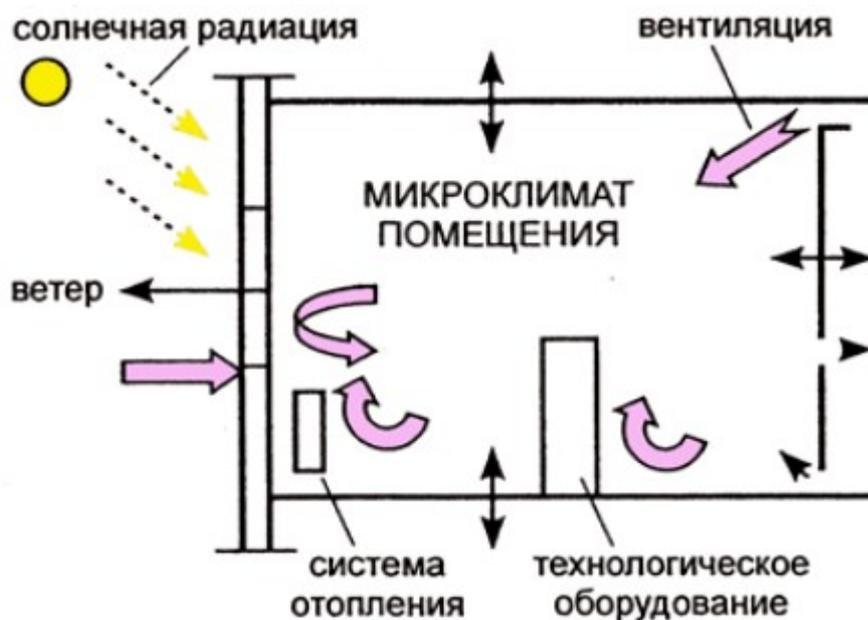


Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

**В.Н. Дорофеев**

«Теоретические основы создания  
микроклимата в помещении»

Учебное электронное издание



Владимир 2016 г

УДК 621.9.06 (075)

Рецензент  
д.т.н., проф. О.В. Веселов  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Теоретические основы создания микроклимата в помещении: Учебное электронное издание по изучению дисциплины «Теоретические основы создания микроклимата в помещении» для студентов очной, заочной и дистанционной форм обучения ВлГУ, обучающихся по направлению «Строительство» (08.03.01) профиль «Теплогазоснабжения и вентиляции (ТГВиГ)» / В.Н. Дорофеев / Владим. гос. ун-т; сост.: Изд-во ВлГУ, 2017.

Содержит теоретический и практический материал по дисциплине «Теоретические основы создания микроклимата в помещении». Приводится список рекомендуемой литературы.

Настоящие методические указания разработаны с учетом требований ЕСКД, ЕСТП, ГОСТ.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС 3-го поколения.

Табл.   .Ил.   .Библиогр.: .... назв.

УДК 621.9.06 (075)

## Оглавление

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 5  |
| 1. Общее представление о формировании микроклимата .....                    | 5  |
| 1.1. Понятие о микроклимате помещения .....                                 | 5  |
| 1.2. Условия формирования микроклимата .....                                | 7  |
| 1.3. Процессы формирования микроклимата.....                                | 9  |
| 2. Моделирование процессов формирования микроклимат .....                   | 13 |
| 2.1. Понятие и виды моделирования.....                                      | 13 |
| 2.2. Математическое моделирование .....                                     | 13 |
| 2.2.1. Модель с <i>распределенными</i> параметрами                          | 14 |
| 2.2.2. Модели с <i>частично распределенными</i> параметрами                 | 14 |
| 2.2.3. Модели с <i>сосредоточенными</i> параметрами                         | 14 |
| 2.2.4. Модели, <i>управляющие</i> формированием микроклимата                | 15 |
| 2.3. Физическое моделирование .....   | 16 |
| 2.4. Аналоговое моделирование .....   | 16 |
| 3. Микроклимат помещения .....  | 18 |
| 3.1. Физиологические основы теплового комфорта в помещении .....            | 18 |
| 3.2. Комфортные условия микроклимата .....                                  | 22 |
| 3.3. Технологические требования к параметрам микроклимата.....              | 25 |
| 4. Воздействие наружной среды на здание .....                               | 29 |
| 4.1. Факторы воздействия наружной среды .....                               | 29 |
| 4.2. Параметры наружного климата.....                                       | 34 |
| 4.3. Расчетные наружные условия.....  | 36 |
| 4.4. Эксплуатационные наружные условия.....                                 | 38 |
| 5. Требуемая тепловая мощность систем обеспечения микроклимата .....        | 40 |
| 5.1. Понятие тепловой нагрузки на системы отопления-охлаждения..            | 40 |
| 5.2. Составляющие тепловой нагрузки на системы отопления-охлаждения .....   | 40 |
| 5.2.1. Трансмиссионный тепловой поток, проходящий через наружные ограждения | 40 |

|   |    |
|---|----|
| 5.2.2. Инфильтрационный тепловой поток  | 42 |
| 5.2.3. Теплопотупления от солнечной радиации через<br>лучепрозрачные ограждения | 44 |
| 6. Вентиляционный процесс обеспечения микроклимата                              | 45 |
| 6.1. Струйные течения в помещении   | 45 |
| 6.1.1. Приточные струи  | 46 |
| 6.1.2. Движение воздуха около вытяжных отверстий                                | 48 |
| 6.2. Эффективность вентиляционного процесса                                     | 49 |
| 6.3. Определение воздухообмена в помещении                                      | 50 |
| 6.4. Нестационарный вентиляционный процесс                                      | 52 |
| 7. Затраты энергии на обеспечение микроклимата в здании                         | 53 |
| 7.1. Годовой расход энергии на отопление и охлаждение                           | 53 |
| 7.2. Годовой расход энергии на вентиляцию                                       | 55 |
| Литература  | 57 |
| Приложения  | 65 |

## Введение

«Теоретические основы создания микроклимата в помещении» предназначен для студентов, изучающих в рамках специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция» одноименную дисциплину. Содержание пособия соответствует программе дисциплины, читаемый в ВлГУ.

Теоретические основы специальности составляет комплекс фундаментальных теоретических и прикладных наук, таких, как Физика, Математика, Механика, Химия, Теплотехника, Гидромеханика, Архитектура, Информатика, Прикладная гигиена, Прикладная климатология и других. Наряду с фундаментальными науками по мере развития техники и технологии обеспечения микроклимата в помещении возникла и развивается прикладная наука о процессах переноса и трансформации в помещении потоков тепла, влаги, газообразных примесей и аэрозолей, формирующих параметры среды обитания, в которой человек осуществляет свою функциональную деятельность. Содержание этой науки составляют многочисленные исследования, проводившиеся особенно активно в середине 20-го века отечественными и зарубежными специалистами.

Цель курса – овладение научно-теоретическими основами обеспечения микроклимата в помещении и способами их реализации при проектировании и эксплуатации средств обеспечения микроклимата помещения.

В лекциях для более глубокого изучения теории и практики создания микроклимата в помещениях даны ссылки на принятый за основу учебный материал по данной дисциплине, читаемый в МГСУ

Компьютерное оформление выполнил студент группы С-314 Хоботов Е.А.

## 1. Общее представление о формировании микроклимата

### 1.1. Понятие о микроклимате помещения

*Здание* - это совокупность помещений, представляющих собой ограниченный объем, в пределах которого протекает жизнедеятельность человека. Процесс жизнедеятельности сопровождается взаимодействием человека с окружающей его средой помещения.

Правильная организация помещений и здания в целом открывает возможность обеспечения в них безопасных и эффективных условий пребывания человека. *Внутренняя среда помещения, проявляющаяся в большом*

*числе факторов воздействия на человека, называется микроклиматом помещения.*

Среди факторов внутренней среды выделим комплекс микроклиматических условий, оказывающих наиболее осязаемое физиологическое воздействие на человека. К ним относят *тепловые условия* в помещении и *состав внутреннего воздуха*.

Человек познает мир частично через ощущения, частично сознанием. При этом непосредственно поступающая информация об окружающей среде соотносится в мозгу с информацией, накопленной в памяти на базе предыдущего опыта. Это обстоятельство свидетельствует об индивидуальности восприятия человеком внутреннего микроклимата помещения. *Окружающая среда, которая не содержит раздражающих и возбуждающих факторов, препятствующих физической и умственной работе, а также отдыху, называется комфортной.*

Приведенное определение распространяется также на тепловые условия и состав воздуха помещения. *Тепловые условия* в настоящее время принято оценивать температурой воздуха, радиационной температурой помещения, относительной влажностью и подвижностью воздуха.

*Состав воздуха* характеризуется концентрацией углекислоты, концентрацией вредных газов, паров, пыли. Восприятие воздуха характеризуется также озono-ионным составом и запахами.

Перечисленные параметры являются исходными при проектировании зданий и систем обеспечения микроклимата и нормируются. При этом определение нормативных параметров исходит из стремления к достижению оптимальных значений, т.е. таких, при которых как можно меньшее число людей (обычно 15-30%) была бы ими недовольна.

Использование оптимальных параметров микроклимата не во всех зданиях бывает целесообразным и экономически оправданным. Поэтому в отечественных нормах широко используется понятие допустимых параметров, представляющих собой разумные граничные значения, при которых не наблюдается отрицательного воздействия на организм человека.

## 1.2. Условия формирования микроклимата

**Параметры микроклимата** формируются (см. рис. 1.1) в результате воздействия на помещение наружной среды, технологического процесса в помещении и систем отопления и охлаждения (СО) и вентиляции (СВ) или кондиционирования воздуха (СКВ).

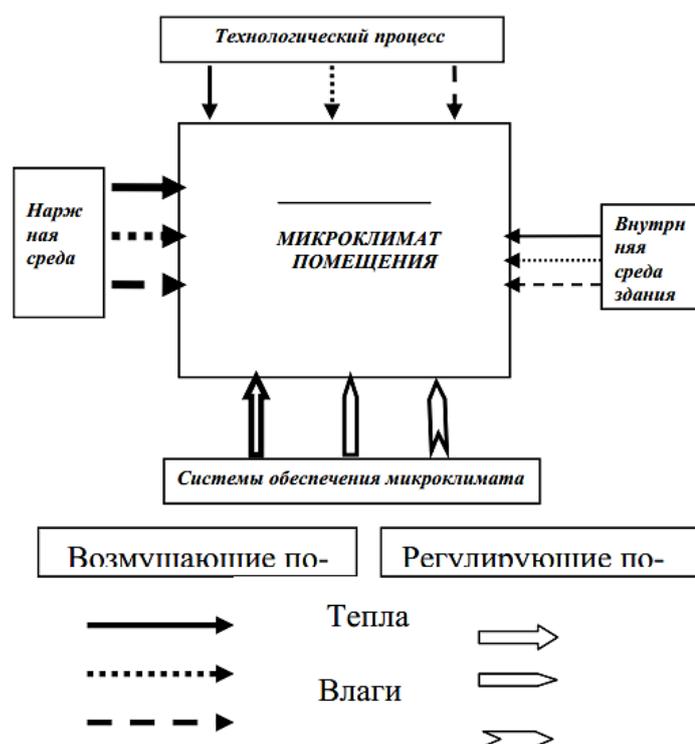


Рис.1.1. Структурная схема формирования микроклимата

**Наружная среда** оказывает влияние на тепловые параметры микроклимата опосредовано через ограждающие конструкции (тепловлагопередача и воздухопроницаемость) и внутренние связи между помещениями (перемещение потоков воздуха, теплообмен). Поэтому теплозащита

здания и планировочная композиция здания являются **пассивными факторами** формирования теплового микроклимата. **Технологический** процесс играет особенно активную роль в формировании микроклимата. Сопровождающее этот процесс выделение потоков тепла, влаги, газов, пыли осуществляется непосредственно в помещении и прямо воздействует на тепловые параметры и состав воздуха.

В свою очередь, эффективное протекание технологического процесса в ряде современных производств невозможно без поддержания параметров внутренней среды в определенных границах. В этом случае говорят о **технологических параметрах внутренней среды**.

Следует иметь в виду, что в большинстве производств технологический процесс осуществляется людьми. Поэтому более правильно говорить о необходимости обеспечения **комфортно-технологических** условий в производственных помещениях (за исключением закрытых технологических линий, в которых не требуется участие человека).

Системы **отопления-охлаждения и вентиляции активно** формируют внутренний микроклимат, нейтрализуя отрицательное воздействие наружной среды и технологического процесса.

Издrevле человек стремился удовлетворить потребность в комфортных условиях среды своего обитания. В значительной мере достижимая степень комфортности обеспечивалась за счет конструкции и теплозащиты здания в сочетании с относительно простыми отопительно-вентиляционными устройствами.

В современных зданиях обеспечение внутренних комфортных условий представляет сложную техническую задачу. Увеличение этажности здания приводит к существенному изменению перепада давления воздуха снаружи и внутри здания по его высоте. В результате возникает вертикальное перетекание воздуха и интенсивное газовое и бактериологическое загрязнение верхних этажей, переохлаждение нижних этажей и повышение опасности их радонового загрязнения.

**Повышенная этажность** здания из конструктивных соображений сопряжена с облегчением ограждений и увеличением площади окон. Это в свою очередь способствует радиационному дискомфорту в холодное время года и избыточной инсоляции в теплый период.

Современные **отделочные** материалы вызывают дополнительное загрязнение воздуха летучими органическими соединениями, формальдегидом и другими токсичными веществами.

Усиление герметичности заполнений световых проемов, желательное из условия энергосбережения, в то же время актуализирует проблему вентиляции помещений -особенно в жилых зданиях массовой застройки, в которых проветривание ведется естественным путем. Вместе с тем, требование интенсивного вентилирования современных помещений связано с применением, как новых отделочных материалов ограждений, так и синтетических материалов мебели, оборудования, оргтехники, акустических и видеосистем.

Вентиляция помещения способствует нормализации влажностного режима помещения, а следовательно увеличению долговечности ограждений.

Одно из актуальных требований современности - повышение **энергетической эффективности** зданий реализуется прежде всего за счет усиления их теплозащиты. Усиление теплозащиты прямо сказывается на улучше-

нии теплового комфорта помещений в холодное время года. Кроме того, уменьшение тепловой нагрузки на отопление при усилении теплозащиты позволяет понизить температуру теплоносителя. Это также приводит к улучшению теплового комфорта и улучшению качества воздуха в помещении.

Приведенные выше соображения свидетельствуют о многообразии прямых и косвенных связей параметров здания и условий формирования микроклимата в нём.

### 1.3. Процессы формирования микроклимата

Как упоминалось выше, микроклимат помещения характеризуется комплексом параметров, определяющих тепловое состояние помещения и газовый состав воздуха в нём. Параметры микроклимата формируются под воздействием на помещение *потоков теплоты, влаги, газовых примесей*.

Перечисленные потоки поступают в помещение через наружные ограждения из наружной среды, через внутренние ограждения из соседних помещений здания и от внутренних источников, действующих в технологическом процессе. При взаимодействии с объемом помещения потоки трансформируются и преобразуются, вызывая изменение соответствующих параметров микроклимата. Отклонение параметров от заданных значений компенсируется системами отопления/охлаждения и вентиляции, которые в свою очередь также подают в помещение потоки тепла, влаги и свежий воздух, нейтрализующие вредные воздействия на микроклимат.

При этом потоки, вызывающие отклонение параметров от заданных величин называются *возмущающими воздействиями*, а потоки, приводящие параметры к норме – *регулирующими воздействиями*.

*Процессы трансформации потоков тепла, влаги и воздуха, в результате которых происходит изменение параметров микроклимата, и есть процессы формирования микроклимата.* Можно выделить три группы физических процессов формирования микроклимата, протекающих в помещении – это процессы теплообмена, процессы перемещения потоков воздуха и процессы молекулярной диффузии газовых примесей в воздухе помещения.

Совокупность процессов формирования отдельных параметров или групп параметров называют *режимом*. При рассмотрении задач обеспечения микроклимата обычно имеет дело с тепловым, влажностным, воздушным и газовым режимом помещения или здания.

**Теплообмен в помещении** обусловлен поступлением в него тепловых потоков, которые принято условно разделять по их природе на лучистые и конвективные. **Конвективный** теплообмен протекает между поверхностями ограждений и оборудования и воздухом помещения. Помимо этого в помещение поступают конвективные тепловые потоки с нагретым (охлажденным) воздухом в основном от систем вентиляции и кондиционирования воздуха. В **лучистом** теплообмене участвуют поверхности, обращенные в помещение.

Источниками тепла в помещении, как правило, являются тепловыделения от технологического оборудования, людей, искусственного освещения, отопительных приборов и теплопоступления от солнечной радиации через окна. Реже тепловые потоки, направленные внутрь помещения, проходят через непрозрачные наружные ограждения – в основном через бесчердачные покрытия, нагреваемые солнечной радиацией.

