

Ю.Я. Кувшинов

# ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЙ



Библиотека научных разработок и проектов МГСУ

**Ю.Я. КУВШИНОВ**

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЙ**



МГСУ

Издательство Ассоциации строительных вузов

Москва

2010

## **Рецензенты:**

**Ю.А. Табунищikov,**

*член-корр. РААСН, профессор, доктор технических наук,  
Президент Некоммерческого партнерства «Инженеры по отоплению,  
вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению  
и строительной теплофизике*

**С.Г. Булкин,**

*кандидат технических наук, руководитель технического отдела  
«Внутренних инженерных систем» Региона Евразия ООО РЕХАУ*

**Кувшинов Ю.Я. Энергосбережение в системе обеспечения микроклимата зданий.** – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 320 с.

ISBN 978-5-93093-760

Монография посвящена актуальной проблеме повышения энергоэффективности зданий. В качестве методологической основы рассмотрения служит представление здания в виде единого энергетического организма, в котором микроклимат обеспечивается пассивными средствами теплозащиты и конструктивно-планировочной среды и активными воздействиями инженерных систем. Учитывая связь между конструктивными элементами здания и энергопотребляющими системами, комплекс, формирующий микроклимат, составляет единую систему обеспечения микроклимата здания.

Повышение энергетической эффективности системы обеспечения микроклимата достигается за счет широкого применения при проектировании и эксплуатации зданий энергосберегающих мер. Существенный потенциал имеют меры, вытекающие из анализа процессов формирования микроклимата. Тепловой режим помещения является определяющим фактором потребления энергоресурсов системами, обеспечивающими микроклимата. Поэтому рассмотрению вопросов теплового режима помещений уделяется в монографии существенное внимание.

Монография предназначена для специалистов в области отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и строительной теплофизики и может быть полезна магистрантам и аспирантам, осуществляющим подготовку в указанной области знаний.

© МГСУ, 2010

© Кувшинов Ю.Я., 2010

ISBN 978-5-93093-760

© Оформление Издательство АСВ, 2010

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>6</b>
<b>Глава 1. Нестационарная теплопередача через ограждение</b> .....	<b>14</b>
1.1. Решение уравнения нестационарной теплопроводности при гармонических тепловых воздействиях на ограждение .....	14
1.2. Решение при прерывистых тепловых воздействиях на ограждение .	18
1.3. Сопоставление различных методов расчета нестационарной теплопередачи через ограждение .....	21
1.4. Нестационарная теплопередача при разовых тепловых воздействиях на ограждение .....	26
<b>Глава 2. Модель теплового режима помещения с сосредоточенными         параметрами</b> .....	<b>30</b>
<b>Глава 3. Требуемая тепловая мощность систем обеспечения         микроклимата</b> .....	<b>44</b>
3.1. Тепловые потоки, проходящие через наружные ограждения .....	44
3.2. Тепловая мощность системы отопления-охлаждения .....	58
3.3. Упрощенный метод расчета средней за время работы тепловой мощности системы отопления-охлаждения.....	65
3.4. Пример определения требуемой тепловой мощности системы обеспечения микроклимата помещения .....	67
<b>Глава 4. Свойства помещения как объекта регулирования         температуры воздуха</b> .....	<b>70</b>
4.1. Статические тепловые характеристики помещения .....	70
4.2. Частотные характеристики помещения как объекта регулирования .....	71
4.3. Уравнения динамики переходных тепловых процессов в помещении.....	73
<b>Глава 5. Воздействие наружной среды на здание</b> .....	<b>82</b>
5.1. Факторы воздействия наружной среды.....	82
5.2. Условия лучисто-конвективного теплообмена на наружной поверхности ограждения .....	85
5.3. Параметры наружного климата .....	90
5.4. Изменение параметров наружного климата во времени .....	96
5.5. Обеспеченность годового изменения параметров наружного климата .....	101

