

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»  
Институт горного дела и строительства**

Кафедра «Санитарно-технические системы»

Утверждено на заседании кафедры  
«Санитарно-технические системы»  
« 20 » января 2022 г., протокол № 5

Заведующий кафедрой



Р.А. Ковалев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ  
дисциплины(модуля)**

***«Системы обеспечения микроклимата гражданских зданий»***

**основной профессиональной образовательной программы  
высшего образования – программы магистратуры**

по направлению подготовки  
***08.04.01 – "Строительство"***

с направленностью (профилем)  
***"Теплогазоснабжение и вентиляция"***

Форма(ы) обучения: *очная, заочная*

Идентификационный номер образовательной программы: 080401-05-22

Тула 2022 год

Методические указания к практическим занятиям составлены доцентом В.Ф. Рожковым и обсуждены на заседании кафедры «Санитарно-технические системы»

протокол № 5 от « 20 » \_\_\_\_\_ 01 \_\_\_\_\_ 2022 г.

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Р.А. Ковалев

Методические указания к практическим занятиям пересмотрены и утверждены на заседании кафедры «Санитарно-технические системы»

протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 г.

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Р.А. Ковалев

Методические указания к практическим занятиям пересмотрены и утверждены на заседании кафедры «Санитарно-технические системы»

протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 г.

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Р.А. Ковалев

## Цели и задачи практических занятий

1. Закрепление теоретических знаний, полученных по материалам лекций и учебной литературы.
2. Практическое ознакомление с действующими видами инженерных систем общественных зданий.
3. Овладение методами расчётов технико-эксплуатационных показателей работы систем и оборудования и их экономической эффективности.
4. Расчетная оценка студентами технико-экономической эффективности характерных энергосберегающих мероприятий и усвоение тем самым методического подхода для выполнения разделов реального курсового и дипломного проектирования.
5. Умение дать аналитическую оценку конструктивных и эксплуатационных достоинств и недостатков действующих или заданных систем и оборудования на основе результатов работы и сделать вывод о целесообразности и эффективности использования данных видов систем и оборудования.

Варианты исходных данных для группы студентов из 5 чел. задаются преподавателем. Методика расчета и ориентировочные значения величин приведены в примерах расчета.

### Содержание практических занятий

#### Очная форма обучения

№ п/п	Темы практических занятий
<i>3 семестр</i>	
1	Эпюры давления воздуха на ограждения здания. Общие положения. Эпюры давления при действии на здание только гравитационных сил. Эпюры давления при действии на здание только ветра. Эпюры давления при совместном действии на здание ветра и гравитационных сил.
2	Обеспеченность расчетных условий. Характеристика климата холодного периода года. Защитные свойства наружных ограждений.
3	Подача тепла в помещение и локализация действия источников холода. Летние характеристики климата. Поступление тепла через наружные ограждения и тепловой режим помещения.
4	Система отопления. Классификация систем отопления. Теплоносители в системах отопления. Основные виды систем отопления.
5	Схемы системы насосного водяного отопления. Система отопления с естественной циркуляцией воды. Система водяного отопления высотных зданий. Децентрализованная система водо-водяного отопления.
6	Воздействие солнечной радиации на здания. Общие сведения. Статистические характеристики климата. Солнечная радиация.
7	Воздействие на здание температуры и влажности воздуха. Температура воздуха. Влажность воздуха.
8	Воздействие на здание осадков и снежного покрова. Осадки. Снежный покров.

№ п/п	Темы практических занятий
9	Воздействие на здание ветра. Анализ микроклимата в районе застройки. Ветер. Оценка круга горизонта по климатическим факторам и анализ микроклимата в районе застройки.
10	Обтекание здания потоком воздуха. Зона аэродинамического следа. Обтекание потоком воздуха отдельно стоящего здания. Аэродинамические характеристики здания.
11	Влияние воздушного режима здания на его тепловой режим. Воздушный режим здания. Передача тепла через ограждение при фильтрации воздуха. Дополнительные затраты тепла в помещении на инфильтрацию.
12	Снижение энергопотребности на отопление здания. Конструктивных решений здания с позиции экономии энергии для отопления.

### Заочная форма обучения

№ п/п	Темы практических занятий
<i>3 семестр</i>	
1	Эпюры давления воздуха на ограждения здания. Общие положения. Эпюры давления при действии на здание только гравитационных сил. Эпюры давления при действии на здание только ветра. Эпюры давления при совместном действии на здание ветра и гравитационных сил.
2	Обеспеченность расчетных условий. Характеристика климата холодного периода года. Защитные свойства наружных ограждений.
3	Подача тепла в помещение и локализация действия источников холода. Летние характеристики климата. Поступление тепла через наружные ограждения и тепловой режим помещения.

### Отчёт о проделанной работе

Отчёт о проделанной работе оформляется индивидуально каждым студентом в тетради в следующей последовательности:

**Наименование работы.**

**Цель выполняемой работы.**

**Исходные данные** к работе расчётного характера.

**Расчётная часть** или принципиальные схемы систем или оборудования (изображаются от руки ручкой или карандашом) с определением некоторых их характеристик.

**Вывод** по результатам работы.

Каждая выполненная и оформленная работа завершается её устной защитой, на которой студент должен проявить знания по соответствующему теоретическому и практическому разделу изучаемой дисциплины и получить зачёт по данной работе.

## Методические указания к проведению практических занятий

### Практическое занятие №1

- 1.1 Общие положения.
- 1.2 Эпюры давления при действии на здание только гравитационных сил.
- 1.3 Эпюры давления при действии на здание только ветра.
- 1.4 Эпюры давления при совместном действии на здание ветра и гравитационных сил.

#### 1.1. Общие положения

Разность плотностей наружного и внутреннего воздуха, действие ветра и систем вентиляции создают определенное распределение давления воздуха на ограждения помещений и зданий. Известно, что для высоких зданий характерно проникание наружного воздуха в помещения через неплотности в ограждениях нижних этажей и обратное направление движения воздуха через неплотности в ограждениях верхних этажей. Такое движение воздуха объясняется наличием разности давлений с двух сторон ограждения.

Для расчета естественного воздухообмена в промышленных, жилых и общественных зданиях в настоящее время широко применяются способы *нейтральной зоны, избыточных давлений* (предложен проф. П. Н. Каменевым) и *фиктивных давлений* (предложен проф. В. В. Батуриным).

Известно, что в столбе жидкости или газа гидро- или аэростатическое давление переменено по высоте. Изменение давления в слое газа высотой  $dh$ , м, составляет, Па:

$$dp = \frac{\rho g dV}{F} \quad (2.1)$$

где  $\rho g$ —удельный вес газа, Н/м<sup>3</sup>;  $dV$ —элементарный объем газа, м<sup>3</sup>;

$F$ —площадь поперечного сечения рассматриваемого столба газа, м<sup>2</sup>.

Если заменить  $dV = F dh$ ., то из равенства (2.1) получим:

$$dp = \rho g dh \quad (2.2)$$

Очевидно, что давление в любом сечении столба газа на высоте  $h$  равно:

$$p_h = p_a - g \int_0^h \rho dh \quad (2.3)$$

где  $p_a$ —атмосферное давление на высоте  $h=0$  (поверхность земли).

Интегрирование выражения (2.3) затрудняется неопределенностью зависимости плотности  $\rho$  от  $h$  ( $\rho$  определяется давлением, значение которого является искомым). В атмосфере, например, изменение плотности воздуха по высоте зависит кроме давления от температуры. Для определения  $p_h$  обычно пользуются эмпирическими уравнениями  $p=f(h)$  или термодинамическими зависимостями. При рассмотрении

воздушного режима зданий ( $h < 100\text{ м}$ ) можно пренебречь изменением плотности воздуха по высоте, и тогда

$$p_h = p_a - \rho dh \quad (2.4)$$

При этом погрешность в определении разности давлений составит около 1%. Абсолютное изменение давления на 1 м высоты  $\rho g$  по сравнению с атмосферным давлением ничтожно мало. Учитывая, что в дальнейшем предстоит определять еще меньшие величины  $\Delta p_g$ , целесообразнее пользоваться избыточным давлением  $p$ , отсчитываемым от условного нуля  $p_h = H$

Введение условного нуля, расположенного в точке системы с минимальным давлением, является основной особенностью рассматриваемого способа построения эпюр давления. Для гравитационного давления эта точка находится снаружи в верхней части здания, а для ветрового — это точка с минимальным аэродинамическим коэффициентом.

## 1.2. Эпюры давления при действии на здание только гравитационных сил

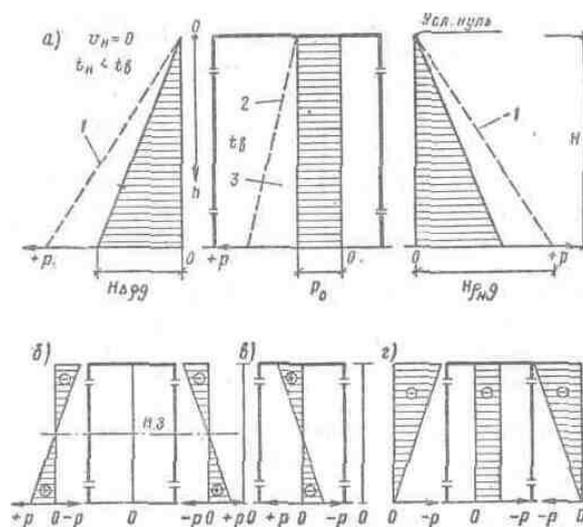
Аэростатическое давление снаружи здания (линии 1 на рисунок 2.1, а) определяется расстоянием по вертикали от точки условного нуля и плотностью наружного воздуха  $\rho_n$ . Эпюра аэростатического давления снаружи здания имеет вид прямоугольного треугольника. Внутри помещения при постоянной температуре по высоте эпюра давления имеет вид трапеции. Верхнее основание — это избыточное относительно условного нуля внутреннее статическое давление  $p_0$ , зависящее от расположения и проницаемости отверстий в наружных ограждениях. Изменение по высоте избыточного аэростатического давления внутри помещения показано линией 2.

Для расчета воздушного режима здания (помещения) используют перепады давлений на определенном уровне. Поэтому можно несколько упростить конфигурацию эпюр давления, не изменяя разности давлений. Вычтем из каждой эпюры статического давления на рисунке 2.1, а треугольник площадью, равной площади треугольной части внутренней эпюры 3. Оставшиеся части (заштрихованные) — снаружи треугольники с основанием  $H \Delta p_g$ , а внутри прямоугольник — и являются расчетными эпюрами избыточного давления при действии *только* гравитационных сил.

На рисунке 2.1, б—г показаны формы эпюр, полученных другими известными способами.

В способе «нейтральной зоны» за нуль давлений принимается давление в помещении, поэтому эпюра давления снаружи (рис. IX.3, б) представляет собой эпюру расчетной разности давлений с двух сторон ограждения  $\Delta p_{н,з} = p_n - p_0$ .

Профессор П. Н. Каменев предложил в случае действия только гравитационных сил отсчитывать избыточное давление от давления воздуха снаружи. Эпюра внутреннего давления по этому способу (рисунок 2.1, в) эквивалентна эпюре разности давлений  $\Delta p_k = p_0 - p_n$ .



*a* — построенные относительно условного нуля; *б* — аэростатическое избыточное давление снаружи;  
 2 — то же, внутри помещения; 3 — треугольная часть эпюры давления внутри помещения; *б* — построенные по способу «нейтральной зоны»; *в* — избыточного, построенные по способу П. Н. Каменева; *г* — фиктивного, построенные по способу В. В. Батурина.

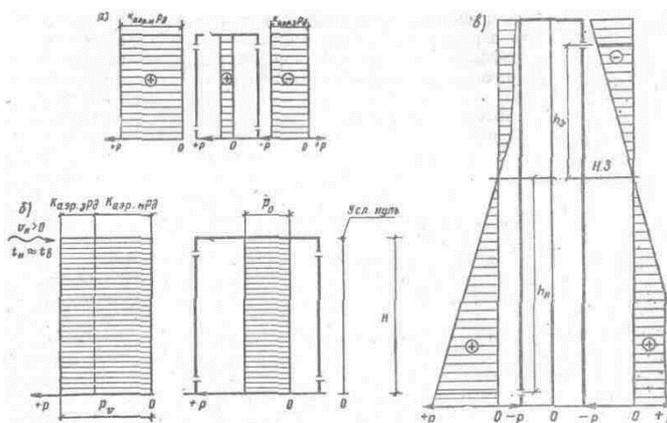
Рисунок 2.1. Эпюры давления при действии на здание гравитационных сил

Рассматриваемый здесь способ построения эпюр давлений близок к способу, предложенному проф. В. В. Батуриным. Отличие состоит лишь в выборе местоположения точки условного нуля давлений. Эпюры (рисунок 2.1, г) построены относительно нуля, принятого на уровне поверхности земли. Профессор В. В. Батурин назвал гравитационное давление фиктивным, имитирующим давление ветра. Вообще условный нуль отсчета давлений в этом способе не закреплен, предлагается принимать его на уровне середины нижнего проема. В связи с этим конфигурация эпюр фиктивного давления не имеет стандартной формы.

Эпюры давления воздуха (рисунок 2.1, а) построены для случая постоянной по высоте помещения температуры воздуха. Для расчета аэрации, в частности аэрации промышленных зданий со значительными тепловыделениями, при построении эпюр следует учитывать изменение температуры по высоте.

### 1.3. Эпюры давления при действии на здание только ветра

При равенстве температуры в помещении и снаружи изменение аэростатического давления по высоте с двух сторон ограждения одинаково и не учитывается. Набегающий на здание поток воздуха создает избыточное давление с его наветренной стороны и разрежение с заветренной. Значения избыточного давления и разрежения определяются динамическим давлением ветра и аэродинамическими коэффициентами: с наветренной стороны  $k_{\text{аэр.н}} > 0$ , с заветренной  $k_{\text{аэр.э}} < 0$ . Эпюры давления ветра на наружные поверхности здания, построенные относительно давления в окружающем воздухе вдали от здания, показаны на рисунке 2.2, а. Такое построение используется в способах, разработанных профессорами П. Н. Каменевым и В. В. Батуриным.



*a*—построенные по способам П. Н. Каменева и В. В. Батурина; *б*—построенные относительно условного нуля; *в* — построенные" по способу «нейтральной зоны»

Рисунок 2.2. Эпюры давления при действии на здание ветра

Если принять избыточное давление на заветренной стороне равным нулю, то избыточное (относительно этого нуля) давление ветра с наветренной стороны будет равно. Па:

$$p_g = (k_{\text{авр.н.}} - k_{\text{авр.з.}}) \frac{\rho_n \vartheta_n^2}{2} \quad (2.5)$$

где  $k_{\text{авр.н.}}$  и  $k_{\text{авр.з.}}$ —средние по площади аэродинамические коэффициенты с наветренной и заветренной стороны здания;

$\rho_n$  и  $\vartheta_n$ —плотность наружного воздуха и скорость ветра.

На боковых фасадах избыточное ветровое давление определяется аналогично с учетом аэродинамического коэффициента  $k_{\text{авр.б.}}$ .

Эпюры давления, создаваемого ветром снаружи и внутри здания, построенные относительно нуля давлений, принятого на заветренной стороне, показаны на рисунке 2.2,б.

По способу «нейтральной зоны» эпюра давления строится так же, как для случая действия только гравитационных сил (рисунок 2.2, а). Давление в помещении принимается равным нулю. Однако для того, чтобы выдержать давление снаружи, равное избыточному давлению, приходится условно изменять конфигурацию здания (см. рисунок 2.2,в), перемещая отверстия вниз и вверх от нейтральной зоны. Расстояния от нейтральной зоны до условного положения отверстий ( $h_n$  и  $h_3$ ) при этом являются искомыми величинами.

Определение избыточного ветрового давления обычно затрудняется отсутствием сведений об аэродинамических коэффициентах. Для зданий простой конфигурации, например в виде параллелепипеда, можно принимать средние аэродинамические коэффициенты  $k_{\text{авр.н.}}$  и  $k_{\text{авр.з.}}$  равными соответственно +0,8 и —0,4. Тогда

$$p_g \approx 0,6 \rho_n \vartheta_n^2 \quad (2.6)$$

Для расчета инфильтрации точность этой формулы достаточна. Для расчета аэрации необходимо располагать данными об аэродинамических коэффициентах для всех аэрационных отверстий  $k_i$ . Их значения принимаются по справочной литерату-

ре или определяются экспериментально. Значение избыточного ветрового давления в произвольной точке  $i$  определится по формуле

$$p_{\partial i} = (k_{\text{аэр.}i} - k_{\text{аэр.мин}}) \frac{\rho_n g_n^2}{2} \quad (2.7)$$

где  $k_{\text{аэр.}i}$  и  $k_{\text{аэр.мин}}$  — аэродинамический коэффициент соответственно в точке  $i$  и минимальный для рассматриваемого здания.

Здесь для простоты рассмотрен случай, когда величина  $k_i$  постоянна по высоте, однако все выводы могут быть распространены и на случаи изменяющихся по фасаду аэродинамических коэффициентов.

#### 1.4. Эпюры давления при совместном действии на здание ветра и гравитационных сил

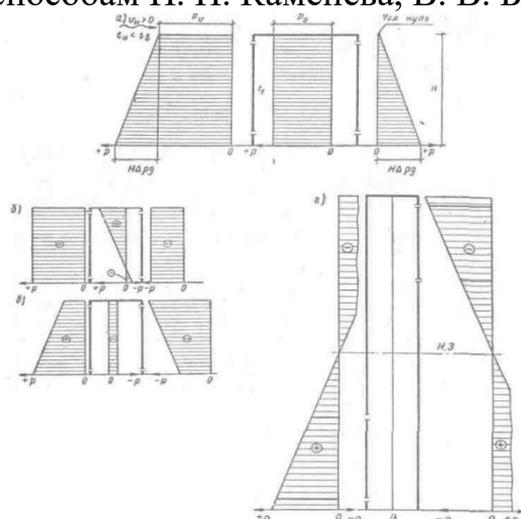
Суммарные эпюры давления получаем, складывая эпюры на рисунке 2.1, *a* и 2.2, *б*. Суммарная эпюра давления (рисунок 2.3, *a*) с наветренной стороны здания имеет форму трапеции. Верхнее основание ее  $p_{\partial}$  нижнее  $H\Delta\rho g + p_{\partial}$ . С заветренной стороны суммарная эпюра давления — треугольник с основанием  $H\Delta\rho g$ . Внутри помещения избыточное давление постоянно по высоте и равно  $p_o$ . Величина  $p_o$  определяется решением уравнения баланса воздуха в помещении.

В общем случае для определения расчетного избыточного давления снаружи здания, имеющего  $n$  отверстий, необходимы следующие данные: температура наружного и внутреннего воздуха, скорость ветра, расстояния от центра отверстий до верха здания  $h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_n$ , аэродинамические коэффициенты у наружной поверхности здания в местах расположения отверстий  $k_{\text{аэр}1}, k_{\text{аэр}2}, \dots, k_{\text{аэр}i}, \dots, k_{\text{аэр}n}$ .

Избыточное давление снаружи здания на уровне центра отдельных отверстий

$$p_i = h_i \Delta\rho g + (k_{\text{аэр.}i} - k_{\text{аэр.мин}}) \frac{\rho_n g_n^2}{2} \quad (2.8)$$

На рисунке 2.53 *б, в, г* показаны суммарные эпюры давления, построенные соответственно по способам П. Н. Каменева, В. В. Батурина и «нейтральной зоны».



*a* — построенные относительно условного нуля; *б* — построенные по способу П. Н. Каменева; *в* — построенные по способу В. В. Батурина; *г* — построенные по способу «нейтральной зоны».

Рисунок 2.3 Расчетные эпюры давления при совместном действии на здание динамических и гравитационных сил

## *Практическое занятие №2*

- 2.1 Обеспеченность расчетных условий
- 2.2 Характеристика климата холодного периода года
- 2.3 Защитные свойства наружных ограждений

### **2.1 Обеспеченность расчетных условий**

Зимний и летний периоды особенно напряженные для работы систем кондиционирования микроклимата и наружных ограждающих конструкций. Наиболее холодные зимние и жаркие летние дни являются определяющими при расчете тепловой и охлаждающей мощности систем и защитных свойств ограждения.

В холодное время года наружные ограждения защищают помещения от воздействия низких температур, ветра и позволяют с помощью системы отопления поддерживать необходимую тепловую обстановку. Решая задачу отопления зданий, следует рассчитывать обогревающие устройства и ограждения так, чтобы они обеспечивали необходимые тепловые условия в помещении в течение всего отопительного периода. Необходимая температурная обстановка в помещении должна выдерживаться при наличии холодных или нагретых поверхностей и неравномерности температуры и подвижности воздуха в объеме помещения. Наибольшие разница температур и подвижность воздуха в помещении наблюдаются в самый холодный период зимы. Если наружные ограждения и система отопления обеспечат расчетные параметры микроклимата в этот период, то необходимые тепловые условия при правильном регулировании будут соблюдены в течение всего отопительного периода.

Расчетные тепловые условия в помещении назначаются в зависимости от его функционального назначения и санитарно-гигиенических требований. Для большинства жилых и общественных зданий эти условия приблизительно одинаковы. В промышленных производствах можно выделить несколько групп помещений, условия в которых назначаются также приблизительно одинаковыми.

Однако кроме санитарно-гигиенических и технологических требований, определяющих внутренние тепловые условия, которые должны быть выдержаны в течение отопительного периода, важным во всех случаях является вопрос о степени обеспеченности заданных внутренних условий.

В таких зданиях, как больницы, родильные дома, детские ясли, а также в некоторых цехах с жесткими технологическими режимами требуется высокая степень обеспеченности заданных тепловых условий. Эти условия должны выдерживаться в них при любых погодных условиях, какие могут быть в районе строительства. В зданиях общего назначения (жилые дома, общежития, залы музеев, книгохранилища и т. д.) возможны разовые кратковременные отклонения от заданных (расчетных) условий. В зданиях второстепенного назначения, периодически функционирующих, с кратковременным пребыванием людей (торговые и выставочные залы, залы ожидания для пассажиров и др.) степень обеспеченности расчетных внутренних условий может быть еще более низкой. Таким образом, для помещений различного назначения должны быть заданы не только расчетные внутренние условия, но и показатели степени их обеспеченности.

Чтобы выполнить необходимые требования обеспеченности заданных внутренних условий, необходимо правильно определить теплозащитные качества ограждений, тепловую мощность системы отопления на основе расчета, отправным моментом в котором будут расчетные наружные условия. Выбор расчетных параметров наружного климата связан с обеспечением заданных внутренних условий. Таким образом, есть возможность требование обеспеченности заданных внутренних условий учесть при выборе параметров наружного климата.

Наиболее холодные периоды каждой зимы принимают за «случай» при выборе расчетных наружных параметров, отвечающих определенной степени обеспеченности их появления. В качестве показателя обеспеченности заданных внутренних условий принимают показатель обеспеченности расчетных параметров наружного климата. Обеспеченность- условий оценивают коэффициентом обеспеченности  $K_{об.п.}$ , показывающим (в долях единицы или процентах) число случаев  $n$ , при которых недопустимо отклонение от расчетных условий. Зная  $K_{об.п.}$ , можно сказать, в скольких случаях (в процентах или долях) невозможно отклонение от расчетных условий. Принятые к рассмотрению случаи связаны с определенной продолжительностью во времени, так как они характеризуются параметрами срочных наблюдений, осредненных за сутки или за период другой продолжительности. Поэтому с их помощью можно определить коэффициент обеспеченности  $K_{об.п.}$  по продолжительности возможных отклонений  $\Delta z$ . Сопоставление наружных расчетных условий, определенных при некотором значении  $K_{об.п.}$ , с параметрами климата в наиболее суровый период позволяет выяснить степень и продолжительность наибольшего разового отклонения наружных условий от расчетных.

Обрабатывая результаты метеорологических наблюдений с учетом заданного коэффициента обеспеченности, можно получить все данные о возможных, вызываемых внешними воздействиями отклонениях условий в помещении от расчетных (число отклонений, их общую продолжительность, степень и продолжительность наиболее невыгодного разового отклонения).

Влияние наружного климата на тепловой режим ограждений и помещений комплексное. Оно определяется совместным действием нескольких метеорологических параметров, которые раздельно наблюдаются метеорологами. При расчете передачи тепла через ограждения действие этих параметров необходимо учитывать совместно: для зимы определяющими параметрами климата, например, являются температура наружного воздуха  $t_n$  и скорость ветра  $v_n$ . В некоторых расчетах дополнительно к ним следует учитывать относительную влажность  $\varphi_n$  и энтальпию  $I_n$  наружного воздуха, а также солнечную радиацию, направление ветра, осадки. Некоторые из этих параметров связаны между собой, и изменение одного из них сопровождается определенным изменением другого. Например, похолодание для большинства районов страны с континентальным климатом связано с понижением скорости ветра.

Задача определения расчетных наружных условий зимой в основном сводится к определению расчетного сочетания зависимых событий — изменению  $t_n$  и  $v_n$ . с учетом заданного коэффициента обеспеченности.

## 2.2 Характеристика климата холодного периода года

При выборе расчетных характеристик климата холодного периода года нужно исходить из следующих предпосылок.

Параметры наружного климата должны быть общими для расчета всех составляющих теплового режима (теплозащиты ограждений, потерь тепла и др.), так как они отражают единый процесс обмена теплом в здании. Параметры следует определять с учетом коэффициента обеспеченности, их должно быть достаточно для расчета нестационарной теплопередачи через ограждения, характерной для расчетных зимних условий.

Основной показатель холодного периода года — изменение температуры воздуха  $t_n$ . Для ряда климатических районов с учетом различных коэффициентов обеспеченности построены расчетные кривые изменения температуры наружного воздуха в период резкого похолодания. Для различных районов они имели характерную и близкую по очертанию форму (рисунок 4.1): сравнительно медленное равномерное понижение температуры до начала периода резкого похолодания, затем резкое понижение температуры с последующим повышением.

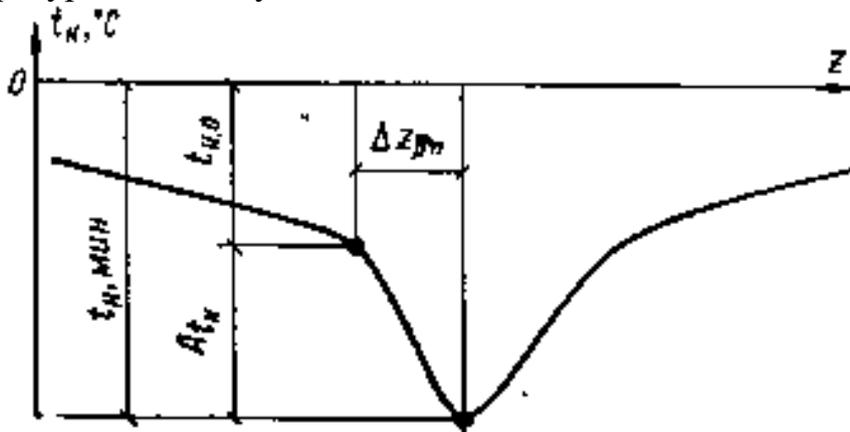


Рисунок 4.1 Характерная кривая изменения температуры наружного воздуха зимой в период резкого похолодания

При медленном понижении температуры, как это наблюдается на начальном участке кривой, распределение температуры в сечении ограждения в каждый момент времени практически соответствует стационарному. При быстром похолодании процесс теплопередачи через ограждение становится нестационарным, и для его расчета нужно иметь полную характеристику изменения температуры. В период резкого похолодания расчетные кривые для различных географических районов и при разных коэффициентах обеспеченности могут быть определены тремя параметрами: температурой начала периода резкого похолодания  $t_{n,0}$ , амплитудой  $A_{t_n}$  изменения температуры в этот период от  $t_{n,0}$  до минимальной температуры  $t_{n,\text{мин}}$ :  $A_{t_n} = t_{n,0} - t_{n,\text{мин}}$  и продолжительностью периода резкого похолодания  $\Delta z_{\text{р.п}}$  (время понижения температуры от  $t_{n,0}$  до  $t_{n,\text{мин}}$ ). Эти показатели для Москвы при разных  $K_{об}$  приведены в таблица 4. 1.

Коэффициент обеспеченности $K_{об}$	Расчетные характеристики климата		
	$t_{н.о}'$ , °C	$A_{t_n}$ , °C	$v_H$ , м/с
0,98	-26,4	15,8	2,6
0,9	-21,5	14,9	3
0,7	-17,2	14,6	3,4
0,5	-13,9	15,8	3,8

Примечание.  $\Delta z_{p,n}=3$  сут.

Таблица 4.1. Характеристики климата в холодный период года в Москве при разных коэффициентах обеспеченности

В условиях Москвы  $\Delta z_{p,n}$  и  $A_{t_n}$  практически не зависят от коэффициента обеспеченности и могут быть приняты постоянными:  $\Delta z_{p,n}=3$  сут;  $A_{t_n} = 15^\circ \text{C}$ .

Для получения расчетных скоростей ветра следует брать наиболее невыгодные сочетания  $t_n$  и  $v_n$ , так как эта зависимость определяет наибольшие скорости, которые наблюдались при различных температурах. Зависимость  $v_n = f(t_n)$  для Москвы на высоте  $H$  м от земли имеет вид

$$v_H = 8,03 + 0,143t_n + 0,03(H - 2). \quad (4.1)$$

В пределах города, как показывают измерения, скорость ветра начиная с 2 м от поверхности земли возрастает с высотой практически по линейному закону. В частности, в Москве на каждый метр высоты скорость увеличивается в среднем на 0,03 м/с. Численные значения  $v_H$  в Москве на высоте 2 м от земли, определенные для средней температуры периода резкого похолодания и разных коэффициентов обеспеченности, приведены в табл. 4.1. Эти скорости расчетные.

