

ПРОФ. В. Д. МАЧИНСКИЙ

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

ГРАЖДАНСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА



54.

Проф. В. Д. МАЧИНСКИЙ

622

697.34
МЗ

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГРАЖДАНСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

ПРОСМОТРЕНО 1950 Г.

ПР 89,9608

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР



41037

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
МОСКОВСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА «МАКИЗ» 1928

Деп.

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

Главлит № А 16320.

Тираж 3000—17 л.

Заказ № 769.

Государств. типогр. им. Евг. Соколовой, Ленинград, пр. Кр. Командиров, 29.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

При возведении зданий, в которых температура должна отличаться от окружающей внешней (жилые здания, холодильники и др.), строителю необходимо знать законы движения теплоты чрез ограждающие части сооружения. Особенно это нужно при постройке зданий с необычными конструкциями ограждений — в частности, в современном удешевленном строительстве жилищ и в постройке холодильников.

Однако законы движения теплоты чрез ограждения весьма сложны во всех тех случаях, когда идет речь о неустановившемся, неравномерном движении теплоты — при остывании, нагреве, при колебательных тепловых течениях. Выработанный еще сто лет тому назад классический метод и уравнения Фурье оставались до самого последнего времени едва ли не единственными в этой области. Но крайняя сложность и громоздкость этого метода были причиной того, что подобные расчеты применялись очень редко и почти исключительно теоретиками высокой квалификации, в практике же процессы неравномерного движения теплоты вообще не рассчитывались.

Между тем именно в этих областях расчетов кроется разрешение многих весьма интересных и важных вопросов строительной теплотехники — например, вопроса о влиянии теплоемкости строительных частей на теплоустойчивость помещений, вопроса о расчетной нагрузке нагревательных систем (отопления) для первоначального обогрева зданий и пр.

Лишь за последние годы стали появляться за границей некоторые теоретические работы, ставившие себе задачей такое упрощение расчетов неравномерного движения теплоты, которое делает их доступными для работников практики. Упомянем здесь метод мюнхенского профессора Э. Шмидта, некоторые выводы Г. Гребера и, наконец, наши собственные работы этого рода, опубликованные в нашей и заграничной печати за последние 3 года.

Все эти работы имеют не столько теоретический интерес, сколько практический, так как выведенные в них методы могут быть немедленно применены для решения таких практических вопросов, которые до этого времени не решались математическими расчетами из-за больших трудностей классических приемов.

Однако, упомянутые новые решения остаются до сих пор разбросанными по отдельным статьям и докладам, без всякой систематической обработки и такого же систематического применения к важным вопросам гражданского строительства. В частности, в нашей русской технической литературе нет до сих пор изложения даже основ классического метода Фурье, если не считать за таковое некоторых частных применений его в отдельных конкретных случаях ¹⁾. В виду всего этого нам кажется уместным теперь же свести в одно целое важнейшие части как теории подобных расчетов, так и их практических приложений к вопросам гражданского строительства.

Но и в области более простых тепловых расчетов при состоянии установившегося движения теплоты чрез строительные ограждения за последнее десятилетие — и особенно за последние годы — добыто наукой не мало новых данных. Достаточно упомянуть работы Мюнхенского Экспериментального Института по теплопроводности, Берлинской Высшей Технической Школы, опыты при Академии Инженерных Наук в Стокгольме и строительные опыты Норвежской Высшей Технической Школы. Этим работам мы обязаны множеством новых коэффициентов теплопроводности, добытых как лабораторным путем, так и практическими проверками, затем прекрасной разработкой вопроса теплопроводности воздушных прослоек и многих других вопросов.

Все это вместе взятое, наряду с отсутствием в нашей технической литературе вообще какой-либо сводки всего основного материала по теплотехнике для гражданского строительства, дало основание к настоящей работе. Не ограничиваясь теоретическими данными по указанным выше вопросам, мы приводим в конце книги и те практические выводы относительно важнейших материалов и конструкций удешевленного строительства, которые вытекают из теоретических данных. Но эта тема трактуется здесь только в качестве иллюстрации к предыдущей теории и не ставится в качестве самостоятельного и сколько-нибудь полного строительного-технического обзора. Такая задача была бы слишком обширной для данного случая и не гармонировала бы с основным характером книги, дающей лишь важнейшие основы для тепловых расчетов строительной практики.

В. Мачинский.

¹⁾ Едва ли не единственным примером этого рода может служить брошюра инж.-техн. Я. Карчевского „О влиянии теплоемкости зданий на температуру при центральных увлажнителях прядильных и ткацких фабрик“ изд. 1913 г. Кругжка Технологов Московского Района.

ВВЕДЕНИЕ.

Движение теплоты в строительных ограждениях можно разделить на три основных вида, интересующих строителя:

1. *Установившееся, равномерное движение* теплоты, когда приток ее к ограждению равен расходу из него, и температура каждой наблюдаемой точки на пути теплового потока остается неизменной во времени; примером может служить поток теплоты в наружной стене помещения, когда с одной стороны на нее действует постоянная внутренняя температура воздуха, а с другой — столь же постоянная наружная.

2. *Переменное, но однозначное движение* теплоты с „замирающим“ темпом — попросту, остывание или нагрев ограждения, когда приток к нему теплоты не равен расходу и температура каждой наблюдаемой его точки только понижается или же только повышается во времени, притом все более медленным темпом, стремясь к полному выравниванию с окружающей температурой среды; пример — остывание прогретой отоплением стены помещения под действием низкой наружной температуры после прекращения притока в нее теплоты из помещения.

3. *Переменное колебательное (неоднозначное) движение* теплоты в ограждении, когда, под влиянием соответствующих внешних (для ограждения) колебаний температуры периодического характера, температура точек внутри ограждения волнообразно повышается и понижается около некоторой средней величины; пример — температурные колебания в наружной стене жилого здания под влиянием периодического колебания внутренней температуры воздуха при действии отопления и его прекращении или же под влиянием периодического колебания наружной температуры в зависимости от смены дня и ночи (в пределах 1 суток) или смены погоды (в пределах более длинных периодов).

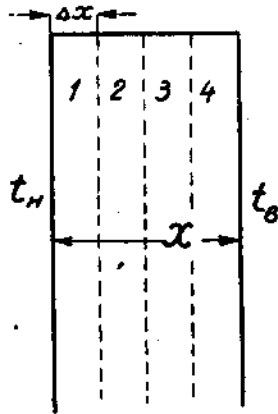
Каждый из этих видов движения теплоты рассмотрен ниже в соответствующих отделах этой книги.

ЧАСТЬ I.

Установившееся движение теплоты чрез строительные ограждения.

Глава I. Формулы и коэффициенты.

Возьмем строительное ограждение из однородного материала — например, в виде вертикальной стены, представленной на рис. 1. Если под влиянием прилегающей среды (например, воздуха) на одной ее поверхности держится температура t_n (в град. Цельсия), а на другой t_o , то по закону физики количество теплоты, проходящей чрез стену в единицу времени (1 час), пропорционально площади стены и разности двух указанных температур ее поверхностей и обратно пропорционально ее толщине. Обозначив площадь в кв м чрез F , толщину в пог м чрез X и коэффициент пропорциональности чрез λ , имеем для количества Q проходящей чрез стену теплоты (в калориях):



$$Q = \lambda \cdot F \cdot \frac{t_o - t_n}{X} \dots (1).$$

Рис. 1.

Представим себе, что данная стена разделена на слои равной толщины Δx . Пусть $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ и т. д. будут разности температур на двух разделительных плоскостях каждого из слоев: 1-го, 2-го и т. д. Тогда, приняв во внимание, что чрез каждый слой проходит в 1 час то же количество теплоты, как и чрез всю стену, получим:

$$\lambda F \frac{t_o - t_n}{X} = \lambda F \frac{\Delta t_1}{\Delta x} = \lambda F \frac{\Delta t_2}{\Delta x} \text{ и т. д.,}$$

из чего заключаем, во-первых, что $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots$ и затем — что линия, выражающая высоту температур во всех слоях плиты и на ее поверхностях, есть наклонная прямая:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{dt}{dx} = \text{Const.}$$

Таким образом характерной особенностью рассматриваемого типа движения теплоты является то, что, помимо неизменяемости внутренних температур стены во времени, их диаграмма по ее толщине X представляет собою наклонную прямую.

Приняв в уравнении (1) $F=1$ кв м, $X=1$ м и $t_s - t_n = 1^\circ\text{Ц}$, имеем $\lambda=Q$; таким образом коэффициент пропорциональности λ представляет собою количество теплоты, которое стена из данного материала способна пропустить через 1 кв м своей площади в 1 час при разности температур на ограничивающих поверхностях в 1°Ц и при толщине стены 1 м. Эта величина называется коэффициентом внутренней теплопроводности материала стены; подробнее о нем будет сказано ниже, в связи с другими коэффициентами.

В предыдущем мы предполагали, что температуры обеих поверхностей стены t_s и t_n известны. Между тем в строительной практике обычно бывают известны не эти температуры поверхностей, а лишь температуры среды, прилегающей к той и к другой поверхности, т.е. температуры воздуха внутри помещения и вне его.

Обозначив их соответственно через T_s и T_n , выведем закон передачи теплоты через ту же стену, исходя из этих величин.

Очевидно, в данном случае, кроме прохождения теплоты через массу стены, надо учесть процесс перехода ее от внутреннего воздуха на внутреннюю поверхность стены и затем переход от внешней поверхности стены к наружному воздуху. По закону физики (Ньютона) количество переходящей таким образом теплоты при каждой поверхности в 1 час пропорционально площади стены и разности температур поверхности и среды (воздуха).

Обозначив коэффициенты пропорциональности соответственно через α_s и α_n и приняв во внимание, что в обоих процессах проходит в 1 час одно и то же количество теплоты Q , имеем:

$$Q = \alpha_s F (T_s - t_s) = \alpha_n F (t_n - T_n) \dots \dots (2)$$

Величина α_s есть так называемый коэффициент теплоприятия от среды (воздуха) к поверхности стены, а величина α_n — коэффициент теплоотдачи от поверхности стены к среде (наружному воздуху); тот и другой означают количество теплоты, передаваемое в 1 час на 1 кв м поверхности стены при разности температур между поверхностью и средой в 1°Ц .

Взяв уравнения (1) и (2) совместно, представим их в следующем виде:

$$Q \cdot \frac{X}{\lambda} = F(t_s - t_n)$$

$$Q \cdot \frac{1}{\alpha_s} = F(T_s - t_s).$$

$$Q \cdot \frac{1}{\alpha_n} = F(t_n - T_n).$$

Сложив их, получим:

$$Q \left(\frac{X}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_n} \right) = F(T_s - T_n)$$

или

$$Q = \frac{1}{\frac{X}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_n}} \cdot F(T_s - T_n) = k \cdot F(T_s - T_n), \quad \dots (3),$$

где

$$k = \frac{1}{\frac{X}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_n}} \dots \dots \dots (4).$$

Из этого видно, что общая теплопередача через стену также пропорциональна ее площади и разности температур воздуха по обе ее стороны, но коэффициент этой пропорциональности K отличается от всех предыдущих и выражается через них по уравнению (4). Он называется коэффициентом общей теплопередачи через данную конструкцию (стену) и означает, очевидно, то количество теплоты, которое проходит через 1 кв м стены (от воздуха к воздуху) в 1 час. времени при разности температур в обеих зонах воздуха в 1°С.

Уравнение (3) является основным для тепловых расчетов при установившемся движении теплоты — в частности, для расчетов теплопотерь отапливаемых помещений при проектировании системы их отопления, равным образом для расчетов внешнего нагревания охлаждаемых помещений (холодильников, некоторых фабричных помещений при проектировании их искусственного охлаждения). Поэтому необходимые для применений этого уравнения коэффициенты, т.-е. K и составляющие его λ , α и α_n , должны быть рассмотрены более подробно.

*Коэффициент внутренней теплопроводности материала*¹⁾ ограждений λ весьма различен для различных строительных материалов. Он зависит от их плотности, физического строения и от ряда других свойств, еще не вполне исследованных. Но и для одного и того же материала с определенной плотностью он не является постоянным: он сильно зависит от степени влажности данного материала и в меньшей степени — от его температуры. Поэтому при определении таких коэффициентов экспериментальным путем в современных исследованиях учитываются эти факторы и проставляются в таблицах полученных выводов. В таблице 1 приложений помещены эти данные для разных строительных материалов в совершенно сухом состоянии (после искусственной сушки) и при некоторых степенях влажности, а также при разных температурах; при этом для более точной характеристики материалов, к которым относятся табличные коэффициенты, указана еще их плотность, т.-е. вес 1 куб м.