<b>Глава 6. Годовой расход энергии на обеспечение микроклимата .....</b>	<b>105</b>
6.1. Расчетная модель годового изменения параметров наружного климата .....	105
6.2. Годовой расход энергии на отопление-охлаждение помещений.....	106
6.3. Определение годового расхода энергии и на обработку воздуха в системах вентиляции, кондиционирования воздуха .....	110
6.4. Обеспеченность годового расхода энергии на отопление-охлаждение и вентиляцию помещения .....	113
<b>Глава 7. Комплексное решение отопления и охлаждения помещения с помощью панельно-лучистых систем .....</b>	<b>118</b>
7.1. Общие сведения об особенностях панельно-лучистого отопления и охлаждения помещений.....	118
7.2. Потолочное панельно-лучистое отопление .....	120
7.3. Панельно-лучистое охлаждение помещений.....	133
7.4. Энергетические показатели совместно работающих СПЛО и СКВ ...	158
<b>Глава 8. Энергосбережение за счет снижения тепловой нагрузки на системы обеспечения микроклимата .....</b>	<b>165</b>
8.1. Влияние конструктивно-планировочных параметров здания на потребление энергии.....	165
8.2. Снижение тепловой нагрузки на системы обеспечения микроклимата с помощью вентилируемых окон .....	176
8.3. Снижение тепловой нагрузки за счет ночного проветривания помещений в теплое время года .....	185
8.4. Использование вентилируемых междуэтажных перекрытий для охлаждения помещений.....	191
8.5. Уменьшение тепловой нагрузки на СОМ, за счет снижения температуры воздуха в нерабочее время .....	200
<b>Глава 9. Энергосберегающие режимы работы СО, СВ и СКВ .....</b>	<b>205</b>
9.1. Особенности прерывистого отопления помещений и условия его осуществления .....	205
9.2. Параметры и режим работы прерывистого отопления.....	207
9.3. Повышение эффективности работы СВ и СКВ с переменным расхо- дом воздуха.....	211
9.4. Условия формирования и особенности микроклимата при периодической вентиляции.....	218
9.5. Динамика параметров микроклимата при периодической вентиляции .....	220
9.6. Натурное обследование и идентификация математической модели динамики микроклимата при ПВ .....	224
9.7. Режим работы периодической вентиляции .....	230
9.8. Схемы управления периодической вентиляцией .....	234

<b>Глава 10. Использование дополнительных источников энергии для обеспечения микроклимата .....</b>	<b>239</b>
10.1. Тепловой режим воздушного гелиоприемника .....	239
10.2. Теплообмен в объеме воздушных аккумуляторов с шаровым заполнением .....	248
10.3. О закономерностях теплообмена в объеме шаровой насадки.....	253
10.4. Тепловой режим гелиовоздушной системы отопления .....	255
10.5. Режим работы гелиовоздушной системы отопления.....	263
10.6. Математическая модель теплового режима теплонасосной (холодильной) установки .....	271
10.7. Режим работы ТНУ в составе системы кондиционирования воздуха .....	274
10.8. Режим работы системы теплоснабжения с использованием тепла солнечной радиации и теплового насоса .....	278
<b>Глава 11. Эффективность энергосберегающих мер в системе обеспечения микроклимата .....</b>	<b>284</b>
11.1. Критерий экономической эффективности .....	284
11.2. Техничко-экономическая оптимизация холодильной мощности СПЛО.....	285
11.3. Экономически целесообразные уровень теплозащиты, размеры, ориентация здания .....	292
11.4. Эффективность мер по снижению тепловой нагрузки и регулированию систем обеспечения микроклимата.....	296
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>303</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Годовое изменение параметров наружного климата в Москве, Новосибирске и Краснодаре .....</b>	<b>308</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Методика расчета годовых расходов энергии и на обработку воздуха в системах вентиляции и кондиционирования воздуха с учетом сменности работы.....</b>	<b>312</b>

## ВВЕДЕНИЕ

*Одной из важнейших социальных задач, решаемых техническими средствами, является создание среды обитания в зданиях и инженерной инфраструктуры населенных мест. Среда обитания человека характеризуется многообразием ощущений, к числу которых относится прежде всего восприятие тепловой обстановки и состояния воздушной среды. 70% времени человек проводит в помещении, поэтому его здоровье и эффективность трудовой деятельности напрямую зависят от параметров внутренней среды. Температурные условия, влажность и состав воздуха в помещении обеспечиваются специальными системами отопления (СО), вентиляции (СВ) и кондиционирования воздуха (СКВ). В здания и сооружения от центральных источников подается тепловая и электрическая энергия, необходимая для обеспечения микроклимата, бытовых и производственных нужд. Помимо этого в здание подается природный газ, используемый как топливо, а так же в производственных целях или для приготовления пищи.*