**Стоки тепла** (тепловые потоки, направленные из помещения), как правило – теплопотери через наружные ограждения и тепловые потоки с охлажденным воздухом. Источники и стоки могут быть чисто конвективными и смешанными – лучисто-конвективными. Следует иметь в виду, что потоки разной природы по-разному формируют температурные условия в помещении. Так, лучистые потоки поглощаются поверхностями ограждений и мебели и приводят к их нагреву. Распределение лучистых потоков в помещении носит, как правило, неравномерный или ассиметричный характер, что приводит к неравномерному нагреву отдельных поверхностей. Нагретые поверхности передают за счет естественного конвективного теплообмена тепло воздуху помещения. Если температура воздуха выше температуры поверхности, конвективный теплообмен имеет другое направление. Так как поверхности ограждений обладают тепловой инерцией, теплообмен протекает в нестационарном режиме. Подвижность воздуха несколько интенсифицирует естественный теплообмен на поверхностях.

Конвективное тепло поступает непосредственно в воздух, который не обладает тепловой инерцией, что приводит к быстрому изменению температуры воздуха

В помещениях большого объема происходит медленное перемешивание воздуха, что приводит к неравномерному распределению температуры воздуха.

**Перемещение потоков воздуха** имеет место как между помещениями в пределах здания, так и в пределах одного помещения. Помимо этого в помещение через наружные ограждения поступает наружный или удаляется внутренний воздух.

Потоки воздуха, попадающие в помещение из других помещений, несут с собой газовые примеси, загрязняющие воздух помещения. Наружный воздух, как правило, охлаждает помещение.

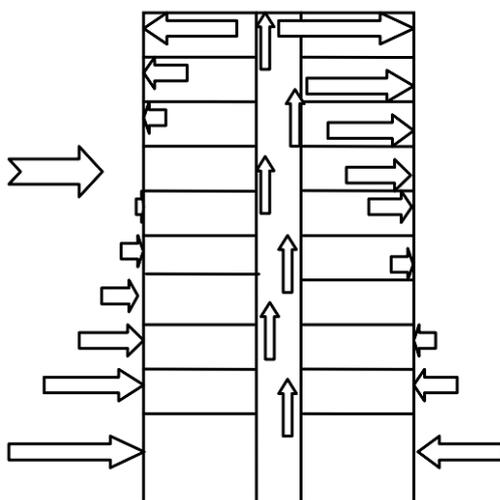


Рис.1.2.Схема вертикального перемещения потоков воздуха в здании

Перемещение воздуха *между помещениями* по вертикали здания обусловлено вертикальным распределением разности давления снаружи и внутри здания при разности объемного веса наружного и внутреннего воздуха. В большинстве случаев объемный вес наружного воздуха больше, поэтому потоки воздуха имеют направление снизу вверх.

Горизонтальное перемещение воздуха связано с действием ветра на здание.

При этом воздух *инфильтруется* в помещение через неплотности наружных ограждений с наветренной стороны здания, а *эксфильтруется* наружу – в помещении на заветренной стороне здания.

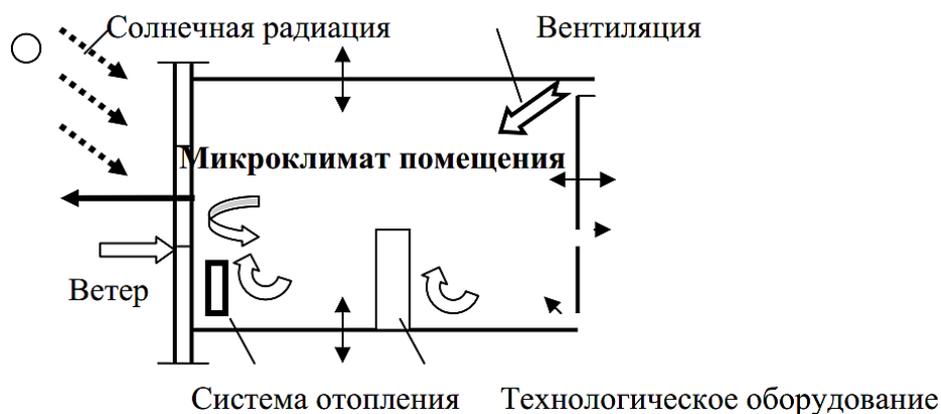


Рис.1.3.Перемещение потоков в помещении

Движение потоков воздуха *внутри помещения* возникает около нагретых поверхностей отопительных приборов и технологического оборудования и охлажденных поверхностей наружных ограждений (так называемые конвективные источники, формирующие конвективные струи) . Наиболее интенсивное движение воздуха в помещении связано с действием *вентиляционных струй*. В результате перемещения потоков воздуха в объеме помещения имеет место неравномерное распределение газовых примесей, температуры, влажности и подвижности воздуха. В пределах рабочей зоны помещения возникают застойные зоны с вихреобразным движением воздуха, в которых могут накапливаться вредные примеси, что недопустимо.

*Молекулярная диффузия* паров и газов в воздухе имеет место за счет разности парциального давления в непосредственной близости от источника примесей и в удалении от него. Вследствие подвижности воздуха скорость распространения вредных примесей в объеме помещения во много раз превышает скорость диффузии . Поэтому этот процесс не оказывает существенного влияния на формирование параметра микроклимата –концентрации газовой вредности в той мере, как например перемещение потоков воздуха в помещении.

## 2. 2. Моделирование процессов формирования микроклимат

### 2.1. Понятие и виды моделирования

Для решения практических задач таких, как оценка комфортности микроклимата или определение потребной мощности систем, обеспечивающих микроклимат, необходимо определять *распределение параметров микроклимата* в объеме помещения и их изменение во времени. В этом случае пользуются моделированием процессов или воспроизведением их определенными методами, при условии, что воспроизведение должно адекватно отображать условия протекания процессов в натуре.

Обычно моделирование преследует следующие цели:

- *исследовательские*, для углубленного изучения процессов формирования или разработки новых технологий обеспечения микроклимата;
- *расчетные*, для определения установочных параметров системы обеспечения микроклимата в расчетных условиях и режима функционирования системы в эксплуатационных условиях.

Для моделирования процессов формирования микроклимата обычно применяют три вида моделирования:

- *математическое* моделирование на основе решения системы уравнений в дифференциальной или алгебраической форме, описывающих тепловой, воздушный, влажностный и газовый режим помещения.
- *физическое* моделирование в натуральных условиях или на геометрически подобных натурному объекту моделях, на которые физические процессы переносят с помощью масштабных соотношений;
- *аналоговое* моделирование – разновидность физического, когда реальные процессы заменяются другими, имеющими формально аналогичное математическое описание.

### 2.2. Математическое моделирование

Современные вычислительные технологии открывают широкие возможности для исследования процессов формирования микроклимата, в том числе, путем прямого решения дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы.

В принципе можно выделить два вида математических моделей - с распределенными (полностью или частично) и сосредоточенными параметрами.

### 2.2.1. Модель с распределенными параметрами

Модели с распределенными параметрами представляют собой систему уравнений движения, баланса тепла и массы газовых примесей в дифференциальной форме в *частных производных*. Система уравнений дополняется краевыми условиями, в состав которых входят граничные условия и начальные условия. Решение системы позволяет определить *трехмерное распределение* параметров микроклимата в объеме помещения и изменяющимися во времени. Такие модели, как правило, используются при решении исследовательских задач.

В упрощенной постановке модель распределения в помещении скорости и температуры воздуха, включающая необходимую систему уравнений, рассмотрена в [1] (рис.2.1. уравнения (2.1) - (2.6)).

Решение системы уравнений ведут численными методами, основанными на переходе от бесконечно малых приращений координат и времени к *конечным малым приращениям*.

Модели с распределенными параметрами сложны и представляют вычислительные трудности при их реализации. При этом не всегда бывает необходимо иметь распределение параметров микроклимата в моделируемом объекте по всем осям координат.

### 2.2.2. Модели с частично распределенными параметрами

В помещениях малой площади с равномерно распределенными источниками вредности достаточно анализировать распределение того или иного параметра только по одной из трех координат, совпадающей с высотой помещения.

В подобных случаях говорят о модели с частично распределенными параметрами, система уравнений для описания подобной модели рассмотрена в [1](рис.2.2. уравнения (2.7)-(2.9)) (по одной или двум осям координат).

### 2.2.3. Модели с сосредоточенными параметрами

Такие модели наиболее распространены в инженерной практике, что связано с их простотой и доступностью реализации. Суть модели состоит в том, что все величины в помещении принимаются *средними* по его объему. Таким образом распределенные в общем случае параметры микроклимата концентрируются в одной точке, поэтому такие модели называют еще *точечными*.

Для точечных моделей характерны следующие упрощения:

- равномерное распределение лучистых тепловых потоков пропорционально площади поверхности ограждений;
- одинаковая средняя температура поверхностей ограждений (радиационная температура) ;
- одинаковая средняя по объему температура воздуха ;
- одинаковая средняя концентрация вредных веществ в объеме помещения;
- одинаковые и постоянные коэффициенты переноса (теплообмена, массообмена).

Точечные модели состоят из алгебраических уравнений и предназначены, как правило, для ручного счета. С их помощью определяют теплотери и теплоступления в помещение, выделение вредностей, определение установившейся производительности и решают широкий круг других задач обеспечения микроклимата.

Вместе с тем, подобные модели могут быть предназначены для решения нестационарных задач формирования микроклимата и поэтому включают уравнения в дифференциальной форме. Пример модели формирования концентрации газовой вредности в помещении, известной как *уравнение воздухообмена* рассмотрен в [1] (раздел 2.2.3, рис.2.3, формула (2.10); раздел 6.3)

#### 2.2.4. Модели, управляющие формированием микроклимата

В этом плане получили распространение специальные информационные комплексы, управляющие инженерным оборудованием крупных зданий общественного назначения, таких как гостиницы, офисы и т.д.. Среди прочих задач, которые ставятся перед такими комплексами, важной является задача реализации энергосберегающих технологий обеспечения микроклимата. В этом случае обычно говорят об «*Интеллектуальном здании*».

Энергосбережение осуществляется путем управления работой отдельных элементов систем отопления-охлаждения и вентиляции (теплообменников, клапанов, насосов и вентиляторов) по специальному алгоритму. При этом управляющий компьютер собирает и анализирует информацию от метеостанции и датчиков, фиксирующих параметры микроклимата во всех помещениях и параметры работы систем обеспечения микроклимата.

Такие модели должны обладать высокой точностью, быстродействием и простой реализацией вычислительных действий на компьютере.

### 2.3. Физическое моделирование

Математическое моделирование представляет физические процессы в упрощенном идеализированном виде. Большую реальность и достоверность физических процессов обеспечивает физическое моделирование.

Физическое моделирование осуществляется в натуральных условиях и на геометрически подобных моделях. *Натурные исследования* проводят на действующих объектах. Возможны разовые обследования и длительные наблюдения (*мониторинг*) за объектом.

Однако в натуральных условиях затруднительно установить закономерности тех или иных процессов из-за большого числа помех случайного характера; при этом важно обеспечить длительное наблюдение и изучение объекта (с помощью современных измерительных и вычислительных приборов).

Помимо дорогостоящих натурных обследований, возможно воспроизведение процессов в лабораторных условиях на моделях, подобных натурному объекту. Лабораторно-модельный метод обладает рядом преимуществ перед методом исследований в натуре:

- возможностью изучения не выполненных еще в натуре объектов;
- возможностью систематического изучения влияния какого либо фактора, выделенного из всей совокупности влияющих на процесс факторов;
- возможностью изучения быстро протекающих явлений, неуловимых в натуральных условиях.

Закономерно распространять результаты моделирования можно только на подобные явления. Применительно к моделированию процессов формирования микроклимата различают геометрическое, механическое и тепловое подобие.

Подробно особенности физического моделирования (применение критериев подобия, рассмотрение результатов моделирования на реальный объект, учет явлений авто-моделирования и стабилизации процессов) рассмотрены в [1]

### 2.4. Аналоговое моделирование

Аналоговое моделирование – это разновидность физического моделирования, в котором реальный физический процесс заменяется другим физическим процессом, более удобным с точки зрения реализации. Так например, измерить распределение температуры в толще наружного ограждения в ре-

альных условиях оказывается затруднительным. Пользуясь аналогией процесс теплопроводности в толще ограждения, можно заменить электропроводностью на модели. Причем электрические параметры измеряются достаточно просто.

В данном случае речь идет об *электро-тепловой* аналогии, которая вытекает из формально одинакового написания *уравнения теплопроводности* Фурье и уравнения распространения электрического потенциала  $U$  в проводнике.

Для решения практических задач используют устройства, называемые *электроинтеграторами*.

Подробные сведения об организации и реализации аналогового моделирования физических процессов приведены в [1].

### 3. Микроклимат помещения

#### 3.1. Физиологические основы теплового комфорта в помещении

Метаболические процессы, протекающие в организме человека (процесс поглощения, хранения и выделения продуктов жизни деятельности) обуславливают круговорот затрат энергии на окисление питательных веществ, обмен веществ теплопродукции и механическую работу мышц. При этом энергетический баланс поддерживается, если количество вырабатываемой организмом энергии (которую физически устанавливают по объему потребляемого кислорода) равно количеству выделяемой энергии.

В состоянии покоя взрослый человек потребляет 15 л/ч кислорода (с выделением теплоты 88Вт), при выполнении физической работы эта цифра возрастает почти до 180 л/ч (при этом количество теплоты может достигать 1060 Вт).

По количеству потребляемого кислорода *метаболическая* тепловая энергия  $M$ , Вт/м<sup>2</sup>, рассчитывается по формуле

$$M = 5,8 \bar{V} \frac{V_{O_2}}{F_d} \left[ \text{Вт/м}^2 \right] \quad (3.1)$$

где 5,8 – энергетический эквивалент 1 л кислорода при нулевой температуре и нормальном барометрическом давлении и  $\bar{V} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \cdot \text{с/л}$ ;

$\bar{V}$  – соотношение количества выдыхаемого углекислого газа и вдыхаемого кислорода; б/р

$V_{O_2}$  – потребление кислорода в нормальных физических условиях, л/ч;

$F_d$  – площадь поверхности организма человека, м<sup>2</sup>:

$$F_d = 0,203 G^{0.425} L^{0.725} , \quad (3.2)$$

здесь  $G$  – масса человека, кг;  $L$  – рост человека, м.

Проверка размерности в формуле (3.1)

$$M \left[ \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч} \cdot \text{с}}{\text{л}} \cdot \text{б/р} \cdot \frac{\text{л}}{\text{ч} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ \text{Вт/м}^2 \right]$$

Эти формулы основаны на результатах многочисленных испытаний, проведенных гигиенистами в разных странах и в различных условиях. Данные авторов по энергетическому балансу человека часто расходятся. Поэтому время на практике используют классификацию, в которой различают три степени тяжести работы:

а) *легкая* (сидячая), (с потреблением кислорода не более чем в 2 раза выше его потребления в состоянии покоя, т.е. меньше 30 л/ч;) энергозатраты при этом составляют менее 175 Вт;

б) *средней тяжести*, (потребление кислорода в 2-4 раза больше, чем в состоянии покоя); энергозатраты достигают 300 Вт.

в) *тяжелая*, (потребление кислорода в 4-8 раз больше, чем в состоянии покоя); энергозатраты, превышают 300 Вт (до 700 Вт).

В результате обменных процессов только часть вырабатываемой организмом энергии превращается в механическую (при максимальном коэффициенте полезного использования энергии  $\eta = 20\%$ ). Т.е. малая часть метаболической теплоты расходуется на обеспечение *внутриобменных* процессов и большую ее долю надо удалять из организма. Теплообмен между организмом и окружающей средой происходит путем радиации, конвекции, теплопроводности и испарения.

Теплоотдача организма определяется *температурой* кожи, воздуха и окружающих человека поверхностей, парциальным давлением водяного пара в воздухе, скоростью потока воздуха, омывающего человека, и зависит от вида одежды и площади поверхности организма.

Внутриобменные процессы в организме протекают при температуре  $37 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . По мере изменения метаболического фактора начинает функционировать система *терморегуляции*, (для входит поддержания постоянства температуры тела.

Об ограниченных возможностях терморегуляции свидетельствует термическое сопротивление кожи, составляющее от 0,04 до  $0,09 \text{ м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ .

Факторы влияющие на организм человека:

- влияние *радиационного теплообмена* на терморегуляцию организма человека.
- *влажность воздуха*, влияние которой на тепловой комфорт связано с дыхательным трактом человека.

Для благоприятной деятельности организма рекомендуется относительную влажность воздуха поддерживать в интервале 40-60%.

Другим проявлением влияния влажности воздуха на тепловой комфорт является зависимость скрытой теплоотдачи организма от влажности. Тепло в результате испарения влаги отводится из легких и дыхательных путей, а также при потоотделении. Установлено, что организм испаряет за сутки 800-1000 г влаги, или в тепловом эквиваленте 2100-2500 кДж, что составляет 20-25 % отдаваемого тепла.

**Влагоотдача**, а следовательно скрытая теплоотдача организма, зависят от температуры воздуха (рис.3.2). Потоотделение начинается при температуре  $28,29^{\circ}\text{C}$ , а свыше  $34^{\circ}\text{C}$  теплоотдача испарением вообще остается единственным способом.