Из таблиц можно видеть, что с ростом температуры коэффициенты λ всех строительных материалов повышаются, хотя и очень незначительно²⁾. Поскольку многие строительные материалы, особенно же рыхлые и искусственно-пористые, имеют в практике весьма колеблющуюся степень плотности (вес 1 куб м), в таблице приводятся для них коэффициенты λ в зависимости также и от этого фактора.

Влияние на коэффициент λ влажности материалов гораздо более значительно. Данные этого рода для некоторых (более исследованных в этом отношении) строительных материалов помещены в таблице, причем надо заметить, что материалы строительных ограждений, разделяющих зоны разных температур, никогда не бывают не только совершенно сухими, но даже и воздушно-сухими, так как, помимо естественной гигроскопичности в отношении наружной атмосферы, конденсируют в себе еще часть постоянно проходящих через них паров. Процесс этот исследован ближе в гл. 3 ч. I.

¹⁾ Обращаем здесь внимание читателя на точный смысл терминологии „коэффициент внутренней теплопроводности материала“ ограждений — в отличие от часто применяемых ниже терминов „коэфф. внутренней теплопр. стены или данного ограждения, конструкции“; эти последние коэффициенты — всегда составные: они состояются из первых и из выражения толщины данной конструкции ($\frac{\lambda}{X}$ в ур. 1.); иногда их называют „теплопроницаемостью“ данного ограждения и обозначают особым знаком (δ).

²⁾ Факт зависимости коэффициента λ от температуры имеет своим неизбежным следствием то обстоятельство, что некоторые из ранее сделанных выводов, при которых не учтена эта зависимость, неточны; например, диаграмма внутренних температур (стр. 7) есть не прямая, но очень слабо искривленная линия (в силу различия λ в слоях с разной температурой). Однако более точный учет сильно осложнил бы трактовку вопроса, не давая в то же время ничего практически важного.

Игнорирование большого влияния влажности может повлечь к особенно большим ошибкам при применении рыхлых, порошковых веществ в качестве термоизоляторов, когда рассчитывают их слои по коэффициентам, относящимся к совершенно сухому состоянию. В силу недостаточности этих данных в приведенных таблицах, полезно иметь в виду следующий более общий вывод исследователей по данному вопросу: такие материалы, с коэффициентом λ для сухого состояния, близким к 0,15, повышают его в среднем на 6—8% на каждый 1% влажности по объему.

Коэффициенты α теплообмена между поверхностями стены и прилегающим воздухом зависят по своей величине главным образом от влияния двух порядков:

1. *Непосредственное соприкосновение поверхности стены с воздухом.* В силу его теплота передается частью путем внутренней теплопроводности прилегающего воздушного слоя в направлении, перпендикулярном к поверхности стены, частью же — путем переноса теплоты движением воздуха вдоль стены — конвекцией, каковая зависит, естественно, от скорости указанного движения. Влияние обоих этих процессов на тепловую потерю пропорционально площади стеной поверхности и разности температур ее и воздуха; обозначив коэффициент этой пропорциональности через α_k (α „конвекции“), имеем для частичной теплопередачи этим путем:

$$Q_1 = \alpha_k \cdot F (t - T) \dots \dots \dots (5).$$

2. *Тепловое лучеиспускание поверхности стены,* рассматриваемое пока совершенно независимо от взаимоотношения температур поверхности и прилегающего воздуха — и даже вообще от наличия последнего. Но это лучеиспускание сильно зависит от абсолютной температуры поверхности, т.-е. величины $t + 273^\circ$, а именно, по закону физики (Стефана и Больцмана) оно пропорционально четвертой степени ее; кроме того оно, конечно, пропорционально площади лучеиспускающей поверхности. Таким образом, количество передаваемой в этом процессе теплоты может быть выражено формулой:

$$Q = \sigma \cdot F \cdot (t + 273)^4,$$

где σ — есть коэффициент пропорциональности, характеризующий способность лучеиспускания данной материальной поверхности при т. н. абсолютно черном цвете. Обозначив $t + 273$ чрез θ и произведя для упрощения формулы некоторые арифметические изменения, получим:

$$Q = C \cdot F \left(\frac{\theta}{100} \right)^4,$$

где $C (= \sigma \cdot 10^8)$ есть характеристический коэффициент физики для абсолютно черного тела.

Но этому потоку лучеиспускания от стены противостоит подобный же поток лучеиспускания на нее со стороны прилегающей среды (воздуха и др. предметов); этот поток может быть менее или более первого в зависимости от соотношения температур и других условий, и таким образом окончательный тепловой результат этого взаимодействия получится лишь при совместном учете обоих процессов. Способ этого учета выведен Нуссельтом в виде формулы:

$$Q = C' \cdot F \left[\left(\frac{\theta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_2}{100} \right)^4 \right],$$

где θ_1 и θ_2 суть абсолютные температуры стены и воздуха, а C' есть коэффициент теплообмена взаимным лучеиспусканием двух названных материалов, выбираемый в зависимости от коэффициентов лучеиспускания C_1 и C_2 каждого из двух материалов и коэффициента C абсолютно черного тела по таблице V приложения. Присоединяя к этим выводам добавления О. Кноблауха и К. Хенки, имеем формулу:

$$Q_2 = C'c \cdot F (t - T) \dots \dots \dots (6),$$

где t — температура стеной поверхности, T — температура среды (воздуха), C' может быть принято равным коэффициентам C таблицы II приложения для соответствующего материала и c — коэффициент, учитывающий влияние четвертых степеней абсолютных температур лучеиспускающих друг на друга материалов. Величины этих коэффициентов приведены в таблицах II и III приложения.

В первой из них даны коэффициенты лучеиспускания C для разных строительных материалов и при разных видах отделки их поверхностей. Надо заметить, что по позднейшим исследованиям [Мюнхенского Института по теплопроводности материалов Forschungsinstitut für Wärmeschutz (E. V.) München Heft 4] коэффициенты лучеиспускания всех важнейших строительных материалов были определены в тесных пределах 4—4,5, что и позволяет брать эти числа в обычных расчетах.

Во второй таблице даны значения „температурного фактора“ c в зависимости от температур двух взаимодействующих в смысле лучеиспускания тел, во второй половине таблицы — величины c в зависимости от средней температуры этого взаимодействия (последние данные, как увидим ниже, применимы преимущественно к воздушным замкнутым прослойкам). Здесь надо обратить внимание на то обстоятельство, что при низких температурах взаимно лучеиспускающих тел разность четвертых степеней их абсолютных температур менее отличается от разности первых степеней обыкновенных температур, чем при высоких температурах;

поэтому c меньше при низких температурах — следовательно, при них меньше и теплопередача между поверхностями лучеиспусканием.

Сложив уравнение (5) и (6), получим выражение для общей теплопередачи между стеной поверхностью и воздухом:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = (\alpha_n + C' c) F (t - T).$$

Сопоставляя это с ур. (2), заключаем, что коэффициенты α для теплообмена между стеной и воздухом, входящие в ур-ние (2) и в уравнение (4), имеют следующее общее для них выражение:

$$\alpha = \alpha_n + C' c.$$

Более конкретное определение этой величины, с выводом отдельных значений для теплопередачи от внутреннего воздуха к стене (т.-е. коэффициента α_n в формуле 4) и от стены к наружному воздуху (коэфф. α_n форм. 4), представило большие трудности для исследователей в виду сложных влияний абсолютных температур (коэфф. c) и скорости движения воздуха (коэфф. α_n). Для нужд строительной практики при небольших сравнительно температурах материалов и небольших скоростях движения воздуха, оказалось возможным упростить рассмотрение. Именно, были приняты при дальнейших исследованиях лишь некоторые типовые значения для c . Так, до Хенки принимали $c = 1,0$. Хенки и Вирц пошли далее и ввели в расчет разные значения c ¹⁾. Что же касается α_n , то эта величина была исследована Нуссельтом и рядом других ученых для двух основных случаев практики: при естественной конвекции воздуха около стены и при добавочной его подвижности от внешней силы.

Естественная конвекция воздуха около стены происходит исключительно от разности температур воздуха и стены и, в силу ограниченной величины этой разности в обычных условиях строительной практики, дает вообще небольшие скорости воздушного потока по поверхности стены. Тем не менее коэффициент α_n зависит, во-первых, от указанной скорости и, следовательно, от разности температур. Затем он зависит от направления конвекции, т.-е. от того, вертикальная или горизонтальная поверхность ограждения соприкасается с воздухом; при этом для горизонтальной поверхности конвекция имеет место лишь в том случае, если тепловой поток идет от нее снизу вверх (сравн. поверхность потолка на чердаке), так что согретый около нее воздух поднимается

¹⁾ Вирцем дана несколько иная формула для коэффициента α теплообмена конвекцией и лучеиспусканием (вместо $\alpha_n + C' c$); она приведена ниже.

вверх и сменяется более холодным; если же тепловой поток идет сверху вниз (например, от нижней поверхности пола в подполье), то конвекция не имеет места, так как согревшийся около поверхности воздух, как более легкий, остается без движения около нее.

Наконец, имеет некоторое значение и то, является ли прилегающий воздух внутренним или наружным (даже при абсолютном безветрии в последнем¹⁾). Таким образом были найдены следующие выражения для α_k :

1. Вертикальные стены:

а) наружные при разности температур $\Delta t < 5^\circ$:

$$\alpha_k = 3 + 0,08 \Delta t$$

и при разности $\Delta t > 5^\circ$:

$$\alpha_k = 2,2 \sqrt[4]{\Delta t}.$$

б) Внутренние стены между помещениями с разной температурой при всех разностях Δt :

$$\alpha_k = 2,2 \sqrt[4]{\Delta t}.$$

2. Горизонтальные ограждения помещений при направлении теплового потока снизу вверх:

$$\alpha_k = 2,8 \sqrt[4]{\Delta t}.$$

3. Горизонтальные ограждения помещений при направлении теплового потока сверху вниз: $\alpha_k = 0$.

Эта последняя величина принимается, очевидно, как некоторая условность, вместо очень малых, но неизвестных величин, происходящих от упомянутой выше непосредственной теплопроводности от стены в ближайший слой воздуха в перпендикулярном (к стене) направлении, каковой процесс имеет место и при отсутствии конвекции.

Прибавляя ко всем этим выражениям для α_k величину C из таблицы IV, получим полные значения для коэффициентов α теплообмена между стеной и воздухом при условии отсутствия всякого движения последнего, помимо вызванного разностью температур его и стеной поверхности.

Выше мы привели результаты обследований в том виде, как они были обработаны у К. Хенки. В последующие годы новые исследования были предприняты Вирцем, который

¹⁾ Конвекция наружного воздуха не имеет, например, таких задерживающих препятствий, как перекрытия (полы) в каждом этаже; пути ее по стене длиннее, а потому и скорости больше.

дал и несколько иную формулировку расчету коэффициентов α_s и α_n . Остановимся здесь только на окончательных выводах.

По Вирцу для передачи теплоты от воздуха к стене при $\Delta t > 5^\circ \text{Ц.}$:

$\alpha = C \cdot c + 0,55 l \Delta t^{0,25}$, где l есть коэффициент, лежащий между 3 и 6 (а именно при $\Delta t > 5^\circ$: $l = 4$ для воздуха в помещении, $l = 5$ для беспокойного внутреннего воздуха или спокойного наружного, $l = 6$ — для наружного в обычном движении); C — коэффициент лучеиспускания, принимаемый обычно в 4,2, но по существу учитываемый как результат совместного действия двух взаимных лучеиспусканий (стены и воздуха) по таблице V, причем, в виду упомянутой выше неточности таблицы II, принимают в таблице V $C_1 = C_2 = 4,4$.

При $\Delta t < 5^\circ$ остается и для внутренней поверхности стены упомянутое выше уравнение Нуссельта, по которому $\alpha_s = C + \alpha_n = C + 3 + 0,08 \sqrt{\Delta t}$. В таблице IVA даны числовые значения α_n по Хенки, а во второй половине Б приведены значения α_s по позднейшей обработке Вирца.

Для передачи теплоты от стены к воздуху Вирц остановился на уравнении:

$\alpha_n = Cc + 13 \sqrt{v}$, где v — скорость движения окружающего воздуха.

Приведенные данные значительно облегчают расчеты этого рода. Однако в практических расчетах нам обычно не бывает заранее известной указанная разность температур Δt : строителю задаются большей частью лишь температуры внутреннего и наружного воздуха T_s и T_n . В таком случае можно применять следующий прием расчета коэффициентов α . Из уравнения (2) имеем:

$$\frac{Q}{F} = \alpha (t_n - T_n) = \alpha \cdot \Delta t,$$

а из уравнения (3):

$$\frac{Q}{F} = k \cdot (T_s - T_n).$$

Приравняв правые части уравнений, получим:

$$\frac{\Delta t}{T_s - T_n} = \frac{k}{\alpha}.$$

Определим далее k из уравнения (4); поскольку мы не различаем в этом последнем уравнении α_n и α_s , можем определить из него k следующим образом:

$$\frac{1}{k} = \frac{2}{\alpha} + \frac{X}{\lambda}, \quad \text{где } \frac{X}{\lambda}$$

есть величина, обратная внутренней теплопроводности стены¹⁾.

