**Сафонов Дмитрий Геннадьевич. Управление компенсацией емкостных токов в электрических сетях среднего класса напряжения при однофазных замыканиях на землю: диссертация ... кандидата Технических наук: 05.14.02 / Сафонов Дмитрий Геннадьевич;[Место защиты: ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»], 2020**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Московский государственный строительный университет»

На правах рукописи

О 5 2013 5 О*W*О

Самарин Олег Дмитриевич

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА  
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ  
И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗДАНИЙ

Специальность 05.23.03 (теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснаб-  
жение и освещение)

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант - д-р техн. наук, профессор, член-корр. РААСН  
Гагарин Владимир Геннадьевич

Москва, 2012

cfA

*Ъ^ЧСО*

СТР.

ВВЕДЕНИЕ 5

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО УРОВНЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ И ЗАДАЧИ ПО СО­ВЕРШЕНСТВОВАНИЮ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЗДАНИЯХ 17
   1. Современное состояние нормирования теплозащиты и энергосбережения в РФ в свете

требований Закона РФ «О техническом регулировании» 17

* 1. Современные методы исследования процессов в ограждениях, помещениях и инженер­ном оборудовании 38
  2. Современные способы энергосбережения и их эффективность 47
  3. Задачи, решаемые в диссертации 61

1. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ОГРАЖ­ДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ 67

2.1 .Расчет температурного поля элементов современных ограждений и определение температу­ры в опасных зонах для оценки требуемой теплозащиты 67

1. Расчет теплопотерь наружного угла и оконных откосов ограждений с современным

уровнем теплозащиты 81

1. Экспериментальное подтверждение результатов расчета температурного поля и тепло­потерь для элементов современных ограждений 87
2. Расчет коэффициента теплотехнической однородности и теплопотерь трехслойных сте­новых панелей с гибкими связями ■ 95
3. Расчет охлаждения и промерзания наружных ограждений 101
4. Пример использования полученных зависимостей для оценки теплозащитных свойств

ограждений здания 111

Выводы по Главе 2 119

1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ НОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ

ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЗДА­НИЙ 120

* 1. Основные принципы нормирования энергосберегающих мероприятий 120
  2. Структура энергетического баланса зданий и ее экспериментальное подтверждение.. 124
  3. Методика оценки энергопотребления зданий 136
  4. Результаты расчета энергопотребления зданий 143
  5. Достоверность оценки энергетического баланса и эффективности энергосберегающих ме­роприятий 149

СТР.

ВВЕДЕНИЕ 5

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО УРОВНЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ И ЗАДАЧИ ПО СО­

ВЕРШЕНСТВОВАНИЮ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЗДАНИЯХ 17

* 1. Современное состояние нормирования теплозащиты и энергосбережения в РФ в свете

требований Закона РФ «О техническом регулировании» 17

* 1. Современные методы исследования процессов в ограждениях, помещениях и инженер­ном оборудовании 38
  2. Современные способы энергосбережения и их эффективность 47
  3. Задачи, решаемые в диссертации 61

1. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ОГРАЖ­ДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ 67

2.1 .Расчет температурного поля элементов современных ограждений и определение температу­ры в опасных зонах для оценки требуемой теплозащиты 67

1. Расчет теплопотерь наружного угла и оконных откосов ограждений с современным

уровнем теплозащиты 81

1. Экспериментальное подтверждение результатов расчета температурного поля и тепло­потерь для элементов современных ограждений 87
2. Расчет коэффициента теплотехнической однородности и теплопотерь трехслойных сте­новых панелей с гибкими связями 95
3. Расчет охлаждения и промерзания наружных ограждений 101
4. Пример использования полученных зависимостей для оценки теплозащитных свойств

ограждений здания 111

Выводы по Г лаве 2 119

1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ НОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ

ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЗДА­НИЙ 120

* 1. Основные принципы нормирования энергосберегающих мероприятий 120
  2. Структура энергетического баланса зданий и ее экспериментальное подтверждение.. 124
  3. Методика оценки энергопотребления зданий 136
  4. Результаты расчета энергопотребления зданий 143
  5. Достоверность оценки энергетического баланса и эффективности энергосберегающих ме­роприятий 149

з

* 1. Влияние геометрических характеристик здания на его энергетические показатели... 157
  2. Влияние характеристик здания на возможность применения энергосберегающих меро­приятий 161

Выводы по Главе 3 167

1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ НОРМ ПО ТЕПЛОЗАЩИТЕ ЗДАНИЙ

