

УЧЕБНИК XXI ВЕК

Ю.Я. Кувшинов О.Д. Самарин

# ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЙ



Б  
А  
К  
А  
Л  
А  
В  
Р



**Ю.Я. Кувшинов, О.Д. Самарин**

# **ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЙ**

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ  
по образованию в области строительства в качестве учебника для студентов,  
обучающихся по программе бакалавриата по направлению 270800  
«Строительство» (профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция»)



Издательство Ассоциации строительных вузов  
Москва  
2012

**УДК 697.1**  
**ББК 31.3**  
**С 17**

**Рецензенты:**

д.т.н., профессор, зав. кафедрой ОиВ ННГАСУ *В.И. Бодров*;  
д.т.н., профессор, член-корр. РААСН, зав. лабораторией строительной теплофизики НИИСФ РААСН *В.Г. Гагарин*.

**Кувшинов Ю.Я., Самарин О.Д.**

Основы обеспечения микроклимата зданий: Учеб. для вузов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2012. – 200 с.

**ISBN 978-5-93093-883-8**

В книге рассмотрены основные понятия, касающиеся формирования внутреннего микроклимата помещений и принципов его обеспечения с помощью инженерных систем. Приведены способы оценки комфортности микроклимата и правила выбора его допустимых и оптимальных параметров. Изложены принципы определения тепловой мощности систем отопления-охлаждения, а также структура теплового баланса помещения и методы расчета его составляющих для определения производительности систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Представлены основные процессы воздействия наружной среды на микроклимат зданий и показаны правила выбора расчетных параметров наружного климата. Рассмотрены процессы изменения состояния влажного воздуха в помещении и его обработки в системах обеспечения микроклимата, а также потоки воздуха в помещении у приточных и вытяжных отверстий и неизотермических поверхностей. Приведены методы оценки годового потребления энергии системами отопления-охлаждения и вентиляции и примеры расчета теплопотерь, теплопоступлений и воздухообмена в помещении.

Разделы 1.1, 1.4, 2.1, 2.6, 3.1 написаны Ю.Я. Кувшиновым, 1.2, 1.3, 1.5–1.8, 2.2, 2.3, 2.7, 3.5, 3.6, 3.9 и глава 4 – совместно Ю.Я. Кувшиновым и О.Д. Самариным, разделы 2.4, 2.5, 3.2–3.4, 3.7, 3.8 и глава 5 – О.Д. Самариным.

**УДК 697.1**  
**ББК 31.3**

**ISBN 978-5-93093-883-8**

© Кувшинов Ю.Я., Самарин О.Д., 2012  
© Издательство АСВ, 2012

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	5
<b>1. Параметры микроклимата помещения и наружного климата</b> .....	6
1.1. Параметры микроклимата, тепловой баланс и терморегуляция организма человека .....	7
1.2. Комфортные и пограничные температурные условия в помещении .....	14
1.3. Влажность и подвижность воздуха, физиологическое влияние, комфортные значения .....	21
1.4. Понятие воздушного комфорта .....	26
1.5. Нормирование параметров микроклимата. Технологические требования к параметрам микроклимата .....	29
1.6. Параметры наружного климата, измерения и расчеты параметров .....	32
1.7. Нормирование параметров наружного климата, понятие их обеспеченности .....	39
1.8. Закономерности суточного и годового изменения параметров наружного климата .....	45
Вопросы для самопроверки .....	52
<b>2. Тепловая нагрузка на системы отопления-охлаждения и определение воздухообмена в помещении</b> .....	55
2.1. Принципы определения тепловой мощности систем отопления-охлаждения .....	55
2.2. Составляющие тепловой нагрузки на системы отопления и охлаждения .....	56
2.3. Теплопоступления от солнечной радиации через светопрозрачные ограждения .....	69
2.4. Теплопоступления от источников искусственного освещения и других источников .....	76
2.5. Простейшие процессы изменения состояния влажного воздуха в <i>I-d</i> -диаграмме .....	80
2.6. Принципы определения требуемого воздухообмена в помещении, оценка распределения параметров в помещении .....	87
2.7. Балансы вредностей в помещении, определение воздухообмена по теплоизбыткам и влаге, по газовым выделениям и по кратности, санитарная норма воздуха .....	91