Таким образом имеем:

$$\frac{\Delta t}{T_s - T_n} = \frac{1}{2 + \alpha : \frac{\lambda}{X}} \left(\frac{\lambda}{X} - \text{коэффициент внутренней теплопро-} \right.$$

водности стены). Это уравнение и может служить для проверки пробных подборов величин Δt и соответствующих им по формулам для α_n или по табл. IV величин α . Для облегчения таких подборов служит следующая таблица для величин

$$\frac{\Delta t}{T_s - T_n}$$

C =	2,0	3,0	4,0
$\frac{\lambda}{X} = 1,0$	$\frac{1}{7,5}$	$\frac{1}{8,5}$	$\frac{1}{9,5}$
1,5	$\frac{1}{5,6}$	$\frac{1}{6,3}$	$\frac{1}{7}$
2,0	$\frac{1}{4,7}$	$\frac{1}{5,2}$	$\frac{1}{5,7}$
5,0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3,3}$	$\frac{1}{3,5}$

Приведем пример. Требуется определить α для наружной стены со следующими заданиями: $\frac{\lambda}{X} = 1,5$, $C = 4$, $T_s = +20^\circ \text{C}$, $T_n = 0^\circ$. По приведенной таблице для данного случая можно взять $\frac{\Delta t}{T_s - T_n}$ предположительно равным $\frac{1}{7}$; так

как $T_s - T_n = 20^\circ$, то Δt надо предполагать $= \frac{1}{7} \cdot 20 = 3,1^\circ$. Тогда из табл. IV имеем: $\alpha_n = 3,25$; следовательно, $\alpha = 4 + 3,25 = 7,25$. Вставляя эту величину в правую часть проверочного уравнения, имеем:

$$\frac{\Delta t}{T_s - T_n} = \frac{1}{2 + 7,25 : 1,5} = \frac{1}{6,82} \quad \text{или} \quad \Delta t = \frac{20}{6,82} = 2,94.$$

¹⁾ Если же α_n не равно α_s , то первую заменяем соответствующей ей конкретной величиной (15—26 см. ниже), что понятным образом видоизменяет и полученное выражение для $\frac{1}{k}$.

Таким образом из проверочного уравнения получилась величина для Δt меньшая, чем мы предположили первоначально для этой разности ($3,1^\circ$) при $\alpha = 7,25$; теперь возьмем для α немного меньшую величину, а именно, $7,23$ и, вставив в то же проверочное уравнение, убедимся, что последнее даст нам $\Delta t = 3,1^\circ$.

До сих пор мы рассматривали коэффициенты α , получающиеся лишь при естественной конвекции воздуха около стены. Если скорость движения воздуха увеличена посторонними внешними силами — например, силами ветра около наружной поверхности стены или влиянием большой искусственной вентиляции внутри помещения — то величины коэффициента α возрастают. Так, по Рекнагелю имеем:

При скорости воздуха в м/сек . . . 0	1	4,5	5,5
Коэффициент $\alpha = 6$	20	30	36

По Нуссельту при скорости воздуха в 3 м/сек $\alpha_n = 25$, следовательно $\alpha = \infty 29$.

По позднейшим исследованиям Вирца и его формуле, приведенной выше, имеем при $c = 0,85$ (средняя величина для разных температур):

При $v =$ м/сек	0,3	0,4	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
$\alpha_n =$	11	12	13	17	20	22	24	26	28	30	31	33	34	36

В расчетах строительной практики эти коэффициенты применяются обычно для внешней поверхности наружных ограждений; при этом принимают:

- а) для стен зданий, расположенных в открытых местах, подверженных ветрам $\alpha_n = 25$;
- б) для стен зданий, расположенных в городе среди общей застройки $\alpha_n = 20$;
- в) для стен зданий, не подверженных действию ветров (например, стоящих в лесу) $\alpha_n = 15$;
- г) для горизонтальных поверхностей, обращенных к закрытым холодным помещениям при теплопередаче снизу вверх (поверхность потолка на чердаке) $\alpha_n = 10-12$;

1) Этот же коэффициент принимается и для обычного расположения зданий в городах при расчетах отопления, если для сторон, подверженных действию ветра, делаются особые добавки к теплопотерям (см. гл. 2).

В. Д. Мачиновский.

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

Деп.

д) для горизонтальных поверхностей, обращенных к закрытым холодным помещениям при теплопередаче сверху вниз (поверхность пола в подполье) $\alpha_n = 5$.

Напротив, коэффициент α_s в формуле (4) обычно исчисляется по приемам, формулам и таблицам, относящимся к естественной конвекции (сравни табл. IV). В практике расчета отоплений он берется:

- а) для вертикальных стен с нормальной теплопроводностью или близкой к ней (следовательно, с обычной разностью температур внутренней поверхности стены и воздуха) $\alpha_s = 7-7,5$;
- б) для горизонтальных перекрытий (потолков) при теплопередаче снизу вверх $\alpha_s = 7,5$;
- в) то же при теплопередаче сверху вниз (полы нижнего этажа) $\alpha_s = 7$.

Заканчивая этим рассмотрение всех коэффициентов уравнения (4) и, следовательно, общего коэффициента k в уравнении (3), обратим еще внимание на то обстоятельство, что величины, обратные всем указанным коэффициентам, носят обычно название коэффициентов сопротивления тепловым токам в строительных ограждениях. Такие величины —

$\frac{1}{k}, \frac{1}{\alpha}, \frac{1}{\lambda}$ — означают, очевидно, время (в часах), необходимо

в соответствующем процессе для передачи 1 кал теплоты (через 1 кв м, в 1 час и при $\Delta t = 1^\circ$), т.е. нечто противоположное способности проведения теплоты в кал, выражаемой коэффициентами k, α, λ . В частности, величина

$\frac{\lambda}{X} = \delta$ (см. ур. 1), выражающая, очевидно, коэффициент

внутренней теплопроводности (не материала, а) стенки из данного материала толщиной X , будет иметь, в качестве обратной, сопротивление этой внутренней теплопроводности

в стенке, т.е. $\frac{X}{\lambda}$ или $\frac{1}{\delta}$. Такие определения, правильные

и по существу дела, находят себе наглядное подтверждение в уравнении (4), если перепишем его в следующем виде:

$$\frac{1}{k} = \frac{X}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_n} \dots \dots \dots (7).$$

Это значит, что общее сопротивление потоку теплоты чрез конструкцию в целом равно сумме сопротивлений по отдельным составляющим элементам этой конструкции — двум поверхностям и внутреннему материалу. Это обстоятельство

дает чрезвычайные удобства при расчетах теплопроводности ограждений, позволяя легко учитывать роль каждой части их в общем сопротивлении, „набирать“ общее сопротивление из его частей и т. п., как это будет видно в последующем изложении и в практических расчетах части III.

После всего вышеизложенного применение уравнений (3) и (4) к обычным расчетам теплопотерь в практике становится понятным. Тем не менее некоторые более сложные случаи подобных расчетов должны быть рассмотрены здесь отдельно. Важнейшим из таких случаев является расчет теплопроводности ограждения, состоящего из нескольких слоев разных материалов (см. рис. 2).

Если все упомянутые слои состоят из твердых тел (в плотном или же рыхлом, сыпучем состоянии), то расчет теплопроводности такой системы мало отличается от выясненного выше. Пользуясь только-что рассмотренным законом сопротивлений (уравнение 7), можем установить, что в общие формулы 3 и 4 для теплопередачи отдельные слои конструкции будут входить совершенно так, как в формулу (4) входит материал стены, т. е. в виде членов типа $\frac{X}{\lambda}$ (сопротивлений внутренней теплопроводности); разница будет лишь в том, что вместо одного слоя (всей прежней стены) с характеристиками X и λ будет ряд слоев с соответствующими им характеристиками X_1 и λ_1 , X_2 и λ_2 и т. д. Таким образом для этих случаев имеем формулу:

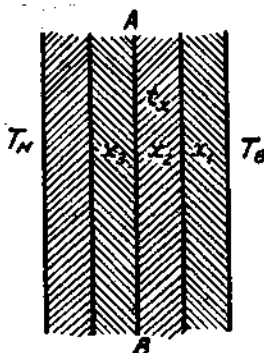


Рис. 2.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_n} + \frac{1}{\alpha_0} + \frac{X_1}{\lambda_1} + \frac{X_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{X_n}{\lambda_n},$$

из которой найденное k используем затем путем уравнения (3).

Не представляет больших затруднений и определение температур, создающихся внутри составной стены, например, в разделительных плоскостях между слоями. Для этого определения нами может быть использован уже упоминавшийся ранее принцип равенства количеств теплоты, проходящих в единицу времени (1 час) чрез всю стену и чрез какую-либо часть ее за то же время. Пусть, например, требуется определить температуру t_x в разделительной плоскости AB; применив указанный принцип, имеем:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{X_1}{\lambda_1} + \frac{X_2}{\lambda_2} + \frac{X_n}{\lambda_n}} \cdot F(T_s - T_n) =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{X_1}{\lambda_1} + \frac{X_2}{\lambda_2}} \cdot F(T_s - t_x)$$

или кратко

$$k \cdot F(T_s - T_n) = k_2 F(T_s - t_x);$$

отсюда

$$t_x = T_s - \frac{k(T_s - T_n)}{k_2} \dots \dots \dots (8).$$

Для решения того же вопроса в более общем виде, а именно, в смысле определения температур на всех разделительных плоскостях составного ограждения, включая и его поверхности, обратим внимание на два ряда величин:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_s} + \frac{X_1}{\lambda_1} + \frac{X_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\alpha_n} \text{ и}$$

$$T_s - T_n = \Delta T_s + \Delta t_s + \Delta t_1 + \dots + \Delta t_n,$$

причем в последнем Δt означают последовательные падения температур, начиная от внутренней T_s ; т.-е., напр., ΔT_s есть разность температуры внутренней поверхности и воздуха, Δt_s — разность температуры в следующей разделительной плоскости сравнительно с t_s и т. д. Ясно, что отдельные слагаемые этих двух рядов соответственно пропорциональны. Поэтому для получения величин Δt (а по ним, следовательно, и самых t) надо общую известную нам величину $T_s - T_n$ разложить на части, пропорциональные ряду соответственных сопротивлений, т.-е. решить элементарную арифметическую задачу.

Так в нашей обычной „климатической“ стене в $2\frac{1}{2}$ кирпича, при новом размере последнего ($25 \times 12 \times 6,5$ см), имеем следующие сопротивления: (при $X = 0,64$, $\lambda = 0,70$, $\alpha_s = 7,5$ и $\alpha_n = 15$):

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_s} + \frac{0,64}{0,7} + \frac{1}{\alpha_n} = 0,13 + 0,91 + 0,07 = 1,11.$$

Соответственно этому нашу обычную расчетную разность температур в 50° разлагаем на ряд пропорциональных предыдущему величин:

$$50^\circ = 5,85^\circ + 41,0^\circ + 3,15^\circ,$$

в силу чего имеем температуры:

$$t_s = 20 - 5,85 = 14,15^\circ, \quad t_n = -30 + 3,15 = -26,85^\circ.$$

Аналогично поступаем и при многослойных стенах.

Гораздо сложнее обстоит дело в том случае, если среди слоев ограждения находится один или несколько воздушных прослоек, как это нередко делается в строительной практике. При этом строитель исходит из тех соображений, что воздух является одним из наименее теплопроводных материалов, особенно в малоподвижном или неподвижном состоянии; в этом последнем он превосходит по своей слабой теплопроводности почти все известные нам строительные материалы (см. табл. I). Так как одновременно этот материал является и совершенно бесплатным, то вполне понятно стремление строителей использовать его в качестве теплоизоляционного слоя в конструкции ограждений. Но вышеуказанное достоинство воздуха имеет место только в меру достигаемой строителем малой величины тепловых лучеиспусканий между стенками пустоты и малой подвижности его в прослойках, учет которой крайне труден. Поэтому данные экспериментального характера и результаты новейших исследований в этой области представляют большое значение для теплового расчета этих прослоек.

Теплопередача чрез воздушный прослойку, подобно сказанному выше о теплообмене между поверхностью стены и воздухом, может быть разложена на три элементарных процесса.