В гл. СП приняты три значения расчетной наружной температуры для каждого географического района: абсолютный минимум  $t_{н.мин}$ , средняя температура наиболее холодных суток  $t_{н.1}$  и средняя температура наиболее холодной пятидневки  $t_{н.5}$ . Две последние температуры определены по восьми суровым зимам последних пятидесяти лет. Выбор расчетной температуры зависит от степени тепловой массивности ограждения. В качестве показателя тепловой массивности ограждения принята величина  $D$ , рассчитанная для правильных колебаний с периодом  $T = 24$  ч. Расчетные температуры наружного воздуха принимают в зависимости от  $D$  в соответствии с данными табл. 4.2.

Таблица 4.2 Значения расчетной температуры наружного воздуха

Степень тепловой массивности ограждения	Показатель тепловой массивности $D$	Температура наружного воздуха, $^\circ\text{C}$ принимаемая за расчетную
Особо легкое	$< 1,5$	$t_{н.мин}$
Легкое	1,5—4	$t_{н.1}$
Среднее	4—7	$\frac{t_{н.1} + t_{н.5}}{2}$
Массивное	$> 7$	$t_{н.5}$

Расчетную скорость ветра по СП принимают равной максимальной скорости из средних скоростей ветра по румбам за январь, повторяемость которых составляет 16% и более, с корректировкой на высоту здания.

Отопление в течение всего холодного периода года должно обеспечивать расчетные тепловые условия. Продолжительность отопительного периода зависит от географического района, в котором расположено здание, и от соотношений составляющих его теплового баланса. Начало и конец работы систем отопления связаны с появлением дефицита (недостатка) тепла в тепловом балансе помещения. Годовые затраты тепла на отопление зависят от продолжительности  $n_{o,п}$  и средней температуры  $t_{o,п}$  (определяются градусоднями) отопительного периода, т. е. периода, когда наружная температура устойчиво становится ниже температуры начала и конца отопительного периода.

Продолжительность периода, в течение которого температура наружного воздуха держится примерно постоянной, разная. Наиболее устойчива погода с температурой около  $0^{\circ}\text{C}$ . Дней с низкими температурами, близкими к расчетной, сравнительно мало.

Значительное влияние на тепловой баланс помещения, а следовательно на режим работы систем отопления, особенно в весенний период, оказывает солнечная радиация. При выборе схем и режима регулирования отопления ее влияние необходимо учитывать. Это особенно существенно для зданий, расположенных в средних и южных районах страны, а также для систем отопления с пофасадным регулированием. Наружный воздух в результате инфильтрации через проемы и неплотности ограждений попадает в здание, поэтому изменение его энтальпии и влажности также необходимо принимать во внимание при проектировании систем обеспечения заданного теплового режима здания. В то же время для многих зданий, особенно жилых и общественных, составляющие теплового баланса оказываются близкими, поэтому в нормах начало и конец отопительного периода для всех зданий приняты одинаковыми, соответствующими  $t_{н-оп} = 8^{\circ}\text{C}$ . Значения  $t_{o,п}$  и  $n_{o,п}$  для разных географических пунктов приведены в таблицах характеристик наружного климата главы СП «Строительная климатология».

### 2.3 Защитные свойства наружных ограждений

Ограждения здания должны обладать требуемыми теплозащитными свойствами и быть в определенной мере воздухо- и влагопроницаемыми.

Теплозащитные свойства наружных ограждений определяют двумя показателями: сопротивлением теплопередаче  $R_0$  и теплоустойчивостью, которую оценивают по тепловой массивности ограждения  $D$ . Величина  $R$  определяет сопротивление ограждения передаче тепла в стационарных условиях, а теплоустойчивость характеризует сопротивляемость ограждения передаче изменяющихся во времени периодических тепловых воздействий.

В зимних условиях теплозащитные свойства ограждений принято характеризовать в основном величиной  $R_0$ , а в летних — их теплоустойчивостью. Это объясняется тем, что для зимы характерны устойчивые температуры вне здания и постоянные внутренние температуры, которые обеспечивает система отопления. Летом характерны периодические суточные изменения температуры и солнечной радиации, внутри здания температура часто не регулируется.

Наиболее важно определение расчетного сопротивления теплопередаче  $R_0$  основной части (глади) конструкции ограждения, с которого обычно и начинают теплотехнический расчет ограждения. Необходимым является условие, чтобы  $R_0$  было равно или больше минимально допустимого по санитарно-гигиеническим соображениям (или требуемого) сопротивления теплопередаче  $R_{0,тр}$ :

$$R_0 \geq R_{0,тр} \quad (4.2)$$

Это условие необходимое, но не достаточное, так как при определении  $R_0$  следует учитывать технико-экономические показатели. Если экономически оптимальное сопротивление теплопередаче

$$R_{0,опт} > R_{0,тр} \quad (4.3)$$

то расчетное сопротивление следует определять по условию

$$R_0 \approx R_{0,опт} \quad (4.4)$$

В этом случае сопротивление  $R_0$  больше минимально допустимого  $R_{0,тр}$  и целесообразно в экономическом отношении.

После определения  $R_0$  глади ограждения необходимо проверить теплозащитные свойства элементов конструкции (стыков, углов, теплопроводных включений). Необходимым и достаточным условием этого расчета является отсутствие выпадения конденсата на поверхности конструкций. Для расчета теплотерь и тепловых условий в помещении часто нужно кроме  $R_0$  рассчитать и приведенное сопротивление теплопередаче ограждения  $R_{0,пр}$ . Для зданий, расположенных в южных районах, дополнительно проверяют теплоустойчивость ограждений в расчетных летних условиях. Недостаточную теплоустойчивость ограждения для зимнего периода года компенсируют увеличением его сопротивления теплопередаче при расчете  $R_{0,тр}$ .

Теплозащитные свойства заполнения оконных и дверных проемов регламентируют только сопротивлением теплопередаче этих конструкций, которое должно быть не ниже требуемого, установленного в СП.

Допустимую воздухопроницаемость окон, дверей, стыков конструкций, стен и перекрытий здания определяют нормируемыми значениями сопротивления воздухопроницанию  $R_{и,тр}$ , расхода воздуха, дополнительных затрат тепла, понижения температуры конструкции при инфильтрации.

Влагозащитные свойства ограждения включают в себя также свойства конструкции защищать материалы от переувлажнения атмосферной влагой и водяными парами в результате их диффузии из помещения.

Процессы передачи тепла, фильтрации воздуха и переноса влаги взаимосвязаны, поэтому определение тепло-, воздухо- и влагозащитных свойств в ограждении является общим расчетом защитных свойств наружных ограждений здания.

### *Практическое занятие №3*

3.1 Подача тепла в помещение и локализация действия источников холода

3.2 Летние характеристики климата

3.3 Поступление тепла через наружные ограждения и тепловой режим помещения

#### **3.1 Подача тепла в помещение и локализация действия источников холода**

Комфортность тепловой обстановки в помещении зависит не только от количества поступающего тепла, но и от способа и места установки нагревательного прибора в помещении и его конструкции. Нагревательные приборы, компенсируя теплопотери, одновременно выполняют роль локализаторов источников холода в помещении. Нагретая поверхность прибора и струя теплового воздуха над ним предупреждают радиационное переохлаждение и попадание холодных токов воздуха в обслуживаемую зону помещения.

Условия, при которых все наружные ограждения равномерно обогревались бы и поверхности помещений не охлаждались, трудноосуществимы. Хорошие тепловые условия в помещении создаются, когда приборы отопления расположены под окнами и вдоль наружной стены. Обслуживаемая зона помещения, особенно у пола, которая подвержена переохлаждению ниспадающими потоками холодного воздуха, в этом случае защищается в тепловом отношении наиболее эффективно.

#### *Локализация ниспадающих холодных потоков воздуха*

Около нагревательного прибора теплый поток воздуха поднимается вверх навстречу холодному ниспадающему потоку вдоль окна или холодной поверхности стены. На некоторой высоте над прибором струи воздуха смешиваются и продолжают движение от поверхности в помещение.

Для расчета локализации ниспадающих потоков воздуха нужно определить начальные параметры струи, возникающей над отопительным прибором.

#### *Защита помещения от радиационного переохлаждения*

Комфортность тепловой обстановки в помещении в большой мере зависит от температуры поверхностей и наружных ограждений.

Допустимую температуру окна можно определить, используя требование второго условия комфортности, которое определяет теплоотдачу излучением  $q_{\text{ч}}^{\text{л}}$  с поверхности тела человека, находящегося в области холодной поверхности, что дает возможность связать геометрические размеры и температуру поверхности окна. Зная минимально допустимую температуру поверхности остекления, можно правильно выбрать необходимое сопротивление оконного проема.

Уравнение баланса лучистого теплообмена  $q_{\text{ч}}^{\text{л}}$  на поверхности человека, стоящего около окна, и нагревательного прибора под ним (рисунок 4.2) может быть составлено по аналогии с уравнением (1.23).

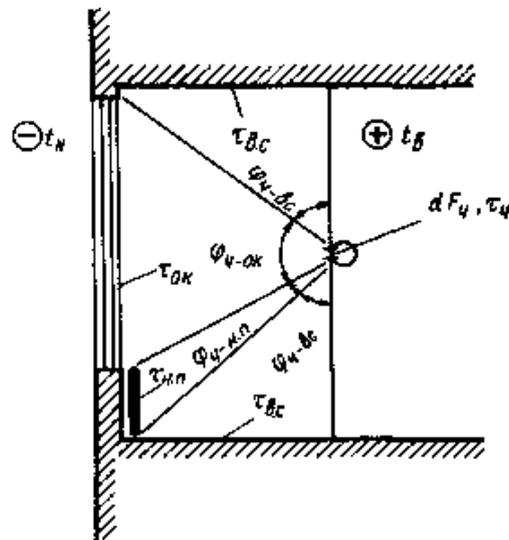


Рисунок 4.2. Лучистый теплообмен элементарной площади на поверхности головы человека, стоящего у окна, под которым расположен нагревательный прибор

Искомая температура поверхности окна в результате оказывается равной

$$\tau_{\text{ок}} = 14 - \left( \frac{q_{\text{ч}}^{\text{л}}}{4,52} - 17 \right) \frac{1}{\varphi_{\text{ч.ок}}}; \quad (4.5)$$

Здесь  $\tau_{\text{ок}}$  зависит от коэффициента облученности от человека в сторону окна  $\varphi_{\text{ч.ок}}$  и величины  $q_{\text{ч}}^{\text{л}}$ .

Допустимая величина  $q_{\text{ч}}^{\text{л}}$  при расстоянии от человека до окна 1 м (на границе обслуживаемой зоны помещения) может быть принята равной 93 Вт/м<sup>2</sup> [80 ккал/(м<sup>2</sup>·ч)], а  $\tau_{\text{ок}}$  — по (4.5):

$$\tau_{\text{ок}} \geq \tau_{\text{ок}}^{\text{доп}} = 14 - 4,4/\varphi_{\text{ч.ок}}. \quad (4.6)$$

Это уравнение, определяющее допустимую температуру внутренней поверхности окна, является одним из составляющих второго условия комфортности. Во многих случаях может оказаться целесообразным развить поверхность или увеличить температуру подоконного прибора при слабой теплозащите или большой площади поверхности окна. Уравнение для  $\tau_{\text{ок}}^{\text{доп}}$  с учетом нагревательного прибора по схеме рисунок 4.2 имеет вид

$$\tau_{\text{ок}} = 14 - \frac{4,4}{\varphi_{\text{ч.ок}}} - (1,27\tau_{\text{пр}} - 22,6) \frac{\varphi_{\text{ч.пр}}}{\varphi_{\text{ч.ок}}} \quad (4.7)$$

Приведенными выше данными можно пользоваться для расчета нагревательного прибора как из условия локализации ниспадающих холодных потоков воздуха, так и из условия уменьшения излучения на холодную поверхность. В современных зданиях архитекторы часто стремятся облегчить конструкцию окна и максимально развить его площадь, что противоречит требованиям сокращения теплопотерь и поддержания комфортности тепловой обстановки в обслуживаемой зоне помещения. Однако в некоторых случаях такие тенденции архитекторов эстетически оправданы, поэтому задача инженеров по отоплению и вентиляции состоит в обеспечении и в этих случаях необходимой комфортности тепловой обстановки в помещении.

Частные вопросы проектирования теплового режима здания применительно к зимним условиям подробно рассмотрены в Справочнике проектировщика.

### 3.2 Летние характеристики климата

Теплый период года более благоприятный по комфортности тепловых условий для человека, чем холодный. Однако здания, особенно расположенные в южных районах, в жаркие летние месяцы подвергаются значительному перегреву. В результате создаются резко дискомфортные тепловые условия в закрытых помещениях и в связи с этим большая перенапряженность системы терморегуляции организма человека. В этот период года ограждения с внешней стороны интенсивно облучаются солнцем и омываются нагретым наружным воздухом, они должны защитить помещения от больших поступлений тепла и сильного перегрева в дневные часы. В летний период определяющую роль в режиме зданий играют теплопоступления от солнечной радиации. Суточная ее периодичность является причиной типичного для летнего режима нестационарного характера всех процессов теплообмена.

В то же время тепловой режим помещений должен отвечать определенным требованиям, для удовлетворения которых используют средства тепло- и солнцезащиты зданий в виде теплоустойчивых, орошаемых водой и вентилируемых ограждений, затеняющих устройств солнцезащитных стекол и др. Помещения охлаждают наружным воздухом, используя ночное проветривание и общеобменную систему вентиляции. В лучшем случае тепловой режим в помещениях регулируют с помощью систем кондиционирования воздуха, панельно-лучистом охлаждении и т. д. Следует стремиться максимально использовать для борьбы с перегревом здания рациональные конструктивно-планировочные решения и организованное проветривание, что мало отражается на общей стоимости здания. Применение систем кондиционирования воздуха целесообразно в зданиях повышенной комфортности, но в любом случае оно должно быть обосновано расчетом теплового режима помещений.

При проектировании зданий и устройств регулирования микроклимата предварительно выявляют возможный тепловой режим при различных мерах его обеспечения и выбирают экономически целесообразный вариант решения, обеспечивающий заданные условия.

Последовательность решения поставленной задачи такова. Устанавливают расчетные (допустимые или оптимальные) внутренние тепловые условия и коэффициент их обеспеченности. С учетом последнего выбирают расчетные характеристики наружного воздуха. Рассчитывают естественный тепловой режим помещений при различных конструктивно-планировочных мерах тепловой защиты и проветривания. Устанавливают удовлетворительность полученного результата для поддержания расчетных внутренних условий или необходимость в устройстве системы кондиционирования воздуха. Определяют расчетный режим систем кондиционирования, который обеспечит оптимальные условия в помещении.

Жаркий период года определяется прежде всего интенсивностью солнечной радиации и температурой наружного воздуха. При расчете систем кондиционирования необходимо, кроме того, иметь полную характеристику тепловлажностного состояния наружного воздуха.

Летние наружные условия должны быть определены при наиболее невыгодном сочетании характеристик климата, выбранных с различной обеспеченностью для расчетного наиболее жаркого периода. За расчетный летний период принимают наиболее жаркие летние сутки.

В соответствии с главой СП «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха», расчетные внутренние условия в помещении должны обеспечиваться системами вентиляции и кондиционирования воздуха в пределах расчетных параметров категорий климата *A* и *B*.

### 3.3 Поступление тепла через наружные ограждения и тепловой режим помещения

Передачу тепла через стены и покрытия (массивные, непрозрачные ограждения обозначаются индексом 1) рассчитывают как гармонически изменяющийся тепловой процесс, характеризуемый тремя параметрами: среднесуточными значениями (индекс 0), например теплового потока, амплитудой колебания и временем наступления максимума.

Основная часть всех теплоступлений зависит от количества прямой  $S$  и рассеянной  $D$  солнечной радиации, поступающей на поверхности различной ориентации. Общие теплоступления (теплотери) в помещение в теплый период года складываются из поступления тепла через ограждения  $Q_{огр}$ , тепла, обычно ассимилируемого с воздухом систем вентиляции и кондиционирования воздуха  $Q_{вент}$ , из технологических и бытовых тепловыделений  $Q_{техн}$ .

Средние за сутки характеристики теплового режима помещения определяются условиями стационарной теплопередачи. Средний за сутки тепловой баланс помещения может быть представлен в виде алгебраической суммы средних за сутки (индекс 0) составляющих:

Температура воздуха помещения, в том числе и средняя за сутки, отличается от средней температуры поверхностей на тот перепад, который обеспечивает передачу суммарного количества конвективного тепла  $Q_{к.о}$  от поверхностей к воздуху и от воздуха к поверхностям.

Естественный тепловой режим, который установится в помещении при расчетных параметрах наружного воздуха с учетом проветривания и конструктивно-планировочных мер защиты помещения от перегрева. Известны теплозащитные качества ограждений, ориентация здания, солнцезащитные устройства, бытовые и технологические тепловыделения, производительность и режим работы общеобменной вентиляции. Следует определить естественный тепловой режим помещения при заданных условиях, в том числе вентиляции, или выяснить необходимый воздухообмен для поддержания расчетных допустимых условий микроклимата.

Таким образом, изменения во времени всех тепловых воздействий на помещение могут быть представлены в виде правильных гармоник или прерывистых поступлений. Переменный естественный тепловой режим помещения достаточно характеризовать средним значением и изменением температуры помещения.

Если конструктивно-планировочное решение и вентилирование не обеспечивают условия в помещении, отвечающие заданным требованиям, то необходимо применить систему кондиционирования воздуха. Рассмотренный метод анализа естественного теплового режима помещения в связи с этим можно назвать *способом определения условий, при которых необходим переход от общеобменной вентиляции к системе регулируемого кондиционирования микроклимата*.

## *Практическое занятие №4*

- 4.1 Система отопления
- 4.2 Классификация систем отопления
- 4.3 Теплоносители в системах отопления
- 4.4 Основные виды систем отопления

### 4.1 Система отопления

В зависимости от преобладающего способа теплопередачи отопление помещений может быть конвективным или лучистым.

**К конвективному** относят отопление, при котором температура внутреннего воздуха  $t_e$  поддерживается на более высоком уровне, чем радиационная температура помещения  $t_R$  ( $t_e > t_R$ ), понимая под радиационной усредненную температуру поверхностей, обращенных в помещение, вычисленную относительно человека, находящегося в середине этого помещения. Это широко распространенный способ отопления.

**Лучистым** называют отопление, при котором радиационная температура помещения превышает температуру воздуха ( $t_R > t_e$ ). Лучистое отопление при несколько пониженной температуре воздуха (по сравнению с конвективным отоплением) более благоприятно для самочувствия человека в помещении (например, до 18-20 °С вместо 20-22 °С в помещениях гражданских зданий).

Конвективное или лучистое отопление помещений осуществляется специальной технической установкой, называемой системой отопления. **Система отопления** - это совокупность конструктивных элементов со связями между ними, предназначенных для получения, переноса и передачи теплоты в обогреваемые помещения здания.

### 4.2 Классификация систем отопления

Системы отопления *по расположению основных элементов* подразделяются на местные и центральные.

**В местных** системах для отопления, как правило, одного помещения все три основных элемента конструктивно объединяются в одной установке, непосредственно в которой происходит получение, перенос и передача теплоты в помещение. Теплопереносная рабочая среда нагревается горячей водой, паром, электричеством или при сжигании какого-либо топлива.

Примером местной системы является газоздушный отопительный агрегат (рис. 1.3), применяемый, в частности, для отопления производственных помещений большого объема. Тепловая энергия, получаемая при сжигании газообразного топлива в горелке, передается в поверхностном теплообменнике теплоносителю - воздуху, нагнетаемому вентилятором. Горячий воздух по теплопроводам (каналам) выпускается в помещение после очистки в фильтре. Охлаждающиеся продукты сгорания газа удаляются через дымоход в атмосферу.

Еще одним примером местной системы отопления могут служить отопительные печи, конструкции и расчет которых будут рассмотрели в специальной главе учебника.

В местной системе отопления с использованием электрической энергии теплопередача может осуществляться с помощью жидкого или газообразного теплоносителя либо без него непосредственно от разогретого твердого элемента.

**Центральными** называются системы, предназначенные для отопления группы помещений из единого теплового центра. В тепловом центре находятся теплогенераторы (котлы) или теплообменники. Они могут размещаться непосредственно в обогреваемом здании (в котельной или местном тепловом пункте) либо вне здания - в центральном тепловом пункте (ЦТП), на тепловой станции (отдельно стоящей котельной) или ТЭЦ.

Теплопроводы центральных систем подразделяют на *магистралы* (подающие, по которым подается теплоноситель, и *обратные*, по которым отводится охладившийся теплоноситель), *стояки* (вертикальные трубы или каналы) и *ветви* (горизонтальные трубы или каналы), связывающие магистралы с *подводками* к отопительным приборам (с ответвлениями к помещениям при теплоносителе воздухе).

Примером центральной системы является система отопления здания с собственным тепловым пунктом или котельной, принципиальная схема которой не будет отличаться от схемы на рис. 1.1, если отопительные приборы размещены во всех обогреваемых помещениях этого здания.

Центральная система отопления называется **районной**, когда группа зданий отапливается из отдельно стоящей центральной тепловой станции. Теплогенераторы, теплообменники и отопительные приборы системы здесь также разделены: теплоноситель (например, вода) нагревается на тепловой станции, перемещается по наружным (с температурой  $t_i$ ) и внутренним (внутри здания, с температурой  $t_r < t_i$ ) теплопроводам в отдельные помещения каждого здания к отопительным приборам и, охладившись, возвращается на тепловую станцию (рис. 1.4) к ЦТП или непосредственно к местным тепловым пунктам зданий и обратно. Вторичный теплоноситель после нагревания в теплообменниках (или смешения с первичным) поступает по наружным (внутриквартальным) и внутренним теплопроводам к отопительным приборам обогреваемых помещений зданий и затем возвращается в ЦТП или местный тепловой пункт.

Первичным теплоносителем обычно служит вода, реже пар или газообразные продукты сгорания топлива. Если, например, первичная высокотемпературная вода нагревает вторичную воду, то такая центральная система отопления именуется водоводяной. Аналогично могут существовать водовоздушная, пароводяная, паровоздушная, газовоздушная и другие системы центрального отопления.

По виду основного (вторичного) теплоносителя местные и центральные системы отопления принято называть системами *водяного*, *парового*, *воздушного* или *газового* отопления.

### 4.3 Теплоносители в системах отопления

Движущаяся среда в системе отопления - теплоноситель - аккумулирует теплоту и затем передает ее в обогреваемые помещения. Теплоносителем для отопления может быть подвижная, жидкая или газообразная среда, соответствующая требованиям, предъявляемым к системе отопления.

Для отопления зданий и сооружений в настоящее время преимущественно используют воду или атмосферный воздух, реже водяной пар или нагретые газы.

Сопоставим характерные свойства указанных видов теплоносителя при использовании их в системах отопления.

Газы, образующиеся при сжигании твердого, жидкого или газообразного органического топлива, имеют сравнительно высокую температуру и применимы в тех случаях, когда в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями удастся ограничить температуру теплоотдающей поверхности отопительных приборов. При транспортировании горячих газов имеют место значительные попутные теплопотери, обычно бесполезные для обогрева помещения.

Высокотемпературные продукты сгорания топлива могут выпускаться непосредственно в помещения или сооружения, но при этом ухудшается состояние их воздушной среды, что в большинстве случаев недопустимо. Удаление же продуктов сгорания наружу по каналам усложняет конструкцию и понижает КПД отопительной установки. При этом возникает необходимость решения экологических проблем, связанных с возможным загрязнением атмосферного воздуха продуктами сгорания вблизи отапливаемых объектов.

Область использования горячих газов ограничена отопительными печами, газовыми калориферами и другими подобными местными отопительными установками.

В отличие от горячих газов вода, воздух и пар используются многократно в режиме циркуляции и без загрязнения окружающей здание среды.

Вода представляет собой жидкую, практически несжимаемую среду со значительной плотностью и теплоемкостью. Вода изменяет плотность, объем и вязкость в зависимости от температуры, а температуру кипения - в зависимости от давления, способна сорбировать или выделять растворимые в ней газы при изменении температуры и давления.

Пар является легкоподвижной средой со сравнительно малой плотностью. Температура и плотность пара зависят от давления. Пар значительно изменяет объем и энтальпию при фазовом превращении.

Воздух также является легкоподвижной средой со сравнительно малыми вязкостью, плотностью и теплоемкостью, изменяющей плотность и объем в зависимости от температуры.

Сравним эти три теплоносителя по показателям, важным для выполнения требований, предъявляемых к системе отопления.

Одним из **санитарно-гигиенических** требований является поддержание в помещениях равномерной температуры (см. § 1.1). По этому показателю преимущество перед другими теплоносителями имеет воздух. При использовании нагретого воздуха-теплоносителя с низкой теплоинерционностью - можно постоянно поддерживать равномерную температуру каждого отдельного помещения, быстро изменяя температуру подаваемого воздуха, т.е. проводя так называемое *эксплуатационное регулирование*. При этом одновременно с отоплением можно обеспечить вентиляцию помещений.

Применение в системах отопления горячей воды также позволяет поддерживать равномерную температуру помещений, что достигается регулированием температуры, подаваемой в отопительные приборы воды. При таком регулировании тем-

пература помещений все же может несколько отклоняться от заданной (на 1 -2 °С) вследствие тепловой инерции масс воды, труб и приборов.

При использовании пара температура помещений неравномерна, что противоречит гигиеническим требованиям. Неравномерность температуры возникает из-за несоответствия теплопередачи приборов при неизменной температуре пара (при постоянном давлении) изменяющимся теплотерям помещения в течение отопительного сезона. В связи с этим приходится уменьшать количество подаваемого в приборы пара и даже периодически отключать их во избежание перегревания помещений при уменьшении их теплотерь.

Другое **санитарно-гигиеническое** требование - ограничение температуры наружной поверхности отопительных приборов - вызвано явлением разложения и сухой возгонки органической пыли на нагретой поверхности, сопровождающимся выделением вредных веществ, в частности окиси углерода. Разложение пыли начинается при температуре 65-70 °С и интенсивно протекает на поверхности, имеющей температуру более 80 °С.

При использовании пара в качестве теплоносителя температура поверхности большинства отопительных приборов и труб постоянна и близка или выше 100 °С, т.е. превышает гигиенический предел. При отоплении горячей водой средняя температура нагретых поверхностей, как правило, ниже, чем при применении пара. Кроме того, температуру воды в системе отопления понижают для снижения теплопередачи приборов при уменьшении теплотерь помещений. Поэтому при теплоносителе воде средняя температура поверхности приборов в течение отопительного сезона практически не превышает гигиенического предела.

Важным **экономическим** показателем при применении различных теплоносителей является расход металла на теплопроводы и отопительные приборы.

Расход металла на теплопроводы возрастает с увеличением их поперечного сечения. Вычислим соотношение площади поперечного сечения теплопроводов, по которым подаются различные теплоносители для передачи в помещение одинакового количества теплоты.

Видно, что площади поперечного сечения водоводов и паропроводов относительно близки, а сечение воздухопроводов в сотни раз больше. Это объясняется, с одной стороны, значительной теплоаккумуляционной способностью воды и свойством пара выделять большое количество теплоты при конденсации, с другой стороны - малыми плотностью и теплоемкостью воздуха.

При сравнении расхода металла следует также учесть, что площадь поперечного сечения труб для отвода конденсата от приборов в паровой системе - конденсатопроводов значительно меньше площади сечения паропроводов, так как объем конденсата примерно в 1000 раз меньше объема той же массы пара.

Можно сделать вывод, что расход металла как на водоводы, так и на паро- и конденсатопроводы будет значительно меньшим, чем на воздухопроводы, даже если последние выполнить со значительно более толстыми стенками. Кроме того, при большой длине металлических воздухопроводов малотеплоемкий теплоноситель (воздух) сильно охлаждается по пути движения. Этим объясняется, что при дальнем теплоснабжении в качестве теплоносителя используют не воздух, а воду или пар.

Расход металла на отопительные приборы, обогреваемые паром, меньше, чем на приборы, нагреваемые горячей водой, вследствие уменьшения площади приборов при более высоких значениях температуры нагревающей их среды. Конденсация пара в приборах происходит без изменения температуры насыщенного пара, а при охлаждении воды в приборах понижается средняя температура (например, до 110 °С при температуре воды, входящей в прибор, 150 °С и выходящей из прибора 70 °С). Так как площадь нагревательной поверхности приборов обратно пропорциональна температурному напору (разности между средней температурой поверхности прибора и температурой окружающего его воздуха), то при температуре пара 130 °С (см. табл. 1.1) площадь паровых приборов приблизительно (считая коэффициенты теплопередачи приборов равными и принимая температуру помещения - 20 °С) составит  $(\text{ПО} - 20) / (130 - 20) = 0,82$  площади водяных приборов.

В дополнение к известным **эксплуатационным** показателям следует отметить, что из-за высокой плотности воды (больше плотности пара в 600-1500 раз и воздуха в 900 раз) в системах водяного отопления многоэтажных зданий может возникать разрушающее гидростатическое давление. В связи с этим в высотных зданиях в США применялись системы парового отопления.

