

Министерство образования Российской Федерации

Владимирский государственный университет

Кафедра “Теплогазоснабжение, вентиляция и гидравлика”

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

В.А. Кечин

“ ” 200...

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине “Строительная теплофизика”

для специальности (направления) 290700 “Теплогазоснабжение и вентиляция”

вид обучения **очное**

Учебный план курса

Вид занятий	Количество часов			
	Всего	Распределение по семестрам		
		5		
Лекции	34	34		
Лабораторные				
Практические (семинары)	16	16		
Курсовые проекты (работы)	+	+		
Расчетные и графические работы (количество)				
Контрольные работы, домашние задания и коллоквиумы (количество)				
Рефераты (количество)				
Экзамен				
Зачет	+	+		

Владимир 200...г.

1. Предисловие.

Задачи дисциплины:

Дать представление о показателях наружного климата, влияющих на тепловой влажностный и воздушный режимы здания. Изучить законы и методы расчета тепло-массообмена в ограждениях, а также основы теплового, воздушного и влажностного режима здания. Освоить показатели комфортности внутренней среды для человека.

Студент должен иметь достаточные знания законов, понятий, характеристик тепло-массообмена в здании. Владеть методами аналитического, численного, инженерного расчета и экспериментальных исследований по дисциплине.

Цель дисциплины:

Инженер специальности должен, применяя нормативные характеристики наружного климата, уметь рассчитывать теплозащиту, теплоустойчивость, воздухопроницаемость, влажностный режим ограждающих конструкций, оценивать тепловые показатели внутренней среды помещения.

Студент должен знать:

1. Законы передачи тепла, влаги, воздуха в материалах, конструкциях и элементах здания.
2. Величины (параметры, коэффициенты, характеристики), определяющие тепло массоперенос в толще и на поверхностях конструкций здания.
3. Понятия, определяющие тепловой, воздушный и влажностный режим здания, включая климатологическую и микроклиматическую терминологию.

Студент должен уметь:

1. Формулировать и решать задачи переноса тепла воздуха и водяного пара в элементах здания.
2. Иметь навыки и умения определять тепловую и влажностную обстановку в помещениях и общие тепловые характеристики здания.

Студент должен освоить:

1. Особенности проектирования процессов тепло-массообмена в конструкциях и помещениях зданий.
2. Использование основных законов теории тепло-массообмена, теплопередачи, термодинамики для инженерных расчетов, применительно к зданию.
3. Методики расчета тепло-массообмена в зданиях и помещениях, определение комфортности и тепловых внутренних условий.

Изучение дисциплины “Строительная теплофизика” базируется на знаниях, полученных при изучении высшей математики, физики, технической термодинамики, теплообмена, архитектуры и строительных конструкций.

2. Содержание дисциплины.

2.1. Наименование тем, их содержание, объем в часах лекционной нагрузки.

1. Введение. Предмет строительной теплофизики – 1 час.

Предмет строительной теплофизики. Положение и роль теплофизики в теории строительства. Учебный план курса. Литература (в т.ч. СНиПы). Что входит в курс строительной теплофизики (процессы тепло-массообмена, микроклимат, и т.д.). Задача курса сферы теплофизики помещения. Расход топлива на теплоснабжение по стране. Тепловой режим здания. Общая схема теплообмена.

Раздел 1. Тепловой режим здания.

1.1. Стационарная теплопередача через ограждение – 3 часа.

Тепловлажностный и воздушный режимы помещения. Зимний воздушно-тепловой режим. Одномерное температурное поле. Двухмерное температурное поле. Сложный теплообмен и теплопередача. Сопротивление теплопередаче.

1.2. Тепловой режим здания – 2 часа.

Общая картина лучистого, конвективного и струйного теплообмена. Виды теплообмена и элементы помещения, участвующие в нем.

1.3. .. 1.4. Виды теплообмена – 2 часа.

Основы теории теплообмена. Виды передачи теплоты: процесс теплопроводности; конвективный теплообмен; тепловое излучение. Коэффициент теплоотдачи. Основные критерии подобия: Nu , Pr , Re , Gr . Основные законы.

1.5. Общий теплообмен в помещении – 2 часа.

Тепловой баланс помещений и теплотраты на отопление здания. Общий теплообмен на поверхности в помещении. Система из 2^x уравнений общего теплообмена в помещении. Одно уравнение общего теплообмена в помещении.

1.6. Теплообмен человека с окружающей средой – 2 часа.

Расчет теплообмена человека с окружающей средой. Расчетные внутренние тепловые условия. 1^е и 2^е условия комфортности. Системы инженерного оборудования и обеспечения заданного микроклимата помещений. Зимние и летние расчетные климатические условия для проектирования систем обеспечения микроклимата (кратко).

1.7. Нестационарная теплопередача через ограждения – 2 часа.

Аналитическое решение задачи о нагревании и охлаждении тел. Метод конечных разностей (явная и неявная схемы).

1.8. Теплоустойчивость ограждения – 2 часа.

Теплоустойчивость ограждения колебаниям тепловых потоков в помещении. Теплоустойчивость ограждения сквозному прониканию колебаний температуры наружного воздуха.

1.9. Теплоустойчивость помещения – 2 часа.

Процесс общего теплообмена и поглощения тепла в помещении. Уравнение теплоустойчивости помещения. Гармонические и прерывистые поступления лучистого и конвективного тепла. Изменение температуры воздуха, поверхностей и помещения.

Раздел 2. Воздушный режим здания.

2.1. Воздухопроницаемость – 2 часа.

Воздухопроницаемость ограждения и ее влияние на воздушно-тепловой и влажностный режимы помещений. Уравнения и характеристики процесса воздухопроницания.

2.2. Теплопередача через ограждение при наличии фильтрации воздуха на теплопередачу. Учет воздушного режима здания при расчете отопления и вентиляции. Теплопередача при фильтрации воздуха через: ограждения, стык конструкции и заполнение световых проемов.

Раздел 3. Влажностный режим здания.

3.1. Влага воздуха помещения – 2 часа.

Влажный воздух. Конденсация влаги. Влагосодержание и влагоемкость воздуха. Упругость водяного пара.

3.2. Термодинамика влажного материала – 2 часа. Теплофизические характеристики строительных материалов. Основы термодинамики влажного воздуха. Потенциал влажности. Влагопроводность и влагосодержание строительных материалов. Термовлагопроводность. Паропроницаемость материала.

3.3. Тепло и влагопередача в ограждении – 2 часа.

Расчет влагопередачи через ограждение на основе потенциала влажности. Стационарная влагопередача. Нестационарная влагопередача.

Раздел 4. Зимний, летний и годовой режим тепломассообмена.

4.1. Зимний режим помещения – 2 часа.

Обеспеченность расчетных условий. Характеристики наружного климата. Защитные свойства наружных ограждений. Расчетное и приведенное сопротивления теплопередаче.

4.2. Летний режим помещения – 4 часа.

4.2.1. Летний тепловой режим помещения.

Расчетные внутренние условия и их обеспеченность. Характеристики наружного климата. Проверка теплозащитных свойств ограждений для теплого периода года – 2 часа.

4.2.2. Расчет поступления тепла в помещение через наружные ограждения. Поступление тепла через массивные непрозрачные ограждения. Поступление тепла через прозрачные ограждения.

2.2. Перечень рекомендуемых практических занятий.

1.Теплотехнический расчет наружных ограждений. Требуемое, оптимальное, приведенное, расчетное сопротивления теплопередаче – 2 часа.

2.Определение тепловой инерции ограждения. Проверка теплоустойчивости ограждения – 2 часа.

3.Проверка внутренней поверхности ограждения на выпадение росы. Проверка на выпадение росы в толще ограждения – 2 часа.

4.Проверка влажностного режима ограждения – 2 часа.

5.Проверка ограждения на воздухопроницание – 2 часа.

6.Теплотехнический расчет чердачного (бесчердачного) перекрытий – 2 часа.

7.Теплотехнический расчет полов – 2 часа. Расчет сопротивления теплопередачи пола. Расчет теплоусвоения поверхности пола – 2 часа.

2.3. Курсовая работа.

В курсовой работе выполняется теплотехнический расчет ограждений (наружных стен, чердачных (бесчердачных) перекрытий, полов, окон и дверей) и расчет теплового режима помещения. Определяются необходимые тепло-, влаго и воздухозащитные свойства наружных ограждений. Рассчитывается теплоустойчивость ограждения.

3. Литература.

Основная :

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М: Высшая школа, 1982-415с.

Дополнительная:

1. Богословский В.Н. Сканава А.Н. Отопление. Москва – Стройиздат. 1991г. – 736с.

2. СНиП II -3-79* Строительная теплотехника М: Стройиздат. 1998-32с.

3. СНиП 23-01-99 Строительная климатология М: Стройиздат. 2000-59с.

4. Внутренние санитарно-технические устройства. Справочник проектировщика чI. Отопление. Под ред Н.Г. Староверова и Ю.И. Шиллера. М: Стройиздат. 1990-334с.

5. Методические указания к курсовой работе по строительной теплофизике. / Владимир. Гос ун-т., Сост: Н. С, Тимахова, М. В. Шеногин. Владимир. 2000-32с.

4. Контроль знаний студентов.

По курсовой работе и курсу лекций проводятся зачеты.

Тематический план курса

Номер раздела и темы	Наименование Раздела (темы)	Распределение часов (ауд)				Кп, Кр, РГР и пр.	Виеаудитор СРС (часов)
		всего	лекции	Прак-тич. занятия	Лаб. занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Введение. Тепловой режим здания.	1	1				
1.1	Стационарная теплопередача через ограждение.	7	3	4		+	
1.2	Тепловой режим здания	4	2	2			

1.3	Виды теплообмена (теплопроводность конвективный теплообмен, теплообмен излучением)	2	2				
1.4							
1.5	Общий теплообмен в помещении.	2	2				
1.6	Теплообмен человека.	2	2				
1.7	Нестационарная теплопередача через ограждения.	2	2				
1.8	Теплоустойчивость ограждения.	6	2	4			
1.9	Теплоустойчивость помещения.	2	2				
2	Воздушный режим здания.						
2.1	Воздухопроницаемо сть.	4	2	2			
2.2	Теплопередача через ограждение при наличии фильтрации воздуха.	2	2				
3	Влажностный режим здания.						
3.1	Влага воздуха помещения.	2	2				
3.2	Термодинамика влажного материала.	2	2				
3.3	Тепло и влаго передача в ограждении	6	2	4		+	
4	Зимний, летний и годовой режимы тепло-массообмена.						
4.1	Зимний режим помещения.	2	2				
4.2	Летний режим помещения.	4	4				

	Курсовой проект (работа)					+	
	Итого	50	34	16			

Примечание: Если дисциплина читается более чем в одном семестре, тематический план составлять по семестрам.

Рабочая программа составлена согласно ГОС специальности (направления) 297700 «Теплогазоснабжение и вентиляция» (пример и наименование специальности или направления) утвержденному в 1995 году, применительно к учебному плану специальности (направления), утвержденному ректором ВлГУ в 1996 году.

Рабочую программу составил доцент кафедры ТГВиГ Кондрашов В.М. (должность, фамилия, И.О.)

Рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ТГВиГ (наименование кафедры) 200.., протокол №

Зав. кафедрой Тарасенко В.И.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании учебно-методической комиссии специальности (направления).

200.., протокол №

Программа переутверждена:

на учебный год протокол № от

Зав. кафедрой

на учебный год протокол № от

Зав. кафедрой

на учебный год протокол № от

Зав. кафедрой

на учебный год протокол № от

Зав. кафедрой

Введение

Почему этот курс называется “Строительная теплофизика”? В этом курсе рассматриваются явления и процессы в зданиях. Вопросы чисто физические при изучении этой дисциплины связаны с техническими. Расчеты возможного развития физических процессов требуют определенных технических решений, поэтому эту область знаний называют строительной теплофизикой. Для рассмотрения процессов тепло и массообмена, происходящих при формировании микроклимата помещений нужно знать: требования к характеристикам внутреннего климата и факторы влияющие на них; законы взаимодействия ограждений с внутренней и наружной средами; тепло и массообменные процессы на обогревающих и охлаждающих поверхностях и в потоках воздуха систем вентиляции и кондиционирования в помещениях; явления, происходящие в конструкциях и материалах при переходе через них тепла, влаги и воздуха; характеристики наружного климата и законы их изменения; годовые режимы работы и потребления энергии в здании.

Задача этого курса состоит в том, чтобы научить будущих инженеров правильно устанавливать прогноз теплового, влажностного и воздушного режимов здания, его отдельных помещений и конструкций с тем, чтобы принять оптимальное (с гигиенической, технической и экономической точек зрения) решение при их проектировании.

Климат большей части территории нашей страны более суров чем в других странах.

Представление об этом дает табл.1, в которой сопоставляются характерные наружные температуры по данным многолетних наблюдений для некоторых городов мира.

Табл.1.

Географический пункт	Географическая широта	Среднемесячная $t_n, ^\circ\text{C}$	
		Наибол. жаркого месяца	Наибол. холодного месяца
Москва	55°52′	17,9	-10,2
Ташкент	41°40′	27,4	-1,1
Париж	48°51′	18	2
Афины	37°59′	27	9

Строительная теплофизика как научная дисциплина начала развиваться в нашей стране сравнительно недавно (с 20^х годов XX в). Сложные теплофизические задачи в строительстве решаются теперь современными математическими и физическими методами, с применением теории подобия, методов аналогии, с применением ЭВМ. На рис. 1.1. показаны схематически сферы теплофизики помещения (1) и ограждения (2).

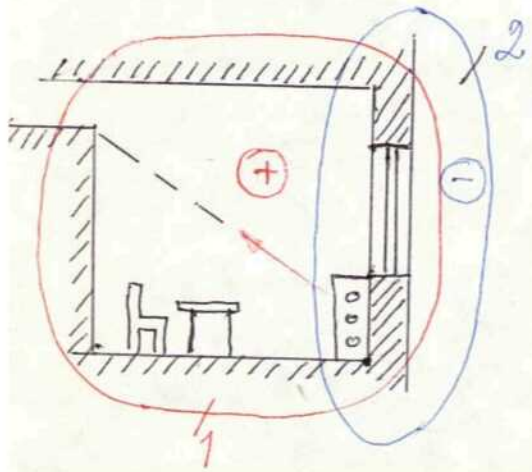


Рис 1.1. Сферы теплофизики помещения.

Теплофизику строительства занимают вопросы создания микроклимата в помещении, применяя системы отопления – охлаждения и вентиляции с учетом влияния наружного климата. В строительной индустрии расходуется много энергии, но главное состоит в том, что основной объект строительства здания и сооружения потребляют огромное количество топливно-энергетических ресурсов. Расход топлива при теплоснабжении зданий составляет $\square$ 40% всего добываемого топлива. При этом на жилище и общественные здания расходуется 26% (в городах – 18, в сельской местности 8%), на промышленные здания – 14%.

Поэтому основной энергетической задачей в области строительства является проектирование зданий и сооружений с эффективным использованием энергии.

В настоящее время экология ставит человечество перед необходимостью делать производства безотходными.

Экономические факторы также заставляют резко повысить степень использования добываемого топлива. Пока еще энергетическая эффективность многих технологических процессов чрезвычайно низка, так как технологии зачастую не ставили во главу угла вопросы экономии топлива.

В СССР такому подходу объективно способствовали неоправданно низкие цены на топливо. В 80^х годах, например, нефть стоила 32 рубля за 1 тонну, в то время как на мировом рынке ее цена в 1987 г. составляла 110 долларов за 1 м³, а в 1991 г. $\square$ 300 долларов за 1 м³. Поэтому отечественные теплотехнические процессы оказались более энергоемкими, чем зарубежные.

Например, прогнозируемые запасы угля в мире велики (□ на 500 лет), но рост его прямого сжигания ограничивается из-за загрязнения при его сжигании окружающей среды выбросами газов и золы.

Несмотря на значительное развитие топливдобывающей промышленности в нашей стране, топливный баланс ее в течении многих лет является очень напряженным: опережающими темпами растет потребность в топливе и часто оно (топливо) расходуется расточительно.

В связи с этим основными направлениями экономического и социального развития России на 2000□2010 г.г. предусмотрена программа разработки мероприятий по обеспечению роста потребности в топливе, энергии, сырье и материалах на 75□80% за счет их экономии.

Важность решения этой трудной задачи имеет первостепенное значение для народного хозяйства и потому, что стоимость топлива, в нашей стране весьма выросла. Одной из причин этого удорожания явилось несоответствие между потребностью в топливо-энергетических ресурсах в Европейской части России и на Урале и в Сибири. (до 80% их потребления приходится на Европейскую часть). А запасы топлива в Европейских регионах составляют менее 10% основных запасов РФ.

В результате около 40% всех перевозок с Востока на Запад приходится на топливо. Удорожание топлива вызвано и тем, что истощаются его запасы в Европейской части России; так добыча угля в Домбассе уже происходит на глубине свыше километра, и разрабатываются в основном тонкие (до 60 см) пласты угля. Топливодобывающая промышленность перебазируется на восток, где горно-геологические условия добычи топлива более тяжелые и, кроме того, требуются огромные капиталовложения на освоение топливдобывающих районов. И транспортные средства. Если в 70^е годы создание новых мощностей для добычи 1 тонны нефти обходилось в 46 рублей; в 1985г – 88 рублей, то к 1990г затраты возросли уже до 130 рублей за тонну. Сегодня страна на 1 единицу национального дохода продолжает расходовать слишком много топлива, электроэнергии, металла и других ресурсов. Энергоемкость национального дохода у нас более чем в 2 раза выше, чем в развитых капиталистических странах.

В связи с перечисленными негативными явлениями в энергоснабжении необходимо, чтобы максимально возможное снижение затрат энергии на работу систем теплоснабжения и вентиляции зданий было одной из основных задач, решаемых при проектировании и эксплуатации этих систем.

Учитывая, что на эти цели сейчас в стране расходуется □ 35% всего добываемого твердого, жидкого и газообразного топлива, результаты энергосбережения здесь могли бы быть весьма значительными.

I. Теплообмен в помещении.

1.1. Тепловой режим здания.

Тепловым режимом здания называют совокупность всех факторов и процессов определяющих тепловую обстановку в его помещениях. Помещения зданий (рис. 1.2.) изолированы от внешней среды ограждающими конструкциями (ОК), что позволяет создать в них определенный микроклимат.

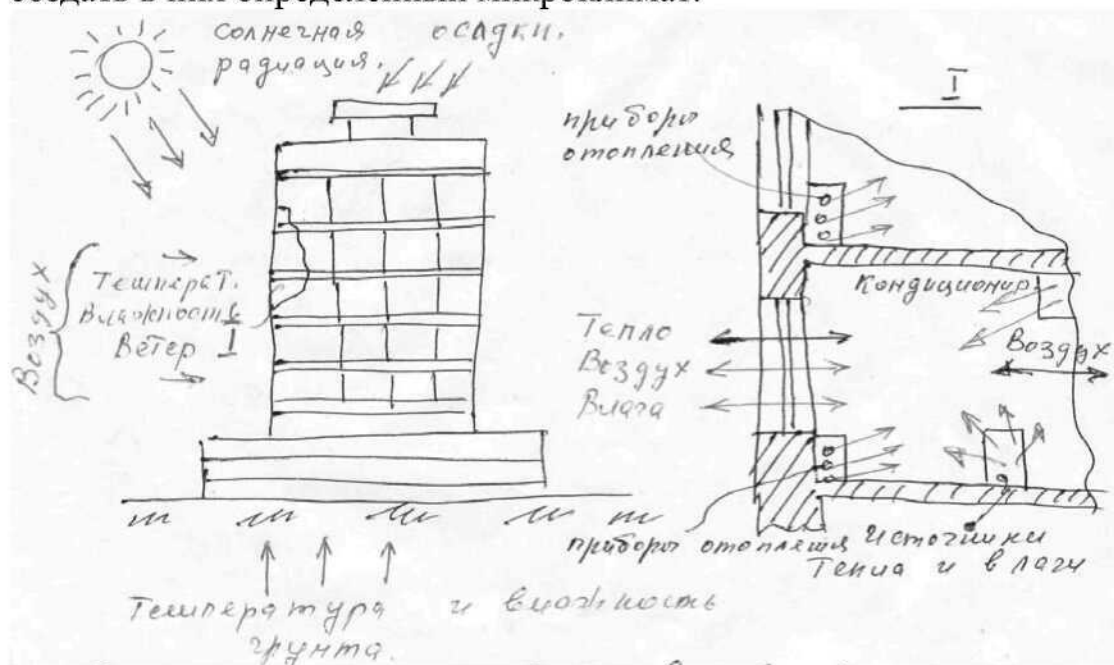


Рис.1.2. Различные виды воздействия на тепловой, воздушный и влажностный режимы помещений в здании.

Наружные ограждения защищают помещения от атмосферных воздействий, а специальные системы кондиционирования (отопления – охлаждения - вентиляции) поддерживают определенные заданные параметры внутренней среды.

Совокупность всех инженерных средств и устройств, обеспечивающих заданные условия микроклимата в помещении здания (ОК, солнцезащитные устройства, другие конструктивно-планировочные средства, а также системы отопления, охлаждения, вентиляции) называют системой кондиционирования микроклимата (СКМ).

Под действием $\Delta t = t_{\text{нар}} - t_{\text{внутр}}$, солнечной радиации и ветра, помещения теряют тепло через ограждающие конструкции (ОК) зимой и нагреваются летом.

Гравитационные силы, действие ветра и вентиляции создают перепады давления (ΔP) приводящие к перетеканию воздуха между сообщающимися помещениями и к его фильтрации через поры материала и неплотности ОК. Атмосферные осадки, влаговыведения в помещениях, разность влажности внутреннего и наружного воздуха приводят к влагообмену через ОК, под влиянием которого возможно увлажнение материалов и ухудшение защитных свойств и долговечности наружных стен и покрытий. Процессы формирующие тепловую обстановку помещений необходимо рассматривать в неразрывной связи между собой, так как их взаимное влияние может оказаться существенным. Например, фильтрации воздуха и увлажнения ОК могут в несколько раз увеличить теплопотери помещения зимой. В тоже время создание благоприятной воздушной среды в помещении требует организации его воздухообмена и влагообмена с наружной средой.

1.2. Теплообмен в помещении.

При эксплуатации зданий определяющим фактором является тепловой режим помещений, от которого зависит ощущение теплового комфорта людей, нормальное протекание производственных процессов, состояние и долговечность конструкции здания и его оборудования. Тепловая обстановка в помещении определяется совместным действием ряда факторов: температуры, подвижности и влажности воздуха помещений, наличием струйных течений, распределением параметров воздуха в плане и по высоте помещений, а также радиационным излучением окружающих поверхностей, зависящих от их температуры, геометрии и радиационных свойств. Под действием конвективного и лучистого теплообмена и процессов массообмена, t воздуха и t поверхностей в помещении – эти процессы взаимосвязаны и оказывают воздействие друг на друга. Для изучения формирования микроклимата, его динамики и способности взаимодействовать на него нужно знать законы теплообмена в помещении. Общая схема теплообмена в помещении приведена на рис. 1.3.

Теплообмен в помещении в общем виде может быть описан следующей формулой.

$$L_i + K_i + T_i = \text{const} \quad (1.1)$$

Лучистая (L_i), конвективная (K_i) и кондуктивная (T_i) (теплопроводностью) могут изменяться во времени, иметь различную величину и знак, но уравнение (1.1.) остается неизменным для всех поверхностей в стационарных и нестационарных условиях теплообмена. Температура поверхностей в помещениях неодинакова. Между поверхностями происходит теплообмен излучением подчиняющийся общим физическим закономерностям.

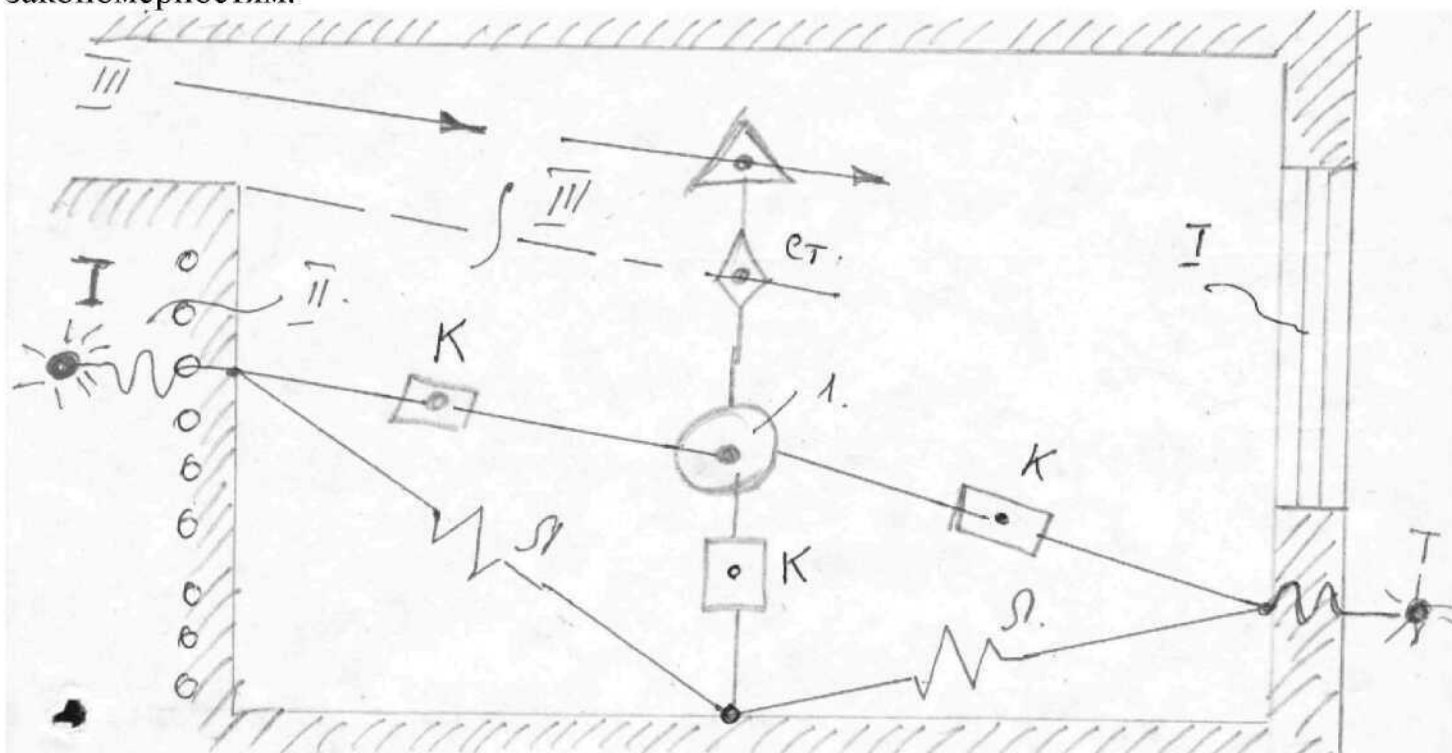


Рис. 1.3. Общая схема теплообмена в помещении:

Принятые обозначения:

$\odot$ - 1; $\bullet\bullet$ - 2; Δ - 3; $\odot$ - 4; $\square$ - 5;
 $\sim$ - 6; $\sim$ - 7; $\sim$ - 8.

- 1 - воздух основного объема помещения;
- 2 - поверхности обращенные в помещение;
- 3 - струи воздуха;
- 4 - внешняя среда;
- 5 - конвективный теплообмен;
- 6 - лучистый теплообмен;
- 7 - струйный теплообмен;
- 8 - теплообмен теплопроводностью;
- I - наружное ограждение (ОК);
- II - панель (отопительные приборы) системы отопления;
- III - неизотермическая струя приточного воздуха.

№2. Стационарная теплопередача через ограждения.

Процесс передачи тепла через ОК, все параметры которой остаются постоянными во времени, называют стационарным и он является наиболее простым случаем теплопередачи.

К стационарной теплопередаче обычно стремятся привести важные для проектирования ОК и систем расчетные условия.

2.1. Одномерное температурное поле.

Простейшим является одномерное стационарное поле, которое для многослойной ОК может быть определено дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x) \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right] = 0 \quad (2.1)$$

где $\lambda(x)$ – теплопроводность материальных слоев ОК.

Если линейный масштаб сечения ОК заменить масштабом термического сопротивления $R = \frac{x}{\lambda}$, то уравнение (2.1.) можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} = 0 \quad (2.2)$$

Конструкции современных (многослойных) ограждений (ОК) характеризуются разделением функций между отдельными материальными слоями (рис. 2.1.).

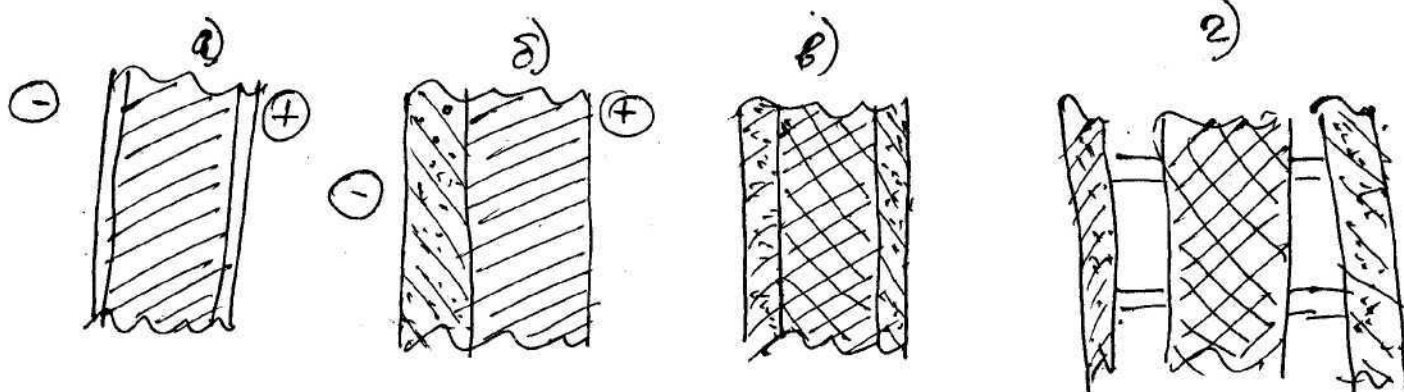


Рис. 2.1. Характерные типы современных конструкций наружных ограждений зданий:

- а) – однослойная керамзитобетонная панель с внутренними и внешними фактурными слоями;
- б) – двухслойная панель (бетон - эффективный теплоизоляционный материал (снаружи) и фактурный слой (внутри);
- в) – трехслойная панель;

г) – трехслойная панель с воздушными прослойками.

В общем случае ОК состоит из конструкционного (несущего) слоя, теплоизоляционного слоя, а также паро или гидроизоляции, внутреннего и внешнего фактурных слоев.

В отношении режима теплопередачи основными являются конструктивные и теплоизоляционные слои.

Теплоизоляционный слой может быть расположен с внутренней и внешней стороны ОК (рис.2.2.).

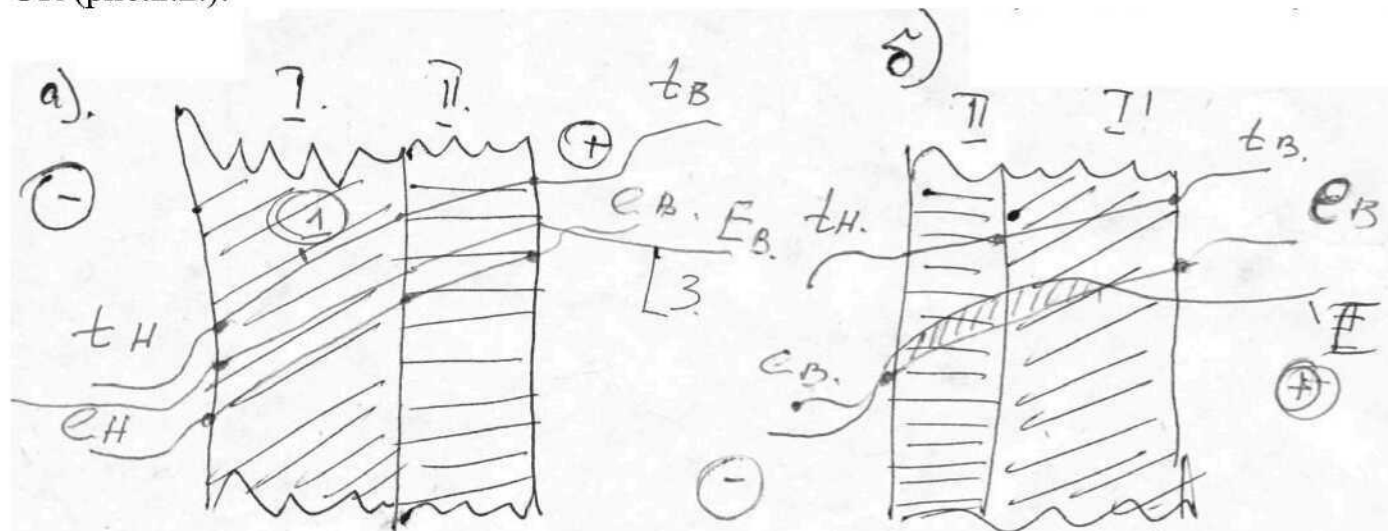


Рис.2.2. Кривая распределения $t(1)$, упругости $e(2)$ и максимальной упругости (3) E водяного пара по толщине двухслойной ОК при расположении теплоизоляционного слоя внутри (а) и снаружи (б).

Заштрихованная площадь (рис. 2.2. б) показывает условие и зону возможной конденсации влаги в ОК.

I – конструктивный слой;

II – теплоизоляционный слой.

В этом случае (а) при прочих равных условиях имеются следующие достоинства:

- 1) отсутствие возможности выпадения конденсата и накопления жидкости в толще ОК, а поэтому не требуется дополнительная пароизоляция с внутренней поверхности ОК;
- 2) стык между слоями находится при положительных t , что исключает периодическое образование в нем льда, нарушающего контакт между слоями;
- 3) ОК более устойчива как к сквозному затуханию колебаний t_n , так и к колебаниям теплоступлений в помещение.

Иногда более выгодными оказываются ОК с внутренним расположением теплоизоляции (рис. 2.2.а) с дополнительным пароизоляционным слоем на ее внутренней поверхности.

2.2. Двухмерное температурное поле.

В реальных конструкциях наружных ОК, особенно в сотовых панелях современных зданий, фактически нельзя выделить площадь в пределах которой обеспечивалась бы одномерность температурного поля. Наличие в ОК включений в виде ребер, обрамлений оконных проемов, внутренних и внешних выступающих частей, примыканий приводит к образованию в них сложных двух и трехмерных температурных полей (рис. 2.3.). Двухмерное температурное поле, рассмотрение которого часто оказывается достаточным при решении задач строительной теплотехники описывается дифференциальным уравнением.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial t}{\partial y} \right] = 0. \quad (2.3)$$

Где $\lambda(x, y)$ – заданные значения теплопроводности определенных частей двумерного сечения ОК.