1) *Проведение теплоты чрез воздух в порядке его внутренней теплопроводности*, как чрез обыкновенный материал, который представляет определенное сопротивление „поперечному“ тепловому потоку самым фактом заполнения собой прослойка независимо от того, находится ли этот материал в покое или в движении; что привносится добавочно этим последним — мы будем учитывать особо, этот же минимум рассчитываем отдельно, как подчиненный особому закону. Коэффициент этой теплопроводности мы видим в таблице I ($\lambda_{\delta_3} = 0,02$): обозначив ширину (толщину) прослойка чрез X_{δ_3} , можем написать формулу для данного частного вида теплопроводности следующим образом:

$$Q_1 = \frac{\lambda_{\delta_3}}{X_{\delta_3}} F (t_1 - t_2),$$

где F — есть площадь прослойка, перпендикулярная к тепловому потоку, а t_1 и t_2 — температуры ограждений, обращенных в прослойку; $\frac{\lambda_{\delta_3}}{X_{\delta_3}} = \delta_{\delta_3}$ есть, очевидно, коэффициент внутренней теплопроводности неподвижного воздушного прослойка и может быть легко вычислен при $\lambda_{\delta_3} = 0,02$ и при заданной величине X_{δ_3} в м.

2) *Проведение теплоты путем конвекции воздуха в прослойке*, т.-е. путем его движения по обеим ограничивающим поверхностям прослойка (вверх — по более теплой поверхности и вниз — по более холодной). О сущности этого явления мы уже упоминали выше. Здесь, в применении к прослойкам, необходимо отметить, что скорость движения воздуха в прослойке, а следовательно и влияние этого движения на теплопроводность прослойка, зависят от целого ряда обстоятельств. Для большей ясности здесь надо различать два основных случая.

а) *Случай вертикального прослойка*. Скорость движения в нем воздуха и его теплопроводный эффект зависят в этом случае главным образом от ширины прослойка, от его высоты и от разности температур на ограничивающих прослойки материальных поверхностях. Эта последняя разность температур является основной причиной движения воздуха вверх по одной поверхности и вниз по другой; вызываемая при этом скорость движения успевает, однако, развиваться лишь в меру высоты прослойка, после чего происходит удар и поворот потока, т.-е. уменьшение его скорости. И, наконец, поскольку эти движения одновременно по двум стенкам являются встречными посредине прослойка, ширина последнего обуславливает большую или меньшую степень взаимного трения и сопротивления двух потоков, а с другой стороны увеличение ее оставляет в середине прослойка все большее количество воздуха, не участвующего в конвекции. Таким образом становится понятным, что теплопроводность прослойка в порядке конвекции увеличивается с увеличением указанной разности температур и высоты прослойка, а с увеличением его ширины уменьшается весьма слабо.

Однако до сих пор еще далеко не достигнуто точного учета всех этих влияний; имеются лишь частичные данные некоторых исследователей и только об одном факторе — ширине прослойков, так как высота их бралась обычно около 0,6 м (по условиям аппаратуры). Так, по данным Нуссельта теплопроводность прослойка путем конвекции может быть выражена формулой:

$$Q_2 = \frac{\lambda_k}{X_{s_2}} \cdot F(t_1 - t_2),$$

где t_1 и t_2 — температуры ограничивающих плоскостей, X_{s_2} — ширина прослойка в м и λ_k некоторый условный коэффициент теплопроводности, подбираемый в соответствии с шириной прослойка по следующей таблице:

При $X_{s_2} = \text{см}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15
$\lambda_k =$	0	0,01	0,02	0,031	0,038	0,044	0,047	0,05	0,051	0,053	0,06

В полученной формуле величина $\frac{\lambda_k}{X_{s_2}} = \delta_k$ означает коэффициент внутренней теплопроводности в кал всего воздушного прослойка от конвекции и получится для приведенных величин X_{s_2} путем деления на них (но выраженных в м) второй графы; мы получим таким образом:

При $X_{s_2} = \text{м}$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,15
$\delta_k = \frac{\lambda_k}{X_{s_2}} = \text{кал}$	0	1,0	1,0	1,0	0,95	0,88	0,78	0,71	0,64	0,53	0,4

б) *Случай горизонтального прослойка.* Здесь в свою очередь надо различать два случая: этот прослойк может иметь свою более теплую ограничивающую поверхность в качестве верхней границы или же в качестве нижней. В первом случае не будет никакой конвекции, потому что воздух, нагреваясь около верхней границы, будет оставаться около нее, как более легкий, не уступая место другим частицам; аналогичное надо сказать и о слое воздуха около нижней границы; здесь, следовательно, $\lambda_k = 0$. Во втором случае будет происходить процесс непрерывной смены частей воздуха как около теплой поверхности, так и холодной, т.е. будет иметь место конвекция (хотя при очень небольшой высоте и, следовательно, при небольших скоростях); за отсутствием специальных исследований по этому вопросу в практике принимают, что коэффициент этой конвекции одинаков со случаем вертикального прослойка.

3. *Проведение теплоты прослойком путем лучеиспускания* стенок прослойка одной на другую. Явление передачи тепла лучеиспусканием уже рассматривалось нами выше. Отличие данного случая состоит только в том, что здесь две лучеиспускающие стенки с различными температурами стоят близко одна от другой и могут оказывать разное влияние в зависимости от физических свойств своих материалов и поверхностей. Поэтому в выведенной ранее формуле (6) для такой теплопередачи коэффициент лучеиспускания C одной материальной поверхности (стены) должен быть заменен иным коэффициентом, учитывающим взаимные влияния двух материальных поверхностей; таким образом для данного случая имеем формулу:

$$Q_3 = C' c F (t_1 - t_2).$$

Коэффициент C' может быть подбираем по табл. V приложения.

Если теперь соединим три рассмотренных элементарных процесса теплопередачи чрез прослойк в одно целое, то получим для всей теплопередачи прослойка следующую формулу:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (\delta_{га} + \delta_k + C' \cdot c) \cdot F \cdot (t_1 - t_2) \dots (9)$$

или, обозначив сводный коэффициент, стоящий в первых скобках, через новый условный коэффициент $\frac{\lambda'}{X_{га}}$,

получим:

$$Q = \frac{\lambda'}{X_{га}} F \cdot (t_1 - t_2),$$

при чем

$$\lambda' = \lambda_{га} + \lambda_k + C' \cdot c \cdot X_{га}.$$

В таблице VI приложений даны числовые значения для λ' при вертикальных прослойках в зависимости от ширины их в см и от величины $C'c$, подбираемой заранее выше-

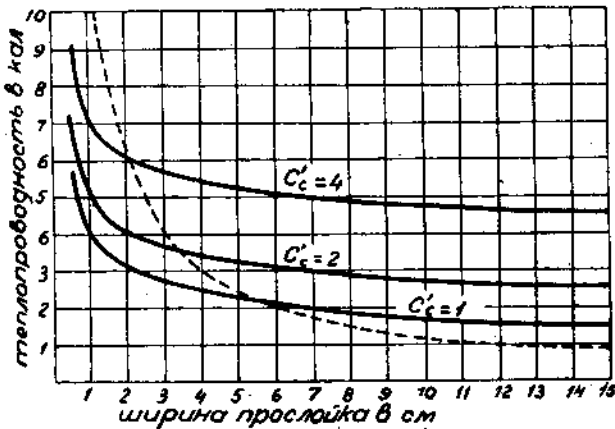


Рис. 3.

указанным путем. В таблице VII даны аналогичные данные для горизонтальных воздушных прослойков, вычисленные согласно изложенных нами данных (в том числе при $\lambda_k = 0$).

В виду сильной зависимости теплопроводных свойств воздушных прослойков от их ширины для строителя может представлять интерес, помимо указанных таблиц, наглядное выражение этой зависимости. Ее дает диаграмма рис. 3. В ней представлены кривые падения теплопроводности прослойков с увеличением их ширины (при трех разных значе-

ниях величины $C'c$). Диаграмма показывает, что падение теплопроводности является значительным только при первоначальном увеличении ширины прослоек — от 0 до 2—3 см; при дальнейшем уширении их оно становится весьма медленным и почти прекращается, когда ширина достигает 12—15 см. Эта диаграмма, составленная К. Хенки на основании всех изложенных выше данных, довольно хорошо подтверждается прямыми опытами, произведенными шведскими специалистами, проф. Крейгером и арх. Эриксоном при Академии Инженерных Наук в Стокгольме в 1922 г. Измеряя теплопроводность воздушных прослоек различной ширины между двумя стеклами, они нашли величины, для которых диаграмма

приведена на рис. 4. Как видно из диаграммы, здесь еще более подчеркнуто замедление падения теплопроводности — уже после ширины в 1—1,5 см¹⁾. Для большей наглядности указанной особенности воздушных прослоек сравнительно с обычными строительными материалами на первой диаграмме пунктиром показано падение теплопроводности

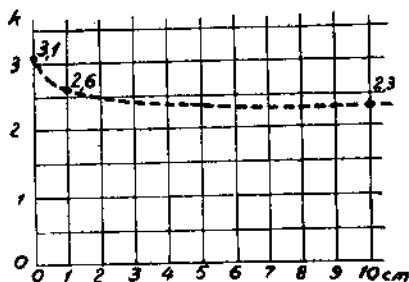


Рис. 4.

стенки из твердого строительного материала с коэффициентом внутренней теплопроводности $\lambda = 0,12$ при таких же изменяющихся величинах ее толщины.

Как было упомянуто выше, влияние высоты прослойка и температур ограничивающих его поверхностей (следовательно, и его собственной температуры) выяснено гораздо менее. В то время как ширина прослойка оказывает влияние на все три составные части общего коэффициента теплопроводности прослойка $\frac{\lambda'}{\lambda_a}$ (а в явной форме, по крайней

мере, на две из них), высота и температура влияют каждая главным образом лишь на одну составную часть: а именно, высота — на конвекцию, а температуры — на лучеиспускание (и лишь отчасти на конвекцию). Поэтому значение того и другого фактора находится в зависимости от относительной роли соответствующего элементарного процесса теплопередачи в общей. Чтобы иметь в этом отношении основные ориентировочные данные, ниже приводим таблицу процент-

¹⁾ См. „Untersuchungen über das Wärmeisolvierungsvermögen von Baukonstruktionen“ von H. Kreuger und A. Eriksson. Berlin, 1923, S. 40. По непонятной причине в русском переводе этого издания (Гос. Изд. 1927 г.) опущена эта весьма интересная часть отчета; редактор перевода не указав.

ного участия каждого из рассмотренных выше элементарных процессов теплопередачи в общей ее величине при разных значениях величины Cs и X_{00} :

X_{00} в см	По К. Хенки при $Cs = 4$			Дополнение по Вирцу при $C = 4,2$		
	внутр. теплопр.	конвекция	лучеиспуск.	внутр. теплопр.	конвекция	лучеиспуск.
1	28,6	14,3	57,1	—	—	—
2	16,7	16,7	66,6	—	—	—
3	—	—	—	12,5	18,5	69
4	—	—	—	10	20	70
5	7,6	16,7	75,7	—	—	—
6	—	—	—	7,1	17,9	75
8	—	—	—	5,6	13,9	80,5
10	4,2	11,2	84,6	—	—	—
12	—	—	—	4,0	10,0	86,0
14	—	—	—	3,5	8,8	87,7
15	3	8,2	88,8	—	—	—

Руководясь этой таблицей, можем, например, заранее предвидеть, что уменьшение высоты прослоек, т. е. разделение их на части горизонтальными, параллельными теплового потоку диафрагмами (прокладками), оказывая непосредственное влияние лишь на конвекцию, будет иметь мало значения в общей теплопроводности прослойка, так как вся вообще конвекция играет в нем незначительную роль (8—18%). Кроме того незначительное уменьшение теплопроводности при этом может быть возмещено, если не превзойдено, увеличением от тех сквозных прокладок, которыми достигается это уменьшение высоты.

Как выше было упомянуто, бывшими до сих пор экспериментальными исследованиями определена теплопроводность воздушных прослоек только при высоте их до 0,6 м. Насколько можно распространять полученные данные на более высокие прослойки? По своему относительному значению вся конвекция в целом имела бы заметное влияние лишь при малых величинах Cs , т. е. при малых C и при малых s ; последнее имеет место в холодных прослойках (где s спускается до 0,7), первое же, по позднейшим исследованиям (Мюнхенского Института) вообще не бывает ниже 4,0 для обычных строительных материалов. Поэтому с этой стороны нет вероятия ожидать большого изменения найденных свойств прослоек от увеличения их высоты.

И другие соображения говорят за то же. Правда, с увеличением высоты возрастает скорость движения воздуха в прослойке; но в узких прослойках это возрастание не может быть большим, как по условиям трения двух встречных потоков воздуха, так и в силу незначительной разности температур в таких прослойках между обеими стенками; в широких же прослойках увеличение скорости воздуха и самой конвекции не играет большой роли потому, что при увеличенной разности температур здесь получает наибольшее значение лучеиспускание, а конвекция вообще не оказывает большого влияния на общую теплопроводность (см. таблицу процентов). По всем этим соображениям нет данных опасаться, что полученные до сих пор законы теплопроводности воздушных прослоек сильно изменятся, когда будут исследованы прослойки больших высот ¹⁾.