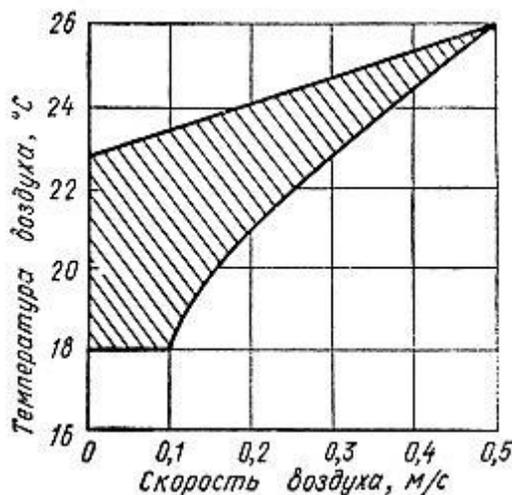


Рис. 3.4. Область комфортного сочетания подвижности и температуры критическое значение, сосуды начинают сужаться.

В создании теплового комфорта в помещении «участвует» **подвижность воздуха**. Минимальная подвижность воздуха, (для разрушения затхлости около тела) составляет 0,05-0,1 м/с. Чрезмерная подвижность воздуха вызывает ощущение сквозняка. Причем как только эффект охлаждения превысит некоторое

Ощущение сквозняка связано не только с подвижностью воздуха, но и с ее пульсацией, т.е. турбулентностью воздуха.

На рис.3.5. показано сочетание температуры, подвижности и турбулентности, соответствующее ощущению комфорта у 85% испытуемых людей.

### 3.2. Физиологические основы воздушного комфорта в помещении

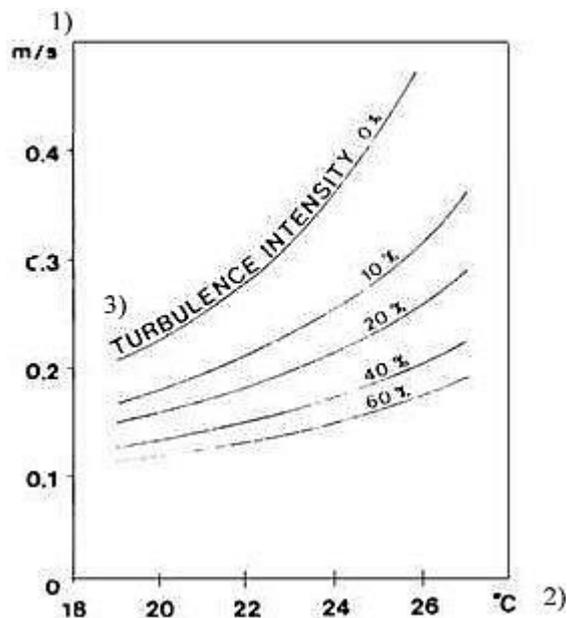


Рис. 3.5. Сочетание средней скорости движения воздуха 1, температуры воздуха 2 и интенсивности турбулентности 3, соответствующее ощущению комфорта у 85 % испытуемых людей.

Нарушение комфортного ощущения воздушной среды в гражданских зданиях связано со следующими причинами:

- накоплением и деструкцией вредных материалов в помещении;
- фоновым загрязнением наружного воздуха, подаваемого в помещение;
- деструкцией наружного воздуха при обработке в системах вентиляции и кондиционирования воздуха.

В промышленных зданиях воздух может быть загрязнен также токсичными парами, газами, аэрозолями и пылью, выделяющимися в технологическом процессе

Наиболее распространены такие вредные вещества, как:

1. окись углерода - угарный газ, (в результате неполного сгорания топлива);
2. **окислы азота** – газы (образующиеся при сгорании топлива).
3. **летучие химические соединения**
4. **формальдегид** – бесцветный газ с резким запахом;
5. **радон** – радиоактивный природный газ;
6. **волокнистые пыли**;
7. **свинец**;
8. биологические загрязняющие вещества:

- плесень;
  - пыль биологического происхождения;
  - бактерии;
9. табачный дым;
  10. сернистый газ;
  11. пары синильной кислоты;
  12. пары и пыль марганца;
  13. пары ртути и другие высокотоксичные пары и газы;
  14. многочисленные виды пыли, дымы, возникающие в результате механической обработки, а также горения и возгонки материалов;

Одно из условий воздушного комфорта - это отсутствие в воздухе неприятных *запахов*.

По данным отечественных гигиенистов, при подаче в помещение 60 м<sup>3</sup>/ч свежего воздуха на одного человека ощущение дискомфорта наблюдается у 25 % испытуемых; лишь 5% недовольны, если в помещение поступает не менее 80 м<sup>3</sup>/ч свежего воздуха на одного человека. Однако для полного ощущения комфорта только подачи нужного количества воздуха оказывается недостаточным. Установлено, что в помещениях, оборудованных воздушным отоплением и кондиционерами, при соблюдении всех комфортных условий ощущается дискомфорт, что объясняется нарушением *озоно-ионного* состава воздуха.

### 3.2. Комфортные условия микроклимата

В качестве обобщающего температурного показателя используют *температуру помещения*, равную средней между температурой воздуха  $t_B$  и радиационной температурой  $t_R$

$$t_{\Pi} = \frac{t_B + t_R}{2} \quad (3.3)$$

*Радиационную температуру* рассматривают как осредненную по площади температуру внутренних поверхностей в помещении. Температура помещения может быть измерена с помощью шарового термометра.

Для легкой работы, выполняемой человеком, В.Н. Богословский дает следующие показатели комфорта:

- для холодного периода

$$t_R = 1,57t_{\Pi} - 0,57t_B,$$

– для теплого периода

$$t_R = 1,5t_{\Pi} - 0,5t_B \quad (3.4)$$

Показатели комфорта по В.Ф.Раберу и Ф.М. Гатчинсону таковы:

$$t_B - t_R = 42,2. \quad (3.5)$$

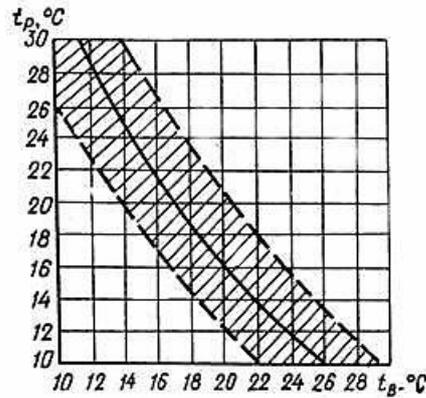


Рис.3.6. Комфортное сочетание температуры воздуха и радиационной температуры помещения

Комфортное сочетание  $t_B$  и  $t_R$  по данным Т.Бедфорда и В.Лизе показано на рис.3.6.

Сочетание температуры воздуха, поверхностей, скорости и относительной влажности воздуха определяют по диаграмме для **эффективной температуры**.

Из рассмотрения балансовых уравнений явной и скрытой теплоотдачи человеком и на основании многочисленных опытов он получено уравнение теплового комфорта:

$$6,91 + \frac{M}{F_d} (0,45 - 0,601\mu + 0,003P + 0,0014t_B) + 0,407P = 4k \left[ \left( \frac{t_{од} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_R + 273}{100} \right)^4 \right] + k\alpha_B(t_{од} - t_B) \quad (3.6)$$

где  $\frac{M}{F_d}$  – удельное значение метаболического тепла, Вт/м<sup>2</sup> ;

$\mu$  – механический коэффициент полезного действия;

$P$  – парциальное давление водяного пара в воздухе, мм рт.ст.;  $t_{од}$  – температура одежды, °С;

$k$  – коэффициент теплопередачи одежды, кло (1 кло = 0,155 м<sup>2</sup> °С/Вт);  $\alpha_B$  – коэффициент теплообмена, Вт/м<sup>2</sup> °С.

Температура одежды рассчитывается по формуле

$$t_{од} = 35,7 - 0,028 \left\{ \frac{M}{F_d} (1 - \mu) - 0,18k_4k \left[ \left( \frac{t_{од} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_R + 273}{100} \right)^4 \right] + k\alpha_B(t_{од} - t_B) \right\} \quad (3.7)$$

$$k = \frac{1}{1 + 0,155\alpha_B R_{од}}$$

где  $R_{од}$  – сопротивление теплопроводности одежды,  $m^3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ .

В уравнении комфорта учтены различные факторы, определяющие ощущения теплового комфорта: параметры микроклимата -  $t_B$ ,  $t_R$ ,  $P$ ,  $V$  (в скрытом виде); одежда человека -  $k$ ,  $R_{од}$ ; характер физической работы –  $\frac{M}{F_d}$ ,  $\mu$ .

Эту модель можно отобразить с помощью номограмм, позволяющих последовательно выбрать комфортное сочетание параметров.

Помимо уравнений теплового комфорта существует метод расчета **теплоощущения** человеком, позволяющий путем сопоставления фактических параметров и расчетных выявить степень дискомфорта в отдельных точках помещения (по шкале ожидаемых значений теплоощущения (PMV)):

| PMV      | -3      | -2        | -1               | 0         | 1            | 2     | 3     |
|----------|---------|-----------|------------------|-----------|--------------|-------|-------|
| Ощущение | Холодно | Прохладно | Слегка прохладно | комфортно | слегка тепло | тепло | жарко |

На основе собственных экспериментов и опытных данных других исследователей П.О. Фангер получил следующую формулу для расчета в условиях равенства температуры воздуха и радиационной температуры и при относительной влажности 50 %.

$$PMV = 0,41e^{-0,049M/F_d} + 0,037Q_0 \quad (3.8)$$

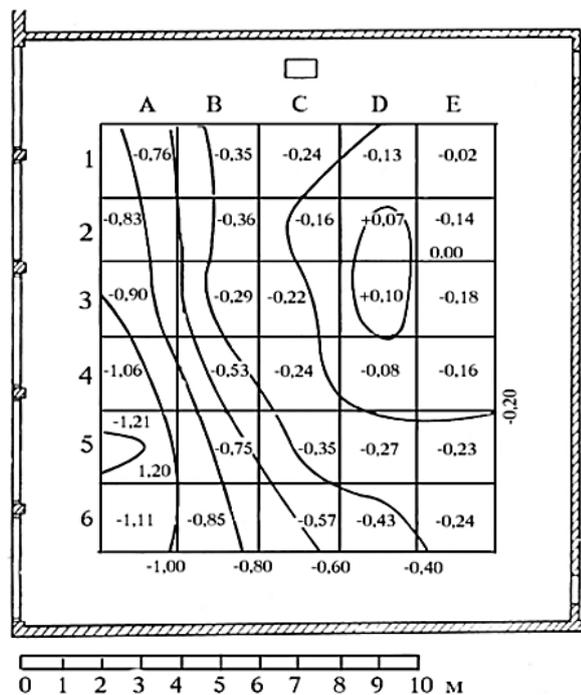


Рис. 3.9. Кривые изолиний PMV для школьного класса (по данным П.О. Фангера)

### 3.3. Технологические требования к параметрам микроклимата

Современные технологии в таких отраслях, как точное машиностроение, радиотехническая, химическая, пищевая, текстильная, полиграфическая промышленность, производство синтетических волокон и др., не эффективны без поддержания круглый год определенных сочетаний температуры и влажности воздуха, его подвижности, а также чистоты. Производство интегральных микросхем, функционирование предприятий микробиологической промышленности возможны только в замкнутом объеме, где к чистоте воздуха предъявляют специальные требования.

Технологические требования к значениям температуры и влажности воздуха и их изменению обусловлены физико-химическими свойствами обрабатываемых, производимых или хранимых материалов и изделий. Так, влажность воздуха влияет на свойства гигроскопичных материалов, а следовательно, и на качество изделий из них. В табл. 3.1 приведены данные о равновесной влажности в процентах к весу сухого материала при температуре 24°C.

Таблица 3.1

## Равновесная влажность некоторых материалов

| Материал                     | Относительная влажность воздуха, % |      |      |      |      |
|------------------------------|------------------------------------|------|------|------|------|
|                              | 10                                 | 30   | 50   | 70   | 90   |
| Бумага писчая                | 3                                  | 5,2  | 7,2  | 9,9  | 14,2 |
| Клей                         | 3,4                                | 5,8  | 7,6  | 10,7 | 12,5 |
| Кожа                         | 5                                  | 11,2 | 16   | 20,6 | 29,2 |
| Лен (волокно)                | 1,9                                | 3,6  | 5,1  | 7    | 10,2 |
| Резина                       | 0,11                               | 0,31 | 0,54 | 0,76 | 0,99 |
| Струны для ракеток           | 4,6                                | 8,6  | 12   | 17,3 | 21,7 |
| Шерсть                       | 5,7                                | 8,9  | 12,8 | 17,2 | 23,4 |
| Шелк                         | 3,2                                | 6,9  | 8,9  | 11,9 | 18,8 |
| Шелк искусственный (полотно) | 0,8                                | 1,4  | 2,4  | 3,6  | 5,3  |

Как видно, масса материалов, широко используемых в полиграфической, текстильной и кожевенной промышленности, значительно меняется по мере изменения влажности, причем влияние температуры сказывается меньше, чем влияние влажности. Например, в текстильной промышленности 5%-ное колебание относительной влажности воздуха дает изменение свойств пряжи более существенное, чем при изменении температуры на 10<sup>0</sup>С.

Что касается других производств и отраслей, то:

1. В окрасочном производстве при сушке лака нужна повышенная влажность воздуха - примерно 65 %, что связано с тормозящим воздействием высокой влажности на поверхностное окисление и свободным выходом газов без образования пузырей;
2. В прецизионном машиностроении - наоборот, изменение температуры воздуха ведет к недопустимо большому увеличению или уменьшению размеров деталей из-за линейного расширения материалов; так, при нанесении рисок на измерительные лимбы металлообрабатывающих станков допустимые колебания температуры воздуха составляют  $\pm 0,01$  °С;
3. В помещениях для хранения и обработки углеродистой стали необходима пониженная влажность воздуха (30 - 45 %), так как по мере увеличения влажности - особенно быстро после достижения 65 % - возрастает скорость коррозии металла; для защиты полированных поверхностей от микрокоррозии также следует поддерживать низкую температуру и низкую влажность воздуха;

4. Опасно в ряде производств и неприятно в быту и общественных зданиях накапливаемое статическое электричество; вред от него можно свести к минимуму, если относительная влажность воздуха будет более 55 %;
5. В прядильных и ткацких цехах особенно велико влияние статического электричества на эластичность и обрывность волокна, поэтому также требуется повышенная влажность воздуха;
6. При производстве химических волокон, например, в камере предсозревания щелочной целлюлозы необходимо поддерживать температуру воздуха 30-35

С при относительной влажности не ниже 90 %;

1. в полиграфическом производстве повышенная влажность воздуха обеспечивает требуемое качество бумаги и предупреждает накопление статического электричества, а колебания влажности более  $\pm 5\%$  влияют на размеры бумажного волокна, что ухудшает качество многоцветной печати;
2. в производстве интегральных схем методом фотопечати в чистых помещениях, одном из современных технологических процессов, колебания температуры и влажности вызывают изменения размеров сверхтонких пленок, на которые наносится интегральная схема, что недопустимо, поэтому в подобного рода процессах возможны колебания температуры  $\pm 0,05^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $\pm 0,5\%$ . Особые требования предъявляются в этом производстве к чистоте воздуха, что вполне понятно: попадание даже самой маленькой пылинки между слоями микропленок, толщина которых находится на молекулярном уровне, выводит элемент в брак (в соответствии с американским стандартом класс чистоты помещения исчисляется числом пылинок размером более 0,5 мкм в одном кубическом футе воздуха);
3. в некоторых отраслях пищевой промышленности, в частности мясоперерабатывающих и подсобных цехах, производстве шоколада и изделий из него и др. важно поддержание заданных параметров воздушной среды; так, определенное сочетание температуры и влажности воздуха обеспечивает эффективный процесс откорма скота и птицы.

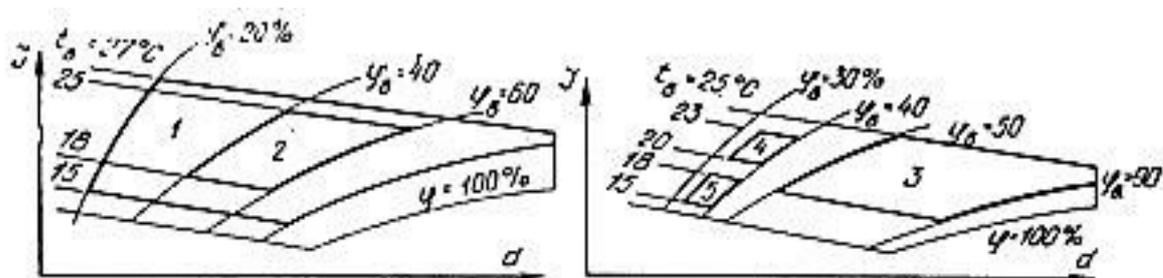


Рис. 3.11. Области сочетания температуры и влажности воздуха, оптимальные по технологическим требованиям для производства бумажной и полиграфической промышленности 1, точного машиностроения 2, текстильной 3, электротехнической 4 и химической 5 промышленности

На рис. 3.11 показаны области сочетания температуры и относительной влажности воздуха для отдельных технологических процессов.

## 4. Воздействие наружной среды на здание

### 4.1. Факторы воздействия наружной среды

Микроклимат в помещениях формируется за счет возмущающих воздействий внешней среды и технологического процесса внутри здания, нейтрализуемых системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха

Взаимодействие здания с внешней средой проявляется в виде **потоков тепла, влаги и воздуха**, приходящих извне внутрь или наоборот. Направление и интенсивность тепло-влаго-воздухопередачи через наружные ограждения обусловлены разностью **потенциалов переноса**.

