**ОГЛАВЛЕНИЕ**

1 Курс лекций................................................................................................................................... 5

1.1 Характеристика системы централизованной системы ТС как объекта

управления........................................................................................................................... 5

1.2 Задачи, решаемые АСУ ТП теплоснабжения: задачи автоматизации .................... 8

1.3 Регулируемые параметры в отапливаемом помещении............................................ 9

1.4 Микроклимат в жилых и производственных помещениях ...................................... 11

1.5 Параметры регулирования горячего водоснабжения ............................................... 13

1.6 Регулируемые параметры для систем теплоснабжения ........................................... 16

1.7 Внешние и внутренние возмущающие воздействия................................................. 18

1.8 Влияние горячего водоснабжения на режим работы систем

теплоснабжения .................................................................................................................. 23

1.9 Классификация управляющих воздействий .............................................................. 25

1.10 Уравнение нестационарного теплообмена объектов систем

теплоснабжения ................................................................................................................. 26

1.11 Динамические характеристики здания..................................................................... 31

1.12 Динамические характеристики систем отопления.................................................. 33

1.13 Термодинамические характеристики теплообменных аппаратов

и котельных установок....................................................................................................... 38

1.14 Динамические характеристики систем кондиционирования воздуха

и вентиляции ....................................................................................................................... 42

1.15 Статические характеристики насосов, вентиляторов, регулирующих

органов................................................................................................................................. 47

1.16 Способы организации регулирования расхода теплоты ........................................ 53

1.17 Автоматизация теплоподготовительных установок ТЭЦ и котельных…….…... 63

1.18 Автоматизация насосных подстанций...................................................................... 68

1.19 Автоматизация узлов горячего водоснабжения ..................................................... 70

1.20 Автоматизация водяных систем отопления............................................................. 72

1.21 Схемы автоматического регулирования отпуска теплоты на отопление ……….75

1.22 Автоматизация приточных камер ................................................................ 78

1.23 Автоматизация систем кондиционирования воздуха ................................ 85

1.24 Защита воздухонагревателей от замерзания............................................... 87

1.25 Состав и содержание проекта....................................................................... 89

1.26 Функциональная схема автоматического контроля систем

теплоснабжения ..................................................................................................... 91

2 Практические задания...................................................................................................... 98

2.1 Примерный перечень тем практических занятий по дисциплине

«Автоматизация систем теплоснабжения» ......................................................... 98

2.2 Примерный перечень тем лабораторных работ по дисциплине

«Автоматизация систем теплоснабжения» ......................................................... 98

**1 КУРС ЛЕКЦИЙ**

**1.1 Характеристика системы централизованной системы ТС как объекта управления**

Система централизованного теплоснабжения (СЦТ), как известно представляет

собой комплекс различных сооружений, установок и устройств, технологически связаных между собой в общем процессе производства, транспорта, распределения

и потребления энергии.

СЦТ включает источники теплоты (ТЭЦ, АТЭЦ, котельные, ACT)

магистральные и распределительные тепловые сети, узлы управления транспортом и

распределением теплоты (насосные перекачивающие подстанции, контрольнораспределительные тепловые пункты), узлы присоединения теплопотребляющих абонентских установок к тепловой сети (центральные и индивидуальные тепловые пункты), теплопотребляющие установки и системы (системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, горячего водоснабжения, теплопотребляющие установки промышленных предприятий) [3].

Режим работы СЦТ диктуется условиями функционирования объектов

теплопотребления: переменными потерями теплоты в окружающую среду через

ограждающие конструкции зданий и сооружений, режимами потребления горячей воды населением, условиями работы технологического оборудования и др.

Анализ системы централизованного теплоснабжения как объекта управления

показывает, что она обладает основными свойствами, присущими большим системам

энергетики.

Необходимо отметить сложность и иерархический характер ее структуры,

влияние многочисленных случайных факторов на режим работы.

Система состоит из большого числа взаимосвязанных последовательно и параллельно включенных элементов, обладающих различными теплогидравлическими свойствами: участки трубопроводов тепловой сети и систем отопления, теплоемкие и нетеплоемкие наружные ограждения зданий, теплообменные аппараты в тепловых пунктах, нагревательные приборы в отапливаемых помещениях и др.

Следует указать на значительное разнообразие конструкций этих элементов и

широкий диапазон режимов их работы.

Динамические свойства системы теплоснабжения характеризуются большими

временными (емкостными и транспортными) запаздываниями по каналам как передачи возмущений, так и управляющих воздействий. Инерционные свойства отдельных параллельно расположенных звеньев существенно разнятся. Так, при прохождении

температурной волны через теплоемкие ограждения (стены) наблюдается ее значительное затухание, и сдвиг фазы. Оконные же ограждения являются практически безынерционными, и тепловые потери через них меняются синхронно с изменением внешних воздействий.

В связи с этим при управлении системой теплоснабжения приходится учитывать

не только состояние внешней среды в данный момент времени, но и метеорологические условия за предыдущий период, а также их возможные изменения в будущем (прогнозирование размера теплопотребления).

Следует также указать, что процесс управления режимами работы СЦТ

характеризуется вмешательством человека на различных уровнях иерархии ее структуры: от главного диспетчера энергосистемы до непосредственного потребителя теплоты в отапливаемых помещениях.

Помимо внутренних взаимосвязей между элементами СЦТ, нельзя не учитывать

ее внешние функциональные связи с другими системами инженерного обеспечения

городов и промышленных комплексов (рисунок 1.1.1).

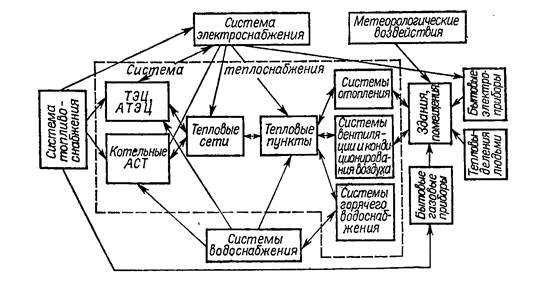


Рисунок 1.1.1 – Схема функциональных связей системы теплоснабжения с другими

системами инженерного обеспечения городов

Характерным для рассматриваемых систем является то, что указанные внешние

связи проявляются на всех этапах процесса производство – потребление тепловой энергии.

Так, режим работы теплового источника не может рассматриваться изолированно от условий функционирования системы топливоснабжения.

Управление отпуском теплоты от теплоэлектроцентралей должно учитывать режим

электроэнергетической системы (установлена целесообразность использования ТЭЦ в маневренном режиме.)

Работа бытовых газовых и электрических приборов влияет на температурный

режим отапливаемых помещений и, следовательно, на работу абонентских систем отопления. Тесно взаимоувязаны режимы работы систем горячего и холодного

водоснабжения.

Важной особенностью системы централизованного теплоснабжения как объекта

управления является ее стохастичность. Изменение внешних и внутренних возмущающих воздействий в СЦТ носит случайный характер.

