q_{ок}$ – трансмиссионные теплотери или теплопоступления через наружные светопроницаемые ограждающие конструкции, Вт; $Q_{вент}$ – теплотери или теплопоступления вследствие вентиляционного воздухообмена, Вт; $Q_{вн}(\tau)$ – бытовые или технологические тепловыделения, Вт; $Q_{об}$ – теплотери за счет поглощения теплоты мебелью или оборудованием, Вт; $\alpha_{огр}(\tau)$, $\alpha_{ок}(\tau)$, $\alpha_{вент}(\tau)$, $\alpha_{от/ох}(\tau)$, $\alpha_{тепл/хол}(\tau)$ – коэффициенты эффективности энергосберегающих инженерных решений и технологий, д.ед, характеризующие соответственно снижение трансмиссионных теплотерь или теплопоступлений через светонепроницаемые ограждающие конструкции; снижение трансмиссионных теплотерь или теплопоступлений через светопроницаемые ограждающие конструкции; снижение теплотерь или теплопоступлений вследствие вентиляционного воздухообмена; снижение теплотребления в системе отопления или охлаждения; снижение теплотребления в системе теплоснабжения или холодоснабжения.

Реализация математической модели осуществляется посредством компьютерной программы, особенностью которой является ее блочная структура, обеспечивающая возможность вносить изменения в тот или иной блок не меняя решения задачи в целом.

В третьей главе представлены результаты подтверждения адекватности разработанной математической модели методом пассивного эксперимента путем сопоставления рассчитанных и измеренных почасовых значений теплотребления на отопление многофункционального жилого комплекса, расположенного в Москве, за часть отопительного периода 2012–2013 гг.

Измерение почасовых значений теплотребления на отопление осуществлялось теплосчетчиком, установленным в индивидуальном тепловом пункте.

Исходные данные для расчета почасовых значений теплотребления на отопление были приняты в соответствии с проектной документацией, а значения температуры наружного воздуха за период измерений приняты по данным метеостанции «Москва, ВВЦ».

По результатам пассивного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная математическая модель достаточно точно описывает сложный почасовой ход изменения теплотребления на отопление многофункционального жилого комплекса, что подтверждает ее валидность.

2. Расхождение измеренных и рассчитанных почасовых значений теплотребления на отопление многофункционального жилого комплекса колеблется в диапазоне от 1 до 22%. Указанное расхождение обусловлено кратковременными периодическими отклонениями фактического режима эксплуатации многофункционального жилого комплекса от заданного при расчете.

В четвертой главе приведены результаты исследований на основе разработанной математической модели теплотребления на отопление и охлаждение жилых и офисных зданий. Объектами исследования являлись жилые и офисные помещения зданий, расположенных в Москве, теплозащитные характеристики ограждающих конструкций которых соответствуют требованиям, установленным в действующих нормативных документах.

Прежде всего, результаты выполненных расчетов почасовых изменений теплотребления жилого и офисного помещений на отопление и охлаждение в годовом цикле показали, что в холодный период имеют место часы, когда вместо ожидаемого теплотребления на отопление требуется теплотребление на охлаждение помещений, а в теплый период – часы, когда вместо ожидаемого теплотребления на охлаждение помещений требуется теплотребление на отопление.

Для выявления потенциала снижения теплотребления на отопление и охлаждение офисного и жилого зданий выполнен анализ теплового баланса рассматриваемых помещений, который показал:

– Для офисного помещения в холодный период теплотери вследствие вентиляционного воздухообмена в рабочее время суток составляют до 89% в общей структуре теплового баланса, а в нерабочее время суток, когда величина воздухообмена снижается до $0,2 \text{ ч}^{-1}$, наибольшую долю в общей структуре теплового баланса составляют трансмиссионные теплотери через светопроницаемые ограждающие конструкции – 57%. Последнее свидетельствует о целесообразности использования в нерабочее время суток устройств, позволяющих снизить трансмиссионные теплотери через светопроницаемые ограждающие конструкции.

В теплый период значительное влияние на величину теплотребления на охлаждение офисного помещения в рабочее время суток имеют технологические тепловыделения и составляют наибольшую долю в общей

структуре теплового баланса – 60%. В связи с этим для снижения теплопотребления на охлаждение возможно увеличение кратности воздухообмена в часы, когда температура наружного воздуха ниже требуемого значения температуры воздуха помещения и имеется необходимость охлаждения помещения.