Вопросы для самопроверки .....	98
<b>3. Процессы формирования и обеспечения микроклимата помещения .....</b>	<b>100</b>
3.1. Воздействие наружной среды на здание .....	100
3.2. Процессы изменения состояния влажного воздуха при вентиляции помещений .....	107
3.3. Процессы изменения состояния воздуха при его кондиционировании (прямоточная схема) .....	113
3.4. Процессы изменения состояния воздуха при его кондиционировании (схемы с рециркуляцией и теплоутилизацией) .....	121
3.5. Струйные течения в помещении .....	126
3.6. Движение воздуха около вытяжных отверстий .....	136
3.7. Основные способы воздухообмена и их сравнение .....	138
3.8. Инженерный метод расчета воздухообмена в помещении .....	140
3.9. Моделирование процессов формирования микроклимата .....	142
Вопросы для самопроверки .....	154
<b>4. Энергопотребление и энергосбережение при обеспечении микроклимата .....</b>	<b>156</b>
4.1. Годовой расход энергии на отопление и охлаждение .....	157
4.2. Годовой расход энергии на вентиляцию .....	160
Вопросы для самопроверки .....	166
<b>5. Приложения .....</b>	<b>168</b>
5.1. Примеры расчета теплопотерь через ограждения для некоторых помещений .....	168
5.2. Методика расчета теплопотерь на нагрев инфильтрующегося наружного воздуха .....	172
5.3. Пример расчета инфильтрационных теплопотерь .....	177
5.4. Пример расчета поступлений теплоты, влаги и углекислого газа в помещение общественного здания ....	181
5.5. Пример расчета воздухообмена по избыткам явной и полной теплоты и влаги .....	188
5.6. Допустимые и оптимальные параметры микроклимата в помещениях жилых и общественных зданий по ГОСТ 30494-96* .....	192
<b>Список литературы .....</b>	<b>196</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Учебник по дисциплине «Основы обеспечения микроклимата зданий» предназначен для подготовки бакалавров по направлению 270800 «Строительство» (профиль «Теплогасоснабжение и вентиляция»). Содержание учебника соответствует рабочей программе дисциплины и в значительной мере ориентировано на курс лекций, читаемый в ФГБОУ ВПО «МГСУ».

Известно, что теоретические основы специальности составляет комплекс фундаментальных теоретических и прикладных дисциплин, таких, как «Математика», «Физика», «Информатика», «Механика жидкости и газа», «Техническая термодинамика», «Тепломасообмен» и др. Эти дисциплины в разной степени детализации и разным объеме изучаются студентами.

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 теплоты, 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 XX в. 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.

# 1. Параметры микроклимата помещения и наружного климата

**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 ощутимое 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%) было бы ими недовольно.

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.

### 1.1. Параметры микроклимата, тепловой баланс и терморегуляция организма человека

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

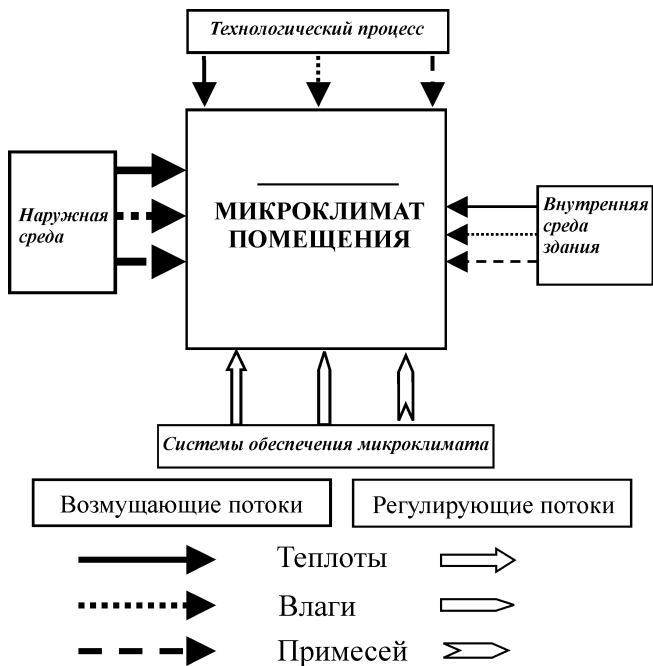


Рис. 1.1. Структурная схема формирования микроклимата

*Наружная среда* оказывает влияние на тепловые параметры микроклимата опосредованно через ограждающие конструкции (тепло-влажнопередача 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 помещение 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. Ранее 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, в частности, за счет усиления их теплозащиты. Усиление теплозащиты прямо сказывается на улучшении 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 нем.

Микроклимат помещения характеризуется комплексом параметров, определяющих тепловое состояние помещения и газовый состав воздуха в нем. 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 теплоты, 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 теплоты, 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 имеют дело с тепловым, влажностным, воздушным и газовым режимами 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 теплоты 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 теплоты* (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 асимметричный, характер, что приводит к неравномерному нагреву отдельных поверхностей. Нагретые поверхности передают за счет естественного конвективного теплообмена теплоту воздуху помещения. Если температура воздуха выше температуры поверхности, конвективный теплообмен имеет другое направление. Так как поверхности ограждений обладают тепловой инерцией, теплообмен протекает в нестационар-

ном режиме. Подвижность воздуха несколько интенсифицирует естественный теплообмен на поверхностях.

Конвективная теплота 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.

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 (рис. 1.2).