Статические и динамические характеристики элементов систем теплоснабжения

не остаются в процессе эксплуатации постоянными, а закон их изменения является

стохастическим. Для иллюстрации в таблице 1.1.1 приведены данные о факторах, вызывающих изменения гидравлических и теплотехнических характеристик некоторых элементов СЦТ.

Необходимо также иметь в виду, что в отличие от других трубопроводных систем (водоснабжения, газо- и нефтеснабжения) режим функционирования тепловых сетей характеризуется двумя различными по своей сущности параметрами: количество отпускаемой тепловой энергии определяется температурой теплоносителя и перепадом давлений, а, следовательно, расходом воды в тепловой сети.

Таблица 1.1.1. Данные об эксплуатационных изменениях тепловых и гидравлических характеристик некоторых элементов систем централизованного

теплоснабжения

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Элементы | Характеристика процесса | Факторы, обусловливающие  изменение характеристик |
| Наружные ограждения зданий | Тепловые потери в  окружающую среду | Эксплуатационные изме-нения теплопроводности и воздухопроницаемости мате-риала конструкций.  Уплотнение или разгерметизация оконных проемов.  Загрязнение поверхностей остекления. |
| Отапливаемое помещение, здание | Аккумулирование тепла  (инерционность) | Изменение количества и составаоборудования и предметов, находящихся в помещении (здании) |
| Участок трубопровода тепловой сети | Гидравлическое сопротивление  Тепловые потери в  окружающую среду  Транспортное запаздывание | Коррозионные отложения  Повреждения и увлажнения  теплоизоляции, изменение влажности грунта  Изменение расхода теплоносителя по участку |
| Поверхностный теплообменник | Гидравлическое сопротивление  Интенсивность теплообмена | Коррозионные отложения, накипь  Коррозионные отложения,  образование накипи, изменение расхода теплоносителя |

**1.2 Задачи, решаемые АСУ ТП теплоснабжения: задачи автоматизации**

Многообразие условий теплоснабжения обусловливает неоднозначность

принципиальных решений, используемых при выборе методов, уровней и технических средств автоматизации. Их выбор зависит от назначения отапливаемых зданий и сооружений, характера теплоснабжающей системы, природноклиматических, социальных и других факторов.

Вместе с тем анализ отечественного и зарубежного опыта позволяет составить

представление о путях научно-технического прогресса в рассматриваемой области и

сформулировать требования, предъявленные к современным автоматизированным системам теплоснабжения [3].

Режимы отпуска тепловой энергии в этих системах должны быть маневренными

и гибкими, учитывать многообразие возмущающих воздействий на функционирование системы и специфические условия температурного режима отдельных потребителей, рационально использовать динамические свойства составляющих ее звеньев, основываться на рациональном сочетании нескольких ступеней управления (на источнике, в тепловых сетях и в абонентских установках, см. таблицу 1.2.1), обеспечивать возможность программного изменения температуры воздуха с зданиях, предусматривать параллельную работу нескольких источников на общие тепловые сети и участие теплоэлектроцентралей в прохождении пиков (провалов) электрической нагрузки .

При этом затраты на производство и распределение тепловой энергии, с учетом

взаимосвязей между источниками теплоты и электроэнергетической системой, а также между различными системами инженерного обеспечения населенных мест, промышленных узлов, отдельных зданий, должны быть минимальными.

Таблица 1.2.1. Ступени автоматического управления в системах централизованного теплоснабжения

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ступени | Ступени  управления | Место осуществления  управления | Объект управления |
| I | Центральное | Котельная, ТЭЦ | Система теплоснабжения, магистральные тепловые сети |
| II | Районное | Контрольнораспределительный  пункт (КРП) | Район теплоснабжения, распределительные  тепловые сети микрорайона |
| III | Групповое | Центральный тепловой пункт (ЦТП) | Теплоснабжение группы зданий, внутриквартальные тепловые сети |
| IV | Местное | Индивидуальный тепловой пункт (ИТП) | Система теплоснабжения одного здания или блоксекции здания |
| V | Позонное  (пофасадное) | Индивидуальный тепловой пункт (ИТП) | Отдельные ветви систем отопления и вентиляции,  отдельные зоны здания |
| VI | Индивидуальное | Нагревательный прибор  в отапливаемом помещении | Отдельное отапливаемое  помещение |

**1.3 Регулируемые параметры в отапливаемом помещении**

Климат внутренней среды, определяемый сочетаниями температуры, влажности

и скорости движения воздуха, а также окружающих поверхностей, принято называть

микроклиматом помещений, а поддержание определенных, наперед заданных метеоро-

логических условий в закрытых помещениях – основной задачей отопительно-вентиляционных систем [3].

Температурные условия и показатели воздушной среды (регулируемые

метеопараметры) закрытых помещений определяются функциональным назначением

помещений, временем года и суток, внешней метеорологической обстановкой,

возможностями отопительно-вентиляционных и теплоснабжающих систем. В

зависимости от перечисленных условий метеопараметры можно классифицировать

как оптимальные, допустимые и необходимые.

Оптимальными метеопараметрами помещений принято считать условия

окружающей среды, обеспечивающие наилучшее самочувствие и работоспособность

человека, наибольшую продуктивность животноводческих комплексов, наиболее

качественное протекание технологических процессов в производственных зданиях,

максимальную урожайность в культивационных сооружениях, сохранность конструкций зданий, сооружений, материалов, оборудования, готовой продукции и др.

Допустимыми метеопараметрами считаются условия, при которых возникают

незначительная напряженность системы терморегуляции организма человека,

несущественные изменения продуктивности или урожайности в сельском хозяйстве,

в количестве и качестве продукции в системе производства и хранения.

Необходимые метеопараметры определяются задачами функционирования,

состоянием отопительно-вентиляционных и теплоснабжающих систем, ограждающих конструкций и могут назначаться исходя из условий экономии топливно-энергетических ресурсов, предотвращения (в аварийных ситуациях или в неосновной период функционирования.) замерзания теплоносителя в системах, снижения ущерба, гибели животных, разрушения конструкций зданий и др.

Установление и выбор в отапливаемых помещениях оптимальных, допустимых

или необходимых метеопараметров зависят от многих факторов. Естественно, что

оптимальные значения обеспечивают наилучшие условия в помещениях. Однако

требования минимизации общих затрат, расходов тепловой и электрической энергии

определяют необходимость поддержания во многих случаях допустимых, а в экстремальных условиях – необходимых метеопараметров.

Следует отметить, что оптимальные и допустимые значения параметров не являются для многих типов зданий- постоянными в течение суток. Так, в периоды сна

или отсутствия людей в помещениях целесообразно устанавливать пониженные

значения температур (программное снижение на определенное время).

Особую область задач управления микроклиматом помещений составляют

аварийные режимы, связанные с отоплением зданий при дефиците топлива, нарушениях подачи теплоносителя и др. Здесь метеопараметры или их сочетания могут изменяться в значительных пределах.