– Для жилого помещения в холодный период теплопотери вследствие вентиляционного воздухообмена составляют до 75% в общей структуре теплового баланса и значительно превышают трансмиссионные теплопотери через ограждающие конструкции. Только для углового помещения верхнего этажа здания теплопотери вследствие вентиляционного воздухообмена, как и теплопотери через ограждающие конструкции, могут составлять 50% в общей структуре теплового баланса. С учетом данного обстоятельства можно сделать вывод о целесообразности применения энергосберегающих инженерных решений и технологий в системе вентиляции, например, утилизации теплоты вытяжного воздуха для подогрева приточного воздуха.

В теплый период бытовые тепловыделения составляют наибольшую долю в общей структуре теплового баланса жилого помещения – до 53%, вместе с тем данная величина может существенно меняться и зависит от метода учета бытовых тепловыделений: как постоянной или как переменной величины в суточном и годовом циклах.

При этом переменные значения бытовых тепловыделений в суточном и годовом циклах в большей степени соответствуют фактическому режиму эксплуатации жилого помещения и расчеты теплопотребления на отопление и охлаждение следует производить с учетом данного обстоятельства.

С учетом результатов анализа теплового баланса офисного и жилого помещений, целью дальнейших исследований являлась оценка влияния на величину теплопотребления на отопление и охлаждение изменения составляющих теплового баланса рассматриваемых помещений.

При исследовании влияния почасовых изменений бытовых тепловыделений и величины вентиляционного воздухообмена на величину теплопотребления жилого помещения на отопление и охлаждение предполагалось, что в часы, когда жильцы в помещении отсутствуют, величина бытовых тепловыделений принимается равной 0 Вт/м^2 , а величина воздухообмена снижается до $0,2 \text{ ч}^{-1}$. В часы, когда жильцы присутствуют в помещении, почасовые значения бытовых тепловыделений принимаются в соответствии со специальным графиком изменения бытовых тепловыделений в течение суток, разработанным таким образом, чтобы среднечасовое годовое значение величины бытовых тепловыделений составило 17 Вт/м^2 , при этом величина воздухообмена принимается $3 \text{ м}^3/\text{ч}$ на 1 м^2 площади пола.

Результаты расчета показали, что отличие полученных значений теплопотребления на отопление с учетом почасовых изменений величины бытовых тепловыделений и при их постоянных значениях в течение суток составляет до 15%, а результаты расчета продолжительности периода отопления отличаются до 25%; отличие результатов расчета теплопотребления на охлаждение с учетом почасовых изменений величины бытовых

тепловыделений и при их постоянных значениях в течение суток составляет до 65%, а отличие результатов расчета продолжительности периода охлаждения составляет до 55%.

При исследовании влияния почасовых изменений кратности вентиляционного воздухообмена на величину теплотребления офисного помещения на охлаждение предполагалось, что в теплый период в часы, когда температура наружного воздуха ниже требуемого значения температуры воздуха помещения и имеется необходимость охлаждения помещения, обусловленная наличием технологических тепловыделений и/или теплоступлений вследствие воздействия солнечной радиации, возможно увеличение кратности вентиляционного воздухообмена с целью снижения теплотребления на охлаждение. В этом случае в помещение подается приточный воздух в объеме, превышающем нормативное значение, например, в 1,5 раза, с температурой равной температуре наружного воздуха. Результаты расчета показали, что такое решение позволяет снизить теплотребление на охлаждение до 25% и сократить количество часов периода охлаждения до 15%.

При исследовании влияния изменяемой во времени величины сопротивления теплопередаче светопроницаемых ограждающих конструкций на теплотребление офисного помещения на отопление предполагалось применение в холодный период года теплозащитных «ночных» штор, которые представляют собой, например, межстекольные экраны, выполненные из пенопласта, толщиной 10 мм с сопротивлением теплопередаче $0,27 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Таким образом, сопротивление теплопередаче заполнения оконного проема в холодный период года с 7:00 до 20:00 ч составляет $0,45 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; с 20:00 до 7:00 ч – $0,72 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Размер теплозащитных «ночных» штор совпадает с размерами окна офисного помещения. При этом выполнены два варианта расчета: офисное помещение с окном, площадь которого составляет $4,8 \text{ м}^2$, и офисного помещения со сплошным остеклением.