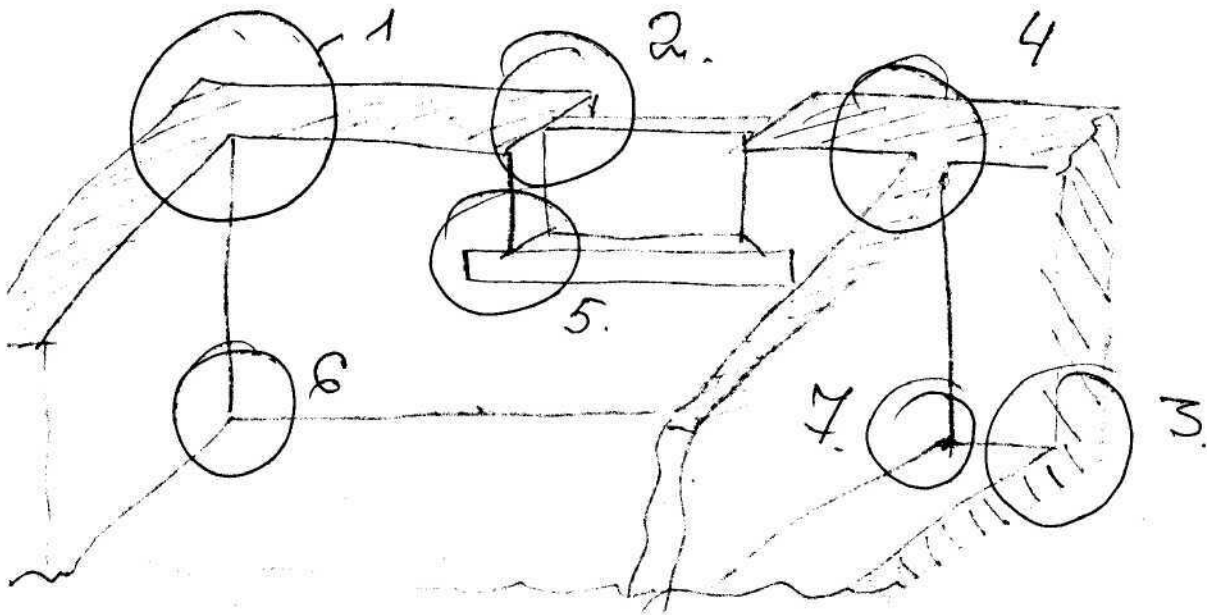


Рис.2.3. Элементы формирования двумерных (1,2,3,4) и трехмерных (5,6,7) температурных полей в наружных ОК зданий.

Решение этого уравнения (2.3.) значительно сложнее, чем для одномерного поля.

Для большинства практических задач, когда наряду с двумерностью температурного поля приходится учитывать его неоднородность, аналитические методы не могут быть использованы.

В этом случае применяют численные методы, которые достаточно точны и просты для расчета.

2.3. Построение двумерных температурных полей методом сеток и графическим методом. Фактор формы.

Рассмотрим два метода (кратко), которые могут быть сравнительно просто использованы в инженерной практике для расчета двумерных ОК.

Метод сеток: Область двумерного сечения ОК, для которой требуется построить температурное поле, делят на элементарные площадки, центры которых соединяют сосредоточенными термическими сопротивлениями (рис. 2.4.а). Таким образом, переходят от поля к тепловой сетке (рис.2.4.б) с сосредоточенными параметрами.

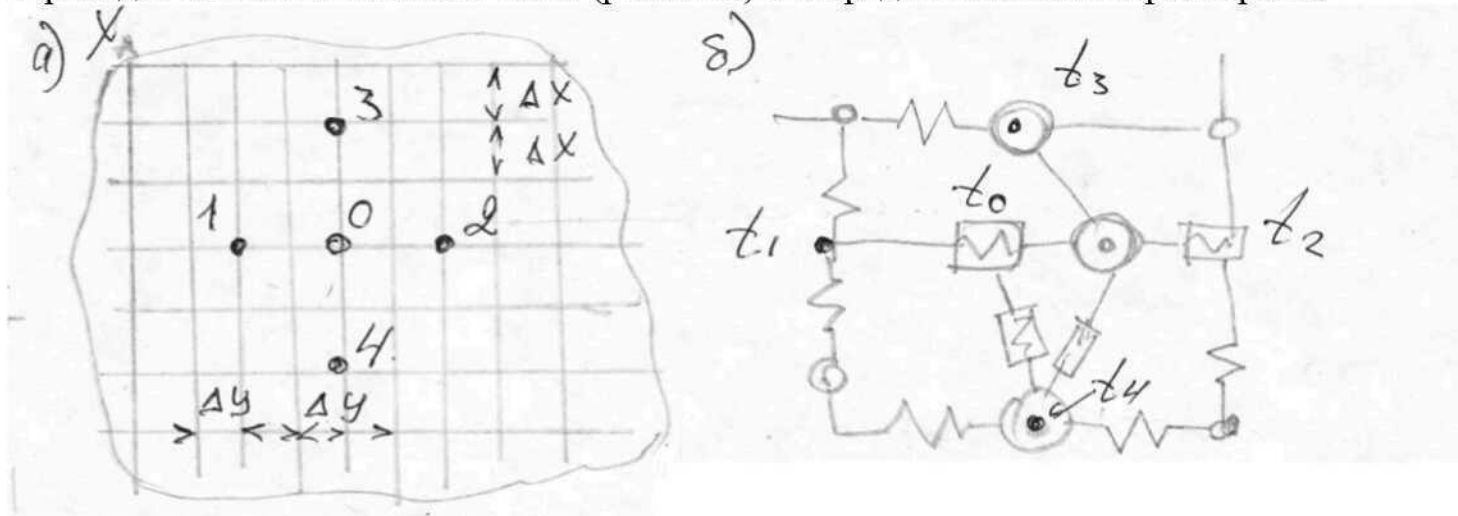


Рис.2.4. Разбивка двумерного температурного поля на элементарные площадки (а) и переход от поля к сетке с сосредоточенными параметрами.

Уравнение стационарной теплопроводности для такой сетки в конечных разностях имеет вид:

$$\frac{\Delta^2 x t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 y t}{\Delta y^2} = 0. \quad (2.4)$$

Решение уравнения (2.4.) относительно температуры в произвольном узле сетки (рис. 2.4.) t_0 , если шаг сетки в направлении x - Δx , и y - Δy одинаков, может быть получено в виде.

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \quad (2.5)$$

Таким образом, при однородном температурном поле температура в произвольном узле сетки равна температуре в соседних узлах. Методом сеток можно вести расчеты для случаев практически любой сложности, в том числе с источниками или стоками тепла в цилиндрической системе координат. Однако ручной расчет температурных полей методом сеток достаточно трудоемкий, поэтому для его реализации в настоящее время используются ЭВМ и компьютеры.

Графический метод. Метод графического приближенного построения стационарного двумерного температурного (t) поля удобен для получения сравнительно быстрого ориентировочного представления о сложном температурном поле. Этот метод основан на построении ортогональной сетки криволинейных квадратов образованных линиями токов тепла и изотермами. Рисуется линии токов тепла и изотермы в виде ортогональной сетки криволинейных квадратов (рис. 2.5.), то есть такой сетки, линии которой ортогональны (то есть в точках пересечения образуют прямые углы), и в которой в пределах каждого квадрата среднее расстояние между изотермами равно среднему расстоянию между линиями тока.

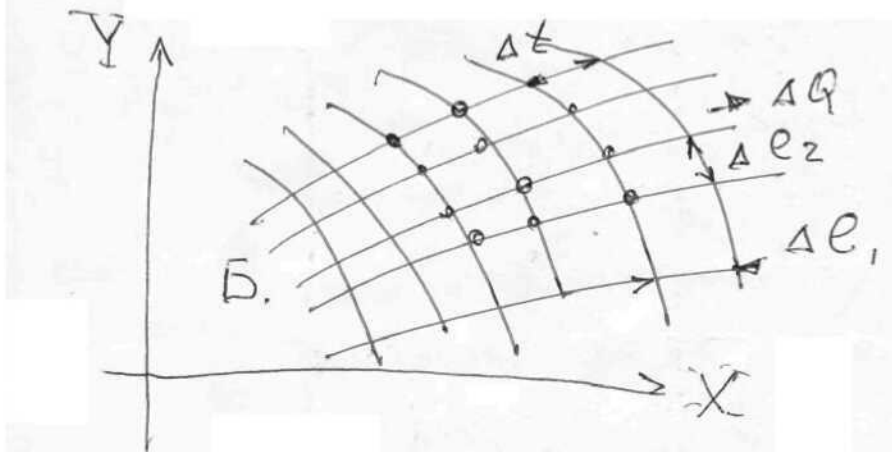


Рис. 2.5. сетка ортогональных криволинейных квадратов.

Расстояние между линиями тока равно: $\Delta e_1 \approx \Delta e_2$. В такой сетке поток тепла в трубке образованной двумя линиями тока равен:

$$\Delta Q = \frac{\Delta e_2 \cdot \lambda}{\Delta e_1} \cdot \Delta t = \lambda \cdot \Delta t \quad \text{или} \quad \Delta Q = \frac{\lambda}{S \cdot (\tau_1 - \tau_2)} \quad (2.6),$$

где Δt – перепад температур между соседними изотермами.

$$\Delta t = (\tau_1 - \tau_2) \quad (2.7.)$$

где τ_1 и τ_2 – температуры на границах области, для которой строится температурное поле; S – число интервалов между изотермами.

Если число “трубок” тока (интервалов между линиями тепловых потоков) в пределах рассматриваемой области (ОК) обозначить через B , то общее количество теплоты, проходящее через эту часть ОК, будет

$$Q = \frac{B}{S} \cdot \lambda(\tau_1 - \tau_2) \quad (2.8),$$

а сопротивление теплопроводности этой части

$$R_T = S/(B \cdot \lambda) \quad (2.9)$$

Фактор формы.

Отношение B/S в формуле (2.8.) является геометрическим параметром, характеризующим область (двухмерного температурного поля) определенной конфигурации.

Для одномерного поля стенки с шириной поверхности в один калибр (1 калибр равен толщине δ стенки) $B/S=1$, а шириной стенки в 2 калибра равной 2 и т.д.

Отношение геометрических параметров для двухмерной и одномерной областей одинаковой ширины показывает во сколько раз изменяется тепловой поток через поверхность определенной ширины в двухмерной области по сравнению с одномерной.

Обычно угол, стык, откос, включения и другие изменения в одномерной ОК вызывают нарушение одномерного температурного поля на расстоянии до двух калибров по ширине ОК, поэтому для всех случаев двухмерных температурных полей в ОК необходимо учитывать участок ОК шириной в 2 калибра.

За один калибр реальных ОК принимают условную толщину однородной ОК с сопротивлением теплопроводности R_0 и коэффициентом теплопроводности материала λ , шириной в 2 калибра.

$$a_f = 2 \cdot \lambda \cdot R_0 \quad (2.10.)$$

При расчете передачи тепла через двухмерные элементы ОК удобно пользоваться так называемым фактором формы.

Фактор формы двухмерного элемента ОК называют отношение геометрических параметров B/S – двухмерных и одномерных частей ОК при их одинаковой ширине равной 2^M калибрам.

$$f = (B/S)/2 \quad (2.11.),$$

где B/S – отношение числа трубок тока к числу изотермических полос (интервалов между изотермами), в ортогональной сетке криволинейных квадратов, расположенных в области двухмерного температурного поля на ширине поверхности в 2 калибра.

Фактор формы показывает во сколько раз больше проводимость тепла двухмерным элементом по сравнению с одномерным.

Или при одинаковой Δt и прочих условиях он показывает во сколько раз больше теряется тепла через двухмерные элементы ОК по сравнению с теплопотерями через гладкую поверхность ОК.

Л.10. Тепло и влажно передача в ОК (Всего 7часов: из них лекции – 3часа, практика – 4 часа).

10.1. Расчет влагопередачи через ОК на основе потенциала влажности.

В настоящее время имеется ряд методов расчета влагопередачи через ОК, основанных на теории диффузии пара и влажопроводности. Однако они имеют ряд недостатков (отмеченных нами ранее), которые затрудняют их использование для расчета многослойных ОК при сверх сорбционной (повышенной) влажности в области положительных и отрицательных температур при сложных граничных условиях. (сорбция – способность материала поглощать влагу - сорбенты).

Использование потенциала влажности позволяет производить расчеты влажного режима ОК во всех этих случаях как в стационарных, так и нестационарных условиях влагопередачи.

Стационарная влагопередача

Сложность расчета влагопередачи состоит в нелинейности основных уравнений, т.к. в условиях стационарной влагопередачи расчет затруднен существующей зависимостью влажопроводности материала x от потенциала влажности Q . В силу этого при проведении расчета удобно воспользоваться способом последовательного приближения.

Сечение ОК делится на элементарные слои δ_i . В многослойных ОК границы элементарных слоев должны совпадать с границами материальных слоев в ОК.

Задается приближенным, например линейным, распределение потенциала влажности по сечению ОК. В пределах каждого слоя значение влажопроводности x_i принимается *const*, соответственно потенциалу влажности слоя Q_i . Исходя из принятых значений x_i определяется общее сопротивление влагопередаче ОК.

$$R_{Q,0} = \sum \frac{\delta_i}{x_i} \quad (10.1).$$

(Сопротивление влажобмена на поверхностях ОК обычно малы) и соответственно величина потока влаги:

$$i = \frac{(Q_B - Q_H)}{R_{Q,0}} \quad (10.2).$$

После этого расчет ведут “змейкой” от слоя к слою, начиная с первого слоя, граничащего с внутренней поверхностью. Приняв x_i этого слоя по потенциалу влажности внутренней поверхности ОК (в общем случае по Q и t поверхности, когда x является функцией Q и t) вычисляют значение Q_z на противоположной границе слоя, на границе со вторым слоем.

$$Q_z = Q_x - i \frac{\delta_i}{x_i} \quad (10.3).$$

Полученное значение Q_z на границе между первым и вторым блоками является исходным для определения x_2 в пределах второго слоя. Расчет продолжается до последнего элементарного слоя К на границе с наружной поверхностью ОК.

Полученные для наружной поверхности значения Q_K не будут достаточно близкими к Q_H . Необходимой точности расчета этим способом удастся достичь с $1 \div 2^x$ попыток.

Пример 10.1 Построить стационарное поле влажосодержания материалов в ОК из красного кирпича толщиной 0,25м утепленной изнутри слоем пенобетона толщиной 0,2м. Район строительства – Москва; $t_H = -9,4^\circ\text{C}$. Потенциал

влажности наружного климата в зимний период $Q_H = 9,1^\circ B$. Условия в помещении:

$t_B = 20^\circ C$; $\varphi_B = 45\%$; $Q_B = 20,5^\circ B$. Характеристики материалов:

$$\rho_K = 0,812 Bm / (M \cdot ^\circ C), \lambda_{ns} = 0,255 \frac{Bm}{(M \cdot ^\circ C)}.$$

Решение.

Рассчитываем стационарное температурное поле в ОК, разбив его на элементарные слои, делением слоя кирпича и пенобетона пополам.

Общее термическое сопротивление ограждения:

$$R = R_B + R_{\Pi\delta_1} + R_{KK} + R_H = 0,115 + \frac{0,2}{0,255} + \frac{0,25}{0,812} + 0,04 = 1,25 M^2 \cdot ^\circ C / Bm.$$

Распределение температуры по сечению ОК, $^\circ C$:

$$\tau_B = 20 - \frac{0,115(20 + 9,4)}{1,25} = \left(t_B - \frac{R_B + (t_B - t_H)}{R_0} \right) = 17,3^\circ C.$$

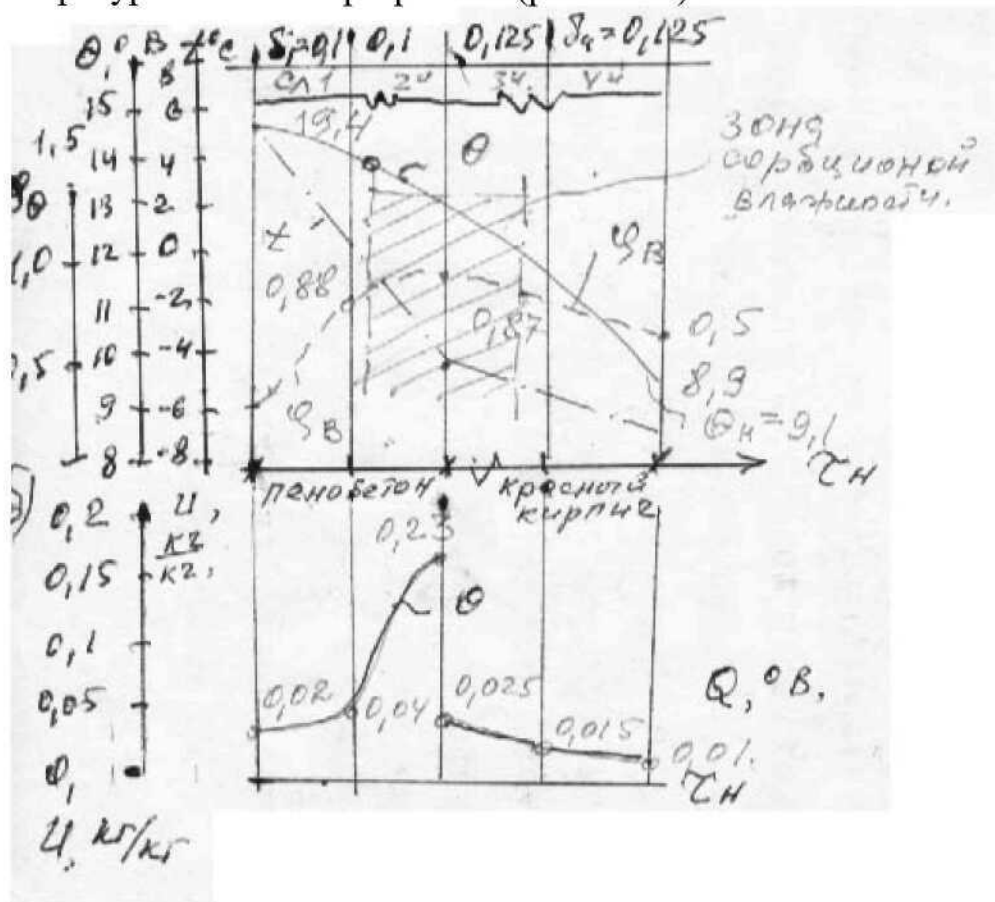
$$t_{x=0,1} = t_B - \frac{(R_B + x / \lambda_{\Pi\delta})(t_B - t_H)}{R_0} = 20 - \frac{(0,115 + 0,2 / 0,255)(20 + 9,4)}{1,25} = 8,0^\circ C.$$

$$t_{x=0,2} = 20 - \frac{(0,115 + 0,2 / 0,255)(20 + 9,4)}{1,25} = -1,2^\circ C.$$

$$t_{x=0,325} = 20 - \frac{((0,115 + 0,2 / 0,255) + 0,125 / 0,812)(20 + 9,4)}{1,25} = -4,8^\circ C.$$

$$\tau_{\Pi} = 20 - \frac{(0,115 + 0,2 / 0,255 + 0,25 / 0,812)(20 + 9,4)}{1,25} = -8,4^\circ C.$$

Наносим температурное поле на разрез ОК (рис.10.1а).



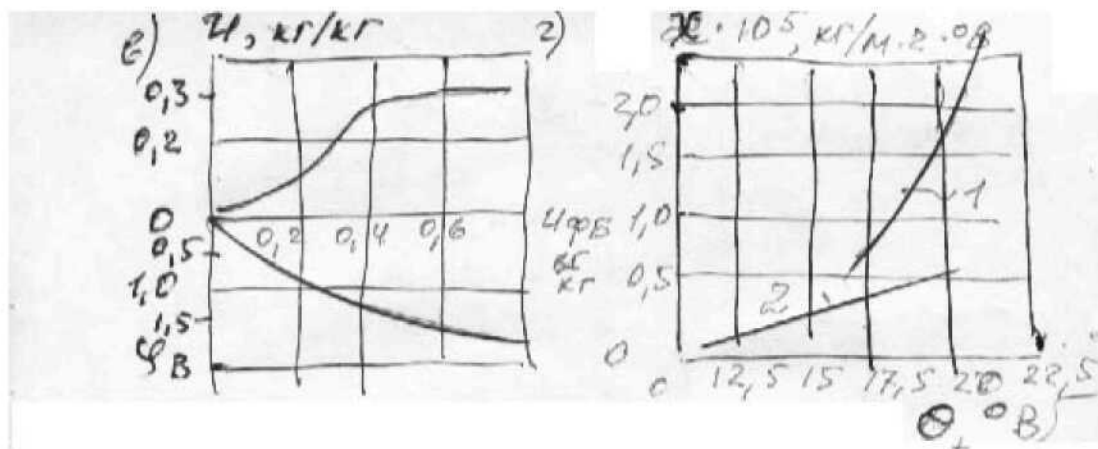


Рис.10.1. К примеру расчета стационарной влагопередачи через ОК.

а – построение распределенного температурного потенциала влажности Q и относительного потенциала влажности φ_Q ;

б – построение распределения влагосодержания материалов;

в – кривые зависимости равновесной влажности пенобетона (ПБ) и красного кирпича (КК) от влажности фильтрованной бумаги и относительного потенциала влажности;

г – принятая зависимость влагопроводности χ от потенциала влажности для пенобетона (1) и кирпича (2).

Расчет поля потенциала влажности.

Оставляя, принятую разбивку пенобетона и кирпича на слои, определим коэффициенты влагопроводности и температуру на границах блоков. Задаемся по данным расчета ориентировочной величиной потока влаги $i = 0,0002 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$.

Слой 1. Со стороны помещения на поверхности слоя 1 $Q_B = 20,5^\circ B$; $t = 17,3^\circ C$, по рис.10.1г.

$$\chi = 1,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ B}.$$

$$Q_{x=0,1} = Q_{x=0} - i \frac{\delta_1}{x_1} = 20,5 - 0,0002 \cdot 0,1 / 1,9 \cdot 10^{-5} = 19,4^\circ B$$

Слой 2 по $Q = 19,4^\circ B$ и $t = 8^\circ C$ определяем $\chi = 1,2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ B}$.

$$Q_{x=0,2} = 19,4 - 0,0002 \cdot 0,1 / 1,2 \cdot 10^{-5} = 17,7^\circ B.$$

Слой 3 по $Q = 13,9^\circ B$ и $t = -4,8^\circ C$ определяем $\chi = 0,25 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ B}$.

$$Q_{x=0,325} = 17,7 - 0,0002 \cdot 0,125 / 0,25 \cdot 10^{-5} = 13,9^\circ B.$$

Слой 3 по $Q = 13,9^\circ B$ и $t = -4,8^\circ C$ определяем $\chi = 0,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ B}$.

$$Q_{x=0,45} = 13,9 - 0,0002 \cdot 0,125 / 0,5 \cdot 10^{-5} = 8,9^\circ B.$$

Распределение Q по сечению ОК показано на рис.10.1а. По условиям задачи потенциал влажности снаружи $Q_H = 9,1^\circ B$, что близко к полученному. При необходимости значения $Q_{x=0,45}$ следует повторить, увеличив (в данном случае) принимаемое значение потока влаги i .

По известному температурному полю и полю потенциала влажности (рис.10.1а), находим значения φ_Q в отдельных сечениях ОК (рис.10.1а). По полученным величинам φ_Q с помощью зависимости графика на рис 10.1.в, определяем влагосодержание материалов в каждом сечении ОК (рис.10.1б).

Нестационарная влагопередача.

Для наружных ОК зданий характерными являются два режима нестационарной влагопередачи. Один – переходной влажностный процесс от одного стационарного состояния к другому при изменении потенциала влажности на одной поверхности. Он

типичен при переходе от теплого к холодному периоду года и наоборот. Это связано со стабильным потенциалом наружного климата Q_H в теплый и холодный периоды и их большой продолжительностью. Второй – также переходный процесс вхождения ОК с высокой начальной влажностью в равновесное влажностное состояние с окружающей внутренней и наружной средами в условиях регулярной эксплуатации здания.

Переходный влажностный процесс при изменении потенциала влажности на одной поверхности.

Потенциал влажности на внутренней поверхности ОК считаем постоянным и равным среднегодовому значению для условий в помещении Q_H . Потенциал влажности на наружной поверхности изменяется от среднего значения потенциала наружного климата $Q_{HЛ}$ для летнего периода года до среднего значения $Q_{HЗ}$ для зимнего периода. Таким образом, расчет сводится к рассмотрению переходного состояния к другому под влиянием изменения условий на одной из поверхностей.

Воспользуемся решением для аналогичной задачи теплопроводности (Богословский «Строительная теплофизика» §IV.2 «Односторонний нагрев или охлаждение стенки» стр.205). Особенностью влагопередачи по сравнению с теплопередачей состоит в существенной изменчивости влагопроводности и влагоемкости материалов с изменением потенциала влажности. Поэтому, применяя указанное выше решение, воспользуемся приемом разбивки рассматриваемой области процесса на пространственно-временные блоки. Сечение ОК разбиваем на элементарные блоки Δx_i , а развитие процесса во времени разобьем на расчетные интегралы времени Δz_j . В пределах каждого пространственно-временного интервала свойства влагопроводности и влагоемкости материалов считаем постоянными и соответственно начальными значениями (для этого интервала блока) потенциала влажности Q_{ij} и температуры t_{ij} .

Расчет на каждом временном интервале Δz_j производим в несколько этапов. На первом этапе все сечение ОК приводим к однородному по значению $\chi_{1,1}/(\eta\rho)_{1,1}$ (Напомним, что χ - влагопроводность материала; ρ - плотность (объемная масса) первого (к наружной поверхности) элементарного блока в первый расчетный интервал времени).

Для этого вычислим толщину $\Delta x_{i,1}$ всех остальных приведенных элементарных блоков из условий равенства критериев Фурье при одинаковом расчетном интервале времени.

(Напомним, что критерий Фурье $F_0 = \frac{a \cdot \tau}{l^2}$, где a – коэффициент температуропроводности, $\frac{m^2}{c}$; τ - время, сек; l - характерный размер тела, м; - критерий Фурье характеризует связь между скоростью изменения температурного поля, физическими const и размерами тела):

$$F_{0,j,1} = F_{0,1,1}; \frac{\chi_{1,1} \Delta z_1}{(\eta\rho)_{1,1} \cdot \Delta x_{1,1}^2} = \frac{\chi^1 \cdot \Delta z_1}{(\eta\rho)_{i,1} \cdot \Delta x_{i,1}^2} \quad (10.4),$$

откуда приведенные толщины слоев:

$$\Delta x_{i,1} = \sqrt{\frac{x_{i,1} \cdot (\eta\rho)_{1,1}}{x_{1,1} (\eta\rho)_{i,1}}} \cdot \Delta x_{1,1} \quad (10.5).$$

В уравнениях (10.4) и (10.5) и далее подстрочные индексы у $F_{0,x,(\eta\rho)}$ и Δx нужно считать, например, так: $F_{0,i,1}$ - критерий Фурье для i -го элементарного блока в первый расчетный интервал времени; $\chi_{i,1}$ - влагопроводность i -го слоя, соответствующая потенциалу влажности этого блока $Q_{i,1}$ в начале первого расчетного интервала времени.

Приведенную толщину ОК для первого интервала времени определим как сумму толщин всех элементарных блоков.

$$l_1 = \Delta x_1 + \sum \Delta x_{i,1} \quad (10.6).$$

Значение критерия Фурье для всей ОК, соответствующего первому расчетному интервалу времени, равно:

$$F_{01} = \frac{x_{1,1} \cdot \Delta z_1}{(\eta\rho)_{1,1} \cdot l^2} \quad (10.7).$$

Далее определим распределение относительного избыточного потенциала влажности

$$Q = \frac{Q_{1,1} - Q_{1,0}}{Q_H - Q_B} \quad (10.8)$$

в пределах первого элементарного слоя $\frac{\Delta x_1}{l_1}$, спустя $\Delta z_1(F_{01})$.

На втором этапе расчета ОК приводим к однородному относительному $F_{02,1}$ по $x_{2,1}/(\eta\rho)_{2,1}$ второго слоя, и т.д. для третьего, i -го, и, наконец, последнего из элементарных слоев. Таким образом, получим распределение потенциала влажности по всем сечениям ОК в конце первого Δz_1 интервала времени. Затем также в несколько этапов (по числу элементарных слоев) проводим расчет для второго интервала времени Δz_2 . Показатель $\chi_{2,i}$ и $(\eta\rho)_{2,i}$ при этом принимаем с учетом полученных значений $Q_{1,i}$ в слоях в конце первого интервала времени. Расчет продолжаем таким образом для третьего, четвертого, j -го интервалов времени и т. д. До стабилизации процесса.

Поле влажности строится по полю $Q(x, z)$ и известными зависимостями $U(Q, t)$ для материалов ОК.

В инженерной практике расчет влажностного режима часто может быть приближенным.

12.Нестационарная влагопередача.

12.1.Переходной влажностный процесс при двухсторонней сушке.

ОК устанавливают при монтаже зданий обычно с высокой начальной влажностью $U_0 \Theta_0$. Потенциал влажности на поверхности после начала эксплуатации здания ОК соответствует среднегодовым значениям Θ_e и Θ_n . В результате возникает необходимость рассчитать переходный процесс высушивания ОК под влиянием заданных постоянных во временных условиях на обеих поверхностях ОК.

В данном случае можно применить метод суперпозиции (наложения частных решений) и использовать решение, принятое в предыдущем разделе. Для этого расчет производят в следующей последовательности. Рассмотрим две частные задачи. В первой частной задаче принимают потенциал влажности на наружной поверхности ОК = const и равна начальному $\Theta_n' = \Theta_0$ и рассчитываем поле потенциала влажности под влиянием изменений условий только на внутренней поверхности ОК- Θ_e . Во второй частной задаче – наоборот, считают, что условия const на внутренней поверхности ОК $\Theta_e' = \Theta_{eo}$ поля потенциала влажности переходит только под влиянием изменившихся условий на наружной поверхности Θ_n . Методика решения первой и второй частных задач соответствует рассмотренной в предыдущем разделе. Определенные двумя частными решениями поля складывают и получают исходное поле потенциала влажности в сечении ОК.

При расчете высушивания ОК в начале эксплуатации здания достаточно определить изменение его средней по сечению влажности во времени. Для этого можно воспользоваться приближенным аналитическим решением в виде... (методом электротепловой аналогии См.Богослов Строительная теплофизика стр.158)

$$\Theta = \frac{\bar{\Theta}_z - \Theta_\infty}{\Theta_0 - \Theta_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} F_0\right) \quad (12.1),$$

где Θ - относительно избыточное значение среднего по сечению потенциала влажности $\bar{\Theta}_z$ материала в ОК;

F_0 - критерий Фурье, определенный для очередного по сечению ограждения и во времени $\left(\frac{x}{\eta\rho_0}\right), \frac{M^2}{r}$; $\bar{\Theta}_0, \bar{\Theta}_\infty$ - средние по сечению потенциалы влажности материала в ОК

соответственно в начальный момент времени при $F_0=0$ и в установившемся равновесном состоянии в конце процесса, когда $F_0 \rightarrow \infty$ В последнем случае $\bar{\Theta}_\infty = \frac{\Theta_B + \Theta_n}{2}$ (12.2)

При малых интервалах времени для которых $F_0 < 0.1$, решение (12.1) можно упростить.

$$\Theta = 1 - 2\sqrt{\frac{F_0}{\pi}} \quad (12.3)$$

Форма записи решения в виде (12.3) удобна для поэтапного расчета, при котором можно учесть изменение определенного отношения $\left(\frac{x}{\eta\rho_0}\right)$ по мере изменения потенциала влажности материала $\bar{\Theta}_2$ во времени (см.пример2).

12.2. Учет влажности режима при работе теплопередачи через ОК.

Влажное состояние ОК м.б. условно разделено на : эксплуатационное соответствующее основному периоду продолжительности и регулярной эксплуатации зданий, и начальное, соответствующее первым годам – после заселения здания (рис12.1).

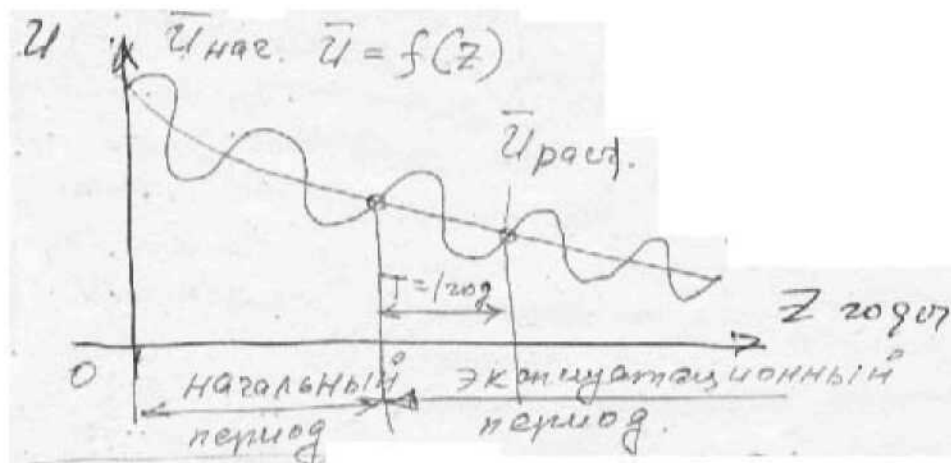


Рис.12.1. Схема изменения средней влажности материала $\bar{U}$ в ОК с начала эксплуатации здания.

Эксплуатационное влажностное состояние ОК наступает, когда влагосодержание материалов ОК приближается к некоторому стабильному состоянию, равновесному относительно воздействующим на ОК внутренней и наружной средам.

Влагосодержание в этот период циклически изменяется в течении года, $\uparrow$ к концу зимы и $\downarrow$ к концу лета. В середине зимы (декабрь-январь) значение влажности и близки к средним за год. Теплотехнический расчет ОК и подсчет теплотерь помещениями проводится для этого периода, поэтому выбор теплофизических характеристик материалов ОК должен производиться исходя из данных о среднегодовой влажности материалов в ОК.

Наиболее полно влажностное состояние м.б. описано с помощью потенциала влажности Θ и относительного потенциала влажности ϕ_{θ} . Пользуясь Θ и ϕ_{θ} можно оценить влажностное состояние внутренней среды помещения материалов в конструкции ограждения и комплексное влажностное воздействие на ограждение наружной среды. Материалам, подвергаясь тепловлажностному воздействию окружающей среды, приобретает некоторую равновесную этой среде влажность: она соответствует определенным значениям Θ , t и ϕ_{θ} . В условиях стационарной влагопередачи ОК имеет некоторое равновесное совместимому действию внутренней и наружной сред влажностному состоянию. В однослойном ограждении, если принять коэффициент влагопроводности материала const и коэффициенты влагообмена на поверхностях ОК, одинаковыми, то среднее значение потенциала влажности толщи ОК $\rightarrow \Theta_T$ равно.

$$\Theta_T = (\Theta_B + \Theta_H) / 2 \quad (12.4),$$

где Θ_B Θ_H - потенциалы влажности соответствующие внутренней и наружной средам.

Для расчета средних за годовой период условий достаточно рассмотреть стационарную влагопередачу. Эксплуатационная влажность материалов ОК необходимая для расчета, равна среднегодовому значению в условиях установившихся периодических изменений воздействия окружающей среды. Зависимость (12.4) можно использовать для определения сложной характеристики – среднегодового значения потенциала Θ_H наружной среды.

$$\Theta_H = 2\Theta_T - \Theta_B \quad (12.5)$$

Комплексное тепловлажностное воздействие наружного климата на ОК, которое названо и определено как потенциал влажности наружного климата Θ_H определяется следующими параметрами климата: температурой t_H и влажностью ϕ_H , интенсивностью и продолжительностью осадков i_H , направленностью и скоростью ветра V_H и интенсивностью и продолжительностью солнечной радиации q .

В настоящее время делаются попытки найти зависимость

$$\Theta_H = f(t_H, \varphi_H, i_H, V_H, q) \quad (12.6)$$

На рис.12.2 (П.17 Богослов.) приведены результаты подобных расчетов для Москвы, Ленинграда, Ташкента. Но такие методы расчета еще не достаточно опробованы, поэтому необходимо для расчета ОК среднегодовые значения. Θ_H В настоящее время наиболее надежно Θ_H м.б. определен с помощью (П.77.) (12.5.) по данным наблюдений Θ_T



Рис.12.2. Годовой ход потенциала влажности наружного климата Θ_H полученные расчетом по данным метеорологических наблюдений.

Величину Θ_B в (12.5.) для помещений общего значения достаточно точно можно принять равную среднему за год значению потенциала влажности внутреннего воздуха. (См.рис.П.10. из примера 2).

Для многих географических пунктов имеются данные натурных наблюдений за влажностью однослойных кирпичных и шлакобетонных стен зданий, эксплуатирующихся длительное время. Потенциал влажности Θ_B в (12.5.) можно определить по оптимальным данным с помощью зависимости $U(\Theta, t)$ зная среднегодовое значение температуры и влажности материала толщи ОК.

Для городов (опорных) Ленинград, Москва и Иркутск по работе Б.Ф.Васильева (Натурные исследования температурно-влажностного режима крупнопанельных зданий. М.1968г.) приведены среднегодовые влажности кирпичные стен для зданий, длительное время находившихся в эксплуатации. На рис.12.3. показана зависимость $U(\Theta, t)$ для красного кирпича с помощью которой зная среднегодовое значение влажности Ut и температуры t кирпичных стен зданий можно найти Θ_T .