Схема воздействия наружной среды на тепло-массопередачу наружных ограждений представлена на рис. 4.1. Определяющими являются параметры наружной среды: температура воздуха ( $t_n$ ), температура грунта ( $t_{гр}$ ) и небо-свода ( $t_{неб}$ ), скорость и направление ветра ( $\vec{V}$ ), интенсивность прямой ( $S$ ) и диф-

фузной ( $D$ ) солнечной радиации, парциальное давление водяного пара  $P$ .

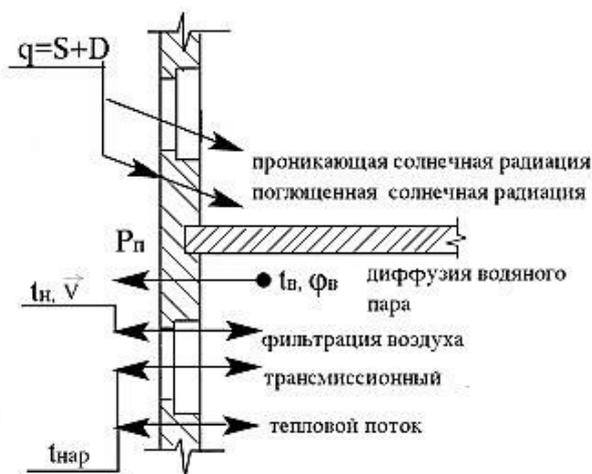


Рис. 4.1. Схема воздействия наружной среды на тепло-массопередачу наружных ограждений

Теплопередача через наружные ограждения обусловлена разностью температур наружной и внутренней среды, т.е. условиями теплообмена на наружной поверхности (см. рис.4.2).

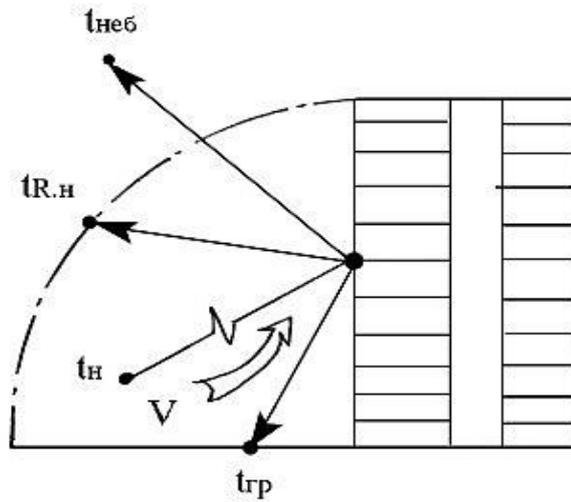


Рис. 4.2. Условия теплообмена поверхности ограждения с наружной средой.

Теплообмен на наружной поверхности складывается из лучистого и конвективного. Уравнение теплового баланса на наружной поверхности имеет вид

$$q_{\text{п}} = pq + \alpha_{\text{н.л}}(t_{R\text{н}} - t) + \alpha_{\text{н.л}}(t_{\text{н}} - t) \quad (4.1)$$

где  $t$  – температура наружной поверхности, °С;

$t_{R\text{н}}$  – радиационная температура наружной среды, °С;

$q_{\text{п}}$  – поток тепла, проходящий через поверхность, Вт/м<sup>2</sup>;

$q$  – интенсивность падающей на поверхность суммарной солнечной радиации

$$q = S + D, \text{ Вт/м}^2;$$

$p$  – коэффициент поглощения солнечной радиации поверхностью;

$\alpha_{\text{н.л}}$ ,  $\alpha_{\text{н.л}}$  – коэффициенты соответственно лучистого и конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>°С).

Уравнение теплового баланса (4.1) можно представить (через температуру наружной среды  $t_{\text{нар}}$ ) следующим образом:

$$q_{\text{п}} = pq + \alpha_{\text{н}}(t_{\text{нар}} - t) \quad (4.2)$$

где

$$t_{\text{нар}} = \frac{\alpha_{\text{н.л}} \cdot t_{R\text{н}} + \alpha_{\text{н.л}} \cdot t_{\text{н}}}{\alpha_{\text{н}}} \quad (4.3)$$

Для учета тепла солнечной радиации, поглощенного поверхностью ограждения используется понятие *условной температуры*,

$$t_{\text{усл}} = t_{\text{нар}} + \frac{pq}{\alpha_{\text{н}}} \quad (4.4)$$

Уравнение (4.1) в этом случае приобретает вид

$$q_{\text{н}} = \alpha_{\text{н}}(t_{\text{усл}} - t) \quad (4.5)$$

где  $\alpha_{\text{н}}$  - суммарный коэффициент теплообмена на наружной поверхности,  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{ }^\circ\text{С}$ :

$$\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{н.л.}} + \alpha_{\text{н.к.}}$$

Наружная поверхность обменивается конвективным теплом с наружным воздухом и лучистым теплом с небосводом, грунтом и противостоящими зданиями.

Условия *лучистого* теплообмена рассмотрены в разделе 5.1. Коэффициент лучистого теплообмена поверхности, расположенной под углом к горизонту  $\Delta$ , находят по формуле:

$$\alpha_{\text{л}} = 5,77 \varepsilon [\cos \Delta + \varepsilon_{\text{гр}}(1 - \cos \Delta)], \quad (4.6)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения наружной поверхности ограждения.

**Конвективный** теплообмен на наружной поверхности протекает в режиме вынужденной конвекции. Для выяснения закономерности течения воздуха у внешних поверхностей рассмотрим аэродинамику здания.

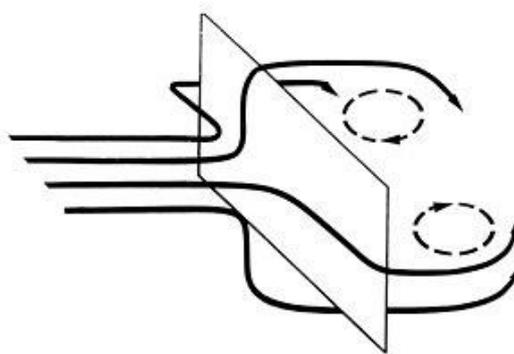


Рис. 4.3. Идеализированная картина обтекания пластины

На рис.4.3 показана идеализированная картина обтекания пластины, когда набегающий по нормали плоскопараллельный поток воздуха растекается по поверхности, при этом на заветренных поверхностях образуются вихри. Для выбора критериальной зависимости конвективного теплообмена следует принять условия обтекания плоской пластины.

Известно, что турбулентный режим течения характеризуется критическим числом Рейнольдса  $Re > 5 \cdot 10^5$ . Это означает, что при температуре воздуха  $t_n = 0^\circ\text{C}$  турбулентный режим соответствует произведению скорости ветра  $V$  на характерный размер  $l$ :  $Vl > 6,8$ . Если принять минимальную скорость ветра, равную 1 м/с, то характерный размер  $l > 6,8$ , м. Это условие удовлетворяется практически во всех случаях обтекания здания. Для турбулентного обтекания пластины используют критериальное уравнение  $Nu = 0,032Re^{0,8}$ , где критерий Нуссельта  $Nu = \frac{\alpha_k l}{\lambda}$ , критерий Рейнольдса  $Re = \frac{Vl}{\nu}$ .

Учитывая, что при  $l^{0,8} < 50$  м справедливо приближение  $l^{0,8} \approx 0,5 l$ , получаем значение среднего коэффициента конвективного теплообмена при нулевой температуре  $\alpha_k = 2,95 V^{0,8}$ .

Для учета температуры воздуха можно применить поправку

$$k_t = 1 - 0,002t.$$

При на бегание потока ветра на фасады здания скорость его течения на плоскости (скорость обтекания ?) отличается от скорости ветра  $V$ , что учитывается введением аэродинамического коэффициента  $k$ , связывающую скорость  $V_x$  и  $V$  соотношением

$$V_x = V\sqrt{1 - k},$$

где  $k$  – аэродинамический коэффициент.

Отсюда следует, что на наветренной стороне, где  $k > 0$ , наблюдается торможение потока, а на заветренной стороне, где  $k < 0$ , – ускорение. Этот вывод соответствует физической сущности процесса. Таким образом, в окончательном виде получим формулу расчета **коэффициента теплообмена** на наружной поверхности:

$$\alpha_n = 5,77 \varepsilon [\cos \Delta + \varepsilon_{гр}(1 - \cos \Delta)] + 2,95V^{0,8}(1 - k)^{0,4}(1 - 0,002t_n) \quad (4.7)$$

$\varepsilon_{гр}$  -коэффициент длинноволнового излучения поверхности грунта (различен зимой и летом);

$\Delta$  – угол наклона поверхности к горизонту, град.

В упрощенном виде это выражение имеет вид:

$$\alpha_n = 5,2 + 2,1 V, \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ }^\circ\text{C}) \quad (4.8)$$

В силу изменения наружных параметров во времени, передача тепла наружными ограждениями носит нестационарный характер. При этом тепло-

вой поток, проходящий через окна, не искажается по величине и во времени из-за ничтожной тепловой инерции окон. В то же время массивные ограждения (стены, перекрытия) передают тепловой поток трансформированным.

Наружные ограждения по разному передают тепловые потоки от коротковолновой солнечной радиации. В **массивных** ограждениях происходит поглощение тепла солнечной радиации поверхностью. Нагретая поверхность (см. рис.4.4) возвращает частично тепло в наружную среду, а частично передает через толщу ограждения внутрь помещения.

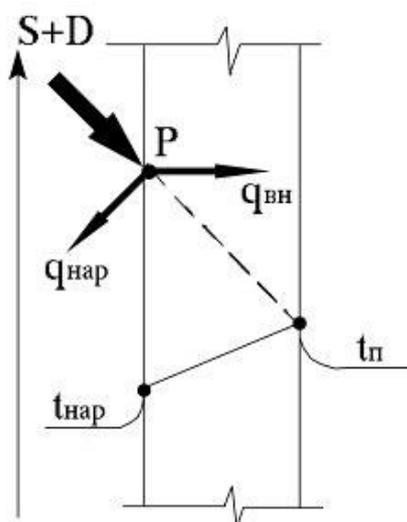


Рис. 4.4. Схема передачи тепловых потоков от коротковолновой солнечной радиации через массивное наружное ограждение.

Аналогично процесс теплопередачи протекает в **лучепрозрачных** ограждениях. Отличие этих ограждений состоит в том, что обычное оконное стекло обладает малым коэффициентом теплопоглощения  $P$  ( $\sim 0,07$ ) и, кроме того, пропускает через свою толщу тепловой **поток от солнечной радиации**. Величина проникающего теплового потока зависит от интенсивности солнечной радиации, конструкции окна и солнцезащитных устройств и в теплое время года может быть определяющей в сравнении с остальными факторами наружной среды.

**Скорость ветра** сказывается на конвективном теплообмене на наружной поверхности ограждения. Более весомым с точки зрения воздействия наружной среды является влияние скорости ветра на распределение давления снаружи здания.

При торможении потока воздуха на наветренном фасаде здания возникает избыточное по отношению к атмосферному давление.

На заветренной стороне здания в зоне вихреобразования давление оказывается ниже атмосферного. Величина давления на фасадах здания определяется скоростью и направлением ветра и конфигурацией здания. Таким образом в результате действия ветра возникает разность давления на противоположных фасадах здания. Помимо ветрового напора, перепад давления снаружи и внутри здания формируется гравитационным напором, обусловленным разностью объемного веса наружного и внутреннего воздуха. Совокупность двух факторов воздействия наружной среды приводит к фильтрации наружного и внутреннего воздуха через открытые проемы и не плотности в ограждениях.

*Разность парциального давления* внутри и снаружи здания служит потенциалом переноса водяного пара. Диффузия водяного пара наиболее существенна в массивных ограждениях в холодное время года. Влажностный режим ограждений оказывает существенное влияние на их теплозащитные свойства и долговечность.

Нарушение нормальной влагопередачи приводит к накоплению влаги в толще ограждения и появлению на его внутренней поверхности плесени.

Наружный воздух, передаваемый в помещение системой вентиляции, оказывает непосредственное влияние на формирование параметров внутреннего микроклимата.

Так, *влажность наружного воздуха* в значительной мере определяет влажность внутреннего воздуха, если здание не оборудовано специальными системами увлажнения для холодного времени года и осушки воздуха в теплый период. Аналогично в теплый период года при отсутствии в здании системы охлаждения температура внутреннего воздуха прямо зависит от температуры наружного воздуха.

## 4.2. Параметры наружного климата

Воздействие отдельных метеорологических элементов на тепловой, влажностный и воздушный режим здания и работу его инженерных систем является комплексным.

Ряд климатических параметров, таких как парциальное давление водяного пара, влагосодержание и энтальпия воздуха, интенсивность радиации на вертикальные и наклонные поверхности разной ориентации рассчитывают, используя имеющиеся значения измеряемых параметров.

При решении задач теплофизики здания и систем обеспечения микроклимата можно выделить два вида требуемой климатической информации: в *расчетных* и *эксплуатационных условиях*.

Под расчетными понимаются наиболее неблагоприятные погодные условия, при которых выбирается теплозащита здания и установочная мощность (производительность) систем обеспечения микроклимата. Расчетным условиям соответствует комплекс параметров наружного климата, за пределами которых система заведомо не обеспечивает поддержание расчетных параметров микроклимата.

Эксплуатационные условия характеризуются изменением параметров наружного климата во времени суток и года в интервале от расчетных летних до расчетных зимних и наоборот.

Парциальное давление водяного пара рассчитывается по данным измерения относительной влажности по формуле

$$P_{\text{п}} = \frac{\varphi}{100} P_{\text{н}},$$

где  $P_{\text{н}}$  – парциальное давление водяного пара при полном насыщении – функция температуры наружного воздуха.

**Влагосодержание** наружного воздуха  $d$ , г/кг:

$$d = 622 \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{г}} - P_{\text{п}}} \quad (4.15)$$

где  $P_{\text{г}}$  – барометрическое давление, Па (мм рт.ст.).

**Теплосодержание** наружного воздуха  $I$ , кДж/кг:

$$I = 1,005t + (2500 + 1,807t)d \cdot 10^{-3} \quad (4.16)$$

Климатические параметры изменяются во времени, сохраняя определенные закономерности. Наиболее ярко закономерность изменения параметров проявляется, если их иллюстрировать *средними многолетними* значениями.

Характер среднемесячного суточного хода температуры наружного воздуха, скорости ветра, интенсивности солнечной радиации, результирующие температуры в июле в различных климатических зонах для разных сезонов года типичен и приведен [1].

Приведенные данные показывают наличие общей закономерности *суточного хода* отдельных параметров для различных периодов года.

В целом результирующая и условная температура, как и составляющие ее параметры, сохраняет общую закономерность суточного хода в отдельные периоды года.

### 4.3. Расчетные наружные условия

При определении расчетных параметров наружного климата наиболее важным представляется сформулировать критерии выбора расчетных условий.

Целью выбора расчетных условий является определение *наибольшей нагрузки* на системы обеспечения микроклимата, которая складывается из наибольших значений составляющих ее частей. В *холодный период* года тепловая нагрузка на систему отопления соответствует возможно низкой температуре наружного воздуха и большей скорости ветра. В расчете не следует учитывать тепловой поток от солнечной радиации, снижающий тепловую нагрузку. Влажность воздуха в этот период физически очень мало.

В *теплый период года* рассчитывается нагрузка на систему охлаждения помещения и осушки воздуха. Наибольшей величине нагрузки соответствуют возможно высокие значения температуры, влажности, теплоемкости наружного воздуха и интенсивности солнечной радиации. Скорость ветра при этом должна быть возможно минимальной.

Наиболее простым решением задачи выбора расчетных параметров наружного климата было бы использование *абсолютных* максимумов или минимумов параметров. Однако такой подход очевидно нецелесообразен. Во-первых, потому, что абсолютный максимум параметра наблюдается один раз за весь срок измерений и вероятность его появления впредь очень мала. Поэтому системы, запроектированные для экстремальных расчетных условий, в реальный период эксплуатации будут иметь завышенную мощность и окажутся экономически неоправданными.

Во-вторых, использование такой модели спорно и с физической точки зрения, так как одновременное появление экстремальных значений всех параметров невероятно. Более того, возможны такие ситуации, при которых приближение одного параметра к экстремальному значению сопровождается изменением другого параметра в обратном направлении.

Последнее утверждение иллюстрирует рис.4.11, на котором показана устойчивая обратная корреляция температуры наружного воздуха и скорости ветра в условиях Москвы.

Из сказанного следует, что в качестве расчетных следует принимать значения параметров меньшие по абсолютной величине, нежели экстремальные.

При выборе *расчётной наружной температуры* в холодный период года представляют интерес расчеты длительности остывания здания при по-

нижении температуры ниже расчетного значения. Установлено, что период снижения температуры воздуха на 4 °С в кирпичном здании с толщиной стен 0,51 м. составляет 152 ч, а для здания с облегченными стенами - 100 ч. Принятый средний период соответствует 5 суткам.