Следует отметить многообразие условий, в которых обеспечивается микроклимат помещений. Параметры микроклимата формируются в результате воздействия на помещение наружной среды, технологического процесса в помещении и систем отопления – охлаждения и вентиляции. Можно выделить три группы физических процессов формирования микроклимата, протекающих в помещении – это процессы теплообмена, процессы перемещения потоков воздуха и процессы молекулярной диффузии газовых примесей в воздухе помещения. Перечисленные условия и процессы действуют в структуре здания, которое представляет совокупность связанных между собой помещений.

Значение средств обеспечения микроклимата в современных зданиях трудно переоценить. Во-первых, это утверждение обусловлено природно-климатическими условиями территории страны. Большая часть страны требует продолжительного и достаточно сурового отопительного периода. Так, Москва, находящаяся в центральной климатической зоне, имеет нормативную продолжительность отопительного периода 215 суток при средней многолетней температуре самого холодного месяца  $-10.2^{\circ}\text{C}$ . В то же время в Восточной Сибири, например в Вилюйске средняя многолетняя температура самого холодного месяца равна  $-38.2^{\circ}\text{C}$ , а в Якутии, в Оймяконе температура опускалась до  $-71^{\circ}\text{C}$ . В европейских городах кли-

мат гораздо мягче. Например, средняя многолетняя температура самого холодного месяца в Париже равна 2° С, в Мадриде 4° С, а в Афинах 9° С. Мягкий климат присущ и большей части территории США. Длительная и холодная зима, характерная для территории России, требует надежной работы систем отопления зданий и теплоснабжения населенных мест.

Во-вторых, важность средств обеспечения микроклимата исходит из современных архитектурно-строительных тенденций, которые обусловлены урбанизацией и направлены на высотное и подземное строительство. Высотное здание имеет облегченные конструкции наружных ограждений, что способствует нарушению внутренних температурных условий в помещениях. Необходимость применения легких конструкций достигается увеличением площади окон в здании, а это, в свою очередь, приводит к перегреву помещений в летний период за счет тепла солнечной радиации. С увеличением высоты здания усиливается интенсивность проникновения в здание наружного воздуха. Все эти факторы требуют усиления мощности систем обеспечения внутренних условий, что приводит к увеличению затрат на их поддержание.

В третьих к числу факторов, повышающих роль средств обеспечения внутренних условий, относится промышленное производство. Современные производственные технологии зачастую требуют обеспечения в помещениях специальных температурно-влажностных условий и чистоты воздуха. Это относится к производству интегральных схем, на которых основано современная промышленность радиозлектроники, к многоцветной полиграфии, производству искусственных волокон, текстильному производству, точному машиностроению, пищевой промышленности и многим другим отраслям производства. В этом случае говорят об обеспечении технологических параметров и технологическом кондиционировании воздуха.

Особенность обеспечения микроклимата помещений состоит в том, что при работе систем отопления-охлаждения и вентиляции они потребляют большое количество электрической и тепловой энергии, стоимость которой очень высока и постоянно возрастает. Проблема энергосбережения является одной из наиболее актуальных мировых проблем. Она тесно связана с проблемой экологии. Системы вентиляции непосредственно взаимодействуют с атмосферным воздухом, забирая его для подачи в помещение и, в то же время, загрязняя его технологическими выбросами. Поэтому энергосбережение и охрана окружающей среды представляются идеологической основой рассматриваемой отрасли техники и технологий. С появлением в начале

90-х годов в нашей стране рынка технологий и оборудования в области обеспечения микроклимата значительно расширились возможности решения этой сложной проблемы.

Одновременно с расширенным применением технических средств обеспечения микроклимата актуализируется задача повышения их энергетической эффективности. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» устанавливает требования к энергоэффективности зданий, строений, сооружений, в том числе показатели удельной величины расхода энергетических ресурсов, требования к архитектурным, функционально-технологическим, конструктивным и инженерно-техническим решениям, требования к отдельным элементам, конструкциям и к их свойствам, устройствам и технологиям, а также к технологиям и материалам, применяемым при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте.