Рассматривая вопросы управления микроклиматом, из комплекса метеопараметров следует выделить наиболее важные, поддающиеся прямому или косвенному регулированию: температура и скорость движения воздуха в помещении, его относительная влажность, температура окружающих поверхностей. Основными регулируемыми параметрами для систем отопления являются: температура внешнего воздуха в помещении и средняя температура поверхностей, обращенных в.помещение.

Подвижность и влажность воздуха как регулируемые параметры чаще

рассматриваются в системах вентиляции и кондиционирования воздуха.

Температура воздуха в помещении подразделяется на локальную, среднюю по

всему помещению, средне взвешенную для здания в целом или его части. Чаще всего

температура воздуха в помещении контролируется (обеспечивается) в части объема

помещения, называемой рабочей или обслуживаемой зоной. Например, для жилых

помещений эта зона определяется пространством высотой до 2 м (до 1,5 м для сидячих людей) над уровнем пола.

Характер изменения температуры воздуха по высоте помещения при различных видах отопления представлен на рисунке 1.3.1.

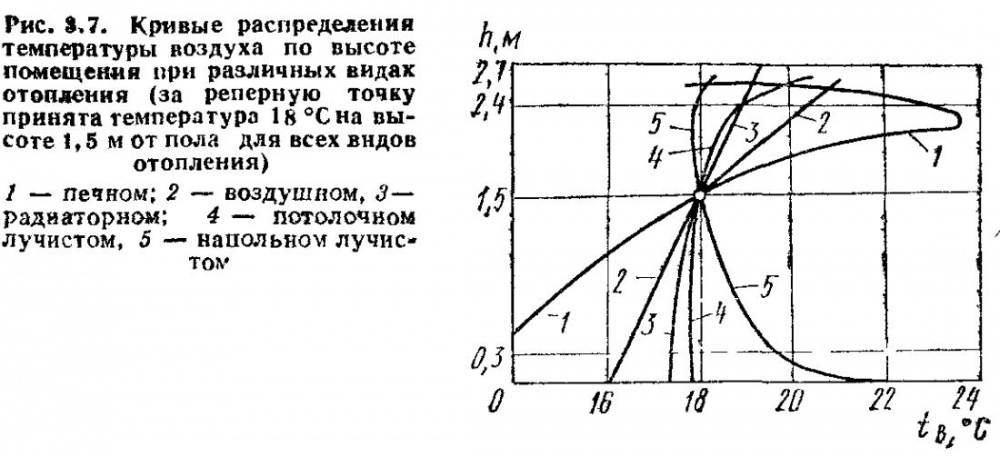


Рисунок 1.3.1 – Изменение температуры воздуха по высоте помещения при

отоплении:

1 — воздушном; 2, 3, 4 — водяном с нагревательными приборами соответственно подоконными (радиатор), потолочными, напольными (панели)

Изменение температуры воздуха по высоте и ширине помещений характеризует

равномерность нагрева, от которой зависит тепловой комфорт и теплопотери помещения.

При определении средней температуры в помещениях, выборе числа и места

размещения термометров следует учитывать характер указанных неравномерностей.

В связи с тем, что помещения в здании, в соответствии с назначением и за счет некоторой разрегулировки системы отопления, могут иметь различную температуру, используется понятие средневзвешенной (усредненной) температуры внутреннего воздуха здания в целом или его части:

\_

𝑡в =

где tвj – средняя температура воздуха в j-м помещении; Vj – объем j-го

помещения.

Более полная характеристика микроклимата помещении возможна с помощью

комплексного метеопараметра, зависящего от относительной влажности, скорости

движения воздуха, средневзвешенной температуры поверхностей и называемого

результирующей температурой tnр.

Для определения tnP используются различные расчетные выражения и графики.

Такой подход важен в связи с тем, что в последнее время наблюдается определенная тенденция по созданию переменных метеопараметров помещений, обусловленная следующими причинами: снижением температуры внутреннего воздуха в ночное время для жилых помещений и в нерабочее – для административных зданий, что сокращает расход топлива на отопление; периодическими изменяющимися температурными воздействиями, соответствующими естественным условиям человеческого организма, что тренирует и укрепляет его, делает более устойчивым к различного рода заболеваниям и улучшает самочувствие; более точными переменными параметрами микроклимата, что приводит к повышению урожайности в культивационных сооружениях, продуктивности животных, удовлетворяет требованиям некоторых технологических процессов и условиям снижения расхода теплоты; переменными нормативами (более широкий возможный диапазон изменений), что позволяет упростить регулирование.

В настоящее время практически нет нормируемых переменных величин микроклимата. В связи с этим их значения чаще всего характеризуются отклонением

от постоянных (нормируемых) параметров (Δtв), например, снижение температуры в

ночное время на 2 °С (Δtв = 2 °С).

Значение отдельных метеорологических параметров, создающих оптимальные и

допустимые условия воздушной среды в различных по назначению закрытых помещениях, даются в СН245–71, СНиП П-ЗЗ–75, ГОСТ 12.1.005–76, а также в

специальной литературе.

Таким образом, в отапливаемых помещениях состав регулируемых параметров,

точность их соблюдения во многом зависят от целей и задач регулирования, назначения помещений. Поэтому в дальнейшем необходимо рассмотреть более подробно некоторые особенности регулируемых параметров в различного рода зданиях.

**1.4 Микроклимат в жилых и производственных помещениях**

Оптимальные метеопараметры в жилых помещениях характеризуются такими

условиями теплового режима, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают сохранение нормального функционального и теплового состояния организма без напряжения реакций терморегуляции. В этом случае появляется ощущение теплового комфорта, создаются предпосылки для высокого уровня работоспособности, которые определяются двумя условиями [3].

Первое условие комфортности заключается в том, что человек, находящийся в

середине обслуживаемой зоны и отдающий тепло, не должен испытывать ни перегрева, ни переохлаждения. Комфортность зависит от характера деятельности, одежды человека, времени года, радиационной обстановки и температуры воздуха в помещении. На рисунке 1.4.1, по данным работы 1/J, представлены графики для определения комфортных условии в зависимости от наиболее важных из перечисленных факторов при длительном пребывании людей в помещении.

Второе условие температурной комфортности определяет допустимые температуры нагретых и охлажденных поверхностей при нахождении человека на

границах обслуживаемой зоны (рисунок 1.4.2).



Рисунок 1.4.1 – Первое условие комфортности для зимы

Т — при тяжелой работе; У — умеренной; Л—легкой (заштрихованная область соответствует допустимым отклонениям при умеренной работе)

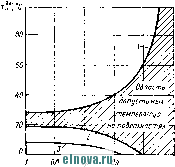


Рисунок 1.4.2 – Второе условие комфортности: зависимость допустимых значений

температуры нагретых (1), охлажденных (2) поверхностей и поверхностей окон (3)

от коэффициента облучения

**Особенности микроклимата общественных и производственных зданий**

Состояние воздушной среды в общественных и производственных зданиях

должно удовлетворять как санитарно-гигиеническим, так и технологическим требованиям. Микроклимат производственных помещений определяется с учетом

обеспечения качественного протекания технологического процесса, а также сохранности оборудования и готовых изделий. Руководящие материалы по нормированию микроклимата определяют необходимые сочетания температуры, влажности и скорости движения воздуха, экстремальные скорости vx, перепады температур в местах поступления приточных струй в рабочую или обслуживаемую зону помещения. По сравнению с жилыми помещениями здесь необходимо учитывать большее число факторов и специфических особенностей деятельности человека, а также производства.