Так в качестве расчетной температуры в холодный период года была обоснована средняя за **наиболее холодную пятидневку** температура наружного воздуха, которая в несколько измененном виде используется в современных нормах



рис.4.11. Зависимость скорости ветра от наружной температуры: 1- наибольшие осредненные значения скорости ветра при разной температуре для наиболее суровых периодов зимы; 2- зависимость расчетной скорости ветра от температуры

Выбор параметров наружного климата, используемых для расчета теплового режима помещений, В.Н. Богословский предложил проводить на основе **коэффициента обеспеченности**  $K_{об}$ , равного отношению

$$K_{об} = \frac{n}{N}$$

где  $n$ - число лет (случаев), когда параметр отклоняется (например, превышает) от заданных значений;

$N$  - число лет, принятых к рассмотрению.

Зависимость численных значений параметров климата от коэффициента обеспеченности имеет вид функции распределения  $F(y)$ .

Последняя величина в долях единицы показывает число случаев, в которых внутренние условия обеспечиваются по отношению к общему числу случаев (членов статистического ряда параметров).

Использование коэффициента обеспеченности, по сути равного вероятности обеспечения внутренних условий, позволило уточнить представление о расчетных условиях. С его помощью удалось связать уровень комфортности в здании с расчетной температурой наружного воздуха так, как это показано в табл. 4.2

**Таблица 4.2**

*Коэффициент обеспеченности расчетных условий для холодного периода года*

| Характеристика основных помещений                                    | Коэффициент обеспеченности $K_{об}$ |
|--|-------------------------------------|
| Повышенные санитарно-гигиенические требования                        | Около 1,0                           |
| Круглосуточное пребывание людей или постоянный технологический режим | 0,9                                 |
| Ограниченное во времени пребывание людей                             | 0,7                                 |
| Кратковременное пребывание людей                                     | 0,5                                 |

Вероятностное обоснование выбора сочетания двух (и более) расчетных параметров наружного воздуха (для зимних и летних условий года), в том числе, с использованием  $t_{\phi}$  диаграммы приведено в [1]

В последней редакции СНиП 2.3.01-99 "Строительная климатология" собрана основательная база данных, прежде всего по расчетным значениям температуры наружного воздуха. В частности приводятся значения  $t_H$  средней за наиболее холодные сутки и наиболее холодную пятидневку с обеспеченностью 0,98 и 0,92, предназначенные для теплотехнического расчета ограждений и расчета мощности систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в холодное время.

#### **4.4. Эксплуатационные наружные условия**

Расчетные наружные условия моделируют искусственную синоптическую ситуацию для выбора установочных параметров здания и систем обеспечения микроклимата.

Эксплуатационные условия должны по возможности отражать близкое к реальному изменение параметров наружного климата *во времени года*. Именно год является основным временным элементом, в рамках которого проявляются систематические режимы функционирования здания.

Рассмотрение годового режима работы систем обеспечения микроклимата необходимо, прежде всего, для оценки их *энергетических затрат*.

Среди многообразия моделей представления годового изменения наружных параметров выделяют две группы.

Первый вид моделей строится на описании годового хода параметров *средних* за месяц. Модели представляются в табличной форме или описываются аналитически. Разновидностью подобной модели наружного климата является так называемый *представительный год* (при ясном небе или различных баллах облачности).

Второй вид представления климатической информации использует обработку срочных измерений в виде *функций распределения* параметра. Функции распределения задаются в табличной форме, в виде графиков или аппроксимируются аналитическими зависимостями.

Более подробно закономерности (особенности и разновидности) применения наружных условий рассмотрены в [1]

## 5. Требуемая тепловая мощность систем обеспечения микроклимата

### 5.1. Понятие тепловой нагрузки на системы отопления-охлаждения

Под *тепловой нагрузкой* понимается сумма тепловых потоков, поступающих в помещение, чтобы обеспечить в пределах рабочей зоны помещения в течение рабочего времени заданную (рабочую) температуру воздуха.

Принято считать, что тепловая нагрузка равна *теплоизбыткам* или *теплопотерям* в виде *алгебраической суммы* тепловых потоков, поступающих в данный момент времени в помещение. Однако, следует иметь в виду, что возмущающие и регулирующие тепловые воздействия в силу их разной *природы* и из-за разных *функций изменения* во времени суток по разному воздействуют на формирование температуры воздуха. Причем из-за нестационарности процессов имеет место *запаздывание реакции* температуры воздуха на то или иное тепловое воздействие.

### 5.2. Составляющие тепловой нагрузки на системы отопления-охлаждения

Тепловая нагрузка на системы отопления-охлаждения складывается из тепловых потоков, поступающих через наружные ограждения и от внутренних источников.

Через наружные ограждения проходят:

- трансмиссионный тепловой поток за счет разности наружной и внутренней температуры;
- тепловой поток с инфильтрационным воздухом, проходящем через окна; -теплопоступления от солнечной радиации.

#### 5.2.1. Трансмиссионный тепловой поток, проходящий через наружные ограждения

С точки зрения теплопередачи наружные ограждения можно разделить на две группы: *массивные* непрозрачные и *немассивные лучепрозрачные*. Из-за изменения во времени граничных условий процессы передачи тепла через ограждения носят *нестационарный* характер.

Для современных многослойных конструкций наружных стен с эффективными теплоизоляционными материалами в условиях действующих норм теплозащиты показатель тепловой инерции  $D$  составляет более 5, затухание при такой величине  $D$  велико для стен, а тем более для перекрытий.

Это свидетельствует о том, что суточное отклонение тепловых трансмиссионных тепловых потоков, проходящих через массивные ограждения, практически *неощутимо* и его не следует учитывать в расчетах. Кроме того, величина суточного колебания трансмиссионного теплового потока на наружной поверхности *мала* по сравнению с другими составляющими тепловой нагрузки на системы отопления-охлаждения помещения. Об этом также свидетельствуют данные рис.5.2, на котором представлены результаты расчета колебания температуры на внешней и внутренней поверхности наружной стены (рис.5.2.а) и бесчердачного покрытия (рис.5.2.б). Расчеты проводились для условий жаркого климата и учитывали поглощение наружной поверхностью ограждения тепла солнечной радиации. Как видно из рис.5.2., существенное колебание тепловых потоков, проходящих через наружную поверхность ограждения практически полностью затухают.

Ниже приведена формула для расчета *трансмиссионного* теплового потока, проходящего через массивные ограждения  $Q_{тр}$  в Вт

$$Q_{тр} = k_l \cdot F_l (t_{y,o} - t_{п}) \quad (5.3)$$

где  $k_l$  - коэффициент теплопередачи массивного ограждения, Вт/м<sup>2</sup>град;

$F_l$  - площадь ограждения, м<sup>2</sup>;

$t_{y,o}$  - среднесуточная условная температура по формуле (4.4);

Лучепрозрачные ограждения имеют малую массу и тепловую емкость, поэтому не стационарностью процесса переноса тепла в них можно пренебречь.

Комплексный процесс переноса тепла и воздуха через конструкцию окна обычно расчлняют на элементарные. Наибольший вклад в величину общего сопротивления теплопередаче окна  $R_0$  вносят сопротивление теплообмену на *внутренней поверхности*  $R_{в}$  и воздушной прослойки в *межстекольном пространстве*  $R_{вп}$ . Расчеты показывают, что значения сопротивления теплопередаче окон относительно постоянны. Для обычного остекления в спаренном переплете среднее значение  $R_0 = 0,335 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ , причем  $R_{в} = 0,094$  (28 %), а  $R_{вп} = 0,172$  (51 %).

Для конструкций окон с стеклопакетами сопротивление теплопередаче больше, чем у обычного остекления и может составлять величины согласно табл. 5.1.

**Таблица 5.1**

*Сопротивление теплопередаче по данным испытаний стеклопакетов*

| Конструкция стеклопакета | Расстояние между стеклопакетами, мм | Сопротивление теплопередаче, (м <sup>2</sup> °С)/Вт, для стеклопакетов |         |
|--------------------------|-------------------------------------|--|---------|
|                          |                                     | Воздухом   | Аргоном |
| Однокамерный             | 4, 6, 9                             | 0,32   | 0,34    |
| Двухкамерный             | 4, 6, 9                             | 0,47   | 0,49    |
|                          | 12, 15, 18, 20                      | 0,53   | 0,55    |

Существенно повысить сопротивление теплопередаче окон можно, используя специальные теплоотражающие стекла с заполнением межстекольного пространства **инертным газом**.

В пределах оконного откоса возникает двухмерное распределение температуры и соответственно увеличивается (по сравнению с гладью стены) тепловой поток, проходящий через откос. Этот фактор учитывают с помощью приведенного сопротивления теплопередачи окон, которое оказывается меньше сопротивления теплопередаче конструкции на 11 % для обычных окон со спаренными переплетами и на 4 % - для окон с отдельными переплетами.

Таким образом тепловой поток за счет теплопередачи  $Q_{ТР}$ , Вт, проходящий через окно равен

$$Q_{ТР} = kF(t_{нар} - t_{п}) \quad (5.4)$$

где,  $k$  – коэффициент теплопередачи окон в Вт/м<sup>2</sup>град;

$F$  – площадь окна, м<sup>2</sup>;

$t_{нар}$  -температура наружной среды по формуле (4.3).

В инженерных методах расчета вместо температуры помещения  $t_{п}$  в формулу (5.4) подставляют температуру воздуха  $t_{в}$ , а вместо наружной температуры  $t_{нар}$  – температуру наружного воздуха  $t_{н}$ .

### 5.2.2. Инфильтрационный тепловой поток

Помимо трансмиссионного теплового потока через окна проходит так называемый тепловой поток, обусловленный *инфильтрующимся* наружным воздухом. Последняя величина  $Q_H$  равна в Вт

$$Q_H = \frac{1}{3,6} A F_{OK} G_H (t_H - t_B) \quad (5.5)$$

где помимо известных величин  $F_{OK}; t_H; t_B$ ,  $A$ -коэффициент рекуперации, равный 0.9 для отдельных переплетов и тройного остекления, а в остальных случаях 1. Величина  $G_H$  в формуле (5.5) – расход инфильтрационного воздуха через единицу площади поверхности окна в кг/ м<sup>2</sup> ч.

Для определения величины расхода следует рассмотреть основные положения аэродинамики здания.

В результате воздействия на здание естественных сил – гравитационного и ветрового давления на внешних поверхностях здания возникает определенное распределение давления воздуха. *Гравитационное* (аэростатическое) давление  $\Delta P_{гр}$  появляется за счет разности объемного веса наружного ( $\gamma_H$ ) и внутреннего воздуха ( $\gamma_B$ ), причем в нижней части здания это давление больше, чем внутри, а в верхней части – меньше. Действие *ветра* приводит к тому, что на наветренной стене создается избыточное давление ( $\Delta P_{ветр}$ ), а на заветренной в зоне вихреобразования - разрежение ( $\Delta P_{ветр}$ ). Оба природных фактора действуют совместно.

На наружной поверхности здания имеет место распределение (см.рис.5.3) избыточного давления наружного воздуха, Па:

$$\Delta P_i = \Delta P_{гри} + \Delta P_{ветри} \quad (5.6)$$

На практике наиболее удобно принимать скорость ветра  $V_H$  *на уровне кровли* здания, т. е. на высоте здания  $H$ . В этом случае значение аэродинамического коэффициента мало зависит от высоты здания.

Осреднение данных многочисленных натурных и экспериментальных исследований на модели дает значения разности аэродинамических коэффициентов на наветренной и заветренной сторонах зданий, которые составляют  $\delta_C$  от 0,9 до 1,3 (в зависимости от уровня-положения по высоте). Среднее значение разности  $\delta_C$  в целом для зданий типа *башни* составляет **1,13**, а для здания типа *пластичны* - **0,98**.

В простейшем случае сбалансированного притока и вытяжки в здании и при одинаковом воздухопроницании обоих фасадов разность давлений, Па, снаружи и внутри здания равна:

$$\Delta P_i = \left( \frac{H}{2} - h_i \right) (\gamma_B - \gamma_H) + 0,25 w_H^2 (k_H - k_3) p_H \quad (5.12)$$

где  $H$  – высота здания, м;

$h_i$  – высота рассматриваемого уровня, м;

$\gamma_B, \gamma_B$  – удельный вес воздуха (наружный и внутренний),  $\text{Н}/\text{м}^3$ ;

$w_H$  – скорость ветра,  $\text{М}/\text{с}$ ;

$\rho_H$  – плотность наружного воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$k_H, k_3$  – аэродинамические коэффициенты (с наружной и внутренней стороны).

Более корректно распределение давления по фасадам здания вычисляются на основе решения системы балансовых уравнений помещений .

С обеих сторон неповрежденных ограждений за счет разности давления воздух проникает или фильтруется через *щелевидные* отверстия (открытые стыки панелей, неплотности по периметру окон и дверей) и через *поверхностные* отверстия в виде микропор, сравнительно равномерно распределенных по площади стен и перекрытий.

В инженерных методах расчета пользуются формулой расчета расхода воздуха, проходящего через неплотности окон в  $\text{кг}/\text{ч м}^2$

$$G_{\text{и}} = \frac{1}{R_{\text{и}}} \left( \frac{\Delta P}{10} \right)^{2/3} \quad (5.13)$$

где  $R_{\text{и}}$  – сопротивление воздухопроницанию,  $\text{м}^2\text{ч}/\text{кг}$ ;

$\Delta P$  – разность давления воздуха снаружи и внутри здания по формуле (5.12), Па.

### 5.2.3. Теплопотупления от солнечной радиации через лучепрозрачные ограждения

Лучепрозрачные ограждения (окна, витрины, фонари) значительно влияют на формирование не только светового, но и теплового микроклимата в здании. В теплый период года окна передают большие потоки тепла от солнечной радиации, а это - нагрузка на систему охлаждения или существенный *перегрев* помещения. Обычное оконное стекло хорошо пропускает значительную часть спектра солнечной интенсивности.

Помимо проникающего тепла, в помещение попадает также часть тепла, *поглощенного стеклом*. Этот поток тепла, связанный с разогревом поверхности стекла, является конвективно-радиационным.

Испытания, выполненные в НИИСФ, показали, что для двойного остекления поток тепла, за счет разности *температуры внутреннего остекления* и помещения в период максимальной инсоляции, составляет до 20 % от суммарного потока. Эта составляющая возрастает с увеличением коэффициента поглощения стекла или в солнцезащитных устройствах в межстекляном пространстве.

Расчет температуры поверхности инсолируемого одинарного остекления основан на решении дифференциального уравнения теплопроводности с источником и уравнений теплообмена на поверхностях. После подстановки в решение постоянных (нормируемых) величин получена формула для расчета теплопритока через *одинарный светопроем* с толщиной остекления

$$q = (0,512S + 0,163D) \frac{\delta^2}{100} \quad (5.19)$$

Суммарное тепlopоступление, проходящее от солнечной радиации через окно, равно

$$Q_{\text{п}} = F_{\text{ок}}(S\bar{\beta}\beta_{\text{оп}}\bar{F}_{\text{ок}} + D\beta_{\text{од}})\beta_3 \quad (5.24)$$

где индексами “п” и “д” обозначены коэффициенты для прямой и диффузной радиации;

$F_{\text{ок}}$  – площадь окна;

$D$  – показатель тепловой инерции;

$\bar{F}_{\text{ок}}$  – коэффициент затемнения (формула (5.21) [1]);

$\bar{\beta}\beta_0\beta_3$  – коэффициенты (см.[1])

В инженерных методах расчета снижение тепlopоступления от солнечной радиации для окон с более одного остеклением и солнцезащитой в конструкции окна принято учитывать с помощью *коэффициента солнцезащиты*  $\beta_3$  в формуле (5.24).

## 6. Вентиляционный процесс обеспечения микроклимата

### 6.1. Струйные течения в помещении

Характер распределения примесей вредных веществ в вентилируемом помещении определяется главным образом возникающими *воздушными течениями*, которые, в свою очередь, зависят от принятого способа организации воздухообмена.

Решающая роль в формировании полей температуры, скорости и концентрации примесей принадлежит **приточным струям** и создаваемым ими циркуляционным течениям. При помощи приточных струй можно обеспечивать в определенных зонах помещения заданные параметры воздушной среды, существенно отличающиеся от таковых в окружающем пространстве (воздушные души, воздушные оазисы); создавать воздушные завесы, препятствующие врыванию в помещение холодного воздуха; применять устройства, способствующие сдуву вредных веществ к месту их организованного удаления (местные отсосы с передувками).

**Конвективные (тепловые) струи**, которые формируются вблизи стен и поверхностей оборудования (с температурой, отличающейся от температуры окружающего воздуха), также могут оказывать влияние на распределение вредных веществ в помещении.

Тепловые струи, возникающие над нагретым оборудованием, способствуют выносу теплоты и вредных примесей в верхнюю зону помещений. Мощные конвективные потоки переносят в верхнюю зону помещений газы и пары даже в том случае, если они тяжелее воздуха.

#### 6.1.1. Приточные струи

**Струей** называется поток жидкости или газа с конечными поперечными размерами, определяемыми границей струи. В технике вентиляции имеют дело с воздушными струями, которые распространяются в воздухе помещения. Такие струи называются **затопленными**. Вентиляционные струи являются **турбулентными**.