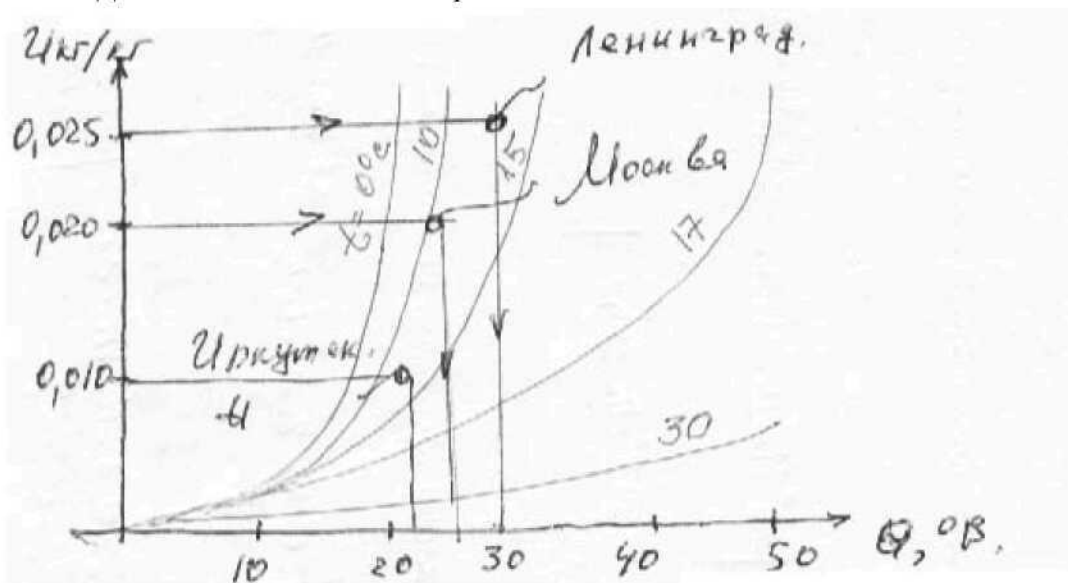


Рис.12.3. Зависимость $U(\Theta, t)$ для красного кирпича с нанесенной на нее значениями многолетних среднегодовых влажностей кирпичных стен.

В таблице 12.1. (П.3.Богослов стр.133) приведены данные, по которым были рассчитаны Θ_B , Θ_T и Θ_H .

К зонам с одинаковым увлажнением ОК относятся районы с резко отличными температурными условиями. В связи с этим потенциал влажности Θ_H заметно изменяется внутри зоны.

Относительный потенциал влажности наружной среды различных влажностных зон.

Табл.12.1.

Город	Влажностная зона По СНиП 2.01.01-82	Характеристика тепловлажностного состояния								
		Внутренний микроклимат			Толщины ОК			Наружного климата		
		t_B	φ_B	Θ_B	t_T	U_T	Θ_T	$t_{год}^{cp}$	Θ_H	$\varphi_{\Theta H}$
Ленинград	Влажная	18,7	59,1	29,0	11,5	0,025	32,0	4,2	35,0	2,1
Москва	Нормальная	18,8	59,1	30,0	11,2	0,020	30,0	3,6	30,0	2,0
Иркутск	сухая	18,7	59,0	29,0	8,8	0,010	25,0	-1,2	21,0	1,5

Учитывая это обстоятельство для оценки уравнения воздействия на ОК климата отдельных влажностных зон удобно воспользоваться шкалой относительных потенциалов влажности.

Если измерить уровень влажностного воздействия в шкале φ_{Θ} для отдельного географического пункта, расположенного в определенной влажностной зоне, то это значение $\varphi_{\Theta H}$, можно распространить на всю зону, в таблице 12.1. приведены величины $\varphi_{\Theta H}$ трех влажностно-климатических зон и использованы для этого данные о Θ_H и t_H в Ленинграде, Москве и Иркутске. Потенциал влажности Θ_H для любого района внутри зоны можно вычислить по φ_H и среднегодовой t_H в данном районе, пользуясь зависимостями $\varphi_{\Theta}(U_{\Phi B})$ и $U_{\Phi B}(\Theta, t)$, приведенными на рис.П.6 и П.7 (см.лекции 9 рис.9.1. и пример 2 рис.П.7).

В таблице 12.1. (П.3) потенциал Θ_B приближенно определен для жилых помещений. В общем случае влажностное состояние в помещении следует также оценивать в шкале относительного потенциала влажности. Средние за год параметры внутреннего воздуха в помещениях одного назначения зависят от места постройки здания. Оценивая влажностный режим различных помещений величиной $\varphi_{\Theta B}$ можно по фактическим данным о t_B определить потенциал влажности Θ_B внутренней среды. В таблице 12.2. (П.4) приведены значения $\varphi_{\Theta B}$, полученные расчетом для помещений четырех градаций влажностного режима, принятых в СНиП.

Относительный потенциал влажности внутренней среды помещений с различными влажностными режимами.

Таблица 12.2. (П.4)

Помещения	Среднегодовые условия в помещении				Предполагаемая градация.	
	t_B	φ_B	Θ_B	$\varphi_{\Theta B}$	Влажностный режим	$\varphi_{\Theta B}$
Проектное бюро, чертёжный зал, библиотека.	19	45	23	0,44	сухой	До 0,45
Жилой дом, поликлиника, детсад, ясли.	19	50	24,5	0,51	Нормальный	До 0,45
Душевые и раздевалки	25	59-75	37-61	0,47-0,67	Влажный	До 0,66
Бани, прачечные.	30	75	110	0,66	Мокрый	70,66

Имея значения Θ_B и Θ_H , можно определить среднегодовое, эксплуатационное влажностное состояние произвольного слоя материала многослойной ОК. Потенциал влажности Θ_{cl} ОК, соответствующий этому состоянию равен

$$\Theta_{cl} = \Theta_B - \bar{H}_{B-cl} (\Theta_B - \Theta_H) \quad (12.7),$$

где $\bar{H}_{B-cl}$ - отношение сопротивления передаче влаги от внутренней среды помещения до середины рассматриваемого слоя к общему сопротивлению влагопередаче ОК.

Эксплуатационная влажность слоя зависит не только от Θ_{cl} , но и от средней за год температуры t_{cl} , которая определяется по зависимости аналогичной (12.7), поэтому влажностное состояние материала в ОК также определяют относительным потенциалом влажности $\varphi_{\Theta cl}$. Между $\varphi_{\Theta cl}$ и влажностью материала (при известной t) имеется прямая зависимость, которая позволяет установить связь между рассматриваемой методикой расчета влажностного состояния материальных слоев в ОК и рекомендациями по выбору теплофизических характеристик, которые соответствуют различной степени увлажнения материала. Выбор характеристик производят в зависимости от влажностного режима помещения и зоны строительства.

В нормативном методе (по СНиП) не учитывается расположение материального слоя в конструкции, поэтому его можно применять только для однослойных ОК. В табл.12.3.(П.5.) приведены данные расчетов с учетом полученных значений $\varphi_{\Theta, H}$ и $\varphi_{\Theta, B}$, которые позволили определить диапазоны значений $\varphi_{\Theta, cl}$, соответствующих трем градациям норм, для выбора теплофизических характеристик материалов (графы А, Б и Б* табл1 СНиП II-3-79 Строительная теплотехника)

Табл.12.3 (II.5)

Эксплуатационное тепловлажностное состояние материалов в однородной ОК и соответствующие графы градации, принятых в СНиП							
Влажностный режим помещений.		Графа и $\varphi_{\Theta,cl}$ соответствующие влажностным законам строительства.					
режим	$\varphi_{\Theta, B}$	Сухая $\varphi_{\Theta, H}=1,5$		Нормальный $\varphi_{\Theta, H}=2,0$		Влажная $\varphi_{\Theta, H}=2,15$	
		графа	$\varphi_{\Theta, cl}$	графа	$\varphi_{\Theta, cl}$	графа	$\varphi_{\Theta, cl}$
Сухой	До 0,45	А	0,97	А	1,22	Б	1,3
Нормальный	До 0,53	А	1,01	Б	1,27	Б*	1,34
Влажный	До 0,66	Б	1,08	Б*	1,33	Б*	1,4
Мокрый	Больше 0,66	Б	Больше 1,08	Б*	Больше 1,33	Б*	Больше 1,4

Приведенные в табл.12.3. (II.5.) значения $\varphi_{\Theta, cl}$ получены приближенно как средние по $\varphi_{\Theta, B}$ и $\varphi_{\Theta, H}$.

Как видно из табл.12.3. для однородных ОК вероятно правильно относить к гр Б* ограждения любых зданий во влажной зоне и мокрых помещений всех трех зон; ОК зданий трех других влажных режимов, расположенных в зоне с нормальным влажным – к группе Б, а расположенных в сухой зоне – к группе А.

В этом случае отпадает необходимость в разбивке на большое число слоев и интервалы времени и расчет значительно упрощается. При прикидочном расчете вообще отпадает необходимость в разбивке и учете изменчивости характеристик материалов и тогда он оказывается таким же простым как и для температурного поля, с той лишь разницей, что необходимо правильно выбрать осредненные (по сечению ОК и во времени) значения влагопроводности и влагоемкости материала.

Л.13. Зимний, летний и годовой режимы тепло-массообмена.

13.1. Зимний режим помещения.

13.1.1. Обеспеченность расчётных условий.

Тепловые условия должны соответствовать функциональному назначению помещения и предъявляемым к нему санитарно-гигиеническим требованиям. В промышленных зданиях можно выделить несколько групп помещений приблизительно с одинаковыми условиями. Кроме санитарно-гигиенических и технологических требований, определяющих необходимый уровень внутренних условий важным являются требования определяющие надёжность поддержания заданных внутренних условий, т.е. требования к их обеспеченности.

Обеспеченность заданных внутренних условий определяется выбором расчётных параметров наружного климата. Т.е. для этого необходимо удовлетворять требования обеспеченности заданных внутренних условий при выборе параметров наружного климата, необходимых для расчёта теплозащиты ОК и тепловой мощности отопления. Обеспеченность условий определяют коэффициентом обеспеченности $K_{об}$, величина которого показывает долю общего числа случаев, не допускающих отклонений от расчётных условий.

Параметры климата для каждого случая связаны с определённой продолжительностью, поэтому с помощью коэффициента обеспеченности можно характеризовать выдерживание во времени расчётных условий. Сопоставление расчётных условий с параметрами климата *тах* обеспеченности позволяет выяснить величину и продолжительность *тах* разового отклонения невозможных условий от расчётных. Обеспеченность $K_{об}$ в зависимости от температуры наружного воздуха t_n и скорости ветра V_n определяется следующей теоремой:

$$K_{об}(t_n, V_n) = K_{об}(t_n) (K_{об}(V_n / t_n)) \quad (13.1),$$

где $K_{об}(t_n)$ – обеспеченность появления заданной температуры наружного воздуха; $K_{об}(V_n / t_n)$ – условная обеспеченность появления скорости ветра V_n при заданной t_n . Запись (13.1) теоремы можно упростить, если принять во внимание следующее. Если условия обеспеченности появления второго события $K_{об}(V_n / t_n)$ принять равной 1, то обеспеченность 2^х событий будет равна обеспеченности первого $K_{об}(t_n)$, т.е.

$$K_{об}(t_n, V_n) = K_{об}(t_n) \text{ при } K_{об}(V_n / t_n) \approx 1 \quad (13.2).$$

Расчётное изменение t_n должно соответствовать заданному коэффициенту обеспеченности $K_{об}(t_n) = K_{об}(t_n, V_n)$, а расчётное значение V_n нужно принять исходя из наиболее невыгодного сочетания параметров (*тах* значения V_n при разных t_n), т.е. сочетания отвечающих условию $K_{об}(V_n / t_n) = 1, 0$. Обеспеченность появления 2^х независимых событий (например, некоторых значений t и солнечной радиации) равна произведению обеспеченности появления температуры $K_{об}(t_n)$ и радиации $K_{об}(q)$, т.е.

$$K_{об}(t_n, q) = K_{об}(t_n) K_{об}(q) \quad (13.3).$$

Следствием этой теоремы является, например, такая запись:

$$K_{об}(t_n, q) = K_{об}(t_n) \quad (13.4),$$

которая справедлива при $K_{об}(q) = 1, 0$.

В табл. 13.1. приведены величины коэффициента обеспеченности $K_{об}$ для зданий и помещений с различными эксплуатационными режимами в расчётных зимних условиях для принятого ряда случаев при обработке климатических данных. Коэффициент обеспеченности расчётных условий для холодного периода года.

Табл. 13.1.

Характеристики основных помещений	Уровень требований	Коэффициент обеспеченности
Особо высокие требования к санитарно-гигиеническим условиям.	Повышенный (П)	$\approx 1,0$
Круглосуточное пребывание людей или постоянного технологического режима.	Высокий (В)	0,9
Ограниченное во времени пребывание людей.	Средний (С)	0,7
Кратковременное пребывание людей.	Низкий (Н)	0,5

Примечание: Значение $K_{об}$ получены на основе сопоставления с действующими в настоящее время рекомендациями.

13.2. Характеристики наружного климата.

При выборе расчётных параметров зимнего климата нужно исходить из следующих предпосылок. Расчётные параметры климата д.б. общими для расчёта всех составляющих теплового режима помещения (теплозащита ограждения, теплопотери и др.) т.к. они отражают единый процесс теплопередачи через ОК. Расчётные значения и сочетания параметров, должны определяться с учётом коэффициента обеспеченности. Данные о расчётных климатических условиях должны учитывать необходимость анализа нестационарного процесса теплопередачи, т.к. в расчётные наиболее холодные периоды зимы происходит быстрое изменение t_n , в то время как ОК обладают теплоинерционностью. Основным показателем климата холодного периода является изменение t_n . В видимой хаотичности значений t_n можно обнаружить определённую закономерность. Это прежде всего годовые и суточные колебания t_n . Для получения обобщенной температурной кривой расчётного периода обрабатываются данные наблюдений методами математической статистики примерно за десять последних лет. Расчётные графики изменения t_n в период резкого похолодания для разных $K_{об}$, построенные для Москвы по данным наблюдений за 50-и летний период приведены на рис. 13.1.

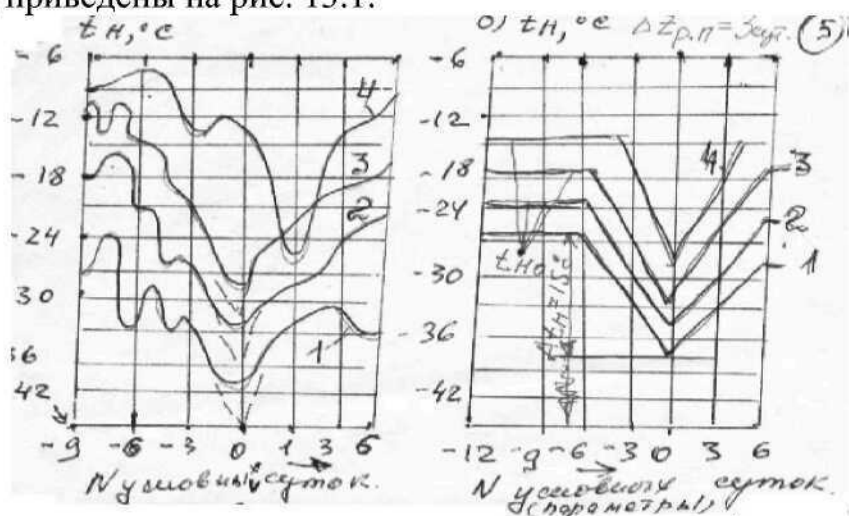


Рис. 13.1. Расчётные зимние параметры наружной температуры: а – кривые изменения среднесуточной t в период резкого похолодания при коэффициентах обеспеченности 0,98(1), 0,90(2), 0,70(3), 0,50(4). Пунктиром отмечен ход t_n в наиболее холодные сутки; б – расчётные кривые изменения t в период резкого похолодания для Москвы при тех же коэффициентах обеспеченности.

Расчётные кривые для разных географических пунктов и для разных коэффициентов обеспеченности м.б. определены 3^{мя} характеристиками: температурой начала периода резкого похолодания $t_{но}$, отклонением t в этот период от $t_{но}$ до $\min t_{н.мин}$, т.е. $\Delta t_n = t_{н.о} - t_{н.мин}$ и продолжительностью периода резкого похолодания ($Z_{p.n}$ (время понижения t от $t_{н.о}$ до $t_{н.мин}$)). Эти показатели для Москвы при разных $K_{об}$ приведены в табл.13.2.

Расчётные параметры климата холодного периода года для Москвы при разных коэффициентов обеспеченности. Табл.13.2.

Коэффициент обеспеченности $K_{об}$	Расчетные характеристики климата.			
	$t_{но}, ^\circ C$	$\Delta t_n, ^\circ C$	$\Delta z_{pл.сут}$	$V_n, \frac{м}{с}$
0,98	-26,4	15,8	3	2,6
0,9	21,5	14,9	3	3,0
0,7	-17,2	14,9	3	3,4
0,5	-13,9	15,8	3	3,8

Данные для Москвы характерны тем, что Δt_n и ($Z_{p.n}$ практически не зависят от коэффициента обеспеченности и м.б. приняты $const$ - ($Z_{p.n}=3сут.$ И $\Delta t_n=15^\circ C$ (рис. 13.1.б) Для получения расчётных скоростей ветра при условии (13.2) необходимо получить зависимость V_n от t_n соответственно $K_{об}(V_n/t_n)=1$. Эта зависимость наиболее невыгодных сочетаний t_n и V_n определяет max скорости ветра, которые наблюдались при различных t_n . На рис. 13.2. показана такая зависимость для Москвы. На графике проведена прямая линия, которая достаточно хорошо отражает общую закономерность уравнения этой прямой имеет вид:

$$V_H=5+0,143(t_n+26)=8,72+0,143t_n \quad (13.5).$$

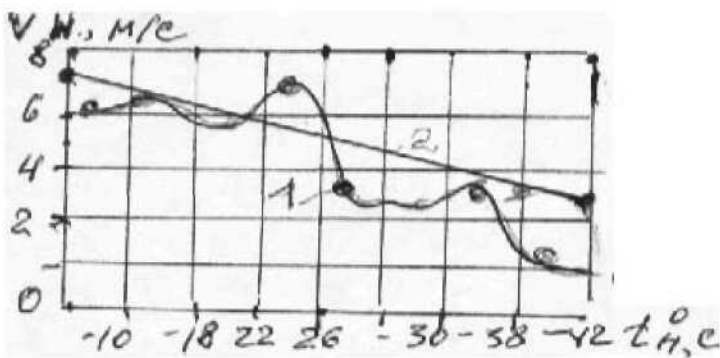


Рис.13.2. Зависимость скорости ветра V_n от t_n : 1-наибольшие осреднённые значения скорости ветра при разных значениях t , полученные для наиболее суровых периодов зимы; 2-зависимость расчётной скорости ветра от t_n при значениях условной обеспеченности $K_{об}(V_n/t_n)=1$.

При медленном понижении t_n до начала периода резкого похолодания, распределение t в ОК в каждый момент времени практически соответствует стационарному. (рис. 13.3).

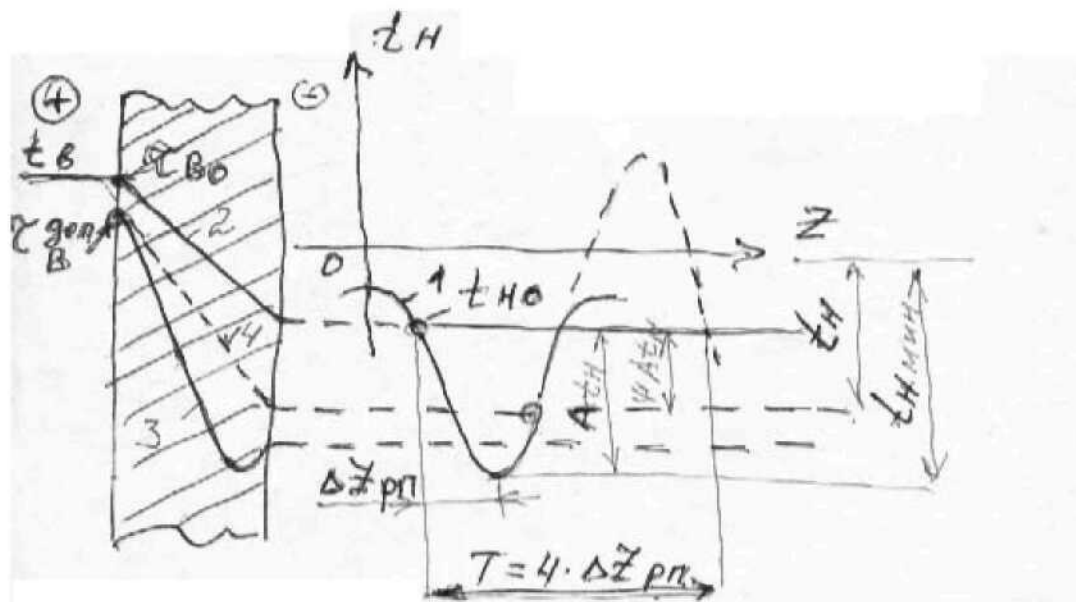


Рис. 13.3. Распределение t в сечении ОК при расчётном изменении t .

1-расчётная кривая изменения t_n ; 2-расчётная предельная t в толще стены перед началом периода резкого похолодания (стационарное состояние); 3-Распределение t в стене в момент времени соответствующий $\min t$ на внутренней поверхности ОК (в нестационарном режиме теплопередачи); 4-расчётное распределение t в стене в стационарных условиях, когда t на внутренней поверхности равна $\min$ значению в соответствии с кривой 3. В период резкого похолодания нельзя пренебрегать нестационарностью режима теплопередачи, т.к. в этот период в каждый момент времени распределение t заметно отличается от стационарного. Изменение t на внутренней поверхности ОК – τ_s будет заметно отставать от изменения t_n .

Понижение τ_s за период похолодания (Z_{pm}) меньше на $A\tau_s$, определённого для стационарного режима.

Для определения распространения t при стационарной теплопередаче отношение между амплитудами

$$A\tau_s/A t_n = R_s/R_o \quad (13.5),$$

где $R_s = 1/\alpha_s$ – сопротивление теплоотдаче внутренней поверхности, $m^2/K \cdot Bm$.

R_o – сопротивление теплопередачи ОК, $m^2/^\circ C \cdot Bm$.

Это отношение в условиях нестационарной теплопередачи период резкого похолодания для ОК определённого тепловой инерцией запишется в виде:

$$A\tau_s/\psi A t_n = R_s/R_o \quad (13.6),$$

где ψ – коэффициент теплоинерционности ОК, учитывающий нестационарность теплопередачи. Коэффициент $\psi < 1$. Он показывает какую долю от $A t_n$ нужно принять в расчёт, чтобы пользуясь формулой (13.5) стационарной теплопередачи получить значение $A\tau_s$, которое будет соответствовать фактическому в условиях нестационарной теплопередачи через ОК.

Расчётная наружная t_n с учётом теплоустойчивости ОК и коэффициента ψ определяется в виде:

$$t_n = t_{n,0} + \varphi A t_n \quad (13.7).$$

Зависимость расчётной t_n от тепловой массивности ОК $D=RS$ и коэффициента обеспеченности для условий г.Москвы приведена на рис. 13.4.

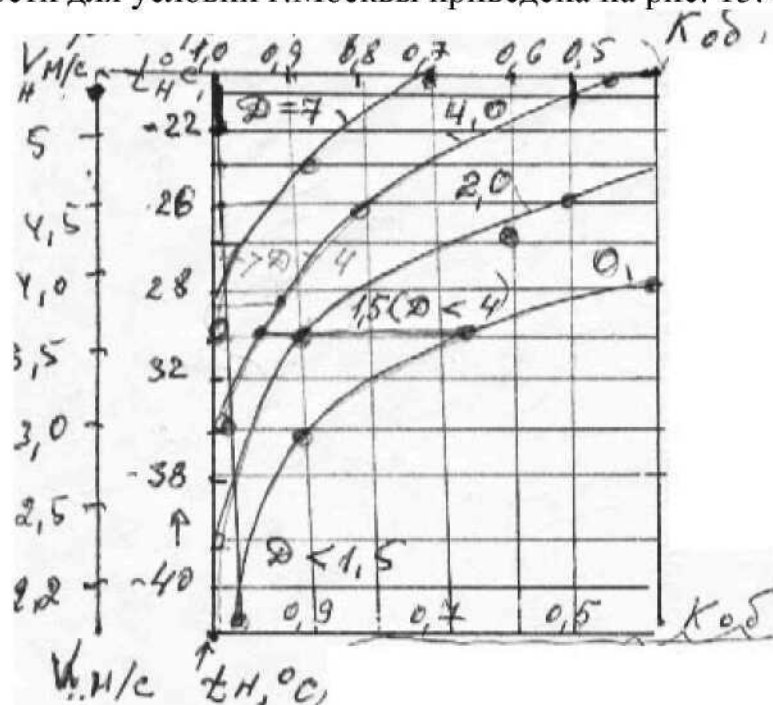


Рис. 13.4. Зависимость расчётной t_n и скорости ветра V_n для отдельных ОК от её тепловой массивности D при разных коэффициентах обеспеченности $K_{об}$.

Коэффициент обеспеченности ОК как это следует из формулы (13.6) можно определять по формуле:

$$\varphi = R_o / (R_o \cdot v) \quad (13.8),$$

где $v = A t_n / A \tau_o$ – показатель сквозного затухания в ОК разового отклонения $A t_n$ при изменении t по расчётной кривой периода резкого похолодания. Для определения (можно воспользоваться формулой:

$$v = v_{min} = R_o / R_o \quad (13.8)$$

Выбор расчётной t_n зависит (по СНиП) от степени тепловой инерции ОК.

Тепловая инерция D рассчитана для колебаний с периодом $T=24$ ч. Расчётная t_n принимается в зависимости от D в соответствии с данными:

D	<1,5	1,5-4,0	4-7	>7,0
t_n	t_{min}	t_1	$\frac{t_1 + t_5}{2}$	t_5

где t_1 – абсолютная $min t_n$ наиболее холодных суток; t_5 – t наиболее холодной пятидневки (по СНиП) t_1 и t_5 – средние за 8 наиболее суровых зим последних 50 лет.

На рис. 1.3. показаны сопоставляющие этих данных со значениями t_n определёнными при разных $K_{об}$ и D по формуле (13.7) и табл. (13.2). Расчёт V_n по СнИПу прием = средней за январь с учётом повтора ветра на местности по основным направлениям с поправкой на высоту здания.

13.3 Защитные свойства наружных ОК.

Ограждения здания должны обладать требуемыми теплозащитными свойствами и быть в достаточной степени воздухо- и влагонепроницаемыми.

Теплозащитные свойства ОК (наружных) определяются 2^{мя} показателями: величиной сопротивления теплопередаче R_o и теплоустойчивости (характеристика тепловой инерции D). Теплоустойчивость характеризует сопротивляемость ОК теплопередаче изменяющейся во времени периодических тепловых воздействий.

Необходимым является условие, при котором R_o д.б. равно или больше $\min$ допустимого по санитарно-гигиеническим соображениям (требуемого) сопротивления R_o теплопередаче, т.е. $R_o \geq R_{mp}$. (см. лекцию N 4). Однако этого условия недостаточно, т.к. при определении R_o должны учитываться технико-экономические показатели. Если окажется, что экономически оптимальным сопротивлением $R_{o\,opt}$ теплопередаче $> R_{o\,mp}$, то расчётное сопротивление должно определяться по условию $R_o \approx R_{o\,opt}$ (13.9). В этом случае сопротивление $R_o > \min$ допустимого и целесообразного в экономическом отношении. После определения R_o наружной ОК необходимо проверить теплозащитные свойства элементов конструкции (стыки, углы, включения). Необходимым и достаточным условием этого расчёта является отсутствие выпадения конденсата на внутренней поверхности ОК.

Для расчёта теплотерь и тепловых условий в помещении часто необходимо кроме R_o рассчитывать приведённое сопротивление R_{opr} теплопередаче ОК.

Недостаточную теплоустойчивость ОК для зимнего периода учитывают $\uparrow$ его сопротивления теплопередаче при расчёте R_{opr} . Допустимая воздухопроницаемость окон, дверей, стыков ОК стен и перекрытий здания определяется нормируемым сопротивлением $R_{н.тп}$ воздухопроницанию, расходом воздуха, дополнительными затратами тепла, понижением t поверхности ОК при инфильтрации.

Влагозащитные свойства ОК должны исключать переувлажнение материалов атмосферной влагой и за счёт диффузии водяных паров из помещения. Процессы передачи тепла, фильтрации и переноса влаги взаимосвязаны и одно явление оказывает влияние на другое, поэтому определение сопротивления тепло- воздухо- и влагопередаче должно проводиться, как общий расчёт защитных свойств наружных ограждений здания.

л15. Расчет поступления тепла в помещение через наружные ограждения.

В тепловом балансе современных зданий с легкими ОК и большими остекленными поверхностями существенную роль играют теплопоступления через наружные ОК. Приток тепла через ОК является нестационарным и зависит от изменений температуры наружного воздуха и интенсивности солнечной радиации.

Помещение может иметь ОК двух характерных категорий: массивные непрозрачные (наружные стены и покрытия) и немассивные лучепрозрачные (окна, витражи, фонари). Теплопередача через них происходит различно.

На рис.(15.1) показана схема, поясняющая принятую последовательность расчета поступления тепла в помещение.

15.1. Поступление тепла через массивные непрозрачные ограждения.

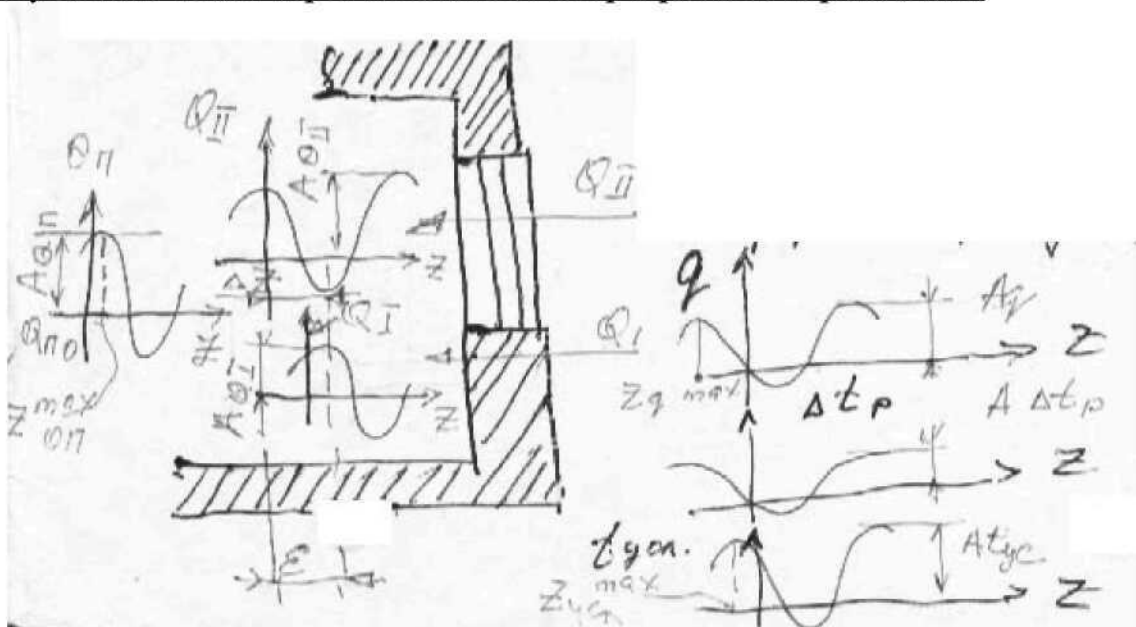


Рис.15.1. Схема последовательности расчет поступления тепла в помещение через наружные ограждения.

Изменения t_n в расчетные летние сутки были определены ранее среднесуточной t_{HO} и амплитудой изменения A_{t_n} . Интенсивная сумма радиационной характеризующейся среднесуточным значением q_0 и амплитуда изменения интенсивности A_{q_0} .

Теплопередачу через ограждения при совместном действии разности Δt и теплового облучения наружной поверхности, пользуясь условной температурой наружного воздуха $t_{усл}$ равной:

$$t_{усл} = t_n + \Delta t_p = t_n + p \cdot q / \alpha_n \quad (15.1),$$

где $\Delta t_p = p \cdot q / \alpha_n$ - температурная добавка, эквивалентная действию солнечной радиации;

α_n - коэффициент теплопередачи на наружные поверхности ОК;

p - коэффициент поглощения тепла солнечной радиации поверхности ОК.

Значения коэффициента p поверхности различных строительных материалов приведены в таблице 1.1.

Значения относительного коэффициента излучения ϵ при ($t = 0 - 150^\circ\text{C}$) и относительного коэффициента поглощения солнечной радиации p при ($t \approx 6000^\circ\text{C}$) поверхности различных строительных материалов.

Таблица 1.1.

Наименование материала и состояния поверхности ОК.	ε	p
Мрамор шлифованный:		
Серый.....	0,93	0,30
Темный.....	0,93	0,65
Известняк шлифованный:		
Светлый.....	0,40	0,35
Темный.....	0,40	0,50
Штукатурка:		
Светлая.....	0,91	0,42
Темная.....	0,91	0,73

В условиях стационарной теплопередачи поток тепла, проходящий через ОК, при совместном действии разности температур и потока солнечной радиации определяется (рис.15.2) разностью условной $t_{усл}$ наружного воздуха и температуры помещения.

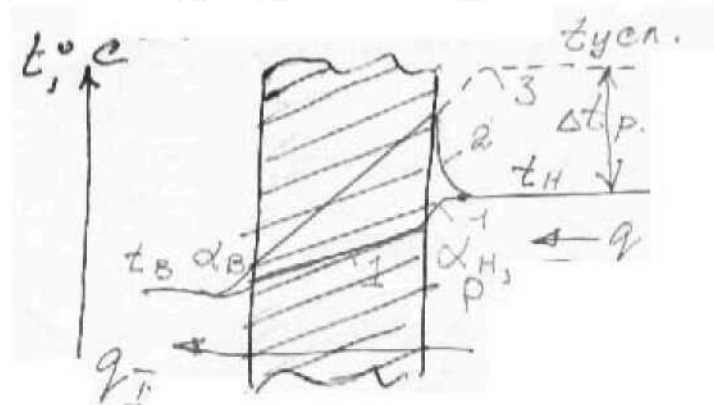


Рис. 15.2. Распределение температуры в сечении ОК при наличии только разности температур (1), при совместном действии разности температур и падающего на поверхность ОК потока солнечной радиации (2) и распределение температур с использованием условной наружной $t_{усл}$.

При нестационарной теплопередаче значения $t_{усл}$ изменяются во времени. В течении суток величина Δt_p изменяется так, что во времени ее колебания совпадают с $q \cdot (\Delta t_p = p \cdot q / \alpha_H)$ - температурная добавка, эквивалент действия солнечной радиации) среднее за сутки значение Δt_{p0} и амплитуда $A_{\Delta t_p}$ равна:

$$\Delta t_p = p \cdot q / \alpha_H \cdot A_{\Delta t_p} = p \cdot A_q / \alpha_H \quad (15.2).$$

Для того, чтобы получить $t_{усл}$ воспользуемся правилом сложения гармоник, в данном случае t_H и Δt_p изменение $t_{усл}$ определяется средним за сутки значением $t_{усл}$:

$$t_{усл.0} = t_{H.0} + \Delta t_{p0} = t_{H.0} + \frac{p \cdot q}{\alpha_H} \quad (15.3).$$

амплитуда колебаний $t_{усл}$:

$$A_{t_{усл.0}} = (A_{t_H} + A_{\Delta t_p}) \cdot \psi \quad (15.4)$$

и временем суток $\max t_{усл}$:

$$z_{t_{усл}}^{\max} = z_1^{\max} \pm \sigma \quad (15.5),$$

где σ - величина сдвига по времени колебаний t_{ycl} относительно случайного колебания с большой амплитудой. Величину σ и коэффициента ψ определяют по графику IV.7 (см. Богословский. «Строительная теплофизика» стр.235.) в зависимости от отношения амплитуд $A_{\Delta t_p}$ и A_{t_H} и разницы во времени колебаний t_H и Δt_p ,

$$\Delta z = |z_{t_H}^{\max} - z_{\Delta t_p}^{\max}|$$

Колебания температуры на внутренней поверхности ограждения τ_B зависят от изменения условий наружной t_{ycl} и их можно определить по формулам IV. (см. Богословский. «Строительная теплофизика»), зная показатели сквозного затухания ν и сдвига по фазе ε для данной ОК.