Подобным же образом можем отдать себе отчет и в значении температур стенок прослойка или его собственной температуры (средней из двух предыдущих). В таблице III во второй половине видим, как зависит от этой средней температуры величина c . С понижением средней температуры величина c уменьшается, поэтому уменьшается $C'c$ (а особенно при высоком C'), а вместе с ним уменьшается общая роль лучеиспускания в теплопроводности прослойка— прежде всего относительная роль (что видно из таблицы % в тексте); но так как при этом не возрастает абсолютное значение и остальных двух элементов теплопроводности (для этого нет причин), то заключаем, что вся она уменьшается при этом понижении температуры (и тем значительнее, чем больше C'). Отсюда легко вывести практическое заключение: воздушные прослойки термоизоляционного назначения в строительных конструкциях выгоднее делать в более холодных зонах этих конструкций. В части второй этой книги, при рассмотрении полезной теплоемкости ограждений, будет приведен еще новый мотив к такому же расположению воздушных пустот (оно увеличивает полезную теплоемкость ограждения). Наконец, в практике за такое же расположение говорит и соображение о том, что при смачивании наружной поверхности ограждения атмосферной влагой (дождями, мокрым снегом) расположенная вблизи этой поверхности воздушная пустота ставит тесный предел рас-

¹⁾ Это подтверждается и данными экспериментального характера. Если сопоставим выводы Нуссельта для прослоек высотой в 0,6 м с выводами шведских опытов Крейгера и Эриксона с прослойками между стеклянными и бетонными стенками высотой до 2 м, то увидим весьма слабое возрастание теплопроводности для последних, особенно при узких пустотах. Вычертив по этим данным кривую, принимающую весьма пологий вид, получим возможность судить и о влиянии других высот воздушных прослоек.

пространению сырости в глубину ограждения, что сохраняет его теплопроводность от снижения сыростью.

Таким образом, влияние высоты прослойка и его температуры, при отсутствии более точных данных экспериментального характера, может быть учтено строителем главным образом с качественной стороны, в количественном же отношении здесь могут быть учтены лишь некоторые предельные границы этого влияния (благодаря таблице процентов).

Помощью той же таблицы и пробных подсчетов выясняются и другие вопросы о влиянии на теплопроводность пустот тех или иных технических приемов при их устройстве. Перечислим некоторые из таких вопросов.

а) Значение гладкости стенок в пустотах. Гладкость стенок с одной стороны уменьшает теплопроводность лучеиспусканием, но с другой — увеличивает конвекцию, представляя менее препятствий движению воздуха по поверхности стенок. Так как, согласно таблице процентов, лучеиспускание обычно играет гораздо большую роль в общей теплопередаче, чем конвекция, то увеличение гладкости поверхностей надо считать вообще желательным.

б) Значение разбивки воздушного прослойка на ряд более узких материальными диафрагмами, перпендикулярными тепловому потоку. Такая разбивка влияет, очевидно, на два элементарных процесса в общей теплопередаче прослойка: она уменьшает конвекцию (с уменьшением свободной ширины в каждом делении) и уменьшает теплопроводность лучеиспусканием. Последняя, по исследованию К. Хенки, уменьшается ровно во столько раз, на сколько равных частей разделили мы прослойок. Но конвекция уменьшается в общем менее сильно, третий же элемент — внутренняя теплопроводность воздуха, как неподвижного материала, не изменяется вовсе. Отсюда становится понятным, что указанное деление прослойка всегда понижает его общую теплопроводность; темп этого понижения всегда ниже, чем темп деления прослойка, конкретные же величины понижения зависят от относительной роли трех элементарных процессов и могут в каждом заданном случае быть взвешены на основании таблицы процентов. Но так как обычно доля участия лучеиспускания является доминирующей — и именно при широких пустотах (доступных подразделению) — то обычное понижение общей теплопроводности бывает довольно велико (например, при разделении прослойка на 3 части понижение бывает до 2 раз); более точные данные могут быть получены в каждом отдельном случае путем вычислений по приведенным выше формулам и таблицам.

в) Значение заполнения воздушных пустот какими-либо материалами. И здесь точное решение возможно в каждом отдельном случае путем вычислений: имея все данные для

расчета общей теплопроводности прослойка, а с другой стороны, зная коэффициент внутренней теплопроводности заменяющего прослойки материала, можно определенно решить вопрос о выгодности или невыгодности этой замены в теплотехническом отношении. При таких вычислениях выясняется вообще, что прослойки узкие, а именно, ширины в 1—2 см (см. диаграмму Хенки и шведских опытов на стр. 24—25), уместно засыпать только весьма квалифицированными термоизоляторами (пробка, кизельгур) или же не засыпать вовсе; напротив, более широкие прослойки бывает выгодно засыпать и менее сильными термоизоляторами (торфяная мелочь, опилки и т. п.), а начиная с ширины в 10 см их можно засыпать почти всяким сухим порожком. Для облегчения практических расчетов этого рода приводим ниже таблицы для величин $\frac{\lambda'}{X_{es}}$ (теплопроводности) и обратных им (сопротивлений) у воздушных прослоек при разной их ширине и разных величинах Cc' ; эти данные относятся к вертикальным прослойкам и к горизонтальным при теплопередаче последними снизу вверх.

X_{es} в см	По К. Хенки				Сопротивления по Вирцу при $C=4,2$		
	Теплопроводность при			Сопротивления	при $C=4,2$		
	$Cc'=1$	$Cc'=2$	$Cc'=4$		$c=1$	$c=0,9$	$c=0,8$
1	4,0	5,0	7	0,143	0,16	0,17	0,18
2	3,05	4,05	6,05	0,165	0,17	0,18	0,19
3	—	—	—	—	0,17	0,18	0,20
4	2,45	3,45	5,45	0,183	0,17	0,18	0,20
5	—	—	—	—	0,18	0,19	0,21
6	2,12	3,12	5,12	0,195	0,19	0,20	0,22
7	—	—	—	—	0,19	0,21	0,23
8	1,89	2,89	4,89	0,204	0,20	0,22	0,24
9	—	—	—	—	0,20	0,22	0,24
10	1,73	2,73	4,73	0,211	0,20	0,22	0,24
11	—	—	—	—	0,21	0,22	0,25
12	1,61	2,62	4,62	0,216	0,21	0,23	0,25
13	—	—	—	—	0,21	0,23	0,25
14	—	—	—	—	0,21	0,23	0,26
15	1,5	2,5	4,5	0,222	—	—	—

При этом в таблице Вирца принимают:

- для теплых прослоек $c=1$,
- „ пустот в стенах $c=0,9$,
- „ „ в окнах $c=0,8$.

Пример: выгодно ли засыпать сухим песком воздушный прослойку шириною 8 см в кирпичной кладке близ внутренней зоны? Из таблицы видим, что теплопроводность прослойка, при величине $C_c = 4$ для кирпичной кладки в теплой части стены ($c = \infty$) составляет по К. Хенки 4,89. Коэффициент внутренней теплопроводности λ для сухого песка по табл. I составляет 0,26, теплопроводность же слоя его в 0,08 м будет: $\frac{0,26}{0,08} = 3,3$. Следовательно, заполнение вы-

годно. При этом мы не входим здесь в рассмотрение входящих практических обстоятельств, которые могут влиять на вывод — например, вопроса о том, совершенно ли сух песок и может ли он сохраниться в таком состоянии на будущее время и т. д.

Для горизонтальных прослоек при теплопередаче сверху вниз имеем следующие сопротивления (по сводке Э. Шмидта):

Толщина прослойка в см	Сопротивления
1	0,17
2	0,20
5	0,21
10	0,23
15	0,24

Как видим, они несколько выше предыдущих, что и понятно в виду отпадения в этом случае конвекции воздуха. Из этого следует между прочим, что наши обычные пустотелые потолочные перекрытия (верхнего этажа) несколько лучше защищают нас от летней жары, чем от зимнего холода (т. е. от утечки теплоты зимой).

Изложенные выше теоретические и экспериментальные данные о теплопроводности воздушных пустот проливают некоторый свет и на более широкий круг материалов, служащих в практике термоизоляторами. Это — всякого рода рыхлые и вообще порозные и пористые материалы. Мы видели выше, как уменьшается теплопроводность воздушных пустот с уменьшением их ширины и высоты. Представив себе дробление некоторой воздушной полости множеством вертикальных и горизонтальных плоскостей (диафрагм), мы получим теоретическое приближение к тому, что представляют из себя термоизоляторы; это — совокупность множества мелких воздушных пустот (ячеек), разделенных тонкими материальными диафрагмами. Их малый удельный вес — и тем меньший, чем они менее теплопроводны — гово-

рит о том, что твердый материал диафрагм занимает лишь незначительную часть их объема, главная часть которого есть воздух. При этом последний разделен на мелкие замкнутые и полужамкнутые ячейки, в которых он почти неподвижен. В меру этой неподвижности, да еще в меру слабого участия в общем объеме термоизолятора твердых диафрагм, разные роды таких термоизоляторов и приближаются по своей нетеплопроводности к совершенно неподвижному воздуху ($\lambda_{\text{в}} = 0,02$). Наиболее низким из коэффициентов внутренней теплопроводности считался до последних лет 0,033; однако коэффициент λ для ламповой сажи оказался не только ниже этого предела, но и сравнялся с коэффициентом для неподвижного воздуха, а при некоторых условиях бывает даже ниже его.

Вообще же можно сказать, что теплопроводность термоизоляторов уменьшается вместе с уменьшением их плотности — особенно в применении к одному и тому же виду; например, бетоны дают нам в этом отношении следующие соотношения:

Вес 1 куб м	λ	Состав
870 кг	0,25	шлаковый
2050	0,70	песчаный 1 : 12
2300	1,14	„ 1 : 3

Подобные же соотношения видим и у других материалов в таблице I приложения. На этом наблюдении могут быть основаны иногда искусственные приемы уменьшения теплопроводности некоторых материалов. Так, чтобы уменьшить теплопроводность песка, угольной или шлаковой мелочи, надо отгрохотить из их массы зерна примерно одинаковой величины, удалив более крупные куски и особенно — более мелкие. Тогда пористость полученного материала будет наибольшей, а потому вес единицы объема — меньший, что приводит и к уменьшению теплопроводности. Так, гравий, состоящий из однообразных зерен размером 0,7 см, имеет вес 1 куб м 1520 кг и % пустот 43,5; песок с зернами 0,1 см — 1679 кг и 35,5%, а смесь того и другого материала дает вес 2058 кг и % всего в 21,8; соответственно теплопроводность последнего материала оказывается выше обоих предыдущих.

В свете тех же соотношений становится понятным и сильное увеличение теплопроводности как этих термоизоляционных материалов, так и всех других (которые всегда пористы в той или иной мере) при их увлажнении: воздух

в ячейках и порах имеет коэффициент внутренней теплопроводности 0,02, а вода, его замещающая, 0,60.

Наконец, легко объяснимо и общее у всех материалов возрастание коэффициента внутренней теплопроводности вместе с повышением их температуры. Если поры всякого тела суть воздушные пустоты, разделенные диафрагмами, то в этих пустотах имеет место и взаимное лучеиспускание стенок и его влияние на общую теплопроводность тела (хотя и очень незначительное в силу большого дробления пустот диафрагмами). При повышении температуры это лучеиспускание усиливается (т. к. с повышается согласно табл. III вторая половина), поэтому и теплопроводность несколько возрастает.

Но если понятна качественная сторона этих зависимостей, то все же пока отсутствует определенная математическая зависимость теплопроводности тел от их плотности (веса 1 куб м), температуры и т. д. Как легко убедиться из таблицы I-ой, первая зависимость вообще не представляется закономерной (систематической, выражаемой к. л. плавной кривой). Так, для некоторых материалов и в некоторых пределах их плотностей теплопроводность почти пропорциональна плотности, но вне этих материалов и пределов такое соответствие нарушается. Например, пробка, дерево и кирпич дают нам некоторое соответствие плотностей и коэффициентов λ ; но в то же время видим, что коксовая мелочь при одинаковом коэффициенте λ с деревом имеет двойную против него плотность, асбестово-цементный шифер — четырехкратную, а лед при десятикратном λ имеет лишь полутонную плотность.

Особенную важность, но и трудность представляет эта зависимость у порошковых материалов, служащих обычно термоизоляторами. У них есть какая-то особая связь между теплопроводностью и внутренней структурой вещества, как о том говорят выше приведенные примеры с подбором зерен этих материалов.