В зависимости от температуры истечения струи разделяются на **изотермические** и **неизотермические**. У изотермических струй температура во всем ее объеме равна температуре окружающего воздуха, у неизотермических струй температура изменяется по мере ее развития, приближаясь к температуре окружающего воздуха.

В зависимости от конструкции воздухораспределительного устройства струи могут развиваться по разным траекториям. На рис.6.1 изображено развитие изотермической **осесимметричной** струи, все поперечные размеры которой симметричны относительно ее оси, которая является прямолинейной.

На границе струи, где продольная составляющая скорости равна нулю, имеет место интенсивное подмешивание масс воздуха в струю и уменьшение скорости воздуха. В пределах координаты  $x_n$  скорость воздуха по оси струи и в ее поперечном сечении равна скорости истечения. Этот участок называется

**начальным.** В последующем осевая скорость уменьшается, как и скорость в поперечном сечении.

Оссиметричные струи вытекают из круглого отверстия и являются компактными. К **компактным** относятся также струи, вытекающие из квадратных и прямоугольных насадков.

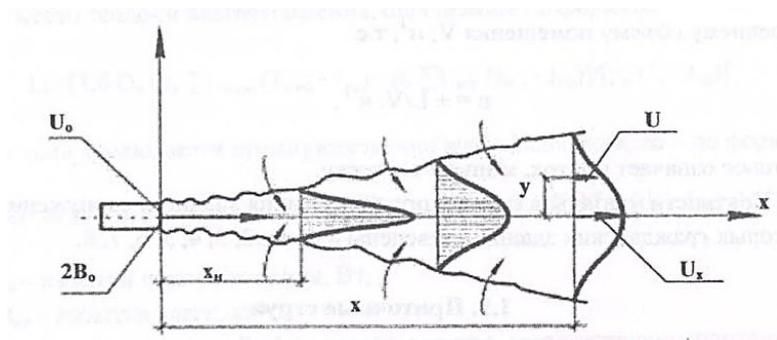


Рис.6.1.Свободная изотермическая осесимметричная струя

Другие виды струй(плоские, веерные, конические, закрученные); их структура и геометрия, а так же схемы формирования воздушных фонтанов и конвективных струй), подробно рассмотрены в [1] (рис.6.2,а,б,в,г;6.3;6.4;6.5)

В технике вентиляции обычно имеют дело с неизотермическими струями. В таких струях из-за разности плотности воздуха в струе и окружающего воздуха возникают **гравитационные** (архимедовы) силы, соизмеримые с силами инерции. Вследствие действия этих сил искривляется ось струи, отклоняясь от прямолинейной.

При горизонтальном или под углом к горизонту выпуске струи охлажденная струя опускается, а нагретая - всплывает.

Неизотермические струи из-за их криволинейной траектории часто называют **воздушными фонтанами**

При рассмотрении изотермических и слабонеизотермических струй исходят из следующих понятий и предпосылок:

1. **Количество движения** секундной массы воздуха в каждом поперечном сечении одинаково и равно количеству движения начальной массы воздуха в струе;
2. В поперечном сечении струи(в зоне турбулентного перемешивания)распределение скоростей и температур происходит по единому экспоненциальному закону
3. Количество **избыточного тепла** потока воздуха в поперечном сечении струи неизменно и равно начальному.

Наличие нагретых источников в помещениях приводит к возникновению около них естественных конвективных потоков Соприкасающийся с по-

верхностью воздух нагревается, возникает подъемная сила, под действием которой нагретый воздух поднимается вверх. На смену ему поступает окружающий воздух. В поднимающемся потоке нагретого воздуха под действием сил внутреннего трения и в результате подмешивания окружающего воздуха формируется распределение скорости и избыточной температуры, *аналогичное приточным* струям. Поэтому такое течение называют конвективной струей.

Рассматривают следующие схемы формирования конвективных струй около различно расположенных поверхностей: а) у вертикальной нагретой поверхности; б) у вертикальной охлажденной поверхности; в) над компактной или осесимметричной нагретой поверхностью, заподлицо с плоскостью; г) над плоской нагретой поверхностью, заделанной заподлицо с плоскостью; д) над объемной нагретой поверхностью источника е) над нагретой поверхностью, расположенной в углублении; ж) над объемной нагретой поверхностью источника (например, отопительный прибор, расположенный вблизи вертикальной стены.[1])(рис.6.4;6.5)

Конвективные потоки около горизонтальных нагретых поверхностей по аналогии с приточными струями можно рассматривать как состоящие из двух участков: *разгонного* (или формирования) с возрастающей скоростью на оси и *основного* — с убыванием скорости на оси. Разгонный участок состоит из ламинарного подслоя, расположенного непосредственно у нагретой поверхности и пограничного слоя конвективной струи состоящего из отдельных взаимодействующих между собой нагретых струек, сформированных в сплошной поток. В конце участка формирования, характерного максимальной скоростью и некоторой *поджатостью* струи, составляющей около  $0,7D$ , располагается переходное сечение. Далее расположен основной участок с симметричным относительно осевой линии профилем скоростей и избыточной температуры, характерным для турбулентных струй.

Рассмотренные выше закономерности вентиляционных струй относятся к *свободным* струям. В реальных помещениях, как правило, струи бывают *стесненными* ограждениями и оборудованием.

### 6.1.2. Движение воздуха около вытяжных отверстий

Скорость движения воздуха вблизи всасывающего отверстия падает значительно *интенсивнее*, чем у приточного. Это связано с тем, что при всасывании воздух подтекает к отверстию со всех сторон.

Наличие у всасывающих отверстий направляющих и ограничивающих плоскостей позволяет получить большие скорости при одинаковых условиях с обычным отверстием.

Закономерности такого движения и показатели эффективности вентиляционного процесса рассмотрены в [1](формулы (6.11)-(6.18) рис.6.6-6.8).

## 6.2. Эффективность вентиляционного процесса

Избытки тепла и влаги, выделение токсичных паров и газов, пыли приводят к нарушению нормального состава внутреннего воздуха. Нейтрализацию этих возмущающих воздействий на микроклимат компенсирует удаление из помещения загрязненного и подача в него свежего вентиляционного воздуха, то есть создание *воздухообмена*. Процесс формирования параметров микроклимата помещения с помощью воздухообмена представляет *вентиляционный процесс*.

Вентиляция помещений связана с большой затратой энергии на обработку и перемещение воздуха, что обусловлено малой плотностью и теплоемкостью воздуха. Поэтому очень важно обеспечить эффективное протекание вентиляционного процесса. Под эффективностью в данном случае понимается обеспеченность заданных параметров воздуха в пределах рабочей зоны при минимальной величине воздухообмена(см. формулы (6.13)-(6.18)[1]).

Эффективность вентиляционного процесса оценивается двумя показателями:

1. *Степенью использования* приточного воздуха в помещении(в частности коэффициентами воздухообмена по температуре  $t$  и концентрацией примесей  $C$ ).
2. *Степенью равномерности* распределения скорости (подвижности) и температуры по площади рабочей зоны(с оценкой коэффициентов неравномерности скорости и температуры).

По этим коэффициентам можно вычислить температуру и концентрацию вредностей *уходящего воздуха*  $t_{yx}$  и  $C_{yx}$ , которые являются исходными величинами при расчете воздухообмена (первый способ расчета параметров уходящего воздуха).

Другой способ определения параметров уходящего воздуха использует понятие *градиента температуры*  $\Delta t$

$$t_{yx} = t_{pz} + \Delta t(H - 2) \quad (6.15)$$

Величина градиента зависит от *тепловой напряженности* помещения

$$q = Q_{\text{я}}^{\text{изб}} / V,$$

где  $Q_{\text{я}}^{\text{изб}}$  – избытки явного тепла, Вт:

- при  $q < 11.5$  Вт/м<sup>3</sup>,  $\Delta_t < 0.5$  град;
- при  $q = 11.5-23$ ,  $\Delta_t = 0.3-1.2$ ;
- при  $q > 23$ ,  $\Delta_t = 0.8-1.5$ .

Приведенные данные относятся к теплому периоду года. Для холодного периода в помещениях с незначительными теплоизбытками ( $q < 23$ ) можно считать  $\Delta = 0, t_y = t_{p3}$ .

Задача организации вентиляционного процесса состоит в обеспечении заданной концентрации  $C_{p3}$  в пределах рабочей зоны. Возможны три случая организации воздухообмена:

- А. Подача и удаление воздуха из верхней зоны;
- Б. Подача воздуха в рабочую зону и удаление из верхней зоны;
- В. Подача воздуха из верхней зоны, удаление – из рабочей зоны.

Примеры рациональной организации вентиляционного процесса (и воздухообмена) приведены в [1](рис.6.7;6,8)

### 6.3. Определение воздухообмена в помещении

Исходными для определения воздухообмена являются величины тепловой, влажностной и газовой нагрузки на систему вентиляции, а определяющим распределение температуры и концентрации вредных веществ в объеме помещения. В значительной мере это относится к температуре и концентрации уходящего воздуха.

В помещении может иметь место сочетание разных схем вентиляционного процесса. Рассмотрим одну из типовых схем организации воздухообмена, представленную на рис.6.9 Схема включает обще-обменный приток в вытяжку в верхней зоне и местный отсос из рабочей зоны.

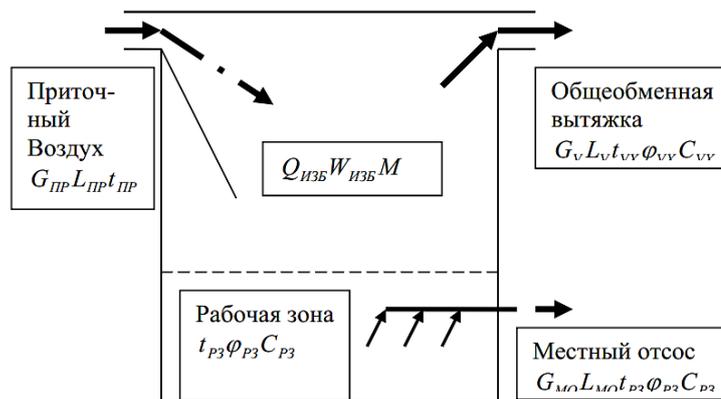


Рис 6.9. К составлению балансовых уравнений воздухообмена в помещении

Воздухообмен определяется из уравнений баланса по теплу, влаге и газовым вредностям. [1] (формулы (6.19) - (6.25)); пример его определения рассмотрен на практическом занятии.

Концентрация вредности в уходящем воздухе равной предельно допустимой концентрации вредного вещества в воздухе рабочей зоны. В свою очередь, концентрация вредности в **приточном** воздухе не должна превышать 0.3 от ПДК рабочей зоны. При одновременном выделении в рабочую зону помещения нескольких вредностей, не обладающих однонаправленностью токсикологического воздействия на человека, в качестве расчетной величины принимается наибольшая из полученных по формуле (6.25). [1]

При одновременном поступлении в рабочую зону помещения нескольких подобных веществ расчетный воздухообмен определяется суммированием величин, полученных по формуле (6.25) для каждого вещества.

В помещениях вспомогательного назначения воздухообмен принято рассчитывать по кратности. **Кратность воздухообмена**  $n$  показывает, сколько раз в течение часа вентиляционный воздух заменяет воздух в объеме помещения

$$n = \frac{L}{V} \quad (6.26)$$

где  $L$  - расход приточного воздуха, м<sup>3</sup>/ч;

$V$  - объем помещения, м<sup>3</sup>.

Кратность принимается со знаком «плюс», что означает приток воздуха, и со знаком «минус» - для вытяжки.

Одним из важных показателей воздухообмена в помещении служит **санитарная норма**, то есть минимально допустимое количество наружного воздуха, которое необходимо подавать в помещение. Санитарная норма

устанавливается для одного человека и равна при постоянном пребывании в помещении 60 м<sup>3</sup>/ч и при временном (менее 2 часов) пребывании -20 м<sup>3</sup>/ч.

Санитарная норма служит не только основным санитарно-гигиеническим показателем, но и представляется важным *экономическим параметром*, который определяет минимально неизбежные расходы на обеспечение микроклимата помещения. В идеале надо стремиться к доведению требуемого воздухообмена, который устанавливается из условия ассимиляции тепло-влагоизбытков, до минимально необходимого, то есть - до санитарной нормы. Это достигается использованием в здании возможно полного *комплекса мер по снижению тепловой нагрузки* и согласованной работой систем отопления-охлаждения и вентиляции.

При определении расчетного воздухообмена системами кондиционирования воздуха исходной величиной является температура приточного воздуха. С точки зрения минимизации расхода приточного воздуха желательно принимать *минимально возможную температуру*. Ограничение минимального значения температуры воздуха связано с *воздухораспределением*.

Воздухообмен обычно принято определять из рассмотрения расчетного теплого, холодного, а иногда и переходного периодов. Чаще всего за расчетный принимают расход воздуха для *теплого периода* года (как наиболее напряженный с точки зрения требуемых параметров приточного воздуха).

Рассмотренные особенности организации воздухообмена отнесены к *качественному* регулированию системы, когда расход воздуха остается неизменным, а меняется температура приточного воздуха. Подобное регулирование осуществляется в течение всего годового цикла эксплуатации системы.

С учетом энергосбережения более целесообразным представляется *количественное* регулирование, основанное на уменьшении воздухообмена. Возможность уменьшения расхода приточного воздуха возникает в годовом цикле по мере снижения холодильной нагрузки на систему при переходе от расчетного теплого периода к расчетному холодному.

Более подробно вопросы определения воздухообмена рассмотрены в [1] (рис.6.9; 6.10; формулы (6.19) - (6.26)).

#### **6.4. Нестационарный вентиляционный процесс**

Вентиляционный процесс ассимиляции газовых примесей в общем случае носит нестационарный характер, который обусловлен наличием *емкости – объема* помещения. Вскрытие характера нестационарности и времен-

ных характеристик процесса позволяет решать различные практические задачи. К числу их относится задача аварийной вентиляции. **Аварийная вентиляция** предназначена для ликвидации ситуации, когда помещение внезапно наполняется большим количеством вредных или взрывоопасных газов или паров. Одним из случаев аварийной вентиляции является противодымная вентиляция, которой оборудуются практически все здания.

Помимо задачи расчета аварийной вентиляции, анализ нестационарности вентиляционного процесса позволяет, например, подойти к решению задачи энергосберегающего способа регулирования систем вентиляции.

Постановка задачи нестационарного вентиляционного процесса основана на уравнении баланса газовой вредности в помещении в дифференциальной форме и соответствует **модели с сосредоточенными** параметрами. ([1], раздел 2.2.3; раздел 6.4, рис. 6.11; 6.12; формулы (6.19) -(6.26)).

## 7. Затраты энергии на обеспечение микроклимата в здании

Особенность систем обеспечения микроклимата состоит в том, что они расходуют большое количество **энергоресурсов**, в том числе тепловую и электрическую энергию и водопроводную воду.

Количественная оценка энергетической эффективности средств обеспечения микроклимата исходит из величины суммарного годового расхода энергии системами. **Годовой расход энергии** представляется наиболее объективным энергетическим показателем, так как именно в годовом цикле в полной мере проявляются все режимы потребления энергии.

В течение года происходит изменение тепловой нагрузки на системы отопления-охлаждения и вентиляции, которые обусловлены годовым ходом параметров наружной среды и сезонной сменой параметров микроклимата. Принципиально можно выделить **два вида** расхода энергии. Первый обусловлен стабилизацией температурных условий в помещении (расход энергии на отопление и охлаждение), второй – связан с термодинамической обработкой воздуха в установках вентиляции и кондиционирования.

### 7.1. Годовой расход энергии на отопление и охлаждение

**Годовой расход энергии на отопление-охлаждение** определяется интегрированием во времени суток и года соответствующих функций времени нагрузки на системы

$$Q^{\text{год}} = M \int_{\Delta\tau} Q_c d\tau \quad (7.1)$$

где:  $\Delta\tau$  – период потребления энергии, суток;

$M$  - продолжительность суточной работы системы с учетом числа рабочих дней в неделю, ч.

Подстановка в (7.1) величины нагрузки, средней за время суточной работы, позволяет упростить задачу, избежав рассмотрения внутрисуточного изменения нагрузки. В качестве примера на рис.7.1 показана функция изменения во времени года тепловой нагрузки на систему отопления-охлаждения.

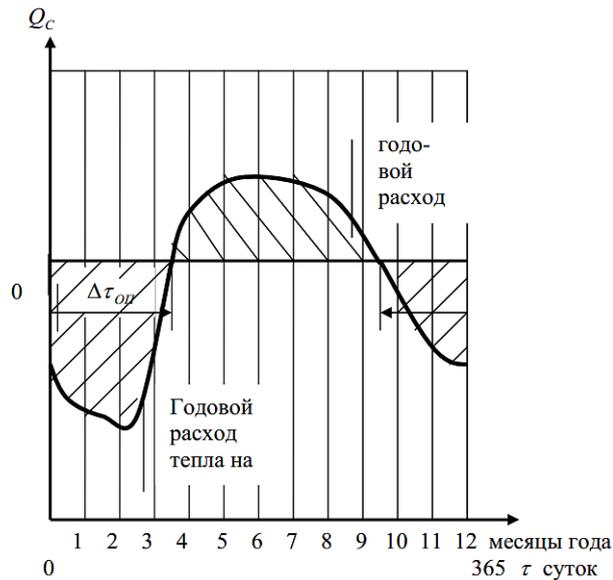


Рис.7.1. Пример годового изменения средней за время работы нагрузки на систему отопления-охлаждения

Дата начала и окончания **отопительного периода** соответствует точкам пересечения линии тепловой нагрузки с нулевой ординатой. При этом площадь, ограниченная кривой  $Q_c$  и лежащая ниже нулевой ординаты, соответствует годовому расходу тепла на отопление, а площадь под кривой выше нулевой линии – соответствует годовому расходу холода на охлаждение.