Результаты расчета показали, что устройство теплозащитных «ночных» штор позволяет снизить теплотребление на отопление на 8–14% в зависимости от площади остекления и незначительно сократить период отопления – на 1–2%.

При исследовании влияния на величину теплотребления жилого помещения на отопление использования утилизации теплоты вытяжного воздуха для подогрева приточного воздуха предполагалось устройство поквартирной механической системы вентиляции с утилизацией теплоты вытяжного воздуха посредством пластинчатого теплообменника для подогрева приточного воздуха.

Результаты расчета показали, что использование утилизации теплоты вытяжного воздуха для подогрева приточного воздуха посредством пластинчатого теплообменника позволяет снизить теплотребление на отопление на 65%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного исследования позволяют подвести следующие **итоги:**

1. Современные требования к энергетической эффективности зданий определяют необходимость оценки их теплотребления не только на основе расчета расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период, но также в годовом цикле, включая расход тепловой энергии на охлаждение, с учетом почасовых изменений параметров наружного климата, почасовых изменений бытовых или технологических тепловыделений, почасовых изменений величины вентиляционного воздухообмена, почасовых изменений температуры воздуха помещений и изменения во времени величины сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

2. Усовершенствована математическая модель теплотребления здания на отопление и охлаждение в годовом цикле в части возможности оценки влияния на его величину эффективности широкого класса энергосберегающих инженерных решений и технологий и учета почасовых изменений:

- параметров наружного климата, таких как температура наружного воздуха, интенсивность прямой и рассеянной солнечной радиации на различно ориентированные поверхности, скорость и направление ветра;

- бытовых или технологических тепловыделений, изменяемых вследствие переменного режима эксплуатации помещений в течение суток;

- величины вентиляционного воздухообмена, изменяемой в связи с регулированием расхода приточного воздуха по потребности в течение суток;

- температуры воздуха помещения, изменяемой в соответствии с требованиями нормативных документов в зависимости от периода года;

- сопротивления теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций, существенно изменяющегося в течение суток в результате применения энергосберегающих инженерных решений и технологий, например теплозащитных «ночных» штор.

3. Предложено обобщенное уравнение теплового баланса воздуха помещения, которое позволяет производить оценку влияния на величину теплотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах широкого класса энергосберегающих инженерных решений и технологий.

4. Математическая модель и компьютерная программа расчета теплотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах может быть использована для:

- прогнозирования теплотребления зданий на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах и продолжительности периодов отопления и охлаждения;

- оценки расчетной теплопроизводительности систем отопления, вентиляции и охлаждения в годовом цикле с целью подбора оборудования и выбора целесообразного режима его функционирования;

– многовариантного анализа и обоснования целесообразности применения в конкурсных проектах зданий инженерных, энергосберегающих, архитектурно-планировочных и других решений, влияющих на теплопотребление здания на отопление и охлаждение;

– выполнения требований рейтинговых систем оценки «зеленых» зданий о необходимости повышения энергетической эффективности зданий.

5. Особенности разработанной компьютерной программы, реализующей математическую модель теплопотребления здания на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах, являются ее модульная структура, обеспечивающая возможность развития компьютерной программы без необходимости существенной переработки алгоритмов расчета, и использование почасовых значений параметров наружного климата, представленных в электронном формате CSV, что дает возможность использовать отечественные и зарубежные «типовые года» и при необходимости, обеспечивает простоту редактирования почасовых значений параметров наружного климата.

6. Установлено, что расчеты теплопотребления зданий на отопление и охлаждение в суточном и годовом циклах необходимо производить с учетом почасовых изменений параметров наружного климата, а также почасовых значений бытовых или технологических тепловыделений, величины вентиляционного воздухообмена и температуры воздуха помещений. Обоснованность данного вывода подтверждается следующими обстоятельствами:

- Для офисных и жилых помещений:

- определено, что в холодный период года имеют место часы, когда вместо ожидаемого теплопотребления на отопление требуется теплопотребление на охлаждение помещений, а в теплый период года – часы, когда вместо ожидаемого теплопотребления на охлаждение помещений требуется теплопотребление на отопление;

- показано, что продолжительность периодов отопления и охлаждения в значительной степени зависит от переменной величины бытовых или технологических тепловыделений, величины вентиляционного воздухообмена, теплозащитных показателей ограждающих конструкций и может отличаться для зданий различного технологического назначения.