Актуальность поставленных задач велика, учитывая объем потребляемых в стране в настоящее время энергоресурсов. Так, только жилищный сектор в РФ расходует более ¼ общего объема энергопотребления или около 45% потребления тепловой энергии в стране. По данным Института экономики города [1] в целом в начале 2009 года суммарный объем потребления всех видов энергии в расчете на 1 кв. м жилищного фонда России составлял 105,35 кг условного топлива в год. Это в полтора раза больше, чем в среднем в других странах с похожим климатом. При этом в последнее десятилетие вследствие повышения энерговооруженности жилых помещений и газификации населенных пунктов России энергопотребление жилищного фонда возросло в целом на четверть за счет роста потребления электрической энергии и сетевого газа. Потребление тепловой энергии на цели отопления и горячего водоснабжения в течение многих лет остается практически на одном и том же уровне. Тепловая энергия является основным видом энергии, потребляемым населением России – 44% суммарного объема потребления энергии всех видов. На финансирование энергоснабжения и других коммунальных ресурсов только для объектов государственной и муниципальной бюджетной сферы в 2009 г. было израсходовано около 400 млрд руб. (более 10 млрд Евро) или примерно 5% консолидированного бюджета Российской Федерации.

По данным Росстата [2] на начало 2009 года суммарная площадь жилищного фонда России составила примерно 3 117 млн кв. м, из

которых 72% находилось в городских поселениях, в том числе 35,9% в столицах субъектов Российской Федерации и 36,3% – в прочих городских поселениях. Общее число домов, находящихся в эксплуатации – 19,3 млн. домов, из которых 17% – многоквартирные дома. При этом в многоквартирных домах находится две трети общей площади всего жилищного фонда, а в городах в многоквартирных домах находится более 80% площади жилищного фонда. Занимая второе место по величине конечного потребления энергии в России, жилищный сектор обладает самым большим потенциалом энергосбережения. В этом смысле, в многоквартирных домах снижение потребления тепловой энергии на цели отопления возможно на 30-60% , на горячее водоснабжение – до 35%).

Повышение энергетической эффективности системы обеспечения микроклимата достигается за счет широкого применения при их проектировании и эксплуатации энергосберегающих мер. В Федеральном Законе «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» энергосбережение определено как «...реализация организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направленных на уменьшение объема используемых энергоресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования». Приведенное определение в полной мере справедливо применительно к средствам обеспечения микроклимата.

При этом следует учитывать два обстоятельства. Во-первых, энергосбережение не должно сопровождаться нарушением требований к обеспечению параметров микроклимата. Во-вторых, энергосберегающие меры не являются самоцелью и необходимы для достижения общего экономического эффекта от применения систем. В связи с этим важна оценка экономической целесообразности энергосберегающих мер.

Известные в настоящее время методы экономии энергии, расходуемой на обеспечение микроклимата, позволяют свести энергопотребление от внешних источников к минимуму. Однако, многие энергоэффективные меры требуют настолько существенных капиталовложений, что их реализация становится нецелесообразной. Поэтому при выборе средств экономии энергии следует отдавать предпочтение тем из них, которые не требуют дополнительных инвестиций или сопряжены с малыми капиталовложениями. Прежде всего это означает тщательное технико-экономическое обоснование проектных решений по обеспечению микроклимата.

При проектировании систем отопления-охлаждения, вентиляции или кондиционирования воздуха следует отдавать предпочтение рациональным видам систем, то есть таким, которые обеспечивают минимум энергетических потерь при достижении эффекта. Помимо этого следует предусматривать комплекс мер по снижению тепловой нагрузки (ТН) на системы и одновременно закладывать меры по снижению энергопотребления в эксплуатационных условиях, заботясь об эффективных методах регулирования систем. Передовой опыт показывает, что этими мерами можно понизить энергопотребление систем на 2/3.

Лишь во вторую очередь подлежат реализации среднетратные меры по вовлечению в оборот вторичных энергоресурсов. Прежде всего здесь речь идет об утилизации тепла выбросного вентиляционного воздуха.