Следует иметь в виду, что расход холода включает как расход искусственного холода (для охлаждения помещения в наиболее жаркую часть года), так и возможность охлаждения помещения за счет «естественного холода» при относительно низкой температуре наружного воздуха, особенно в ночное время.

Как видно из приведенного примера, продолжительность отопительного и охладительного периодов зависит от характера изменения тепловой нагрузки и поэтому индивидуальна для каждого помещения. При централизованном теплоснабжении дата конца отопительного периода может быть

разной (при наличии индивидуального регулирования системы отопления), но дата начала отопительного сезона одна для всех зданий.

Нормативный отопительный период в нашей стране определяется как период с устойчивой среднесуточной температурой ниже +8 град. В справочных данных продолжительность отопительного периода и годовой расход тепла на отопление приводятся по средним многолетним климатологическим данным. В отдельные годы параметры отопительного периода не совпадают с средними многолетними. Так, в условиях Москвы отклонение числа градусо-суток отопительного периода от среднего достигает в отдельные годы от -26% до +20%.

Связь величины отклонения годового расхода от среднего с частотой отклонения устанавливается коэффициентом *обеспеченности годового расхода*  $K_{об}$ , учитывают *асинхронность* распределения обеспеченности в отдельные месяцы отопительного периода ([1], рис.7.2, линии 1,2).

## 7.2. Годовой расход энергии на вентиляцию

Вторая часть общего расхода энергии на обеспечение микроклимата связана с *тепловой обработкой приточного воздуха*. Из многообразия схем обработки воздуха, отметим общие принципы определения годового расхода энергии на нагрев и охлаждение наружного воздуха.

Исходным для определения границ режимов нагрева и охлаждения вентиляционного воздуха является поле параметров внутреннего воздуха «В», которое имеет вид четырехугольника и ограничено расчетными значениями температуры  $t_B$  и относительной влажности  $\phi_B$  для теплого и холодного периодов года.

На поле выделяют границы – *расчетного* сочетания параметров для теплого (летнего) периода «Л» и для холодного (зимнего) периодов года «З».

Помимо поля внутренних параметров, для анализа энергопотребления следует рассмотреть область параметров наружного воздуха «Н», которая представляет собой сочетание температуры  $t_H$  и относительной влажности  $\phi_H$  наружного воздуха (по наблюдениям в метеосети рассматриваемой местности).

На совмещенных полях внутренних «В» и наружных «Н» параметров воздуха можно получить полем требуемых параметров приточного воздуха «П» (по приведенным линиям *тепловлажностного отношения* в помещении  $\varepsilon_{П}$ ).

Положение линий постоянного теплосодержания, проходящих через вершины поля «П», и определяет *границы режимов* энергопотребления на

обработку наружного воздуха (см.рис.7.4) [1]) и области параметров наружного воздуха, соответствующие *режиму охлаждения*, (тепло и холод не потребляются) и *режиму нагрева* наружного воздуха.

В примере ([1], рис.7.5, формулы (7.2) - (7.3) приведен способ расчета и анализа характеристик годового хода теплосодержания наружного воздуха.

## Литература

1. Кувшинов Ю.Я., Павленко В.А., Ефремова Л.А., Чуваткин А.Н. «Теоретические основы создания микроклимата в помещении» (11.4.2.9) Москва 2009 г. – 131с.
2. Тихомиров К.В., Сергеенко Э.С. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 480 с.: ил. ISBN 5-274-00831-3
3. Гримитлин М.И. Распределение воздуха в помещениях. СПб., 1994.
4. Авдеева Т.П. Воздухораспределение динамически неустойчивыми потоками. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук СПбГАСУ. СПб., 2001.
5. Полосин И.И., Новосильцев Б.П., Шершнева В.Н. Теоретические основы создания микроклимата в помещении. Изд. ВГАСУ, Воронеж, 2005.
6. Рымкевич А.А. Системный анализ оптимизации общественной вентиляции и кондиционирования воздуха. М., Стройиздат, 1990.
7. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. Техническая библиотека НП «АВОК». М., Авок-пресс. 2002.
8. Савин В.К. Строительная физика. М., Лазурь, 2005.
9. Аксенов А.А., Гудзовский А.В. Программный комплекс Flow Vision для решения задач аэродинамики и тепломассопереноса методами численного моделирования. Сб. докладов III-го съезда АВОК. СПб, 1993.

### *Нормативные документы*

10. СП44.13330.2011 «Административные и бытовые здания. Актуализированная редакция СНиП 2.09.04-87»
11. СП50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003»
12. СП51.1333.2011 «Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003»
13. СП54.13330.2011 «Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003»
14. СП56.13330.2011 «Производственные здания. Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001»
15. СП60.13330.2012 «Отопление, вентиляция, кондиционирование. Актуализированная редакция СНиП 41 -01-2003»

- 16.СП131.13330.2012 «Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99»
- 17.СНиП II-3-79\* «Строительная теплотехника»
- 18.СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы»
- 19.СанПиН 2.1.6.1032-01 «Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест»
- 20.ГОСТ 23838-89 «Здания предприятий. Параметры»

*Вопросы для проверки знаний.*

**Глава 1.**

1. Что такое микроклимат помещения?
2. Какие факторы микроклимата являются наиболее существенными?
3. Что такое комфортная окружающая среда?
4. Какими параметрами оцениваются тепловые условия и состав воздуха в помещении?
5. Что такое оптимальные внутренние условия?
6. Назовите пассивные и активные факторы формирования микроклимата помещения.
7. Чем отличаются технологические требования к микроклимату от комфортнотехнологических?
8. Каковы особенности формирования микроклимата в зданиях в современных условиях?
9. Перечислите процессы формирования микроклимата помещения.
10. Что такое возмущающие и регулирующие воздействия на микроклимат помещения?

**Глава 2.**

1. Что такое моделирование процессов формирования микроклимата помещения?
2. Какие цели преследует моделирование процессов формирования микроклимата?
3. Назовите виды моделирования процессов формирования микроклимата.
4. Что такое математическая модель с распределенными параметрами?
5. Чем отличается математическая модель с распределенными параметрами от модели с частично распределенными параметрами?
6. Что такое точечная модель и почему она так называется?
7. Какие уравнения составляют математическую модель трехмерного распределения параметров микроклимата в помещении?
8. Что такое граничные и начальные условия математической модели?
9. Какими методами решается система уравнений математической модели с распределенными параметрами?

10. Какие основные упрощения принимают в математической модели с сосредоточенными параметрами?
11. В чем особенности двухзонной математической модели?
12. Для каких целей служат управляющие математические модели?
13. Какие виды физического моделирования используются при решении задач обеспечения микроклимата?
14. Назовите основные преимущества лабораторного физического моделирования.
15. Назовите условия однозначности процессов, протекающих на модели и в натуре.
16. В чем смысл свойства автомодельности процессов?
17. Что показывают масштабные соотношения при моделировании?
18. На чем основано аналоговое моделирование?
19. Назовите электрические аналоги тепловым величинам.
20. Что такое электроинтегратор и какие типы этих приборов используются при моделировании процессов в помещении?

### **Глава 3.**

1. Что такое метаболические процессы, протекающие в организме человека?
2. Как принято подразделять виды работы по степени тяжести?
3. В чем состоит принцип терморегуляции организма человека?
4. Сформулируйте особенности восприятия организмом человека лучистых потоков тепла.
5. В чем состоит физиологическое воздействие на организм человека влажности воздуха?
6. Какова роль подвижности воздуха в создании теплового комфорта в помещении?
7. Какие факторы определяют состояние воздушного комфорта в помещении?
8. Укажите основные причины нарушения воздушного комфорта.
9. Назовите наиболее распространенные вредные вещества, загрязняющие воздух промышленных помещений и характер их токсикологического действия.
10. Каким образом подразделяются запахи в помещении?
11. На чем базируется гигиеническое обоснование воздухообмена в помещении?
12. Какова санитарная норма наружного воздуха?

13. Какие ионы оказывают благотворное воздействие на организм человека?
14. Что такое радиационная температура и температура помещения?
15. Каким образом можно установить комфортное сочетание температуры помещения, воздуха и радиационной температуры?
16. В чем состоят основные положения метода О.Фангера оценки теплоощущения человеком?
17. Каковы технологические требования к микроклимату помещения, в котором находятся гигроскопические материалы?
18. Назовите примеры технологических процессов, на которые оказывает влияние микроклимат помещения.

#### **Глава 4.**

1. В каком виде проявляется взаимодействие здания и наружной среды?
2. Перечислите параметры наружного климата.
3. Что такое результирующая температура наружной среды?
4. Что учитывает условная эффективная температура наружной среды?
5. Что учитывают эквивалентная температура небосвода и радиационная температура наружной среды?
6. В чем состоит различие в передаче потоков из наружной среды в помещение различными видами ограждений?
7. В чем состоит воздействие ветра на микроклимат помещения?
8. Перечислите метеозлементы, наблюдаемые непосредственно в метеосети.
9. Из каких тепловых потоков складывается суммарная солнечная радиация?
10. В чем различие свойств прямой и диффузной солнечной радиации?
11. Что такое профильный угол, какие величины его определяют?
12. Опишите закономерности суточного изменения отдельных параметров наружного климата.
13. Для чего предназначены расчетные параметры наружного климата?
14. Каким образом определено расчетное значение наружной температуры в холодный период года? 15. Какой подход принят в действующих нормах при выборе расчетных параметров наружного воздуха в теплый период года?

15. Что показывает коэффициент обеспеченности?
16. Что такое  $t - \phi$  диаграмма?
17. Какие задачи ставятся при рассмотрении эксплуатационных климатических условий?
18. Охарактеризуйте два способа представления годового изменения параметров наружного климата.
19. Опишите закономерности годового изменения параметров наружного климата по средним многолетним данным.

## **Глава 5.**

1. Чему соответствует знак у величины тепловой нагрузки на систему отопления/охлаждения?
2. В чем особенности теплопередачи через массивные и немассивные лучепрозрачные наружные ограждения?
3. Как оцениваются суточные колебания трансмиссионного теплового потока через наружные ограждения и их влияние на величину тепловой нагрузки?
4. Приведите формулы для расчета трансмиссионного и инфильтрационного тепловых потоков.
5. Какие природные силы являются причиной возникновения разности давления воздуха снаружи и внутри здания?
6. Назовите методы построения эпюр разности давления снаружи и внутри здания.
7. Какие зоны движения возникают вокруг здания при его обтекании потоком воздуха?
8. Что показывает аэродинамический коэффициент?
9. Выведите формулу перепада давления на фасадах здания в простейшем случае сбалансированного притока и вытяжки.
10. Приведите формулу для расчета расхода фильтрующегося воздуха, используемую в инженерных методах расчета.
11. В чем особенность инсоляции помещения, называемая парниковым эффектом?
12. Какому закону подчиняется проникание лучистого потока тепла через остекление?
13. В чем состоит различие в проникании через остекление тепла прямой и диффузной солнечной радиации?
14. Что показывают коэффициенты проникания, затенения и солнцезащиты для прямой и диффузной солнечной радиации?

## **Глава 6.**

1. Что называется струей?
2. Приведите классификацию вентиляционных струй в помещении.
3. Назовите основные характеристики свободной осесимметричной изотермической струи.
4. При каких условиях истечения струя становится плоской, конической?
5. Что называют воздушным фонтаном?
6. Из каких предпосылок исходят при рассмотрении закономерностей турбулентных струй?
7. По какому закону изменяется скорость воздуха в поперечном сечении струи?
8. По какому закону изменяются осевые значения скорости и температуры воздуха?
9. Для чего используют аэродинамическую (кинематическую)  $M$  и тепловую  $N$  характеристики струи?
10. В каких условиях формируются конвективные струи?
11. Каковы закономерности движения воздуха около вытяжных отверстий?
12. Для чего нужен воздухообмен в помещении?
13. Что понимается под вентиляционным процессом?
14. Какими способами определяют параметры уходящего воздуха в помещении?
15. Что такое тепловая напряженность помещения?
16. Какой способ организации воздухообмена является наиболее эффективным?
17. Какие величины составляют балансовые уравнения вредностей в помещении?
18. Как определяется расчетный воздухообмен из условия ассимиляции вредностей?
19. Что понимается под однонаправленными вредностями?
20. Что показывает кратность воздухообмена в помещении?
21. Какие ограничения накладываются на температуру и скорость приточного воздуха и почему?
22. В чем принцип действия аварийной вентиляции?
23. По какому закону происходит изменение концентрации вредности в воздухе помещения при работе и бездействии вентиляции?
24. В чем принцип действия периодической или прерывистой вентиляции?
25. Как определить время проветривания помещения?

## Глава 7.

1. Какой показатель служит для объективной оценки энергетической эффективности средств обеспечения микроклимата?
2. Из каких частей состоит годовой расход энергии на обеспечение микроклимата?
3. Как определяется продолжительность отопительного и охлаждающего периодов и годовой расход тепла или холода?
4. С каким фактором связано понятие распределенности годового расхода тепла на отопление в отдельные годы?
5. Как определить годовой расход тепла на отопление с учетом обеспеченности?
6. Каким образом определяются зоны энергопотребления на обработку вентиляционного воздуха?
7. Какие величины теплосодержания воздуха, определяющие зоны потребления холода и тепла на обработку вентиляционного воздуха?
8. Чем характерен переходный период энергопотребления системами обеспечения микроклимата?
9. Как определяется годовой расход тепла и холода на обработку воздуха?

## **Приложения**

ГОСТ 30494-96 «ЗДАНИЯ ЖИЛЫЕ И ОБЩЕСТВЕННЫЕ»  
Параметры микроклимата в помещениях.

ГОСТ 30494-96

Группа Ж24

**МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ  
ЗДАНИЯ ЖИЛЫЕ И ОБЩЕСТВЕННЫЕ.  
ПАРАМЕТРЫ МИКРОКЛИМАТА В ПОМЕЩЕНИЯХ**

**Residential and public buildings.  
Microclimate parameters for indoor enclosures**

ОКС 13.040.10  
ОКСТУ 2030

Дата введения 1999-03-01

**Предисловие**

1. РАЗРАБОТАН Государственным проектно-конструкторским и научно-исследовательским институтом СантехНИИпроект (ГПКНИИ СантехНИИпроект), Научно-исследовательским институтом строительной физики (НИИстройфизики), Центральным научно-исследовательским и экспериментальным проектным институтом жилища (ЦНИИЭПжилища), Центральным научно-исследовательским и экспериментальным проектным институтом учебных зданий (ЦНИИЭП учебных зданий), Научно-исследовательским институтом экологии человека и гигиены окружающей среды им. Сысина, Ассоциацией инженеров по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике (АВОК)

ВНЕСЕН Госстроем России

2 ПРИНЯТ Межгосударственной Научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС) 11 декабря 1996 г.

За принятие проголосовали:

| Наименование государства   | Наименование органа государственного управления строительством                                     |
|----------------------------|--|
| Азербайджанская Республика | Госстрой Азербайджанской Республики  |
| Республика Армения         | Министерство градостроительства Республики Армения   |
| Республика Беларусь        | Минстройархитектуры Республики Беларусь  |
| Грузия                     | Министерство урбанизации и строительства Грузии  |
| Республика Казахстан       | Агентство строительства и архитектурно-строительного контроля Министерства экономики и торговли    |
| Кыргызская Республика      | Минархстрой Кыргызской Республики  |
| Республика Молдова         | Министерство территориального развития, строительства и коммунального хозяйства Республики Молдова |

|                        |   |
|------------------------|---|
| Российская Федерация   | Госстрой России                           |
| Республика Таджикистан | Госстрой Республики Таджикистан           |
| Республика Узбекистан  | Госкомархитектстрой Республики Узбекистан |

### 3. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

4 ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ с 1 марта 1999 г. постановлением Госстроя России от 6 января 1999 г. N 1

#### *1 Область применения*

Настоящий стандарт устанавливает параметры микроклимата обслуживаемой зоны помещений жилых, общественных, административных и бытовых зданий. Стандарт устанавливает общие требования к оптимальным и допустимым показателям микроклимата и методы контроля.

Стандарт не распространяется на показатели микроклимата рабочей зоны производственных помещений.

Требования, изложенные в разделах 3 и 4 в части допустимых параметров микроклимата (кроме локальной асимметрии результирующей температуры), являются обязательными.

#### *2 Определения, классификация помещений*

##### Определения

В настоящем стандарте применяют следующие термины и определения

Обслуживаемая зона помещения (зона обитания) - пространство в помещении, ограниченное плоскостями, параллельными полу и стенам: на высоте 0,1 и 2,0 м над уровнем пола (но не ближе чем 1 м от потолка при потолочном отоплении), на расстоянии 0,5 м от внутренних поверхностей наружных и внутренних стен, окон и отопительных приборов.