Воздух и вода до определенной скорости движения могут перемещаться в теплопроводах бесшумно. Частичная конденсация пара вследствие попутных теплопотерь через стенки паропроводов и появления попутного конденсата вызывает шум (щелчки, стуки и удары) при движении пара.

В суровых условиях российской зимы в некоторых случаях рекомендуется использовать в системе отопления специальный незамерзающий теплоноситель - **антифриз**. Антифризами являются водные растворы этиленгликоля, пропиленгликоля и других гликолей, а также растворы некоторых неорганических солей. Любой антифриз является достаточно токсичным веществом, требующим особого с ним обращения. Его использование в системе отопления может привести к некоторым негативным последствиям (ускорение коррозионных процессов, снижение теплообмена, изменение гидравлических характеристик, завоздушивание и др.). В связи с этим, применение антифриза в качестве теплоносителя в каждом конкретном случае должно быть достаточно обоснованным.

В заключение перечислим **преимущества и недостатки** основных теплоносителей для отопления.

При использовании **воды** обеспечивается достаточно равномерная температура помещений, можно ограничить температуру поверхности отопительных приборов, сокращается по сравнению с другими теплоносителями площадь поперечного сечения труб, достигается бесшумность движения в теплопроводах. Недостатками применения воды являются значительный расход металла и большое гидростатическое давление в системах. Тепловая инерция воды замедляет регулирование теплопередачи приборов.

При использовании **пара** сравнительно сокращается расход металла за счет уменьшения площади приборов и поперечного сечения конденсатопроводов, достигается быстрое прогревание приборов и отапливаемых помещений. Гидростатическое давление пара в вертикальных трубах по сравнению с водой минимально. Однако пар как теплоноситель не отвечает санитарно-гигиеническим требованиям, его температура

высока и постоянна при данном давлении, что затрудняет регулирование теплопередачи приборов, движение его в трубах сопровождается шумом.

При использовании **воздуха** можно обеспечить быстрое изменение или равномерность температуры помещений, избежать установки отопительных приборов, совмещать отопление с вентиляцией помещений, достигать бесшумности его движения в воздуховодах и каналах. Недостатками являются его малая теплоаккумулирующая способность, значительные площадь поперечного сечения и расход металла на воздуховоды, относительно большое понижение температуры по их длине.

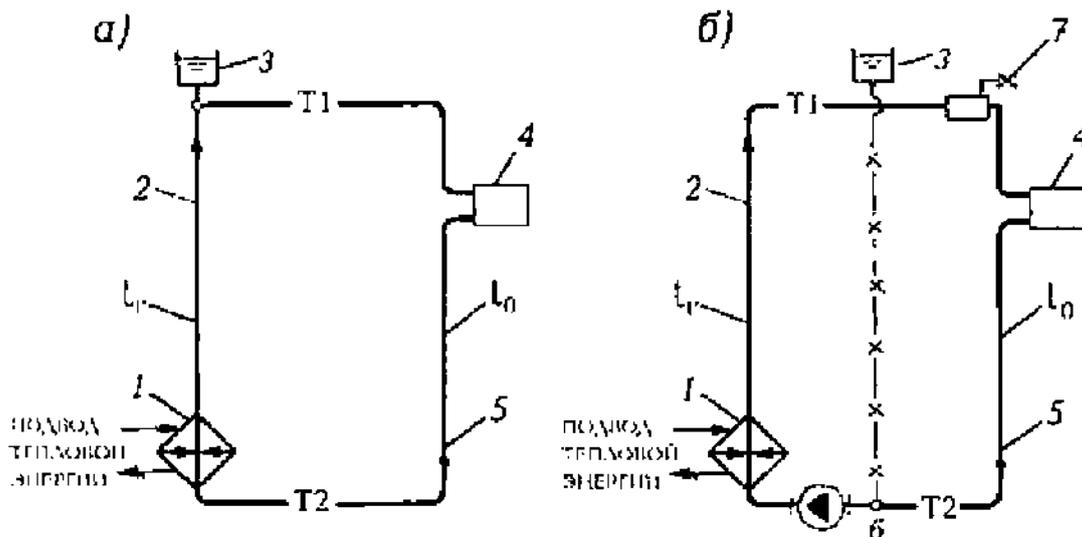
#### 4.4 Основные виды систем отопления

В настоящее время в России применяют центральные системы в основном водяного и, значительно реже, парового отопления, местные и центральные системы воздушного отопления, а также печное отопление в сельской местности. Приведем общую характеристику этих систем (кроме печного отопления) с детальной классификацией на основании рассмотренных свойств теплоносителей.

При **водяном отоплении** циркулирующая нагретая вода охлаждается в отопительных приборах и возвращается к теплоисточнику для последующего нагревания.

Системы водяного отопления *по способу создания циркуляции воды* разделяются на системы с естественной циркуляцией (гравитационные) и с механическим побуждением циркуляции воды при помощи насоса (насосные). В **гравитационной** (лат. *gravitas* - тяжесть) **системе** (рисунок 5.1, *а*) используется свойство воды изменять свою плотность при изменении температуры. В замкнутой вертикальной системе с неравномерным распределением плотности под действием гравитационного поля Земли возникает естественное движение воды.

В **насосной системе** (рисунок 5.1, *б*) используется насос с электрическим приводом для создания разности давления, вызывающей циркуляцию, и в системе создается вынужденное движение воды.



1 - теплообменник; 2 - подающий теплопровод (Т1); 3 - расширительный бак; 4 - отопительный прибор; 5 - обратный теплопровод (Т2); б - циркуляционный насос; 7 - устройство для выпуска воздуха из системы  
а - с естественной циркуляцией (гравитационная); б - с механическим побуждением циркуляции воды (насосная)

Рисунок 5.1. Схемы системы водяного отопления

По температуре теплоносителя различаются системы **низкотемпературные** с предельной температурой горячей воды  $t_r < 70$  °С, **среднетемпературные** при  $t_r$  от 70 до 100 °С и **высокотемпературные** при  $t_r > 100$  °С. Максимальное значение температуры воды ограничено в настоящее время 150°С.

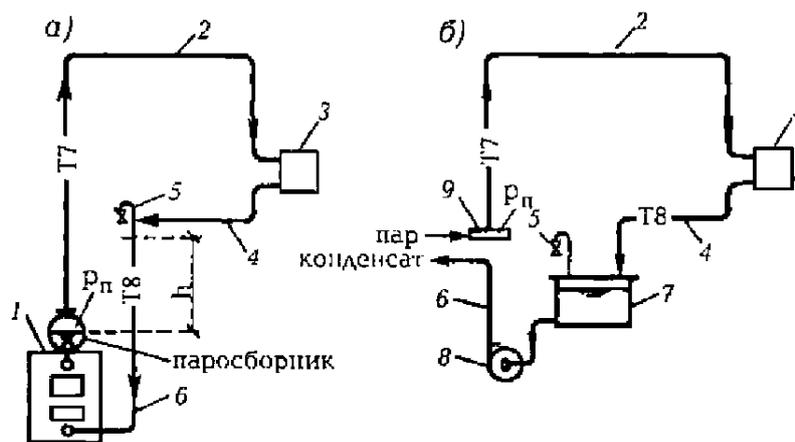
По положению труб, объединяющих отопительные приборы по вертикали или горизонтали, системы делятся на **вертикальные** и **горизонтальные**. В зависимости от схемы соединения труб с отопительными приборами системы бывают **однотрубные** и **двухтрубные**.

В каждом стояке или ветви однотрубной системы отопительные приборы соединяются одной трубой, и вода протекает последовательно через все приборы. Если каждый прибор разделен условно на две части ("д" и "б"), в которых вода движется в противоположных направлениях и теплоноситель последовательно проходит сначала через все части "а", а затем через все части "б", то такая однотрубная система носит название **бифилярной** (двухпоточной).

В двухтрубной системе каждый отопительный прибор присоединяется отдельно к двум трубам - подающей и обратной, и вода протекает через каждый прибор независимо от других приборов.

При **паровом отоплении** в приборах выделяется теплота фазового превращения в результате конденсации пара. Конденсат удаляется из приборов и возвращается в паровой котел.

Системы парового отопления по способу возвращения конденсата в котел разделяются на **замкнутые** (рисунок 5.2, а) с самотечным возвращением конденсата и **разомкнутые** (рисунок 5.2, б) с перекачкой конденсата насосом.



1 - паровой котел с паросборником; 2 - паропровод (Т7); 3 - отопительный прибор; 4 и 5 -самотечный и напорный конденсатопроводы (Т8); б - воздуховыпускная труба; 7 - конденсатный бак; 8 - конденсатный насос; 9 - парораспределительный коллектор  
а - замкнутая схема; б - разомкнутая схема;

Рис. 5.2. Схемы системы парового отопления

В замкнутой системе конденсат непрерывно поступает в котел под действием разности давления, выраженного столбом конденсата высотой  $h$  (см. рис. 5.2, а) и давления пара  $p_p$  в паросборнике котла. В связи с этим отопительные приборы должны находиться достаточно высоко над паросборником (в зависимости от давления пара в нем).

В разомкнутой системе парового отопления конденсат из отопительных приборов самотеком непрерывно поступает в конденсатный бак и по мере накопления

периодически перекачивается конденсатным насосом в котел. В такой системе расположение бака должно обеспечивать стекание конденсата из нижнего отопительного прибора в бак, а давление пара в котле преодолевается давлением насоса.

В зависимости от *давления пара* системы парового отопления подразделяются на **субатмосферные, вакуум-паровые, низкого и высокого давления** (таблица 5.1).

Таблица 5.1. Параметры насыщенного пара в системах парового отопления

Система	Абсолютное давление, МПа	Температура, °С	Удельная теплота конденсации, кДж/кг
Субатмосферная	<0,10	<100	>2260
Вакуум-паровая	<0,11	<100	>2260
Низкого давления	0,105-0,17	100-115	2260 -2220
Высокого давления	0,17- 0,27	115-130	2220 -2175

Максимальное давление пара ограничено допустимым пределом длительно поддерживаемой температуры поверхности отопительных приборов и труб в помещениях (избыточному давлению 0,17 МПа соответствует температура пара приблизительно 130 °С).

В системах субатмосферного и вакуум-парового отопления давление в приборах меньше атмосферного и температура пара ниже 100 °С. В этих системах можно, изменяя величину вакуума (разрежения), регулировать температуру пара.

Теплопроводы систем парового отопления делятся на **паропроводы**, по которым перемещается пар, и **конденсатопроводы** для отвода конденсата.

По паропроводам пар перемещается под давлением  $p_n$  в паросборнике котла (см. рис. 5.2, *а*) или в парораспределительном коллекторе (см. рис. 5.2, *б*) к отопительным приборам.

Конденсатопроводы (см. рис. 5.2) могут быть **самотечными и напорными**. Самотечные трубы прокладывают ниже отопительных приборов с уклоном в сторону движения конденсата. В напорных трубах конденсат перемещается под действием разности давления, создаваемой насосом или остаточным давлением пара в приборах.

В системах парового отопления преимущественно используются двухтрубные стояки, но могут применяться и однотрубные.

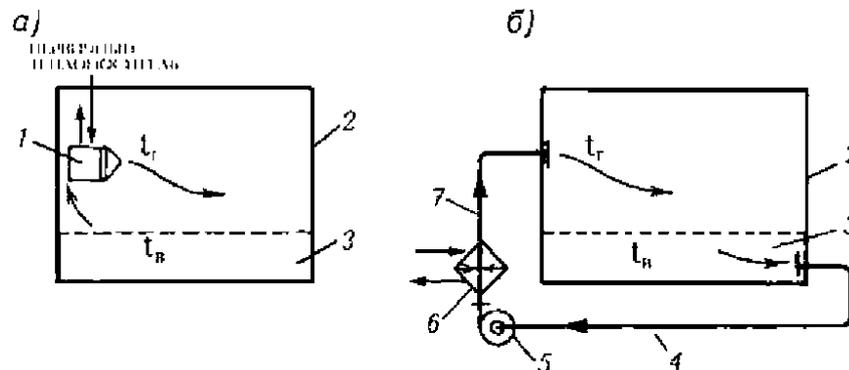
**При воздушном отоплении** циркулирующий нагретый воздух охлаждается, передавая теплоту при смешении с воздухом обогреваемых помещений и иногда через их внутренние ограждения. Охлажденный воздух возвращается к нагревателю.

Системы воздушного отопления *по способу создания циркуляции* воздуха разделяются на системы с **естественной циркуляцией** (гравитационные) и с **механическим побуждением** движения воздуха с помощью вентилятора.

В гравитационной системе используется различие в плотности нагретого и окружающего отопительную установку воздуха. Как и в водяной вертикальной гравитационной системе, при различной плотности воздуха в вертикальных частях возникает естественное движение воздуха в системе. При применении вентилятора в системе создается вынужденное движение воздуха.

Воздух, используемый в системах отопления, нагревается до температуры, обычно не превышающей  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в специальных теплообменниках -калориферах. Калориферы могут обогреваться водой, паром, электричеством или горячими газами. Система воздушного отопления при этом соответственно называется **водовоздушной, паровоздушной, электровоздушной или газовоздушной**.

Воздушное отопление может быть местным (рисунок 5.3, *а*) или центральным (рисунок 5.3, *б*).



- 1 - отопительный агрегат; 2 - обогреваемое помещение (помещения на рис. б);  
 3 - рабочая (обслуживаемая) зона помещения; 4 - обратный воздуховод; 5 - вентилятор;  
 6 - теплообменник (калорифер); 7 - подающий воздуховод  
 а - местная система; б - центральная система;

Рис. 1.7. Схемы системы воздушного отопления

В местной системе воздух нагревается в отопительной установке с теплообменником (калорифером или другим отопительным прибором), находящимся в обогреваемом помещении.

В центральной системе теплообменник (калорифер) размещается в отдельном помещении (камере). Воздух при температуре  $t_s$  подводится к калориферу по **обратному** (рециркуляционному) воздуховоду. Горячий воздух при температуре  $t_r$  перемещается вентилятором в обогреваемые помещения по **подающим** воздуховодам.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Определите климатические условия в течение отопительного сезона в основных регионах территории России.
2. Оцените суровость (число градусо-суток) зимы в Вашем городе по сравнению с условиями в г. Верхоянске.
3. Начертите принципиальную схему теплоснабжения Вашего жилого (учебного) здания.
4. Рассчитайте сравнительный запас тепловой энергии для целей отопления помещения в 1 кг трех основных теплоносителей.
5. Опишите по классификационным признакам систему отопления вашего жилого здания. Чем объясняется распространение водяного отопления в гражданских и воздушного отопления в производственных зданиях?
6. Изобразите стояк и горизонтальную ветвь бифилярной системы водяного отопления.
7. Определите, насколько сократится теплоотдача отопительного прибора в помещении (температура  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), если абсолютное давление насыщенного пара в приборе в одном случае будет  $0,15$ , а в другом -  $0,05$  МПа, т.е. уменьшится в 3 раза.

## *Практическое занятие №5*

- 5.1 Схемы системы насосного водяного отопления
- 5.2 Система отопления с естественной циркуляцией воды
- 5.3 Система водяного отопления высотных зданий
- 5.4 Децентрализованная система водо-водяного отопления

### **5.1 Схемы системы насосного водяного отопления**

Водяное отопление с искусственным побуждением циркуляции воды при помощи насоса - **насосное** водяное отопление - получило самое широкое распространение. Водяное отопление с естественной циркуляцией - **гравитационное** - применяют в настоящее время сравнительно редко.

Практика подтвердила гигиенические и технические преимущества водяного отопления. При водяном отоплении отмечают (по сравнению с паровым отоплением) относительно невысокую температуру поверхности приборов и труб, равномерную температуру помещений, значительный срок службы, экономию тепловой энергии, бесшумность действия, простоту обслуживания и ремонта.

Систему водяного отопления как при местном, так и при централизованном теплоснабжении применяют с верхним и нижним расположением магистралей, с тупиковым и попутным движением воды в них, с последовательным и параллельным (по направлению движения воды) соединением отопительных приборов. По последнему признаку систему называют однотрубной, двухтрубной или бифилярной.

При разработке систем отопления конкретных зданий составляют **схемы** систем, различным образом сочетая в каждой схеме магистрали, стояки и ветви с отопительными приборами.

В схеме системы отопления устанавливается взаимное расположение теплообменников (котлов), циркуляционных насосов, теплопроводов, отопительных приборов и других элементов в зависимости от размещения их в здании, т.е. закрепляется **топология** или **структура** системы.

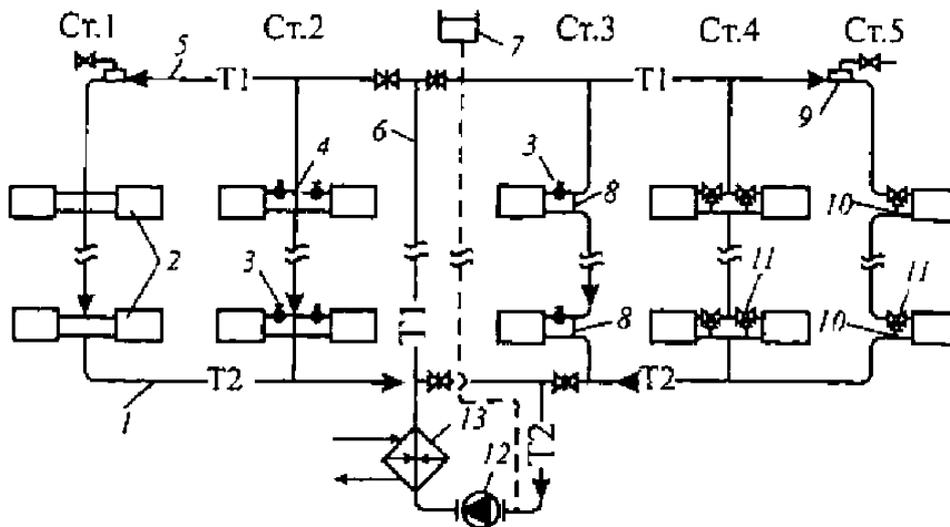
Схемы системы отопления в течение 50...70-х годов XX в. существенно видоизменялись, причем общим явлением в России было вытеснение ранее широко распространенных двухтрубных систем однотрубными. При использовании однотрубных систем вместо двухтрубных появилась возможность уменьшить длину и массу труб, унифицировать отдельные узлы и детали, устранить замеры в натуре, механизировать процессы заготовки деталей, осуществить предварительную сборку и комплектацию узлов, а в результате - сократить затраты труда и сроки монтажа систем.

Потери давления в однотрубных стояках и ветвях получаются значительно превышающими потери в двухтрубных стояках. При этом устанавливается устойчивый гидравлический режим однотрубных систем: заданное распределение теплоносителя по отопительным приборам сохраняется в течение всего отопительного сезона. Поэтому у приборов можно устанавливать регулирующие краны типа КРП или КРТ, предназначенные только для эксплуатационного (вторичного) регулирования. При запуске смонтированных однотрубных систем в эксплуатацию не проводят

пуско-наладочного (первичного) регулирования теплоотдачи отопительных приборов, как это делают при двухтрубных системах.

**Вертикальная однотрубная система с верхней разводкой** (с верхним расположением подающей и нижней прокладкой обратной магистралей) получила распространение в начале 50-х годов (рисунок 6.1). Она выполнялась сначала с **двусторонним** (стояки 1,2,4), а потом и с **односторонним** присоединением отопительных приборов к стоякам (стояки 3 и 5). Приборные узлы делались как **проточными** (стояк 1), так и с **закрывающими** (стояки 2 и 3) и **обходными** (стояки 4 и 5) участками. Все типы стояков показаны на рисунке 6.1 для примера, а в конкретной системе применяется какой-либо один (реже два) тип стояка.

Закрывающие постоянно проточные участки устраивались **осевыми** (стояк 2) и **смещенными** от оси (стояк 3), со "сжимами", т.е. с уменьшением диаметра по сравнению с диаметром основного участка стояка, и без "сжимов". Было доказано, что "сжимы" осевых закрывающих участков несущественно изменяют количество воды, затекающей в приборы. В большей степени увеличивается расход воды в приборах при использовании смещенных закрывающих участков. При этом, как уже отмечалось, обеспечивается еще и компенсация удлинения труб при нагревании межприборных участков стояков.



Ст.1 - проточный стояк; Ст.2 и Ст.3 - стояки соответственно с осевыми и смещенными закрывающими участками; Ст.4 и Ст.5 - проточно-регулируемые стояки; 1 - обратная магистраль (Т2); 2 - отопительные приборы; 3 - краны типа КРП; 4 - осевой закрывающий участок; 5 - подающая магистраль (Т1); 6 - главный стояк (Г.ст); 7 - открытый расширительный бак; 8 - смещенный закрывающий участок; 9 - проточный воздухооборник; 10 - обходной участок; 11 - краны типа КРТ; 12 - циркуляционный насос; 13 - теплообменник

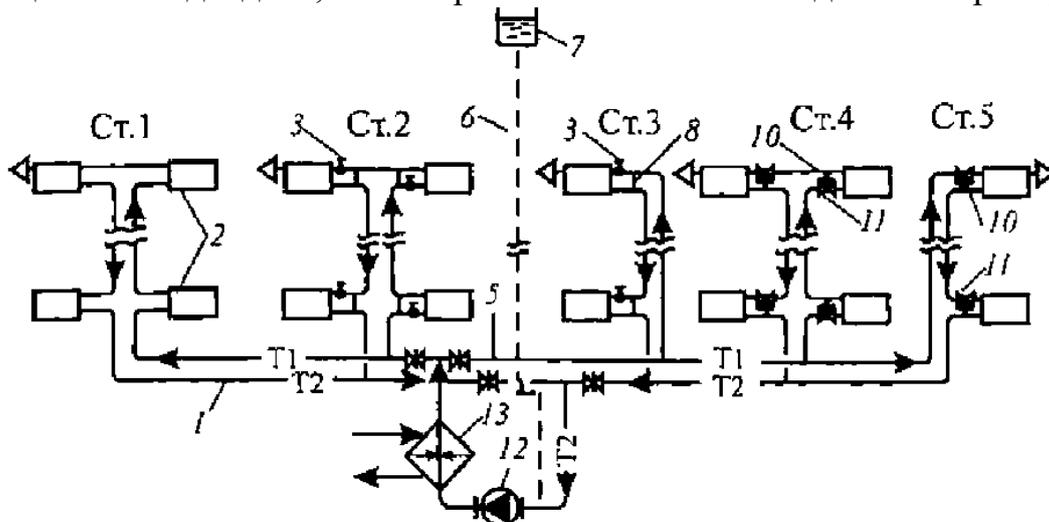
Рисунок 6.1. Схема вертикальной однотрубной системы водяного отопления с верхней разводкой подающей магистрали:

Обходные участки (стояки 4 и 5), предназначенные для периодического использования при потребителском (эксплуатационном) регулировании теплоотдачи приборов кранами типа КРТ, устраивали сначала осевыми, а затем, как правило, смещенными.

Вертикальная однотрубная система с верхней разводкой применяется в настоящее время со стояками всех трех типов - проточными, с закрывающими участками и

проточно-регулируемыми - в многоэтажных зданиях, имеющих четыре-девять этажей и более.

**Вертикальная однотрубная система с нижней разводкой** (с нижним расположением обеих магистралей) стала распространяться с начала 60-х годов в связи с массовым строительством бесчердачных зданий (рисунок 6.2). В так называемых П-образных стояках этой системы, состоящих из восходящей и нисходящей частей, применялись и проточные приборные узлы (стояк 1), и узлы с замыкающими участками (стояки 2 и 3), и проточно-регулируемые узлы (стояки 4 и 5). При непарных отопительных приборах "холостой" (без приборов) делали восходящую часть стояков (стояки 3 и 5). В пробках верхних радиаторов или в верхних точках стояков с конвекторами устанавливали воздушные краны. Регулирующие краны типа КРП и КРТ помещали на подводках, по которым теплоноситель подается в приборы.



Ст.1 - проточный стояк; Ст. 2 и Ст.3 -стояки со смещенными замыкающими участками; Ст.4 и Ст. 5 - проточно-регулируемые стояки; обозначения 1-13 - см. рис. 6.1

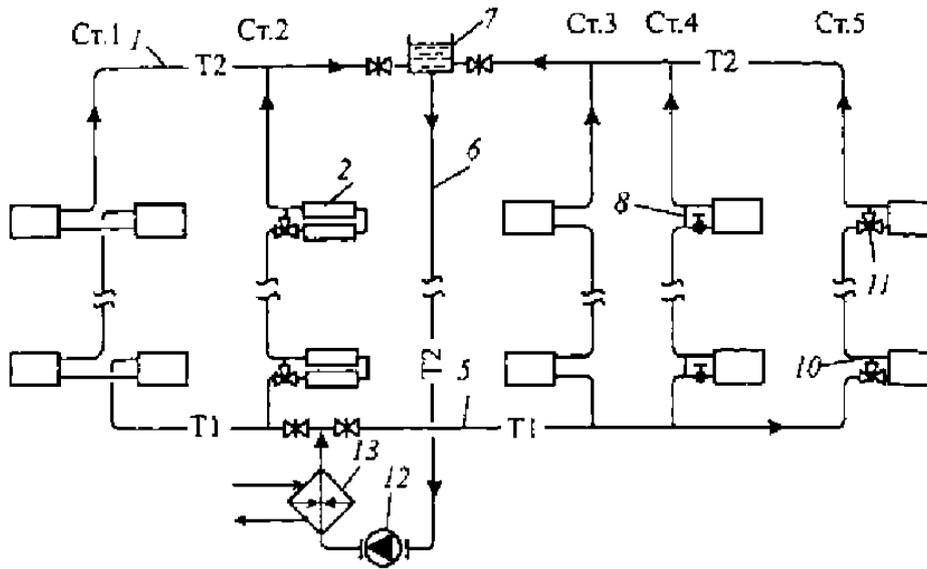
Рисунок 6.2. Схема вертикальной однотрубной системы водяного отопления с нижней разводкой обеих магистралей и П-образными стояками

В стояках по типу стояка 2 (см, рис. 6.2) при движении воды снизу вверх уменьшается затекание ее в приборы, особенно при увеличенном их сопротивлении. Поэтому предпочтение отдавалось проточно-регулируемым приборным узлам с двухсторонним присоединением приборов к трубам и смещенными обходными участками (стояк 4). В таком виде эту систему применяют в настоящее время в бесчердачных многоэтажных (три-семь этажей и более) зданиях, имеющих технические подполья или подвальные помещения.

Систему отопления с П-образными стояками можно включать в действие в процессе монтажа поэтажно (с временными перемычками), и эту особенность системы используют в зимнее время при выполнении внутренних отделочных работ в строящемся многоэтажном здании.

**Вертикальная однотрубная система с "опрокинутой" циркуляцией** воды (с нижним расположением подающей магистрали и верхней прокладной обратной магистрали), изображенная на рисунке 6.3, стала применяться с середины 60-х годов в зданиях повышенной этажности (10 этажей и более). Стояки таких систем делали проточными (стояки 1 и 3) или со смещенными замыкающими (стояк 4) и обходными

ми (стояки 2 и 5) участками. Осевых замыкающих и обходных участков не применяли. Встречалось двустороннее присоединение приборов к стояку, например, при установке конвекторов с кожухом с двумя горизонтально расположенными греющими трубами (стояк 1). Потери давления в стояках таких систем предусматривают при расчете повышенными для обеспечения устойчивого гидравлического режима при эксплуатации. В этой системе иногда применялись проточные расширительные баки (см. рис. 6.3).



Ст.1 - проточный стояк с конвекторами с кожухом; Ст.2 и Ст.5 - проточно-регулируемые стояки соответственно с конвекторами без кожуха и радиаторами; Ст.3 - проточный стояк с радиаторами; Ст.4 - стояк со смещенными к радиаторам замыкающими участками; обозначения 1-13 - см. рис. 6.1

Рисунок 6.3. Схема вертикальной однотрубной системы водяного отопления с "опрокинутой" циркуляцией воды и проточным открытым расширительным баком

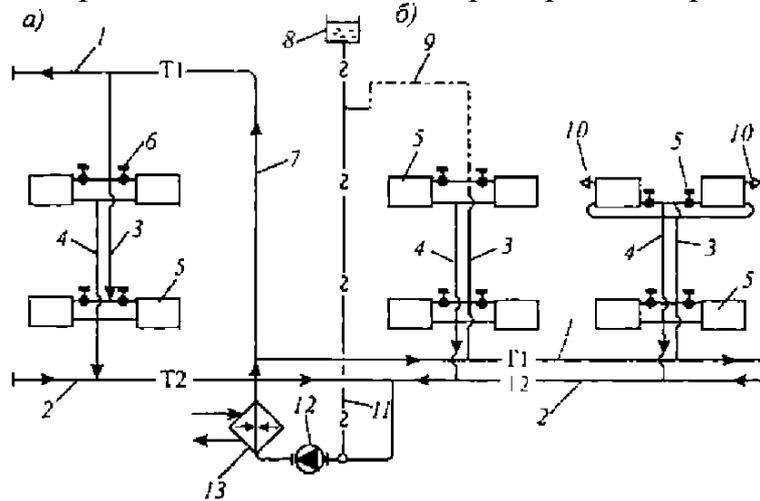
Система с опрокинутой циркуляцией воды способствует, не в пример системе с верхней разводкой, поддержанию равномерного теплового режима во всех помещениях и установке приборов одинаковой площади по высоте здания (когда степень охлаждения воды в стояках соответствует уменьшению теплопотерь однотипных помещений по вертикали). При проектировании этой системы избегают применения колончатых радиаторов из-за преувеличения их площади при движении воды в них по схеме "снизу-вверх" (до 12... 14 % по сравнению с площадью при движении по схеме "сверху-вниз"), а также установки приборов с высоким гидравлическим сопротивлением в стояках с замыкающими участками.