Наиболее затратным представляются меры по вовлечению в энергетический баланс возобновляемых источников энергии, поэтому их применение не является первоочередным. Строго говоря, использование возобновляемых источников не является энергосберегающей мерой, так как они представляют собой самостоятельный, пока что, «нетрадиционный» вид энергоресурсов.

Немаловажную роль в реализации энергосбережения принадлежит научно-методологическому обоснованию разработки, проектирования и эксплуатации соответствующих технических средств. Методология эффективного использования энергии для целей обеспечения микроклимата должна исходить из принципа комплексного рассмотрения всех факторов, определяющих энергопотребление и связанных между собой.

Комплексность рассмотрения достигается применением системного подхода, который применительно к энергопотреблению на обеспечение микроклимата означает анализ всей последовательности передачи и трансформации энергии от генератора до регулируемого параметра, что представляется сложной задачей по существу и объему реализации. Формой системного подхода служит представление здания в виде единого энергетического организма, в котором микроклимат обеспечивается пассивными средствами теплозащиты и конструктивно-планировочной среды и активными воздействиями инженерных систем. Учитывая связь между конструктивными элементами здания и энергопотребляющими системами, можно говорить о комплексе, формирующем микроклимат, как о единой **системе обеспечения микроклимата (СОМ)** в здании.

Другой методологический принцип исследования способов и средств снижения энергопотребления СОМ состоит в рассмотрении процессов формирования микроклимата изменяющимися во времени суток и года. Такое рассмотрение представляется необходимым, так как энергопотребление системой имеет место в эксплуатационном режиме и объективные данные о свойствах системы могут быть получены в результате анализа полного цикла работы системы, то есть за год. Рассмотрение суточного и годового хода параметров, определяющих состояние элементов и расхода энергии в них, то есть режима работы системы, позволяет разработать алгоритм ее функционирования. Кроме того такое рассмотрение необходимо для определения годовых расходов энергии, составляющих основную часть эксплуатационных затрат СО, СВ и СКВ.

Именно *суммарный годовой расход энергии системами*, составляющими активную часть СОМ, в процессе формирования микроклимата является наиболее объективным энергетическим показателем, так как именно в годовом цикле в полной мере проявляются все режимы потребления энергии элементами систем. Величина годового расхода энергии, используемая в обосновании того или иного энергосберегающего решения, должна быть обоснованно-необходимой. Для определения такой величины используется понятие *требуемой тепловой мощности системы*, под которой понимается часть суммы тепловых потоков, вносимых в помещение, которую необходимо нейтрализовать активными средствами формирования микроклимата для обеспечения заданных температурных условий в помещении. В этом смысле требуемая мощность определяет обоснованно-необходимое энергопотребление.

Приведенное определение подразумевает, что для обеспечения заданных температурных условий в помещении системы отопления-охлаждения не должны нейтрализовать всю сумму тепловых избытков или потерь, сложившихся в помещении в данный момент времени. Такое утверждение исходит из того, что при сменном режиме функционирования помещения часть тепловых возмущений нейтрализуется пассивными элементами СОМ за счет поглощения в рабочее время и выделения в нерабочее время или наоборот.

Изложенные выше методические подходы определяют задачу энергосбережения системой обеспечения микроклимата, которая состоит в выборе и обосновании мер, направленных на формирование требуемой тепловой мощности СО, СВ, СКВ, соответствующих минимальному суммарному годовому расходу энергии системами. Энергосбережение в этом случае достигается прямым путем – сни-

жением тепловой нагрузки на системы отопления-охлаждения и косвенно – за счет сокращения энергопотребления на обработку воздуха в СВ и СКВ.

Тепловая нагрузка (ТН) складывается из тепловых потоков, проходящих через наружные ограждения и поступающих от внутренних источников. Увеличение роли внутренних тепловых возмущений, связанное с возрастанием энерговооруженности современных зданий, снижает значимость тепловых потоков, проходящих через наружные ограждения, что вносит определенные коррективы в традиционное представление о теплозащите здания и роли наружных ограждений в формировании микроклимата и расходовании энергоресурсов. Следует иметь в виду, что характер внутренних тепловых воздействий на микроклимат связан с режимом функционирования помещения и видом обслуживаемых помещений систем. Таким образом, получение достоверных представлений о влиянии конструкции здания и его ограждений на энергопотребление возможно только на основе комплексного рассмотрения всех элементов СОМ с учетом существующих в структуре системы связей. Связующим элементом энергетической системы в данном случае является тепловой режим помещения, рассмотрение которого преследует цель определения требуемой тепловой мощности.