В случае нормировании температуры воздуха из условия технологического

процесса, сохранности оборудования или изделии нередко устанавливаются значительные ограничения на отклонения температуры воздуха (до ±0,01 °С). Для прецезионных процессов в ряде случаев создаются гармонические колебания температуры воздуха определенной амплитуды и частоты.

Оптимальными для животноводческих помещений называются метеорологические условия окружающей среды, при которых возможно получение наибольшей продуктивности от находящихся в них животных. Основным условием для этого является отсутствие напряженности в системе терморегуляции организма.

Для животных различных типов и возраста установлены целесообразные пределы

изменения температурно-влажностных условий воздушной среды и ограждающих

конструкций.

Развитие растений обеспечивается совокупностью почвенных и атмосферных

условий в соответствии с законом минимакса: если хотя бы один из факторов, обеспечивающих рост и развитие растений, будет в недостатке или избытке, то

жизнедеятельность растений и урожай будут находиться от этого фактора в прямой

зависимости.

Микроклимат культивационных сооружений является одним из определяющих

развитие факторов. Основная климатическая особенность культивационных сооружений – существенная зависимость от наружных метеорологических условий (интенсивности солнечной радиации, ветра, наружной температуры).

Анализ особенностей микроклимата рассматриваемых сооружений и требований

к нему показывает, что культивационные сооружения нуждаются в надежных средствах управления микроклиматом, обеспечивающих: постоянный обогрев в зимний период и периодический обогрев в весенне-летний; поддержание требуемой влажности; тепловую защиту пристенной зоны; уменьшение или ликвидацию перегрева в весенне-летний период.

Рекомендуемые значения температур воздуха зависят от вида и сорта культур, стадии развития, времени года и приводятся в специальной литературе.

**1.5 Параметры регулирования горячего водоснабжения**

Удовлетворение гигиенических и бытовых нужд населения в горячей воде,

обеспечение промышленности и сельского хозяйства водой определенной температуры является одной из задач систем теплоснабжения. Средняя тепловая нагрузка горячего водоснабжения в городах достигает 10-40 % от расчетной нагрузки отопления, и поэтому она оказывает существенное влияние на тепловые и гидравлические режимы тепловых сетей. Особенностями рассматриваемого типа теплоиспользования являются: слабая зависимость расходов теплоты от климатических условий, круглогодовой характер и значительная неравномерность водопотребления [3].

Контролируемыми и регулируемыми параметрами в системах горячего водоснабжения являются: качество, температура горячей воды, напор в точках водоразбора. Регулируемыми являются также запасы горячей воды в бакахаккумуляторах, расходы воды у некоторого типа потребителей, допускающих варьирование временем водоразбора.

Необходимая температура воды определяется характером ее использования. Так,

для умывания она составляет 25-30 °С, для принятия ванн и душа – (37- 40) °С, для

мытья посуды – (55 – 70) °С. В технологических процессах диапазон температуры весьма

широк – (20 – 95) °С.

С другой стороны, в системах теплоснабжения температура воды обусловливается санитарно-гигиеническими требованиями. За нижний предел принимается так называемая «температура пастеризации», при которой погибает большинство болезнетворных бактерий, за верхний предел – такая температура, при которой невозможно получение ожогов потребителями. В точках водозабора СНиП П-34-76 регламентирует следующие температуры: для систем централизованного горячего водоснабжения, присоединенных к

закрытым системам теплоснабжения, – не ниже 50 и не выше 75 °С; для систем централизованного горячего водоснабжения, присоединенных к открытым системам теплоснабжения, а также для систем местного (децентрализованного) горячего водоснабжения – не ниже 60 и не выше 75 °С.

Поскольку для гигиенических процедур используется вода с температурой

37-42 °С, в некоторых случаях для экономии теплоты осуществляется снижение температуры воды у водоразборных кранов ночью до 40 °С.

Для учреждений социального обеспечения, общеобразовательных школ, детских

домов и дошкольных учреждений, а также в зданиях лечебно-профилактических учреждений температура горячей воды принимается не выше 37 °С.

Указанные ранее нижние пределы температуры воды относятся к наиболее

удаленным от подогревательной установки водоразборным точкам и к минимальному

расходу воды по подающим трубопроводам, соответствующему отсутствию водоразбора и наличию в системе только циркуляционного расхода воды. С учетом потерь тепла в трубопроводах в первом приближении на выходе из подогревателей рекомендуется принимать:

tг.закр min= tг.закр норм + 10 = 50 + 10 = 60 °С;

tг.откр min = tг.откр норм + 5 = 60 + 5 = 65 °С;

Нарушения температурного режима систем горячего водоснабжения приводят к

существенным перерасходам теплоты и горячей воды. Особенностью систем бытового горячего водоснабжения является периодическое и кратковременное включение в работу отдельных приборов, что приводит к резко переменному графику расходов горячей воды по системе в целом в течении суток (рисунке 1.5.1). Помимо внутри суточных колебаний, наблюдаются изменения среднесуточных расходов в течении недели, месяца, года. Количественное прогнозирование нагрузки горячего водоснабжения определяет совершенство регулирования отпуска теплоты, режимов работы систем отопления, диагностики аварийных ситуаций в системах.