Помещение с постоянным пребыванием людей - помещение, в котором люди находятся не менее 2 ч непрерывно или 6 ч суммарно в течение суток.

Микроклимат помещения - состояние внутренней среды помещения, оказывающее воздействие на человека, характеризуемое показателями температуры воздуха и ограждающих конструкций, влажностью и подвижностью воздуха.

Оптимальные параметры микроклимата - сочетание значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают нормальное тепловое состояние организма при минимальном напряжении механизмов терморегуляции и ощущение комфорта не менее чем у 80 % людей, находящихся в помещении.

Допустимые параметры микроклимата - сочетания значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать общее и локальное ощущение дискомфорта, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности при усиленном напряжении механизмов терморегуляции и не вызывают повреждений или ухудшения состояния здоровья.

Холодный период года - период года, характеризующийся среднесуточной температурой наружного воздуха, равной 8 °С и ниже.

Теплый период года - период года, характеризующийся среднесуточной температурой наружного воздуха выше 8 °С.

Радиационная температура помещения - осредненная по площади температура внутренних поверхностей ограждений помещения и отопительных приборов.

Результирующая температура помещения - комплексный показатель радиационной температуры помещения и температуры воздуха помещения, определяемый по приложению А.

Температура шарового термометра - температура в центре тонкостенной поллой сферы, характеризующая совместное влияние температуры воздуха, радиационной температуры и скорости движения воздуха.

Локальная асимметрия результирующей температуры - разность результирующих температур в точке помещения, определенных шаровым термометром для двух противоположных направлений.

Скорость движения воздуха - осредненная по объему обслуживаемой зоны скорость движения воздуха.

### *Классификация помещений*

Помещения 1 категории - помещения, в которых люди в положении лежа или сидя находятся в состоянии покоя и отдыха.

Помещения 2 категории - помещения, в которых люди заняты умственным трудом, учебой.

Помещения 3а категории - помещения с массовым пребыванием людей, в которых люди находятся преимущественно в положении сидя без уличной одежды.

Помещения 3б категории - помещения с массовым пребыванием людей, в которых люди находятся преимущественно в положении сидя в уличной одежде.

Помещения 3в категории - помещения с массовым пребыванием людей, в которых люди находятся преимущественно в положении стоя без уличной одежды.

Помещения 4 категории - помещения для занятий подвижными видами спорта.

Помещения 5 категории - помещения, в которых люди находятся в полураздетом виде (раздевалки, процедурные кабинеты, кабинеты врачей и т. п.).

Помещения 6 категории - помещения с временным пребыванием людей (вестибюли, гардеробные, коридоры, лестницы, санузлы, курительные, кладовые).

### *3 Параметры микроклимата*

3.1 В помещениях жилых и общественных зданий следует обеспечивать оптимальные или допустимые нормы микроклимата в обслуживаемой зоне.

3.2 Требуемые параметры микроклимата: оптимальные, допустимые или их сочетания - следует устанавливать в нормативных документах в зависимости от назначения помещения и периода года.

3.3 Параметры, характеризующие микроклимат помещений:

температура воздуха;

скорость движения воздуха;

относительная влажность воздуха;

результирующая температура помещения;

локальная асимметрия результирующей температуры.

3.4 Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в обслуживаемой зоне помещений (в установленных расчетных параметрах наружного воздуха) должны соответствовать значениям, приведенным в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1**

*Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в обслуживаемой зоне помещений жилых зданий и общежитий*

| Период года | Наименование помещения   | Температура воздуха, °С |                  | Результирующая температура, °С |                  | Относительная влажность, % |                      | Скорость движения воздуха, м/с |                      |
|-------------|--|-------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|
|             |  | оптимальная             | допустимая       | оптимальная                    | допустимая       | оптимальная                | допустимая, не более | оптимальная, не более          | допустимая, не более |
| Холодный    | Жилая комната  | 20-22                   | 18-24<br>(20-24) | 19-20                          | 17-23<br>(19-23) | 45-30                      | 60                   | 0,15                           | 0,2                  |
|             | То же, в районах с температурой наиболее холодной пятидневки (обеспеченностью 0,92) минус 31 °С и ниже | 21-23                   | 20-24<br>(22-24) | 20-22                          | 19-23<br>(21-23) | 45-30                      | 60                   | 0,15                           | 0,2                  |
|             | Кухня  | 19-21                   | 18-26            | 18-20                          | 17-25            | НН*                        | НН                   | 0,15                           | 0,2                  |
|             | Туалет   | 19-21                   | 18-26            | 18-20                          | 17-25            | НН                         | НН                   | 0,15                           | 0,2                  |
|             | Ванная, совмещенный санузел  | 24-26                   | 18-26            | 23-27                          | 17-26            | НН                         | НН                   | 0,15                           | 0,2                  |
|             | Помещения для отдыха и учебных занятий   | 20-22                   | 18-24            | 19-21                          | 17-23            | 45-30                      | 60                   | 0,15                           | 0,2                  |
|             | Межквартирный коридор  | 18-20                   | 16-22            | 17-19                          | 15-21            | 45-30                      | 60                   | 0,15                           | 0,2                  |
|             | Вестибюль, лестничная клетка   | 16-18                   | 14-20            | 15-17                          | 13-19            | НН                         | НН                   | 0,2                            | 0,3                  |
|             | Кладовые   | 16-18                   | 12-22            | 15-17                          | 11-21            | НН                         | НН                   | НН                             | НН                   |
| Теплый      | Жилая комната  | 22-25                   | 20-28            | 22-24                          | 18-27            | 60-30                      | 65                   | 0,2                            | 0,3                  |

\* НН - не нормируется

Примечание - Значения в скобках относятся к домам для престарелых и инвалидов

Таблица 2

Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в обслуживаемой зоне общественных зданий

| Период года | Наименование помещения или категория     | Температура воздуха, °С |            | Результирующая температура, °С |            | Относительная влажность, % |                      | Скорость движения воздуха, м/с |                      |
|-------------|--|-------------------------|------------|--------------------------------|------------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|
|             |  | оптимальная             | допустимая | оптимальная                    | допустимая | оптимальная                | допустимая, не более | оптимальная, не более          | допустимая, не более |
| Холодный    | 1 категория                              | 20-22                   | 18-24      | 19-20                          | 17-23      | 45-30                      | 60                   | 0,2                            | 0,3                  |
|             | 2 "                                      | 19-21                   | 18-23      | 18-20                          | 17-22      | 45-30                      | 60                   | 0,2                            | 0,3                  |
|             | 3а "                                     | 20-21                   | 19-23      | 19-20                          | 19-22      | 45-30                      | 60                   | 0,2                            | 0,3                  |
|             | 3б "                                     | 14-16                   | 12-17      | 13-15                          | 13-16      | 45-30                      | 60                   | 0,2                            | 0,3                  |
|             | 3в "                                     | 18-20                   | 16-22      | 17-20                          | 15-21      | 45-30                      | 60                   | 0,2                            | 0,3                  |
|             | 4 "                                      | 17-19                   | 15-21      | 16-18                          | 14-20      | 45-30                      | 60                   | 0,2                            | 0,3                  |
|             | 5 "                                      | 20-22                   | 20-24      | 19-21                          | 19-23      | 45-30                      | 60                   | 0,15                           | 0,2                  |
|             | 6 "                                      | 16-18                   | 14-20      | 15-17                          | 13-19      | НН*                        | НН                   | НН                             | НН                   |
|             | Ванные, душевые                          | 24-26                   | 18-28      | 23-25                          | 17-27      | НН                         | НН                   | 0,15                           | 0,2                  |
|             | Детские дошкольные учреждения            |                         |            |                                |            |                            |                      |                                |                      |
|             | Групповая раздевальная и туалет:         |                         |            |                                |            |                            |                      |                                |                      |
|             | для ясельных и младших групп             | 21-23                   | 20-24      | 20-22                          | 19-23      | 45-30                      | 60                   | 0,1                            | 0,15                 |
|             | для средних и дошкольных групп           | 19-21                   | 18-25      | 18-20                          | 17-24      | 45-30                      | 60                   | 0,1                            | 0,15                 |
|             | Спальня:                                 |                         |            |                                |            |                            |                      |                                |                      |
|             | для ясельных и младших групп             | 20-22                   | 19-23      | 19-21                          | 18-22      | 45-30                      | 60                   | 0,1                            | 0,15                 |
|             | для средних и дошкольных групп           | 19-21                   | 18-23      | 18-22                          | 17-22      | 45-30                      | 60                   | 0,1                            | 0,15                 |
| Теплый      | Помещения с постоянным пребыванием людей | 23-25                   | 18-28      | 22-24                          | 19-27      | 60-30                      | 65                   | 0,3                            | 0,5                  |

\* НН - не нормируется

Примечание - Для детских дошкольных учреждений, расположенных в районах с температурой наиболее холодной пятидневки (обеспеченностью 0,92) минус 31 °С и ниже, допустимую расчетную температуру воздуха в помещении следует принимать на 1 °С выше указанной в таблице

Локальная асимметрия результирующей температуры должна быть не более 2,5 °С для оптимальных и не более 3,5 °С для допустимых показателей.

3.5 При обеспечении показателей микроклимата в различных точках обслуживаемой зоны допускается:

- перепад температуры воздуха не более 2 °С для оптимальных показателей и 3 °С - для допустимых;

- перепад результирующей температуры помещения по высоте обслуживаемой зоны - не более 2 °С;

- изменение скорости движения воздуха - не более 0,07 м/с для оптимальных показателей и 0,1 м/с - для допустимых;

- изменение относительной влажности воздуха - не более 7 % для оптимальных показателей и 15 % - для допустимых.

3.6 В общественных зданиях в нерабочее время допускается снижать показатели микроклимата при условии обеспечения требуемых параметров к началу рабочего времени.

#### **4 Методы контроля**

4.1 Измерение показателей микроклимата в холодный период года следует выполнять при температуре наружного воздуха не выше минус 5 °С. Не допускается проведение измерений при безоблачном небе в светлое время суток.

4.2 Для теплого периода года измерение показателей микроклимата следует выполнять при температуре наружного воздуха не ниже 15 °С. Не допускается проведение измерений при безоблачном небе в светлое время суток.

4.3 Измерение температуры, влажности и скорости движения воздуха следует проводить в обслуживаемой зоне на высоте:

- 0,1; 0,4 и 1,7 м от поверхности пола для детских дошкольных учреждений;

- 0,1; 0,6 и 1,7 м от поверхности пола при пребывании людей в помещении преимущественно в сидячем положении;

- 0,1; 1,1 и 1,7 м от поверхности пола в помещениях, где люди преимущественно стоят или ходят;

- в центре обслуживаемой зоны и на расстоянии 0,5 м от внутренней поверхности наружных стен и стационарных отопительных приборов в помещениях, указанных в таблице 3.

## Места проведения измерений

| Вид зданий  | Выбор помещения  | Место измерений   |
|---|--|---|
| Одноквартирные  | Не менее чем в двух комнатах площадью более 5 м <sup>2</sup> каждая, имеющая две наружные стены или комнаты с большими окнами, площадь которых составляет 30 % и более площади наружных стен | В центре плоскостей, отстоящих от внутренней поверхности наружной стены и отопительного прибора на 0,5 м и в центре помещения (точке пересечения диагональных линий помещения) на высоте, указанной в 4.3 |
| Многоквартирные                                       | Не менее чем в двух комнатах площадью более 5 м <sup>2</sup> каждая в квартирах на первом и последнем этажах   |   |
| Гостиницы, отели, больницы, детские учреждения, школы | В одной угловой комнате 1-го или последнего этажа  |   |
| Другие общественные и административно-бытовые         | В каждом представительном помещении  | То же, в помещениях площадью 100 м <sup>2</sup> и более измерения осуществляются на участках, размеры которых регламентированы в 4.3  |

В помещениях площадью более 100 м<sup>2</sup> измерение температуры, влажности и скорости движения воздуха следует проводить на равновеликих участках, площадь которых должна быть не более 100 м<sup>2</sup>.

4.4 Температуру внутренней поверхности стен, перегородок, пола, потолка следует измерять в центре соответствующей поверхности.

Для наружных стен со светопроемами и отопительными приборами температуру на внутренней поверхности следует измерять в центрах участков, образованных линиями, продолжающими грани откосов светопроема, а также в центре остекления и отопительного прибора.

4.5 Результирующую температуру помещения следует вычислять по формулам, указанным в приложении А. Измерения температуры воздуха проводят в центре помещения на высоте 0,6 м от поверхности пола для помещений с пребыванием людей в положении сидя и на высоте 1,1 м в помещениях с пребыванием людей в положении стоя либо по температурам окружающих поверхностей ограждений (приложение А), либо по данным измерений шаровым термометром (приложение Б).

4.6 Локальную асимметрию результирующей температуры следует вычислять для точек, указанных в 4.5, по формуле

$$t_{asu} = t_{su1} - t_{su2} \quad (1)$$

где  $t_{su1}$  и  $t_{su2}$  – температуры, °С, измеренные в двух противоположных направлениях шаровым термометром (приложение Б).

4.7 Относительную влажность в помещении следует измерять в центре помещения на высоте 1,1 м от пола.

4.8 При ручной регистрации показателей микроклимата следует выполнять не менее трех измерений с интервалом не менее 5 мин, при автоматической регистрации - следует проводить измерения в течение 2 ч. При сравнении с нормативными показателями принимают среднее значение измеренных величин.

Измерение результирующей температуры следует начинать через 20 мин после установки шарового термометра в точке измерения.

4.9 Показатели микроклимата в помещениях следует измерять приборами, прошедшими регистрацию и имеющими соответствующий сертификат.

Диапазон измерения и допустимая погрешность измерительных приборов должны соответствовать требованиям таблицы 4.

**Таблица 4**

*Требования к измерительным приборам*

| Наименование показателя                           | Диапазон измерений | Предельное отклонение |
|---|--------------------|-----------------------|
| Температура внутреннего воздуха, °С               | От 5 до 40         | 0,1                   |
| Температура внутренней поверхности ограждений, °С | " 0 " 50           | 0,1                   |
| Температура поверхности отопительного прибора, °С | " 5 " 90           | 0,1                   |
| Результирующая температура помещения, °С          | " 5 " 40           | 0,1                   |
| Относительная влажность воздуха, %                | " 10 " 90          | 5,0                   |
| Скорость движения воздуха, м/с                    | " 0,05 " 0,6       | 0,05                  |

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**(обязательное)**

*Расчет результирующей температуры помещения*

Результирующую температуру помещения  $t_{su2}$  при скорости движения воздуха до 0,2 м/с следует определять по формуле

$$t_{su} = \frac{t_p + t_\gamma}{2} \quad (A.1)$$

где  $t_p$ - температура воздуха в помещении, °С;

$t_\gamma$ - радиационная температура помещения, °С.

Результирующую температуру помещения следует принимать при скорости движения воздуха до 0,2 м/с равной температуре шарового термометра при диаметре сферы 150 мм.

При скорости движения воздуха от 0,2 до 0,6 м/с  $t_{su}$  следует определять по формуле

$$t_{su} = 0,6t_p + 0,4t_\gamma \quad (A.2)$$

Радиационную температуру  $t_\gamma$  следует вычислять по температуре шарового термометра по формуле

$$t_\gamma = t_b + m \sqrt{V(t_d - t_p)} \quad (A.3)$$

где  $t_d$ - температура по шаровому термометру, °С;

$m$  - константа, равная 2,2 при диаметре сферы до 150 мм либо определяемая по приложению Б;

$V$ - скорость движения воздуха, м/с.

по температурам внутренних поверхностей ограждений и отопительных приборов

$$t_\gamma = \frac{\sum (A_i t_i)}{\sum A_i} \quad (A.4)$$

где  $A_i$ - площадь внутренней поверхности ограждений и отопительных приборов, м<sup>2</sup>;

$t_i$ - температура внутренней поверхности ограждений и отопительных приборов, °С.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Б** **(справочное)**

### *Устройство шарового термометра*

Шаровой термометр для определения результирующей температуры представляет собой зачерненную снаружи (степень черноты поверхности не ниже 0,95) полую сферу, изготовленную из меди или другого теплопроводного материала, внутри которой помещен либо стеклянный термометр, либо термоэлектрический преобразователь.

Шаровой термометр для определения локальной асимметрии результирующей температуры представляет собой полую сферу, у которой одна половина шара имеет зеркальную поверхность (степень черноты поверхности не выше 0,05), а другая - зачерненную поверхность (степень черноты поверхности не ниже 0,95).

Измеряемая в центре шара температура шарового термометра является равновесной температурой от радиационного и конвективного теплообмена между шаром и окружающей средой.

Рекомендуемый диаметр сферы 150 мм. Толщина стенок сферы минимальная, например из меди - 0,4 мм. Зеркальную поверхность образуют гальваническим методом путем нанесения хромового покрытия. Допускаются наклеивание полированной фольги и другие способы. Диапазон измерений от 10 до 50 °С. Время нахождения шарового термометра в точке замера перед измерением не менее 20 мин. Точность измерений при температуре от 10 до 50 °С - 0,1 °С.

При использовании сферы другого диаметра константу  $m$  следует определять по формуле

$$m = 2,2(0,15/d)^{0,4} \quad (\text{Б.1})$$

где  $d$  - диаметр сферы, м.