Обоснованный выбор конструктивных параметров здания представляется одной из важных энергосберегающих мер, участвующих в формировании тепловой нагрузки. Среди архитектурно-планировочных решений здания можно выделить группу, составляющую предмет отдельного рассмотрения. К ней относятся решения, рассматривающие совмещение функций ограждений, отопления-охлаждения. Совмещение функций систем и ограждений как двух частей СОМ позволяет активизировать пассивную часть СОМ, снять с активной системы часть тепловой нагрузки и, таким образом, понизить энергопотребление. Среди подобных решений можно выделить использование вентилируемых окон и междуэтажных перекрытий.

Использование аккумуляции тепла (холода) ограждениями создает условия для формирования пониженной тепловой нагрузки. Это относится к использованию «ночного охлаждения» помещений, снижению температуры воздуха в помещении в ночное время в холодный период, сопровождающиеся снижением тепловой нагрузки на системы отопления-охлаждения и вентиляции.

Вторая группа мер направлена на осуществление энергосберегающих режимов работы. К числу таких относится периодический

режима включения СО и СВ в течение рабочей части суток, что приводит к сокращению времени работы системы за сутки и сокращению энергопотребления. Возможность таких режимов работы обусловлена допустимыми колебаниями параметров микроклимата а их обоснование исходит из рассмотрения процессов формирования микроклимата.

Одним из средств экономии энергии является утилизация отбросной энергии. В широком смысле под утилизацией можно понимать все формы использования потерь энергии как в технологическом процессе, так и в самих СО, СВ и СКВ. В связи с этим можно говорить об активной форме утилизации с помощью специальных систем и пассивной утилизации, которая достигается конструктивно-планировочными мерами и режимом работы систем отопления-охлаждения. В том и другом случае утилизацию отбросной энергии следует рассматривать в качестве энергосберегающей меры.

Использование возобновляемых источников требует обоснования, которое состоит в рассмотрении изменения во времени мощности и потенциала источника и требуемой мощности и потенциала потребителя энергии с целью их увязки. Такое рассмотрение представляется одной из задач анализа режима работы СОМ.

Приведенная краткая характеристика энергосберегающих мер относится к той части, которая рассматривается в настоящей работе. Их объединяет общность методологии обоснования, которая включает два направления: анализ теплового режима помещения и закономерностей потребления энергии СОМ во времени.

# Глава 1. Нестационарная теплопередача через ограждение

## 1.1. Решение уравнения нестационарной теплопроводности при гармонических тепловых воздействиях на ограждение

В силу изменения во времени граничных условий реальные процессы передачи тепла через ограждения носят нестационарный характер. Решение задачи расчета нестационарной теплопередачи сводится к интегрированию уравнения теплопроводности [3] Дифференциальных уравнений теплопроводности в частных производных параболического типа имеет вид

$$c \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda z \frac{\partial t}{\partial z} \right). \quad (1.1)$$

Решение системы преследует цель расчета температуры в заданных точках трехмерной области ограждения в заданный момент времени. Рассмотрим возможные решения системы применительно к одномерной теплопроводности

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{a} \frac{d^2 t}{dx^2} \quad (1.2)$$

В уравнениях (1.1) и (1.2) принято:

$t$  – температура, °С;

$\tau$  – время, с;

$a$  – коэффициент температуропроводности

$$a = \lambda / c\rho$$

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стены, Вт/м °С;

$c$  – удельная теплоемкость материала, кДж/кг°С;

$\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

В настоящее время известно большое число решений применительно к рассматриваемой задаче. Наибольшее распространение получили численные методы решений [4]. В ряде случаев используется аналитические методы, основанные на интегральных преобразованиях [5], вариационном и операционном принципах [6], а также на базе электротепловой [7] и гидравлической аналогии.