Поступление тепла Q_1 через всю площадь F_1 массивного непрозрачного (обозначим I) ограждения (пример наружной стены) будут изменяться, следуя за τ_B по закону гармонического колебания. Среднее за сутки значение тепlopоступлений Q_{10} равно:

$$Q_{10} = \alpha_{B1}(\tau_{10} - t_H) \cdot F_1 = K_1(t_{ycl,10} - t_H) \cdot F_1 \quad (15.6)$$

Амплитуда колебаний этих поступлений A_{Q_1} равна:

$$A_{Q_1} = \alpha_B \cdot A_{t_1} \cdot F_1 = \alpha_B \frac{A_{t_{ycl,1}}}{\nu} \cdot F_1 \quad (15.7)$$

Максимальное поступление тепла через ОК равно:

$$Q_1^{\max} = Q_{10} + A_{Q_1} \quad (15.8)$$

Во времени они будут на ε_1 час позднее $\max t_{ycl}^{\max}$.

$$z_{Q_1}^{\max} = z_{t_{ycl}}^{\max} + \varepsilon \quad (15.9)$$

Текущее значение Q_1 в произвольный момент времени z равно:

$$Q_1 = Q_{1,0} + \beta A_{Q_1} \quad (15.10).$$

15.2. Поступление тепла через светопрозрачные ограждения.

Основные поступления тепла в помещение летом происходят через окна. В помещение поступает коротковолновое излучение непосредственно проникающее ($q_{\Pi p}$) через остекление, а также конвективное тепло и длинноволновое излучение ($q_{\Pi T}$) за счет разности температур и поглощения солнечного тепла элементарными заполнениями оконного проема. Результирующая плотность потока тепла через окно q_{Π} можно представить (рис.15.3.) суммой : (15.11)

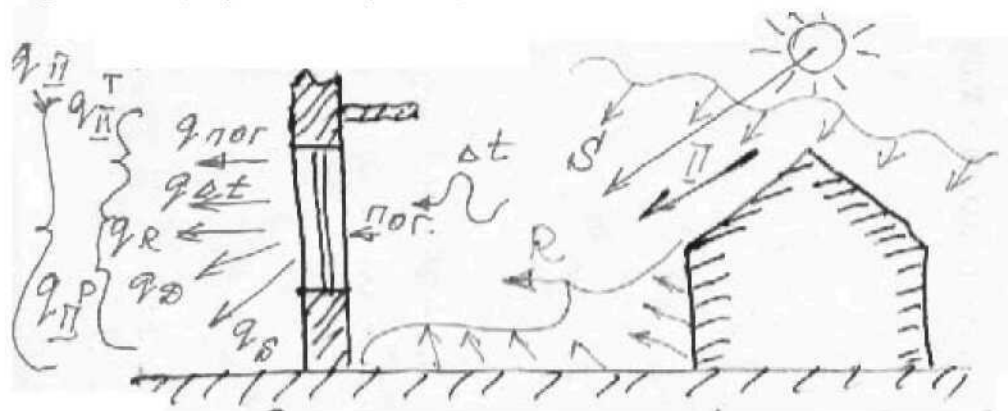


Рис.15.3. Влияющие факторы и составляющие тепlopоступления через окно.

$$q_{\Pi} = q_{\Pi p} + q_{\Pi T} = (q_s + q_D + q_R) + (q_{\Delta t} + q_{noz}) \quad (15.11),$$

где q_s, q_D, q_R - составляющая проникающей радиации $q_{\Pi p}$ - соответственно под влиянием прямой (S), рассеянной (D) и отраженной (R) солнечной радиации;

$q_{\Delta t} q_{\text{пот}}$ – составляющие потока тепла в результате теплопередачи $q_{\text{П.Т}}$ соответствует $q_{\Delta t}$ – за счёт разности Δt и $q_{\text{ног}}$ – поглощённого элемента заполнения солнечного тепла. Интенсивность проникающей радиации для вертикального оконного проёма обычно определяется в виде:

$$q_{\text{П.Р}} = (S_B \cdot K_{\text{П.С}} \cdot K_{\text{инс}} + D_B \cdot K_{\text{П.Д}} \cdot K_{\text{об}} \cdot K_R) \cdot (K_{\text{пер}} \cdot K_{\text{загр}} \cdot K_{\text{атм}}) \quad (15.12)$$

В этой формуле $q_{\text{П.Р}}$ – зависит от интенсивности прямой (S_B) и рассеянной (D_B) радиации на вертикальную поверхность, коэффициентов пропускания заполнения ($K_{\text{П.С}}$ и $K_{\text{П.Д}}$), влияние отражённой радиации (K_R), влияние переплётов окна ($K_{\text{пер}}$), его (окна) загрязнения ($K_{\text{загр}}$) и загрязнения атмосферы ($K_{\text{атм}}$). Основное влияние на $q_{\text{П.Р}}$ оказывают степень освещённости (инсоляции) солнцем поверхности окна ($K_{\text{инс}}$) и его облучённость рассеянной радиацией небосвода ($K_{\text{обл}}$).

Коэффициент инсоляции $K_{\text{инс}}$ = отношением освещенной солнцем площади окна ко всей его площади. Его расчёт ($K_{\text{инс}}$) связан с построением теней, падающих на поверхность окна от солнца защитных устройств, карнизов, откосов и т.д.

Длина тени l' и её положение определяется зависимостями:

$$l'/l = \operatorname{tg} \alpha / \cos \varphi_i \quad \varphi = \operatorname{arctg}(\sin \alpha \cdot \operatorname{ctgh}) \quad (15.13)$$

где l – вертикальный отрезок длиной l на поверхности любой ориентации.

l' – длина тени от любого затеняющего устройства.

α – солнечный азимут стены;

h – угол высоты стояния солнца.

Коэффициент облученности $K_{\text{обл}}$ окна небосводом исходя из закона замкнутости лучистых потоков равен:

$$K_{\text{обл}} = \varphi_{\text{ОК-неб}} = 1 - \sum \varphi_{\text{ОК-}i} \quad (15.14),$$

где φ – коэффициент облученности с поверхности окна в сторону небосвода и других его поверхностей.

Теплопередача через окно за счет разности температур и поглощения тепла может быть рассчитана по уравнениям теплообмена и теплового баланса одинарного или двойного остекления с учетом тепла солнечной радиации, поглощения стеклами.

Например, для двойного остекления:

$$q_{\text{ПТ}} = (q_{\text{ног}} + q_{\Delta t}) = (0,17P_1 + 0,636P_2)q + 2,5(t_H - t_B) \quad (15.15),$$

где P_1 и P_2 – коэффициенты поглощения соответственно первого и второго по ходу солнечного луча остекления (для обычного оконного стекла $P \approx 0,07$).

Из ф. (15.15) следует, что поглощение тепла вторым стеклом является основной составляющей $q_{\text{ПТ}}$. Следовательно, при применении специальных (поглощающих или отражающих) стекол необходимо иметь в виду, что второе стекло не должно быть поглощающим, желательно, чтобы оно было отражающим солнечные лучи. Участие каждой из составляющих (q), Вт/м² для двойного остекления в Москве в летних условиях оказывается следующим.

$q_{\text{П}}$	$q_{\text{ПР}}$	q_S	q_D	q_R	$q_{\text{ПТ}}$
100%	87%	52%	15%	20%	13%

Общие теплоступления в помещение за счет теплопередачи через массивные и лучепрозрачные ОК рассчитываются по правилу сложения. В простейшем случае, когда помещение имеет одно массивное ограждение (стена) и окно, средняя за сутки величина теплоступлений за счет теплопередачи через наружные ограждения $Q_{\text{огр},0}$ равен:

$$Q_{огр,0} = Q_{I,0} + Q_{II,TO} \quad (15.16),$$

а амплитуда общих тепlopоступлений:

$$A_{Q_{огр}} = (A_{Q_I} + A_{Q_{II,T}}) \cdot \psi \quad (15.17).$$

Если в помещении более двух ограждений, например, имеются различно ориентированные по сторонам света наружные стены, перекрытия, окна, то расчет общих тепlopоступлений за счет теплопередачи проводят попарным суммированием результатов: складывают поступления тепла через наружные стены и перекрытия с поступлениями тепла через окна и т.д.

Прерывистые тепlopоступления рассчитываются отдельно. Например, тепло проникающее через окно солнечной радиацией характеризуется величиной прерывистого тепlopоступления $Q_{II,P \max}$. Время его действия равно:

$$m' = \frac{Q_{II,P,0} \cdot 24}{Q_{II,P,\max}} \quad (15.16),$$

причем $Q_{II,P \max}$ соответствует середине теплопередачи. При совместном действии гармонических и прерывистых тепlopоступлений их сумма может быть приведена по рекомендациям изложенным в §VII.6 (см. Богосл. «Строительная теплофизика»).

Раздел 3.

Тепловой режим здания (всего 6 часов)

3.1. Основы теории теплообмена.

Теория теплообмена - это наука о процессах переноса теплоты. Ряд важных процессов проектирования и строительства зданий и сооружений решаются на основе теории теплообмена. Знание законов теплообмена позволяет инженеру строителю увязать толщину и материал ограждающей конструкции (ОК) с отопительными приборами (ОП) разработать новые строительные материалы и конструкции, более экономичные и способные надежно защищать человека от холода, жары и другие вопросы, которые возникают в процессе развития строительной техники.

3.1.1. Виды передачи теплоты.

Теплообмен представляет сложный процесс, который можно расчленить на ряд простых процессов. Различают 3 элементарных принципиально отличных один от другого процессов - теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

Процесс теплопроводности происходит при непосредственном соприкосновении (молекул, атомов и свободных электронов) сопровождающимся обменом энергии и их тепловое движение. теплопроводность в жидких и особенно в газообразных средах незначительна.

Твердые тела обладают различной теплопроводностью. Тела с малой теплопроводностью называют теплоизоляционными.

Процесс конвекции - происходит лишь в жидкостях и газах и представляет собой перенос теплоты в результате перемещения и перемешивания частиц жидкости или газа. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью.

Если перемещение частиц жидкости или газа обусловлено разностью их плотностей ρ , то такое перемещение называют естественной конвекцией. При естественной конвекции нагретые объемы теплоносителя поднимаются, охладившиеся - опускаются. Например, ОП системы центрального отопления соприкасаются с воздухом, передается от прибора в другие части помещения.

Если жидкость или газ (Ж и Г) перемещается с помощью насоса, то такое перемещение называют вынужденной конвекцией. Теплообмен в этом случае происходит значительно интенсивнее, чем при естественной конвекции.

Процесс теплового излучения - состоит в переносе теплоты от одного тела к другому электромагнитными волнами, возникающими в результате сложных молекулярных и атомных возмущений. Лучистая энергия возникает в телах за счет других видов энергии, главным образом тепловой. Электромагнитные волны распространяются от поверхности тела во все стороны. Встречая на своем пути другие тела, лучистая энергия может ими частично поглощаться превращаясь снова в теплоту (увеличивая t тела).

3.2. Теплопроводность.

Закон Фурье (1822г.) является основным законом теплопроводности, устанавливающим прямую (пропорциональную) зависимость между поверхностной плотностью теплового потока и температурным градиентом ($grad$):

$$q = -\lambda grad t \quad (3.1),$$

где λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м °С);

Знак минус указывает на то, что вектор теплового потока направлен в сторону противоположную $grad\, t$.

(Производная температуры перпендикулярная к изотермической поверхности называется $grad\, t = \frac{\partial t}{\partial n}$, град/м).

Коэффициент теплопроводности λ равен (=) удельному тепловому потоку q при $grad$ температуры t в 1 °C на единицу длины (или толщины).

Коэффициент теплопроводности является важной теплофизической характеристикой вещества: чем больше коэффициент теплопроводности λ , тем большей теплопроводностью обладает материал (вещество). Коэффициент λ зависит от: природы вещества, его структуры, влажности, наличия примесей, температуры t и других факторов.

В практических расчетах коэффициент λ строительных материалов необходимо принимать по СНИП II-3-79* "Строительная теплотехника".

Рассмотрим однослойную (рис.3.1.) плоскую стенку толщиной δ , коэффициент теплопроводности которой постоянен ($const$) и равен λ .

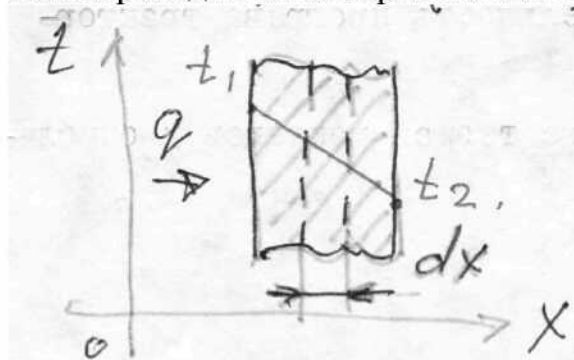


Рис. 3.1 (Тихомиров стр.58 рис. 2.2)
Распределение t в однослойной плоской стенке.

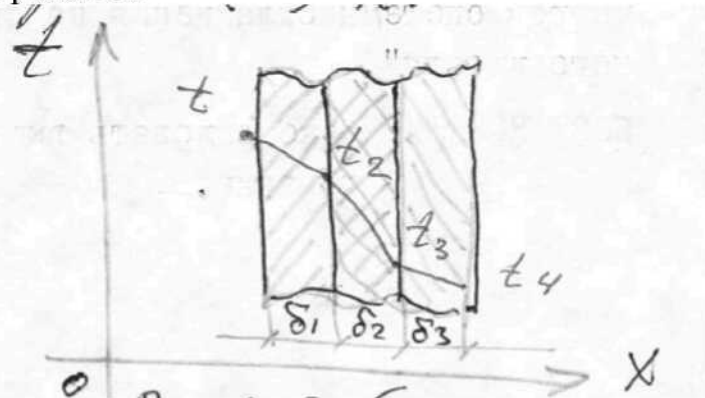


Рис. 3.2 (Тихомиров стр. 58 рис. 2.3)
Распределение t в многослойной плоской стенке.

Температура (t) на границах стенки t_1 и t_2 , причем $t_1 < t_2$. Теплота распространяется только вдоль оси X . При этих условиях температурное поле будет одномерным и изотермические поверхности (поверхности одинаковых температур) будут плоскими и параллельными поверхностям стенки.

Проинтегрировав уравнение Фурье (без вывода) окончательно получим:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) \quad (3.2), \quad Bm/m^2.$$

Из уравнения (3.2.) видно, что поверхностная плотность теплового потока зависит от температурного перепада $\Delta t = t_1 - t_2$, т.е. $q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t$ или

$$q = \frac{\Delta t}{\delta/\lambda} = \frac{\Delta t}{R} \quad (3.3).$$

Отношение $\delta/\lambda = R$ называется термическим соотношением стенки. Зная поверхностную плотность теплового потока q можно определить общее количество теплоты, передаваемое за 1 час через поверхность стенки F по формуле

$$Q = q \cdot F \quad (3.4).$$

То есть, общее количество теплоты передаваемое через однослойную плоскую стенку пропорционально плотности теплового потока на 1 м^2 (q) и площади поверхности стенки (F).

Рассмотрим теплопроводность плоской многослойной стенки состоящей из n материальных слоев плотно прилегающих один к другому (рис.3.2).

Каждый слой имеет заданную толщину δ и коэффициент теплопроводности λ . Многослойными являются стены и перекрытия крупнопанельных и кирпичных зданий. При стационарном тепловом режиме тепловые потоки проходящие через каждый из слоев стенки одинаковы.

Просуммировав тепловые потоки через каждый слой можно записать (без вывода)

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{\Delta t}{R} \quad (3.5),$$

где Δt – температурный переход $\Delta t = t_1 - t_4$.

$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$ – общее термическое сопротивление многослойной стенки равное сумме термических сопротивлений отдельных слоев.

Суммарный тепловой поток Q , Вт через многослойную плоскую стенку определяется по формуле:

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R} \cdot F \quad (3.6).$$

Для расчета теплового потока через многослойную или однослойную цилиндрическую стенки, если толщина ее по сравнению с диаметром (d) незначительна, можно пользоваться формулой для плоской стенки.

При этом площадь F подсчитывается $F_{cp} = \pi \cdot d_{cp} \cdot l$, где d_{cp} – средний диаметр цилиндра между наружной и внутренней поверхностями его стенки.

3.3. Конвективный теплообмен.

Тепловой поток Q , Вт передаваемый при конвективном теплообмене, определяется по формуле Ньютона:

$$Q = \alpha \cdot F(t_{ж} - t_{cm}) \quad (3.7),$$

где α – коэффициент теплоотдачи;

$t_{ж}$ – температура теплоносителя, °С ;

t_{cm} – температура поверхности стенки, °С;

F – поверхность соприкосновения теплоносителя со стенкой, м^2 .

Приняв $F = 1 \text{ м}^2$ получим поверхностную плотность теплового потока q , Вт/ м^2 :

$$q = \alpha(t_{ж} - t_{cm}) \quad (3.8)$$

Из уравнения (3.8.) можно определить разность $(t_{ж} - t_{cm})$ и температуру t_{cm} :

Где $1/\alpha$ – термическое сопротивление стенки при теплоотдаче соприкосновением.

Формулой (3.7.) можно пользоваться как при теплоотдаче от жидкости или газа (Ж или Г) к стенке, так и при теплоотдаче от стенки к (Ж или Г) жидкости или газу.

Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²°C), представляет собой количество теплоты, проходящей в единицу времени от жидкости (газа) к стенке (или наоборот) через 1 м² поверхности F при разности t жидкости (газа) и стенки 1°С ($\Delta t_{ж и ст}=1^\circ\text{C}$).

Коэффициент теплоотдачи α (в отличии от λ) – очень сложная величина, которая учитывает следующие факторы обслуживающие протекание конвективного теплообмена: характер движения жидкости или газа (ламинарное или турбулентное) и природа его возникновения; скорость движения жидкости или газа – V ; физические параметры Ж или Г (теплопроводность λ , вязкость μ , плотность ρ , теплопроводность C_p , коэффициент объемного расширения β ; $t_{ж}$ и t_2 и $t_{ст}$; форму Φ и линейные размеры омываемых Ж и Г поверхностей $l_1, l_2, l_3 \dots$).

Таким образом (т.о.)

$$\alpha = f(V, \mu, \rho, C_p, \beta, t_{ж}, t_{ст}, \Phi, l_1, l_2, l_3, \dots)$$

Для определения величины α для различных случаев конвективного теплообмена предлагаются эмпирические формулы имеющие однако ограниченную область применения. Значительно лучший результат дает определение величины α с использованием критериев подобия – безразмерных соотношений параметров характеризующих физический процесс.

Приведем некоторые критерии подобия для определения α и их краткую характеристику:

- 1) $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ - критерий Нуссельта;
- 2) $Pr = \frac{\mu \cdot C_p \cdot g}{\lambda}$ - критерий Прандтля;
- 3) $Re = \frac{V \cdot l \cdot \rho}{\mu}$ - критерий Рейнольдса;
- 4) $Gr = \frac{g \cdot l}{\nu^2} \beta \cdot \Delta t$ - критерий Грасгофа.

(Параметры входящие в эти выражения – смотри в начале конспекта лекции).

Какие же явления процессы характеризуют эти критерии?

Критерий Нуссельта (Nu) – или критерий теплоотдачи, характеризует интенсивность теплоотдачи на границе жидкость (газ) – твердое тело и всегда является искомой величиной.

Критерий Рейнольдса (Re) – представляет собой отношение сил инерции к силам внутреннего трения и характеризует гидродинамический режим движения. (При $Re < 2300$ – ламинарное, при $Re > 2300$ – турбулентное течение).

Критерий Прандтля (Pr) – характеризует физические свойства Ж и Г и способность распространения теплоты в Ж и Г.

Критерий Грасгофа (Gr) – характеризует подъемные силы возникающие в Ж или Г вследствие разности плотности их частиц и вызывающих так называемую (т.н.) свободную конвекцию.

В общем случае критериальная зависимость конвективного теплообмена имеет вид:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr) \quad (3.10).$$

Для внутренних поверхностей ограждающих конструкций (ОК) отапливаемого здания критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu = 0,135(Gr \cdot Pr)^{0,333} \quad (3.11).$$

Для определения коэффициента теплоотдачи по уравнению (3.11) подсчитываются числовые значения критериев, входящих в правую часть равенства, определяет критерий Nu и из него – коэффициент теплоотдачи α .

3.4. Теплообмен излучением.

Теплообмен излучением происходит между телами находящимися на больших (или близких) расстояниях друг от друга. Пример, излучение Солнца на Землю. В технике, теплообмен излучением имеет место в котлах, системах отопления (СО) зданий, в сушильных агрегатах и т.п. При высоких температурах теплообмен излучением преобладает над остальными видами теплообмена и имеет в связи с этим важное значение. Лучеиспускание тепла в пространстве может быть (м.б.) равномерным или направленным. Лучистая энергия испускается на какое либо тело в зависимости от его физических свойств, формы и состояния поверхности, при этом частично поглощается этим телом и переходит в тепловую (или другие) формы энергии, а остальная часть отражается и частично проходит через него (рис. 3.3.)

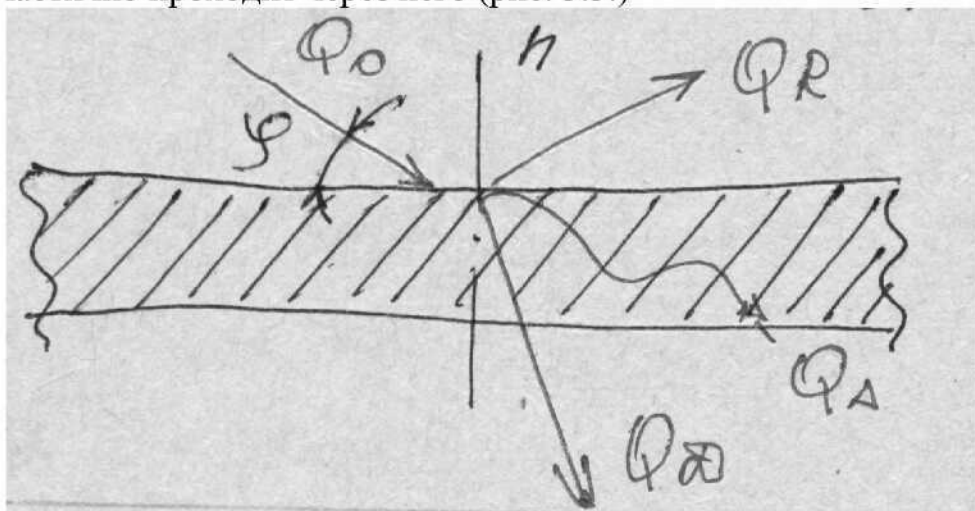


Рис. 3.3 Схема распределения лучистой энергии, падающей на тело.

Обозначим через Q_0 – общее количество лучистой энергии падающей на тело, а через Q_A , Q_R и Q_D – соответственно количество лучистой энергии поглощенной (Q_A), отраженной (Q_R) и прошедшей через него (Q_D). Т.е.

$$Q_0 = Q_A + Q_R + Q_D \quad (3.12).$$

Разделив обе части равенства (3.12.) на Q_0 получим:

$$\frac{Q_0}{Q_0} = \frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_D}{Q_0} \quad \text{или} \quad 1 = A + R + D,$$

где A – поглощательная способность тела; R – отражательная; D – пропускная.

Если $A=1,0$ (т.е. $R=D=0$) – то тело полностью поглощает все падающие на него тепловые лучи и называются абсолютно черными. (Примеры: нефтяная сажа $A=0,9 - 0,96$; вода и лед $A=0,92 - 0,95$).

Если $R=1$ – то тело называется зеркальным (если отражение правильное), или абсолютно белым (если отражение рассеянное – диффузное). (Примеры: золото, медь – $R=0,95 - 0,97$ – отражение зеркальное; белая штукатурка – $R \approx 0,9$ – отражение диффузное).

Если $D=1$ – то тело называется абсолютно проницаемым (прозрачным) или диатермичным. (Примеры: воздух – практически прозрачная среда; оконное стекло – пропускает световые лучи и почти непрозрачно для ультрафиолетовых и длинноволновых волн инфракрасного излучения).

Основные законы теплового излучения.

1. Закон Стефана-Больцмана – устанавливает связь излучательной способности абсолютно черного тела с температурой T, K .

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (*),$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

2. Закон Ламберта – максимальное (max) излучение единицы поверхности происходит перпендикулярно к ней.

$$Q_\varphi = Q_0 \cdot \cos \varphi.$$

Это выражение определяет зависимость излучаемой тепловой энергии от ее направления.

3. Закон Кирхгофа – определяет что, отношение излучательной способности тела E к его поглощательной способности A для всех тел одинаково и равно (=) излучательной способности абсолютно черного тела E_0 при той же температуре $t (T)$ и зависит только от $t (T)$, т.е.

$$E/A = E_0 = f(T).$$

Коротко рассмотрим случай теплообмена излучением между двумя стенками, имеющими большую поверхность и расположенными параллельно на небольшом расстоянии рис.(3.4).

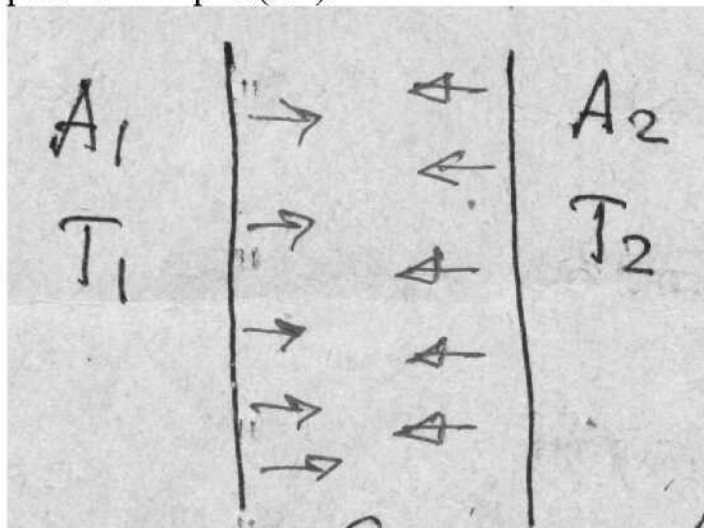


Рис. 3.4. Схема тепловых потоков между двумя параллельными стенками при теплообмене излучением.

$$Q_{1-2} = C_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F,$$

где C_{np} – приведенный коэффициент излучения, $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$.

$$C_{np} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \quad (3.13),$$

где C_1 и C_2 - константы (const) излучения тел между которыми происходит процесс лучистого теплообмена.

Подробнее об особенностях лучистого теплообмена в помещении мы рассмотрим в разделе “Летний режим помещения”.

3.2 Тепловой баланс воздуха в помещении.

Воздух помещения, соприкасаясь с нагретыми поверхностями нагревается или охлаждается. Кроме того, он получает или отдает тепло в процессе воздухообмена. В небольших помещениях под влиянием конвективных токов и вентиляционных струй воздух достаточно хорошо перемешивается, в следствии чего его t_e при расчете теплообмена можно считать постоянной во всем объеме помещения. Осредненная температура поверхности также принимается постоянной. Уравнение теплового баланса воздуха в помещении имеет вид:

$$\sum \alpha_{Ki} (\tau_i - \tau_e) \cdot F_i \pm Q_B = 0 \quad (3.9),$$

где α_{Ki} - среднее значение коэффициента конвективного теплообмена на поверхности; Q_e - количество конвективного тепла, которое непосредственно передается воздуху помещения или забирается от него.

В величину Q_e входит тепло, вносимое приточной вентиляцией и в результате неорганизованного проветривания помещения, а также конвективного теплообмена выделяется (или отбирается) тепло (в конвективных каналах нагревательных приборов и другого теплового оборудования).

Для струи приточного воздуха необходимо самостоятельные уравнения теплового баланса. В направлении движения струю разбивают на элементарные обмены в соответствии с разбивкой на элементарные площадки омываемой поверхности. Уравнение теплового баланса для каждого элементарного объема (рис. 3.1.) (их границы на рисунке обозначены пунктиром) можно записать в виде:

$$L_{n-1} \cdot c \cdot \rho \cdot t_{n-1} + \Delta L_n \cdot c \cdot \rho \cdot t_e - L_n \cdot c \cdot \rho \cdot t_n + \alpha_{Kn} (\tau_n - t_n) \cdot \Delta F_n = 0 \quad (3.10),$$

где L_{n-1}, L_n - объемные расходы воздуха в струе между элементарными объемами $(n-1)-n$ и $n-(n+1)$;

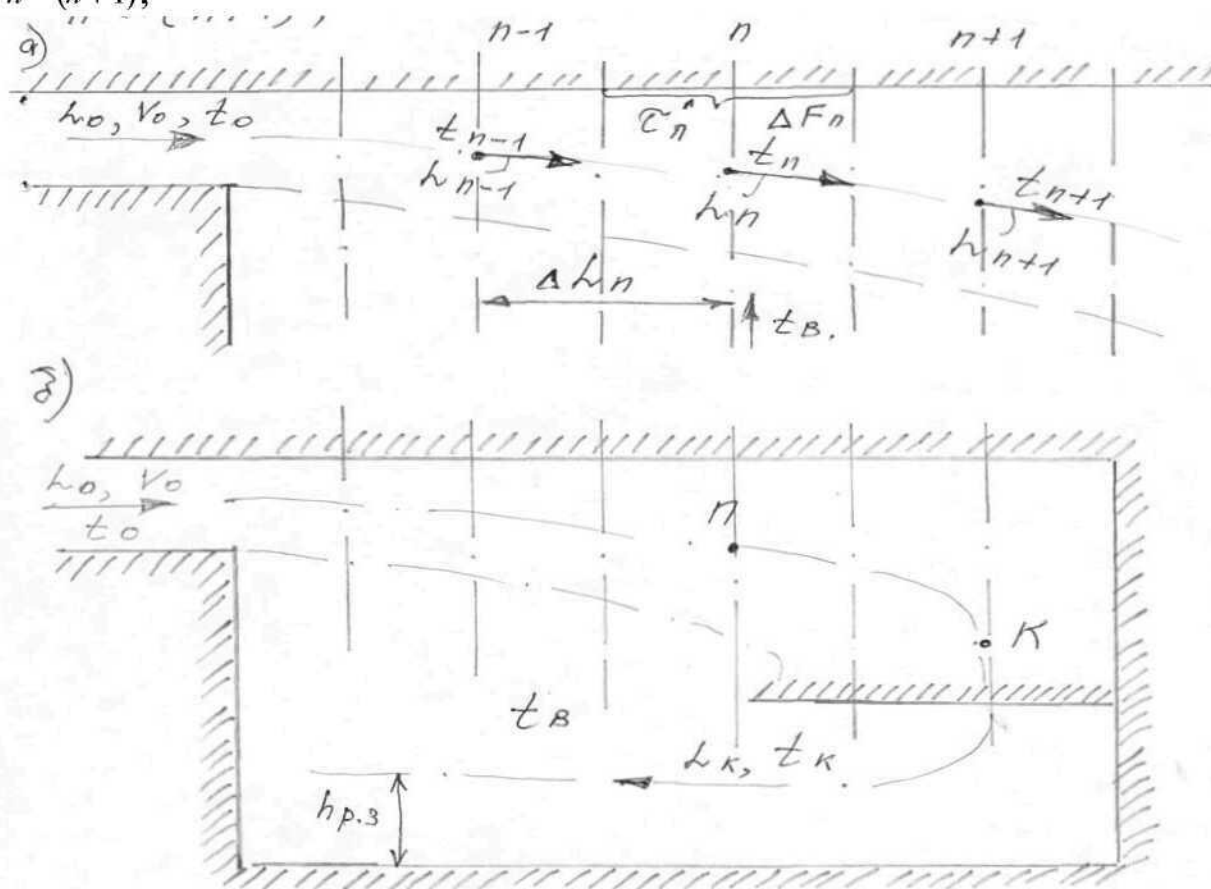


Рис.3.1. Теплообмен настилающейся струи: а) тепловой баланс элементарного объема воздуха в струе; б) тепловой баланс воздуха помещения.

В формуле (3.10): $c\rho$ - объемная теплоемкость воздуха;
 t_{n-1} и t_n - среднее значение температуры воздуха в пределах элементарных объемов струи на участках $n-1$ и n ;
 ΔL_n - объемный расход воздуха, который подмешивается к струе из помещения с t_e в пределах элементарного объема n ;
 τ_n - средняя температура поверхности в пределах элементарного объема n ;
 α_{Kn} - средний коэффициент конвективного теплообмена на поверхности в пределах элементарного объема n ;

Так как $L_n = L_{n-1} + \Delta L_n$, то уравнение (3.10) перепишем в виде:

$$L_{n-1} \cdot c \cdot \rho \cdot (t_{n-1} - t_n) + \Delta L_n \cdot c \cdot \rho \cdot t_e - L_n \cdot c \cdot \rho \cdot (t_e - t_n) + \alpha_{Kn} (\tau_n - t_n) \cdot \Delta F_n = 0 \quad (3.11).$$

Расход в элементарном объеме K струи равен:

$$L_K = \sum \Delta L_n + L_0 \quad (3.12).$$

В общем случае, когда температура уходящего из помещения воздуха $t_{yx} \neq t_e$

$$L_K \cdot c \cdot \rho_K \cdot t_K - \sum \Delta L_n \cdot c \cdot \rho_e \cdot t_e = (L_K - L_0) \cdot c \cdot \rho \cdot (t_K - t_e) + L_0 \cdot c \cdot \rho \cdot (t_K - t_{yx}) \quad (3.13),$$

где L_K и t_K - расход воздуха и температура в конце последнего элементарного объема K на границе с воздухом помещения, где условно заканчивается струя;

L_0 - количество приточного воздуха, подаваемого вентиляцией.

Уравнение теплового баланса воздуха помещения в этом случае (3.9) имеет вид:

$$\sum_{i=1} \alpha_{Ki} (\tau_i - \tau_e) \cdot F_i + L_K \cdot c \cdot \rho (t_K - t_e) + L_0 \cdot c \cdot \rho (t_K - t_{yx}) \pm Q_B = 0 \quad (3.14).$$

В сумму первого слагаемого (3.14) входят все составляющие конвективного теплообмена, кроме поверхности, омываемой струей. Второе и третье слагаемые учитывают тепло приточной настилающей струи.

Для свободной струи в помещении получены (3.13) обобщенные зависимости, с помощью которых можно определить все ее параметры необходимые для расчета общего теплообмена в помещении.

Поэтому при свободных струях обычно не нужно прибегать к разбивке на элементарные объемы.

3.3 Полная система уравнений общего теплообмена в помещении.

В общем теплообмене в помещении участвуют все его поверхности, воздушные струи и воздух помещения.

Рассматривая полную физико-математическую постановку задачи о теплообмене в помещении, принимают в качестве основной систему уравнений, состоящую из уравнений теплового баланса поверхности (3.7), элементарных поверхностей и объемов настилающихся струй (3.11), объемов свободных струй и уравнение теплового баланса воздуха (3.14). (Примечание, я ее не привожу поскольку она очень громоздкая и сложна к восприятию).

Система уравнений (1.124. Богословский СТФ) состоит из большого числа уравнений, что затрудняет ее решение. Удобно решать полную систему уравнений теплообмена в помещении на электрической аналоговой модели (Богословский СТФ. §1.17). Кроме того это решение может быть успешно проведено с помощью компьютера.

3.4 Система из двух уравнений общего теплообмена в помещении.

Для характеристики общей температурной обстановки в помещении обычно достаточно иметь среднее значение температуры трех характерных групп поверхностей (нагревающих, охлаждающих и нейтральных) и воздуха (рис.3.2).