И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИНИМАЕМЫХ РЕШЕНИЙ ПО ЭНЕР­ГОСБЕРЕЖЕНИЮ 169

* 1. Вероятностно-статистические соотношения между расчетными параметрами наружного

климата 169

* 1. Совершенствование нормирования теплозащиты оболочки здания 173
  2. Определение оптимального уровня удельного энергопотребления зданий на отопле­ние 182
  3. Оптимальное распределение теплоизоляции в несветопрозрачных ограждениях 189
  4. Оптимальная стоимость заполнений световых проемов с высокими теплозащитными

качествами 193

* 1. Выбор оптимального коэффициента температурной эффективности утилизаторов теп­лоты вытяжного воздуха 198

Выводы по Главе 4 203

1. НЕКОТОРЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЕ­ЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЯ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ 204
   1. Оценка фактической температурной эффективности теплоутилизаторов различной кон­струкции 204
   2. Комбинированная обработка воздуха в системах вентиляции и кондиционирования.213
   3. Снижение воздухообмена в помещениях, оборудованных автоматизированными систе­мами вентиляции и кондиционирования воздуха 218
   4. Особенности реализации энергосберегающих мероприятий в высотных зданиях 225

Выводы по Главе 5 232

1. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЯТОГО КОМПЛЕКСА ЭНЕРГО­СБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ 233
   1. Методика оценки экономической целесообразности энергосберегающих решений....233
   2. Влияние параметров наружного климата на выбор оптимального сочетания энергосбе­регающих мероприятий в общественных зданиях 244
2. 

 

1. Обоснование целесообразной стоимости тепловой энергии в условиях когенерации по

термодинамической эквивалентности 258

1. Обоснование предлагаемого сочетания инженерных решений для снижения энергопо­требления по максимальной эффективности инвестиций 262
2. Технико-экономическое сравнение принятого комплекса энергосберегающих мероприя­тий с нормативными решениями 268
3. Влияние изменения параметров наружного климата на окупаемость энергосберегающих

мероприятий 273

1. Особенности реализации и технико-экономического обоснования комплекса энергосбе­регающих мероприятий для жилых зданий 279

Выводы по Главе 6 285

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 287

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 289

ПРИЛОЖЕНИЕ. Примеры расчетов энергопотребления зданий по методике п.3.3 301

АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ 311

Актуальность работы. Современная ситуация с нормированием энергосбережения и теп­лозащиты в РФ ориентирует специалистов на применение весьма ограниченного набора реше­ний по снижению энергопотребления, не всегда отвечающих конкретным условиям строитель­ства и зачастую весьма дорогостоящих, но избыточных с точки зрения обеспечения теплотех­нической безопасности. При этом практически отсутствует теоретически обоснованная методи­ческая база для разработки нормативных документов в области энергосбережения, особенно в части выбора наиболее целесообразных энергосберегающих мероприятий.

Кроме того, на уровне действующих норм слабо проработана возможность учета взаимо­влияния и взаимозаменяемости различных энергосберегающих решений, что не позволяет в полной мере учесть эффект от их совместного использования уже на этапе технико­экономического обоснования (ТЭО) основных проектных решений и в ряде случаев приводит к их внутренней противоречивости. Отсутствуют также четкие и однозначные критерии опти­мальности используемого комплекса решений по снижению энергопотребления, особенно с точки зрения экономических интересов заказчика.

В связи с этим разработка теоретических основ энергосбережения с использованием ком­плексного подхода к выбору и реализации энергосберегающих мероприятий при проектирова­нии, строительстве и эксплуатации зданий и в первую очередь систем обеспечения их микро­климата с учетом сравнительной эффективности данных мероприятий является актуальной. Это позволит решить важную народнохозяйственную проблему энергосбережения с использовани­ем малозатратных и быстроокупаемых мероприятий в зданиях различного назначения в разных климатических условиях при существующем и прогнозируемом уровне цен на материалы, обо­рудование и тарифах на энергоносители и должно способствовать развитию отечественной строительной индустрии.