В жилых зданиях с "теплыми" чердаками обратные магистрали рассматриваемой системы прокладывают на чердаках без тепловой изоляции (чердаки с учетом теплоотдачи труб становятся "теплыми"). Такие чердаки используют для бесканального сбора вытяжного воздуха к вентиляционным шахтам.

Еще раз отметим, что для большинства современных вертикальных однотрубных систем водяного отопления характерно одностороннее присоединение отопительных приборов к стоякам. Хотя при этом и увеличиваются число стояков и расход труб, зато появляется возможность уменьшить их диаметр и унифицировать приборные узлы. Массовое обезличенное изготовление таких узлов способствует повышению производительности труда. Кроме того, увеличение числа открыто прокладываемых

емых стояков - своеобразных эффективных отопительных приборов - заметно сокращает площадь нагревательной поверхности основных приборов.

Схемы двухтрубной системы водяного отопления представлены на рис. 6.4 применительно к двухэтажному зданию. Слева показана часть системы с верхней разводкой (рисунок 6.4, а), справа - с нижней разводкой (рис. 6.4, б), причем левый из двух стояков изображен с централизованным удалением воздуха, а правый - с местным через воздушные краны на отопительных приборах на верхнем этаже.



а - с верхней разводкой подающей магистрали; б - с нижней разводкой обеих магистралей;  
1 и 2 - подающие (Т1) и обратные (Т2) магистрали; 3 и 4 - соответственно подающие и обратные части стояков; 5 - отопительные приборы; б - краны типа КРД; 7 - главный стояк (Г.ст); 8 - открытый расширительный бак; 9 - воздушная линия; 10 - воздушные краны; 11 - соединительная труба расширительного бака;  
12 - циркуляционный насос; 13 - теплообменник

Рисунок 6.4. Схемы вертикальной двухтрубной системы водяного отопления:

Двухтрубная система, как уже отмечено, применялась в последнее время сравнительно редко. Система с **верхней разводкой** использовалась при естественной циркуляции воды, особенно при квартирном отоплении, а также для отопления железнодорожных вагонов. При насосной циркуляции воды эта система устраивалась преимущественно в малоэтажных (два-три этажа) зданиях во избежание значительного вертикального теплового разрегулирования из-за действия в двухтрубном стояке естественного давления.

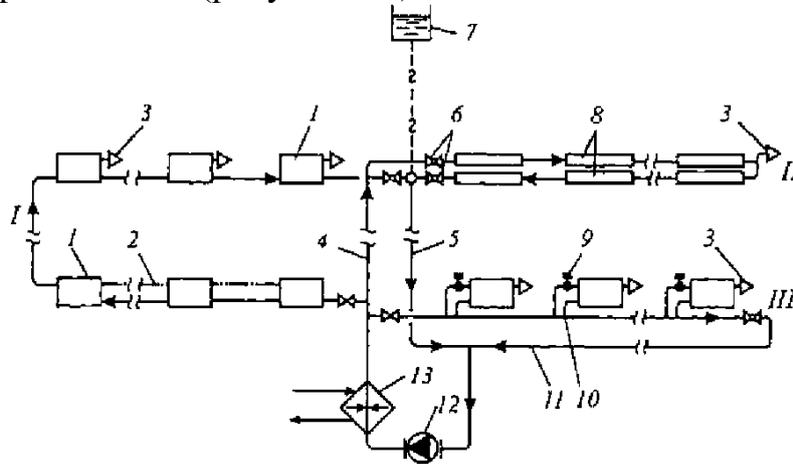
Двухтрубная система с **нижней разводкой** применялась чаще, чем система с верхней разводкой, особенно при числе этажей в зданиях более трех и в зданиях, состоящих из разноэтажных частей. При этом исходили из ее преимуществ - меньшего расхода труб и большей вертикальной гидравлической и тепловой устойчивости по сравнению с системой, выполненной с верхней разводкой.

Современная тенденция на значительное увеличение в системах водяного отопления насосного циркуляционного давления существенно сокращает отрицательное воздействие естественного давления на гидравлическую устойчивость работы двухтрубных систем и расширяет область их применения. В настоящее время такие системы с нижней разводкой применяются и в многоэтажном строительстве.

Воздушные линии для централизованного удаления воздуха (см. рис.6.4, б) устраивались только в специально обоснованных случаях, учитывая увеличение при этом расхода труб и их недолговечности из-за активной коррозии. Как правило, систему делали с воздушными кранами в верхних точках стояков.

На рис. 6.4 изображена распространенная так называемая столбовая схема прокладки стояков, при которой подводы присоединяются к отопительным приборам односторонне. Подающие и обратные части стояков при этом прокладываются рядом (подающие всегда справа при взгляде из помещения). Существует также цепочная схема прокладки стояков, когда они располагаются разобщенно (по одному между приборами), а подводы присоединяются к приборам с разных сторон. При разностороннем (особенно диагональном) присоединении труб к радиаторам эти приборы лучше прогреваются, исключаются также скобы на стояках для огибания горизонтальных подводов. Все же преимущественно применяют столбовую схему, при которой возможно независимое регулирование и отключение для ремонта обособленных парных стояков.

**Горизонтальная однотрубная система**, встречающаяся ранее в основном в одноэтажных зданиях временного типа, в последнее время стала применяться для отопления сельскохозяйственных сооружений, многоэтажных зданий как производственных, так и гражданских (рисунок 6.5).



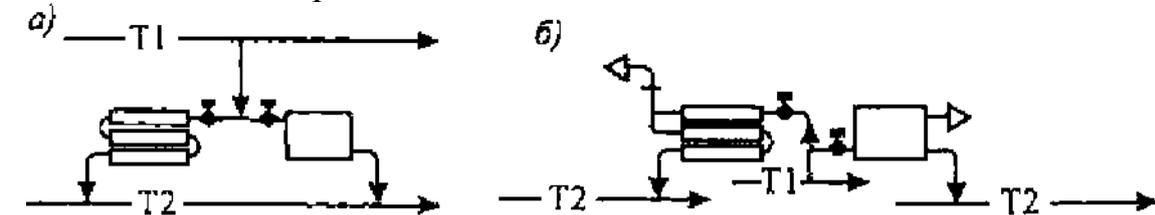
- I - проточная ветвь для приборов, расположенных на разных этажах; II - проточная бифилярная ветвь; III - ветвь с замыкающими участками; 1 - радиаторы; 2 - воздушная труба; 3 - воздушные краны; 4 - подающий стояк; 5 - обратный стояк; 6 - запорно-регулирующая арматура; 7 - открытый расширительный бак; 8 - конвекторы двухтрубные; 9 - краны типа КРП; 10 - осевой замыкающий участок; 11 - обратная магистраль; 12 - циркуляционный насос; 13 - теплообменник

Рис. 6.5. Схемы горизонтальной однотрубной системы водяного отопления

Распространение горизонтальной системы связано с увеличением длины зданий, внедрением сборных каркасно-панельных конструкций с широким шагом колонн и удлиненными световыми проемами. Отсутствие в таких зданиях простенков и отверстий в панелях перекрытий затрудняло размещение традиционных вертикальных стояков. Наличие ленточных световых проемов предопределяло размещение отопительных приборов не отдельными группами, а в виде цепочек (во избежание теплового дискомфорта в помещениях). Соединяя последовательно отопительные приборы увеличенной длины короткими трубными вставками, получали горизонтальные однотрубные ветви.

В горизонтальной однотрубной системе сокращается по сравнению с вертикальной системой протяженность теплопроводов, особенно стояков и магистралей. Немногочисленные укрупненные стояки для горизонтальных однотрубных ветвей (см. рис. 6,5) прокладываются во вспомогательных помещениях здания.

В горизонтальных однетрубных ветвях применяют проточные нерегулируемые приборные узлы (ветвь 7) и регулируемые узлы с осевыми замыкающими (ветвь III на рисунке 6.6) и обходными участками. При проточных ветвях регулирование теплоподдачи в помещения осуществляют воздушными клапанами в конвекторах с кожухом или общим (для всех приборов на одном этаже) регулирующим вентилем. Подобная схема применяется с начала 70-х годов.



а) - с верхней разводкой подающей магистрали; б) - с нижней разводкой обеих магистралей  
Рис. 6.6. Приборные узлы горизонтальной двухтрубной системы водяного отопления

При использовании в системе отопления здания высокотемпературной воды применяют удлиненные горизонтальные однетрубные ветви с циркуляцией постепенно охлаждающейся воды снизу вверх через приборы на разных этажах (ветвь I на рис. 6.5). Тогда высокотемпературная вода будет находиться в зоне повышенного гидростатического давления, что предотвратит ее вскипание.

Горизонтальная однетрубная система пригодна также для периодического отопления помещений на различных этажах (например, при отличающихся технологических процессах со значительными тепловыделениями), а также для отопления старинных зданий со сводчатыми перекрытиями.

**Схемы бифилярной системы** водяного отопления, которая может быть с вертикальными стояками и горизонтальными ветвями, аналогичны рассмотренным схемам однетрубной системы.

**В вертикальной бифилярной системе** устраивают, как и в однетрубной системе с нижней разводкой, П-образные стояки (см. рис. 6.2). По такой схеме делали до середины 80-х годов отопление отдельных типов крупнопанельных жилых зданий. Там использовались трубчатые нагревательные элементы, встроенные вместе со стояками во внутренний бетонный слой наружных трехслойных стеновых панелей. При этом нагревательные элементы каждого помещения делились на два змеевика, и каждый змеевик отдельно присоединялся к восходящей и нисходящей частям стояка.

**В горизонтальной бифилярной системе** используют трубчатые отопительные приборы - конвекторы, бетонные радиаторы приставного типа, ребристые и гладкие трубы (см. ветвь II на рис. 6.5). Стальные и чугунные радиаторы могут быть применены только при двухрядной их установке. В такой системе так же, как и в однетрубной системе с проточными приборными узлами, невозможно индивидуальное количественное регулирование теплоотдачи отдельных отопительных приборов. Применяется количественное регулирование теплоотдачи сразу всей цепочки приборов или регулирование теплоотдачи каждого прибора "по воздуху", если устанавливаются конвекторы с воздушным клапаном.

Бифилярная система с горизонтальными пофасадными ветвями наиболее часто используется в производственных и сельскохозяйственных зданиях.

В одноэтажных зданиях ранее применявшееся горизонтальное двухтрубное распределение теплоносителя по отопительным приборам заменялось соединением приборов по однотрубной или бифилярной схемам, как более экономным по расходу труб и устойчивым по теплоотдаче приборов. Двухтрубные магистрали применялись лишь при невозможности использования однотрубной схемы и только с попутным в них движением теплоносителя (фрагмент системы - см. рис. 6.6). При этом гидравлическое сопротивление отопительных приборов по возможности увеличивали, укрупняя приборы и используя змеевиковую форму движения воды в них (на рис.6.6 - слева).

## 5.2 Система отопления с естественной циркуляцией воды

Область применения системы с естественной циркуляцией воды (гравитационной) в настоящее время, как уже известно, ограничена. Ее используют для отопления отдельных жилых квартир, обособленных зданий (особенно в отдаленной сельской местности), зданий при не налаженном снабжении электрической энергией. Гравитационную систему применяют также в зданиях, в которых недопустимы вызываемые циркуляционными насосами и высокими скоростями воды шум и вибрация конструкций (например, при точных измерениях).

Система с естественной циркуляцией воды может быть устроена для отопления верхних помещений высоких зданий (например, технического этажа при кондиционировании воздуха, совмещенном с отоплением, в основных помещениях здания).

Ограничение области применения связано с тем, что для циркуляции воды используется различие в гидростатическом давлении в вертикальных частях системы, которое только в высоких зданиях достигает значений, соизмеримых с давлением, создаваемым насосом.

В малоэтажных зданиях гравитационная система имеет следующие **недостатки** по сравнению с насосной системой водяного отопления:

- - сокращенный радиус действия (до 20 м по горизонтали), обусловленный небольшим циркуляционным давлением;
- - повышенная первоначальная стоимость (до 5...7 % стоимости небольших зданий) в связи с применением труб увеличенного диаметра;
- - увеличенные расход металла и затраты труда на монтаж системы;
- - замедленное включение в действие из-за большой теплоемкости воды и низкого циркуляционного давления;
- - повышенная опасность замерзания воды в трубах, проложенных в не отапливаемых помещениях.

Вместе с тем гравитационная система отопления обладает **достоинствами**, определяющими в отдельных случаях ее выбор:

- - относительная простота устройства и эксплуатации;
- - независимость действия от снабжения электрической энергией;
- - низкая скорость движения теплоносителя, отсутствие циркуляционных насосов и соответственно шума и вибраций;
- - сравнительная долговечность (при правильной эксплуатации система мо-

жет действовать 35...40 лет и более без капитального ремонта);

- - улучшение теплового режима помещений, обусловленное действием с количественным саморегулированием.

Остановимся на явлении количественного **саморегулирования**. В гравитационной системе создается своеобразный механизм естественного регулирования: при проведении обычного качественного регулирования, т.е. при изменении температуры воды, самопроизвольно возникает количественные изменения - изменяется расход воды. Действительно, если повышать температуру греющей воды при понижении температуры наружного воздуха (и наоборот), то в системе из-за иного распределения плотности воды будет увеличиваться (уменьшаться) естественное циркуляционное давление, а следовательно, и количество циркулирующей воды. Одновременное изменение температуры и количества воды обеспечивает необходимую теплоотдачу отопительных приборов для поддержания ровной температуры помещений.

В двухтрубной системе усиление или ослабление циркуляции воды в циркуляционном кольце каждого отопительного прибора изменяет теплопередачу в помещение, которая, взаимодействуя с теплопотерями помещения (тормозясь или возрастая), сама влияет на расход воды, изменяя температуру обратной воды (а с ней и циркуляционное давление). В результате в каждом помещении сохраняется соответствие между теплоотдачей прибора и теплопотерями, т.е. обеспечивается при действии системы отопления ровный тепловой режим.

В вертикальной однотрубной системе имеет место такое же количественное саморегулирование, но в отличие от двухтрубной системы в циркуляционных кольцах не каждого прибора, а уже стояков в целом с их последовательно соединенными приборами. При этом усиление или ослабление циркуляции воды происходит более интенсивно, чем в двухтрубной системе. В результате в теплый период отопительного сезона наблюдается отклонение от необходимой теплоподдачи у части приборов: при движении в стояке сверху вниз сильно уменьшенного количества воды нижние приборы несколько недогревают помещения. Это явление смягчается с увеличением числа этажей здания.

Можно сделать вывод, что при естественной циркуляции воды преимущество в малоэтажных зданиях следует отдавать двухтрубной системе отопления. Вертикальная однотрубная система предпочтительна в многоэтажных зданиях, где благодаря увеличению естественного циркуляционного давления можно уменьшить диаметр труб (по сравнению с двухтрубной)/ а также располагать отдельные отопительные приборы ниже котла или теплообменника.

Схема гравитационной системы во многом подобна рассмотренной выше схеме насосной системы отопления. Перечислим лишь **особенности конструкции** гравитационной системы, отражающие природу ее действия.

1. Гравитационная система для улучшения циркуляции воды устраивается, как правило, с верхним расположением подающей магистрали - с верхней разводкой (см. рис. 5.1, а).

2. Расширительный бак в гравитационной системе присоединяется непосредственно к теплоизолированному главному стояку для непрерывного удаления воздуха из системы через бак в атмосферу (без воздухоотборников и воздухоотводчиков).

3. Подающая магистраль прокладывается, как правило, под потолком верхнего этажа без тепловой изоляции с увеличенным уклоном (не менее 0,005 м/м) для сбора воздуха против направления движения воды (см. рис. 5.6, б) к точке присоединения расширительного бака.

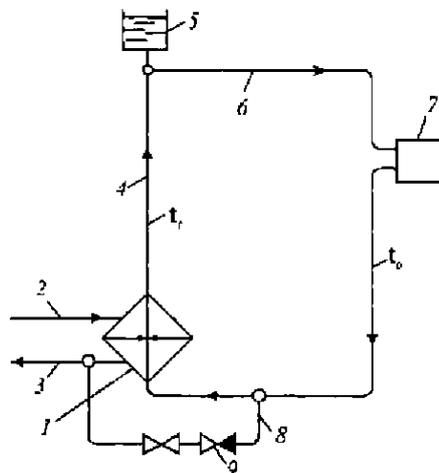
4. Приборные узлы выполняются для обеспечения движения воды в отопительных приборах по схеме "сверху-вниз" (см. рис. 4.17) с целью повышения коэффициента теплопередачи приборов.

5. Однотрубные стояки устраиваются с замыкающими участками у приборов (см. рис. 5.7, б) для уменьшения потерь давления при движении воды через приборные узлы.

На рисунке 6.7 изображена принципиальная схема гравитационной системы водяного отопления с верхней разводкой и теплообменником, который применяют при независимом присоединении системы к наружным теплопроводам. Показано, что наполнение и подпитка системы делаются деаэрированной водой из наружного обратного теплопровода без насоса, что возможно при достаточно высоком давлении в нем. При местном теплоснабжении теплообменник заменяется котлом. Наполнение и подпитка при этом осуществляется из наружного водопровода, а при его отсутствии путем ручной заливки воды в расширительный бак. Подробные схемы стояков двухтрубной системы даны на рисунке 6.4, а, однотрубной - на рисунке 6.1.

Возможно применение гравитационных систем отопления с нижней разводкой обеих магистралей, двухтрубные и однотрубные стояки которых изображены на рис. 6.4, б и 6.2. Однако при этом уменьшается циркуляционное давление, что приводит к увеличению диаметров труб, усложняется сбор и удаление воздушных скоплений из системы. Расширительный бак в этом случае присоединен к магистрали в нижней части системы, и его можно использовать для удаления воздуха только при прокладке специальных воздушных труб, показанных на рис. 6.4, б.

Система с "опрокинутой" циркуляцией при естественной циркуляции воды не используется, так как в ней иногда возникает обратное движение охлажденной воды в стояках.



1 - теплообменник (или теплогенератор - водогрейный котел); 2 и 3 - наружные, соответственно, подающий и обратный теплопроводы; 4 - главный стояк; 5 - открытый расширительный бак; 6 - подающая магистраль; 7 - отопительный прибор; 8 - наполнительно-подпиточная труба; 9 - обратный клапан

Рисунок 6.7. Схема гравитационной системы водяного отопления

В двухтрубной гравитационной системе отопления для создания достаточного циркуляционного давления следует увеличивать вертикальное расстояние между нижними отопительными приборами и теплообменником, доводя его хотя бы до 3 м. Если это осуществимо в отдельных зданиях, то при отоплении одноэтажных квартир и домов, а также железнодорожных вагонов теплогенератор (котел) приходится располагать на одном уровне с отопительными приборами. В этих случаях рассчитывают на создание циркуляции воды только за счет охлаждения ее в трубах.

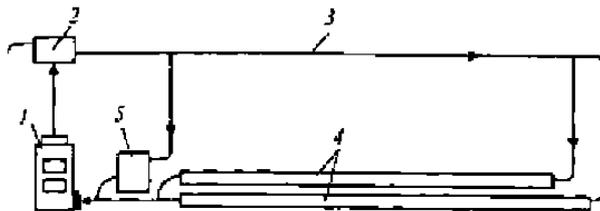
**Квартирные системы водяного отопления** применяются уже более ста лет. За это время изменялись и совершенствовались котлы и их топливо, трубы и отопительные приборы, использовались различные схемы, но принцип устройства и действия оставался одним и тем же: для создания устойчивой циркуляции воды одна из магистралей прокладывается под потолком отапливаемого помещения. Охлаждение воды в этой сравнительно высоко расположенной над котлом магистрали и обеспечивает необходимое циркуляционное давление. Что же касается охлаждения воды в отопительных приборах, то центр охлаждения в них может оказаться не только не выше середины котла, но даже ниже ее, а это будет препятствовать естественной циркуляции воды.

Наиболее распространена двухтрубная система, при которой подающую магистраль размещают под потолком отапливаемого помещения, обратную прокладывают у пола или в подпольном канале. Отопительные приборы присоединяют к трубам по схеме "сверху-вниз".

Теоретически возможна двухтрубная схема, когда не только подающая, но и обратная магистрали помещаются под потолком помещения. При этом для обеспечения циркуляции воды необходимо опускать обратную магистраль петлями до низа каждого отопительного прибора, что увеличивает расход труб и усложняет спуск воды из системы в процессе ее эксплуатации.

Можно применить также горизонтальную однотрубную схему присоединения отопительных приборов, но и в этом случае одна из магистралей должна быть проложена сверху (под потолком помещений).

На рисунке 6.8 изображена для примера одна из двух ветвей гравитационной системы водяного отопления железнодорожного пассажирского вагона. Две гладких трубы  $D_y70$ , обогревающие нижнюю зону салона, присоединяют самостоятельно к верхней подающей магистрали для усиления циркуляции воды в каждой из них. Отдельный отопительный прибор предназначен для отопления туалетной комнаты. Подающую магистраль желательно прокладывать без тепловой изоляции для увеличения циркуляционного давления, и изолировать только главный стояк.



1 - котел; 2 - открытый расширительный бак; 3 - подающая магистраль;  
4 - основные греющие гладкие трубы; 5 - отопительный прибор туалета

Рисунок 6.8. Схема гравитационной системы водяного отопления железнодорожного пассажирского вагона

Для вычисления естественного циркуляционного давления в гравитационной системе отопления необходимо знать температуру и плотность воды в различных ее точках. Следовательно, при проектировании квартирной системы отопления обязателен точный расчет теплопередачи через стенки труб для определения степени охлаждения протекающей в них воды. Эту особенность теплогидравлического расчета в необходимых случаях распространяют и на другие гравитационные системы отопления.

Наименьшее охлаждение воды, а следовательно, и наименьшее естественное циркуляционное давление получается в циркуляционном кольце через прибор, ближний к теплогенератору (например, в кольце прибора 5 на рис. 6.8), вследствие малой длины труб. Поэтому через такой прибор, не в пример потокораспределению в насосной системе, может протекать меньшее количество воды, чем через приборы, удаленные от теплогенератора.

При расчете площади нагревательной поверхности прибора квартирной системы отопления учитывают уже известные теплоотдачу труб, проложенных в помещении, и действительную температуру воды при входе в каждый прибор и выходе из него. В этом особенность расчета приборов такой системы отопления.

Система отопления железнодорожного вагона обычно дополняется электрическим насосом для возможности усиления циркуляции воды. В районах, обеспеченных устойчивым электроснабжением, квартирная система отопления может также устраиваться с циркуляционным насосом. Насосная квартирная система отопления делается горизонтальной однетрубной или двухтрубной с нижней прокладкой обеих магистралей.

### **5.3 Система водяного отопления высотных зданий**

Высотные здания и санитарно-технические устройства в них зонируются: делятся на части - зоны определенной высоты, разделенные техническими этажами. Оборудование и коммуникации помещаются на технических этажах. В системах отопления, вентиляции и водоснабжения допустимая высота зоны определяется значением гидростатического давления воды в нижних отопительных приборах или других элементах и возможностью размещения оборудования, воздухопроводов, труб и других коммуникаций на технических этажах.

Для системы водяного отопления высота зоны в зависимости от гидростатического давления, допустимого как рабочего для отдельных видов отопительных приборов (от 0,6 до 1,0 МПа), не должна превышать (с некоторым запасом) 55 м при использовании чугунных и стальных приборов (при радиаторах типа МС - 80 м) и 90 м для приборов со стальными греющими трубами. Высота зоны может быть увеличена при применении термосифонных отопительных приборов.

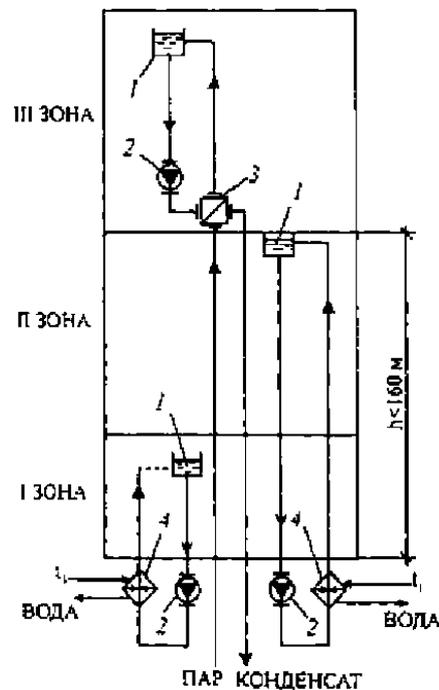
В пределах одной зоны систему водяного отопления устраивают при водяном теплоснабжении по схеме с независимым присоединением к наружным теплопроводам, т.е. гидравлически изолированной от наружной тепловой сети и от других систем отопления. Такая система имеет собственные водо-водяной теплообменник, циркуляционный и подпиточный насосы, расширительный бак.

Число зон по высоте здания, как и высота отдельной зоны, определяется допустимым гидростатическим давлением, но не для отопительных приборов, а для оборудования в тепловых пунктах, расположенных при водяном теплоснабжении обычно в подвальном этаже. Основное оборудование этих тепловых пунктов, а именно обычного вида водо-водяные теплообменники и насосы, даже изготовленные по специальному заказу, могут выдерживать рабочее давление не более 1,6 МПа. Это означает, что при таком оборудовании высота здания при водо-водяном отоплении гидравлически изолированными системами имеет предел, равный 150... 160 м. В таком здании могут быть устроены две (по 75...80 м высотой) или три (по 50...55 м высотой) зональных системы отопления. При этом гидростатическое давление в оборудовании системы отопления верхней зоны, находящемся в подвальном этаже, достигнет расчетного предела.

В зданиях высотой от 160 до 250 м может применяться водо-водяное отопление с использованием специального оборудования, рассчитанного на рабочее давление 2,5 МПа. Может быть также выполнено, если имеется в наличии пар, комбинированное отопление (рисунке 6.9): помимо водо-водяного отопления в зонах ниже 160 м, в зоне сверх 160 м устраивается пароводяное отопление.

Теплоноситель пар, отличающийся незначительным гидростатическим давлением, подается на технический этаж под верхней зоной, где оборудуют еще один тепловой пункт. В нем устанавливают пароводяной теплообменник, свой циркуляционный насос и расширительный бак, приборы для качественно-количественного регулирования.

В каждой зональной системе отопления имеется свой расширительный бак, оборудованный системой электрической сигнализации и управления подпиткой системы.

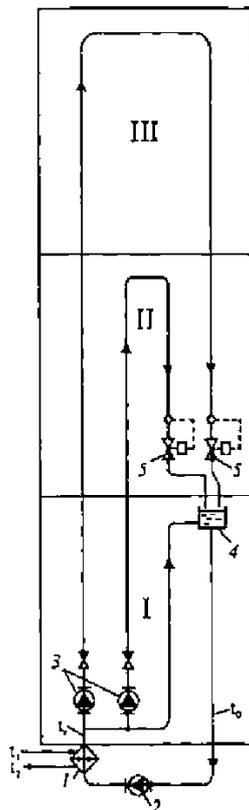


И и II - зоны здания с водо-водяным отоплением; III - зона здания с пароводяным отоплением;  
1 - расширительный бак; 2 - циркуляционный насос; 3 - пароводяной теплообменник;  
4 - водо-водяной теплообменник

Рисунок 6.9. Схема водяного отопления высотного здания

Описанный комплекс комбинированного отопления действует в центральной части главного корпуса Московского государственного университета: в нижних трех зонах устроено водо-водяное отопление с чугунными радиаторами, в верхней четвертой зоне -пароводяное отопление. В зданиях высотой более 250 м предусматривают новые зоны пароводяного отопления или прибегают к электроводяному отоплению, если источника пара не имеется.

Для снижения стоимости и упрощения конструкции возможна замена комбинированного отопления высотного здания одной системой водяного отопления, при которой не требуется второй первичный теплоноситель (например, пар). На рисунке 6.10 показано, что в здании может быть устроена гидравлически общая система с одним водо-водяным теплообменником, общими циркуляционным насосом и расширительным баком. Система по высоте здания по-прежнему делится на зональные части по приведенным выше правилам. Вода в зону II и последующие зоны подается зональными циркуляционно-повысительными насосами и возвращается из каждой зоны в общий расширительный бак. Необходимое гидростатическое давление в главном обратном стояке каждой зональной части поддерживается регулятором давления типа "до себя". Гидростатическое давление в оборудовании теплового пункта, в том числе и в повысительных насосах, ограничено высотой установки открытого расширительного бака и не превышает стандартного рабочего давления 1 МПа.



1 - водо-водяной теплообменник; 2 - циркуляционный насос;  
3 - зональный циркуляционно-повысительный насос; 4 - открытый расширительный бак;  
5 - регулятор давления "до себя"

Рис. 6.10. Схема единой системы водо-водяного отопления высотного здания

Для систем отопления высотных зданий характерны деление их в пределах каждой зоны по сторонам горизонта (по фасадам) и автоматизация регулирования температуры теплоносителя. Температура теплоносителя воды для зональной системы отопления устанавливается по заданной программе в зависимости от изменения температуры наружного воздуха (регулирование "по возмущению"). При этом для части системы, обогревающей помещения, обращенные на юг и запад, предусматривают дополнительное регулирование температуры теплоносителя (для экономии тепловой энергии) на случай, когда при инсоляции температура помещений повышается (регулирование "по отклонению").