В этом случае для всех поверхностей относящихся к одной категории можно составить одно уравнение теплового баланса.

В систему уравнений теплообмена в помещении войдут: уравнение теплового баланса для всех обогревающих поверхностей; уравнение для всех охлаждающих поверхностей наружных ОК; уравнение для всех поверхностей внутренних ОК и уравнение для воздуха.

3. Тепловой баланс помещений и теплотраты на отопление здания.

3.1. Общий теплообмен на поверхности в помещении.

Количество тепла, которое воспринимает или отдает произвольная поверхность i в результате лучисто-конвективного теплообмена в помещении равна количеству тепла, которое передается к поверхности или отводится от нее теплопроводностью

$$L_i + K_i + T_i = \text{const} \quad (3.1)$$

Где L_i - лучистая, K_i - конвективная и T_i - кондуктивная (теплопроводностью) составляющие теплообмена на поверхностях в помещении.

Теплопроводностью передается количество тепла T_i , которое при средних по всей площади F_i значениях температурного градиента (grad) около поверхности $\partial t_i / \partial n$ и значениях коэффициента теплопроводности λ_i составляет:

$$T_i = -\lambda \frac{\partial t_i}{\partial n} F_i \quad (3.2)$$

В стационарных условиях, когда $\text{grad} \frac{\partial t_i}{\partial n}$ в толще ОК остается const во времени, уравнение (3.2.) удобно записать в виде:

$$T_i = K'_i (\tau_i - t_{\text{cpi}}) F_i \quad (3.3),$$

где K'_i - коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности ОК (с τ_i) до внешней среды, температура которой t_{cpi}

Общее уравнение теплового баланса (3.1.) по поверхности i в помещении имеет вид:

$$(E_{\text{эф}} - E_{\text{пад}}) F_i + \alpha_{ki} (\tau_i - t_B) F_i - \lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial n} F_i = 0 \quad (3.4),$$

где E - интенсивность лучистого потока, Вт/м^2

$E_{\text{эф}}$ - эффективный лучистый поток (общий) покидающий поверхность;

$E_{\text{пад}}$ - падающий лучистый поток (часть $E_{\text{эф}}$) на поверхность ОК.

Учет многократного отражения от поверхности в помещении значительно усложняет расчет теплового баланса поверхности и в тоже время не оказывает большого влияния на конечные результаты. В строительной практике обычно ограничиваются учетом только первого отражения. В этом случае тепловой баланс поверхности с учетом выражения (1.38 Богословский СТФ. Стр.26)

$$L_1 = \sum_j C_0 E_{i-j} \epsilon_{i-j} (\tau_1 - \tau_j) \phi_{1-j} F_1,$$

где ϕ_{1-j} - коэффициент облучённости с поверхности 1 в сторону всех окружающих поверхностей j

Описывается одним уравнением:

$$\sum_j C_0 E_{i-j} \epsilon_{i-j} (\tau_i - \tau_j) \phi_{i-j} F_i + \alpha_{ki} (\tau_i - t_B) F_i + K'_i (\tau_i - t_{\text{cpi}}) F_i \pm Q_i = 0 \quad (3.7),$$

где ϕ_{i-j} - коэффициент облученности поверхности 1 на поверхность j ;

C_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела; $C_0 = 5.77 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$

E - степень черноты или относительный коэффициент излучения поверхности (безразмерная величина); $E = C/C_0$,

где C - коэффициент излучения поверхности серого тела ($E < 1$)

ϵ_{i-j} - коэффициент учитывающий переход от четвертой степени абсолютной T к разности t , $^\circ\text{C}$, где

α_{ki} - коэффициент конвективного теплообмена, средний по поверхности;

Q_i - прочие источники и истоки тепла на поверхности.

В соответствии с особенностями теплообмена все поверхности в помещении можно разделить на три характерные группы: охлаждающие, нагревающие и нейтральные.

Охлаждающими поверхностями помещений в зимний период года будут внутренние поверхности наружных ОК. В этом случае в уравнении (3.7) τ_i заменяют на τ_B - температуру внутренней поверхности наружной ОК.

K_i - на приведенный коэффициент теплопередачи;

K_H - коэффициент теплопередачи от внутренней поверхности ОК к наружному воздуху, отнесенный к площади F_i

F_i - определяется по размерам внутренней поверхности ОК, обращенной в помещение.

Температура внешней среды t_{cpi} - применяется равной t_H наружного воздуха.

Для нагретых поверхностей (зимой это нагревательные приборы или отопительные панели) значение отдельных величин в уравнении (3.7.) будут следующие:

τ_i - Температура отопительного прибора τ_{Π}

K_i - коэффициент теплоотдачи от отопительного прибора (ОП) к теплоносителю;

$K_{H.П}$ - от теплоносителя к поверхности ОП;

t_{cpi} - средняя t теплоносителя в ОП – (t_{TH})

Для нейтральных поверхностей – внутренних стен и перекрытий в уравнении (3.7) составляющая передачи тепла теплопроводность $T_i = 0$

Эти поверхности в стационарных условиях не нагреваются и не охлаждаются со стороны ОК.

Поверхности внутренних стен могут иметь положительный традиционный баланс, получая в результате лучистого теплообмена определенное количество тепла. Такое же количество тепла они будут отдавать конвекцией воздуху помещения. В теплообмене может участвовать тепло солнечной радиации проникающей через лучепрозрачные ОК. Прямые солнечные лучи нагревают отдельные части внутренних ограждений.

Диффузная рассеянная радиация ($Q_{\Pi p}$) распределяется равномерно В расчете теплообмена допускается принимать, что вся прямая (Q_p) и рассеянная ($Q_{\Pi p}$) радиация непосредственно непосредственно проникающие в помещение равномерно распределяются по площади всех внутренних поверхностей.

В уравнении теплового баланса (3.7) всех поверхностей дополнительное слагаемой Q_i равна доле проникающей радиации. Величину можно определить в виде

$$Q_i = Q_{\Pi p} F_i / \sum F_i \quad (3.8),$$

где F_i - сумма всех поверхностей помещения.

В помещении могут быть (м.б.) поверхности которые омываются струей охлажденного или нагретого воздуха, подаваемого в помещение.

По направлению движения струи изменяется t_B и скорость V_B воздуха в струе, а следовательно и условия теплообмена.

В общей постановки уравнения теплового баланса такой поверхности должно быть (д.б.) записано в интегральной форме, учитывающей изменение условий теплообмена в направлении движения струи. Такая запись усложнит решение и для целей инженерного расчета ее желательно упростить. Для этого поверхность разбивают на элементарные площадки, в пределах которых все параметры принимают осредненными. Для каждой элементарной площадки поверхности составляют свое уравнение теплового баланса (по формуле (3.7.),

3.2 Тепловой баланс воздуха в помещении.

Воздух помещения, соприкасаясь с нагретыми поверхностями нагревается или охлаждается. Кроме того, он получает или отдает тепло в процессе воздухообмена. В небольших помещениях под влиянием конвективных токов и вентиляционных струй воздух достаточно хорошо перемешивается, в следствии чего его $t_{\text{с}}$ при расчете теплообмена можно считать постоянной во всем объеме помещения. Осредненная температура поверхности также принимается постоянной. Уравнение теплового баланса воздуха в помещении имеет вид:

$$\sum \alpha_{Ki} (\tau_i - \tau_{\text{с}}) \cdot F_i \pm Q_B = 0 \quad (3.9),$$

где α_{Ki} - среднее значение коэффициента конвективного теплообмена на поверхности; $Q_{\text{с}}$ - количество конвективного тепла, которое непосредственно передается воздуху помещения или забирается от него.

В величину $Q_{\text{с}}$ входит тепло, вносимое приточной вентиляцией и в результате неорганизованного проветривания помещения, а также конвективного теплообмена выделяется (или отбирается) тепло (в конвективных каналах нагревательных приборов и другого теплового оборудования).

Для струи приточного воздуха необходимо самостоятельные уравнения теплового баланса. В направлении движения струю разбивают на элементарные обмены в соответствии с разбивкой на элементарные площадки омываемой поверхности. Уравнение теплового баланса для каждого элементарного объема (рис. 3.1.) (их границы на рисунке обозначены пунктиром) можно записать в виде:

$$L_{n-1} \cdot c \cdot \rho \cdot t_{n-1} + \Delta L_n \cdot c \cdot \rho \cdot t_{\text{с}} - L_n \cdot c \cdot \rho \cdot t_n + \alpha_{Kn} (\tau_n - t_n) \cdot \Delta F_n = 0 \quad (3.10),$$

где L_{n-1}, L_n - объемные расходы воздуха в струе между элементарными объемами $(n-1) - n$ и $n - (n+1)$;

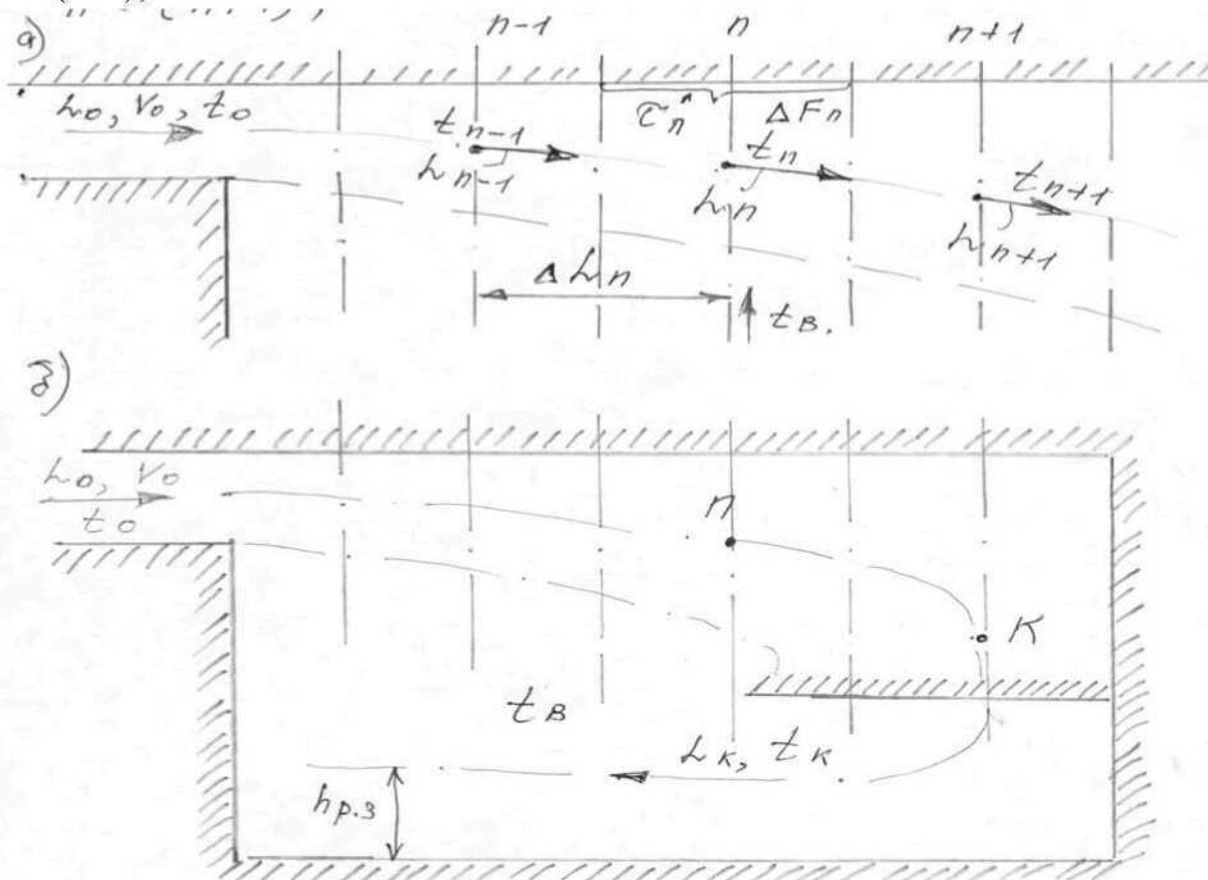


Рис.3.1. Теплообмен настилающейся струи: а) тепловой баланс элементарного объема воздуха в струе; б) тепловой баланс воздуха помещения.

В формуле (3.10): $c\rho$ - объемная теплоемкость воздуха;

t_{n-1} и t_n - среднее значение температуры воздуха в пределах элементарных объемов струи на участках $n-1$ и n ;

ΔL_n - объемный расход воздуха, который подмешивается к струе из помещения с t_g в пределах элементарного объема n ;

τ_n - средняя температура поверхности в пределах элементарного объема n ;

α_{Kn} - средний коэффициент конвективного теплообмена на поверхности в пределах элементарного объема n ;

Так как $L_n = L_{n-1} + \Delta L_n$, то уравнение (3.10) перепишем в виде:

$$L_{n-1} \cdot c \cdot \rho \cdot (t_{n-1} - t_n) + \Delta L_n \cdot c \cdot \rho \cdot t_g - L_n \cdot c \cdot \rho \cdot (t_g - t_n) + \alpha_{Kn} (\tau_n - t_n) \cdot \Delta F_n = 0 \quad (3.11).$$

Расход в элементарном объеме K струи равен:

$$L_K = \sum \Delta L_n + L_0 \quad (3.12).$$

В общем случае, когда температура уходящего из помещения воздуха $t_{yx} \neq t_g$

$$L_K \cdot c \cdot \rho_K \cdot t_R - \sum \Delta L_n \cdot c \cdot \rho_g \cdot t_g = (L_K - L_0) \cdot c \cdot \rho \cdot (t_K - t_g) + L_0 \cdot c \cdot \rho \cdot (t_K - t_{yx}) \quad (3.13),$$

где L_K и t_K - расход воздуха и температура в конце последнего элементарного объема K на границе с воздухом помещения, где условно заканчивается струя;

L_0 - количество приточного воздуха, подаваемого вентиляцией.

Уравнение теплового баланса воздуха помещения в этом случае (3.9) имеет вид:

$$\sum_{i=1} \alpha_{Ki} (\tau_i - \tau_g) \cdot F_i + L_K \cdot c \cdot \rho (t_K - t_g) + L_0 \cdot c \cdot \rho (t_K - t_{yx}) \pm Q_B = 0 \quad (3.14).$$

В сумму первого слагаемого (3.14) входят все составляющие конвективного теплообмена, кроме поверхности, омываемой струей. Второе и третье слагаемые учитывают тепло приточной настилающей струи.

Для свободной струи в помещении получены (3.13) обобщенные зависимости, с помощью которых можно определить все ее параметры необходимые для расчета общего теплообмена в помещении.

Поэтому при свободных струях обычно не нужно прибегать к разбивке на элементарные объемы.

3.3 Полная система уравнений общего теплообмена в помещении.

В общем теплообмене в помещении участвуют все его поверхности, воздушные струи и воздух помещения.

Рассматривая полную физико-математическую постановку задачи о теплообмене в помещении, принимают в качестве основной систему уравнений, состоящую из уравнений теплового баланса поверхности (3.7), элементарных поверхностей и объемов настилающихся струй (3.11), объемов свободных струй и уравнение теплового баланса воздуха (3.14). (Примечание, я ее не привожу поскольку она очень громоздкая и сложна к восприятию).

Система уравнений (1.124. Богословский СТФ) состоит из большого числа уравнений, что затрудняет ее решение. Удобно решать полную систему уравнений теплообмена в помещении на электрической аналоговой модели (Богословский СТФ. §1.17). Кроме того это решение может быть успешно проведено с помощью компьютера.

3.4 Система из двух уравнений общего теплообмена в помещении.

Для характеристики общей температурной обстановки в помещении обычно достаточно иметь среднее значение температуры трех характерных групп поверхностей (нагревающих, охлаждающих и нейтральных) и воздуха (рис.3.2).

В этом случае для всех поверхностей относящихся к одной категории можно составить одно уравнение теплового баланса.

В систему уравнений теплообмена в помещении войдут: уравнение теплового баланса для всех обогревающих поверхностей; уравнение для всех охлаждающих поверхностей наружных ОК; уравнение для всех поверхностей внутренних ОК и уравнение для воздуха.

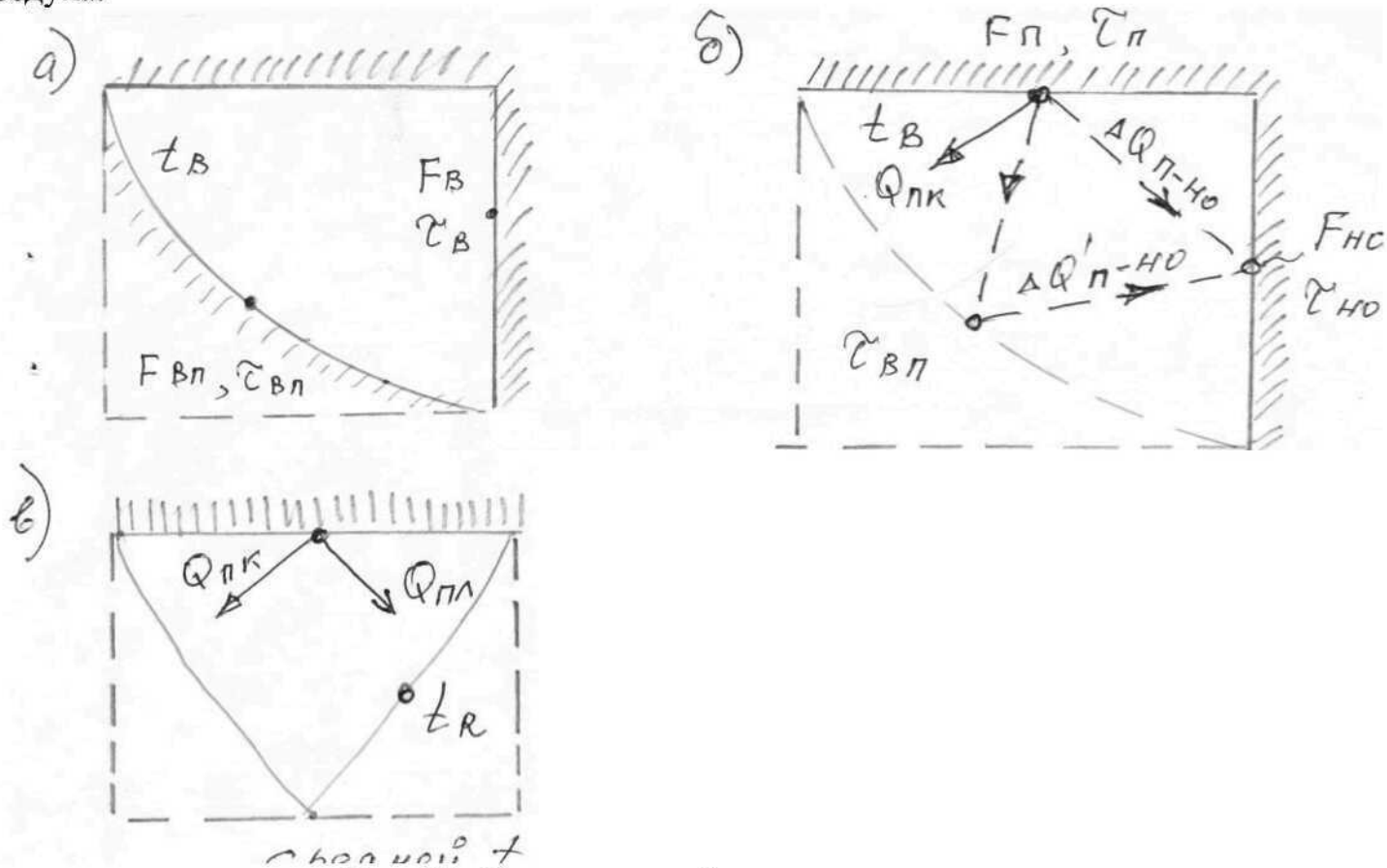


Рис. 3.2. Схема теплообмена в помещении:

- а) три характерные категории поверхностей;
- б) одно уравнение с учетом коэффициента полной облученности;
- в) одно уравнение с учетом средней t условной поверхности.

Обычно при расчете теплообмена в помещении заданы t внутренних поверхностей наружных ОК τ_v и воздуха t_a . В этом случае необходимо решить систему из двух уравнений для получения t обогревающих поверхностей τ_n (при известной ее площади F_n и расположения в помещении) и средней $\tau_{вп}$ поверхности внутренней ОК. Может быть задана τ_n нагревающей поверхности, тогда одним из неизвестных будет ее площадь F_n .

Форма записи уравнений теплового баланса обогревающих и внутренних поверхностей в системе из двух уравнений состоит в определении осредненной по всем поверхностям одной категории численных значений коэффициентов и других параметров процесса теплообмена.

Необходимо определить коэффициенты облученности со всех поверхностей одной категории на все поверхности другой категории, находить осредненные значения коэффициентов приведенного излучения, конвективного теплообмена, теплопередачи и т.д.

Для определения коэффициентов облученности удобно воспользоваться свойствами замкнутости и взаимности лучистых потоков.

Осреднение коэффициента конвективного теплообмена м.б. затруднено тем, что поверхности одной категории различно ориентированы в пространстве и имеют различные Δt (например, по этим причинам для пола и потолка коэффициенты конвективного теплообмена α_k могут отличаться в 2 раза и более). Такие трудности обычно м.б. преодолены методом последовательного приближения.

Решение системы из двух уравнений, так же как и полной системы неудобно в инженерной практике, поэтому желательно дальнейшее упрощение расчетной схемы.

3.5. Одно уравнение общего теплообмена в помещении.

При расчете теплообмена в помещении обычно задаются значениями t_b на внутренних поверхностях наружных ОК и t_b в помещении. Значения этих t даны в СНиП.

Температуру внутренних ОК приблизительно можно считать равной t_b в помещении. Поэтому в такой постановке искомой величиной в расчете является только t или площадь обогревающей поверхности отопительных приборов (ОП).

Необходимость определения только одной неизвестной дает возможность заменить систему уравнений одним уравнением теплообмена в помещении.

Лучистый теплообмен в помещении можно представить как теплообмен излучением между панелью и наружной поверхностью (рис. 3.2.б) при наличии внутренних ограждающих поверхностей ($\tau_{вп}$).

Панель в помещении рис (3.2.б) передает определенное количество тепла поверхностям наружных ОК. Это тепло передается прямым ($\Delta Q_{n-но}$) и косвенным ($\Delta Q'_{n-но}$) (отражением от внутренней поверхности) излучением.

Количество тепла $\Delta Q_{n-но}$ м.б. подсчитано по формуле:

$$Q_{1-2} = C_0 \cdot \varepsilon_{np1-2} \cdot b_{1-2} \cdot (\tau_1 - \tau_2) \cdot \varphi_{1-2} \cdot F_1$$

где 1- площадка 1; 2 – площадка 2.

Эта формула получена из рассмотрения теплообмена двух поверхностей между собой, где C_0 – коэффициент излучения поверхности;

ε – относительный коэффициент излучения абсолютно черного тела;

b – показатель теплопоглощения;

φ – коэффициент облученности (угловой коэффициент).

С помощью коэффициента прямой облученности с панели (П) на наружное ограждение (НО) $\varphi_{n-но}$ с учетом принятых при рассмотрении задачи теплообмена в помещении допущений и обозначений уравнение для определения полного количества теплоты Q_{nl} передаваемое панелью излучением непосредственно и косвенно поверхности наружных ограждений можно записать в виде:

$$Q_{nl} = \Delta Q_{n-но} + \Delta Q'_{n-но} = c \cdot \Phi \cdot b \cdot (\tau_n - \tau_{но}) \cdot F_n \quad (3.15),$$

где c и b – соответственно приведенный коэффициент и температурный коэффициент для системы "панель – наружное ограждение".

Φ – коэффициент полной облученности с панели на поверхность наружной ОК, равный сумме коэффициентов прямой и косвенной облученности:

$$\Phi = \varphi_{n-но} + \varphi'_{n-но} = \frac{F_{но}/F - \varphi^2}{F_{но}/F - 2\varphi + 1} \quad (3.16),$$

где $\varphi_{n-но}$ – коэффициент прямой облученности с панели на поверхность наружной ОК; $\varphi'_{n-но}$ – коэффициент косвенной облученности с панели на поверхность наружной ОК от внутренних ОК.

При этом $\varphi_{n-но} = \varphi$ поэтому в формуле (3.16.) индексы опущены.

Полное количество тепла Q_n , подаваемое панелью равно сумме ее лучистой Q_{nl} (3.15) и конвективной составляющих:

$$Q_n = [c \cdot \Phi \cdot b \cdot (\tau_n - \tau_{но}) + \alpha_d \cdot (\tau_n - \tau_s) \cdot F_n] = [\alpha'_d \cdot (\tau_n - \tau_{но}) + \alpha_k \cdot (\tau_n - t_s)] \cdot F_n \quad (3.17),$$

где α_d - коэффициент конвективного теплообмена на поверхности панели.

α'_d - коэффициент лучистого теплообмена на поверхности панели, отнесенный к $\Delta t = \tau_n - \tau_{но}$. Значения коэффициента Φ полученные по формуле (3.16), которая выведена без учета влияния конвективного обмена теплом на лучистый теплообмен будут несколько

больше. Однако данные расчетов показали возможность использования для инженерных расчетов формулы (3.16) для определения Φ . Сопоставление расчетов электромоделей с формулой (3.16) для двух случаев охлаждающейся панели в потоке воздуха приведены на рис. 3.3.

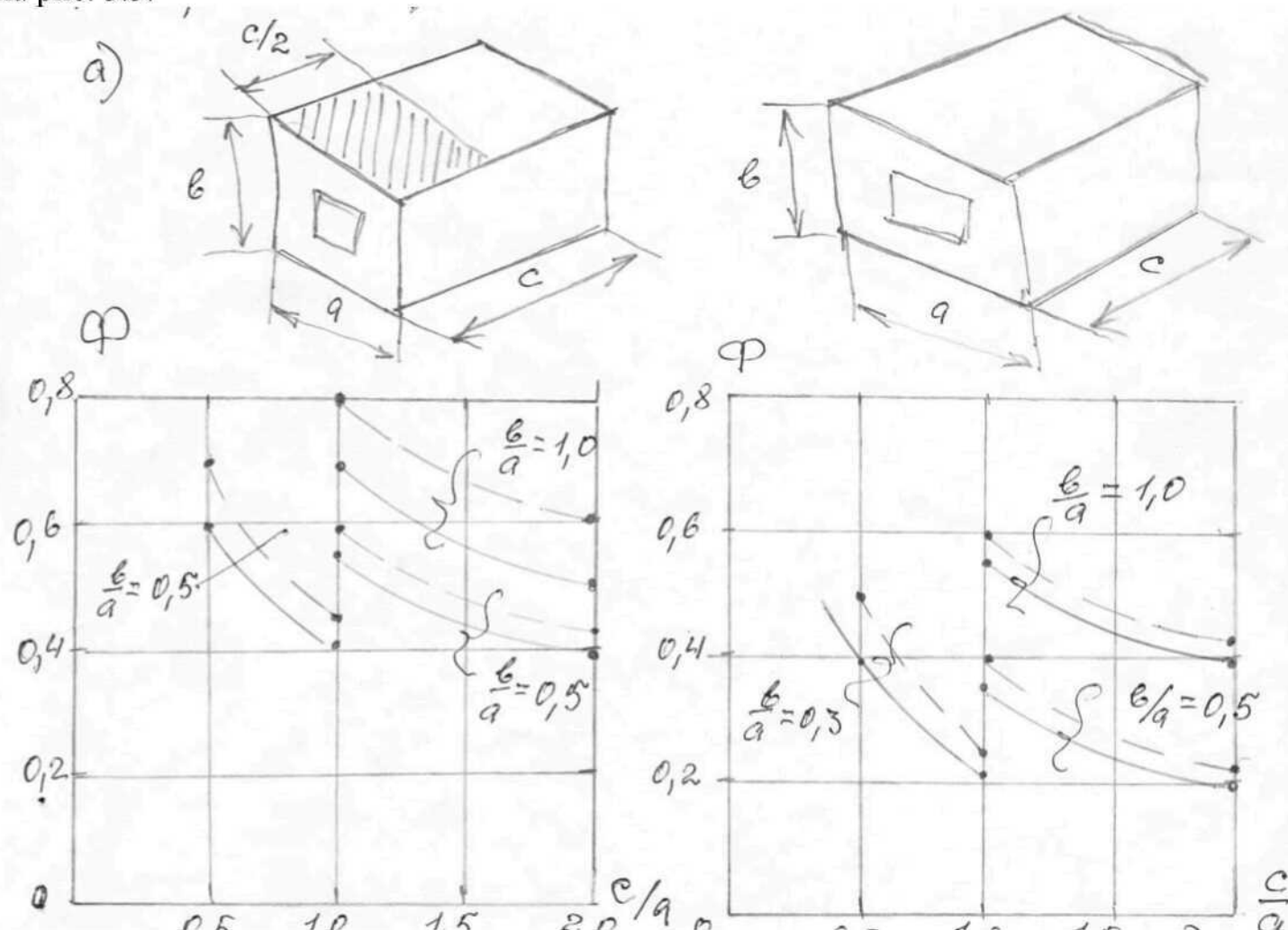


Рис. 3.3. Коэффициент полной облученности для двух (а и б) вариантов расположения в потоке:

— данные расчета на электромоделей;
 ----- расчет по формуле (3.16).

Л.5 Метод конечных разностей.

Реальные процессы теплообмена протекают во влажных многослойных ОК при самых разнообразных изменениях во времени условий на границах ОК. Эти условия отличаются от простейших случаев, для которых получены q и аналитическое решение, рассматривалось в предыдущем разделе. Рассмотрение процессов теплообмена, осложненных массообменом, в однослойных ОК аналитическим путем сложно, а чаще и невозможно. Поэтому в практике распространены инженерные способы решения нестационарной теплопередачи: метод конечных разностей, расчеты с использованием ЭВМ, персональных компьютеров (ПК), метод аналогий и др.

Метод конечных разностей для расчета нестационарных температурных полей подобен методу сеток (Богосл. СТФ 8 III. 6). Решается уравнение теплопроводности в конечных разностях, которое в простейшем случае при $const$ теплофизических характеристиках материала ОК и равномерной разбивке на элементарные слои имеет вид (II.16 Богословский СТФ стр. 98)

$$\Delta_z t = F_{0\Delta} \cdot \Delta_x^2 t \quad (\text{II. 16}), \text{ где } F_{0\Delta} - \text{критерий гомохромности Фурье.}$$

В этой записи уравнения (II. 16) критерий подобия (Фурье) является обобщенной пространственно-временной координатой процесса, т.к. его значением определяется изменение t и в пространстве и во времени. Из уравнения (II. 16) следует что отношение изменения t во времени $\Delta_z t$ ко второй конечной разности температуры во времени ее изменения в пространстве $\Delta_x^2 t$ в данном слое зависит от критерия $F_{0\Delta}$, хотя в каждом частном случае это отношение зависит от n (N слоя) $\Delta x_i z_i \Delta z_i \lambda_i c q$.

Расчет ведётся ступенями. Определяются t элементарных слоёв в конце расчетных интервалов времени. Искомой величиной каждой ступени расчета является температура $t_{n,\Delta z}$ в центре элементарного слоя n в конце следующего расчетного интервала времени Δz . Уравнение (II.16) м.б. решено относительно $t_{n,\Delta z}$. Для этого запишем его в виде:

$$(t_{n,\Delta z} - t_n) = F_{0\Delta} (t_{n+1} - 2t_n + t_{n-1}) \quad (5.1),$$

тогда

$$t_{n,\Delta z} = F_{0\Delta} \left[t_{n+1} + \left(\frac{1}{F_{0\Delta}} - 2 \right) t_n + t_{n-1} \right] \quad (5.2)$$

Изменение значения $F_{0\Delta}$ (принимая различие элементарных слоев Δx) и продолжительности расчетного времени Δz) из этого уравнения можно получить множество частных расчётных формул. Формула будет наиболее простой при $F_{0\Delta} = \Delta z / (C \cdot R) = 1/2$

$$t_{n,\Delta z} = \frac{t_{n+1} + t_{n-1}}{2} \quad (5.3)$$

Из этой формулы следует, что при $F_{0\Delta} = 1/2$ температура $t_{n,\Delta z}$ равна t соседних слоёв вначале расчётного интервала времени.

Теоретически доказано, что формулой (5.2) можно пользоваться только при $F_{0\Delta} \leq 1/2$, поэтому наиболее быстрый расчёт м.б. проведён по формуле (5.3) при $F_{0\Delta} = 1/2$. Доказано, что наибольшая точность м.б. получена при $F_{0\Delta} = 1/2$. Точность расчёта по формуле (5.3) вполне достаточна для технических целей. Разработан способ ускорения расчётов, в котором используют пространственно-временную сетку (сетку разбивки на элементарные слои и расчётные интервалы времени).

Тепловые потоки, которыми обмениваются элементарные слои пропорциональны средним за расчётный интервал разностям температур (не явная схема) и исходное уравнение теплопроводности записывается в виде:

$$C \frac{t_{n,\Delta z} - t_n}{\Delta z} = \frac{1}{R} \left[\left(\frac{t_{n+1} + t_{n+1,\Delta z}}{2} - \frac{t_n + t_{n,\Delta z}}{2} \right) - \left(\frac{t_n + t_{n,\Delta z}}{2} - \frac{t_{n-1} + t_{n-1,\Delta z}}{2} \right) \right] \quad (5.4)$$

Чем дальше расположен слой от расчётного, тем слабее влияние его t на результат расчёта. Поэтому t в соседних с расчётным слоях в конце расчётного интервала ($t_{n+1,\Delta z}$; $t_{n-1,\Delta z}$) для подстановки в уравнение (5.4) можно определять по менее точной, но более простой явной схеме (5.2).

При использовании такой смешанной схемой можно решить уравнение (5.4) относительно искомой температуры $t_{n,\Delta z}$.

После ряда преобразований формулы для определения $t_{n,\Delta z}$ примет вид:

$$t_{n,\Delta z} = \frac{F_{0\Delta}^2}{1 + F_{0\Delta}} \left[\frac{1 - F_{0\Delta}}{F_{0\Delta}} (t_{n+1} + t_{n-1}) + \frac{1}{2} (t_{n+2} + t_{n-2}) + \frac{F_{0\Delta}^2 - F_{0\Delta} + 1}{F_{0\Delta}^2} t_n \right] \quad (5.5)$$

Этим уравнением можно пользоваться при различных $F_{0\Delta}$. Особенность этого уравнения в том, что оно позволяет увеличить в 2 раза шаг расчёта по сравнению с явной схемой. При значении $F_0 = 1,0$ получим простую формулу (5.6)

$$t_{n,\Delta z} = \frac{1}{4} (t_{n+2} + t_{n-2}) + \frac{1}{2} t_n = \frac{t_{n+2} + t_{n-2} + 2t_n}{4}$$

Из формулы (5.6) видно, что при таком большом пространственно-временном интервале ($F_{0\Delta} = 1,0$) искомая t слоя зависит от его t в начале расчётного интервала и от t не соседних, как это было в явной схеме, а следующих за ними слоёв.

При $F_{0\Delta} = 1/2$ формула (5.5) имеет вид:

$$t_{n,\Delta z} = \frac{1}{2} t_n + \frac{1}{6} (t_{n+1} + t_{n-1}) + \frac{1}{12} (t_{n+2} + t_{n-2}) = \frac{6t_n + 2(t_{n+1} + t_{n-1}) + t_{n+2} + t_{n-2}}{12} \quad (5.7)$$

Как показывают расчеты последняя формула при $F_{0\Delta} = 1/2$ даёт примерно такую же точность как формула явной схемы при $F_{0\Delta} = 1/6$. Точность расчета по формуле (5.6) для $F_{0\Delta} = 1,0$ приблизительно соответствует полученной по формуле (5.3) при $F_{0\Delta} = 1/2$. Приведённые формулы написаны для элементарных слоёв, расположенных в толще конструкции. Некоторое осложнение расчётной схемы возникает при определённой t в слоях около поверхностей ОК.