Целью работы является:

*Разработка теоретических основ выбора комплекса малозатратных и быстроокупаемых меропрттий по снижению энергопотребления зданий в их взаимной увязке и с обеспечением необходимой взаимозаменяемости в условиях реальной экономической конъюнктуры и соот­ветствующей законодательству РФ при обязательном обеспечении теплотехнической безо­пасности.*

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

- разработка методики оценки энергопотребления зданий и ТЭО проекта, учитывающей использование всех типичных энергосберегающих мероприятий;

* выявление элементов современных ограждающих конструкций со сложным температур­ным полем и изучение особенностей их теплового режима и теплопередачи для оценки энерго­потребления здания;
* выдвижение и обоснование целесообразного сочетания малозатратных и быстроокупае- мых решений по снижению энергопотребления, основанных на простейших технологиях, дос­тупных для массового строительства;
* построение критерия оптимальности выбранного сочетания энергосберегающих меро­приятий в условиях современной экономики, исследование их сравнительной эффективности, выявление области целесообразного применения и глубины реализации.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

* разработаны научные основы нормирования энергопотребления и теплозащиты зданий, базирующиеся на комплексном учете применения малозатратных энергосберегающих меро­приятий, их взаимной увязке и взаимозаменяемости, и позволяющие достичь минимума сово­купных дисконтированных затрат на строительство и эксплуатацию здания и его систем обес­печения микроклимата;
* на основании экспериментальных и теоретических исследований усовершенствованы ме­тоды расчета теплопередачи в современных ограждающих конструкциях с учетом специфики свойств используемых материалов, их размещения и конфигурации, с акцентом на влияние рас­сматриваемых процессов на энергопотребление здания и безопасность его эксплуатации;
* научно обоснованы границы применимости и глубина реализации наиболее типичных малозатратных энергосберегающих технических решений в различных зданиях;
* определены статистические показатели относительной энергетической и экономической эффективности планируемых энергосберегающих мероприятий, пригодные для предваритель­ной оценки на стадии предпроектных проработок;
* предложены оптимальные сочетания энергосберегающих мероприятий, обеспечивающие максимальный энергосберегающий эффект при минимальных материальных и энергетических затратах для разных значений цен на материалы и оборудование и тарифов на энергоносители;
* с использованием теории предельной полезности обосновано предложенное сочетание решений по снижению энергопотребления по дифференциальной и интегральной эффективно­сти инвестиций;
* проведено районирование территории РФ по сроку окупаемости оптимального сочетания энергосберегающих мероприятий;
* получена зависимость расчетного срока окупаемости решений по снижению энергопо­требления от прогнозируемого изменения климатических параметров.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем:

* создана методическая основа для нормативных документов по энергосбережению с уче­том Закона РФ «О техническом регулировании», и обоснована идеология энергосбережения, содействующая развитию отечественного производства и строительства;
* разработана методика комплексной оценки энергопотребления зданий и ТЭО принятой совокупности энергосберегающих мероприятий в условиях рыночной экономики на этапе при­нятия основных инженерных решений, соответствующая предложенным принципам нормиро­вания энергопотребления и учитывающая все основные энергосберегающие мероприятия;
* сформулированы и обоснованы предложения по будущей корректировке действующих норм в области теплозащиты и энергопотребления зданий, учитывающие предложенные прин­ципы нормирования энергопотребления;
* предложены рекомендации по расчету теплопередачи в критических элементах ограж­дающих конструкций (углы, оконные откосы) с целью выбора расчетного сопротивления теп­лопередаче для обеспечения санитарно-гигиенических условий в зданиях и оценки их энерго­потребления;
* разработаны рекомендации по выбору целесообразного сочетания и необходимой глуби­ны реализации энергосберегающих мероприятий, по энергетической и технико-экономической оценке их совокупности в зависимости от назначения здания, климатических характеристик района строительства и уровня цен и тарифов.
* получены инженерные формулы для оценки энергетического эффекта от применения ря­да отдельных технических решений по снижению энергопотребления, в том числе аппаратов утилизации теплоты вытяжного воздуха, автоматизации систем вентиляции и кондиционирова­ния воздуха и др.;
* предложены энергосберегающие комбинированные схемы обработки воздуха в системах вентиляции и кондиционирования, основанные на сочетании рециркуляции и теплоутилизации и позволяющие достичь максимального снижения энергопотребления.

Достоверность научных положений, выводов и результатов обоснована из анализа экспе­риментов на основе теории ошибок, хорошей сходимостью результатов теоретических и экспе­риментальных исследований, а также результатов исследований других авторов.