По результатам выполненного исследования можно сформулировать следующие **рекомендации** по использованию результатов диссертационной работы:

- Для офисных помещений:

- на основе анализа отечественных и зарубежных работ предложена методика учета почасовых изменений технологических тепловыделений в тепловом балансе помещений, которую рекомендуется использовать при расчете теплопотребления на отопление и охлаждение;

- как альтернатива искусственному охлаждению воздуха рекомендуется увеличение кратности вентиляционного воздухообмена в теплый период года,

когда значение температуры наружного воздуха ниже требуемого значения температуры воздуха помещения и имеется необходимость охлаждения помещения, что позволяет снизить теплотребление на охлаждение до 25% и сократить количество часов периода охлаждения до 15% для зданий, расположенных в Москве;

- рекомендовано устройство теплозащитных «ночных» штор в помещениях офисных зданий, что позволяет сократить теплотребление на отопление в годовом цикле на 8–14% в зависимости от площади остекления.

- Для жилых помещений:

- рекомендовано при расчете теплотребления на отопление и охлаждение и определении продолжительности периодов отопления и охлаждения учитывать почасовые суточные изменения величины бытовых тепловыделений. Отличие результатов расчета теплотребления жилого помещения на отопление с учетом почасовых суточных изменений величины бытовых тепловыделений и при постоянных значениях величины бытовых тепловыделений в течение суток составляет до 15%, а результаты расчета продолжительности периода отопления отличаются до 25%; отличие результатов расчета теплотребления жилого помещения на охлаждение с учетом почасовых суточных изменений величины бытовых тепловыделений и при постоянных значениях величины бытовых тепловыделений в течение суток составляет до 65%, а отличие результатов расчета продолжительности периода охлаждения составляет до 55%;

- применение поквартирной системы механической вентиляции с использованием утилизации теплоты вытяжного воздуха для подогрева приточного воздуха посредством пластинчатого теплообменника, устройство которой позволит обеспечить не только регулирование и поддержание на заданном уровне параметров микроклимата помещений, но так же является одним из наиболее эффективных энергосберегающих решений для современных зданий с высокими теплозащитными характеристиками ограждающих конструкций, которое позволяет снизить теплотребление на отопление до 65%.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Уточнение разработанной математической модели с целью расширения области применения в части реализации возможности учета особенностей влажностного режима помещений общественных зданий и оценки расхода электрической энергии, потребляемой инженерным оборудованием систем отопления, вентиляции и охлаждения.

2. Расширение и систематизация исследований влияния энергосберегающих инженерных решений и технологий, почасовых изменений параметров наружного климата, почасовых изменений бытовых или технологических тепловыделений, почасовых изменений величины вентиляционного воздухообмена, почасовых изменений температуры воздуха помещений и изменения во времени величины сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций на теплотребление здания на отопление и охлаждение в годовом цикле.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Табунщиков, Ю.А. Принципы определения годового энергопотребления на климатизацию зданий / Ю.А. Табунщиков, **Ю.В. Миллер** // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 31-2 (50). – С. 549–555.
2. Табунщиков, Ю.А. Экспресс-оценка эффективности энергосберегающего оборудования, технологий и мероприятий / Ю.А. Табунщиков, Н.В. Шилкин, **Ю.В. Миллер** // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 6 (654). – С. 57–63.

Публикации в отраслевых изданиях и материалы конференций

3. **Миллер, Ю.В.** Эффективность энергосберегающих мероприятий при рассмотрении здания как единой энергетической системы / Ю.В. Миллер // Энергосбережение. – 2014. – №1. – С. 36–39.
4. Табунщиков, Ю.А. Оценка годового расхода энергии на отопление и охлаждение зданий / Ю.А. Табунщиков, **Ю.В. Миллер** // АВОК. – 2013. – №3. – С. 56–65.
5. Табунщиков, Ю.А. Методы и результаты оценки эффективности энергосберегающих решений / Ю.А. Табунщиков, Н.В. Шилкин, **Ю.В. Миллер** // АВОК. – 2013. – №7. – С. 38–49.
6. Табунщиков, Ю.А. Расчет годового расхода тепловой энергии для отопления и охлаждения зданий / Ю.А. Табунщиков, **Ю.В. Миллер** // Сборник докладов V Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции. – 2013. – С. 397–403.