Совершенно новый свет проливает на этот вопрос — о законах теплопроводности пористых веществ — применение к нему кинетической теории газов. Впервые вступил на эту почву краковский профессор Смолуховский, который на основании своих теоретических и экспериментальных исследований сделал доклад на эту тему Второму Интернациональному Холодильному Конгрессу в 1910 году в Вене. Он нашел, что в то время, как при атмосферном давлении лишь одно из известных нам веществ имеет коэффициент λ равный или даже меньший чем 0,02 (λ_{s_0}), в разреженной атмосфере все исследованные им рыхлые термоизоляционные порошки обладают свойством понижать свой коэффициент λ ниже λ_{s_0} — притом

весьма значительно. На данной им диаграмме, приведенной на рис. 5, представлено изменение коэффициентов λ для 5 разных порошков при пониженных давлениях; коэффициенты λ представлены ординатами диаграммы, а давления (точнее—логарифмы давлений)—абсциссами. Порошки были следующие: 1. кварцевый песок с величиной зерен в 0,26 мм, 2. цинковая пыль при диаметре зерен 0,028 мм. 3. тончайшая цинковая пыль—0,0062 мм, 4. кизельгур и 5. ламповая сажа. Три первых принадлежат к группе зернистых термоизоляционных веществ, два последних—к группе губчатых „спла-

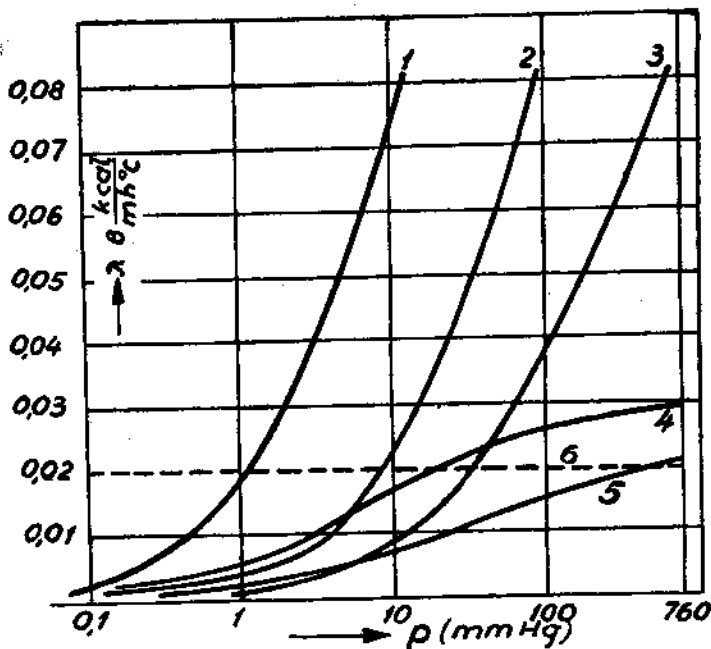


Рис. 5.

вленных“ веществ с неразделимыми и потому неопределенно мелкими частицами. На той же диаграмме пунктирная прямая на высоте ординаты 0,02 обозначает λ_{gs} . Из диаграммы видно, что при атмосферном давлении величина λ всего ниже у второй группы порошков и только ламповая сажа имеет λ равный λ_{gs} (как выше было упомянуто, некоторые сорта сажи имеют коэффициенты ниже λ_{gs}); но начиная с известных степеней разрежения воздуха, все остальные материалы понижают свой коэффициент почти до 0.

Объяснение этого явления, а вместе с тем и всей вообще закономерности в теплопроводных свойствах порошков, состоит в следующем. По кинетической теории газов, последние

состоят из множества мельчайших молекул ¹⁾, движущихся с громадной скоростью (485 м/сек при 0°) в разных направлениях и непрерывно сталкивающихся друг с другом и со стенками оболочек („давление“ газа на стенки). Столкновения эти при указанном количестве молекул настолько часты, что свободный путь каждой из них (между столкновениями) в среднем составляет всего $\frac{1}{10.000}$ мм. С уменьшением объема, занимаемого данным количеством газа, увеличивается число ударов его молекул друг о друга и о стенки, что ведет к увеличению давления (с уменьшением свободной длины путей). При повышении температуры газа увеличивается скорость его молекул, а потому и живая сила их ударов о стенки, что также обозначает повышение давления. Наконец, при разрежении газа уменьшается число его молекул в данном объеме, поэтому уменьшаются удары их о стенки оболочек, равно и взаимные столкновения молекул — иначе говоря, увеличивается свободная длина их пути. Эта последняя величина, вместе со скоростью движения молекул, играет важнейшую, решающую роль в большинстве физических свойств газов ²⁾.

Так, мы знаем, что если в одной части газовой среды создана искусственно иная температура, чем в остальной массе, или иное давление, или, наконец, иная консистенция смеси с другим газом, то во всех случаях происходит процесс выравнивания условий температуры, давления, консистенции. Это объясняется тем, что молекулы газа, имевшие первоначально неодинаковую скорость или неодинаковый свободный путь движения, в силу отличия своей энергии от других, начинают при столкновениях с ними терять это отличие, передавая его постепенно молекулам остальной массы. С этой точки зрения и тепловое движение (теплопередача) в газе есть не что иное, как передача повышенной энергии движения одних молекул молекулам с пониженной энергией.

С той же точки зрения находит себе объяснение и то обстоятельство, что все указанные свойства газов, в частности, их теплопроводность, в известных границах не зависят от их давления, но при сильном разрежении становятся пропорциональными давлению. При объяснении этого явления с точки зрения кинетической теории газов один из научных работников в этой области (проф. Варбург) приводит следующую иллюстрирующую аналогию. Пусть в громадном библиотечном зале происходит быстрое перенесение книг из шкафов одной стены в шкафы противоположной. При увеличении числа

¹⁾ В 1 куб см насчитываются триллионы молекул.

²⁾ Исключительные примеры крайнего разрежения их мы видим в вакууме рентгеновской трубки; там длина свободного пути молекул достигает нескольких сантиметров (вместо приведенной выше величины 0,0001 мм при 0° и атмосфер. давлении).

работников для этой переноски мы сначала получаем пропорциональный рост продукции, т. е. числа перенесенных переносчиков в данном зале, последние испытывают все большие препятствия для своей работы, внутренние трения и столкновения в ней возрастают, и общая продукция возрастает все слабее, пока на известной стадии дальнейшее увеличение числа людей уже совсем не повышает общей продукции. И обратно, с уменьшением, начиная от этой стадии, числа работников, продукция сначала не уменьшается, а затем, после определенной стадии разрежения, падает пропорционально этому уменьшению. В переводе на язык физики это значит, что теплопроводность газов в известных границах не зависит от их давления, но начиная с известной степени разрежения, она падает и притом примерно пропорционально падению давления. Это и подтверждается прямыми опытами физики и, в частности, вышеупомянутыми опытами Смолуховского над термоизоляторами.

Но раз кинетическая теория газов нашла себе таким образом точку опоры в вопросе о теплопроводности пористых, богатых воздухом веществ, она обещает в будущем дать и общее решение этого вопроса с помощью своих математических формул. Силу этого последнего метода она уже показала в данной области. Так, для перечисленных выше трех видов движения газов (выравнивающего разности) она вывела математические формулы, в виде функций от упомянутой выше средней свободной длины путей молекулярного движения при 0° . Определив далее из опытов некоторые коэффициенты этих уравнений при всех трех процессах, она решила эти уравнения относительно свободной длины путей и получила во всех трех случаях почти одну и ту же величину (0,0001 мм). Это позволяет рассчитывать, что и в дальнейшем приложение физико-математических методов этой теории к вопросу о теплопроводности термоизоляторов даст в этой области некоторые общие решения, взамен тех узко-практических опытных данных, которыми техника располагает здесь в настоящее время.

Это и начал уже делать в свое время проф. Смолуховский (ныне покойный). Рассматривая с точки зрения кинетической теории газов теплопередачу чрез газовую среду между двух стенок с температурами t_1 и t_2 на взаимном расстоянии l при коэффициенте теплопроводности газа λ , он нашел, что закон этой теплопередачи выражается не формулой $Q = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{l}$, как обычно принимается ныне, а формулой

$$Q = \frac{\lambda (t_1 - t_2)}{l + 2d},$$

где d есть упомянутая выше свободная длина пути газовых молекул. Применяя аналогичный метод к термоизоляционным порошкам (в которых предположены были для упрощения шарообразные зерна), он получил для их коэффициента теплопроводности формулу:

$$\lambda = A\lambda_0 \cdot \log \left(1 + \frac{ap}{d_0 p_0} \right),$$

где a — радиус зерна, p — давление газа при опыте и p_0 — атмосферное давление, d_0 — длина свободного пути молекул при атм. давлении, λ_0 — соответствующий тому же давлению коэффициент теплопроводности и A — постоянная величина, зависящая от расположения зерен. Определив после этого экспериментальным путем λ и A для разных газов, исследователь получил из уравнения величины d_0 , достаточно близкие к тем, которые ранее и другими путями были установлены кинетической теорией для этих свободных длин. Это — для проверки; по существу же уравнения эта величина является основным фактором для получения λ .

Та же величина свободной длины путей оказывается решающей и в вопросе о теплоотдаче от поверхности стены к прилегающему газу, т. е. в вопросе о коэффициенте α . Кинетическая теория уже объяснила со своей точки зрения тот факт, подтвержденный опытами, что α понижается с разрежением газа (за недостатком места не входим здесь в рассмотрение этого объяснения); остается, очевидно, ожидать, что, как и коэффициент λ , величина α будет выражена теорией в функции от свободной длины пути d_0 .

Заканчивая на этом рассмотрение теплопроводности воздушных прослоек и связанных с ними термоизоляционных веществ, обратимся теперь к общему решению вопроса об общем коэффициенте теплопередачи ограждений любой конструкции. После всех ранее сделанных выводов мы, очевидно, имеем следующее выражение для этой теплопередачи:

$$Q = F \cdot k (T_s - T_n), \text{ при чем } \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{X_1}{\lambda_1} + \frac{X_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{X_n}{\lambda_n} + \frac{\lambda'}{X'_{as}} + \frac{X''}{X''_{as}} + \dots \dots \dots (10)$$

где предположено в конструкции ограждения несколько разнородных слоев твердого материала и несколько воздушных пустот. При наличии всех приведенных выше формул, коэффициентов и таблиц решение этих уравнений не представляет вообще затруднений. Исключение составляют однако стены с наличием в них воздушных пустот. В самом деле, выше при рассмотрении теплопроводности этих прослоек,

все время предполагалось, что известны температуры ограничивающих их стенок, следовательно, и собственные температуры прослоек (как средние из двух крайних). В действительности, перед расчетом стены эти температуры нам неизвестны; и так как они сами зависят от влияния воздушного прослойка, то получается как бы заколдованный круг. В практике это затруднение разрешается, при более точных расчетах, методом пробных подстановок, подобных тому, который нами уже применен ранее при определении коэффициента α для однородной стены с заданными температурами T_n , T_s и коэффициентом λ (см. стр. 15—16). Представим этот способ расчета для большей ясности на одном конкретном примере. Пусть надо рассчитать общую теплопередачу стенки, представленной на рис. 6, при разности наружной и внутренней температур в 25°C .

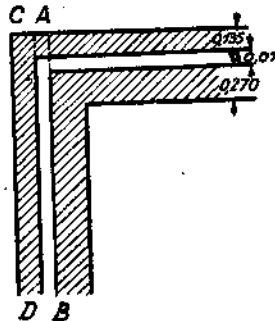


Рис. 6.

Коэффициент внутренней теплопроводности первого изнутри слоя стены толщ. $X_1 = 0,27 \text{ м}$ определим следующим образом:

$$\frac{\lambda}{X_1} = \frac{0,7^1)}{0,27} = 2,6.$$

Для наружного слоя имеем $\frac{\lambda}{X_2} = \frac{0,7}{0,135} = 5,2$.

Теперь задаемся температурой воздуха в прослойке в $+5^\circ \text{C}$). Коэффициент теплопроводности λ' воздуха в прослойке подсчитываем по формуле:

$$\lambda' = \lambda_{as} + \lambda_k + X_{as} \cdot C' \cdot c.$$

Здесь $\lambda_{as} = 0,02$; λ_k по табличке на стр. 23 равен 0,05.

Величину C' подбираем по табл. V приложения, предполагая в ней C_1 и C_2 для кирпичных стенок прослойка равными 4,3; тогда $C' = 4,0$. Наконец, c берем по таблице III (вторая половина) для средней температуры 5° ; получим $c = 0,860$. Таким образом имеем:

$$\lambda' = 0,02 + 0,05 + 0,07 \cdot 4,0 \cdot 0,860 = 0,31.$$

Теперь переходим к вычислению общего коэффициента теплопередачи всей стены:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{X_1}{\lambda} + \frac{X_2}{\lambda} + \frac{X_{as}}{\lambda'}.$$

¹⁾ берем коэффициент λ для кирпичной кладки равным 0,7 с известным запасом на нормальные условия влажности (см. табл. I).