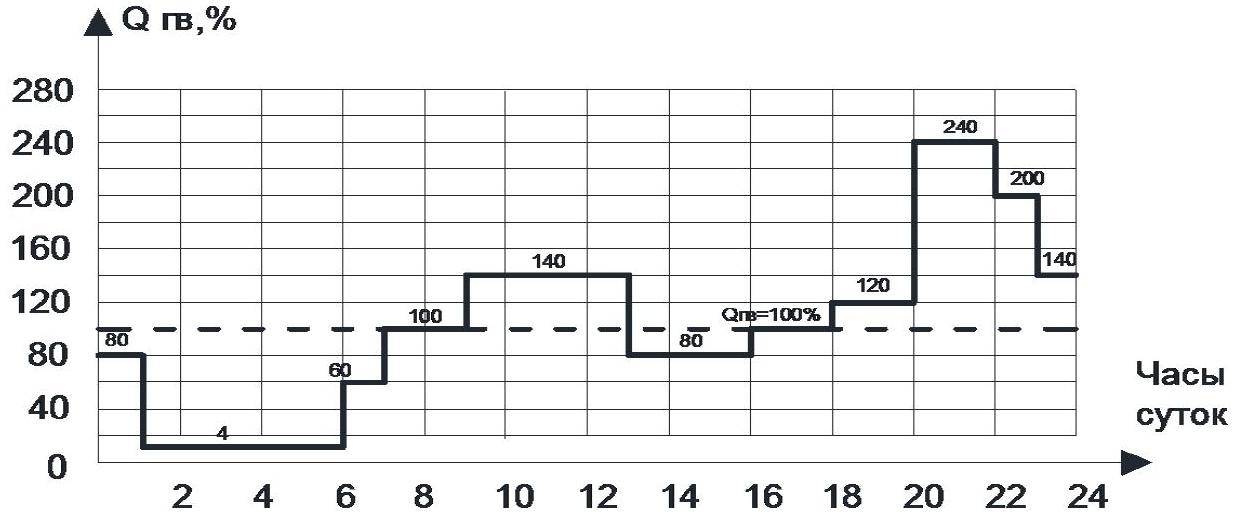


Рисунок 1.5.1 – Обобщённый суточный график потребления горячей воды

В системах горячего водоснабжения важным регулируемым параметром является напор в точках водоразбора. Из условий надёжности функционирования и предотвращения попаданий воздуха в систему минимальный напор в точках водоразбора устанавливается в размере 2-5 м. Так, напор свободного слоя воды Нсв через водоразборные краны у раковины, моек, душевых сеток, умывальников, а также у смесителей умывальников принимаются не менее 2 м, для смесителей у ванн и душевых сеток в квартирах – не менее 3 м, для душевых сеток в групповых установках – до 4 м. Максимальное давление определяется механической прочностью трубопроводов.

Цели регулирования для систем горячего водоснабжения могут заключаться в

следующем:

в удовлетворении условия 𝑃𝑡 ≥ 𝑃𝑡 норм;

в минимизации значения 𝑃нач = 𝑓(𝐺𝑖 ) по выражению (2.12) при условии 𝑃𝑡 ≥𝑃𝑡норм с целью сокращения затрат на транспорт воды к потребителям (рис. 2.13);

в управлении величинами 𝑆𝑗𝑗 для доведения до минимума величин 𝑃𝑖 – 𝑃𝑖 норм;

в минимизации величины ∫ 𝑃нач𝑑𝑡 𝑏 (из условия обеспечения суммарным

расходом) при наличии потребителей, допускающих варьирование временем

водозабора τ (наличие баков-аккумуляторов и др.);

в регулировании расходов воды в циркуляционных контурах систем горячего

водоснабжения с целью из минимизации при соблюдении условия

𝑡норм𝑚𝑎𝑥 > 𝑡𝑘 > 𝑡норм𝑚𝑖𝑛 ;

в удовлетворении условия 𝑃𝑖 ≥ 𝑃𝑖 норм категорированных потребителей с временным или полным отключением водопотребления у абонентов, допускающих временные перерывы.

**1.6 Регулируемые параметры для систем теплоснабжения**

Одним из основных регулируемых параметров для систем теплоснабжения

является величина гидродинамического давления в различных точках тепловой сети,

анализируемая, как правило, с помощью пьезометрических графиков. Здесь в период

функционирования необходимо минимизировать затраты электроэнергии на привод

циркуляционных и подпиточных насосов при удовлетворении требуемых расходов и

граничных условий по величинам гидродинамических давлений [3].

Гидростатический режим тепловых сетей определяется из условий заполнения

системы водой до 100℃ и обеспечения в верхних гидравлически связанных точках

высоко расположенных отопительных установок избыточного давления не менее 0,05

МПа (5 м вод. ст.), а в элементах системы расположенных на низких геодезических уровнях, − не выше допустимых для установленного оборудования давлений.

Гидродинамические давления, помимо указанных выше пределов, должны

удовлетворять условиям функционирования: для подающей линии – защита от вскипания воды, для обратной линии – предотвращение вакуума (давления меньше 0,1 МПа) в системе, а также предупреждения кавитации жидкости в насосах.

Величина требуемого перепада давлений ∆𝑃 на вводе у потребителя зависит от

характеристики местной системы и схемы её присоединения к тепловой сети. В случае присоединения отопительных или вентиляционных систем без элеваторного узла смешения или с насосным подмешиванием ∆𝑃 = 0,04 ÷ 0,05 МПа, при элеваторном присоединении ∆𝑃 = 0,1 ÷ 0,15 МПа, через водонагреватели ∆𝑃 = 0,04 ÷ 0,08 МПа. При последовательном включении системы отопления и водонагревателя на систему горячего водоснабжения располагаемых, напор принимается равным суммарной величине требуемых напоров.

Управляющими воздействиями для минимизации энергетических затрат и

обеспечения гидравлических режимов в общем случае являются: снижение величины ∆𝐻рд за счёт оптимального выбора числа работающих насосов, регулирование

частоты вращения насосов, выбор представительных абонентов в различные периоды

работы системы и др.

Производным регулируемым параметром в системах теплоснабжения является

расход теплоты, определяемый температурами и расходом теплоносителя. Изменение

параметров теплоносителя в соответствии с фактической тепловой потребностью абонентов повышает качество теплоснабжения, сокращает расходы тепловой энергии

и топлива. Адекватное определение потребного и фактического расходов теплоты

способствует возможностям максимальной экономии топлива и тепловой энергии,

достижению высоких экономических показателей в теплоснабжении.

Потребные (нормируемые) расходы теплоты определяются в соответствии с

известными методиками и нормативными документами.

Часовой расход теплоты на отопление отдельного здания можно определить по

выражению

𝑄от = 1,1 (𝑄но + 𝑄в − 𝑄вт);

где 1,1 – коэффициент, учитывающий дополнительные потери теплоты в

местной системе отопления ( СНиП 11-33−75);

𝑄но – потери теплоты через наружные ограждения здания с учётом

инфильтрационных потерь;

𝑄в – теплота, затрачиваемая на подогрев вентиляционного воздуха;

𝑄вт – внутренние тепловыделения.

Для определения потерь через наружные ограждения без учёта инфильтрации

возможно использовать формулу

𝑄но′ = ∑𝑘𝐹∆𝑡

𝑄но′ = 𝑞0′ 𝑉 (𝑡в − 𝑡и)

где F – площадь поверхности отдельных ограждений, м2;

k – коэффициент теплопередачи наружных ограждений, Вт/(м2∙℃);

∆𝑡 – разность температур воздуха с внутренней и наружной стороны

ограждающих конструкций, ℃,

𝑘𝑐, 𝑘ох, 𝑘ат, 𝑘𝑛𝑎 – коэффициенты теплопередачи стен, окон, потолка верхнего

этажа, Вт/м2∙℃);

φ – коэффициент остекления, т.е. отношение площади окон к площади

вертикальных ограждений (стен);

𝜓1, 𝜓2 – поправочные коэффициенты на расчётный период температур для

верхнего и нижнего горизонтальных ограждений здания для большинства

случаев: 𝜓1 = 0,75 ÷ 0,9; 𝜓2 = 0,5 ÷ 0,7; 𝑞0′ − удельная тепловая

характеристика конкретного здания.