Для опорожнения отдельных стояков или частей системы на технических этажах прокладываются дренажные линии. На время действия системы дренажную линию выключают во избежание неконтролируемой утечки воды общим вентиляем перед разделительным водосточным бачком.

#### 5.4 Децентрализованная система водо-водяного отопления

Среди применяемых систем водяного отопления преобладают системы, в которых температура поверхности отопительных приборов ограничена. Выше рассматривались распространенные системы, где местный теплоноситель централизованно нагревается высокотемпературной водой, причем нагревается максимум до 95 °С в двухтрубных и до 105 °С в однострунных системах. Между тем, система, в которой высокотемпературная вода подводилась бы как можно ближе к отопительным приборам, а температура их поверхности по гигиеническим требованиям сохранялась пониженной, имела бы определенное экономическое преимущество перед обычной системой. Это преимущество достигалось бы за счет уменьшения диаметра труб для перемещения сокращенного количества воды с повышенной скоростью под давлением циркуляционного насоса.

В такой комбинированной водо-водяной системе нагревание теплоносителя происходило бы децентрализованно. В тепловом пункте здания оборудования для нагревания и создания циркуляции воды не потребовалось. Там только контролировалось бы действие системы, и учитывался расход тепловой энергии.

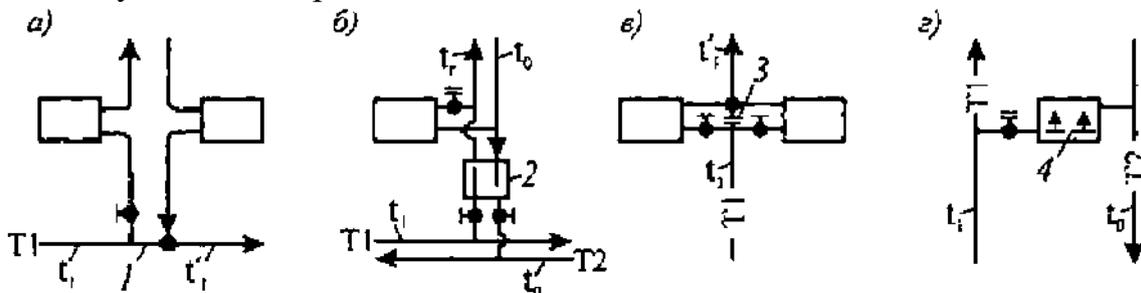
Разберем некоторые схемы системы децентрализованного нагревания местного теплоносителя высокотемпературной водой, разработанные российскими инженерами, разделив их на две группы - с независимым и зависимым присоединением системы к наружным теплопроводам.

Для децентрализованного нагревания местной воды или масла **по независимой схеме** предложены стальные или керамические безнапорные отопительные приборы. Эти приборы, как открытые сосуды, заполняются водой (маслом), нагреваемой через стенки змеевика высокотемпературной водой. Испарение с поверхности воды в приборе способствует повышению влажности воздуха в помещении. Змеевик включен в однострунную проточно-регулируемую систему с "опрокинутой" циркуляцией высокотемпературной воды (по рис. 6.3). Высокотемпературная вода может иметь температуру при керамических блоках 110 °С, при стальных приборах, заполненных минеральным маслом, 130 °С. При этом температура поверхности приборов не превышает 95 °С.

Децентрализованное смешение высоко- и низкотемпературной воды, т.е. нагревание местного теплоносителя по зависимой схеме может осуществляться в магистралях, стояках и непосредственно в отопительных приборах.

При смешении в магистралях система отопления делится на несколько последовательно соединенных частей (подсистем), каждая из которых состоит из нескольких однотрубных П-образных стояков (см. рис. 6.2). Попутное подмешивание высокотемпературной воды к охлажденной обратной воде из подсистем (для повышения температуры от 70 до 105 °С) происходит через перемычки с диафрагмами в промежуточные магистрали между отдельными подсистемами.

В системе со смешением воды в основании однотрубных П-образных стояков магистраль с высокотемпературной (температура  $t_i$ ) водой делается, в отличие от известных систем отопления, также однотрубной (рисунок 6.11, а). Вода в ней понижает температуру в точках смешения (в центрах охлаждения - черная точка на рисунке) и поступает, стояки с различной температурой. В вертикальных стояках возникает в основном естественная циркуляция воды, так как гидравлическое сопротивление замыкающих участков  $l$  сравнительно невелико.



а и о - в основании соответственно одно- и двухтрубного стояков;  
 в и г - в отопительных приборах соответственно одно- и двухтрубного стояков;  
 l - замыкающий участок на магистрали; 2 - смеситель; 3 - диафрагма на замыкающем участке стояка;  
 4 - перфорированный коллектор

Рисунок 6.11. Узлы систем водяного отопления с децентрализованным смешением

Для смешения воды в основании двухтрубных стояков (по рис. 6.4, б) используются специальные смесители (рис. 6.11, б). Вода в обеих магистралях перемещается под давлением сетевого насоса, в стояках происходит естественная циркуляция воды.

При децентрализованном смешении и однотрубных стояках система отопления делится на две части: в первой высокотемпературная вода движется в стояках снизу вверх (по рис. 6.3), охлаждаясь до температуры 95 °С, во второй - сверху вниз (по рис. 6.1). Для обеспечения затекания в приборы необходимого количества высокотемпературной воды на замыкающих участках устанавливаются диафрагмы (рис. 6.11, в).

При децентрализованном смешении в двухтрубных стояках высокотемпературная вода подается внутрь каждого отопительного прибора через перфорированный коллектор (рис. 6.11, г) или через сопло-смеситель, а охлажденная вода удаляется в таком же количестве в обратный стояк.

Описанные системы отопления не получили массового распространения из-за затруднений с прокладкой труб высокотемпературной воды в помещениях, сложности монтажного и эксплуатационного регулирования.

В настоящее время применяется прямоточная система отопления с децентрализованным нагреванием воды, возвращающейся из последовательно соединенных трех-четырех подсистем (групп стояков). В этой так называемой системе со ступенчатой регенерацией температуры (СРТ) (рис. 6.12) высокотемпературная вода нагревает охлажденную воду в двух-трех (между подсистемами) регенераторах температуры (РТ). Регенераторы температуры представляют собой противоточные теплообменники типа "труба в трубе" (например, труба  $D_{y25}$  в корпусе  $D_{y40}$ ). Вода дважды протекает через каждый РТ: сначала в виде высокотемпературной по межтрубному пространству, потом в виде охлажденной воды по внутренней трубе. Вода при возвращении из последней подсистемы нагревается высокотемпературной водой до 95... 105 °С, затем поступает в предпоследнюю подсистему и т.д., пока из первой подсистемы она охлажденной не возвратится к точке ввода в здание высокотемпературной воды.

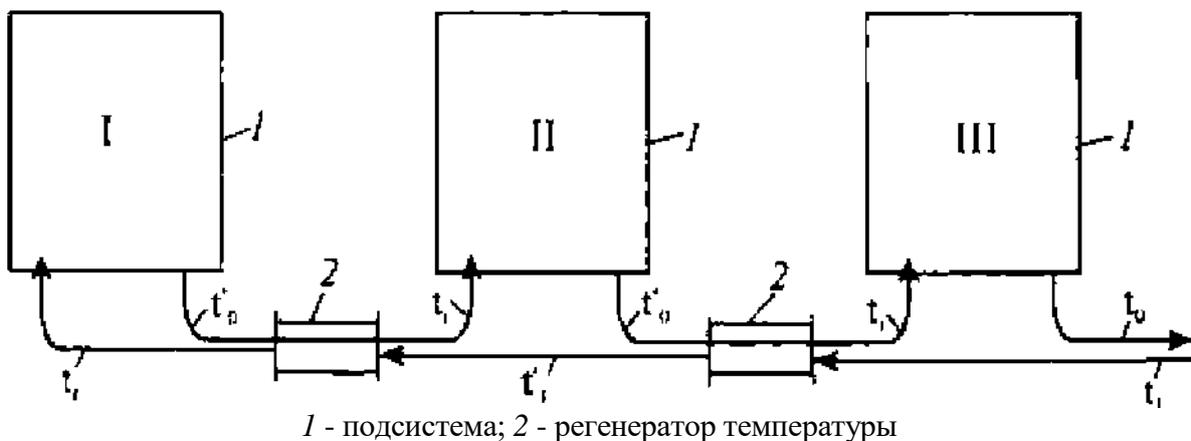


Рис. 6.12. Схема системы водяного отопления со ступенчатой регенерацией температуры

Систему отопления СРТ выполняют однотрубной с односторонними унифицированными приборными узлами, с верхней или нижней разводкой подающей магистрали.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Проанализируйте показатели, приведенные в табл. 6.1, применительно к 17-этажному жилому зданию.
2. Составьте ряд известных Вам схем присоединения теплопроводов к радиаторам и конвекторам.
3. Охарактеризуйте основные конструктивные различия насосной и гравитационной систем водяного отопления.
4. Опишите явление количественного саморегулирования в системе гравитационного водяного отопления.
5. Разработайте конструкцию местной системы водяного отопления для одноквартирного двухэтажного жилого дома с подвалом.

## *Практическое занятие №6*

### ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ЗДАНИЕ

6.1 Общие сведения

6.2. Статистические характеристики климата

.3. Солнечная радиация

#### **6.1. Общие сведения**

В переводе на русский язык слово «климат» означает «наклон». Древние греки считали, что состояние атмосферы (температуры воздуха) зависит от угла падения (наклона) солнечных лучей на землю. Чем выше солнце, тем угол падения лучей ближе к 90°, тем больше тепла поступает на землю. Если солнечные лучи падают на землю под малым углом (как бы скользят по поверхности), то они приносят меньше тепла и температура воздуха понижается. В связи с этим, климаты земли делились по широтному принципу, в зависимости от высоты стояния солнца и продолжительности дня. Были выделены холодный, умеренный и жаркий пояс.

В дальнейшем было обнаружено, что в пределах одного и того же широтного пояса могут наблюдаться различные климаты. В формирование климата существенную роль вносят и другие климатообразующие факторы: астрономические, географические, циркуляционные, влагооборот, рельеф и характер земной поверхности, высота над уровнем моря, наличие морей и больших водоемов, характера поверхности почвы, растительного и снежного покрова.

Таким образом, климат – это совокупность и последовательность смены всех возможных в данной местности состояний атмосферы (условной погоды). Многолетний режим погоды и называют климатом. Состояние атмосферы за короткий промежуток времени называют погодой. Погода очень изменчива во времени в силу постоянной изменчивости атмосферных процессов. Однако, в каждой местности существует закономерная последовательность атмосферных процессов, определяющих и погоду, и климат.

К основным климатическим факторам относятся:

- солнечная радиация;
- температура воздуха;
- влажность воздуха;
- осадки;
- ветер.

Важное значение имеет изучение сочетания ряда факторов:

- ветер с температурой (температурная роза ветров и воздействие на человека и жилую среду);
- ветер с дождем (увлажнение стен при косых дождях);
- ветер со снегом и пылью (метели, снегозаносы и пыльные бури).

Такие климатические факторы, как температура и влажность воздуха, имеют свойство *скалярной* характеристики, в то время как солнечная радиация, ветер и

осадки являются *векторными*, что предопределяет требования к ориентации зданий, сооружений и городских территорий по странам света.

## 6.2. Статистические характеристики климата

Основой для изучения климатических факторов являются результаты наблюдений за элементами климата, полученные на метеорологических станциях.

В России эти наблюдения регулярно ведутся с XIX века на небольшом количестве метеостанций 3 раза в сутки. С развитием промышленности, транспорта, сельского хозяйства неуклонно развивалась сеть метеостанций и количество наблюдений в сутки. С 1966 года наблюдения ведутся уже 8 раз в сутки и действует более 10000 метеостанций.

На основе обработки первичных данных метеостанций об элементах климата получают различные статистические характеристики климата.

На практике обычно используют:

- средние значения;
- экстремальные (наибольшие и наименьшие);
- амплитуды;
- повторяемости;
- непрерывные продолжительности.

**Средние значения.** Среднее суточное определяется из всех значений данного метеорологического элемента, измеренных в течение суток (из 8 измерений). Среднее месячное получается из всех средних суточных значений за данный месяц. Среднее годовое – из всех средних месячных значений.

**Экстремальные значения.** Средние значения факторов позволяют сравнивать климаты разных районов, но их недостаточно для полной характеристики климатических условий конкретной местности.

В климатологических справочниках приводятся данные по:

- абсолютным экстремумам (максимальным и минимальным) метеорологического фактора, который наблюдался за весь период наблюдений;
- средним из годовых экстремальных величин;
- средним экстремумам за месяц (средние значения из максимумов и минимумов за каждые сутки).

Абсолютные экстремумы весьма редки, поскольку определяются редко наблюдаемыми атмосферными процессами, в то время как средние из экстремальных величин более устойчивы в пространстве, поскольку обусловлены постоянно действующими факторами, характерными для значительных территорий.

**Амплитуды.** В метеорологии и климатологии амплитудой называют разность между максимальным и минимальным значениями фактора за определенный отрезок времени (сутки, месяц, год и т.д.). Этим определяется нагрев и охлаждение материалов строительных конструкций, увлажнение и высушивание, замораживание и оттаивание и т.д. Годовая амплитуда средних месячных температур воздуха наиболее жаркого и наиболее холодного месяца характеризует степень континентальности климата, что, в свою очередь, диктует требования к генеральным планам застройки

города, объемно-планировочным решениям зданий, выбору конструкций ограждений зданий.

**Повторяемости.** Этот показатель определяет частоту наблюдения климатического фактора в данной местности. Например, повторяемость ветра больше определенной величины (для расчета ветровых нагрузок) или повторяемость ветра по румбам (для оценки господствующих ветров), повторяемость отрицательных температур воздуха ниже заданной величины (для теплотехнических расчетов ограждений зданий) и т.д. В климатологии понятия «повторяемость» и «вероятность» нередко отождествляют и используют эту характеристику для вероятностного прогноза.

**Непрерывная продолжительность** действия климатического фактора является важной характеристикой климата. Непрерывная продолжительность дождей предопределяет степень увлажнения конструкций, то же – интенсивных дождей диктует требования к техническим решениям ливневого водоотвода и водоотвода с кровель зданий. Непрерывная продолжительность отрицательных температур воздуха ниже определенной величины диктует требования к массивности и конструкции ограждений зданий. Рассмотренные выше климатические факторы и их характеристики носят общий характер. За редким исключением они не привязаны к нуждам архитектурно-строительной отрасли. В связи с этим, одной из главных задач строительной климатологии является с одной стороны – использование климатических факторов общего характера для целей проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений; и на основе знаний поведения материалов и конструкций в эксплуатации, а также взаимодействия с климатом искусственной среды зданий и сооружений – формулирование задания для Гидрометслужбы по разработке специальных климатических характеристик – с другой стороны.

Формулированию требований к климатическим факторам для целей строительства должны предшествовать широкие обобщения и специальные научные исследования по взаимодействию здания с климатическими условиями, по физике среды вблизи здания, по влиянию климатических факторов на материалы и конструкции и по физике процессов в материалах и конструкциях в процессе эксплуатации здания.

### 6.3. Солнечная радиация

Солнечная радиация представляет собой мощный поток электромагнитных волн различных частот. На границе атмосферы этот поток приблизительно равен 1200 Вт/м<sup>2</sup>. При прохождении через атмосферу часть энергии теряется за счет поглощения и рассеяния.

Солнечная радиация - один из главных климатических факторов, который определяет климат всей планеты. В южных районах солнце несет избыток тепла и требуется защита зданий и помещений от перегрева. Избыток солнечной энергии используют для отоплений зданий, получения горячей воды и т.п.

В северных районах ощущается недостаток солнечной радиации и важным является учесть и использовать солнечную радиацию как санитарно-гигиенический фактор и фактор дополнительных теплоступлений к ограждениям зданий и через светопроемы в помещения.

По спектральному составу солнечная радиация подразделяется на:  
 ультрафиолетовое излучение (100 - 400нм) ~ 4% ;  
 видимый свет (400 - 780нм) ~ 54% ;  
 инфракрасное излучение (780 – 3000нм) ~ 42% .

Известно благотворное влияние ультрафиолетовой радиации областей *A* (315-400нм) и *B* (280-315нм), которая уничтожает болезнетворные бактерии, повышает устойчивость к заболеваниям и общий тонус. Именно с этим участком спектра связаны нормы (продолжительность) инсоляции помещений и территорий. С увеличением широты местности снижается приход ультрафиолетовой радиации. Зона ультрафиолетового комфорта находится в интервале 50-55° северной широты. К югу от этих широт ощущается избыток ультрафиолетового облучения, а к северу – дефицит.

Область *C* ультрафиолетовой радиации (100 - 280нм) вызывает разрушение молекул белка, выцветание, старение и разрушение строительных материалов. Эта часть ультрафиолетовой радиации учитывается при исследовании старения материалов и моделируется в камерах искусственной погоды при исследовании долговечности.

Важным элементом солнечной радиации является ее тепловая часть (инфракрасное излучение и частично видимый свет).

Солнечную радиацию обычно рассматривают через прямую, рассеянную и суммарную. *Прямая* радиация – это часть энергии от видимого диска солнца, *рассеянная* – это части энергии от небосвода без учета прямых солнечных лучей, *суммарная* – представляет собой сумму прямой и рассеянной радиации. Для горизонтальных поверхностей информация о прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации является достаточно полной, а для стен зданий определенное значение имеет также отраженная радиация земли и соседних зданий.

Приход солнечной радиации к зданиям зависит от географической широты местности, облачности, состояния и загрязненности атмосферы, ориентации поверхности, времени года и суток.

В количественном отношении интенсивность (напряжение) солнечной радиации на нормальную к лучам поверхность  $S_n$  можно определить по формуле:

$$S_i = S_o \frac{\sinh o}{\sinh o + C},$$

где  $S_o$  – солнечная постоянная, принимаемая равной 1200Вт/м<sup>2</sup>;

$h_o$  – высота стояния солнца для данной местности в расчетный час суток, град.;

$C$  – эмпирический коэффициент, характеризующий прозрачность атмосферы.

Интенсивность солнечной радиации на поверхности любой ориентации ( $S_{л.о}$ ) можно определить по формуле:

$$S_{л.о} = S_n \cdot \cos \theta, \quad (6.1)$$

где  $\theta$  – угол между направлением луча и нормалью к поверхности.

Значение  $\cos \theta$  зависит от угла падения луча, ориентации по странам света, широты местности и определяется по формулам сферической тригонометрии.

Для вертикальных поверхностей стен зданий суммарная солнечная радиация (интенсивность) будет складываться не из двух ( $C+D$ ), как для горизонтальной поверхно-

сти, а из трех, то есть учитывать еще и отраженную радиацию земли и соседних зданий ( $R$ ):

$$Q = S + D + R, \quad (6.2)$$

где  $S$ - прямая радиация;

$D$  - рассеянная радиация;

$R$  - отраженная радиация.

Если использовать эту формулу для оценки интенсивности суммарной радиации, она дает большие ошибки в силу большой анизотропности потоков  $D$  и  $R$ . При подсчете сумм тепла за сутки или более эта формула дает удовлетворительную точность. При этом можно использовать обширные данные, приведенные в справочниках по Климату СССР по рассеянной и отраженной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность. В этом случае:

$$D = D_{\tilde{A}} \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}; \quad (6.3)$$

$$R = R_{\tilde{A}} \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (6.4),$$

где  $\alpha$  - угол наклона поверхности к горизонту;

$D_{\tilde{A}}$  и  $R_{\tilde{A}}$  - рассеянная и отраженная радиации, поступающие на горизонтальную поверхность.

Для вертикальных поверхностей ( $\alpha = 90^\circ$ )  $\sin^2 \frac{\alpha}{2} = 0,5$ ;  $D_{\hat{A}} = \frac{D_{\tilde{A}}}{2}$  и  $R_{\hat{A}} = \frac{R_{\tilde{A}}}{2}$  и общая радиация будет равна:

$$Q_B = S_B + \frac{D_{\tilde{A}}}{2} + \frac{R_{\tilde{A}}}{2}$$

В специальной актинометрической литературе [10,21,34] и справочниках [40,52-55] приводятся различные данные по интенсивности и суммам солнечной радиации. Задача проектирования (или исследования) состоит в том, что бы как можно более точно для решаемой задачи выбрать значения параметров солнечной радиации.

В качестве иллюстрации приведем несколько графиков по интенсивности солнечной радиации [21] для июня при безоблачном небе и семибалльной облачности для широты местности  $56^\circ$  (рис.6.1, 6.2, 6.3). Следует отметить то обстоятельство, что абсолютная величина рассеянной радиации при облачном небе на 20-50% выше, чем при безоблачном небе (сравнение рис.6.1 и 6.3). Интенсивность суммарной солнечной радиации на стенах зданий различной ориентации имеет ярко выраженный суточный ход (рис.6.2).

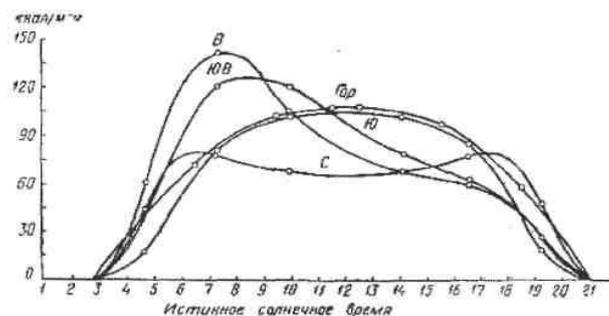


Рис.6.1. Интенсивность рассеянной солнечной радиации на стенах различной ориентации (безоблачное небо, широта  $56^\circ$ )

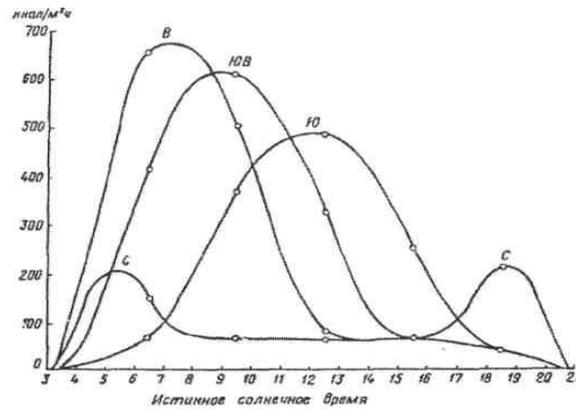


Рис.6.2. Интенсивность суммарной солнечной радиации на стенах различной ориентации (безоблачное небо, широта 56°)

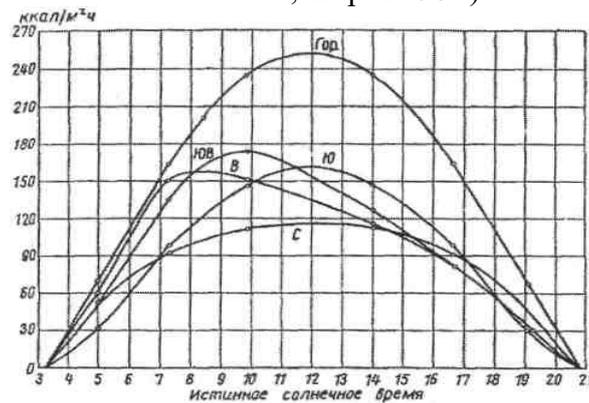


Рис.6.3. Интенсивность рассеянной солнечной радиации на стенах различной ориентации (при облачности 7 баллов, широта 56°)

В строительстве, проектной практике решают различные задачи по учету воздействия солнечной радиации.

Продолжительность облучения территорий, зданий и помещений (инсоляция) является важнейшим санитарно-гигиеническим требованием. Вопросам инсоляции посвящены специальные разделы данного пособия.

Для многих целей важным является оценка нагрева материалов и конструкций под действием солнечной радиации. Широкой известностью пользуется формула Шкловера А.М.:

$$t_{\text{нв}} = t_f + \frac{\rho S}{\alpha_f}, \quad (6.5)$$

где  $t_{\text{нв}}$  - температура наружной поверхности ограждения (или конструкции);

$\rho$  - коэффициент поглощения солнечной радиации материалом ограждения;

$S$  - интенсивность солнечной радиации;

$\alpha_f$  - коэффициент теплообмена у наружной поверхности ограждений, определяемый по формуле:

$$\alpha_f = 1,16 \cdot (5 + 10 \sqrt{v}), \quad (6.6),$$

где  $v$  - скорость ветра.

Кажущаяся простота формулы имеет свои особенности. Можно видеть, что в расчетах участвуют три климатических фактора:  $t_f$  - температура наружного воздуха;  $S$  - интенсивность солнечной радиации и  $v$  - скорость ветра. Указанные параметры ( $t_f$ ,  $S$  и  $v$ ) должны быть отсчитаны в один момент времени, что и определяет точность рас-

чета. Причем, следует иметь в виду, что параметры  $S$  и  $v$  имеют векторную характеристику по отношению к исследуемой поверхности.

В весенне-летний период нагрев поверхностей ограждений может быть значительным и требует учета при выборе материалов. Известны случаи плавления битумных мастик на совмещенных кровлях от солнца и проникновения их через стыки панелей в квартиры верхних этажей. Известны случаи сползания рулонного ковра с кровли, когда температура размягчения мастики оказывалась ниже температуры нагрева кровли (ниже  $t_{\text{н.а}}$ ).

Перегрев помещений в летнее время связан также с воздействием солнечной радиации. Приходится решать задачи прихода солнечной радиации к ограждениям зданий и поступления тепла солнечной радиации через световые проемы. Для этих целей необходима информация не об интенсивности, а о суммах тепла солнечной радиации за определенное время (час, сутки и т.д.). Следует еще раз напомнить, что солнечная радиация имеет векторные характеристики, а приход тепла к фасадам зданий зависит от ориентации фасадов по странам света.

## *Практическое занятие №7*

7.1. Температура воздуха

7.2. Влажность воздуха

### **7.1. Температура воздуха**

В ранней справочной и нормативной литературе по климату приводится множество значений температуры воздуха:

- средняя температура по месяцам и за год;
- абсолютные минимальные и максимальные значения;
- средние максимальные значения;
- средние температуры наиболее холодной пятидневки;
- средние температуры наиболее холодных суток;
- средние температуры наиболее холодного периода;
- повторяемость температур воздуха в часах по сухому термометру (с градацией через один градус с нарастающим и убывающим итогом часов) и т.п.

В последующих изданиях СНиПа по строительной климатологии происходит уточнение некоторых показателей температуры воздуха и появляются новые:

- амплитуды средние и максимальные за сутки и месяц;
- вводятся температуры воздуха различной обеспеченности (0,92; 0,94; 0,95; 0,98);
- вводится градация климатических параметров для теплого и холодного периодов года.

Из множества значений температур воздуха в практике проектирования зданий в настоящее время находят использование не все значения температур, а их ограниченный перечень.

Этот перечень и значения температур определяются задачами, которые решает проектировщик.

Так, при расчете сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и вычислении градусо-суток отопительного периода, используются средние температуры воздуха периода со средней суточной температурой ниже  $8^{\circ}\text{C}$  или ниже  $10^{\circ}\text{C}$  (в зависимости от назначения проектируемого здания).

При расчете сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций через расчетные температуры наружного воздуха в холодный период года выбор конкретных значений расчетных температур определяется тепловой инерцией ограждающей конструкции (табл. 7.1).

Для производственных зданий, предназначенных для сезонной эксплуатации, за расчетную температуру наружного воздуха принимают минимальную температуру наиболее холодного месяца, которую определяют как среднюю месячную температуру января, уменьшенную на среднюю суточную амплитуду наиболее холодного месяца.

При расчете теплоустойчивости ограждающих конструкций в теплый период года, используют два значения температур воздуха:

- средняя месячная температура воздуха за июль;
- максимальная амплитуда суточных колебаний температуры воздуха в

июле (прилож. Г, СП 23-101-2000).

Таблица 7.1. Расчетные температуры наружного воздуха для холодного периода года

Расчетная температура	Значение тепловой инерции ограждающей конструкции $D=R \cdot S$
Расчетная температура наиболее холодных суток, обеспеченностью 0,98	до 1,5
Средняя температура наиболее холодных суток, обеспеченностью 0,92	от 1,5 до 4,0
Средняя температура наиболее Холодной пятидневки, обеспеченностью 0,98	от 4,0 до 7,0
Средняя температура наиболее Холодной пятидневки, обеспеченностью 0,92	свыше 7

Расчеты на теплоустойчивость ограждений проводят обычно при условиях, если среднемесячная температура июля превышает  $21^{\circ}\text{C}$ .

Как будет показано ниже, при климатическом районировании используются средние месячные температуры воздуха за январь и июль.

Введены специальные значения температур при расчете вентиляции (для теплого и холодного периода года, параметры  $A$  и  $B$  и т.д.).

Таким образом, первичным в выборе значений температуры наружного воздуха для архитектурно-строительных целей является постановка задачи, основанная на наиболее полном моделировании физических процессов.

С этой точки зрения заслуживают внимания предложения Савина В.К. с коллегами [79] по определению расчетных температур наружного и внутреннего воздуха с точки зрения снижения затрат энергии на отопление зданий. Экономия энергозатрат является важнейшей государственной задачей, однако следует помнить, что экономия в одних вопросах (энергозатраты на отопление) не должна быть в ущерб другим аспектам зданий: комфорту, воздухообмену в помещениях и т.п., здание должно представлять собой единую сбалансированную систему.