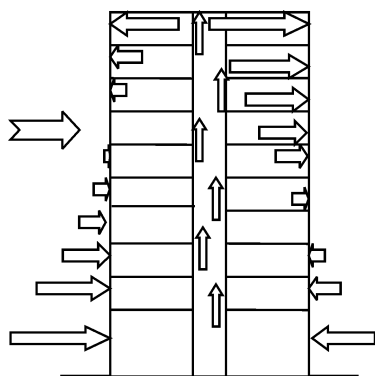


Рис. 1.2. Схема вертикального перемещения потоков воздуха в здании

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.

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) (рис. 1.3). 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.

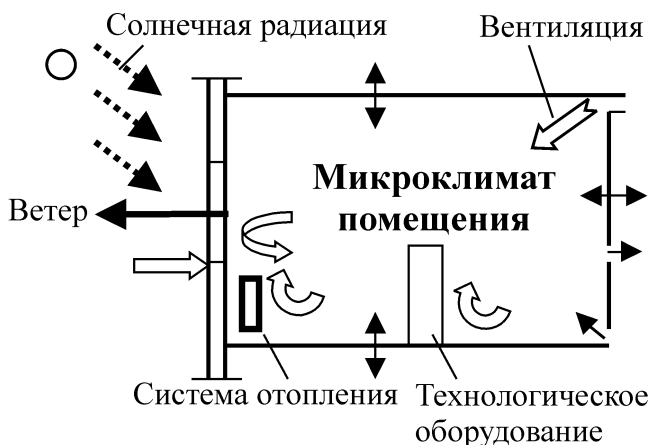


Рис. 1.3. Перемещение потоков в помещении

*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.

Протекающие в организме человека процессы поглощения, превращения, хранения и выделения продуктов жизнедеятельности принято называть *метаболическими процессами*. Сопутствующий круговорот энергии состоит в окислении питательных веществ, об-

мене веществ теплопродукции и механической работе мышц, причем 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, при выполнении физической работы эта цифра возрастает почти до 180 л/ч. Выделяющееся при сгорании 15 л/ч кислорода (в состоянии покоя) количество теплоты составляет 88 Вт и может достигать 1060 Вт.

Рассчитанная по количеству потребляемого кислорода *метаболическая* тепловая энергия  $M$ , Вт/м<sup>2</sup>, выражается формулой

$$M = 5,8 \cdot \bar{V} \frac{V_{O_2}}{F_d}, \quad (1.1)$$

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

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

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

$F_d$  – площадь поверхности организма человека (по Дюбуа), м<sup>2</sup>:

$$F_d = 0,203 G^{0,425} L^{0,725}, \quad (1.2)$$

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

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

а) *легкая* (обычно сидячая или стоячая, но не связанная с переносом тяжестей более 1 кг), в ходе которой потребление кислорода не более чем в 2 раза превышает его потребление в состоянии покоя, т.е. меньше 30 л/ч; энергозатраты при этом составляют менее 175 Вт;

б) *средней тяжести*, в ходе которой потребление кислорода в 2–4 раза больше, чем в состоянии покоя; такая деятельность соот-

ветствует энергозатратам, достигающим 300 Вт, к ней относят рукоделие и механизированный труд, связанный с переносом тяжестей до 10 кг;

в) *тяжелая*, в ходе которой потребление кислорода в 4–8 раз больше, чем в состоянии покоя; такая деятельность соответствует энергозатратам, превышающим 300 Вт (до 700 Вт), к ней относят большинство профессий, требующих больших физических усилий.

В результате обменных процессов только часть вырабатываемой энергии превращается в механическую. По некоторым данным, коэффициент полезного использования энергии  $\eta = 20\%$ . По П.О. Фангеру, эту значение следует рассматривать как максимально возможное. Малая часть метаболической теплоты расходуется на обеспечение *внутриобменных* процессов, следовательно, 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.

## 1.2. Комфортные и пограничные температурные условия в помещении

Русский исследователь И.И. Флавицкий в 1884 г. выявил комплексное воздействие метеорологических факторов на человека. Это обстоятельство означает, что ощущение теплового комфорта появляется, если параметры микроклимата находятся в определенном сочетании.

В качестве обобщающего температурного показателя используют *температуру помещения*, в первом приближении равную средней между температурой воздуха  $t_b$  и радиационной температурой  $t_p$ :

$$t_n = \frac{t_b + t_p}{2}. \quad (1.3)$$

*Радиационную температуру* рассматривают как осредненную по площади температуру внутренних поверхностей в помещении (подробнее это рассматривается в курсе «Теплофизика зданий»). Температура помещения может быть измерена с помощью шарового термометра.

Учебное издание

Юрий Яковлевич **Кувшинов**  
Олег Дмитриевич **Самарин**

# ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЙ

Компьютерная верстка: *Е.В. Орлов*  
Редактор: *В.Ш. Мерзлякова*  
Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.  
Подписано к печати 01.08.12. Формат 60х90/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. 12,5 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511  
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru), <http://www.iasv.ru/>