Полные тепло потери с учётом инфильтрации

𝑄но = (1 + 𝜇)𝑞0′ 𝑉(𝑡в − 𝑡и),

где µ − коэффициент инфильтрации:

g – ускорение свободно падающего тела, м/с2;

L – свободная высота здания (для жилых и общественных зданий – высота

этажа), м;

𝜔в – скорость ветра, м/с;

b – постоянная инфильтрации, с/м.

Ориентировочный расход теплоты на вентиляцию

𝑄в = 𝑚𝑉всв(𝑡вн − 𝑡н);

𝑄в = 𝑞в𝑉(𝑡вн − 𝑡н);

где m – кратность воздухообмена, с−1 или 𝑞−1;

V – объём здания, м3;

𝑉в – вентилируемый объём здания, м3;

𝑡вн – температура нагретого воздуха, подаваемого в помещение, °С;

𝑞в – удельный расход теплоты на вентиляцию (при 𝑡вн = 𝑡в, 𝑞в = 𝑚𝑐в𝑉а/𝑉).

Рассмотренные выше методы применимы лишь для укрупнённого прогнозирования расхода теплоты и топлива. В настоящее время практически отсутствуют обоснованные методики определения более точной тепло потребности с учётом эксплуатационных особенностей.

Фактическое теплопотребление здания наиболее точно определяется с помощью

тепломеров.

**1.7 Внешние и внутренние возмущающие воздействия**

Управляющими (регулирующими) воздействиям, которые должны обеспечить

стабилизацию температурного режима помещений в заданных пределах или его

изменение во времени по заданной программе, являются температура и расход теплоносителя поступающего в нагревательные приборы, а также продолжительность его подачи [3].

Управляющие воздействия, в свою очередь подвергаются различного рода возмущениям. На работу источника теплоты влияют переменный состав топлива, колебания давления газа перед горелками котла, изменения давления пара в отборе

турбины и т.д. На режим работы тепловых сетей оказывают влияние переменная нагрузка горячего водоснабжения, работа вентиляционных устройств, переключения в сети и т.д. Для создания требуемых температурных условий в отапливаемых помещениях влияние указанных возмущений необходимо компенсировать соответствующей системой управления отпуском теплоты.

**Температура наружного воздуха.** Основным фактором, определяющим режим работы систем отопления, является изменение температуры наружного воздуха. При этом меняется разность между внутренней 𝑡в и наружной 𝑡и температурами, т. е.

температурный напор, вызывающий перенос теплоты через ограждающие конструкции зданий. Этот перенос происходит путём кондуктивного теплообмена через толщу ограждений и лучистого и конвективного теплообмена их поверхностей.

За счёт разности объёмных масс теплового и холодного воздуха возникает перепад

давлений внутри и снаружи здания, который обуславливает тепломассообмен путём

инфильтрации воздуха через плотности в ограждающих конструкциях.

По своим динамическим свойствам тепловые потери зданий, вызванные изменением температуры наружного воздуха, делятся на быстрые (через нетеплоёмкие ограждения) и медленные (через теплоёмкие ограждения).

Колебания температуры наружного воздуха носят периодический и непериодический характер. К периодическим колебаниям относят годовой и суточный ход температуры, зависящий главным образом от широты местности, её удалённости от моря, рельефа местности, времени года. Непериодические колебания возникают под действием случайных факторов. Они могут быть достаточно длительными, многосуточными (например, вызванные прохождением через данный район холодной волны воздуха) и кратковременными (пульсациями), обусловленными причинами.

Изменения температуры наружного воздуха (не считая пульсаций, которые

практически не влияют на температурный режим зданий) обычно происходят со скоростью не более 2° в час, но в отдельные периоды (например при прохождении

фронта, температурной волны, вызванной циклоном) могут достигать 10° и более.

Для большей части районов СССР суточный градиент температур воздуха наиболее существенен в весенний период отопительного сезона (март – апрель). Температуры воздуха меняются тоже и с высотой над уровнем земли.

В пределах города имеют место температурные контрасты, обусловленные

различной плотностью затройки, высотой домов, шириной улиц и площадей, их

расположением по странам света, растительным покровом. Так, средняя неравномерность

**Ветер.** Значительное влияние на тепловые потери отапливаемых зданий оказывают скорость и направление ветра. Под действием ветра и температурного напора происходит проникновение наружного холодного воздуха через щели, оконные и дверные заполнения (воздухообмен через поры материалов стен мал и им можно пренебречь), а также горизонтально перемещение потоков воздуха с наветренной стороны на подветренную.

Вследствие ветрового и гравитационного давлений возникает вертикальное

перемещение потоков воздуха внутри здания, сопровождающееся интенсивной инфильтрацией наружного воздуха в помещениях жилых этажей, постепенно уменьшающейся по высоте здания. В помещениях верхних этажей может происходить эксфильтрация воздуха через наружные ограждения. Изменение тепловых потерь зданий при ветре происходит также за счёт увеличения коэффициента теплоотдачи ограждающих конструкций.

Степень воздействия ветра на тепловые потери зависит от ориентации здания по

странам света. Так как скоростной напор ветра по преобладающему направлению

значительно больше, чем по остальным.

По своим динамическим характеристикам тепловые потери зданий, обусловленные влиянием ветра, делятся на быстрые и медленные. Быстрые тепловые потери обусловлены проникновением холодного воздуха путем инфильтрации через неплотности в оконных и дверных проемах, стыки наружных стеновых панелей, а также влиянием ветра на коэффициент теплоотдачи окон. При этом величина инфильтрации в большой степени зависит от качества оформления оконных проемов и ухода за ними. Медленные тепловые потери обусловлены главным образом влиянием ветра на коэффициент теплоотдачи наружных поверхностей стен.

Как показали многочисленные исследования, зависимость быстрых тепловых

потерь здания от скорости ветра в широком диапазоне скоростей может быть принята

линейной.

Влияние ветра на тепловой режим здания удобно оценивать путем введения

поправки к температуре наружного воздуха, по которой осуществляется регулирование расхода теплоты. Величина этой поправки ∆𝑡н0 может быть определена из выражения

∆𝑡н0 = 𝑑𝑝(𝑣 − 𝑣𝑝)(𝑡в − 𝑡н)

где v — скорость ветра, м/с;

𝑣p — скорость ветра, на которую рассчитываются тепловые потери здания;

𝑣p =5 м/с;

tв, tн— температура воздуха внутри и снаружи здания, °С;

𝑑p — коэффициент, зависящий от теплотехнических характеристик помещений

и воздухопроницаемости оконных проемов, °С/м.

Помимо увеличения общего размера тепловых потерь, ветер приводит к

уменьшению запаздывания при прохождении тепловой волны через стену, а также к

относительному снижению доли медленных теплопотерь в суммарных теплопотерях

здания.