## 7.2. Влажность воздуха

Атмосферный воздух представляет собой смесь газов и водяных паров. Погода и климат на планете зависят от распределения тепла, давления и содержания водяного пара в атмосфере. Это содержание может выражаться в единицах абсолютной влажности,  $\text{г}/\text{м}^3$  (количество влаги в граммах, содержащейся в  $1\text{м}^3$  воздуха) или парциальным давлением, т.е. давлением водяного пара, находящегося в смеси с другими газами, или упругостью водяного пара в паскалях (Па).

Чем больше влаги содержится в воздухе, тем выше значение упругости водяного пара. При увеличении температуры воздуха (при неизменном барометрическом давлении) возрастает способность воздуха к аккумуляции влаги. Для постоянной температуры воздуха его влагосодержание имеет предел, называемый максимальной

упругостью водяного пара, что соответствует полному насыщению воздуха водяным паром.

Влажность воздуха характеризуют также относительной влажностью ( $\varphi$ ), которая представляет собой отношение действительной упругости водяного пара ( $e$ ) к максимальной при данной температуре ( $E$ ), выраженной в процентах:

$$\varphi = \frac{e}{E} \cdot 100 \% . \quad (7.1)$$

Относительная влажность воздуха является важнейшим санитарно-гигиеническим показателем. Результаты исследований медицинской науки, закрепленные в нормативных документах, определяют комфортной для человека влажностью 50-60% при температурах 18-22°C.

При высокой влажности затрудняется отдача влаги с поверхности кожи человека и нарушается тепловой баланс. При низкой - происходит интенсивное испарение влаги с кожи человека, возникают неприятные ощущения сухости во рту и горле. Влажность воздуха влияет на теплоощущения человека при различных температурах. Известно, что в сухом воздухе легче переносятся низкие температуры, чем во влажном. (Сибирские морозы при -40°C легче переносятся, чем морозы средней полосы при -25°C).

Различные сочетания влажности воздуха и его температуры использованы при определении типов погод.

Нормативная литература по строительной климатологии содержит различные данные по влажности воздуха:

- упругость водяного пара наружного воздуха по месяцам, ГПа;
- средняя месячная относительная влажность воздуха в 13 часов (в %) для самого холодного и самого жаркого месяцев;
- средняя относительная влажность воздуха (в %) по месяцам;
- средняя амплитуда суточных колебаний относительной влажности воздуха наиболее жаркого месяца (в %) (например, для Казани - 29%).

При колебаниях относительной влажности воздуха и его температуры возникают ситуации полного насыщения воздуха водяным паром  $\varphi=100\%$  и  $E=e$ . Температуру, при которой наступает состояние полного влагонасыщения, называют *температурой точки росы*. В природной среде это явление известно утренними росами, туманом. В урбанизированной среде происходит конденсация влаги на строительных конструкциях, ограждениях зданий, что вызывает процессы, требующие учета при проектировании и эксплуатации зданий. (Снижение теплозащитных качеств увлажненных конструкций и их долговечности, образование грибков и гниения, коррозии и т.п.).

## *Практическое занятие №8*

8.1. Осадки

8.2. Снежный покров

### **8.3. Осадки**

К этой группе метеорологических явлений относятся дождь, снег, смешанные осадки, морось, снежная крупа, обильная роса и туман, гололедные явления.

Все перечисленные выше разновидности осадков требуют учета при проектировании территорий и зданий, а также при их эксплуатации.

Опыт проектирования и эксплуатации зданий показывает, что учет осадков идет, в основном, по следующим направлениям:

- проектирование ливневой канализации;
- проектирование водоотвода с кровли;
- увлажнение стен зданий косыми дождями;
- учет гололедных нагрузок;
- учет снеговых нагрузок;
- учет снегозаносов территории при метелях.

Для разных целей требуются различные данные об осадках.

Ошибки в проектировании или неправильно выбранные характеристики осадков могут привести к серьезным нарушениям в эксплуатации зданий или к авариям.

Известно множество случаев, когда невнимание к осадкам приводило к регулярному замачиванию, а, следовательно, к преждевременному износу несущих и ограждающих конструкций. Здесь имели место как ошибки проектирования водоотвода с кровли, так и некачественное производство работ. Известен случай обрушения кровли одноэтажного гаража с внутренним водоотводом после нескольких часов интенсивного дождя. Сечение водоотводных труб не было рассчитано на интенсивный дождь, в результате чего за парапетом кровли скопились многие тонны воды. Этот перегруз и вызвал обрушение конструкций.

На отечественном строительном рынке появилось множество зарубежных технологий. Далеко не все из них могут быть использованы в наших климатических условиях. Архитекторы и проектировщики зданий часто забывают об этом.

Так, в средней полосе часто используют конструкцию металлической кровли с подвесными водосборными лотками. В весенний или осенний период при оттепелях и заморозках указанные лотки заполняются льдом и не выполняют функции сбора воды с кровли и отвода ее до приемных воронок. В силу этого, на лотках образуются мощные сосульки, масса которых приводит к обрыву водосборных лотков. (В традиционных «русских» кровлях водосборные лотки являются частью металлической кровли и прочно закреплены на карнизе). Эти примеры можно продолжить.

Для решения задачи водоотвода с кровли требуется информация об интенсивных осадках за небольшой отрезок времени или информация о так называемом расчетном дожде. Через расчетный дождь определяются схема водоотвода, площади водосбора, конструкция водоприемных воронок и сечение водоотводящих труб (стояков).

Расчетный расход дождевых вод с водосборной площади следует определять по формулам [58]:

а) для плоских кровель (с уклоном менее 2,5%):

$$Q_{\text{расч}} = \frac{F \cdot q_{20}}{10000} \text{ л/сек}; \quad (8.1)$$

б) для скатных кровель (с уклоном более 2,5%):

$$Q_{\text{расч}} = k_1 \frac{F \cdot q_5}{10000} \text{ л/сек}, \quad (8.2)$$

где  $Q_{\text{расч}}$  - расчетный расход дождевых вод, л/сек;

$F$  - водосборная площадь м<sup>2</sup>;

$q_{20}, q_5$  - интенсивность дождя в л/сек на 1 га для данной местности продолжительностью 20 мин и 5 мин, при периоде однократного превышения расчетной интенсивности, равной одному году;

$k_1$  - коэффициент, учитывающий период однократного переполнения.

Интенсивность дождя  $q_{20}$  определяется по рис.3.4 для Европейской территории России.

Интенсивность дождя  $q_5$  следует определять по формуле:

$$q_5 = 4^n \cdot q_{20}, \quad (8.3)$$

где  $n$  - параметр, определяемый по рис.3.5.

Значения величины  $q_5$ , вычисленные по формуле (3.3), приведены в табл.8.1.

Коэффициенты  $k_1$  следует принимать:

- для районов с  $q_{20}$  до 90 л/га сек,  $k_1 = 1$ ;
- для районов с  $q_{20}$  от 9' 1 до 150 л/га сек,  $k_1 = 1,5$ ;
- для районов с  $q_{20}$  более 150 л/га сек,  $k_1 = 2$ .

Водосборные площади и конструкция водоотвода должны обеспечивать удаление воды с кровли без переполнения системы и без накопления воды.

Другой вопрос, который должен учитываться при проектировании зданий и конструировании ограждающих конструкций, - предотвращение замачивания стен при дождях и выбор водостойких материалов. Даже при небольшом ветре капли дождя отклоняются от вертикали и попадают на стены. Метеорологические наблюдения по этим процессам не носят систематического характера, однако существуют методики, позволяющие расчетным путем оценить количество осадков, выпадающих на стены зданий различной ориентации на основе известных многолетних климатических данных об осадках на горизонтальные поверхности и данных по скоростям и повторяемости ветра по различным румбам.

Определить количество осадков, выпадающих на стены зданий под действием ветра, можно, используя соотношение, связывающее количество осадков, выпадающих на горизонтальные поверхности  $P_H$ , с количеством осадков, выпадающих на вертикальные поверхности  $P_B$  (в мм):

$$P_B = \frac{P_H \cdot v_n}{v_B}, \quad (8.4)$$

где  $v_B$  - скорость ветра во время дождя (м/с);

$v_n$  - скорость вертикального падения капель дождя (м/с).

Таблица 8.1 Значения величин  $q_5$  в л/сек с 1 га

$q_{20}$ , в л/сек с 1 га	Величина параметра $n$						
	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
40	75	80	86	92	98	106	113
50	93	100	107	115	123	133	142
60	112	12	128	138	148	159	170
70	131	140	150	161	172	186	198
80	149	160	171	184	197	212	226
90	168	180	193	207	221	239	255
100	187	200	214	230	246	265	283
110	206	220	235	253	271	292	311
120	224	240	257	276	295	318	340
130	243	260	278	299	320	345	368
140	262	280	300	322	344	371	396
150	280	300	321	345	369	398	425
160	299	320	342	368	394	424	453
170	317	340	364	391	418	451	481
180	336	360	385	414	443	477	509
190	354	380	407	437	467	504	538
200	373	400	428	460	492	530	566

Определить количество осадков, выпадающих на стены зданий под действием ветра, можно, используя соотношение, связывающее количество осадков, выпадающих на горизонтальные поверхности  $P_H$ , с количеством осадков, выпадающих на вертикальные поверхности  $P_B$  (в мм):

$$D_{\hat{A}} = \frac{D_{\tilde{A}} \cdot v_{\hat{A}}}{v_i}, \quad (8.4)$$

где  $v_B$  – скорость ветра во время дождя (м/с);

$v_n$  – скорость вертикального падения капель дождя (м/с).

Наблюдения по ветру всегда относятся к определенному румбу, поэтому величина  $P_B$  имеет ту же ориентацию.

Как было отмечено, в метеорологии отсутствуют систематические данные по скорости ветра во время дождя, однако в работах [21] получена устойчивая статистическая связь между скоростью ветра при дожде и скоростью ветра при всех погодных условиях. Карта зон и графики такой связи представлены на рис.8.1 и 8.2. Пользуясь этой картой и графиком, можно оценить  $v_B$  на основе широко представленных в справочниках по климатологии данных о скорости ветра.

Скорость вертикального падения капель дождя ( $v_n$ ) зависит от диаметра капель. Оказалось, что интенсивность дождя (мм/мин) связана с диаметром капель прямой зависимостью: чем больше интенсивность дождя, тем больше диаметр капель. Таким образом, можно воспользоваться эмпирической зависимостью (рис.8.3) [21] и оценить скорость падения осадков ( $v_n$ ) через широко представленные в справочниках по климатологии данные об интенсивности осадков.

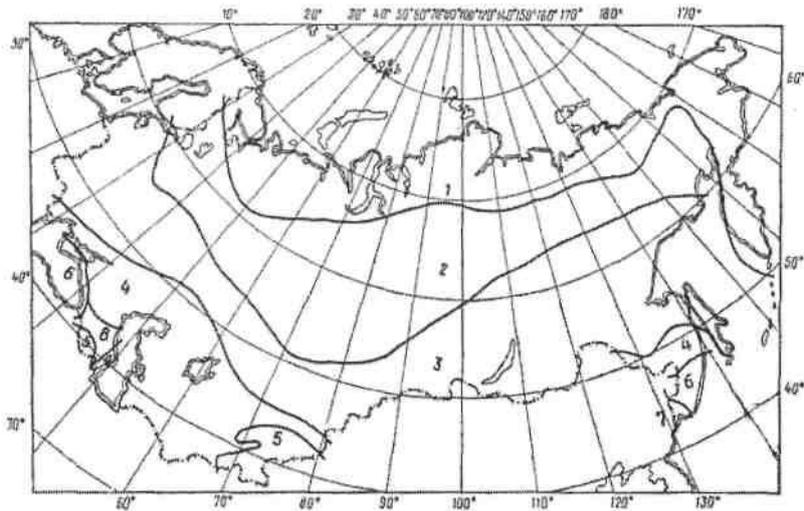


Рис.8.1. Карта зон, выделенных по характеру связи между среднемесячной скоростью ветра при дожде и среднемесячной скоростью ветра при всех погодных условиях



Рис.8.2. График связи среднемесячной скорости ветра при дожде  $V$  и среднемесячной скорости ветра при всех погодных условиях  $V_1$   
Кривые 1 -8 соответствуют зонам на карте рис.3.6

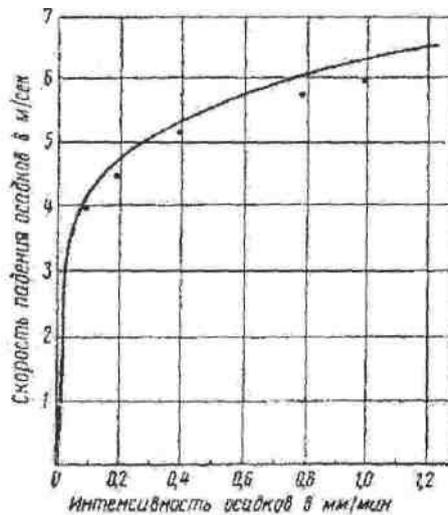


Рис.8.3. Эмпирическая зависимость вертикальной скорости падения осадков от их интенсивности

Этот метод позволяет с хорошей статистической обеспеченностью получить данные об увлажнении косыми дождями стен зданий различной ориентации. Для общей оценки осадков, выпадающих на вертикальные поверхности, можно также воспользоваться данными рис.8.4 и 8.5.

Определение количества дождя, выпадающего на стены зданий, - это только первая часть оценки влажностного состояния ограждений. Важно установить, какие процессы и как они идут в ограждающих конструкциях при дожде с ветром. Дождевая вода с верхних этажей здания будет стекать по стене к нижним, увеличиваясь по массе и скорости. Это происходит при действии ветра, и ветровой напор будет оказывать свое воздействие в зоне стыков, щелей, швов и т.д. Например, описаны случаи, когда при сильных ветрах дождевая вода поднималась по фасаду здания вверх, затекая снизу в швы между панелями. Эти вопросы изучены недостаточно и требуют своего решения.

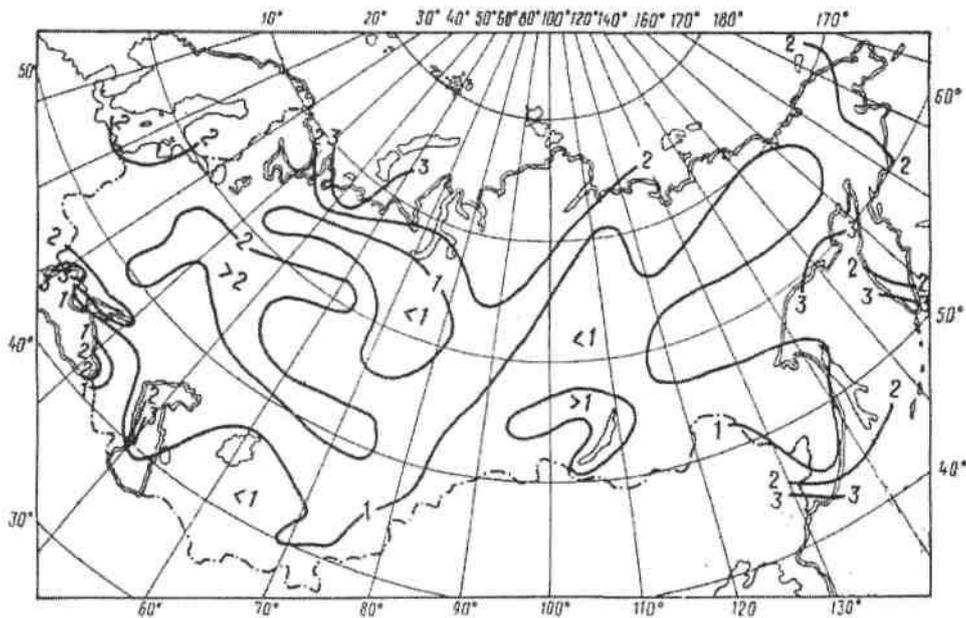


Рис. 8.4. Отношение  $P_v/P_z$  по территории СССР

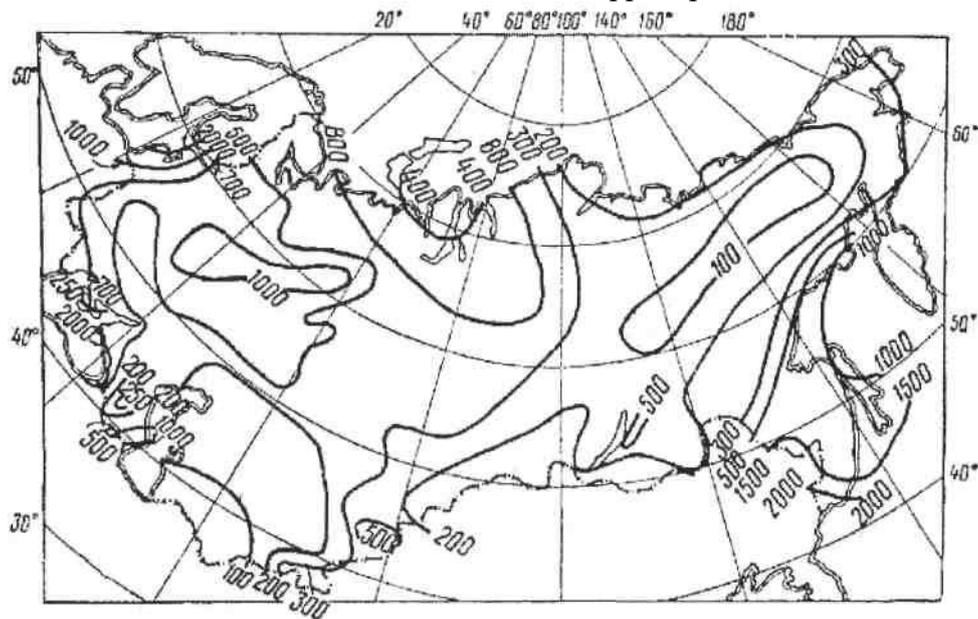


Рис.8.5. Количество осадков, выпадающих на стены зданий наветренной ориентации за теплый период года, в мм

## 8.2. Снежный покров

Снежный покров учитывается, прежде всего, как снеговая нагрузка. В СП 13330.2018 «Нагрузки и воздействия» приводится методика учета снеговой нагрузки. Учитывается масса снегового покрова, вводится перевод этой массы к снеговой нагрузке на здание, учитывается снеговой район, приводятся схемы снеговых нагрузок на покрытия зданий, в том числе с учетом скорости ветра за три зимних месяца. Именно ветер и перемещение по кровле снеговой массы приводит к неравномерности снеговой нагрузки на покрытие. Пластика объема здания вносит свои коррективы в неравномерность снеговой нагрузки, что требует учета при проектировании (рис.8.6).

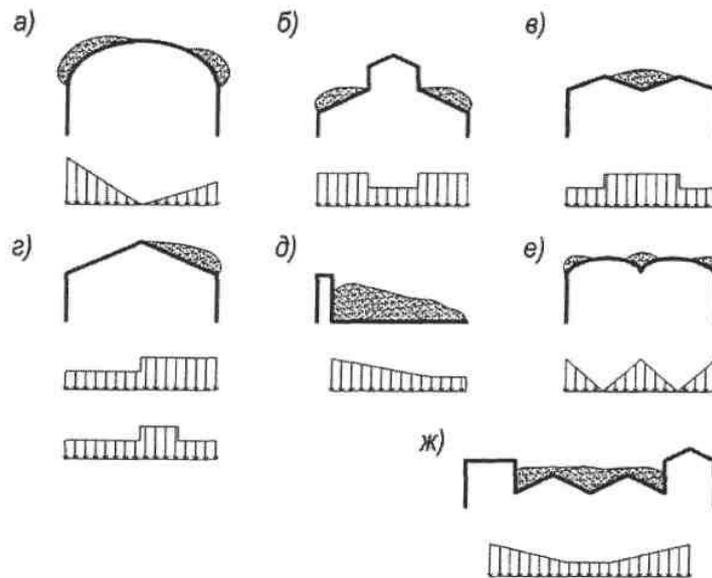


Рис.8.6. Характер снеговой нагрузки на зданиях с различным сечением покрытий а)...ж) (СП 13330.2018)

Характерной особенностью зимнего периода являются метели, сопровождающиеся снегопереносом. Направление снегопереноса совпадает с направлением господствующих ветров за зимние месяцы, а объемы снегопереноса и объемы отложения снега (сугробы) зависят от аэродинамических характеристик местности, микрорайона, здания. В зависимости от плотности снега, метели начинаются, как правило, при скорости ветра 5-6 м/с.

Метеорологические наблюдения учитывают три вида метелей: общую, низовую и поземку [17]. Вклад каждого вида метели в процесс снегопереноса различен, так как они наблюдаются при различных скоростях ветра и в различных слоях над поверхностью земли. Общая метель сопровождается выпадением снега, низовая наблюдается без снегопада при сильном ветре в слое не менее 2м над поверхностью земли, поземкой называют перенос снега только у поверхности земли в слое менее 2м.

Многочисленные экспериментальные данные подтверждают, что основная масса снега (более 95%) переносится в приземном слое высотой около 2м.

Интенсивность переноса снега пропорциональна кинетической энергии ветра и может быть определена по формуле:

$$J = c \cdot v^3, \quad (8.5)$$

где  $v$  - скорость ветра во время метели, м/с;

$c$  - коэффициент пропорциональности.

Интенсивность переноса снега может выражаться в единицу объема -  $\text{м}^3$  или массы - кг на метр пути за единицу времени, что заложено в размерности коэффициента пропорциональности  $c$ .

Количество переносимого снега за время метели ( $q$ ) зависит от ее продолжительности ( $\tau$ ). Формула интенсивности (8.5) примет вид:

$$q = J \cdot \tau = c \cdot v^3 \tau, \text{ м}^3/\text{м}. \quad (8.6)$$

Если ветер дует под углом  $\alpha$  к данному объекту, то:

$$q = J \cdot \tau \cdot \sin \alpha. \quad (8.7)$$

Для заносимого участка длиной  $l$  после суммирования всех метелей ( $n$ ) за зиму получим количество накопленного за зиму снега:

$$Q = l \sum_{i=1}^n q_i = l \sum_{i=1}^n c \cdot v_i^3 \cdot \tau_i \cdot \sin \alpha. \quad (8.8)$$

Объем переносимого за зиму снега более  $200 \text{ м}^3/\text{м}$ , является неблагоприятным и требует специальных проектных решений по снижению снеготранспорта территорий застройки.

На рис.8.7 приведена карта объемов переносимого за зиму снега [52].

Следует иметь в виду, что точность этих расчетов в значительной степени зависит от точности определения скорости ветра при метелях, так как в формулу она входит в кубе.

Определение общих объемов снеготранспорта за зимний период еще не означает определения места его отложения во время метелей и образования сугробов. Объемы снеготранспорта, методика подсчета которого разработана метеорологами, - это первая часть проблемы. Вторая часть - определение мест его отложения и образования сугробов - связана с аэродинамикой микрорайонов, групп зданий, отдельных зданий и их частей, малых форм, заборов и т.п.

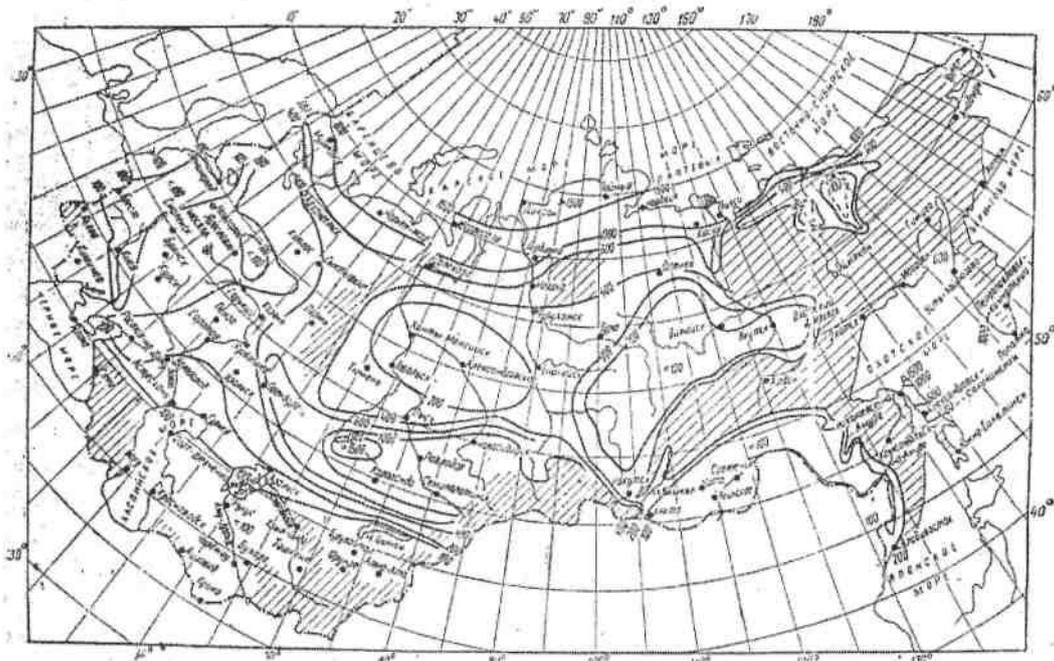


Рис.8.7. Схематическая карта районирования территории СССР по объемам снеготранспорта в  $\text{м}^3/\text{м}$  за зиму

Отложение переносимого при метелях снега у препятствий связано с частичной потерей скорости ветра и возникновением вихревых потоков воздуха.

Качественный характер снегоотложений у препятствия показан на рис.8.8. Реальный характер снегоотложений может видоизменяться в зависимости от скорости ветра, от величины которой зависит отрыв струи от препятствия и образование вихрей.

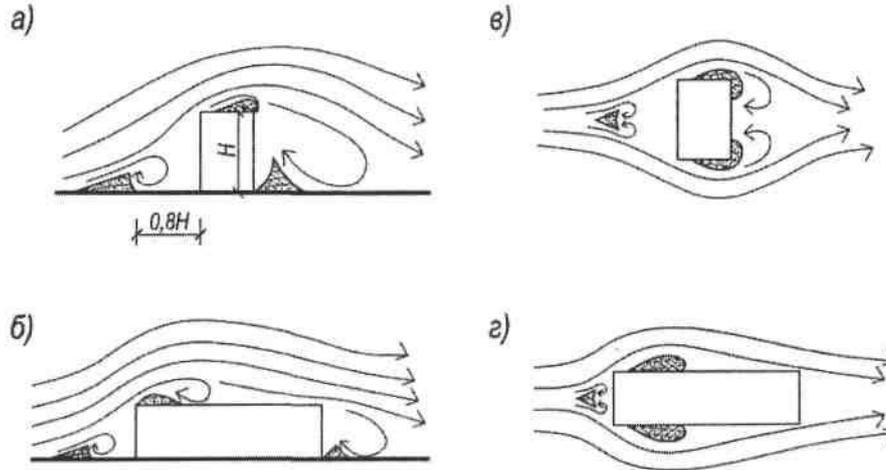


Рис.8.8. Качественный характер снегоотложений у препятствий: а) и б) схемы в разрезе, соответственно, точечного и протяженного зданий, в) и г) схемы в плане, соответственно, короткого (вдоль направления ветра) и длинного (вдоль направления ветра) зданий

Интенсивность отложений снега в зоне препятствия может быть определена по формуле:

$$\Delta J = J_1 - J_2 = c \cdot (v_1^3 - v_2^3) \text{ м}^3/\text{м час},$$

где  $J_1$  – интенсивность снеготранспорта до препятствия;

$J_2$  – то же в зоне препятствия;

$v_1$  – скорость ветра до препятствия;

$v_2$  – то же в зоне препятствия.

Величина отложений снега в зоне препятствия зависит от продолжительности метели ( $\tau$ ) и, в соответствии с формулой (8.8), может быть определена из выражения;

$$q = c \cdot (v_1^3 - v_2^3) \cdot \tau \text{ м}^3/\text{м}. \quad (8.9)$$

По объемам снегоотложений известны лишь единичные работы и требуются системные исследования.

## Практическое занятие №9

### 9.1. Ветер

9.2. Оценка круга горизонта по климатическим факторам и анализ микроклимата в районе застройки

### 9.1. Ветер

Ветровой режим городов и поселений находился во внимании древних зодчих, беспокоит он и современных строителей. Гиппократ предсказывал виды заболеваний у горожан в зависимости от преобладающих в городе ветров. Витрувий предостерегал от ветров в переулках города: холодные ветры неприятны, знойные нездоровы, влажные вредны. Аристотель обращал внимание при выборе месторасположения города: города, обращенные к востоку и в сторону восточных ветров, наиболее удовлетворяют санитарным условиям.

В национальных типах жилья и застройках поселений учету ветрового режима уделяется серьезное внимание. Так, в Японии жилище строилось так, чтобы потоки воздуха могли свободно проходить сквозь дом с севера на юг и наоборот за счет легких раздвижных перегородок. В Индонезии дома поднимают на столбы от раскаленной почвы, а стены делают легкопроницаемыми для малейшего дуновения ветра. Улицы сибирских сел располагаются вдоль зимних господствующих ветров с целью защиты от снегозаносов.

Известны конструкции эффективного воздухообмена в тканевых навесах и шатрах, используемых народами Ближнего Востока рис.9.1 Воздухообмен обеспечивается при малейших ветерках любого направления и даже в штиль за счет гравитационного давления (удаления через шахту перегретого воздуха и вовлечения в сооружение менее нагретого воздуха).