При граничном условии I рода разбивку на элементарные слои принимают такой, чтобы центры крайних слоёв совпадали с поверхностями. При этом, если на поверхности задано мгновенное изменение t с t_0 до t_1 , то для первого расчётного интервала времени нужно принимать не заданную (мгновенную изменившуюся) температуру t_1 поверхности, а некоторую промежуточную температуру t_x , которая при $F_{0\Delta} = 1/2$ равна.

$$t_x = (t_0 + 2t_1)/3 \quad (5.8)$$

При граничных условиях II и III рода разбивку следует проводить так, чтобы поверхности ОК совпадали с границами крайних слоёв.

При условии II рода заданный тепловой поток определяется Δt в центре первого элементарного слоя и на границе условного полуслоя.

При граничном условии IV рода (на стыке между материальными слоями) решение усложняется. В многослойной ОК разбивку на элементарные слои рекомендуется проводить так, чтобы их границы совпадали по возможности с границами материальных слоёв. Расчетный пространственно-временной интервал $F_{0\Delta}$ для всех материальных слоёв ОК д.б. одинаковым, при этом необходимо чтобы расчетный интервал времени Δz был также общим для всех материальных слоёв ОК. В этом случае отношение между

толщинами элементарных слоёв ОК в отдельных материальных слоях ОК д.б. равно корню из соответствующих отношений коэффициентов теплопроводности материалов (a – коэффициент теплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$). Наиболее общим является случай, когда 3 рядом расположенных элементарных слоя относятся к трем разным материальным слоям ОК. В пределах каждого слоя n , $n-1$, $n+1$ будут разные теплофизические характеристики материалов.

Уравнение теплопроводности в конечно-разностном виде по явной схеме для этого случая можно записать в виде (5.9):

$$\frac{C_n}{\Delta Z}(t_{n,\Delta z} - t_n) = 2\left(\frac{t_{n+1} - t_n}{R_{n+1} + R_n} - \frac{t_n - t_{n-1}}{R_n + R_{n-1}}\right).$$

Значение искомой t в произвольном слое n через интервал времени Δz равно (5.10)

$$t_{n,\Delta z} = t_n + \frac{2\Delta z}{C_n} \left[\frac{t_{n+1} - t_n}{R_{n+1} + R_n} - \frac{t_n - t_{n-1}}{R_n + R_{n-1}} \right],$$

где R – сопротивление теплопроводности от центра до границ соответствующим индексам элементарных слоёв. Если элементарный слой n расположен на стыке 2^x материалов, формула для $t_{n,\Delta z}$ несколько упростится т.к. 3^{ий} слой (например $n+1$) будет иметь одинаковые со слоем n значения термического сопротивления R . Для расчётов удобно воспользоваться графической интерпретацией метода конечных разностей. Наиболее простым является графический метод расчёта, если используется явная схема при $F_{0\Delta} = 1/2$. Температура в слое равна среднеарифметической t соседних слоёв. При графическом построении (рис. 5.1) для определения t в любом слое спустя расчётный интервал времени, необходимо соединить точки, соответствующие t в соседних с ним слоях прямой линией.

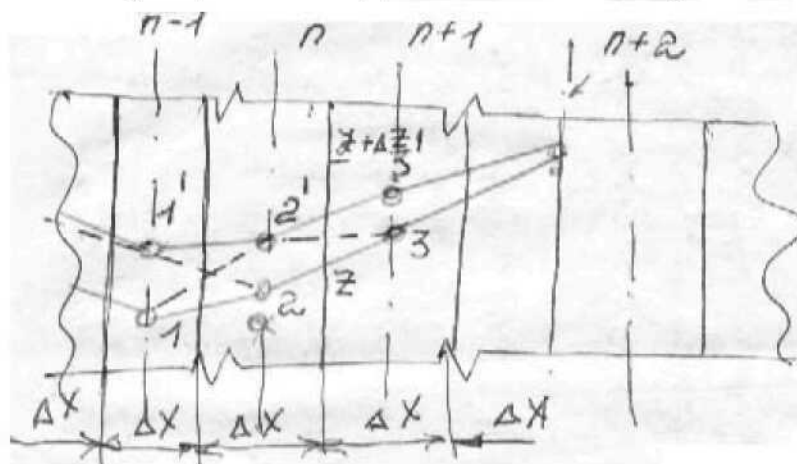


Рис. 5.1. Графическая интерпретация метода конечных разностей при явной схеме и $F_{0\Delta} = 1/2$.

Пересечение с осью симметрии расчётного слоя даёт искомую t . Простым построением, соединяя прямыми линиями через слой точки t в центрах элементарных слоёв, можно определить распределения t в конце очередного расчётного интервала времени.

При граничных условиях I рода (с учётом данных выше рекомендаций о разбивки на слои) можно полностью решить задачу, определить t во всех элементарных слоях, спустя любой промежуток времени, кратного продолжительности расчётного интервала времени.

Графической интерполяцией в пространстве и во времени можно получить значение t в произвольном сечении в любой момент времени. Графическое построение с учётом граничных условий I и II рода несколько усложняется. Возникают сложности при определении t в последнем к поверхности элементарном слое. Обычно ведут построения с учётом дополнительного условия полуслоя и эквивалентного слоя (рис. 5.2)

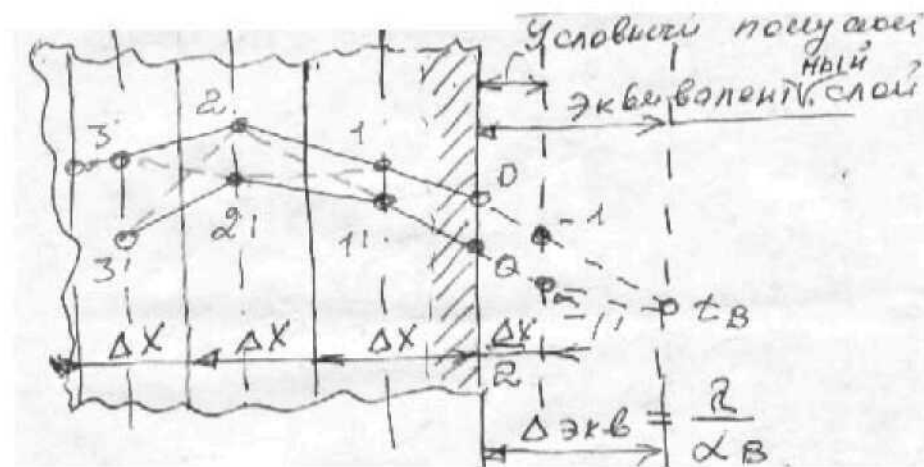


Рис. 5.2. Графическая интерпретация метода конечных разностей при граничном условии III рода.

Значения t в центре условного полуслоя ($=1/2$ толщине элементарного слоя) определяет пересечение с прямой, соединяющей точки t поверхности и t воздуха на границе эквивалентного слоя.

При заданном тепловом потоке (условие II рода) определяют соответствующий ему Δt между первым слоем и на границе условного полуслоя. В остальном графические построения такие же, как и в общем случае расчёта в толще ОК.

При граничном условии IV рода на границе двух материальных слоёв изменяются толщины элементарных слоёв и теплофизические характеристики материалов, что вызывает некоторые осложнения при графическом расчёте из формулы (5.10) видно, что $t_{n,\Delta z}$ определяются теплоёмкостью данного слоя. Соседние слои влияют только на термические сопротивления. Расчёт графическим построением рекомендуют вести в такой последовательности. Ограждение разбивают на элементарные слои и вычерчивают в масштабе термических сопротивлений. На графике сечения ограждений в масштабе сопротивлений ведут построение температурных кривых в обычной последовательности, соединяя соседние точки t прямыми линиями через слой. Можно не вычерчивать всё сечение в масштабе сопротивлений, а сделать соответствующие построения для 1^x от стыка элементарных слоёв. Этого оказывается достаточно, т.к. для построения t в последнем слое данного материала необходима только одна дополнительная точка – t в соседнем с ним граничном элементарном слое другого материала. Новое расстояние от стыка до оси граничного слоя определяют из условия выдерживания общего с соседним материальным слоем масштаба термических сопротивлений. Размер полуслоя изменяют пропорционально отношению коэффициентов теплопроводности λ .

Для графического расчёта температурного поля в материальном слое 1 первый полуслой материала 2 толщиной $\Delta x_2/2$ откладывают от стыка на расстоянии l_2 равном:

$$l_2 = \frac{\Delta x_2}{2} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (5.11)$$

Такое же построение д.б. сделано при расчёте t в слое материала 2. Для этого граничный полуслой материала 1 толщиной $\Delta x_1/2$ строят на графике с новым размером l_1 равном:

$$l_1 = \frac{\Delta x_1}{2} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (5.12)$$

Особенность построения в слое материала 1 в том, что ординату t в центре граничного слоя материала 2 переносят в новое сечение на расстоянии l_2 от стыка (на рис. 5.3. точка 2_0).

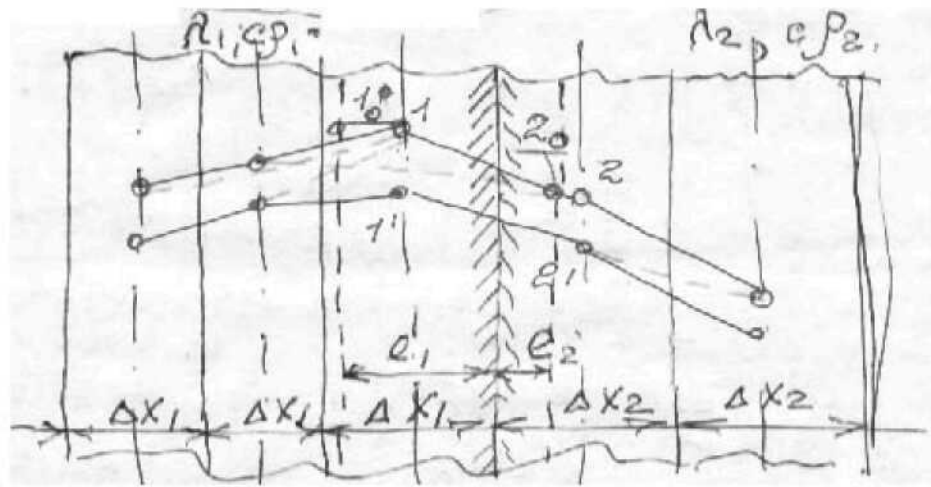


Рис. 5.3. Графическая интерпретация метода конечных разностей при граничном условии IV рода.

Аналогичное построение будет для слоя материала 2. Если в ОК несколько материальных слоёв, то на каждом сопряжении материалов д.б. выполнены такие же построения.

Метод конечных разностей м.б. использован для расчёта практически любой сложности процессов теплопередачи, в том числе с учётом массообмена и фазовых превращений влаги.

Министерство общего и профессионального образования Российской Федерации.

Владимирский Государственный университет

Кафедра теплогазоснабжения вентиляции и гидравлики

**Курс лекций по дисциплине “ Строительная теплофизика ”
Для студентов специальности 2907 очного обучения.**

Составитель: В.М. Кондрашов.

5. Теплоустойчивость ограждения.

5.1. Нестационарный тепловой режим.

Температура t воздуха будет оставаться неизменной, если поступление теплоты (Q, q) ОП будет равно недостатку теплоты в помещении. Если тепlopоступления будут периодически изменяться, то в помещении будут наблюдаться колебания t воздуха и радиационной t_R . Ограждающие конструкции (ОК), все предметы, воздух под влиянием этих изменений периодически поглощают и отдают теплоту. Чем больше способность теплопоглощения у ОК и у предметов, поверхность которых обращена в помещение, тем меньше колебания t_B и тем больше его теплоустойчивость.

Под теплоустойчивостью ограждения понимают его способность сохранять относительное постоянство t на своей внутренней поверхности τ_B при периодических тепловых воздействиях.

Теплоустойчивость ОК удобно проследить, изучая их температурный режим при периодических тепловых воздействиях. Действительные периодические колебания t и Q потоков около поверхности ОК часто можно без особой погрешности заменить правильными гармоническими колебаниями или суммой (Σ) ряда гармоник. Поэтому закономерности периодического теплового (Q) воздействия на ОК имеют прямое практическое приложение. Свойство теплоустойчивости ОК интересует нас в двух направлениях:

- теплоустойчивость ОК относительно колебаний t и Q потоков в помещении (рис.5.1а);
- теплоустойчивость ОК относительно сквозного проникания колебаний t_H через его толщину ОК в помещение (рис.5.1.б).

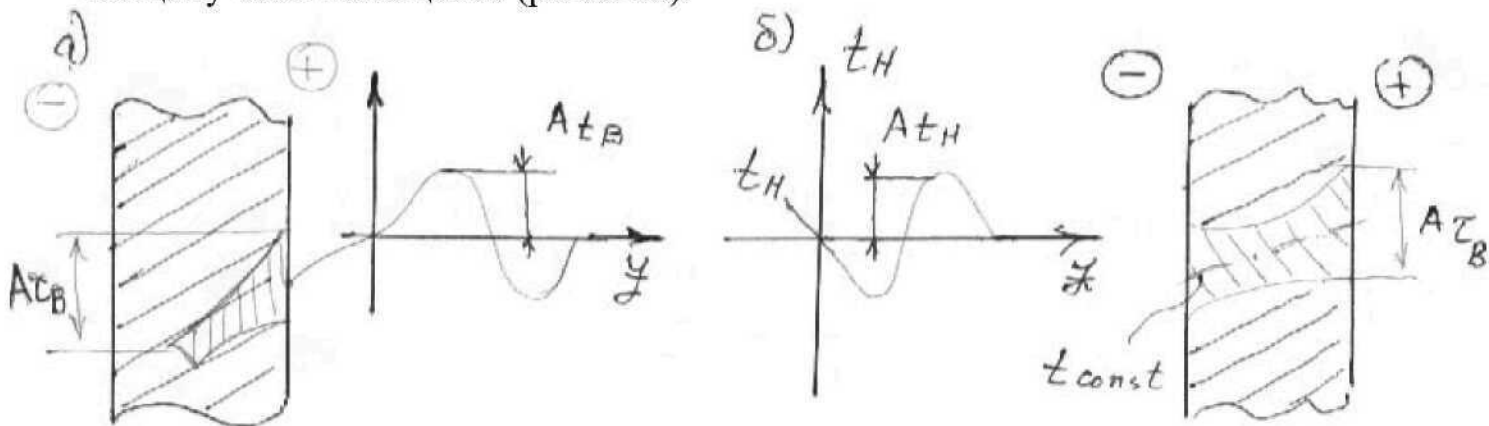


Рис.5.1. Теплоустойчивость ОК и ее двойное проявление – относительное колебание t_B и Q потока в помещении (а) и относительное сквозное проникание через ОК в помещение колебаний t_H наружного воздуха (б).

Теплоустойчивость ОК рассматривается по методике приведенной в СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника».

5.1. Теплоустойчивость ОК к колебаниям тепловых потоков в помещении.

Если теплоотдача ОП или другого источника теплоты в помещении будет периодически изменяться (при $const$ всех остальных составляющих теплового баланса), то в помещении будет периодически наблюдаться изменение t_B и t поверхностей ОК. Между колебаниями Q потока и τ на поверхности ОК существует зависимость, которая определяется коэффициентом теплоусвоения поверхности ОК - Y . Величина Y равна отношению амплитуды колебания теплового потока A_q и t на поверхности ОК- $A_{\tau_{OK}}$.

$$Y = A_q / A_{\tau} \quad (5.1).$$

Если слой резких колебаний t заканчивается в пределах первого от поверхности (внутренней) материального слоя и следовательно его тепловая инерция $D > 1$, то Y равен удельному коэффициенту теплоусвоения материала этого слоя S_1 .

$$Y = S_1 = \frac{R_1 \cdot S_1^2 + Y_2}{1 + R_1 \cdot Y_2} \quad (5.2),$$

где $R_1, S_1, \lambda_1, c\rho_1$ - соответственно термическое сопротивление, коэффициент теплоусвоения, теплопроводность и массовая теплоемкость материала первого слоя.

Y_2 - коэффициент теплоусвоения второго материального слоя.

Колебания t поверхности отстают во времени от колебаний теплового потока, проходящего через поверхность на величину ε_y (рис.5.2.).

Это отставание (сдвиг по фазе) для простейшего случая:

$$\varepsilon_y = T/8 \quad (5.4),$$

где T - период времени, ч.

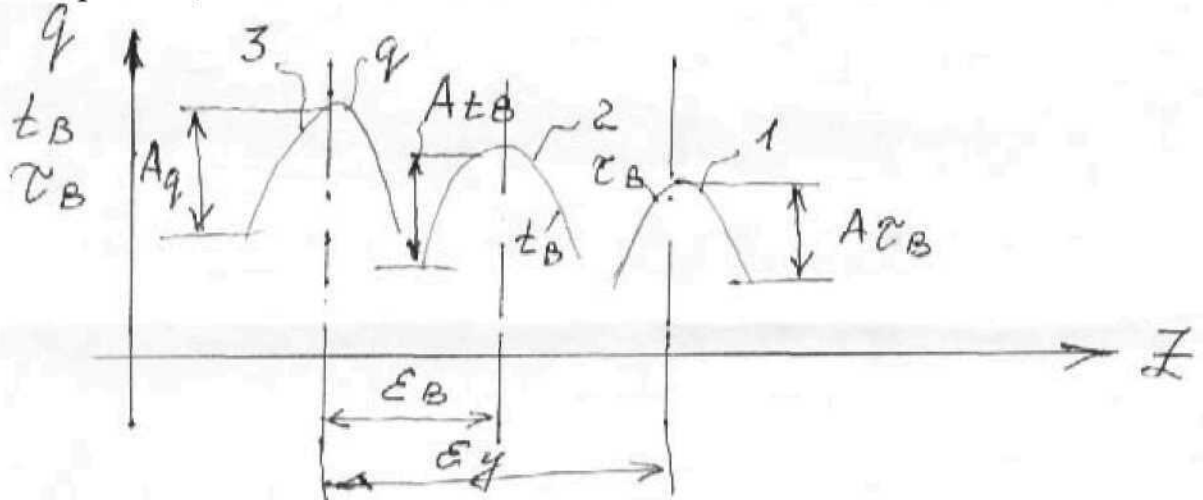


Рис.5.2. Относительные во времени колебания t внутренней поверхности ОК (1), температуры воздуха в помещении (2) и теплового потока, проходящего через эту поверхность.

Изменение теплового потока также связано с колебаниями t воздуха в помещении. Соотношение между изменениями q , проходящего через поверхность ОК и t воздуха омывающего эту поверхность, определяются коэффициентом теплопоглощения B поверхности ОК.

$$B = \frac{q}{A_{t_B}} \approx \frac{1}{\frac{1}{Y} + \frac{1}{\alpha_B}} \quad (5.5).$$

Уравнение (5.5.) можно переписать в виде:

$$\frac{1}{B} \approx \frac{1}{Y} + \frac{1}{\alpha_B} \quad (5.6),$$

Из которого следует, что сопротивление теплопоглощению $1/B = \sum$ сопротивлений теплоусвоению $1/Y$ и сопротивлению теплообмену $1/\alpha_B$ на поверхности.

Изменение t воздуха опережает во времени t поверхности, но отстает от изменения теплового потока на величину ε_B (рис.5.2).

$$\varepsilon_B = T/16 \quad (5.7).$$

5.2. Теплоустойчивость ОК сквозному прониканию колебаний t наружного воздуха.

Колебания t наружного воздуха вызывают колебания повышения, понижения t и тепловых потоков q в толще и на внутренней поверхности наружных ОК. По мере удаления от наружной поверхности колебания t в толще ограждения уменьшаются по

величине и запаздывают во времени (по фазе). Колебания τ внутренних поверхностей непосредственно влияют на теплопотери и радиационную t_R помещений, поэтому ее изменения представляют особый интерес при проектировании отопления помещений. Свойство теплоустойчивости сквозному прониканию температурных колебаний характеризуется двумя показателями:

Затухания ν и запаздывания ε .

Показатель сквозного затухания колебания $t - \nu$ определяет, во сколько раз амплитуда изменения t на внутренней поверхности ОК - A_{τ_B} меньше амплитуды колебаний t_H - A_{t_H} .

Формула для расчета ν имеет вид:

$$\nu = \frac{A_{t_H}}{A_{\tau_B}} \approx 2^D \left(0,83 + 3,5 \frac{\sum R_i}{D} \right) \cdot \beta_{cl} \cdot \beta_{en} \quad (5.8).$$

Величина ν зависит от следующих факторов:

1) тепловой инерции D ОК:

$$D = \sum R_i S_i \quad (5.9),$$

где R_i и S_i - сопротивление теплопроводности и коэффициент теплоусвоения материальных слоев ОК;

2) сопротивления теплопроводности толщины ОК - $\sum R_i$;

3) последовательности расположения основных конструктивных и теплоизоляционных слоев, если их можно четко выделить в ОК, которая учитывается поправочным коэффициентом β_{cl} :

$$\beta_{cl} = \frac{(S_1 + S_2) \left(1 + \frac{20}{S_1} \right) \left(1 + \frac{7,5}{S_2} \right)}{\frac{30 \sum R_i}{D} + 55} \quad (5.10),$$

где индексы при S определяют положение основных слоев по ходу температурной волны (т.е. из помещения наружу).

4) наличия в ОК воздушной прослойки, которое учитывается поправочным коэффициентом β_{en} :

$$\beta_{en} = 1 + 0,5 R_{en} \cdot \frac{D}{\sum R_i} \quad (5.11),$$

где R_{en} - сопротивление теплопередаче воздушной прослойки.

Приближенной формулой (5.8) можно пользоваться только в том случае, если можно четко выделить в конструкции ограждения два определяющих (в тепловом отношении) слоя.

В остальных случаях необходимо пользоваться более сложными формулами, приведенными в СНиП II-3-79.

Показатель запаздывания во времени сквозного проникания температурных колебаний ε в основном зависит только от D и равен:

$$\varepsilon \approx (0,0113D - 0,017)T \quad (5.12)$$

при $T=24$ (часа). $\varepsilon = 2,7 \cdot D = 0,4$.

Формулой (5.8) следует пользоваться только при $D > 2$ (соответствующих периоду $T=24$ часа).

При $D < 2$ величина ν практически равна своему *min* возможному значению:

$$\nu = \nu_{\min} = \frac{R_0}{R_B} \quad (5.13),$$

где R_0 - сопротивление теплопередаче ОК

R_B - сопротивление теплообмену на внутренней поверхности ОК.

В произвольный момент времени Z (начало отсчета соответствует $\max t$ наружного воздуха) t внутренней поверхности ОК τ_B может быть определена уравнением:

$$\tau_B = \tau_{BO} + \frac{A_{tH}}{v} \cdot \cos \frac{2\pi(z - \varepsilon)}{T} \quad (5.14),$$

где τ_{BO} - средняя за период T (24 часа) τ_B .

$$\tau_{BO} = t_n - \frac{R_B}{R_0} (t_n - t_{HO}) \quad (5.15),$$

где t_n, t_{HO} - средние за период T температуры помещения и t наружного воздуха.

$\cos 2\pi / T = \cos \pi \cdot x$ (табл.5.1).

Значения $\cos \pi \cdot x$

Табл.5.1.

X	0	0,25	0,5	0,75	1,0
$\cos \pi \cdot x$	1	0,71	0	-0,71	-1

Если на ОК одновременно действуют изменения t_n и t_b в помещении, то можно воспользоваться принципом суперпозиции (сложения независимых тепловых воздействий и получить результирующее изменение t_b сложением ее частных изменений под влиянием каждого воздействия.

5.3. Теплоустойчивость помещения.

Теплоустойчивостью помещения называется свойство поддерживать относительное $\text{const } t_n$ при периодически изменяющихся теплоступлениях.

Интенсивность колебаний t_n в помещении будет также зависеть от степени неравномерности лучистой и конвективной составляющих теплоотдачи ОП и их соотношения.

По характеру изменения во времени все возможные виды теплоступлений и теплопотерь можно разделить на гармонические и прерывистые. Более сложные случаи теплопередачи могут быть представлены их сочетанием.

Имеется определенная специфика участия лучистых и конвективных теплоступлений в теплоустойчивые помещения, которая состоит в разной последовательности передачи Q воздуху и поверхности помещения.

При рассмотрении задачи теплоустойчивости помещений пользуются методом наложения (суперпозиции), основанным на независимости действия отдельных тепловых возмущений. Совместный эффект действия всех источников и стоков теплоты получают суммированием ($\sum$) частных результатов.

Коэффициент неравномерности теплоотдачи ОП при периодическом отоплении можно определить по формуле:

$$M = (Q_{\max} - Q_{\min}) / 2Q_{cp} \quad (5.16),$$

где $Q_{cp}, Q_{\max}, Q_{\min}$ - средняя, $\max$ и $\min$ теплоотдача ОП.

Если теплоотдача прибора изменяется по закону правильного герметического колебания, то:

$$(Q_{\max} - Q_{\min}) / 2 = A_Q \quad (5.17),$$

где A_Q - амплитуда изменения теплоотдачи.

Для теплоемких приборов коэффициент M может быть определен экспериментально.

Теплоустойчивость помещения определяющую изменения его теплового режима можно охарактеризовать показателем теплоусвоения $Y_{ном}$ и теплопоглощения $P_{ном}$.

В качестве показателя теплоусвоения помещения $Y_{ном}$ применяют $\sum e$ теплоусвоение всех поверхностей ОК, обращенных в помещение.

$$Y_{ном} = \sum Y_i \cdot A_i \quad (5.18),$$

где Y_i, A_i , - коэффициенты усвоения и площади отдельных ограждений в помещении.

Показатель теплопоглощения $P_{ном}$ в основном учитывает поглощательную способность ОК $P_{огр}$. И воздухообмен $P_{вен}$ и равен их сумме.

$$P_{ном} = P_{огр} + P_{вен} \quad (5.19).$$

При прерывистой подаче теплоты коэффициент теплопоглощения ОК равен:

$$P_{огр} = \frac{1}{\frac{\Omega}{Y_{ном}} + \frac{1}{\Lambda}} \quad (5.20),$$

где Ω - коэффициент прерывистости определяется в зависимости от отношения времени отопления к общему периоду T (2 часа).

Теплопоглощение в помещении в результате вентиляционного воздухообмена равно:

$$P_{вен} = L \cdot c\rho \quad (5.21).$$

(Подробнее см. Богословский и др. Отопление).

7. Воздушный режим здания.

7.1. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и ее влияние на воздушно-тепловой и влажностный режимы помещений.

При разности P воздуха с одной и другой стороны ОК через нее может проникать воздух в направлении от большего P к меньшему. Это явление называется фильтрацией. Если фильтрация происходит в направлении от наружного воздуха в помещение, то она называется инфильтрацией, при обратном направлении – эксфильтрацией. Свойство ОК или материала пропускать воздух называется воздухопроницаемостью.

Разность P воздуха на наружной и внутренней поверхности ОК возникает вследствие разности ρ наружного и внутреннего воздуха (гравитационное давление) и под влиянием ветра (ветровое давление).

Гравитационное давление. В зимнее время воздух в отапливаемых помещениях имеет большую температуру, чем воздух снаружи. При этом наружный воздух будет иметь большую ρ , чем воздух в помещении. Разность ρ воздуха и создает разность его P . На рис.7.1. схематично изображено поперечное сечение отапливаемого помещения с двумя наружными стенами.

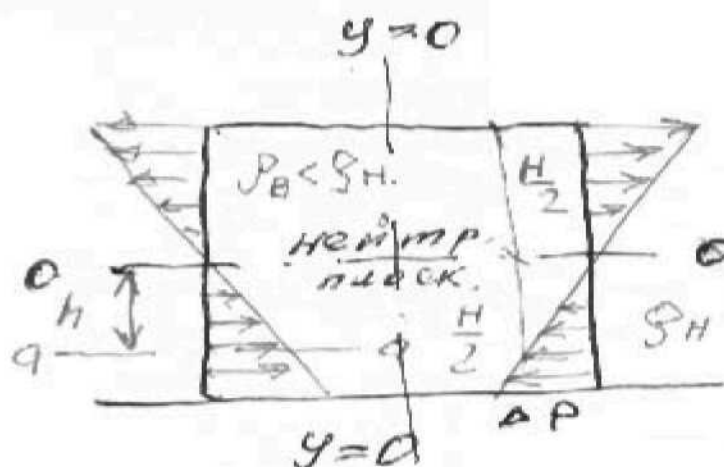


Рис7.1. Схема расположения нейтральной плоскости при наличии гравитационного давления.

Если в таком здании пол и потолок будут воздухопроницаемыми, то через нижнюю половину наружных стен воздух будет проникать внутрь здания, а через верхнюю половину – уходить из него. На середине высоты помещения ΔP воздуха будет равно 0 (нейтральная плоскость). max Величина ΔP будет у пола и под потолком. В некотором сечении а-а, отстоящей от нейтральной плоскости на расстоянии h , величина ΔP составит:

$$\Delta P = h(\rho_n - \rho_v) \quad (7.1),$$

где ρ_n ρ_v - соответственно плотность наружного и внутреннего воздуха, кг/м^3 .

Для помещения, сечение которого показано на рис 7.1. максимальная величина гравитации P определит по формуле:

$$\Delta P = 0.5H(\rho_n - \rho_v) \quad (7.2),$$

где H – высота помещения, М.

Ветровое давление. Под действием ветра на наветренной поверхности здания (рис.7.1.) возникает избыточное P , а на заветренной поверхности – разрежение.

Величина избыточного статического давления $\Delta P_{ст}$ (ветрового давления) равна

$$\Delta P_{ст} = \frac{k_1 - k_2}{2} * \frac{\rho W H^2}{2} \quad (7.3)$$

Где K_1 и K_2 – аэродинамические коэффициенты сопротивления с наветренной и заветренной сторон здания; $\rho W H^2 / 2$ - динамическое давление набегающего на здание потока воздуха.

При совместном действии на здание гравитационного и ветрового P величина P в любой точке на поверхности здания равна

$$P = 0.5H(\rho_n - \rho_v) + \frac{K_1 - K_2}{2} * \frac{\rho_n W H^2}{2} \quad (7.4)$$

Воздухопроницаемость ОК оценивается во величине сопротивления воздухопроницанию . Для сплошных слоев материалов сопротивление воздухопроницанию R_n определяется по формуле:

$$R_n = \delta / i \quad (7.5),$$

где δ - толщина слоя, М; i - коэффициент воздухопроницаемости материала, кг/(м²ч Па), характеризующий количество воздуха в кг, которое проходит через 1м² ОК за 1 час при $\Delta P = 1$ Па .

Фильтрация наружного воздуха через ОК в холодный период года вызывает дополнительные потери теплоты помещения, а также охлаждение внутренней поверхности ОК, особенно в современных многоэтажных зданиях. Поэтому СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника» ограничивают воздухопроницаемость ОК.

Сопротивление воздухопроницаемости R_n не менее требуемая по СНиП II-3-79 п.5.1. (за исключением световых проемов, окон, балконных дверей и фонарей) $R_n^{тр}$, м² ч Па/кг:

$$R_n \geq R_n^{тр} = \Delta P / G^H \quad (7.6),$$

где G^H - норматив воздухопроницания ОК.

№ п/п	Ограждающие конструкции	Норматив воздухопроницаемости G^H кг/(м ² ч)
1.	Наружные стены, перекрытия и покрытия жилых, общественных, вспомогательных зданий.	0,5
2.	То же производственных зданий.	1,0
3.	Входные двери в квартиры.	1,5
4.	Окна, балконные двери и ворота производственных зданий в районах со средней температурой наиболее холодной пятидневки $t_n = -40$ и ниже.	10
5.	То же с $t_n = -40$ и выше.	8
6.	Стыки между панелями наружных ОК жилых зданий, не более.	0,5

Для практических расчетов ΔP , Па форма записи (7.4). в виде:

$$\Delta P = 0.55gH(\rho_n - \rho_v) + 0,3\rho_n w^2 \quad (7.7),$$

где H – высота здания от поверхности земли до верха карниза, М; ρ_n ρ_v - соответственно плотность наружного и внутреннего воздуха.

$$\rho = 353(273 + t_{вн}) \quad t_{нар} = t_{наиболее\ холодная\ пятидневки\ обеспеч.\ 0,92};$$

Скорость ветра по румбам за январь, повторяемость которого составляет 16% и более примем по СНИП 2.01.01.82 «Строительная климатология и геофизика». Для типовых проектов примем равной 5м/с, а в климатический подрайон 1Б и 1Г равной 8м/с. Сопротивление воздухопроницаемости многослойной ОК - $R_n, м^2 \cdot ч \cdot Па / кг$ определим по формуле:

$$R_{ni} = R_{n1} + R_{n2} + \dots + R_{in} \quad (7.8),$$

где $R_{n1}, R_{n2}, \dots, R_{in}$ - сопротивление воздухопроницаемости отдельных слоев ограждения приведен в приложении 9 СНИП II-3-79 (см.табл.7.2.)

Сопротивление воздухопроницаемости материалов и конструкций.

Таблица 7.2.

№	Материалы и ОК	Толщина слоя, мм	Сопротивление воздухопроницаемости, $R_n \left[\frac{м^2 \cdot ч \cdot мм}{кг} \right]$
1	Бетон (сплошной без швов)	100	2000
2	Картон строительный (без швов)	1,3	6,5
3	Кирпичная кладка из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе.	250 и более	1,8

Сопротивление воздухопроницаемости окон и балконных дверей жилых и общественных зданий, а также окон и фонарей производственных зданий R_n должно быть не менее требуемого сопротивления воздухопроницаемости R_n^{mp} и определяется по формуле:

$$R_n^{mp} = \frac{1}{G} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (7.9),$$

где $\Delta P_0 = 10$ - разность P воздуха, при котором определено сопротивление воздухопроницаемости. R_n и P – см ф.(7.7).

7.2. Влияние фильтрации воздуха на теплопередачу.

В многоэтажных зданиях из крупноразмерных элементов воздухопроницаемость существенно влияет на тепловой режим помещений и потери теплоты через отдельные ОК. Влияние воздухопроницаемости на теплоотдачу для различных элементов ОК оказывается по разному. Инфильтрация наружного воздуха через окна, которые имеют наибольшую воздухопроницаемость, связаны с увеличением теплопотерь, инфильтрация через массив ОК и стыки в основном вызывает снижение температуры внутренней поверхности ОК. При фильтрации воздуха температурное поле и теплообмен на поверхности ОК изменяется в результате теплопереноса потоком воздуха.

Температура на внутренней поверхности пористого ОК при инфильтрации наружного воздуха:

$$\tau_s = t_n + (t_s - t_n) \frac{e^{C_B j (R_0 - R_B)} - 1}{e^{C_B j R_0} - 1} \quad (7.8),$$

где C_B - теплоемкость воздуха; R_0 - сопротивление теплопередаче ОК. $R_B = \frac{1}{\alpha_s}$

При эксфильтрации, расход внутреннего воздуха в формуле (7.8) берется.... со знаком «-». Наружный воздух, проходя через ОК навстречу кондуктивному (за счет теплопроводности ОК) потоку теряемой помещением теплоты, нагревается и поступает в помещение с большей температурой, чем его начальная. Происходит своеобразная рекуперация, частичный возврат в помещение теплоты, которая потребовалась бы на

подогрев наружного воздуха. При малых расходах воздуха, при значениях относительного коэффициента фильтрационного теплообмена $C_B jR_0 < 0,1$ фильтрацию воздуха можно не учитывать – теплотери изменения меньше чем на 5%. При больших расходах воздуха через пористые ОК, когда $C_B jR_0 > 4,0$, потерь теплоты фактически не будет, т.к. трансмиссионный тепловой поток почти целиком будет использоваться на нагрев наружного воздуха, поступающего в помещение.

В СНиП II-3-79 сопротивление воздухопроницаемости R_n ОК регламентируется требуемой его величиной $R_n^{тр}$, которая должна обеспечить нормативную проницаемость воздуха G'' (для стен – (0,5 - 1,0); для входных дверей – 1,5; для окон – (8,0 – 30), $кг/(м^2 \cdot ч)$) (см табл. 7.1) при расчете ΔP воздуха на наружной и внутренней поверхностях наружной ОК.

7.3. Учет воздушного режима здания при расчете отопления и вентиляции.

Влияние зимнего воздушно-теплого режима помещений при расчете систем отопления и вентиляции рассмотрено нами ранее в лекции 4.

Сейчас мы рассмотрим влияние летнего теплового режима помещений на расчет отопления и вентиляции.

7.3.1. Летний тепловой режим помещения.