²⁾ ее выбираем по соображению с расположением прослойка относительно двух зон, внутренней и внешней, с заданными температурами.

Здесь коэффициент α_n для теплоотдачи наружной поверхностью стены берется по изложенным выше практическим данным о силе ветра; так как выбор той или иной величины не меняет дальнейших приемов, мы возьмем теоретический случай, когда $\alpha_n = \alpha_s$, и таким образом вопрос сводится к подбору коэффициента α_s для тепловосприятия внутренней поверхностью стены. Величина этого коэффициента зависит от разности температур на поверхности стены и в прилегающем воздухе и потому может быть взята первоначально также лишь в порядке пробного подбора. Этот подбор может быть сделан по таблице на стр. 16 если будем исходить из определенного коэффициента внутренней теплопроводности всей стены k_1 ; последний, согласно предыдущему, следует из уравнения:

$$\frac{1}{k_1} = \frac{X_1}{\lambda} + \frac{X_2}{\lambda} + \frac{X_{ca}}{\lambda'} = 2,6 + \frac{1}{5,2} + \frac{0,07}{0,31} = 0,81, \text{ откуда } k_1 = 1,23.$$

В таком случае по таблице на стр. 16 имеем путем интерполяции:

$$\frac{\Delta t}{T_s - T_n} = \frac{1}{8},$$

откуда $\Delta t = 3,1^\circ$. Теперь подбираем по этой разности температур величину α_s , которая $= C + \alpha_k$ (см. стр. 15), а величину α_k имеем по табл. IVA равной 2,9; следовательно

$$\alpha_s = 4,3 + 2,9 = 7,2.$$

Можем также всю величину α_s взять прямо по второй части таблицы IV (IVB).

Возвращаясь теперь к общему коэффициенту k , имеем:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{7,2} + \frac{1}{7,2} + 0,81, \text{ откуда } k = 0,92.$$

Теперь можем определить создающиеся при этом температуры как на поверхностях стены, так и на стенках воздушного прослойка и затем сравнить их с предположенными выше (т. е. с $\Delta t = 3,1^\circ$ и с температурой прослойка $+5^\circ$). Действительно, температуру поверхности стены или, вернее, разность ее с температурой воздуха определим, исходя из известного нам принципа равенства теплопередач чрез отдельные слои стены всей ее теплопередаче; в данном случае имеем:

$$\alpha_s \Delta t_s = k \cdot (T_s - T_n), \text{ откуда } \Delta t_s = \frac{0,92 \cdot 25}{7,2} = 3,2^\circ,$$

что достаточно близко к предположенной выше величине. Температура стеной поверхности внутри помещения будет при этом $= 20 - 3,2 = 16,8^\circ \text{ Ц.}$

Для температуры на поверхности AB имеем:

$\Delta' t \cdot \frac{\lambda}{X_1} = k (T_a - T_n)$, откуда $\Delta' t = \frac{0,92 \cdot 25}{2,6} = 9^\circ$, и, следовательно, искомая температура поверхности AB будет $16,8 - 9 = 7,8^\circ \text{ Ц}$.

Наконец, подобным же образом определяем разность для температуры на поверхности CD сравнительно с температурой на AB :

$$\Delta'' t \cdot \frac{\lambda'}{X_{ca}} = k (T_a - T_n), \text{ откуда } \Delta'' t = \frac{0,92 \cdot 25}{0,31:0,07} = 5,2^\circ,$$

а самая температура будет $7,8^\circ - 5,2^\circ = 2,6^\circ \text{ Ц}$.

Наконец, средняя температура в прослойке получается

$$\frac{7,8^\circ + 2,6^\circ}{2} = 5,2^\circ,$$

что достаточно близко к предположенной выше. Таким образом сделанный выше предположительный расчет можем признать вместе с тем и окончательным. Если бы расхождение в полученных температурах (Δt у стены и в средней температуре прослойка) было значительным (несколько градусов), то почти весь расчет пришлось бы переделать на основе более правильного предположения, пока не добьемся достаточного согласия предположений с выводами.

Изложенное показывает, что сколько-нибудь правильный и строгий расчет теплопередач чрез сложную конструкцию ограждения, особенно же включающую в себя воздушные пустоты, довольно сложен. Но для рядовой практики он может быть значительно упрощен без большого вреда для результатов. Коэффициент теплопроводности воздушного прослойка может быть взят прямо по таблице на стр. 29, исходя из примерных средних значений $C's$ и заданного X_{ca} . Равным образом коэффициент α_a может быть взят для обычных условий в жилых зданиях равным $7-7,5$, а $\alpha_n = 15-25$. Если присоединить к этому отсутствие повторных расчетов в связи с пробными величинами, то все дело сильно упрощается. В то же время на этих вычислениях можно убедиться, что получаемые результаты отличаются от более точных сравнительно мало и потому для практики вполне допустимы в виду множества других неопределенных условий в предстоящей новому зданию эксплуатации (степень влажности режима, естественная вентиляция и пр.). Но для вычислений более ответственных и точных приведенный метод весьма полезен.

В рассмотренном задании при упрощенном подходе получим $\frac{X_{ca}}{\lambda'} = 0,20$, $\alpha_a = 7,5 = \alpha_n$ и $k = 0,94$, а при более реальных условиях, когда $\alpha_n = 15$, $k = 1,0$.

Приведенные методы расчетов теплопроводности строительных ограждений применяются в практике для двух основных целей:

1) для определения общей нагрузки отопительной системы, т. е. для расчета последней;

2) для определения теплотехнических качеств ограждений и проверки их пригодности.

Первая задача общеизвестна и не требует пояснений. Вторая же должна быть рассмотрена здесь по существу.

Теплопроводность ограждения интересует нас не только с точки зрения расхода топлива; если бы последнее было даже даровым, мы не могли бы сколько-нибудь значительно облегчить наши ограждения в смысле уменьшения их размеров и увеличения теплопроводности. Этому мешают санитарные требования, предъявляемые современной культурой к отапливаемым помещениям. Большая теплопроводность ограждений привела бы неизбежно к понижению температуры внутренней поверхности ограждения или, что еще важнее, к увеличению разности между ней и температурой внутреннего воздуха (см. выше Δt); а это в свою очередь имело бы два последствия:

а) поверхность ограждения давала бы обитателям ощущение своей холодности;

б) начиная с известной стадии охлаждения (разности температур), она стала бы конденсировать на себе влагу окружающего воздуха (мокнуть), что в свою очередь, кроме непосредственного санитарного ущерба, повело бы к увеличению теплопроводности ограждения и даже к его промерзанию. Первое (п. а) понижает санитарное качество жилища, второе (п. б) делает его совершенно непригодным для обычного жилья. Рассмотрим условия и расчеты, которые позволяют проверить качества ограждений в этом отношении.

Сущность вопроса заключается в том, что разность температур на внутренней поверхности ограждения и в прилегающем воздухе, т. е. величина $T_s - t_a$, не должна переходить известного предела. Последний определяется условием конденсации паров внутреннего воздуха при данном понижении температуры на поверхности ограждения.

Из физики известно, что воздух при каждой заданной температуре может содержать в единице своего объема (1 куб м) лишь вполне определенное количество влаги в газообразном состоянии (невидимого пара); это количество в граммах на 1 куб м дается для каждой температуры в таблицах физики; ниже мы приводим извлечение из них в объеме, нужном для строительных расчетов:

Темпер. в °Ц	Колич. водяных паров в гр/куб м	Темпер. в °Ц	Колич. водяных паров в гр/куб м
— 10	2,14	11	10,0
— 8	2,54	12	10,7
— 6	2,99	13	11,4
— 4	3,51	14	12,1
— 2	4,13	15	12,8
0	4,84	16	13,6
+ 2	5,6	17	14,5
4	6,4	18	15,4
5	6,8	19	16,3
6	7,3	20	17,3
7	7,8	21	18,3
8	8,3	22	19,4
9	8,8	23	20,6
10	9,4	24	21,8

При таком содержании паров воздух называется насыщенным ими. Чем ниже его температура, тем меньшее количество влаги нужно для полного насыщения воздуха; иначе говоря, при понижении температуры насыщенного парами воздуха часть влаги последнего будет выделяться из него в капельном состоянии, конденсироваться.

В обычных условиях жилья мы не имеем полного насыщения; по ряду причин и в согласии с санитарными нормами процент насыщения редко превышает 60—70%, т. е. воздух жилья имеет в себе лишь 60—70% той влаги, которую мог бы иметь при полном насыщении. Однако, если внутренняя поверхность ограждения имеет слишком низкую температуру, то и прилегающий к ней воздух может охладиться настолько, что достигнет полного насыщения (100% влажности), а затем начнет выделять на холодную поверхность стены влагу. Проверка ограждения в отношении этой опасности состоит в следующем.

Пусть дана температура и влажность (в %) внутреннего воздуха. По упомянутой таблице физики мы найдем количество влаги в граммах, приходящейся на 1 куб м этого воздуха при насыщении; взяв от него заданный процент, найдем действительное количество влаги на 1 куб м воздуха. Затем по той же таблице, исходя из найденного веса влаги, найдем ту температуру, при которой это количество влаги

является насыщающим воздух; эта температура окажется, конечно, ниже заданной внутренней (T_g) и будет, положим, ϑ . В таком случае, очевидно, температура внутренней поверхности ограждения t_g не должна быть ниже ϑ° , а в предельном случае $t_g = \vartheta$. Теперь посмотрим, какова должна быть общая теплопередача ограждения (т. е. коэффициент ее k), чтобы t_g не спускалось ниже ϑ .

Из уравнения (3): $Q = kF(T_g - T_n)$, а из уравнения (2) $Q = \alpha_s F(T_g - t_g)$; поэтому

$$k(T_g - T_n) = \alpha_s(T_g - t_g), \text{ откуда } k = \alpha_s \cdot \frac{T_g - t_g}{T_g - T_n}.$$

Положив здесь $t_g = \vartheta$, имеем максимальное значение для k , при котором уже возникает опасность конденсации:

$$k = \alpha_s \frac{T_g - \vartheta}{T_g - T_n}.$$

Следовательно, для устранения конденсации должно быть соблюдено условие:

$$k < \alpha_s \frac{T_g - \vartheta}{T_g - T_n}.$$

Числовой пример: пусть $T_g = +20^\circ \text{Ц}$, $T_n = -30^\circ$, $\alpha_s = 7,5$ и пусть предполагаемая влажность воздуха в жилье не должна превосходить 70%. Тогда по таблице находим, что в воздухе жилья будет содержаться максимально (при $+20^\circ \text{Ц}$) $17,3 \times 0,7 = 12,1$ гр. влаги на 1 куб. м. По той же таблице видим, что такое содержание влаги является насыщающим при температуре воздуха в 14°Ц ($\vartheta = 14^\circ$); поэтому коэффициент общей теплопередачи должен быть:

$$k < 7,5 \cdot \frac{20 - 14}{50}, \text{ т. е. } < 0,9.$$

Вышеприведенные числовые задания для T_g и T_n обычны для климата центральной полосы России; соответственно этому мы и видим, что коэффициент общей теплопередачи для наружных стен здесь брался раньше не более 0,80 (сухая кирпичная стена в $2\frac{1}{2}$ кирпича старого размера). При новом размере кирпича и при обычной влажности кладки этот коэффициент мы имеем теперь в 0,9, т. е. в предельно высоком значении с точки зрения опасности конденсации паров. Однако, минимальная расчетная температура наружного воздуха редко бывает настолько продолжительной, чтобы на внутренней поверхности стены успела установиться соответствующая ей низкая температура. Кроме того, влажность воздуха у нас обычно менее 70% (особенно при централь-

ном отоплении и вентиляции). Наконец, небольшие осадки конденсата наша обычная стена хорошо всасывает в себя. В силу этих обстоятельств указанное увеличение k не представляет собой большой опасности. Но с другой стороны ясно, что при этой величине мы стоим уже на границе опасности, дальше идти некуда в смысле увеличения k .

Глава 2. Теплопотери в гражданских сооружениях.

Практические расчеты теплопотерь в гражданских сооружениях необходимы для определения нагрузки отопительной системы; в холодильных помещениях аналогичный расчет согревания их внешней атмосферой (летом) необходим для расчета механических холодильных установок. Наконец, в отдельных случаях подобные же расчеты необходимы только для проверки естественно создающихся в помещении температур, которые не должны выходить из известных пределов; таковы тепловые расчеты простых хранилищ (подвалов для овощей, фруктов и пр.), расчеты температур в неотапливаемых помещениях, расположенных среди отапливаемых и т. п. В основе всех этих расчетов лежат величины общих коэффициентов теплопередачи k у разных ограждений, ограничивающих данное помещение от зон с иной температурой; когда эти коэффициенты известны или вычислены, то остается произвести подсчет по формуле (3) для каждого рода ограждения (стен, полов, потолков, окон, дверей), учитывая соответствующие площади ограждений F и разности температур у зоны охраняемой и зоны воздействующей.