Среди известных методов решения выделим группу, основанную на одинаковых исходных посылах, которые состоят в представлении граничных условий в виде гармонических или периодически изменяющихся. В такой постановке по истечении определенного

времени в конструкции ограждения устанавливается периодическое тепловое состояние, не зависящее от начального режима помещения (квазистационарное состояние). Методы расчета теплового режима, основанные на рассмотрении распространения температурных волн в конструкциях ограждений, получили достаточно широкое распространение. Это объясняется относительной простотой аналитического решения. Правомочность использования решения для расчета теплового режима ограждения связана с тем, что реальные тепловые воздействия на него в основном носят периодический характер.

Подобные решения упоминаются в зарубежной литературе, причем авторы ссылаются на работу Г. Гребера [8], как одну из первых в этом направлении. В нашей стране решение уравнения теплопроводности при гармонических граничных условиях положено в основу теории теплоустойчивости, развитие которой представлено в работах О.Е. Власова [9], Г.А. Селиверстова [10], С.М. Муромова [11]. Основу теории теплоустойчивости составляет решение уравнения одномерной нестационарной теплопроводности в гиперболических функциях комплексной переменной

$$i_x = e^{\omega \tau i} (A \operatorname{ch} R_x S \sqrt{i} + B \operatorname{sh} R_x S \sqrt{i}), \quad (1.3)$$

где А и В произвольные постоянные;

$$R_x = \frac{x}{\lambda} \text{ – переменная координата, м}^2 \text{ }^\circ\text{C/Вт};$$

S – коэффициент теплоусвоения материала, Вт /м<sup>2</sup> °С;

$$S = \sqrt{\omega \lambda c p}, \quad (1.4)$$

$\omega$  – частота колебания, 1/ч

$$\omega = 2\pi / T, \quad (1.5)$$

T – период колебания, ч.

Для расчетов колебания температуры в толще ограждения пользуются коэффициентом сквозного затухания  $v$ . Его величина показывает во сколько раз уменьшается амплитуда колебания в сечениях ограждения по отношению к амплитуде на его поверхности ( $x=0$ , см. рис. 1.1)

$$v_x = e^{RS\sqrt{i}} \frac{S\sqrt{i+y_0}}{S\sqrt{i+y_x}}, \quad (1.6)$$

где  $Y_x$  – коэффициент теплоусвоения в заданной плоскости ограждения, Вт /м<sup>2</sup> °С



1/8 части периода колебания  $T$ . Физически такая предпосылка означает, что поверхность ограждения является массивной.

Уравнение (1.3) представим в виде

$$\dot{\theta} = q \cdot \dot{R}_y \quad (1.9)$$

где  $q$  – плотность периодического теплового потока, проходящего через сечение, в котором рассчитывается температура, Вт/м<sup>2</sup> ч;

$\dot{R}_y$  – сопротивление теплоусвоению величина, обратная величине теплоусвоения  $\dot{Y}$ .

Можно показать, что в пределе, для условий стационарной теплопередачи,  $\dot{R}_y$  приобретает значение сопротивления теплопроводности ограждения. Показатель сопротивления теплоусвоению  $\dot{R}_y$ , как и  $\dot{Y}$ , является комплексным числом и приводится к виду  $a+bi$ , позволяющему определить модуль

$$R_y = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1.10)$$

и аргумент

$$\varepsilon_R = \arctg \frac{b}{a}. \quad (1.11)$$

Для гармонически изменяющейся во времени плотности теплового потока с амплитудой  $A_q$  уравнение (1.9) в тригонометрической форме имеет вид

$$\Delta t = t - t_0 = \frac{A_q}{S\sqrt{2}} \cdot R_y \cos\left(\frac{2\pi}{T} \tau + \varepsilon_R\right), \quad (1.12)$$

который преобразуется с учетом (1.10) и (1.11) к форме

$$\Delta t = \frac{A_q}{S\sqrt{2}} \left( a \cos \frac{2\pi}{T} \tau - b \sin \frac{2\pi}{T} \tau \right). \quad (1.13)$$

где  $t_0$  – средняя за период колебания температура, °С.

Запись вида (1.13) представляется удобной для анализа температурных колебаний в помещении с учетом конкретных инерционных свойств ограждений. При этом процедура определения осредненной температуры поверхности в помещении сводится к сложению синусоидальных величин.

Решение вида (1.13) позволило уточнить представление о тепловом режиме ограждения при прерывистых тепловых воздействиях.