Ветер не обладает постоянными скоростью и направлением, он дует порывами.

Однако на тепловые потери зданий оказывают влияние не отдельные порывы ветра, а его усредненное за определенный отрезок времени значение, которое и должно

учитываться в системах автоматического управления подачей теплоты в здания.

В связи с этим учет направления ветра при центральном автоматическом

управлении подачей теплоты, за исключением некоторых особых случаев, не представляется возможным.

Учет же скорости ветра (тем или иным способом), которая, может существенно

увеличить тепловые потери зданий, при центральном регулировании является необходимым.

Высокая точность компенсации влияния скорости и направления ветра на

температурный режим помещений может быть достигнута при пофасадном и индивидуальном автоматическом регулировании теплоотдачи нагревательных

приборов.

**Солнечная радиация.** Поступление теплоты за счет солнечной радиации

занимает существенную долю в тепловом балансе отапливаемых помещений. Потоки солнечных лучей приходят на ограждающие поверхности зданий в виде прямой солнечной радиации, в виде лучей, рассеянных атмосферой и облаками, а также в виде потоков, отраженных от поверхностей расположенных рядом зданий, земли и различных предметов.

Соответственно различают прямую, рассеянную и отраженную радиацию. Количество прямой солнечной радиации, поступающей на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам, зависит от широты местности, времени года,

состояния атмосферы. Рассеянная радиация, как и отраженная, в основном для всех

ограждений одинакова, независимо от ориентации

Влияние солнечной радиации на тепловой режим здания удобно оценить путем

введения соответствующей поправки к температуре наружного воздуха, определяемой из выражения

∆𝑡𝑅 = 𝑞инс ÷∑𝑘𝐹

где 𝑞инс – количество лучистой теплоты, поступающей в здание (включая

коротковолновую радиацию, проникающую через окна, и теплоту,

поглощенную ограждающими конструкциями и переданную воздуху

помещений), Вт;

∑ 𝑘𝐹 – основные (кондуктивные) тепловые потери зданий при разнице

температур внутреннего и наружного воздуха в 1 °С, Вт/°С.

Из изложенного следует, что солнечная радиация оказывает существенное влияние на тепловой режим помещений. Ее учет при отоплении зданий возможен в случае применения систем пофасадного либо индивидуального автоматического регулирования.

Внутренние возмущающие воздействия, как было отмечено выше, обусловливаются целым рядом причин. В жилых домах их источником являются бытовые теплопоступления. Значительное количество бытовой теплоты выделяется при приготовлении пищи на кухне. Большая ее часть выделяется интенсивно и в сравнительно короткий срок. Но эта теплота достигает жилых комнат чаще всего сглаженным и выровненным потоком благодаря аккумуляциии ее ограждениями кухни, предметами обихода, мебелью и пр., значительная же часть ее удаляется при вентиляции самой кухни.

Количество выделяемой теплоты в помещении зависит от состава семьи, уклада

жизни, размеров квартиры, характера деятельности семьи (тяжелая или легкая работа), температуры воздуха в помещении, среднего времени пребывания человека в доме. Суточный размер тепловыделений от пребывания человека в течение 50-70% времени составляет 1300-1400 Вт·ч; суточный расход электроэнергии в квартирах – 500-600 Вт·ч; суточный расход теплоты для приготовления пищи – 1100-1400 Вт·ч; общий среднечасовой размер бытовых тепловыделений – 130-140 Вт·чел.

Для оценки влияния тепловыделений на тепловой режим отапливаемых

помещений удельную кубатуру на одного человека можно принять равной (по наружному обмеру) 50 м3, а удельную тепловую нагрузку – q=0,35 Вт/(м3·°С).

В переходный период отопительного сезона (+10°С) величина тепловыделений

приближается к величине тепловых потерь здания. Устранение «перетопов» в помещениях, вызванных влиянием бытовых тепловыделений, может быть достигнуто

путем индивидуального регулирования теплоотдачи нагревательных приборов.

**1.8 Влияние горячего водоснабжения на режим работы систем**

**теплоснабжения**

Горячее водоснабжение жилых и общественных зданий и коммунальных

предприятий является крупным потребителем теплоты в системах централизованного

теплоснабжения. Годовой расход теплоты на горячее водоснабжение достигает 40% от общего годового отпуска ТЭЦ или районной котельной. Пиковые нагрузки горячего водоснабжения в ряде случаев превышают расходы теплоты на отопление зданий [3].

Режим потребления горячей воды населением отличается резко выраженной

неравномерностью как в течение недели, так и в пределах суток.

Представление о характере режимов водопотребления дают значения

коэффициентов неравномерности:

K=Gmax/Gср

где Gmax – минимальный расход за исследуемый отрезок времени (неделя, сутки,

час);

Gср – средний расход за тот же отрезок времени.

Как известно, существует несколько систем и способов горячего водоснабжения

при централизованном теплоснабжении: закрытые системы с параллельной, последовательной и смешанной схемами включения теплообменников, открытые системы с непосредственным водоразбором из тепловых сетей.

Работа установок горячего водоснабжения приводит к определенным нарушениям параметров теплоносителя в системах отопления. В связи с этим при решении вопросов автоматического регулирования режимов отопления зданий горячее водоснабжение следует рассматривать как возмущающее воздействие на регулирующую величину (расход и температуру теплоносителя).

Влияние горячего водоснабжения на работу систем отопления определяется размером и режимом потребления горячей воды, способом его осуществления, гидравлическими характеристиками тепловой сети и абонентских установок.

Исследования теплового и гидравлического режимов тепловых сетей при различных способах осуществления горячего водоснабжения показали следующее.

Достоинство открытых тепловых сетей с точки зрения их гидравлического режима заключается в том, что при низких температурах наружного воздуха, когда системы отопления наиболее чувствительны к колебаниям расходов воды в сети, водоразбор, производимый в это время из обратных труб, усиливает циркуляцию воды в системах. Это положительно сказывается на их тепловой устойчивости.

Водоразбор из подающих труб, уменьшающий расход воды в системах отопления,

осуществляется только при положительных температурах наружного воздуха, при которых даже существенные нарушения режимов работы тепловых сетей оказывают

малозаметное влияние на температуру воздуха в отапливаемых помещениях. При

среднезимних температурах наружного воздуха отбор одновременно из обеих труб тепловой сети создает условия, практически исключающие влияние горячего водоснабжения на режим систем отопления.

Непосредственный водоразбор удачно сочетается с качественноколичественным регулированием в тепловых сетях, так как в этом случае в переходный период отопительного сезона не требуется увеличения (против расчетного) напора воды в сети для уменьшения влияния отбора из подающего трубопровода на работу системы отопления.

Недостатками открытых тепловых сетей являются существенные изменения

давления в сети при колебаниях величины водоразбора. В периоды интенсивного

водопотребления возможно прекращение или изменение направления циркуляции

теплоносителя в обратном трубопроводе на ответвлениях тепловой сети к отдельным

зданиям. Указанные обстоятельства Должны учитываться при создании АСУ ТП

открытых систем теплоснабжения.