Расчет мощности системы вентиляции и кондиционирования воздуха при борьбе с теплоизбытками.

Особенностью летнего теплового режима зданий является определение тепlopоступления от солнечной радиации. Она имеет периодичный характер в течение суток, что обуславливает типичную нестационарность процессов теплообмена в летний период. В жаркие летние месяцы здания подвергаются перегреву, что приводит к созданию дискомфорта топливных условий и, как следствие, к существенным перенапряжениям системы терморегуляции человека.

Для поддержки в помещении в летний период определенного микроклимата используют средства тепло и солнцезащиты зданий в виде теплоустойчивых, орошаемых водой и вентилируемых ОК, затеняющих приспособлений, солнцезащитных стекол и др. Помещения, охлаждающиеся наружным воздухом путем ночного проветривания и функционирования системы вентиляции, а также с помощью системы кондиционирования воздуха.

Для определения расчета мощности системы вентиляции и кондиционирования воздуха при борьбе с теплоизбытками необходимо составить тепловой баланс помещения в теплый период года. Его можно представить в следующем выражении:

$$Q_{огр.} + Q_{вент.} + Q_{техн.} = 0 \quad (7.9),$$

где $Q_{огр.}$ - тепlopоступление в помещение через наружные ограждения; $Q_{вент.}$ - тепlopоступление с воздухом СКВ; $Q_{техн.}$ – тепlopоступления с технологическими и бытовыми тепловыделениями.

Указанные тепlopоступления являются переменными во времени величинами. Величину $Q_{огр.}$ определяют обычно для каждого часа расчетных летних суток путем сложения тепlopоступления через различные виды массивных непрозрачных ОК (стены, покрытия) и лучепрозрачных (окна, фонари) ОК различной ориентации.

При переменных технологических тепловыделениях по данным технологического проекта для каждого часа расчет суток определяется $Q_{техн.}$. Складывая, величины $Q_{огр.}$ и $Q_{техн.}$ получают кривую (расчетную) почасового изменения тепlopоступления в помещение Q_n , а также максимальное их значение:

$$Q_{n, \max} = (Q_{\text{огр.}} + Q_{\text{техн.}})_{\max} \quad (7.10)$$

Значение Q_n иногда принимают как расчет теплоизбытка для определенной мощности систем вентиляции и СКВ. При этом установочная мощность СКВ получается выше на 30% и более.

Для более точного расчета мощи СКВ составляется средний за сутки топливный баланс помещения.

7.4. Дополнительные затраты тепла.

В формуле (5.7.):

$$Q_{\text{огр}} = \frac{F}{R_0} (t_B - t_n^B) (1 + \sum \beta) n = kF (t_B - t_n^B) (1 + \sum \beta) n \quad (5.7).$$

Член $(1 + \sum \beta)$ учитывает ряд теплопотерь, называемых добавочными. К ним относятся: ориентация по сторонам света, обдув ветром и т.д.

Некоторые из этих дополнительных потерь теплоты мы рассматривали ранее (на лекции 5.3.). Подробнее остановимся на тех, которые мы ранее не рассматривали:

1. На подогрев врывающегося холодного воздуха. Добавка на подогрев врывающегося через наружные двери, не оборудованные воздушными или воздушно-топливными завесами, холодного воздуха при высоте здания H , может приниматься в размере: $\beta = 0,2H$ - для 3-х дверей с двумя тамбурами между ними; $\beta = 0,27H$ - для 2-х дверей с тамбуром между ними; $\beta = 0,34H$ - для 2-х дверей без тамбура и $\beta = 0,22H$ - для одинарных дверей. Для наружных ворот, не оборудованных воздушной или воздушно-топливной завесой: $\beta = 3$ - при отсутствии тамбура и $\beta = 1$ - при наличии тамбура у ворот. Для летних и запасных наружных дверей и ворот добавочные потери тепла не учитываются.

Кроме рассмотренных ранее добавочных потерь, учитывая формулу (5.7.), имеются потери теплоты помещений зданий на нагревание инфильтрующегося в помещение наружного воздуха, который не учитывается этой формулой.

1. Теплозатраты на нагревание инфильтрующегося воздуха.

Наибольшая разность ΔP воздуха почти всегда оказывается в нижней части наветренной стороны здания, $\Delta P_{\min}$ характерна для верхней части здания. В помещениях здания по высоте его условия могут быть и такими, при которых P в верхней части будет больше давления снаружи, вследствие чего будет происходить эксфильтрация воздуха.

Затраты теплоты Q_n, Bt для нагревания инфильтрующегося воздуха в помещениях жилых и общественных зданий при естественной вытяжной вентиляции, не компенсирующиеся его подогретым приточным воздухом, следует принимать равными большей из величин, рассчитанных согласно методике, приведенной в СнИПе 04.05-86. "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха" по формулам:

$$\left. \begin{aligned} Q_n &= 0,28 \sum G_H \cdot C(t_B - t_n^B) \cdot K \\ Q'_1 &= 0,28 L \rho_H \cdot C(t_B - t_n^B) \end{aligned} \right\} \quad (7.11),$$

где $\sum G_H$ - расход инфильтрации воздуха, кг/ч через ОК помещения (определяем по приложению 9 СНиП 2.04.05-86) C - удельная теплоемкость воздуха равная $1 \text{ КДж} / (\text{кг}^\circ\text{C})$, t_B и t_n^B - расчетные температуры воздуха в помещении и нагрев в холодный период года (параметр Б), $^\circ\text{C}$

K - коэффициент учитывающий влияние встречного теплового потока в концентрации равный: 0,7- для стыков панелей стен, для окон с тремя переплетами; 0,8 – для одинарных окон, окон и балконных дверей с раздольными переплетами и 1,0 – для одинарных окон, окон и балконных дверей со спаренными переплетами и открытых проемов;

L - расход удаляемого воздуха, не компенсируется подогретым приточным воздухом, $м^3 / час$. Для жилых зданий удельный норматив расхода принимается равным $3м^3 / час$ на 1 кв.м. площади жилых помещений и кухни; ρ_n - плотность наружного воздуха.

Подсчитан для каждого помещения расход теплоты на нагревание инфильтрующего воздуха, следует добавить к теплотерям этих помещений.

Для поддержания расчета воздуха помещения система отопления должна компенсировать теплотерии помещения.

Л.8. Влажностный режим здания .

8.1. Влага воздуха помещения.

Влажный воздух (В.В.) – В.В. называется парогазовая смесь состоящая из сухого воздуха и водяных паров. Знание его свойств инженерно-строительных необходимо для понимания и расчета таких технических устройств как системы отопления, вентиляции и кондиционирования (СКВ).

В.В. содержащий тах количество водяного пара при данной t называется насыщенным.

Воздух который не содержит тах количество водяного пара называется ненасыщенным.

Водяной пар содержится в воздухе обычно в небольших количествах и в большинстве случаев в перегретом состоянии, поэтому к нему с достаточной для технических расчетов точностью м.б. применены законы идеальных газов. Влажность воздуха в помещении и ее

влияние на воздушно-тепловые режимы помещения. Повышение влажности материалов повышает их теплопроводность, что значительно понижает теплозащитные свойства ОК.

Влажный строительный материал неприемлем и с гигиенической точки зрения (плесень, грибки повышение влажностного режима воздуха в помещении). Кроме того, влажностный режим ОК оказывает соответствующее влияние на долговечность ОК. В ОК может оказаться:

строительная влага, проникающая при возведении зданий или при изготовлении строительных ЖБК; грунтовая влага проникающая в ОК вследствие капиллярного всасывания; атмосферная влага, проникающая в ОК при косом дожде или вследствие неисправности кровли; эксплуатационная влага, появляющаяся в процессе эксплуатации; гигроскопическая влага, находящаяся в ОК вследствие гигроскопичности его материала.

Конденсационная влага. От всех видов влаги, кроме конденсационной, можно и должно избавиться до начала эксплуатации зданий. Процесс конденсации влаги из воздуха тесно связан с теплотехническим режимом ОК. Влага из воздуха может конденсироваться как на внутренних поверхностях ОК, так и в его толще. Влажность воздуха в помещении обусловлена: производственным процессом а также выделением влаги находящимися в помещении людьми; выделением влаги при приготовлении пищи, стирки белья, мытье полов и т.п.

В зимнее время t воздуха с внутренней стороны ОК бывает много большей t наружного воздуха, соответственно и парциальное давление (упругость) водяного пара в воздухе помещения окажется большей, чем наружного воздуха. Разность величин упругости водяного пара с одной и другой стороны ОК вызывают диффузионный поток водяного пара через ОК от внутренней поверхности к наружной. Поэтому по аналогии с формулой для

определения теплопроводности ОК $q = \frac{\lambda}{\delta}(t_1 - t_2)$ для количества водяного пара,

диффундируемого в стационарных условиях через плоскую однородную стенку можно записать

$$G = (e_e - e_n) \cdot (\mu / \delta) \quad (8.1)$$

где G – количество диффундируемого пара, кг; e_e и e_n – упругости водяного пара у внутренней и наружной поверхности ОК, Па; μ - коэффициент паропроницаемости материала стенки, кг/(м·ч·Па); δ - толщина ОК, м.

Влагосодержание и влагоемкость воздуха. Количество влаги в воздухе определяется его влагосодержанием d , г влаги на один кг сухой части влажного воздуха. Кроме того его влажностное состояние характеризуется упругостью водяных паров e , Па или относительной влажностью φ , %.

Примечание: 1) парциальное давление можно определить из таблиц насыщенного пара по температуре точки росы, т.е. по такой t до которой нужно охладить ненасыщенный воздух

при постоянном влагосодержании, чтобы он стал насыщенным т.е., если охлаждённый ненасыщенный воздух с температурой t , то при некоторой температуре $t_n < t$ он станет насыщенным. Эта температура и является температурой точки росы.

2) Относительная влажность ϕ , определяет степень насыщения воздуха водяным паром:

$\phi = \rho_n / \rho_n$, т.е. отношение действительной абсолютной влажности к тах возможной абсолютной влажности при той же t (подробно см. Тихомиров, стр 48).

Воздух обладает определенной влагоудерживающей способностью. Например, при $t = 20^\circ\text{C}$ каждый 1 кг сухого воздуха удерживает при полном насыщении $\approx 15\text{г}$ водяных паров. При низкой t способность воздуха удерживать влагу становится совершенно незначительной (1,5г при $t = -15^\circ\text{C}$), с возрастанием t она повышается (50г при $t = 40^\circ\text{C}$). Чем суше воздух тем с большей силой удерживается в нём водяной пар, тем больше энергия связи влаги с воздухом. Упругость водяного пара с качественной стороны, отражает свободную энергию влаги в воздухе. Величина e возрастает от 0 до тах упругости E , соответствует полному насыщению воздуха и тах величине свободной энергии влаги. Упругость e в этом случае можно рассматривать как измеритель потенциала водяных паров в воздухе. Диффузия влаги происходит в воздухе от мест с большей упругостью водяного пара к местам с меньшей упругостью, т.е. от среды с более высоким потенциалом к среде с низким потенциалом.

Влагосодержание d повышается с возрастанием упругости водяного пара e воздуха.

Изменение d от e определенного (по аналогии с теплоемкостью) влагоёмкость воздуха.

Влагоёмкость воздуха $\eta_{\text{возд}}$, г/(кг·Па) показывает, на сколько возрастает влагосодержание воздуха Δd , г/кг, при возрастании Δe на 1 Па.

$$\eta_{\text{возд}} = \Delta d / \Delta e \quad (8.2)$$

На рис 8.1 показана зависимость d от e и крвая локальных значений влагоёмкости воздуха.

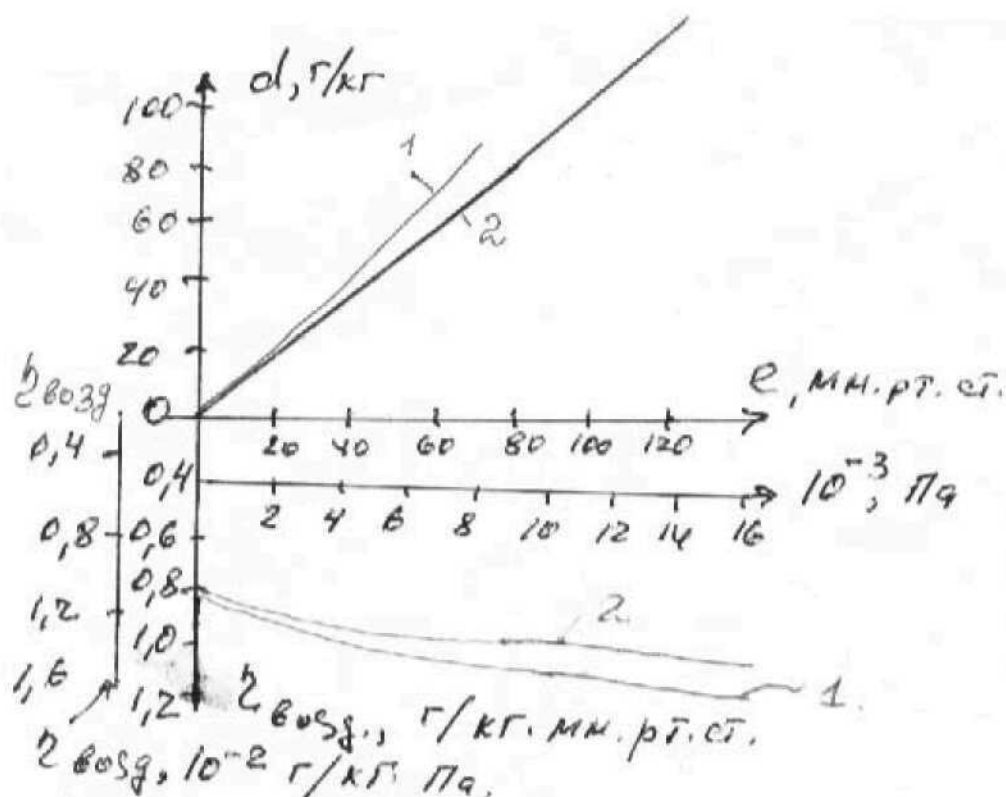


Рис 8.1. Зависимость содержания влаги d в воздухе и влагоёмкости воздуха $\eta_{\text{возд}}$ от упругости водяного пара на 1 кг сухого (1) и влажного (2) воздуха.

Упругость полного насыщенного воздуха E , Па зависит от t насыщения. С возрастанием $t_{\text{нас}}$ величина E возрастает. Приближённая зависимость E , Па от $t_{\text{нас}}$ (при $t_{\text{нас}} > 0$) можно найти из выражения.

$$E = 476 + (11,5 + 1,61 \cdot t_{\text{нас}})^2 \quad (8.3)$$

В расчетах часто необходимо знать $t_{\text{нас}}$, которой соответствует то или иное значение E . Эту зависимость можно определить в виде:

$$t_{\text{нас}} = 37,2 - (7 - 0,0015E)^2 \quad (8.4)$$

Уравнение баланса влаги в помещении имеет вид:

$$\sum G_{np, i} \cdot d_{np, i} + \sum W_i - \sum G_{yx, i} \cdot d_{yx, i} = 0 \quad (8.5)$$

где G – массовый расход отдельных составляющих (по притоку „пр“ и вытяжке („ух“) воздухообмена, кг/ч.

d_{np}, d_{yx} – влагосодержание d , г/кг приточного и уходящего воздуха;

W – интенсивность отдельных влаговыделений, кг/г.

Принимая $d_{yx} \approx d_e$ и $\sum G_{np} = \sum G_{yx} = \sum G$, получим формулу для определения влагосодержания d_e , г/кг воздуха в помещении

$$d_e = \frac{\sum G \cdot d_{np} + \sum W}{\sum G} \quad (8.6)$$

В результате конвективного перемешивания воздух имеет и одинаковую влажность в объёме помещения.

Величина d изменяется в течение суток и года. Поверхности строительных конструкций, обращённых в помещение обладают способностью воспринимать и отдавать влагу соответственно при возрастании и уменьшении влажности воздуха. При суточных и сезонных изменениях влажности воздуха поглощение и выделение влаги поверхностями ОК можно учесть в уравнении (8.5) в форме дополнительных источников и стоков влаги. Водяной пар передается во влажном неподвижном воздухе к поверхности посредством диффузии. Если поверхность собирает (поглощает) водяной пар, то в слое воздух около поверхности концентрация водяного пара уменьшаться. За счет разности концентрации происходит диффузия водяного пара. Коэффициент диффузии водяного пара в воздухе D , м²/ч равен

$$D = D_0 \frac{0,01}{P} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad (8.7)$$

Где $D_0 = 0,08$ – коэффициент диффузии при $T = 273^\circ$ и $P = 0,101$ МПа (760 мм. рт. ст.).

Диффузию водяных паров в воздухе удобнее определять в зависимости от градиента упругости водяных паров. Поток пара, проходящий через пограничный слой воздуха около поверхности, соответствует интенсивности i , г/(м²·ч) влагообмена поверхности ОК с воздухом, который в инженерных расчётах так принято определять в виде:

$$i = \beta_e (e_e - e_n) \quad (8.8)$$

где β_e – коэффициент влагообмена на поверхности ОК, г/(м²·ч·Па); e_e и e_n – упругость водяных паров в воздухе объема помещения и на поверхности, МПа (мм. рт. ст.).

Величина β_e зависит от t , влажности, подвижности воздуха в помещении и t поверхности ОК. В условии естественной конвекции β_e м.б. рассчитано по формуле (8.9)

$$\beta_e = 42,9 \Delta t^{1/3} \cdot \Delta e^{2,5}$$

где Δt и Δe – разности температур и упругости водяных паров в воздухе и на поверхности.

Рассмотрение свойства влажности воздуха связано с ассимиляцией (рассмотрением) и перемещением влаги в воздухе. Остальные сведения о влажности воздуха и его тепло и массообмена между воздухом и водой излагаются в курсе „Вентиляция“.

1.9. Термодинамика влажного материала.

9.1. Теплофизические характеристики строительных материалов.

Точность теплотехнических расчетов при решении инженерных задач в большой мере зависит от того насколько правильно выбраны значения теплофизических характеристик строительных материалов конструкции. В расчетах теплопроводности используются два основных показателя: теплопроводимость λ и объемная теплоёмкость $c\rho$.

В случае решения линейных уравнений, когда λ и $c\rho$ постоянны, удобно ввести коэффициент температуропроводности, который является производным от λ и $c\rho$ и равным:

$$a = \lambda / c\rho \quad (9.1).$$

Численные значения этих коэффициентов значительно изменяются в зависимости от состава, структуры и тепловлажностного состояния материалов.

Теплопроводность λ Вт/(м·°С) материала сильно отличается от λ воздуха, равного $\lambda_{\text{воз}} \approx 0,023$. Влага заполняющая поры имеет $\lambda \approx 0,58$, т. е. в 25 раз больше, чем у воздуха. При переходе в лед жидкой влаги теплопроводность ее повышается вчетверо, т. к. $\lambda_{\text{льда}} \approx 2,3$ Вт/(м·°С). С увеличением объемной массы теплопроводность одного и того же материала заметно растет. Так, например, пенобетон при $\rho = 400$ кг/м³ имеет теплопроводность $\lambda = 0,14$, при $\rho = 600$ кг/м³, $\lambda = 0,21$, а при $\rho = 1000$ кг/м³ $\lambda = 0,4$ Вт/(м·°С).

Важной для строительных материалов является зависимость λ от влажности. С повышением влажности материала коэффициент λ повышается. Характер этой зависимости показан на рисунке 9.1 на примере газосиликата и кирпича.

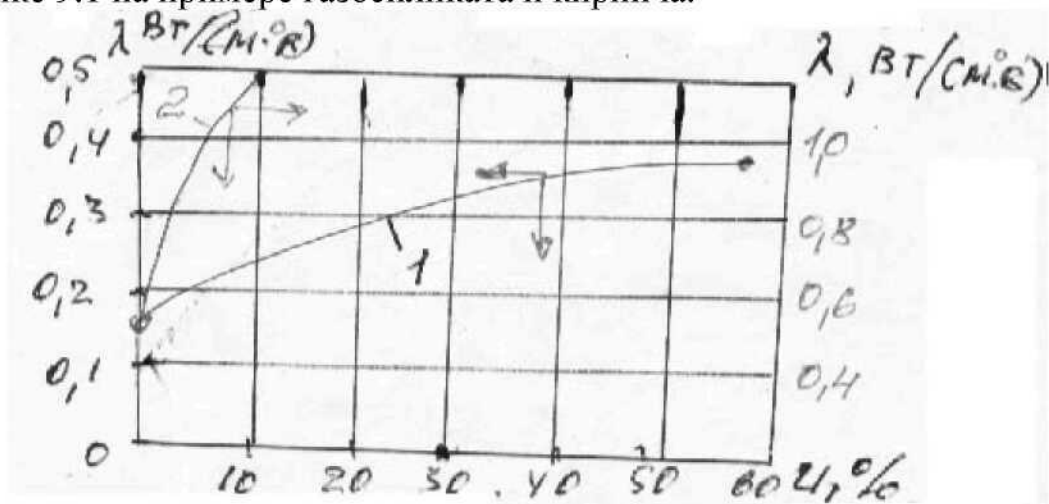


Рисунок 9.1. Зависимость λ строительных материалов от влагосодержания U , % на примере газосиликата с $\rho = 700$ кг/м³ (1) и красного кирпича (2).

Увеличение λ связано с замещением воздуха в порах жидкостью, имеющей более высокий коэффициент теплопроводности λ . На стыках между частицами материалов создаются так называемые “водяные манжеты”, которые повышают площадь контакта между частицами и способствуют теплообмену между ними.

При высоких t λ с повышением влажности растет быстрее. При отрицательных температурах повышение влажности при прочих равных условиях также приводит к повышению λ . При переходе в зону отрицательных температур не вся влага сразу превращается в лед. Сначала замерзает только свободная, не связанная со скелетом материала влага в крупных порах и капиллярах. По мере понижения температуры все более и более становится количество твердой фазы влаги. Такой характер перехода жидкой влаги в лед в меньшей мере проявляется в чисто капиллярно-пористых телах (песок, керамика),

где почти вся масса влаги замерзает уже при $t = -1 \div -3^\circ\text{C}$. Значительно сильнее этот эффект проявляется в коллоидных телах, таких как глина. Например, меньше 1/2 влаги замерзает при $t = -70^\circ\text{C}$ и имеется заметное количество незамерзающей влаги. Характерная картина изменения λ пеносиликата в зоне отрицательных температур показана на рисунке 9.2.

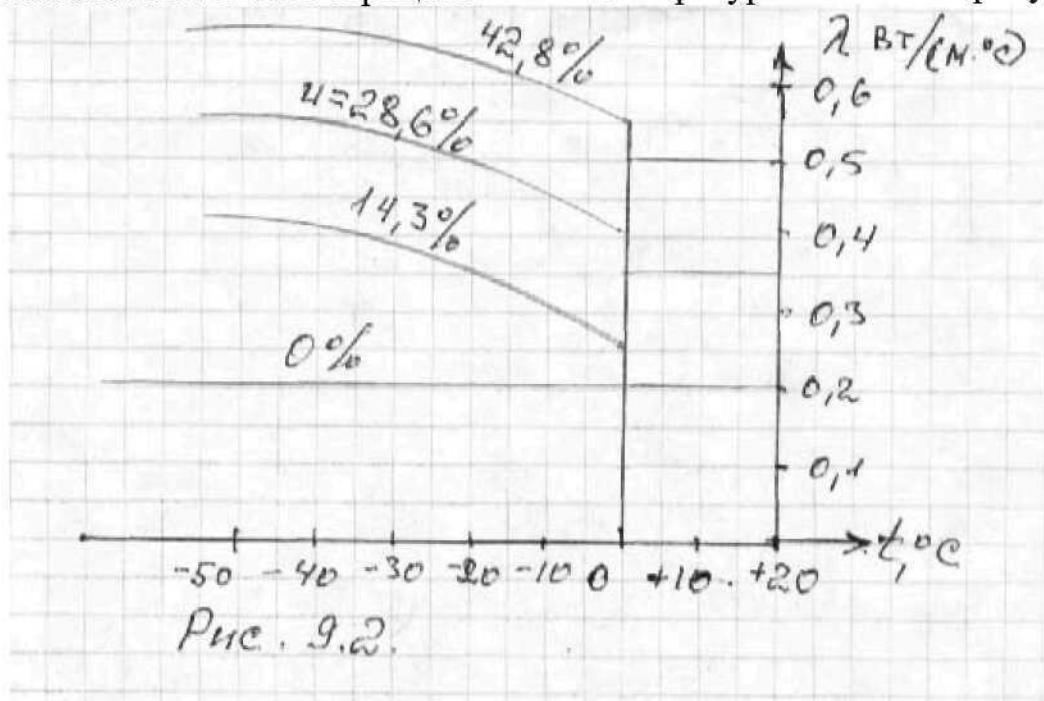


Рис. 9.2. Зависимость λ влажных строительных материалов ($U \approx Var$) от температуры в зоне положительных и отрицательных температур (пеносиликат $\rho = 700 \text{ кг/м}^3$)

9.2 Основы термодинамики влажного материала . Потенциал влажности. (стр. 107 Богосл.)

Как уже было сказано, во влажных строительных материалах движение влаги (жидкой и парообразной) протекает весьма медленно. Поэтому обычно считают, что внутри пор материала достигается термодинамическое равновесие между фазами влаги, т.е. наряду с равенством t имеет место равенство потенциалов фаз влаги.

Равенство потенциалов в отдельных точках влажность тела позволяет отказаться от рассмотрения состояния и расчёта движения отдельных фаз влаги, т.к. по показателям интенсивности (ρ, T, μ) они равны, а их показатели ёмкости имеют аддитивный характер, т.е. их можно суммировать.

Термодинамическое равновесие в точке, а также право суммирования ёмкостных показателей позволяет вместо системы уравнений состояния гетерогенной системы, каждая из которых определяет состояние отдельной фазы влаги, написать одно уравнение состояния в виде:

$$dF = -S \cdot dT + \theta \cdot dP \quad (9.2),$$

где F – свободная энергия; S – удельная энтропия; θ – полный термодинамический потенциал состояния в материале влаги (потенциал влажности) независимо от фазового состояния.

Запись уравнения состояния для влажного материала (9.2) удобна тем, что в нем выделены в самостоятельные слагаемые факторы, определяющие явный теплообмен (первое слагаемое) и факторы определяющие влагообмен (второе слагаемое).

Потенциал влажности в процессе переноса влаги играет такую же роль, как и t , которая является потенциалом в процессе переноса тепла. Этой аналогией широко пользуются в расчётах тепло и массообмена. В данном случае удобно пользоваться хорошо разработанным в термодинамике методикой понятия t для введения потенциала влажности

и шкалы этого потенциала. Потенциал влажности является функцией системы влажности, вида материала, давления, t и потенциалов гравитационного, осмотического и других силовых полей. Пользуясь правом произвольного выбора шкалы, величины θ можно измерять шкалой влажности, P , потенциала гравитационного поля и с помощью других показателей.

Однако, необходимым условием при этом является исключительное влияние, кроме выбранного фактора, от которого зависит величина θ . В настоящее время существуют теоретические построения процесса влагообмена, в которых за основу приняты различные шкалы потенциала переноса влаги: упругость водяных паров, капиллярное давление, влагосодержание и др. Однако принятая методика не исключает влияние прочих факторов на величину θ .

Потенциал влажности можно измерить определяя равновесную влажность определённого материала. Потенциал влажности измеряют в градусах влажности ($^{\circ}B$). На рис. 9.1. приведён пример зависимости влагосодержания U , температуры t и потенциала влажности θ для пенобетона.

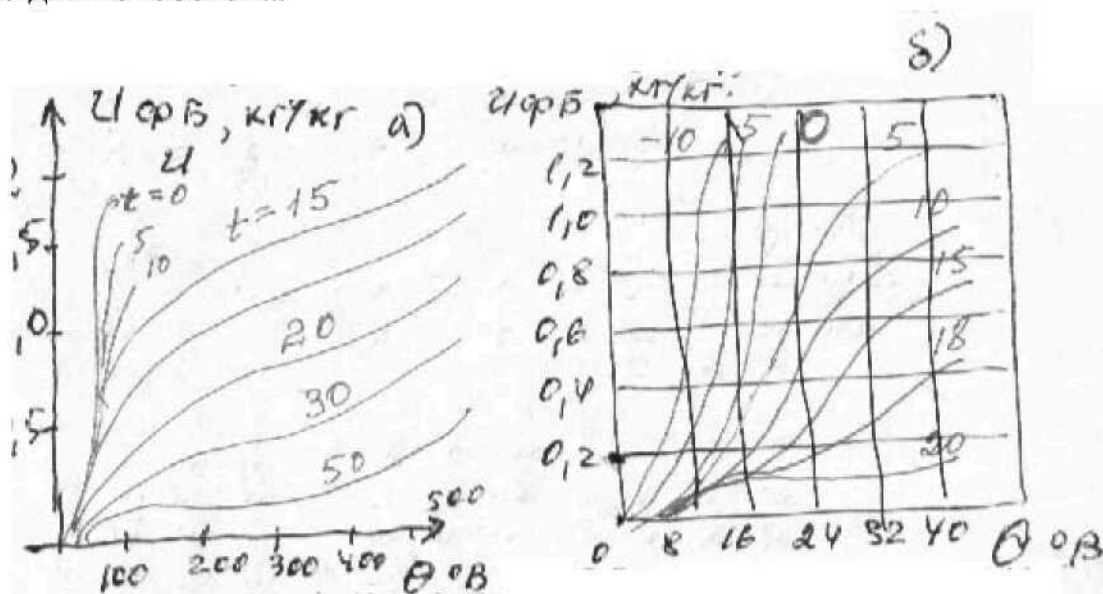


Рис. 9.1. Шкала потенциалов влажности – зависимость (а) между потенциалом влажности пенобетона и влажностью фильтровальной бумаги $U_{ФБ}$ при разных t ; (б) – тоже в диапазоне θ от 0 до $50^{\circ}B$, включая область отрицательных t .

Сравнение θ пенобетона проводится с влажностью фильтрованной бумаги. По аналогии с относительной влажностью воздуха ϕ в теории потенциала влажности введён показатель относительного потенциала влажности ϕ_{θ} . Подобно тому как ϕ является отношением упругости водяного пара в воздухе данного состояния к его упругости в состоянии полного насыщения, относительный потенциал влажности определяется общей зависимостью:

$$\phi_{\theta} = \frac{f_1(\theta)}{f_2(\theta_{м.с})} \quad (9.3),$$

которое отражает физический смысл ϕ_{θ} , как отношение некоторой функции потенциала влажности θ при данном состоянии материала и потенциала влажности материала, равновесной насыщенному состоянию воздуха при эталонной $t=20^{\circ}C$.

Влагопроводность и влагосодержание.

В теории влагопроводности в качестве потенциала влажности принимают влагосодержание материала. В табл. 9.1. приводятся значения весового влагосодержания $U \cdot 10^{-2}$ (кг/кг) (по сравнению с фильтровальной бумагой) строительных материалов, соответствующих различным значениям потенциала влажности ϕ_{θ} .

В общем случае в изотермических условиях считают, что поток влаги i , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, при любом соотношении между парообразными градиенту влагосодержания ∇U , кг влаги на 1кг сухого материала, т.е.

$$i_u = -k \cdot \rho \cdot \nabla U \quad (9.4),$$

где k – коэффициент проводимости влаги в материале, $\text{м}^2/\text{ч}$.

ρ – объёмная масса абсолютно сухого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Равновесные весовые влагосодержания различных строительных материалов.

Табл. 9.1.

Материал	$\rho, \text{кг} / \text{м}^3$	Значения $U \cdot 10^{-2} \text{кг} / \text{кг}$ при φ_θ					
		0,2	0,6	1,0	1,6	2,0	3,0
Фильтровальная бумага	380	5,0	10	24,6	92	138	253
Пенобетон	700	2,5	4,9	15	-	-	-
Поризованный керамзитобетон	900	1,4	2,4	6,3	20,7	26	-
Кирпич красный	1800	0,3	0,7	1,3	12	-	-

В неизотермических условиях во влажном материале предполагают поток влаги i , вызванный $\text{grad } t$. Это явление называют термовлагопроводностью δ . Поток влаги i_t пропорционален $\text{grad } t$ и равен:

$$i_t = -k \cdot \rho_0 \cdot \delta \cdot \nabla t \quad (9.5.)$$

Из уравнения (9.4) и (9.5) следует, что в сечении, где поток i_u равен и противоположен по знаку потоку i_t . Коэффициент термовлагопроводности δ определяют зависимостью

$$\delta = \nabla U / \nabla t \quad (9.6)$$

Дифференциальное уравнение термовлагопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \delta \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (9.7)$$

Область применения дифференциального уравнения (9.7) ограничивается однородной конструкцией.

Влияние t на интенсивность перемещения влаги учитывают, принимая численные значения коэффициента k (коэффициент проводимости влаги в материале) в зависимости не только от влажности материала, но и от t .

Паропроницаемость материала определяется коэффициентом паропроницания материала μ в зависимости от физических свойств данного материала и представляет собой количество водяного пара, которое диффундирует в течение 1ч через 1м^2 плоской стенки толщиной 1м при разности упругостей водяного пара с одной и с другой стороны равной 1Па .

Справочная величина μ различных строительных материалов и конструкциях приведена в приложении 3 СНиП II-3-79*, “Строительная теплотехника”. Оценка паропроницаемости ОК проводится по величине сопротивления паропроницанию. Для однородного слоя материала сопротивление паропроницанию определяется по формуле.

$$R_n = \delta / \mu \quad (9.8),$$

где δ – толщина слоя; μ – коэффициент паропроницаемости материала стенки, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$.

Сопротивление паропроницанию многослойной ОК равно:

$$R_{on} = R_{gn} + R_{1n} + R_{2n} + \dots + R_{nn} = R_{gn} + \delta_1 / \mu_1 + \delta_2 / \mu_2 + \dots + \delta_{nn} / \mu_{nn},$$

где R_{1n}, R_{2n}, R_{nn} – сопротивления паропроницанию отдельных слоёв ОК, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$; n – число всех слоёв ОК; R_{en} и R_{nn} – сопротивления влагообмену у внутренней и наружной поверхности ОК, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$.

При оценке паропроницаемости ОК необходимо выполнить условие: величина сопротивления паропроницанию $R_n, \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$ ОК д.б. не менее наибольшего из требуемых сопротивлений R_{n1} и R_{n2} (по условиям недопустимости накопления влаги в ограждении за год эксплуатации и ограничение влаги в ОК за период с отрицательными среднемесячными t наружного воздуха) в соответствии со СНиП II-3-79* (п. 6.1).

Методика проверки отсутствия накопления влаги расчётным путём.

В ОК, вычерченной в определённом масштабе, строится линия падения t (рис. 9.2).

Рис. 9.2.