Изменение температуры поверхности при прерывистом тепловом потоке, проходящем через нее характеризуется коэффициентом прерывистости  $\Omega$ . Коэффициенты прерывистости удобно использовать в инженерных методах, так как любое по форме изменение во времени тепловых воздействий на помещение может быть представлено в виде композиции отдельных единичных (например, за один час) прерывистых воздействий.

## 1.2. Решение при прерывистых тепловых воздействиях на ограждение

Понятие коэффициента прерывистости  $\Omega$  было сформулировано Г.А. Селиверстовым [10]. А.М. Шкловером были получены численные значения таких коэффициентов [12]. При вычислении численных значений предполагалось, что все поверхностные слои ограждений, обращенные в помещение, являются массивными и для них  $\dot{Y} = S\sqrt{i}$ . Вместе с тем, расчеты коэффициентов прерывистости с учетом фактических инерционных свойств ограждений показали, что они отличаются от полученных А.М. Шкловером как по величине, так и по форме изменения во времени. По существу значения коэффициентов прерывистости по [12] являются предельными и справедливы для массивных ограждений с  $D = \sum RS > 3$ .

Техника вычисления коэффициентов прерывистости состоит в разложении прерывистой функции в ряд Фурье. Уравнение (1.13), справедливое для каждой гармоники ряда, позволяет определить отклонение температуры на поверхности при прерывистом тепловом воздействии в виде ряда

$$\Delta t = \frac{q}{S\sqrt{2}} \cdot \sum_{k=1}^N A_k \left( a_k \cos \frac{2\pi}{T} k \tau - b_k \sin \frac{2\pi}{T} k \tau \right), \quad (1.14)$$

где  $N$  – число членов ряда, достаточное для достижения требуемой точности вычисления.

Тепловые потоки, формирующих тепловой режим помещения, имеют две характерные периодические функции времени с суточным периодом:

- прямоугольную

$$q(\tau) = q \text{ при } \frac{\Delta\tau}{2} - < \tau < \frac{\Delta\tau}{2}$$

$$\text{и } q(\tau) = 0 \text{ при } \frac{T}{2} - < \tau < -\frac{\Delta\tau}{2} ; \frac{\Delta\tau}{2} < \tau < \frac{T}{2} ;$$

а среднегодовая смесь по формуле (9)

$$t_{m,r} = 18 (1 - 6\,000 / 12\,000) + 5,6 - 6\,000 / 12\,000 = 11,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Продолжительность периода потребления теплоты по формуле(8) при использовании рециркуляции равна

$$\Delta\tau_{T1} = 182,5 [(13 - 4,7)/(11,8 - 4,7)]^{0,5} = 197 \text{ сут.}$$

При  $\Delta\tau_{T1} = 197$  сут. по табл. 2 получаем  $K_3 = 1,03$ ,  $K_4 = 0,63$ .

Годовой расход теплоты по формуле (7):

$$Q = 12\,000 (13 - 4,7)5,72 \cdot 197 \cdot 1,03 \cdot 0,63 = 72,8 \text{ ГДж/г.}$$

Число часов работы воздухонагревателей в год по формуле (10):

$$M_r = 5,72 \cdot 197 \cdot 1,03 = 1\,160 \text{ ч/г.}$$

Годовой расход теплоты системой за две смены, соответственно, составит:

- для прямоточной системы  $221,35 \cdot 2 = 442,7$  ГДж/г;
- для системы с рециркуляцией  $- 72,8 \cdot 2 = 145,6$  ГДж/г.

Число часов работы системы при эксплуатации в две смены:

- для прямоточной системы  $M_r = 1\,364 \cdot 2 = 2\,728$  ч/г;
- для системы с рециркуляцией  $M_r = 1\,160 \cdot 2 = 2\,320$  ч/г.

---

## КУВШИНОВ Юрий Яковлевич

**Энергосбережение в системе обеспечения микроклимата зданий.** – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 320 с.

Компьютерная верстка: *В.П. Бурмакин*

Редактор: *В.П. Бурмакин*

Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.

Подписано к печати 02.10.2010. Формат 60х90/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. 20,0 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)

129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511

Тел./факс: (499) 183-56-83. E-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru); <http://www.iasv.ru>