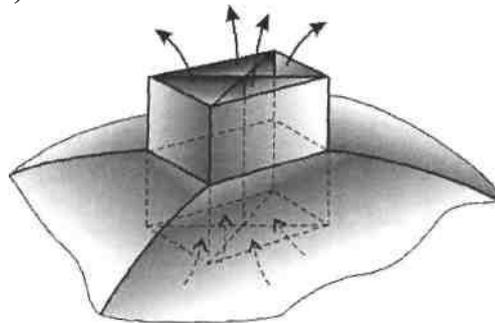


Рис.9.1. Ветровая «ловушка» (с использованием гравитационного давления)

Еще Палладио предостерегал от строительства в долинах: ветра там яростны вследствие узких расселин, через которые они вырываются, а без ветра воздух становится тяжелым и нездоровым. Эти предостережения архитекторов эпохи Возрождения не были учтены при проектировании городов Кузбасса (Кемерово, Кузнецк и др.). В Кузбассе в зимний период наблюдается большое количество штилей, а рельеф местности характеризуется замкнутыми котловинами и плохо проветриваемыми долинами. Падение скорости ветра в котловинах и большое количество штилей привели к силь-

нейшему загрязнению жилых районов выбросами производства, хотя размещение предприятий было правильным - по розе ветров.

Ветровой режим в строительной климатологии характеризуют скоростью и повторяемостью ветра по румбам. Скорость ветра измеряется в м/с, а направление - в % (без учета штилей). В соответствии со странами света, различают 8 румбов: северный (С), северо-восточный (СВ), восточный (В), юго-восточный (ЮВ), южный (Ю), юго-западный (ЮЗ), западный (З), северо-западный (СЗ). В зависимости от задачи проектирования, используют годовую, сезонную или месячную розу ветров. Надежность проектного решения будет тем выше, чем точнее соответствуют решаемым задачам параметры ветрового режима.

В современных условиях учет ветрового режима идет по четырем направлениям:

- 1) учет ветрового режима при планировке и застройке городов и территорий (в т.ч. аэрация);
- 2) учет охлаждающего действия ветра на людей и здания;
- 3) учет ветра при проектировании воздухообмена в зданиях;
- 4) учет ветра как нагрузки.

*Учет ветрового режима городских территорий* наиболее сложный. Каждое новое здание или подросшие деревья городского парка вносят свои коррективы в направление и скорость ветра, а, следовательно, в аэрацию городской территории.

В настоящее время отсутствует теория и методика расчета аэрации городских территорий, а наблюдения и эксперименты отдельных исследователей носят частный характер.

В первом приближении можно использовать рекомендации [55] для оценки планировочных решений застройки с учетом ветрового режима через коэффициент продуваемости ( $K$ ). Коэффициент продуваемости численно равен отношению средней скорости ветра на территории застройки к скорости невозмущенного ветрового потока. Чем больше указанный коэффициент, тем выше скорость ветра в застройке и тем больший объем воздуха проходит через застройку. Рекомендуемые планировочные схемы объединены в две группы в зависимости от повторяемости ветра по направлениям. В табл.3.4 приведены планировочные схемы и коэффициенты продуваемости для районов с равномерной повторяемостью ветра по направлениям, а в табл.3.5 - для районов с преобладающим направлением ветра по одному из направлений.

Эти рекомендации носят слишком общий характер. Как использовать данные о коэффициенте продуваемости? С одной стороны, это свежий воздух в застройке, с другой - увеличение скорости ветра за счет сложения потоков, возникновение ветрового дискомфорта и дополнительное охлаждение зданий, возможности образования сугробов при зимних метелях. В настоящее время проектная наука не располагает количественными методами оценки перечисленных выше проблем. Главным инструментом остается интуиция проектировщика.

Таблица 9.1 Планировочные схемы и коэффициенты продуваемости для районов с равномерной повторяемостью ветра по направлениям

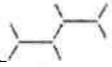
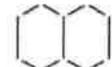
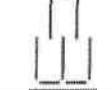
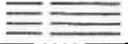
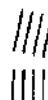
Тип застройки	Подтип	Схема	$K$
Строчная	<i>A</i>		0,45
	<i>B</i>		0,38
Ленточная	<i>A</i>		0,38
	<i>B</i>		0,35
Взаимно перпендикулярная	<i>A</i>		0,71
	<i>B</i>		0,42

Таблица 9.2 планировочные схемы и коэффициенты продуваемости для районов с преобладающим направлением ветра по одному из направлений

Тип застройки	Подтип	Направление ветра	Схема	$K$
Строчная	<i>A</i>	→		1,5
	<i>A</i>	→		0,3
	<i>B</i>	→		1,8
	<i>B</i>	→		0,6
	<i>B</i>	→		1,7
	<i>B</i>	→		0,6
	<i>Г</i>	→		1,45
	<i>Г</i>	→		0,55
Дворовая	<i>A</i>	→		1,3
	<i>B</i>	→		0,3

При учете охлаждающего действия ветра необходимо рассматривать его в сочетании с температурой.

Комфортными условиями для человека является ветер со скоростью не более 2,5 м/с, условия комфортности сохраняются при температурах воздуха 16-28°C. При увеличении скорости ветра происходит сильное охлаждение, при увеличении температуры до 32°C ветер дает некоторое облегчение, а при температуре свыше 32°C ветер не дает облегчения.

В зимних условиях при скорости ветра свыше 5 м/с происходит сильное охлаждение зданий. Наветренные стены зданий со стороны господствующих зимних ветров требуют повышенной воздухопроницаемости и теплозащиты.

Согласно нормативным документам, теплопотери в зданиях за счет инфильтрации и действия ветра составляют 5% для ограждений, защищенных от ветра и 10% - для ограждений, открытых ветрам. Фактически теплопотери от ветра могут достигать 30%.

В зарубежных нормах теплопотери зданий от инфильтрации при ветре в зависимости от высоты зданий составляют: США - 30-40%, Англия 15-50%, ФРГ 7-40%.

Есть предложения [21] учет теплопотерь при ветре проводить на основе так называемой температурной розы ветров, в которой объединены повторяемость, средняя температура и средняя скорость ветра каждого направления (румба).

Пребывание человека на улице в условиях Севера определяется совместным воздействием отрицательных температур и скорости ветра (рис.9.2). Данные рисунка предъявляют требования к проектированию зданий и комплексов в условиях Севера, исключая или сводящие к минимуму переход между зданиями по открытому воздуху.

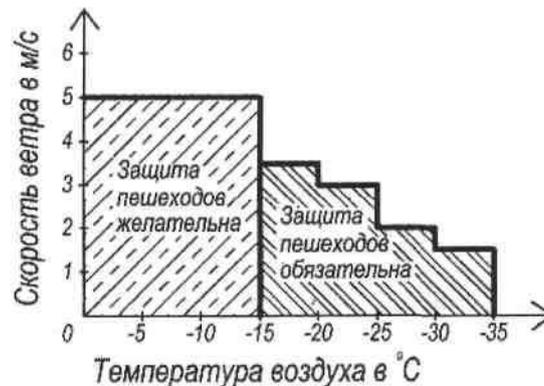


Рис.9.2. Воздействие ветра и отрицательных температур на человека

Для решения третьей и четвертой задач требуется информация о ветровом напоре на здания, который, в свою очередь, зависит от скорости ветра и аэродинамических характеристиках зданий, комплексов или микрорайонов.

На рис.4.3 показаны примеры обтекания здания воздушным потоком, который определяет ветровой напор на наветренной стороне и отсос на заветренной и других ограждениях здания.

В общем случае давление ветра на здание определяется по формуле:

$$P = K \frac{\rho_n v_n^2}{2g}, \quad (9.1)$$

где  $P$  - давление ветра на здание, кПа (кгс/см<sup>2</sup>);

$K$  - аэродинамический коэффициент;

$\rho_n$  - плотность наружного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$v_n$  - скорость ветра, невозмущенного ветрового потока, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения,  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

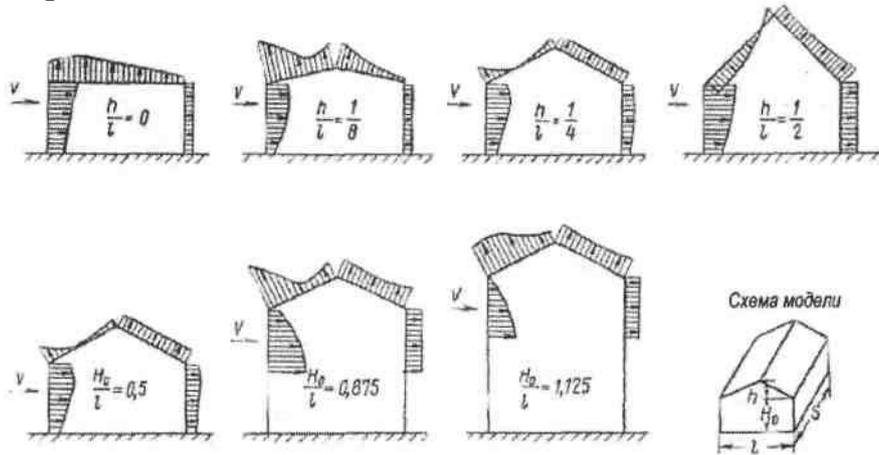


Рис.9.3. Ветровой напор на здания при различных параметрах модели

Для расчета ветровой нагрузки на элементы зданий аэродинамический коэффициент принимают в соответствии с СП 13330.2011 «Нагрузки и воздействия». На наветренной стороне здания эти коэффициенты не превышают  $+1,0$ , на заветренной могут достигать значения  $-2,0$  в зависимости от профиля зданий.

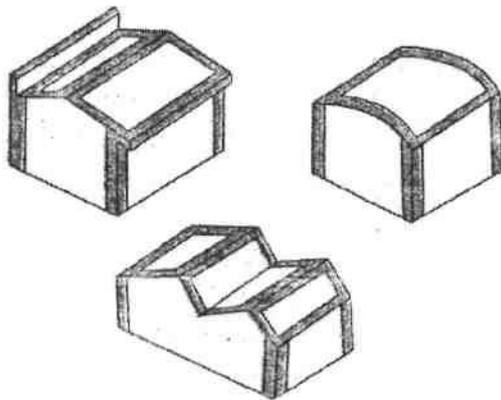


Рис.9.4. Участки зданий с повышенным отрицательным давлением ветра

В связи с ветровой нагрузкой, важное значение приобретает проектирование конструкций углов, карнизов, коньков и парапетов зданий, крепление ограждающих элементов в этих местах, поскольку эти участки испытывают повышенное отрицательное давление ветра (аэродинамический коэффициент равен  $-2,0$  (рис. 9.4)). Невнимание к вопросам конструирования указанных элементов зданий может привести к серьезным авариям. При проектировании воздухообмена в зданиях при действии ветра формула (3.20) примет вид:

$$P = \left( \frac{K_1 - K_2}{2} \right) \frac{\rho_i v_i^2}{2g}, \quad (9.2)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  - аэродинамические коэффициенты с наветренной и заветренной сторон здания.

Следует заметить, что результаты расчетов по формулам (9.2) или (9.1) в значительной степени зависят от правильности выбора значения скорости ветра, поскольку в формулу она входит в квадрате.

Несмотря на «одинаковость» в написании формул (9.2) и (9.1) и похожесть задач (оценка ветрового давления на здания), выбор значения скорости ветра для них принципиально различен.

Для ветра как нагрузки следует выбирать скорость ветра, повторяющуюся достаточно редко - один раз за определенный период лет. Этот период зависит от решаемой задачи.

При расчете ветровой нагрузки на здание в целом, принимается скорость ветра, случающаяся один раз за 20 или более лет. При расчете крепления элементов зданий, которые могут быть заменены в процессе эксплуатации, можно принять другое значение скорости ветра, повторяющееся один раз за 5 лет. Это значение будет ниже, ветровое давление будет также ниже, и крепежные элементы могут быть экономичнее.

При оценке воздухообмена в зданиях, подход к величине скорости ветра (формула 9.1) принципиально другой. Воздухообмен в зданиях формирует санитарно-гигиенические условия помещений, а эти условия должны поддерживаться постоянно (зимой и летом, днем и ночью, сразу по завершении строительства здания и через десятки лет эксплуатации).

Для решения этой задачи необходима информация о скорости ветра в любой момент времени или информация о скорости ветра за определенные периоды времени: дневные, вечерние, сезонные, наличие штилей.

В справочной литературе о климате в концентрированном виде эти данные отсутствуют. В СП 60.13330.2016 при расчете воздухообмена за счет действия ветра для всех случаев установлено: скорость ветра - 1 м/с.

Безусловно, значение скорости ветра, принимаемое в расчетах, требует большего обоснования (теплый или холодный период года, объемно-планировочное решение квартир, их ориентация по странам света, направление ветра в разные сезоны, конструктивные решения систем естественной вентиляции и т.д.).

## **9.2. Оценка круга горизонта по климатическим факторам и анализ микроклимата в районе застройки**

Проведенный в предыдущих разделах анализ климатических факторов дает первое представление по учету климата для задач строительной отрасли.

Следующим этапом учета климата при проектировании зданий является оценка круга горизонта по климатическим факторам, выполняемая на основе экологической модели пространства профессора Блинова В. А. Модель позволяет получить климатический (экологический) паспорт города, в котором собраны климатические факторы, имеющие векторные характеристики. Выделены положительные и отрицательные воздействия факторов.

В графическом выражении модель представляет собой круг с наблюдателем (или проектируемым объектом) в центре, а по странам света расположены климатические факторы, векторно сориентированные на наблюдателя (рис.4.5). Для удобства прочтения различные климатические факторы размещаются на концентрических окружностях разных диаметров.

Оценку круга горизонта по климатическим факторам легко превратить в экологическую модель пространства добавлением других факторов городской среды, име-

ющих векторный характер (шум, производственные загрязнения, газы и запахи, технологическая пыль и т.д.).

Климатические факторы, рассмотренные в предыдущих разделах и сведенные в оценку круга горизонта, представляют собой оценку климата, полученную на специальных метеорологических станциях на большой высоте или на специальных площадках, расположенных за городом на открытой местности. Эти данные применимы для проектирования отдельно стоящего здания в сельской местности.

Урбанизированная среда, рельеф, растительность, водные поверхности вносят коррективы в «классические» характеристики климатических факторов. Эти коррективы могут идти как в сторону усиления действия факторов, так и в сторону их ослабления.

Для корректировки «классических» значений климатических факторов, учитывающих рельеф и другие природные характеристики участка строительства, рекомендуется использовать табл.9.6. [26].

Для учета городской среды в районе застройки рекомендуется пользоваться табл.9.7 [22].

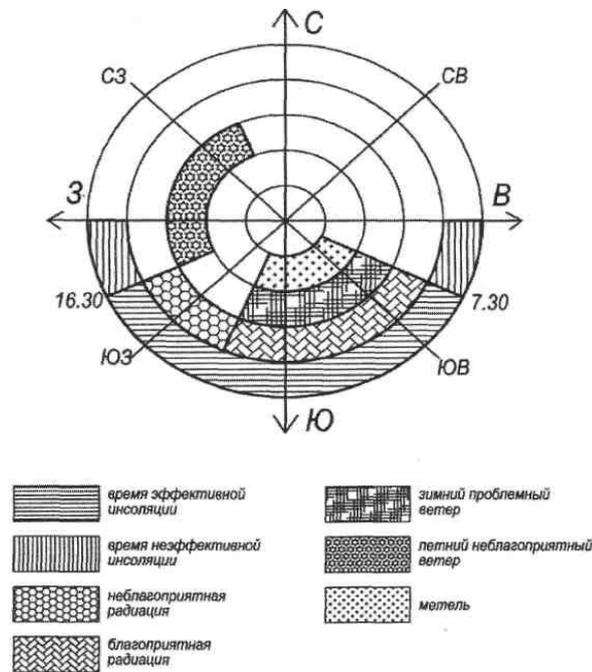


Рис. 9.5. Оценка круга горизонта по климатическим факторам для Казани

Таблица 9.3 Основные закономерности формирования микроклимата в условиях природной среды

Элементы природной среды	Закономерности изменения климатических факторов
Рельеф:	Днем температура воздуха на 2-4 °С ниже, чем в окружающей местности, в ясные и тихие ночи – на 1,5-2 °С теплее по сравнению с ровным местом и на 2-8 °С – с дном долин и подножьем склонов
вершины и открытые верхние части склонов	
южные склоны	Максимальные дневные температуры. Получают тепла на 8-10 °С больше, чем на равнине
северные склоны	Наиболее холодные (особенно летом). Получают тепла на 8-10 °С меньше, чем на равнине
наветренные склоны	Наиболее холодные, имеют небольшую глубину снежного покрова
подветренные (заветренные) склоны	Наиболее теплые, имеют большую глубину снежного покрова
долины, котловины, нижние части склонов	Значительно большие суточные колебания температуры воздуха, частое образование туманов, росы. Ночью самые низкие температуры и высокая влажность воздуха. Плохие условия проветривания.
Растительность	На 2-22% снижает проникновение солнечной радиации. Возможно снижение температуры воздуха на 10 °С. Ветрозащитное действие
Моря, водохранилища, озера	Весной и в начале лета водоем охлаждает прилегающую территорию; в конце лета и осенью – утепляет. Вблизи водоема днем температура воздуха на 2-4 °С ниже, а ночью – на 2-4 °С выше, чем вдали от берега

Таблица 4.4 Основные закономерности формирования микроклимата в городской среде

Элементы климата	Изменение климатических характеристик в сравнении с загородной зоной
Солнечная радиация	Снижение до 20% в зависимости от степени загрязнения воздуха, времени года и суток
Температура воздуха	Повышение на 1-4 °С в зависимости от плотности застройки: в застройке плотностью до 20% - на 1-2 °С, плотностью более 20% - на 3-4 °С (без учета влияния озеленения на снижение температуры)
Скорость ветра	Снижение или увеличение на 20-70 % в зависимости от плотности застройки: в застройках плотностью до 30% - на 20—25 %, плотностью более 30% - больше чем на 50%.

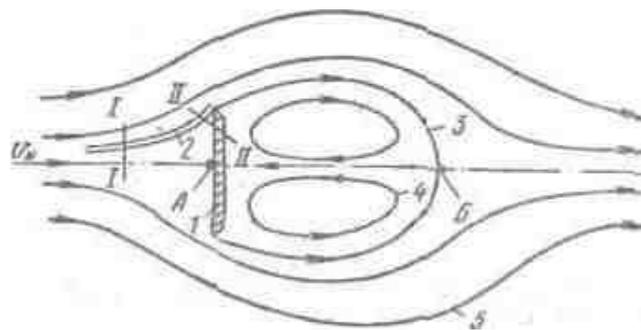
## Практическое занятие №10

- 10.1 Зона аэродинамического следа.
- 10.2 Обтекание потоком воздуха отдельно стоящего здания.
- 10.3 Аэродинамические характеристики здания.

### 10.1 Зона аэродинамического следа

Обтекание тел потоками жидкости или газов является весьма сложным физическим процессом. Этот процесс исследуют самолетостроители, транспортники, судостроители. Исследования ведутся в основном экспериментальными методами с привлечением аппарата теории подобия.

При набегании потока на препятствие (тело) перед и за ним образуется область так называемого отрывного течения. Иногда эту область называют застойной областью или зоной. Мы будем пользоваться термином *зона аэродинамического следа* (зона АС), имея в виду всю область отрывного течения. При обтекании тел турбулентным установившимся потоком воздуха при дозвуковых скоростях в зоне аэродинамического следа наблюдаются сложные вихревые неустановившиеся трехмерные движения, даже если поток набегает на двухмерное препятствие (пластину). Уже для тел простейшей формы процессы обтекания весьма сложны. Однако, введя некоторые упрощения, оказалось возможным получить для пластины, шара, цилиндра и других подобных тел аналитическое решение для расчета их аэродинамического сопротивления и габаритных размеров зоны аэродинамического следа. Аналитическое решение обычно является первым приближением решения задачи, не учитывающим вихревые движения в зоне аэродинамического следа. **Осредненные** линии тока в зоне аэродинамического следа можно построить по средним значениям скорости, полученным экспериментально. Для плоской пластины **осредненные** линии тока в следе представлены на рис. 10.1.



I—I, II—II—сечения; А—пластина; 2—элементарная струйка потока воздуха, набегаящего на пластину; 3—граница зоны аэродинамического следа; 4—вихревое движение (линия тока) в зоне аэродинамического следа; 5—линия тока за пределами зоны аэродинамического следа; А и Б—точки торможения

Рис 10. 1. Схема обтекания бесконечной пластины потоком воздуха

Характер движения в зоне аэродинамического следа определяется режимом набегаящего потока (числом  $Re$ ). При ламинарном режиме набегаящего потока вихри, образующиеся за пластиной, постепенно увеличиваясь, попарно увлекаются потоком. При небольшой турбулентности вихри образуются то у одной кромки пла-

стины, то у другой и уходят от них попеременно. Центры вихрей расположены вдоль потока за пластиной в «шахматном» порядке. Такая вихревая система с «шахматным» расположением центров вихрей носит название вихревой дорожки Кармана. При дальнейшем увеличении числа  $Re$  набегающего потока дорожка Кармана исчезает. Вихревое движение в зоне аэродинамического следа приобретает как бы устойчивый характер. Движение потока за пластиной становится устойчиво турбулентным и оторвавшиеся вихри сразу же затухают, разбиваясь на более мелкие. Границу зоны аэродинамического следа также нельзя рассматривать как установившуюся. На этой границе происходит взаимодействие двух потоков, имеющих разный энергетический уровень. Поток, срывающийся с кромки пластины; имеет большую энергию, чем поток, подходящий к границе из зоны аэродинамического следа. В результате взаимодействия этих потоков на границе зоны возникает вихревой слой.

Характерным для обтекания пластины является наличие двух точек торможения. Точка  $A$  (см. рис. 10.1), лежащая на оси симметрии, является точкой деления потоков и при плоскопараллельном потенциальном потоке скорость в ней близка к нулю. Точка  $B$  находится в месте смыкания основного потока, обтекающего пластину. Правее точки  $B$  направление движения совпадает с направлением набегающего потока. Левее точки  $B$  находится зона аэродинамического следа, в которой направление движения вдоль оси симметрии противоположно направлению основного потока. Расположение точки  $B$  постоянно меняется из-за пульсации потока.

## 10.2 Обтекание потоком воздуха отдельно стоящего здания

При исследовании воздействия турбулентного потока воздуха (ветра) на здания и сооружения предметом изучения обычно является распределение давления ветра. Знание этого давления дает возможность строителям рассчитать ветровую нагрузку на здание, а специалистам по вентиляции — воздухообмен через открытые проемы и неплотности в ограждениях.

При обтекании здания потоком воздуха около него образуется застойная зона. Определение размеров этой зоны, условий циркуляции в ней воздушных потоков и, следовательно, условий проветривания зоны также является целью аэродинамического исследования здания. Наибольшее значение это исследование имеет для промышленных зданий с большим количеством вредных выбросов.

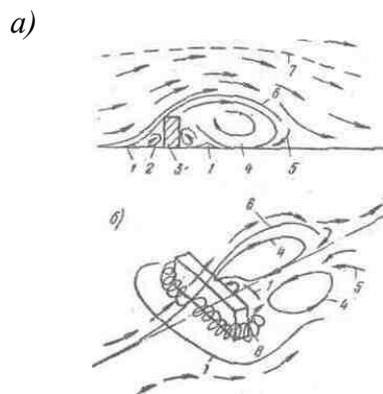
Здание, как и пластина, является плохо обтекаемым телом. Обтекание здания потоком воздуха даже при простейшей его форме — параллелепипеде — является сложным процессом из-за трехмерности препятствия и влияния подстилающей плоскости — поверхности земли.

Рассмотрим схему обтекания потоком воздуха отдельно стоящего здания (рисунки 10.2). При набегающем на препятствие нижние слои потока воздуха затормаживаются, и кинетическая энергия этой части потока переходит в потенциальную, следовательно, статическое давление увеличивается. Увеличение статического давления происходит постепенно по мере приближения к зданию, (практически начиная за пять — восемь калибров до здания, если за калибр принять средний размер фасада). Максимального значения статическое давление достигает на поверхности

наветренного фасада. Набегающий поток воздуха образует зону циркуляции непосредственно у поверхности здания (см. рисунок). Вихри, образующиеся здесь, как бы дополняют форму здания до удобообтекаемой и тем самым уменьшают потери энергии основного потока. В этой зоне постоянно происходит обмен воздуха, совершающего вихреобразные движения и уходящего на заветренную сторону здания (рисунок 10. 2, б).

Набегающий поток воздуха обтекает здание и зону циркуляции сверху и с боков. Обтекающий здание поток воздуха в силу некоторого его поджатия имеет скорость, несколько большую, чем скорость ветра. Этот поток интенсивно эжектирует воздух с заветренной стороны здания, где в результате этого давление уменьшается. Воздух, уносимый из заветренной зоны, компенсируется приземными слоями потока, в которых воздух заторможен настолько, что может изменять направление своего движения. Назаветренной стороне здания образуется несколько вихрей (на рисунок 10. 2, а показано два). Расположение границы зоны аэродинамического следа в этой области указано ориентировочно. Эта граница заметна лишь вблизи места срыва потока с наветренного фасада. На рисунке показаны образующиеся при обтекании зданий две приземные застойные области, в которых подвижность воздуха настолько мала, что из него осаждаются мельчайшие взвешенные частицы.

Исследования, проведенные для отдельно стоящего здания при установившемся потоке, позволили выявить лишь принципиальную схему потоков воздуха вблизи здания. В реальных условиях поток воздуха обычно неустановившийся. Пульсирующие изменения направления и силы ветра приводят к тому, что в натуральных условиях габариты зоны аэродинамического следа и циркуляция воздуха в пределах зоны изменяются во времени. При обтекании ветром группы зданий зоны аэродинамических следов влияют друг на друга, и аэродинамика обтекания усложняется.



а—вертикальный разрез, б—схема движения воздуха в зоне аэродинамического следа;

1—граница между вихрями в зоне аэродинамического следа, участок с нулевой скоростью движения воздуха; 2—зона избыточного давления; 3—здание; 4—зона разрежения и вихревого движения воздуха; 5—обратные потоки воздуха, входящие в зону аэродинамического следа; 6—граница зоны аэродинамического следа; 7—граница влияния здания на поток воздуха; S—вихреобразные потоки воздуха из зоны избыточного давления в зону разрежения

Рис. 10.2. Схема обтекания здания потоком воздуха

Знание размеров зоны аэродинамического следа дает возможность решать вопрос о расположении точек выброса вредных веществ и мест воздухозабора. Например, если очистка удаляемого из здания загрязненного воздуха невозможна, то вы-

брос этого воздуха необходимо осуществлять на высоте, превышающей высоту зоны аэродинамического следа, поскольку при попадании вредных веществ в зону концентрация их в ней может превысить допустимый уровень.

Воздухозабор целесообразно устраивать на боковых фасадах или на главных фасадах в местах, примыкающих к торцам здания, так как, здесь проходит вихревой поток воздуха с наветренной стороны, подпитывающий зону аэродинамического следа на заветренной стороне здания.

### 10.3. Аэродинамические характеристики здания

Избыточное статическое давление перед зданием и разрежение за ним, возникающие при обтекании здания потоком воздуха, пропорциональны динамическому давлению ветра.

При расчете ветровой нагрузки на здание, а также при определении давлений в отдельных точках его наружной поверхности применяется аэродинамический коэффициент  $k_{aэр}$ .

*Аэродинамический коэффициент* показывает отношение **избыточного** статического давления в одной из точек наружной поверхности здания к динамическому давлению ветра. В соответствии с этим статическое давление в любой точке наружной поверхности здания равно:

$$P_{ст} = k_{aэр} \frac{\rho_n g_n^2}{2} \quad (10.1)$$

Аэродинамические коэффициенты обычно определяют экспериментально в аэродинамических трубах на моделях зданий. Известны способы аналитического расчета аэродинамических коэффициентов для зданий простейших форм. Значение и знак аэродинамического коэффициента зависят от места расположения точки на поверхности здания, от формы здания и направления ветра. На значение этого коэффициента оказывают влияние близко расположенные здания и сооружения, а также рельеф местности. Энергетический смысл аэродинамического коэффициента заключается в том, что его значение показывает в долях единицы, какая часть удельной кинетической энергии потока переходит в удельную потенциальную энергию. Значение аэродинамического коэффициента можно выразить через скорости потока в отдельных точках вблизи здания. Для этого используем уравнение Бернулли;

Предположим, что поток воздуха набегает на пластину, расположенную перпендикулярно его направлению (см. рисунок 10.1). Выделим в потоке элементарную струйку. Если пренебречь потерей энергии между сечениями I—I и II—II и сжимаемостью воздуха, можно записать уравнение сохранения энергии в таком виде:

$$p_I + \frac{\rho g_I^2}{2} = p_{II} + \frac{\rho g_{II}^2}{2} \quad (10.2)$$

где  $p_I$  и  $p_{II}$ —статическое давление соответственно в сечениях I—I и II—II;  $g_I$  и  $g_{II}$  — скорость движения воздуха в указанных сечениях.

Если статическое давление в сечении I—I, расположенном на большом расстоянии от пластины, принять за нуль, то избыточное статическое давление в сечении II—II можно определить следующим образом:

$$p_{cm} = p_{II} - p_I = \frac{\rho \mathcal{G}_I^2}{2} \quad (10.3)$$

отсюда значение аэродинамического коэффициента

$$k_{aep} = 1 - \left( \frac{\mathcal{G}_{II}}{\mathcal{G}_I} \right)^2 \quad (10.4)$$

Если  $\mathcal{G}_{II} < \mathcal{G}_I$  (наветренная сторона пластины), то  $k_{aep.n} > 0$ . Если  $\mathcal{G}_{II} > \mathcal{G}_I$  (заветренная сторона пластины), то  $k_{aep.z} < 0$ . В действительности движение воздуха у заветренной стороны пластины и здания не подчиняется уравнению (10.2). Значения  $k_{aep.z}$  определяются процессом эжекции.