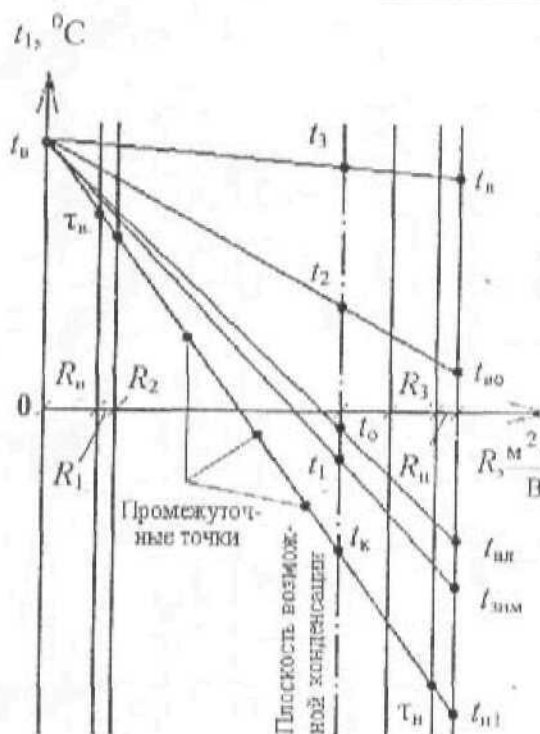


Рис. 1. Распределение температур

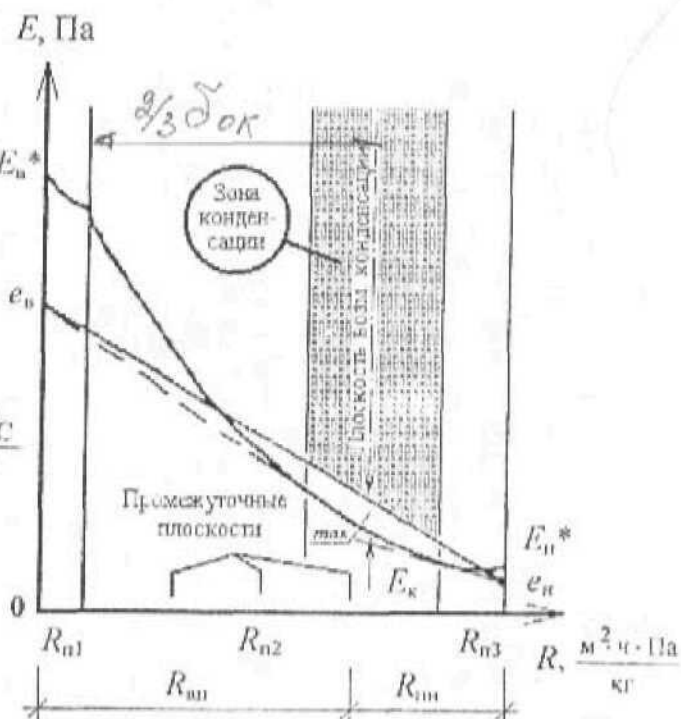


Рис. 2. Распределение уругостей

Рис. 9.2. Схема к проверке отсутствия накопления влаги в ОК в зимний период.

а) – накопление влаги отсутствует.

б) – возможно накопление влаги.

По значениям t в соответствующей плоскости устанавливают величину $\max$ уругости водяного пара и строится линия E .

Значение уругости e_x водяного пара в соответствующей плоскости определяют по формуле:

$$e_x = e_v - \frac{e_v - e_n}{R_{оп}} \sum R_x \quad (9.10),$$

где e_v, e_n – уругость водяного пара у внутренней и наружной поверхностей ОК, Па.

$R_{оп}$ – сопротивление паропроницанию многослойной ОК.

$\sum R_x$ – сумма сопротивлений паропроницанию от внутренней среды до соответствующей плоскости X .

Если линии E и e не пересекаются (9.2.а) - это указывает на отсутствие конденсации водяного пара. Если же линии E и e пересекаются (рис. 9.2.б), то в ОК возможна конденсация водяного пара. Зона конденсации находится между точками касания $E_{кв}$ и $E_{кн}$.

Для предупреждения конденсации в толще ОК более плотные, теплопроводные и малопроницаемые материалы должны располагаться у внутренней поверхности ОК, а к наружной поверхности, наоборот, пористые, малотеплопроводные и более паропроницаемые. В этом случае у внутренней поверхности будет более высокая t , а значит и тах возможное значение E , причём $E > e$.

Для предупреждения конденсации влаги на внутренней поверхности наружных ОК необходимо чтобы $t_B > t_P$. Температура точки росы t_P воздуха помещения определяется по формуле:

$$t_P = 20,1 - (5,75 - 0,00206e_\phi)^2 \quad (9.11)$$

где e_ϕ – упругость водяного пара в воздухе помещения, Па. Если $t_B > t_P$ не соблюдается, то необходимо повысить сопротивление теплопередачи ОК R_0 . Целесообразно вентилирование помещения.

14.1. Летний тепловой режим помещения.

1.4.1. Тепловой период года в общем является более благоприятным и комфортным тепловых условий для человека, чем холодный. Однако, в жаркие летние месяцы здания, расположенные в южных районах подвергаются значительному перегреву, и в связи с этой большой перенапряженности системы терморегуляции организма.

ОК защищают помещения от интенсивного облучения солнца и нагретого наружного воздуха. Определяющую роль играют теплопоступления от солнечной радиации. Суточная ее периодичность приводит к типичной для летнего режима нестационарности всех процессов теплообмена.

Тепловой режим помещений здания должен соответствовать определенным требованиям. Для удовлетворительного их использования средства тепло- и солнцезащиты зданий в виде теплоустройств орошаемых водой и вентилируемых ограждений, затеняющих устройств, солнцезащитных стекол и т.д. Помещения, охлаждающиеся наружным воздухом, используя ночное проветривание и работу общеобменной системы вентиляции, а также с помощью специальных систем кондиционирования микроклимата. В зданиях повышенной комфортности применяются системы регулируемого кондиционирования микроклимата. Одна из главных задач при проектировании систем кондиционирования состоит в выявлении возможного теплового режима при различных мерах его обеспечения, и в выборе экономически целесообразного варианта, обеспечивающего заданные внутренние условия. Последовательность решения такой задачи следующая: принимаются расчетные (допустимые или оптимальные) внутренние тепловые условия и коэффициент их обеспеченности. С учетом принятого коэффициента обеспеченности устанавливаются расчетные параметры наружных условий. Производится расчет естественного теплового режима помещений при различных конструктивно-планировочных мерах защиты и проветривания. Устанавливается достаточность такого решения для поддержания расчета внутренних условий или выявляется необходимость устройства системы регулируемого кондиционирования микроклимата. Определяется расчетный режим системы регулируемого кондиционирования, при котором обеспечиваются оптимальные условия в помещении. Намеченная последовательность расчета дает возможность подобрать достаточно эффективный и в то же время экономичный вариант обеспечения заданных тепловых условий в помещении зданий.

Анализ теплового режима помещений позволяет установить производительность, установочную тепловую и холодильную мощность и режим регулирования работы систем кондиционирования микроклимата.

14.2. Расчетные летние внутренние условия и их обеспеченность.

Выбор расчетных внутренних условий для летнего периода года имеет специфичность. Он должен производиться с учетом следующих факторов:

1. назначение здания и помещения;
2. климата и географического района строительства;
3. нестационарности летних условий;
4. градация уровней требований и способа обеспеченности заданных условий;
5. выполняемые человеком работы и степень ее физической тяжести;
6. наличие больших нагретых или охлажденных поверхностей;
7. длительность пребывания людей;
8. требования обеспеченности расчетных условий.

За основу определения внутренних условий удобно принять условия для наибольшего распространенного случая основных помещений жилых и общественных зданий, расположенных в умеренном климате с учетом нестационарности условий для двух

уровней требований при их обеспеченности средствами вентиляции и кондиционирования воздуха. По принятым сейчас рекомендациям их ориентировочные значения приведены в таблице 14.1.

Если t_H устойчиво больше 30°C , то расчеты t_{Π} помещения должны отличаться от t_T в таблице 14.1. и быть равными:

$$t_{\Pi}' \approx t_{\Pi} + 0.5(t_H - 30) \quad (14.1)$$

Длительность пребывания ($\Delta z_{\text{преб}}$) людей в помещении необходимо учитывать при t_H больше 30°C . Температура помещения t_{Π}

Расчет внутреннего условия для основных помещений жилых и общественных зданий
Таблица 14.1.

В умеренном климате				
Расчётные внутренние средства и условия	Расчётные параметры микроклимата			
	Температура помещения $t_{\Pi}^{\circ}\text{C}$		Относительная влажность воздуха	Подвижность воздуха
Их обеспечения	$t_{\Pi 0}$	A_{Π}	$Y_B\%$	$V_B \text{ м/с}$
Оптимальные условия – регулируемая система кондиционирования.	25	1	40-60	Меньше 0,3
Допустимые условия – система вентиляции.	$T_{\text{н.о.}}^{**} + 3$	4	-	Меньше 0,5
Примечание: * - температура помещения. $t_{\Pi} = (t_B + t_R)/2$; ** - среднесуточное значение, $t_{\Pi 0}$				

В этом случае должно быть с учетом (14.1.) приблизительно равно:

$$t_{\Pi}'' \approx t_{\Pi}' + c(t_H - 30) = t_{\Pi} + (0.5 + c)(t_H - 30) \quad (14.2),$$

где c - численный коэффициент равный 0,3 при $\Delta z_{\text{преб}}$ до 1 ч и 0,1 при $\Delta z_{\text{преб}}$ до 3 часов.

Для летних условий (также как и зимой) необходимо задавать коэффициент обеспеченности и по числу n случаев ($K_{об,n}$) и по продолжительности (Δz) отклонений ($K_{об,\Delta z}$).

Коэффициент обеспеченности по числу случаев равен:

$$K_{об,n} = (N - n) / N \quad (14.3),$$

а по продолжительности отклонений:

$$K_{об,\Delta z} = (z - \Delta z) / z \quad (14.4),$$

где N и Z - соответственно общее число случаев и общая продолжительность во времени для принятого сезона, периода года;

N и Δz - соответственно число случаев и продолжительность отклонения условий от расчетных.

В действующих нормах принято три градации климата (А, Б и В) для расчета систем обеспеченности микроклимата. Их приближенно можно определить коэффициентами

обеспеченности. В таблице 14.2. приведены рекомендуемые градации обеспеченности расчет внутренних условий для летнего периода и их связь с данными СНИПа.2.01.01-82 строительная климатология и геофизика.

Требуемая обеспеченность и ее связь с градацией климата по СНИП.

Таблица 14.2

Уровень требований	$K_{об,п}$	$\Delta z, ч$	$K_{об, \Delta z}$	Градац. Климата по СНИПу(~)
Повышенный(П)	~1	~0	~1	В
Высокий(В)	0.9	~50	~0.98	Б
Средний(С)	0.7	~200	~0.92	-
Низкий(Н)	0.5	~400	~0.8	А

Для промышленных зданий уровень требований к обеспеченности в определенной мере мог быть связан с допустимыми колебаниями температуры, которые часто определены в технологическом здании на проектирование. Требования обеспеченности для промышленных зданий даны в таблице 14.3.

Требования обеспеченности для промышленных зданий

Таблица 14.3

Виды требований	Уровень треб.	Допустимая амплитуда колебаний	$K_{об, п}$
Технические	Повышенный	0,1	1
	Высокий	0,5	0,9
	Средний	1,0	0,9
Оптимальные условия для работающих	Высокий	1,0	0,9
	Средний	1,5	0,7
Допустимые условия для работающих	низкий	2 и больше	0,5

14.3. Характеристики наружного климата.

Важными характеристиками климата летнего периода является солнечная радиация и $t_{нар,в}$. Для оценки теплозащит качества ОК и определяется поступлениями тепла в помещение, а также для выбора производительности вентиляции и холодильной мощности системы кондиционирования, необходимо иметь характеристики климата для расчета наиболее жаркого периода лета.

Следуя принятой методике (для холодного периода года) за расчетный случай принимаем наиболее жаркие сутки. Для получения расчетных параметров климата при разных $K_{об}$ принимаем заряд случаев все сутки календарных (июнь, июль, август) летних месяцев за последние 25 лет. Прежде всего должны быть определены расчетные изменения t_H и интенсивность падающей на ОК солнечной радиации.

Значения t_H по каждому сроку наблюдений располагают в убывающий статический ряд. На рис.14.1. для условий Москвы приводятся графики изображения убывающих рядов для четырех сроков наблюдения.

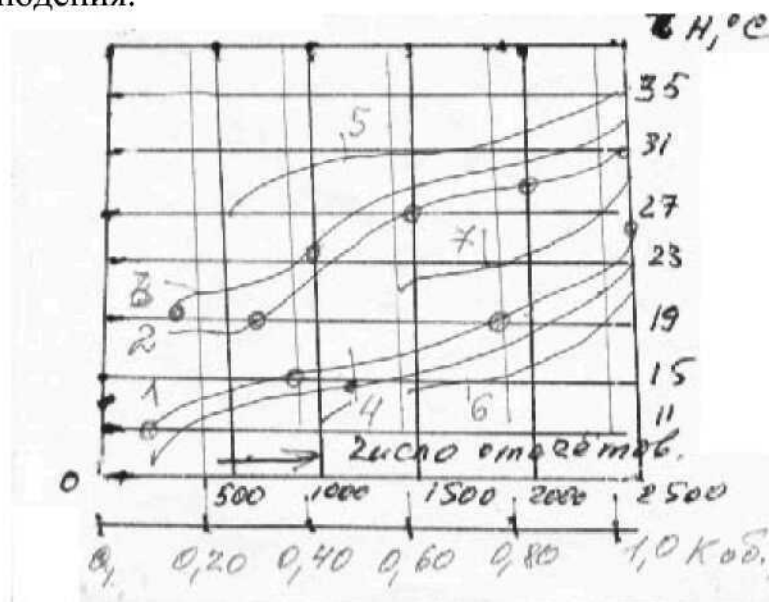


Рис. 14.1. Убывающие статистические ряды средних температур: 1- в 7 часов; 2 – в 13 часов; 3- в 19 часов; 4 – в 1 час; 5 – максимальная температура в летние месяцы; 6 – минимальная температура в летние месяцы; 7 – среднесуточные температуры в летние месяцы.

Графики рисунок 14.1. построены для четырех сроков наблюдения (в 1;7;13 и 19 часов каждых суток а также для значений максимальных, минимальных и средних за сутки температуры. По данным графика рис.14.1. построены кривые изменения $t_{нар}$ в течении расчетных суток (рис.12.2.). Каждая кривая соответствует определенному коэффициенту обеспеченности.

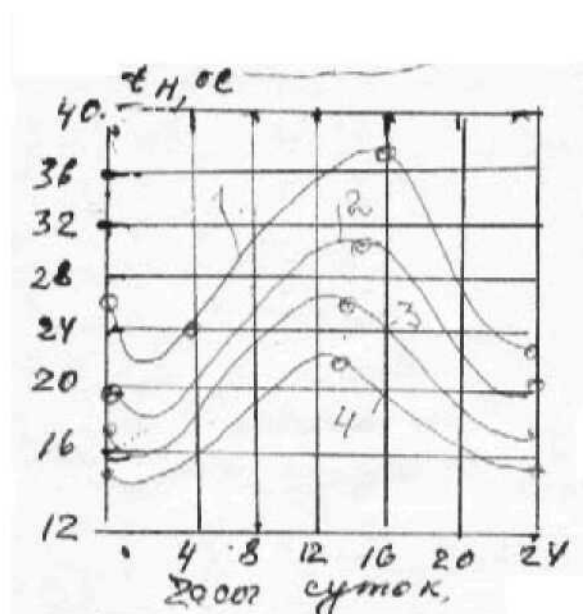


Рис.14.2. Кривые изменения температуры в летние сутки для Москвы при коэффициентах обеспеченности : 1-0,999; 2 – 0,9; 3 – 0,7; 4 – 0,5.

Как видно из рисунка, кривые суточного изменения температуры близки по очертаниям к правильным гармоничным колебаниям (max. Значения $t_H \rightarrow$ в 15 час)

Эти кривые полностью определяются тремя параметрами: средней за сутки $t_{но}$ амплитуды суточного изменения $t \rightarrow A_H$ временем суток максимального значения $t_{нар} \rightarrow z_{та}^{max}$ Для получения расчетных значений падающих на ОК солнечной радиации необходимо использовать данные наблюдения Σq (прямой и рассеянной) солнечной

радиации. Как известно, интенсивность солнечной радиации зависит от облачности, прозрачности атмосферы, времени года и суток широты места и др. Корреляционная связь между значениями t_H (во времени) и интенсивности солнечной радиации не значит, поэтому t_H и q можно считать независимым.

При заданном коэффициенте обеспеченности сочетания q и t_H определяются как:

$$K_{об}(t_H, q) = K_{об}(t_H) K_{об}(q) \quad (14.5)$$

Для получения $K_{об}(t_H, q)$ можно принять $K_{об}(q) = 1$. Тогда

$$K_{об}(t_H, q) = K_{об}(t_H) \quad (14.6).$$

Рассматривая обеспеченность совместного действия t_H и q в качестве расчетных берем максимальное значение интенсивности сумму солнечной радиации, соответственно $K_{об}(q) = 1$. В качестве расчетных принимают максимальную солнечную радиацию в июле при безоблачном небе.

Для районов с влажным летним периодом рассеянная радиация занимает значительную часть в сумме радиации падающей на поверхности здания, особенно на вертикальные поверхности. В следствии этого в условиях жаркого и влажного летнего периода в качестве расчетных принимают максимальные значения интенсивности суммы солнечной радиации падающие на поверхности зданий при облачности средних баллов.

Расчет прямой солнечной радиации, поступающей на вертикальные поверхности ОК проводятся по формуле:

$$S_B = S \cdot \cos \theta \quad (14.7),$$

где S - интенсивность прямой солнечной радиации, падающей на перпендикуляр солнечным лучам поверхность (измеряется на метеостанциях).

θ - угол падения солнечных лучей на поверхность. Величина $\cos \theta$ определяется для вертикальных (горизонтальных) поверхностей определенной ориентации по сторонам света (север, юг, запад, восток) зависит также от:

φ - географической широты местности;

δ - угла отклонения солнца, градусов;

γ - часовой угол солнца в данный момент времени, отсчитывается от момента истинного полудня, град.

Величину S принимают по данным фактических наблюдений, по эмпирической формуле.

$$S = \frac{S_0 \cdot \sinh}{\sinh + C} \quad (14.8),$$

где S_0 - солнечная постоянная на границе атмосферы;

h - угол высоты стояния солнца;

C - эмпирический коэффициент, характеризующий прозрачность атмосферы.

14.4. Проверка теплозащитных свойств ОК для теплого периода года.

По опыту эксплуатации зданий в каждом районе и по действующим рекомендациям амплитуды колебаний температуры на внутренних поверхностях ОК - A_{τ_B} зданий, расположенных в районах со среднемесячным t_H июля 20°C , и выше, должно быть больше допускаемой, которая определяется по формуле:

$$A_{\tau_B}^{don} = 2,5 - 0,1(t_H - 21) \quad (14.9).$$

Расчет необходимой теплоустойчивости ОК для обеспеченности допустимых значений A_{τ_B} проводится при постоянном t_H помещения и в условиях расчетных изменений t_H и интенсивности падающей на ОК солнечной радиации. Фактические колебания

температуры τ_B будут иными, чем полученные таким расчетом, т.к. температурные условия в помещении изменяются.

Эти изменения могут увеличивать или уменьшать колебания τ_B на поверхности ОК. Их реальные значения мб. Определяются по формуле.

$$A_{\tau_B} = (A'_{\tau_B} + A_{\tau_{OC}})\psi \quad (14.9),$$

где A'_{τ_B} - амплитуда τ'_B при постоянной температуре помещения.

$A_{\tau_{OC}}$ - амплитуда изменения τ_{OC} под влиянием конвективных и лучистых прерывистых теплопоступлений..

Важными показателями (кроме A_{τ_B}) являются сопротивление теплопередаче R - ОК. Чем больше R_0 , тем меньше теплопоступление в помещение, что уменьшает холодильную мощность системы кондиционирования. Летом определяют при выборе R_0 обычно (в отличие от зимних условий) являются не санитарно-гигиенические требования, а экономические. Значит поступление тепла в помещение происходит через окна и другие лучепрозрачные ОК. Регламентация по теплозащите окон носит общий характер: светопроемы в жарких южных районах должны иметь солнцезащитные устройства, исключающие попадание прямых солнечных лучей в помещения; желательно применять специальные солнцезащитные стекла и необходимость ограничивать площадь остекления допустимой величиной естественного освещения помещений.

Необходимость и достаточность мер по защите светопрозрачных проемов и всего здания от перегрева должны оцениваться расчетом теплового режима помещений.

Пример 2. Расчёт нестационарной влагопередачи. (Богосл. Строительная теплофизика.стр. 128)

В качестве примера рассчитаем режим высыхания (вхождение в равномерное состояние с окружающей средой.) конструкции покрытия (не стены а перекрытия) из газобетона объёмной массой (плотностью) $\rho = 700 \text{ кг/м}^3$ и толщиной $l = 24 \text{ см}$.

Приведём выборочно необходимые сведения для расчёта : среднее в течении года условия в помещении $t_B = 22^\circ \text{C}$; $\varphi_B = 70\%$ режим помещения влажный . Географический район – Москва . $t_{H, \text{ср. год}} = 4,8^\circ \text{C}$

Нормальная влажностная зона строительства . $\varphi_{\text{сн}} = 2,0$

Данные в зависимости $x/\eta\rho_0$ от влагосодержания газобетона приведены на рис 11.55 (Богосл. Стр.Тепл.стр.128)

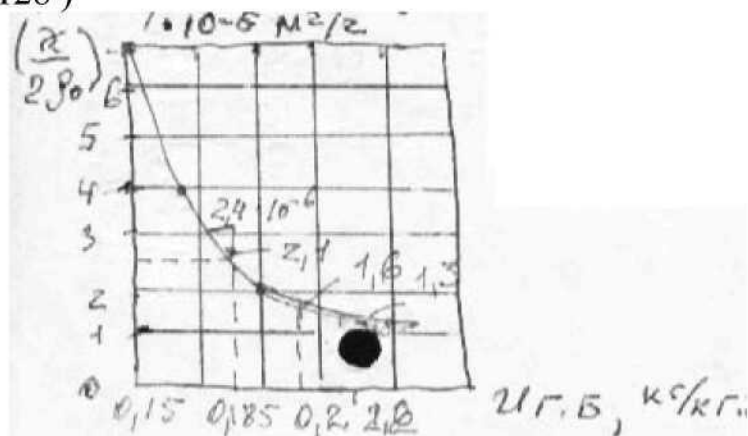


Рис.П.15 Теплофизические свойства газобетона к примеру расчета П.2.

Начальная влажность газобетона в плите равна $U_{\text{ГБ}} = 0,22 \text{ кг/кг}$

Решение Вариант А Вначале проводим расчёт, принимая осреднённое значение теплофизических характеристик в своём диапазоне высушивания ОК . Условия со стороны помещения для $t_B = 22^\circ \text{C}$ и $\varphi_B = 70\%$ по рис. П 10. $\Theta_B = 43^\circ$ (см. Богослов. Строит. Теплофиз.)

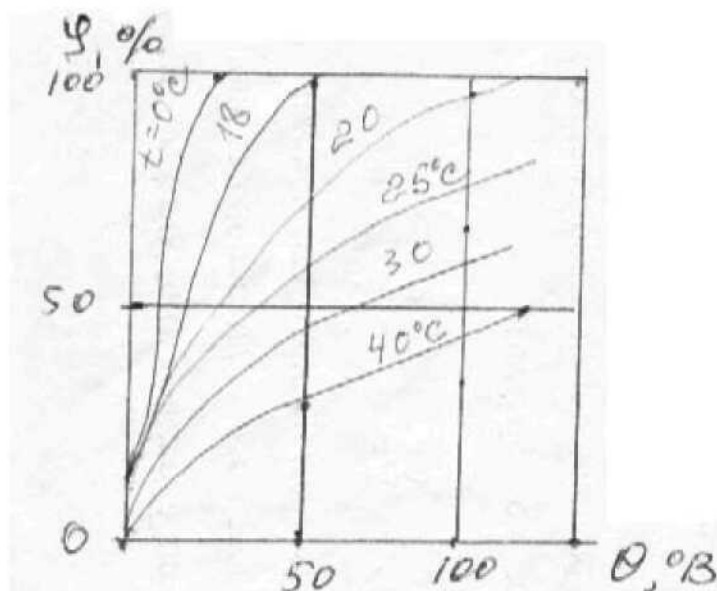


Рис.П.10. Зависимость относительной влажности воздуха φ от потенциальной влажности θ

При разных температурах воздуха.

Внешние условия при $\Psi_{\text{сн}} = 2,0$ по табл. П. 1. (Богосл. Стр 115 Строительная теплофизика) $U_{\text{Ф.Б.}} = 1,38 \text{ кг/кг}$ (Ф.Б. – фильтровальная бумага) С учётом $t_H = 4,8^\circ \text{C}$ по

рис. II. 6. (стр.113) (см. лекцию 9. рис 9.1. стр.6) $\Theta_H = 31^\circ B$. В равномерном состоянии будет равно

$$\Theta_\infty = (\Theta_B + \Theta_H) / 2 = (43 + 31) / 2 = 37^\circ B,$$

а температура ОК

$$t_\infty = (t_B + t_H) / 2 = (22 + 4.8) / 2 = 13.4^\circ C$$

При $\bar{\Theta}_\infty = 37^\circ B$ и $t_\infty = 13.4^\circ C$ по рис. II.6. $U_{\phi.B.} = 0,80 \text{ кг/кг}$ и по табл. II. 1.

$$U_{Г.Б.} = 0,15 \text{ кг/кг}$$

По рис. II. 15 для этого диапазона влажностное среднее значение $(x/\eta\rho_0) = 2.4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/2$ начальный потенциал влажности при $t_\infty = 13.4^\circ C$ и $U_{Г.Б.} = 0,22 \text{ кг/кг}$ по табл. II. 1. и рис. II.6 равен $\Theta_0 = 108^\circ B$ Определим изменение Θ во времени по формуле (лекция 12 форм. 12.1)

$$\Theta = \frac{\bar{\Theta}_z - \bar{\Theta}_\infty}{\bar{\Theta}_0 - \bar{\Theta}_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} F_0\right) \quad (12.1)$$

спустя 30 суток = 720г

$$F_0 = \frac{(x/\rho_0\eta) * z}{l^2} = \frac{2.4 \cdot 10^{-6} * 720}{0.24^2} = 3.0 \cdot 10^{-2}$$

$$\Theta = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} F_0\right) = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} * 3.0 \cdot 10^{-2}\right) = 0.753$$

$$\bar{\Theta}_z = \Theta(\bar{\Theta}_0 - \bar{\Theta}_\infty) + \bar{\Theta}_\infty = 0.753(108 - 37) + 37 = 90.48^\circ B$$

И т.д. спустя 60,90,120 суток до равномерного влажностного состояния, которое наступит ~ при $F \cong 1.5$ (отклонение ~ 1%) В данном случае через время z

$$z = \frac{F_0 l^2}{(x/\eta\rho_0)} = \frac{1.5 \cdot 10^{-2} (0.24)^2}{2.4 \cdot 10^{-6}} = 28.8 \cdot 10^3 \text{ ч или } 1200 \text{ сут.}$$

Данные полного расчёта связаны в табл. II. 2. Вариант А.

Вариант В.

Проведём постоянный расчёт с учётом изменения теплофизических характеристик материала в процессе высыхания ОК.

Данные расчёта к примеру II. 2.

Время ч.	Вариант А			Вариант Б		
	$\frac{x}{\rho_0\eta} * 10^6$ $\frac{\text{м}^2}{\text{ч}}$	$\Theta, ^\circ B$	$U, \text{кг/кг}$	$\frac{x}{\rho_0\eta} * 10^6$ $\frac{\text{м}^2}{\text{ч}}$	$\Theta, ^\circ B$	$U, \text{кг/кг}$
720	2,4	90,5	0,192	1,3	97,8	0,21
1440	2,4	86,7	0,183	1,4	92,0	0,2
2160	2,4	83,7	0,181	1,6	88,4	0,185
2880	2,4	79,8	0,177	2,1	82,0	0,18

При этом теплофизические характеристики материала для каждого нового расчётного интервала будем принимать по средней влажности газобетона в конце предыдущего расчётного интервала. Расчётные интервалы времени $\Delta Z = 30 \text{ сут} = 720 \text{ ч}$

Первый расчётный интервал.

Определим по рис. II. 15 для $U_{Г.Б.} = 0,22$; $(x/\eta\rho_0) = 1,3 \cdot 10^{-6}$

$$\text{и } F_0 = \frac{1.3 \cdot 10^{-6} \cdot 720}{0.24^2} = 1.62 \cdot 10^{-2}$$

Определим по формуле (П. 76.)

$$\Theta = 1 - 2\sqrt{\frac{F_0}{\pi}} \quad (\text{П. 76.}), \quad \text{т.к. } F_0 < 0.1$$

имеем:

$$\bar{\Theta}_z = \Theta(\bar{\Theta}_0 - \bar{\Theta}_\infty) + \bar{\Theta}_\infty = 0.856(108 - 37) + 37 = 97.8^\circ \text{B}$$

По рис П. 6. ДЛЯ $\Theta = 97,8^\circ \text{B}$; $t_\infty = 13.4^\circ \text{C}$ определим $U_{\Phi.Б.}$ которая по рис П. 7. (см. Богосл. Строительная теплофизика стр.114. соответств. $\varphi_\Theta = 1,8$

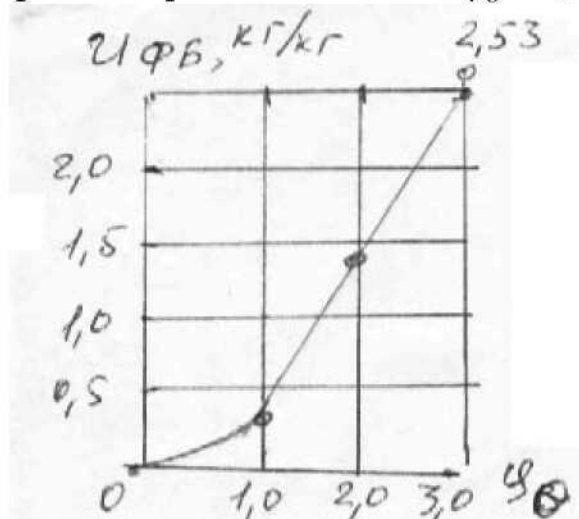


Рис П. 7. Шкала относительного потенциала влажности - зависимость равновесного влагосодержания фильтровальной бумаги (ИФБ) от относительного потенциала влажности.

Далее по табл. П 1. $U_{Г.Б.} = 0,21 \text{ кг/кг}$. По этому значению $U_{Г.Б.} \Delta z$ – определяет теплофизические характеристики газобетона для второго расчётного интервала и т.д. Производим расчёты для последующих интервалов данные которого занесены в табл.П. 2. Вариант Б.

К примеру 3. Выбор теплофизических характеристик материалов в многослойной ОК с учётом их эксплуатационной влажности. (см. лекцию 12).

Последовательность выбора теплофизических характеристик д.б. следующей. В расчёт принимается среднегодовой режим влагопередачи ОК. Определив влажностную зону $\varphi_{\text{вн}}$ (по табл. П.3, Богосл. Стр.133 или лекция 12 табл. 12.1. лист 8) и среднюю температуру $t_n^{\text{ср.год.}}$ (по СНиП) района строительства, находим θ_n (по табл. П.3), устанавливаем потенциал влажности внутренней среды $\theta_{\text{в}}$, зная назначение помещения $\varphi_{\text{в}}$ и $t_{\text{в}}$ (по табл. П.4. Богосл. Или 12.2. лекц. 12. Лист 9). Вычисляем $\theta_{\text{сл}}$ и $t_{\text{сл}}$ и находим $\varphi_{\theta \text{ сл}}$ (по табл. П. 5. , 12.3). По значению последнего определим графу таблицы в СнИПе, по которой принимаем значения теплофизических характеристик материала слоя. Методика СнИПа по выбору теплофизических характеристик с учётом влажностного режима ОК предполагает выбор последних в зависимости от влажностного состояния помещения и влажностной зоны района строительства. Однако при этом никак не учитываются влажностные свойства самих материалов, многослойных конструкций и место расположения в ней теплоизоляционного слоя.

Известно, что влажность материалов бесчердачного покрытия, имеющегося на наружной поверхности гидроизолирующий слой, существенно > влажности наружных стен, хотя они эксплуатируются в одном здании и в одной влажностной зоне.

Ниже приведён пример выбора теплофизических характеристик материалов ОК с учётом их эксплуатационной влажности, которая показывает достоинства предложенной методики.

Пример 3. Требуется рассчитать толщину утепляющего слоя ограждения душевой. Конструкция стены (со стороны помещения): железобетонный слой $\delta=40$ мм, гидроизолированный с внутренней поверхности поливинилхлоридным лаком за 2 раза, пенобетон $\rho=1000$ кг/м³ (с внешней стороны).

Условия в помещении: $t_{\text{в}}=25^\circ\text{C}$, $\varphi_{\text{в}}=65\%$, режим - влажный, $\varphi_{\text{вв}}=0,58$ (см. табл. П.4). Район постройки – г.Липецк, сухая влажностная зона, $\varphi_{\text{вн}}=1,5$ (см. табл. П.3. стр. 133. Богосл.), ограждение легкое, $R_{\text{отр}}=0,92$ м²·°C/Вт.

Решение. Для душевой в г. Липецке расчётные условия эксплуатации по СНиП “Строительная теплотехника” (П-3-79) соответствует графе Б. Принимаем по графе Б таблицы СНиП теплофизические характеристики материалов и определяем толщину пенобетона из условия:

$$R_0 = R_{\text{в}} + \sum R_i + P_n \geq R_{\text{отр}}. \quad (3.1)$$
$$0,144 + \frac{0,04}{2,03} + \frac{\delta_{\text{пб}}}{0,41} + 0,043 \geq 0,92 \quad \Rightarrow \quad \delta_{\text{пб}} = 0,3 \text{ м}.$$

Уточним с учётом фактического влажностного режима материала по предложенной выше методике. Среднегодовым условием в помещении при $t_{\text{в}}=25^\circ\text{C}$ и $\varphi_{\text{в}}=65\%$ по рис. П.10 (см. пример 2. Л.2.) соответствует $\theta_{\text{в}}=42^\circ\text{B}$. Среднегодовые наружные условия при $t_n=5,1^\circ\text{C}$ и $\varphi_{\text{вн}}=1,5$ по рис. П.6 и П.7 (см. лекц. 9. Рис.9.1. и л.6. пример 2. Рис. П.7. л.5) соответствуют $\theta_n=25^\circ\text{B}$.

Соппротивление влагопередаче слоёв ограждения; по формуле (П,80).

Железобетон:

$$H_{\text{жб}} = \frac{0,04}{0,3} \cdot 10^4 = 0,133 \cdot 10^4 = 1330 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}}{\text{з}};$$

Пенобетон:

$$H_{Б.П} = \frac{0,3}{1,13} \cdot 10^4 = 0,265 \cdot 10^4 = 2650 \frac{м^2 \cdot ч \cdot Па}{з}$$

Слой гидроизоляции $H_{Г.И} = 3850 \frac{м^2 \cdot ч \cdot Па}{з};$

Общее сопротивление влагопередаче:

$$H_0 = 1330 + 2650 + 3850 = 7830 \frac{м^2 \cdot ч \cdot Па}{з}$$

Вычисляем значения потенциала влажности слоёв Ж.Б. и утеплителя – пенобетона:

$$\theta_{Ж.Б} = \theta_B - \frac{H_{Г.И} + \frac{H_{Ж.Б}}{2}}{H_0} (\theta_B - \theta_H) = 42 - \frac{4515}{7830} (42 - 25) = 32,2^\circ B.$$

$$\theta_{П.Б} = \theta_B - \frac{H_{Г.И} + H_{Ж.Б} + \frac{H_{П.Б}}{2}}{H_0} (\theta_B - \theta_H) = 42 - \frac{6505}{7830} (42 - 25) = 27,0^\circ B.$$

Вычислив температурное поле ограждений получим среднегодовые значения t отдельных материальных слоёв: $t_{жб} = 22,3^\circ C$, $t_{пб} = 14,1^\circ C$. По рис. П.9. Богосл. Стр. 11 (результат опытов по определению влажностных характеристик пенобетона методом неизотермичной разрезной колонки) для $\theta_{жб}$ и $t_{жб}$ имеем $U_{жб} = 0,05$ кг/кг, $\varphi_{жб} = 0,3$; для $U_{пб} = 0,25$ кг/кг, $\varphi_{пб} = 1,0$. Для железобетона $\varphi_{жб} < 1,1$ следовательно условия эксплуатации соответствую графе А. Для пенобетона $\varphi_{пб} < 1,1$ условия эксплуатации также по графе А. Принимаем теплопроводность материалов по соответствующей графе таблицы СнИПа и определяем необходимую толщину пенобетона и расчётное сопротивление теплопередачи ограждения (т.е. вместо режима Б $\rightarrow$ принимается режим А из условий учёта эксплуатационной влажности).

$$0,114 + 0,04/1,91 + \delta_{пб}/0,35 + 0,043 \geq 0,92$$

Откуда $\delta_{пб} = 0,26$ (вместо 0,3м). Т.о. толщина утеплителя получилась меньше 0,3м на 4см. Т.о. расчёт по предложенному методу позволил обосновано принять более экономичную конструкцию ограждения.