Внедрение результатов работы:

Предложенные автором принципы нормирования энергопотребления и методика ком­плексной оценки энергопотребления зданий использованы в Стандарте организации - Россий­ского научно-технического общества строителей СТО 17532043-001-2005 (Изд. ГУП ЦПП, 2006) «Нормы теплотехнического проектирования ограждающих конструкций и оценки энерго­эффективности зданий» (далее - Стандарт РНТО) и при выполнении работ по теме 7/11 темати­ческого плана НИР ФГБОУ ВПО «МГСУ» в 2011 году «Разработка критериев контроля качест­ва работ в области оценки и прогнозирования энергетической эффективности зданий и соору­жений». Предложенные методики расчета энергопотребления зданий и ТЭО комплекса энерго­сберегающих мероприятий использованы в проектах стандартов ГОСТ Р «Системы обеспече­ния микроклимата зданий. Методика экономической оценки энергосберегающих мероприя­тий.» и «Системы обеспечения микроклимата новых зданий. Оценка энергетической эффектив­ности при проектировании.».

Разработанные в диссертации методики расчета теплопередачи в критических элементах ограждающих конструкций использованы в ряде работ, выполненных автором по хозяйствен­ным договорам.

Предложенные автором методики расчета эксплуатационной энергетической характери­стики зданий и температурной эффективности аппаратов утилизации теплоты вытяжного воз­духа в системах механической вентиляции и кондиционирования внедрены в нормативные до­кументы - методики расчета энергетической эффективности рекомендуемых мероприятий по энергосбережению в г. Москве (разделы 5 и 7).

Методика комплексной оценки энергопотребления зданий и ТЭО комплекса энергосбере­гающих мероприятий, а также методики расчета температурной эффективности аппаратов ути­лизации теплоты вытяжного воздуха внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО «МГСУ» в со­ставе дисциплины «Энергосбережение и энергоэффективность зданий».

Акты о внедрении прилагаются к диссертационной работе.

**Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались на ежегодных (№№ 6-9) научно- технических конференциях НИИСФ РААСН в 2001 - 2004 году, на Первой, Второй и Третьей Международных научно-технических конференциях МГСУ «Теоретические основы теплогазо- снабжения и вентиляции» в 2005, 2007 и 2009 г., а также на 5-й, 6-й и 7-й конференциях ВГТУ «Energy for buildings» (Вильнюс, 2002, 2004 и 2008 г.). Кроме того, результаты были представ­лены на 6-м Московском Международном Форуме «Heat&Vent2004», на семинарах МГСУ «Ак­туальные проблемы строительства высотных зданий» (2004), «Высотные и большепролетные здания. Технологии инженерной безопасности и надежности» (2005), конференциях МГСУ «Фундаментальные науки в современном строительстве» (2008), «Современные фасадные сис­темы: эффективность и долговечность» (2008), и на Межрегиональной конференции «Энерго­сбережение в ЖКХ и строительстве» в КДЦ «Гостиный Двор» (2006), а также на конференциях НИИСФ РААСН «Строительная физика в XXI веке» (2006) и «Актуальные вопросы строитель­ной физики» (2009 - 2012 г.г.), научно-практической конференции «Алюминиевые фасадные системы: аспекты безопасности, надежности, долговечности» (2007) и Всероссийской специа­лизированной выставке-форуме «Стройтехмашиндустрия России-2008» в МВЦ «Крокус-

Экспо» и Второй Всероссийской научно-технической конференции «Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций здания» (С.-Пб, 2009).

Основное содержание исследования **опубликовано:**

- в **монографиях «Теплофизические и технико-экономические основы теплотехниче­ской безопасности и энергосбережения в здании» (Изд. МГСУ -Тисо-принт, 2007. -160 с.), «Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность» (М.: Изд-во АСВ, 2009; 2-е изд. - 2011. - 296 с.) и «Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий» (М.: Изд-во АСВ, 2011.-128 с.)** ; а также в статьях и докладах, всего в 97 печатных работах, перечисленных ниже. Публикации в журналах, входивших на момент сдачи статьи в список изданий, рекомен­дованных ВАК РФ для издания материалов докторских диссертаций, выделены курсивом, в т.ч. по направлению «Строительство» - жирным курсивом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработаны теоретические основы энергосбережения с использованием ком­плексного подхода к выбору и реализации энергосберегающих мероприятий при проектирова­нии, строительстве и эксплуатации зданий и в первую очередь систем обеспечения их микро­климата с учетом сравнительной эффективности данных мероприятий. По результатам данных исследований решены основные вопросы по рассматриваемой проблеме:

1. Сформулированы и обоснованы принципы нормирования и оценки энергопотребления зда­ний, соответствующие требованиям ЗТР. Основой предложенных принципов является уста­новление заказчиком требуемого снижения энергопотребления здания за счет применения тех или иных энергосберегающих мероприятий и последующего обеспечения такого сниже­ния за счет оптимального выбора комплекса этих мероприятий при соблюдении требований безопасности.
2. На основе расчета теплопередачи и теплового режима элементов современных энергосбере­гающих ограждающих конструкций (углы, оконные откосы) с экспериментальным под­тверждением полученных результатов предложены инженерные методы определения тре­буемого уровня теплозащиты ограждений, исходя из обеспечения санитарно-гигиенических требований. Разработаны рекомендации по оценке фактической теплозащиты конструкций с учетом указанных элементов и теплопроводных включений. Данные методы и рекоменда­ции предназначены для оценки энергопотребления здания по укрупненным показателям на этапе ТЭО и, в отличие от существующих, сочетают простоту и инженерный вид с доста­точно полным учетом влияния геометрии элементов и теплофизических свойств материалов на теплопередачу в неоднородных ограждениях.
3. Предложена методика расчета энергопотребления зданий, комплексным образом учиты­вающая все наиболее часто применяемые энергосберегающие мероприятия и позволяющая установить контрольные показатели энергопотребления на этапе ТЭО проекта. Достовер­ность ее результатов выявлена за счет их статистической обработки и сопоставления с имеющимися экспериментальными данными. Методика дополнена средствами технико­экономической оценки целесообразности принятого комплекса энергосберегающих меро­приятий в условиях рыночной экономики.
4. Предложен и обоснован критерий оптимальности выбранного сочетания энергосберегаю­щих мероприятий - расчетный срок окупаемости дополнительных капитальных вложений с учетом дисконтирования капитальных и эксплуатационных затрат.
5. Собран банк данных по конструктивным характеристикам большой группы общественных зданий, для которых при использовании разработанной методики выявлены статистические показатели энергетической и экономической эффективности основных планируемых энер­госберегающих мероприятий, пригодные для предварительных оценок.
6. На основе анализа структуры энергетического баланса зданий, полученной с помощью этой методики, предложено и обосновано целесообразное сочетание малозатратных и быстро- окупаемых энергосберегающих мероприятий, основанных на простейших технологиях, дос­тупных для массового строительства в зданиях различного назначения.
7. Наиболее эффективными по совокупности показателей признаны утилизация теплоты вы­тяжного воздуха в системах механической вентиляции и установка автоматических термо­регуляторов у отопительных приборов, а также мероприятия по снижению расхода воды в системах ГВС, далее следует применение современных энергоэффективных окон, и на по­следнем месте - повышение теплозащиты несветопрозрачных ограждений в экономически оптимальных пределах.
8. С привлечением вероятностно-статистических соотношений между параметрами наружного климата и теории автоматического управления выявлена оптимальная глубина и способы реализации, а также целесообразные пределы применимости отдельных мероприятий в пре­делах принятого комплекса, а также особенности его осуществления в жилых зданиях. Вы­явлена связь между особенностями конструктивных и объемно-планировочных решений здания и возможностями реализации решений по снижению энергопотребления.
9. Установлена специфика организации энергосбережения в отдельных видах зданий, харак­терных для современного строительства. В общественных зданиях основное внимание должно уделяться утилизации теплоты в системах вентиляции, в жилых - применению энергоэффективного остекления и тепловодосбережению в системах ГВС.
10. Разработаны рекомендации по применению предложенного комплекса мероприятий в зави­симости от климатических параметров района строительства, а также стоимости оборудова­ния и материалов, тарифов на энергоносители и ставки рефинансирования ЦБ РФ. Предло­жено осуществлять технико-экономическое обоснование принимаемых решений с учетом среднесрочных и долгосрочных прогнозов изменения климатических и стоимостных факто­ров. Признана целесообразной более оперативная корректировка нормативных и справоч­ных документов с использованием рядов метеонаблюдений за последние годы.
11. Результаты диссертации использованы при разработке нескольких нормативно­инструктивных документов. Методы расчета теплопередачи в элементах ограждений, тем­пературной эффективности аппаратов утилизации теплоты и ТЭО комплекса энергосбере­гающих мероприятий были использованы в учебном процессе ФГБОУ ВПО «МГСУ». Прак­тические рекомендации, основанные на исследованиях автора, нашли применение на ряде строительных объектов страны.