В точке торможения А теоретическое значение аэродинамического коэффициента  $k_{aep.A} = 1$ .

Для наиболее широко распространенной формы здания (параллелепипед) аэродинамический коэффициент имеет следующие значения на фасаде с наветренной стороны  $k_{aep.n} = 0,4 \dots 0,8$ , на фасаде с заветренной стороны  $k_{aep.z} = 0,3 \dots 0,6$ .

На значение аэродинамического коэффициента некоторое влияние оказывает открытие окон в здании и организация сквозного проветривания (аэрация под действием ветра). Однако в практических расчетах этим влиянием пренебрегают. Последние исследования показали, что значение аэродинамического коэффициента зависит от распределения скоростей в набегающем потоке. Эпюра скоростей ветра по высоте здания имеет криволинейный характер из-за наличия пограничного слоя у поверхности земли. В связи с этим появляется неопределенность—к какой скорости относить аэродинамический коэффициент. В данном случае можно пользоваться следующими рекомендациями:

1) если соотношение высоты здания  $H$  и протяженности фасада  $L$  меньше 1 (низкое протяженное здание), обтекание воздухом происходит в основном над зданием, и давление ветра можно определять по аэродинамическим коэффициентам и динамическому давлению, вычисленным по средней скорости ветра  $\mathcal{G}_{cp}$  (по высоте здания). Этот случай встречается в основном при расчете давления ветра на ограждения промышленных и многосекционных жилых и общественных зданий;

2) для высоких зданий при  $L > 1$  обтекание происходит в горизонтальных плоскостях (боковое обтекание), и статическое давление можно определять по локальным аэродинамическому коэффициенту и динамическому давлению, вычисленным по скорости  $\mathcal{G}_i$  на уровне рассматриваемой точки.

## Практическое занятие №11

### 11.1 Воздушный режим здания

#### 11.2 Передача тепла через ограждение при фильтрации воздуха

#### 11.3 Дополнительные затраты тепла в помещении на инфильтрацию

### 11.1 Воздушный режим здания

Воздушным режимом здания называют общий процесс обмена воздухом между помещениями и наружным воздухом, который происходит под действием естественных сил и работы искусственных побудителей движения воздуха. Наружный воздух поступает в помещения через проницаемые ограждения и по каналам приточных вентиляционных систем. Внутри здания воздух может обмениваться между помещениями через двери и неплотности во внутренних конструкциях. Он удаляется из-помещения за пределы здания через наружные ограждения и по вентиляционным каналам вытяжных систем (рисунок 11.1).

Естественными силами, вызывающими движение воздуха в здании, являются гравитационное и ветровое давления. Воздухообмен под влиянием естественных сил можно уменьшить лучшей герметизацией ограждения^ частичное же его регулирование возможно дросселированием каналов вентиляции открыванием окон, фрагуг и вентиляционных фонарей.

Воздушный режим здания связан с его тепловым режимом. Инфильтрация наружного воздуха приводит к дополнительным затратам тепла на его подогрев. Экс-фильтрация внутреннего воздуха увлажняет ограждения и снижает их теплозащитные качества. Положение зон инфильтрации и эксфильтрации в здании зависит от геометрии, конструктивных особенностей, режима вентилирования здания, а также от времени года и климата.. Между фильтрующим воздухом и ограждением происходит теплообмен, который специфичен для каждого вида конструкций (массив ограждения, стык панелей, окна,. воздушные прослойки и т.д.).

Для выявления влияния на тепловой режим здания движения воздуха необходимо определить интенсивность и направление потоков воздуха и рассчитать передачу тепла через отдельные виды ограждения в условиях воздухопроницания.

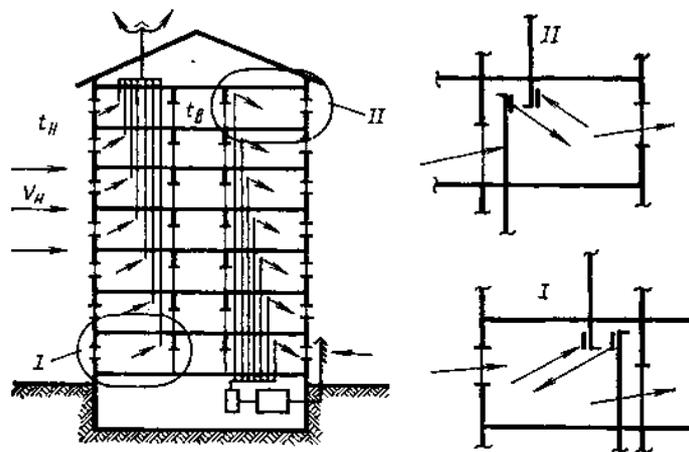


Рисунок 11. 1. Воздухообмен в здании и направления движения воздушных потоков в помещениях

## 11.2 Передача тепла через ограждение при фильтрации воздуха

Воздухопроницание существенно влияет на теплопередачу через ограждения, а также на теплопотери и тепловой режим помещений. Проницание воздуха сказывается по-разному на передачу тепла через различные виды конструкций. У окон, которые обладают наибольшей проводимостью воздуха, заметно увеличиваются теплопотери. Влияние на массив (толщ) и стыки ограждения в основном сказывается в понижении температуры внутренней поверхности.

### *Теплопередача толщ и элементов (стык, окно) ограждения при фильтрации воздуха*

**Теплопередача пористого ограждения при фильтрации воздуха.** При фильтрации воздуха температурное поле и теплообмен на поверхностях пористого ограждения заметно изменяются в результате переноса тепла потоком воздуха. Расход воздуха  $j$ , проникающего через ограждения, обычно невелик: до 10 кг/ч через 1 м<sup>2</sup> поверхности. Воздух движется по порам и капиллярам медленно (число Рейнольдса соответствует приблизительно 0,05), и его температура во всех сечениях ограждения практически близка температуре окружающего твердого материала. Все это упрощает математическое рассмотрение.

Уравнение нестационарного температурного поля плоского пористого ограждения при наличии поперечной фильтрации воздуха, пользуясь , запишем в конечных разностях:

$$c \frac{\Delta_z t}{\Delta z} = \frac{1}{\Delta R} \Delta_x^2 t + c_B j \Delta_x t \quad (11.1)$$

В дифференциальной форме оно имеет вид

$$c_p \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + c_B j \frac{\partial t}{\partial x} \quad (6.2)$$

Нестационарная теплопередача через однородное ограждение при фильтрации воздуха в период резкого зимнего похолодания рассмотрена В. П. Титовым в МИСИ им. В. В. Куйбышева. Задачу решали на гидроинтеграторе с преобразованием уравнения (6.2) в обычное уравнение Фурье подстановкой

$$t = \tau e^{\nu} \quad (11.3)$$

где  $\tau$  — новая искомая функция, зависящая от  $x$  и  $z$ , относительно которой ведется расчет на гидроинтеграторе;

$\nu$  — безразмерный коэффициент.

Некоторое усложнение граничных и начальных условий, которое при этом получается, для расчета на гидроинтеграторе несущественно.

По результатам серии расчетов определен коэффициент фильтрации  $\nu_{\phi}$ . Для зимних условий, который равен отношению наибольших тепловых потоков на внутренних поверхностях герметичного ограждения и воздухопроницаемого ограждения при инфильтрации наружного воздуха. Коэффициент  $\nu_{\phi}$  связан с изменением минимальной температуры внутренней поверхности, поэтому его значение необходимо

учитывать при расчете  $R_{0,тр}$ . Зависимость коэффициента УФ от теплофизических свойств ограждения и интенсивности инфильтрации показана на рисунке 11.2.

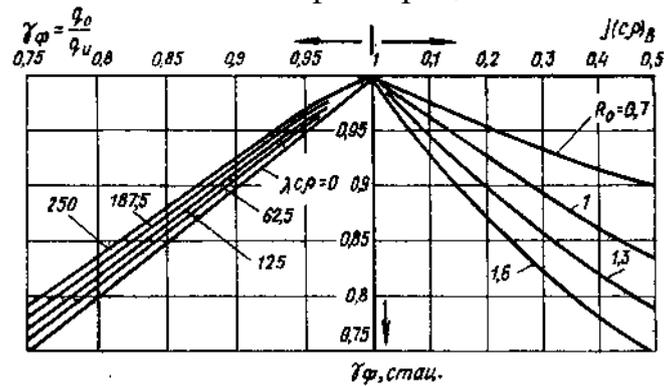


Рисунок 11.2 Зависимость коэффициента  $\nu_\phi$  от теплофизических свойств ограждения и интенсивности инфильтрации ( $\nu_{\phi,стат}$  — в стационарных условиях теплопередачи)

Уравнение температурного поля многослойного ограждения в стационарных условиях при фильтрации воздуха удобно записать, пользуясь масштабом термических сопротивлений, в виде

$$\frac{d^2t}{dR^2} + c_\nu j \frac{dt}{dR} = 0 \quad (11.4)$$

где  $j$  — интенсивность фильтрации воздуха при вдуве с минусом и отсосе с плюсом.

Движение воздуха через поверхность изменяет интенсивность конвективного теплообмена на ней. Этот вопрос изучен теоретически и экспериментально.

Условия конвективного теплообмена при вдуве и отсосе воздуха при расчете теплопередачи так же, как и при отсутствии фильтрации, можно учесть введением эквивалентных слоев на поверхностях ограждения. Теплообмен в пограничном слое в этих условиях при ламинарном и турбулентном режиме движения воздуха приближенно можно рассчитать, пользуясь уравнением (11.4). Результаты решения дали хорошую сходимость с данными теоретических исследований. При вдуве воздуха через поверхность (например, при инфильтрации на внутренней поверхности ограждения) интенсивность теплообмена уменьшается, а при отсосе увеличивается. Коэффициент конвективного теплообмена при наличии фильтрации  $\alpha_{к,ф}$  может быть достаточно точно определен по формуле:

$$\alpha_{к,ф} = \alpha_k \pm \frac{c_\nu}{2} j \quad (11.5)$$

Возможность введения эквивалентных (сопротивлению теплообмена) слоев при воздухопроницании позволяет стационарную теплопередачу через многослойное ограждение при фильтрации воздуха полностью определить одним уравнением (6.3). Лучистый теплообмен на поверхностях при этом можно учесть, применив метод суперпозиции или введя условную температуру среды.

Распределение температуры по сечению ограждения при фильтрации воздуха по уравнению (6.1) имеет вид

$$t = t_H + (t_B - t_H) \frac{e^{c_\nu j R} - 1}{e^{c_\nu j R_0} - 1} \quad (11.6)$$

ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК

$$q = \frac{c_B j e^{c_B j R}}{e^{c_B j R_0} - 1} (t_B - t_H) \quad (11.7)$$

При эксфильтрации воздуха через ограждение в этих формулах величина  $j$  имеет знак минус.

При инфильтрации, как это следует из формулы (11.7), тепловой поток на внутренней поверхности (не поверхности эквивалентного слоя) оказывается наибольшим, по мере приближения к наружной поверхности  $c$  уменьшается. Это происходит в результате рекуперации — частичного возврата теряемого через ограждение тепла на нагрев наружного воздуха, фильтрующего через ограждение навстречу потоку тепла. Из уравнения (6.7) следует, что разность тепловых потоков на внутренней  $q_B$  и наружной  $q_H$  термических границах ограждения с эквивалентными слоями равна:

$$q_B - q_H = c_B j (t_B - t_H) \quad (11.8)$$

Влияние потока фильтрующего воздуха на трансмиссионный перенос тепла через ограждение удобно характеризовать так называемым коэффициентом порового охлаждения  $\Pi$ , который равен отношению входящего в ограждение (через поверхность эквивалентного слоя)

### 11.3 Дополнительные затраты тепла в помещении на инфильтрацию

В производственных помещениях расход тепла на нагревание холодного воздуха, поступающего через притворы окон, фонарей, дверей, ворот, составляет до 30—40% от основных теплопотерь, поэтому при расчете теплопотерь производственных помещений специально рассчитывают затраты тепла на нагревание поступающего в помещение холодного воздуха. При определении затрат тепла на нагревание наружного воздуха при инфильтрации расчет воздушного режима здания может быть упрощен.

Промышленные здания, как правило, одноэтажны. В многоэтажных промышленных зданиях этажи чаще всего достаточно изолированы друг от друга и их воздушный режим можно рассматривать независимо.

Простейшим является случай, когда помещение не имеет перегородок, отсутствует ветер и инфильтрация происходит под влиянием только гравитационных сил. Перетекание воздуха происходит в основном через щели притворов, но инфильтрацию условно относят к площади окон, а ее интенсивность  $j$ , кг/(м<sup>2</sup>·ч), за счет разности давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждения,  $\Delta P$ , Па (кгс/м<sup>2</sup>), определяют по формуле

$$j = B_u \Delta P^{1/2}, \quad (11.9)$$

где  $B_u$  — коэффициент проводимости воздуха конструкцией.

Для помещения с двухсторонним равномерно распределенным остеклением по всей площади наружного ограждения при безветрии среднее количество воздуха, проходящего снаружи через 1 м<sup>2</sup> окна, равно:

$$j_0 = 0,47 B_{u_{ок}} d (H \Delta \rho)^{1/2}, \quad (11.10)$$

где  $B_{u \text{ ок}}$  — коэффициент проводимости воздуха для окна;  $d$  — доля остекленной поверхности наружного ограждения;  $H$  — полная высота ограждения здания.

Разность плотностей наружного  $\rho_n$  и внутреннего  $\rho_v$  воздуха может быть приближенно заменена разностью их температур:

$$\Delta\rho = \rho_n - \rho_v \approx 0,005 (t_v - t_n), \quad (11.11)$$

а выражение (11.10) преобразовано:

$$j_0 = 0,033 B_{u \text{ ок}} d (H \Delta t)^{\frac{1}{2}}. \quad (11.12)$$

В промышленных зданиях окна часто одинарные и не герметизированы, их проводимость  $B_{u \text{ ок}} = 27$ . Тогда

$$j_0 = 0,9 d (H \Delta t)^{\frac{1}{2}}. \quad (11.13)$$

Следует иметь в виду, что предлагаемые формулы приближенны. Однако точность их (ошибка 10—15%) достаточна для расчета потерь тепла на инфильтрацию.

Следует иметь в виду следующие соображения. Наибольшие теплопотери от инфильтрации (до 30—40%) связаны с наличием окон, особенно в промышленных зданиях, в которых притворы окон не заклеивают на зиму. Затраты тепла на инфильтрацию через стыки составляют до 3—5% основных теплопотерь, через толщу ограждения они еще меньше. Инфильтрацию в двух последних случаях следует учитывать при теплотехническом расчете ограждений, так как она приводит к значительному понижению температуры внутренней поверхности ограждения. Вентилирование воздушной прослойки в конструкции ограждения наружным воздухом также увеличивает теплопотери и понижает температуру внутренней поверхности ограждений.

## Практическое занятие №12

### План

12.1. Снижение энергопотребности на отопление здания

12.2. Конструктивных решений здания с позиции экономии энергии для отопления

#### 12.1. Снижение энергопотребности на отопление здания

Основным путем экономии энергии в строительстве является возведение зданий с эффективным использованием энергии (ЗЭИЭ). ЗЭИЭ - это такое здание, в котором предусмотрены оптимальные на перспективу инженерные методы и средства по эффективному использованию и экономии энергии, применению нетрадиционных теплоисточников.

Отопление обеспечивает необходимый тепловой режим зданий в зимний период года с затратой около 25 % энергии в балансе страны. Поэтому в регионах с суровым и продолжительным отопительным сезоном, типичным для большей части территории России, эффективное использование энергии для отопления является определяющим моментом экономии ее для теплообеспечения зданий.

Последовательность проектирования оптимального отопления логически соответствует алгоритму - последовательности проектирования при создании современного ЗЭИЭ. После выбора расчетных внутренних и наружных климатических условий существенным является выбор энергетически рациональных градостроительных, объемно-планировочных и конструктивных решений здания. Прежде всего, необходимо стремиться, чтобы здание, его теплозащитные свойства были бы в энергетическом отношении наилучшими. Нет смысла бороться за эффективное использование энергии на отопление в здании, которое имеет недостаточную теплозащиту, плохо герметизировано. Расчеты и опыт эксплуатации здания показывают, что выгоднее в 2 раза дополнительно утеплить и герметизировать здание, чем пытаться в плохо защищенном здании достичь такого же результата за счет совершенствования эффективности только системы отопления. Есть такое выражение, что самой дешевой является энергия, которую не надо расходовать.

Рассмотрим, в чем должна заключаться оптимизация градостроительных, объемно-планировочных и конструктивных решений здания с позиции экономии энергии для отопления.

*Градостроительные* решения применительно к рассматриваемому вопросу связаны, прежде всего, с выбором формы и компактности застройки, а также места расположения источника теплоснабжения. Повышение плотности жилой застройки на 10 % обеспечивает снижение суммарной теплопотребности на 5...7 % по сравнению со стандартной застройкой. Рациональное размещение потребителей теплоты относительно источника, при котором наблюдается пропорциональное снижение нагрузок по мере удаления от источника, дополнительно обеспечивает снижение бесполезных потерь еще на 15...20 %.

Энергоэкономический эффект, достигаемый только за счет отмеченных градостроительных решений, оказывается существенным. При этом обеспечиваются дополнительные экономические и технологические преимущества, например, на 2...3 % снижается материалоемкость, а также повышается надежность системы энергообеспечения за счет сокращения ее общей протяженности.

Существенное сокращение потерь теплоты на отопление обеспечивает рациональная аэродинамика застройки. В частности, при уменьшении скорости ветра в зоне застройки можно сократить в 2...3 раза инфильтрационные теплопотери зданиями, что равноценно экономии 0,1 кг условного топлива на 1 м<sup>2</sup> в год. В этих целях могут быть использованы специальные ветроломные щиты в виде лесонасаждений, рациональное строительное зонирование застройки по этажности со снижением обдуваемости отдельных зданий и другие приемы. Градостроительные решения применительно к рассматриваемому вопросу связаны также с выбором ориентации здания по "сторонам горизонта и его положения в застройке. На юге предпочтительна широтная, на севере - меридиональная ориентация зданий с целью использования теплоты солнечной радиации для отопления и во избежание перегрева зданий в летнее время. Считается, что переход от одной ориентации к другой приходится на широту, где продолжительность отопительного сезона около 200 сут.

Выбор положения здания в застройке с точки зрения энергоэффективности связан с направлением доминирующих ветров зимой, косыми осадками на вертикальные ограждения, экранирующим действием и затенением солнечной радиации рядом расположенными зданиями, разрывами между ними.

*Объемно-планировочные* решения существенно влияют на энергопотребности отопления здания. Форма здания должна быть компактной, надо стремиться к минимальному отношению площади наружных ограждений к объему помещения. Идеальной формой является сфера, хорошей - куб или широкий параллелепипед, хуже - узкие и длинные здания или в виде высокой башни. Фасады здания не должны быть изрезанными, не желательны встроенные заглубленные лоджии и эркеры.

Экономии энергии обеспечивает блокировка различных цехов и помещений в одном корпусе. Блокировка промышленных цехов может давать экономию теплоты до 30...40 %. Предпочтительным является сблокированное здание с широким корпусом, многоэтажное, с неизрезанными, гладкими фасадами.

При планировке здания важно правильно расположить помещения различного назначения в зависимости от ориентации фасадов. Основные помещения, как правило, целесообразно размещать со стороны южного фасада, второстепенные - северного. С точки зрения комфортности микроклимата желательно увеличивать высоту помещений, предназначенных для постоянного пребывания людей.

К объемно-планировочным мероприятиям относится организация аэрации здания. Возможно устройство квартир с односторонней ориентацией или квартир со сквозным проветриванием при двух- и трехсторонней ориентации. Необходима защита входных дверей и вестибюлей здания от врывания холодного наружного воздуха. Целесообразно использовать лестничные клетки, лифтовые холлы, коридоры для организованного перетекания воздуха в здании с целью утилизации теплоты. Возможно устройство специальных аэрационных шахт и проемов. В последнее время в зданиях применяются атриумы, которые используются как воздушные резерву-

ары для снижения воздухообмена, организации перетекания воздуха, а также как накопители для утилизации теплоты с помощью тепловых насосов, аккумуляторов и др. Аэрационный режим может быть во времени непрерывным, прерывистым с дневным или ночным проветриванием.

## **12.2. Конструктивных решений здания с позиции экономии энергии для отопления**

Основную роль в формировании теплового режима здания играют конструктивные средства. Ограждения должны обладать высокими теплозащитными свойствами, герметичностью, их внутренние поверхности - свойством сорбировать и десорбировать пары и газы. Основные теплозащитные свойства определяются сопротивлением теплопередаче и теплоустойчивостью, которые принимаются в зависимости от назначения здания и способа его отопления.

Фундаментальные здания должны иметь теплоустойчивые ограждения с высоким сопротивлением теплопередаче. Здания для непродолжительной эксплуатации могут иметь ограждения с минимальным сопротивлением теплопередаче и малой тепловой инерцией. Здания с эффективным использованием энергии должны иметь повышенную теплоизоляцию, т. е. быть "зданием-термосом" с теплоустойчивыми внутренними слоями ограждений, обращенными в помещение.

В энергоэкономичных зданиях коэффициент теплопередачи стен и перекрытий должен быть уменьшен по сравнению с обычными решениями в 3...4 раза, т. е. до 0,3...0,4 Вт/(м<sup>2</sup> °С). Окна по возможности должны быть со стеклопакетами, заполненными инертным газом, с селективными покрытиями стекол, препятствующими пропусканию длинноволнового излучения из помещения, оконные переплеты - с двойным (тройным) уплотнением. Следовательно, коэффициент теплопередачи окон может быть уменьшен в 2...3 раза, т. е. до 1,5 Вт/(м<sup>2</sup> °С) и ниже.

Теплоустойчивые внутренние слои должны выполнять функцию аккумуляторов теплоты при различных решениях регенерации теплоты в помещении. Кроме того, функции рекуператоров теплоты могут выполнять окна и ограждения с вентилируемыми воздушными прослойками, вентилируемые чердаки. Для регенерации теплоты могут также использоваться перекрытия, подполья и грунт под зданием. С этой же целью начинают проектировать здания в оболочке-футляре. Перспективной является конструкция наружных ограждений с термоэлектрическими элементами в толще и развитыми теплообменными поверхностями с наружной и внутренней стороны. Они работают как термоэлектрические тепловые насосы, утилизирующие энергию окружающей среды. Рациональны конструкции наружных ограждений в виде солнечных коллекторов и абсорберов. Наружные поверхности ограждений должны иметь такие радиационные свойства, чтобы зимой активно поглощать коротковолновую солнечную радиацию и слабо отдавать длинноволновую радиацию в окружающую среду.

Основные теплопотери в здании приходятся на окна, поэтому большую роль играет степень остекленности фасадов зданий. Обычно ее стремятся сократить до минимальной по условию допустимой естественной или смешанной (естественно-искусственной) освещенности помещений. Однако при хорошей теплозащите окон и

их экранировании от воздействия солнца летом оптимальная остекленность с учетом использования солнечной энергии для отопления, особенно в весенне-осенние периоды, может заметно превосходить минимально допустимую по условию освещенности. Следует также использовать многослойное остекление с применением селективных, отражающих, поглощающих и утепленных стекол, а также постоянных и временных теплозащитных экранов в виде монопанелей, ставней и др. Рациональное применение совокупности рассмотренных градостроительных, объемно-планировочных и конструктивных мер может значительно (в 1,5...2 раза) снизить потребность энергии для отопления зданий.

Перспективными с точки зрения экономии энергии являются наружные ограждения с переменным сопротивлением теплопередаче. Сопротивление можно варьировать в зависимости от наружных климатических воздействий. Теоретически возможно ограждение, в котором сопротивление теплопередаче может изменяться от нуля до бесконечности. В большинстве случаев вполне достаточно обеспечить такое изменение теплозащитных свойств, при котором на внутренней поверхности ограждения поддерживается допустимая температура в любой момент времени. Примером такого ограждения может служить конструкция двойного окна, межстекольное пространство которого ночью заполняется с помощью вакуум-насоса элементами из пенополистирола. В дневные часы дополнительная теплоизоляция удаляется, и солнечная радиация свободно проникает в помещение. Подобный эффект достигается путем вентилирования межстекольного пространства внутренним воздухом, расход которого регулируется в зависимости от наружных условий.

Регулирование теплозащитных свойств ограждения возможно также путем изменения лучистой и конвективной составляющих теплового потока на его внутренней поверхности. В первом случае необходимый эффект достигается облучением конструкции потоком требуемой интенсивности, например, с помощью горелок инфракрасного излучения. При этом исходное сопротивление теплопередаче конструкции может быть принято намного меньше требуемого, что существенно снижает капитальные затраты. Такое решение экономически оправданно для зданий сезонного действия. Во втором случае регулирование конвективного теплового потока на внутренней поверхности обеспечивается с помощью тепловоздушных завес в виде плоских полуограниченных струй.

Активное регулирование теплового потока через ограждение можно обеспечить путем его порогового проветривания. При этом наблюдается рекуперация теплового потока через ограждение, интенсивность которой регулируется потоком фильтрующегося воздуха. Такое решение целесообразно для вентилируемых зданий, оно позволяет снижать расходы теплоты на отопление на 40...60 %.

Конструкция наружного ограждения может быть выполнена с тепловым экраном. Тепловой экран, расположенный ближе к наружной поверхности ограждения, обеспечивает в плоскости расположения повышенную температуру за счет циркуляции низкотемпературного теплоносителя (например, грунтовой воды). Теплотери через экранированное ограждение снижаются до 2...3 раз, а циркуляция теплоносителя возможна за счет гравитационных сил.

Применение этих мероприятий особенно необходимо в ЗЭИЭ, где их использование совместно с солнечными коллекторами или абсорберами, суточными, не-

дельными и сезонными аккумуляторами теплоты и тепловыми насосами может снизить потребность в подводимой извне энергии для целей отопления в 3...4 раза.

Существенное снижение энергопотребности на отопление зданий может быть достигнуто при использовании автоматической системы управления (АСУ) работой инженерного оборудования здания. Структурная схема АСУ работой инженерного оборудования здания состоит из нескольких взаимосвязанных блоков:

- измерительного, включающего датчики регулируемых и нерегулируемых параметров;
- устройства преобразования сигналов и сигнализаторы их значений;
- пульта управления, ЭВМ и коммутаторов, служащих для сбора, обработки данных наблюдений и подачи команд;
- исполнительного блока, управляющего работой, в том числе системы отопления.

Работа АСУ тепловым режимом на ряде объектов общественного и промышленного назначения в Москве показала их высокую эффективность, обеспечивающую экономию энергии до 20 % при окупаемости дополнительных капитальных вложений в течение около одного года.

## Литература

### Основная

1. Каменев, П. Н. Вентиляция : учебник для вузов / П. Н. Каменев, Е. И. Тертичник .— М. : АСВ, 2008 .— 616 с. : ил. — Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-93093-436-6 (в пер.) .
2. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование : учеб. пособие для вузов / Б. М. Хрусталева [и др.] ; под общ. ред. Б. М. Хрусталева .— 3-е изд, испр. и доп. — М. : АСВ, 2008 .— 784 с. : ил. — На обл. и корешке указ. три авт. — Библиогр. в конце гл. — ISBN 978-5-93093-394-9 (в пер.) : 627,00.
3. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: учебник для вузов / В.Н.Богословский. — 3-е изд. — СПб. : Авок Северо-Запад, 2006. — 400с. — (Инженерные системы зданий). — Библиогр. В конце кн. — ISBN 5-902146-10-0/в пер./: 180.00.
4. Ананьев В.А. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В. А. Ананьев, Л. Н. Балужева, В. П. Мурашко .— Новая ред. — М. : Евроклимат, 2008 .— 504 с. : ил. — (Библиотека климатехника) .— Авт. указ. на обороте тит. л. — Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-94836-171-0 (впер.) : 1275.00.
5. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности : учеб. пособие для вузов / Е.А. Штокман [и др.]; под ред. Е.А. Штокмана. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: АСВ, 2007.- 632с.:ил.— Библиогр. в начале кн.— ISBN 978-5-93093-522-6.

### Дополнительная литература

- 1 Еремкин , А. И. Тепловой режим зданий : учеб. пособие для вузов / А. И. Еремкин , Т. И. Королева .— Ростов-н/Д : Феникс, 2008 .— 365 с. : ил ил .— (Высшее образование) .— Библиогр.: с. 358-360 .— ISBN 978-5-222-12605-9 (в пер.) .
2. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: Учеб. Пособие. Ч.1. Теоретические основы создания микроклимата в помещении / В.И. Полушкин, О.Н. Русак, С.И. Бурцев и др. — СПб.: Профессия, 2002. — 176с.: ил. — (Специалист). — Библиогр. В конце кн.—ISBN5-93913-031-3/впер./145.48.
3. Изельт П. Увлажнение воздуха. Системы и применение: (учеб. пособие/ Изельт П., Арндт. У., Вильке М. – М.: Техносфера., 2007. -216с.:ил.- Библиогр. в начале кн.- ISBN 978-5-94836-136-9/в пер./: 512.00.
4. Луканин В.Н. Теплотехника: Учебник для вузов/Луканин В.Н. - 5 изд. стер. - М.: Высшая школа,2006.-671с.:ил.- Библиогр. в конце кн.- ISBN 5-0600-3958-7/в пер./: 364.06