Наиболее тяжелые условия гидравлического и теплового режимов создаются при

закрытой схеме горячего водоснабжения с параллельным включением подогревателя.

Колебания расхода воды в системах отопления в этом случае оказываются

максимальными.

При последовательной двухступенчатой схеме работа установок горячего

водоснабжения совершенно не влияет на гидравлический режим тепловой сети.

Однако включение подогревателя второй ступени вызывает понижение температуры воды в системе отопления, которое должно компенсироваться соответствующим повышением температур воды в сети. Кроме того, эта схема плохо сочетается с местным автоматическим регулированием в абонентских вводах.

При смешанной двухступенчатой схеме работа подогревателя второй ступени

вызывает колебания расхода воды в системе отопления. Размер нарушений

гидравлического режима возрастает с понижением температур сетевой воды (по мере

увеличения нагрузки второй ступени подогрева) и достигает максимума в переходный период отопительного сезона. Однако, как уже было отмечено, нарушение гидравлического режима тепловой сети в этот период не оказывает существенного влияния на температуру воздуха в отапливаемых помещениях.

Смешанная двухступенчатая схема, так же, как и непосредственный водоразбор,

удачно сочетается с режимом качественно-количественного регулирования в тепловых сетях. При таком сочетании не требуется увеличения напора в сети (против расчетного) для компенсации влияния работы подогревателя второй ступени на режим отопления. Сложные условия гидравлического режима при этой схеме (как и при открытой схеме) возникают в часы максимального разбора горячей воды на бытовые нужды, иногда превышающего расход воды в системах отопления.

Таким образом, при всех способах горячего водоснабжения оно оказывает в тех

или иных размерах влияние на тепловой и гидравлический режимы систем отопления.

Устранение этого влияния может быть достигнуто централизованным путем и

местным автоматическим регулированием в абонентских вводах.

**1.9 Классификация управляющих воздействий**

Физическая величина, с помощью которой осуществляется воздействие на объект управления, называется регулирующей, а ее изменение – управляющим воздействием, являющимся средством для поддержания необходимого значения регулируемого параметра [3].

В системах теплоснабжения и отопления управляющим воздействием, в общем

случае, является изменение количества подаваемой теплоты, осуществляемое

совместным или раздельным регулированием температуры и расхода теплоносителя, а также изменением условий теплообмена.

**1.10 Уравнение нестационарного теплообмена объектов систем**

**теплоснабжения**

Система теплоснабжения представляет собой совокупность большого числа

теплообменных устройств, объединенных в единую систему генерации, транспорта, отпуска теплоты, и может быть представлена в виде структурной схемы, учитывающей все внутренние связи и внешние воздействия. Элементы системы теплоснабжения разделяются по видам теплопередачи (фильтрацией, конвекцией, теплопроводностью, излучением), по физическим свойства теплоносителей (газ, жидкость, двухфазный теплоноситель с изменяющимся агрегатным состоянием) и по конструктивному выполнению (прямоток, противоток, перекрестный ток). Для всех этих весьма разнохарактерных элементов можно составить дифференциальные уравнения, описывающие процесс динамики теплообмена [3]. При этом допустим такой подход, когда можно пренебречь влиянием изменения массы среды на динамические процессы. В этом случае скорость изменения температуры среды пропорциональна полному количеству теплоту, передаваемой путем конвекции, теплопроводности, излучения, фильтрации и тепловыделения, т.е.

𝑚 𝑑𝑡 = 𝑄к + 𝑄λ+𝑄нз+𝑄Ф+𝑄Т , (10.1)

где m – масса среды (𝑚 = 𝑐𝛾𝑉); c – теплоемкость; 𝛾 – удельный вес; V – объем;

𝑡 = (𝑡1,𝑡2, … ,𝑡𝑖) – температура поверхности тела или теплоносителя;

𝑄к – суммарный расход подведенной и отведенной теплоты путем конвекции:

𝑄к = ± ; (10.2)

𝑎𝑖 – коэффициент теплоотдачи;

𝐹𝑖 – поверхность теплообмена;

𝑄λ − результирующий расход подведенной (отведенной) теплоты за счет

теплопроводности:

𝑄λ = λ𝑖𝐹𝑖 (10.3)

λ𝑖 −коэффициент теплопроводности среды;

x – пространственная координата;

𝑄из − суммарный расход теплоты, подведенной с некоторой области

пространсва излучением:

𝑄из = (𝜏); (10.4)

𝑞𝑖(𝜏) – удельный тепловой поток;

𝑄ф − количество теплоты, подведенной (отведенной) фильтрацией:

𝑄ф = ; (10.5)

Кф𝑖− коэффициент фильтрационного теплообмена;

𝑄𝑡 – источник тепловыделения, изменение которого может быть задано

любым законом.

Выражение dt в уравнении (10.1) есть полный дифференциал

, (10.6)

где 𝑣𝑖 − скорость теплоносителя.

Для твердого тела и неподвижного теплоносителя 𝑈𝑖 =𝜕𝑡𝑖/𝜕𝑥𝑖~0.

После подстановки значений 𝑄к, 𝑄λ, 𝑄нз,𝑄Ф, 𝑄Т и полного дифференциала в

выражение (10.1) получим систему дифференциальных уравнений в частных производных для каждого конкретного элемента системы теплоснабжения (таблица 1.10.1).

Более предпочтительным следует считать метод получения решения в виде

передаточных функций. Аппарат передаточных функций более универсален, позволяет легко перейти к вычислению частотных характеристик. Последнее обстоятельство весьма существенно, так как частотный метод анализа динамических систем разработан наиболее полно и очень часто решение задач синтеза и анализа систем регулирования основано на использовании частотных характеристик объекта.

Кроме того, определение частотных характеристик не представляет особых

трудностей даже в случае сложных систем и существует множество методов аппроксимации по частотным характеристикам.

Общий метод получения передаточных функций сводится главным образом к

известным элементам операционного исчисления, в частности к методу Лапласа преобразования функций. Операционное исчисление, основанное на преобразовании

Лапласа и разработанное для исследования детерминированных дифференциальных

уравнений в прикладной математике, находит широкое применение для решения задач нестационарного теплообмена, сводящихся к определению динамических характеристик теплообменных аппаратов. Этот метод, как известно, основан на работах Хевисайда, Бромвича, Карслоу и Карсона и др.

Полученные исходные системы уравнений (таблица 1.10.1) являются нелинейными. Поэтому, чтобы применить к ним преобразование Лапласа, необходимо системы дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами, являющимися функциями пространственных координат и времени, линеаризовать и заменить их постоянными или линейными функциями. Такая замена возможна, если коэффициента инвариантны относительно времени и пространственных координат или не зависят от времени и изменяются линейно с пространственными координатами. Если систему не удается представить в виде линейной или квазилинейной, то почти отсутствует возможность точного определения передаточных функций.