Как известно, большинство наших гражданских сооружений имеют весьма однообразные, типовые конструкции своих ограждений. Поэтому вполне естественно, что для них величины коэффициентов k вычислены раз навсегда и сведены в таблицы для прямого пользования ими при обычных практических расчетах. Такая таблица приведена у нас под № VIII в приложении. Все необычные конструкции, не помещенные в таблице, должны, очевидно, рассчитываться в теплотехническом отношении индивидуально, по методам, формулам и вспомогательным таблицам, помещенным в предыдущей главе.

Но и в пределах обычных конструкций имеются некоторые элементы зданий, которые не учитываются в таблице VIII и при пользовании ею ускользают от подсчета. Таковы углы зданий, места пересечений стен, оконные ниши и пр. Правильный подход к делу требует, чтобы они были учтены — хотя бы в таком виде, что определив раз навсегда более точным расчетом их значение в общей теплопотере, мы выработаем некоторые простые приемы для их компенсации в практических расчетах.

Рассмотрим ряд таких теплопотерь через особые элементы здания.

1. *Наружные вертикальные углы.* Каждый такой угол (рис. 7) имеет свою наружную теплоотдающую поверхность, но не имеет внутренней теплопитающей. Поэтому внутри строительного материала угла происходит некоторое „оттягивание“ теплоты от ее нормальных в стене токов в косых направлениях (см. рис. 7), в силу чего увеличивается теплопотеря через прилегающие к углу рядовые поверхности стен¹⁾. В практических расчетах теплопотерь это обстоятельство учитывается тем, что теплоотдающую площадь стен измеряют не по внутреннему горизонтальному периметру, а по наружному. Насколько это соответствует действительности?

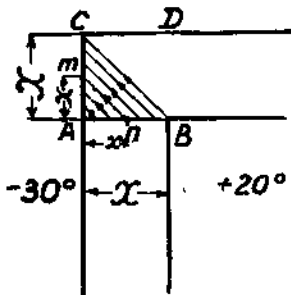


Рис. 7.

Сделаем более точный расчет. Разделив угол пополам диагональной прямой (см. рис.), видим, что каждая из двух полученных частей угла питается теплотой от прилегающего к ней торца *AB* стены. Токи теплоты при этом можно себе представить всего вероятнее в направлениях, параллельных упомянутой диагонали, так как только при таком направлении разность конечных температур у этих токов соответствует длинам их путей, т.е.

получается одинаковое соотношение между тепловыми потенциалами и сопротивлениями.

Предположив сначала в *AB* нормальный тепловой ток через стену, посмотрим, сколько отвлекает из него теплоты холодный угол. Возьмем на *AB* материальную точку *n* в расстоянии *x* от наружной поверхности стены. При однородной стене температуру в этой точке можно выразить формулой:

$$t_n + \frac{t_s - t_n}{X} x,$$

где t_s и t_n суть температуры внутренней и наружной поверхностей стены, а X — ее толщина.

Обозначая чрез t'_n температуру наружной поверхности угла, будем иметь следующую разность температур в точках *m* и *n*:

$$\Delta t = t_n + \frac{t_s - t_n}{X} x - t'_n.$$

¹⁾ В силу этого, как известно, углы ранее других частей способны промерзать и сыреть (от конденсации влаги воздуха на их поверхностях).

Но t'_n весьма близко к t_n , так как обе эти величины близки к T_n ; во всяком случае величина $t_n - t'_n$ очень мала сравнительно с $\frac{t_s - t_n}{X} \cdot x$, и ею можно пренебречь. Тогда разность температур в m и n будет:

$$\Delta t = \frac{t_s - t_n}{X} \cdot x.$$

С другой стороны, внутренняя теплопроводность материала между теми же точками будет:

$$\frac{\lambda}{mn} = \frac{\lambda}{1,42x},$$

а в более общем виде $= \frac{\lambda}{x} csa$,

где λ — коэффициент внутренней теплопроводности и α — угол между стороной угла CD и биссектрисой. Взяв теперь элемент площади торца AB шириною dx и высотой $1,0$ (м), найдем теплопроводность от него к наружной поверхности угла:

$$dQ = \frac{t_s - t_n}{X} \cdot x \cdot \frac{\lambda}{x} csa dx = \frac{t_s - t_n}{X} \cdot \lambda csa dx.$$

Интегрируя это в пределах всей стороны угла (от $x = 0$ до $x = X$) получим:

$$Q = \frac{t_s - t_n}{X} \lambda csa X = (t_s - t_n) \lambda csa. \dots (Q)$$

На обе части одного угла это составит $2 \lambda csa (t_s - t_n) = 1,42 \lambda (t_s - t_n)$ кал на каждый пог. метр высоты.

Так как по принципу равенства частных теплопередач общей $\frac{(t_s - t_n) \lambda}{X} = (T_s - T_n) k$, то предыдущее выражение перепишем в виде

$$Q = 2X \cdot k \cdot (T_s - T_n) csa = 1,42 \cdot X \cdot k (T_s - T_n).$$

Формула показывает, что теплотеря углом равносильна тому, что давала бы нам вертикальная полоса рядовой стены шириною в $1,42$ раза бóльшей, чем толщина стены.

Из этого легко видеть, какой запас делаем мы, когда считаем теплоотдающую поверхность стен по наружному обмеру, т. е. прибавляем к длине стены полосу в $2X$ м. При стенах в $2\frac{1}{2}$ кирпича старого размера мы присчитываем при этом вертик. полосу шириною $0,7 \cdot 2 = 1,4$ м, тогда как было бы достаточно $1,0$ м. При бревенчатых стенах мы присчитываем ок. $0,22 \cdot 2 = 0,44$ м, вместо $0,31$ м. Иначе говоря,

мы делаем запас, составляющий ок. 40% от действительной потери тепла углами.

При входящих углах не имеем в них никакой теплопотери, кроме обычной стенной, и те части внутреннего периметра, которые соответствуют этим углам (см. *ABC* на рис. 8), должны выключаться при обмере стен по внутреннему периметру.

2. При пересечении внутренних стен с наружными (рис. 9) получаются вертикальные полосы *AB* наружных поверхностей, действующие охлаждающим образом на соседние части стен подобно углам. Является вопрос: откуда берется теплота для питания этой потери, каковы пути движения теплоты?

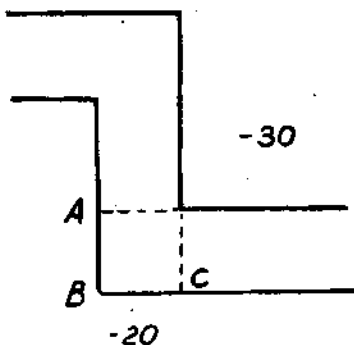


Рис. 8.

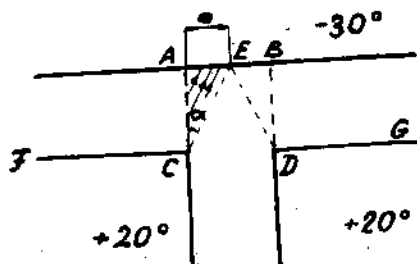


Рис. 9.

Если мы предположим питание от торцов *AC* и *BD*, то путем вывода, вполне аналогичного предыдущему, получим теплопотерю на 1 м высоты:

$$Q = 2 \frac{t_a - t_n}{X} \cdot \lambda \cdot csa \cdot a = \frac{t_a - t_n}{X} \lambda csa \cdot A = csa A (T_a - T_n) \cdot k_1$$

где $A = 2a = AB$.

По этой формуле для наружной стены в 2½ кирпича и такой же внутренней, при расчетной разности температур в 50°, получим $\alpha = 26^\circ 40'$, $A = X$ и $Q = 28$ кал.

При таком предположении процесс будет сопровождаться некоторым охлаждением участков стены *CF* и *DG* и потому усиленной передачей на них внутренней теплоты.

Если с другой стороны предположим, что *AB* питается исключительно от торца *CD* теплой внутренней стены, то коэффициент этой теплопередачи k_1 определится из формулы:

$$\frac{1}{k_1} = \frac{X}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}$$

1) Эту формулу получим непосредственно из предыдущей (Q), если будем рассматривать *AE* и *EB* как наружные поверхности двух углов (соемкнутых в *E*), оттягивающих теплоту соответственно от *AC* и *BD*.

в силу чего k_1 , будет несколько больше, чем обычный общий коэффициент теплопроводности, определяемый из формулы:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_s} + \frac{X}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}$$

Так, для стены в $2\frac{1}{2}$ кирпича $k=0,9$ и $k_1=1,0$, для деревянной рубленой $k=0,6$, $k_1=0,67$. В таком случае теплоотдача от торца CD была бы равна на 1 пог. м высоты: $Q = 1 \cdot X k_1 (t_s - t_n) = k \cdot k_1 \frac{\lambda^2}{\lambda} (T_s - T_n)$, если температура в CD предположим равной t_s .

При толщине в $2\frac{1}{2}$ кирпича как наружной, так и внутренней стен и при расчетной разности температур в 50° получим теплопотерю торца CD

$$Q = 32 \text{ кал.}$$

Как видим, и второе предположение приводит к результату, довольно близкому с первым. В действительности, по-видимому, происходит нечто среднее между двумя предположениями, т. е. полоса AB питается частью за счет прилегающих наружных стен, частью за счет внутренней. Но у нас уже есть уверенность в том, что эта теплопотеря весьма близко совпадает с той, какую имела бы свободная наружная стена той же ширины AB ; например, для нашей кирпичной стены мы имели бы для указанной ширины:

$$Q = 0,9 \cdot 50 \cdot 0,7 = 31,5 \text{ кал.}$$

Таким образом, обычный способ обмера таких стен при расчете теплопотерь, а именно, со включением толщины внутренних стен в площадь наружной, вполне правилен и даже довольно точен в смысле согласия с более точным расчетом.

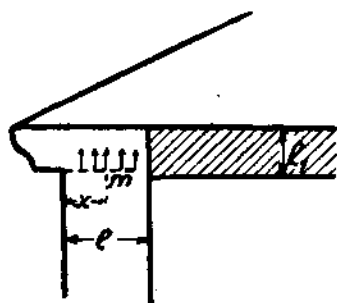


Рис. 10.

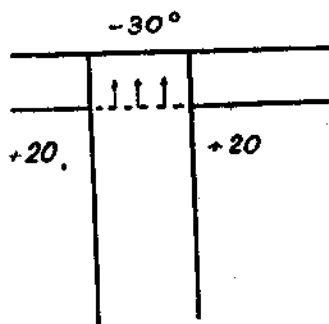


Рис. 11.

3. Третий вид добавочных теплопотерь получается вблизи верхних холодных торцов капитальных стен, как наружных (рис. 10), так и внутренних, выходящих на уровень чердачной засыпки потолков (рис. 11). Подсчитаем количество

теплоты, теряемое такими частями стен. Возьмем попережнему точку m с абсциссой x . Разность температур в ней и на верхней поверхности торца стены можно выразить формулой:

$t_n + \frac{t_s - t_n}{X} \cdot x - T'_n$, где T'_n есть температура верхней поверхности торца, и $X = e$. В силу этого, общая теплопроводность на 1 пог. м длины стены при ширине элемента dx составит:

$$dQ = (t_n + \frac{t_s - t_n}{X} \cdot x - T'_n) k_1 \cdot dx,$$

где $k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{e_1}{\lambda}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{X_1}{\lambda}}$. По всей же толщ. стены получим:

$$Q = \int_{x=0}^{x=X} dQ = (t_n - T'_n) \cdot k \cdot X + k \cdot k_1 \frac{(T_s - T_n)}{2\lambda} X e^2$$

Так, для стены в $2\frac{1}{2}$ кирпича при $X_1 = \frac{X}{2}$ и $T_s - T_n = 50^\circ$ и при $t_n = 27^\circ$, $T'_n = -20^\circ$ (температура чердака, см. ниже), $k_1 = 1,0$, $X = 0,64$ получим $Q = \infty 8$ кал.

При этом мы учитывали некоторое затепление торца крыши, каковое при железной, например, кровле не велико, при других же кровельных материалах может быть и значительным. Все же из расчета легко видеть, что теплопотеря данными частями здания значительно меньше, чем она была бы у соответствующей по высоте свободной наружной стены (у последней потеря была бы в нашем примере $0,9 \cdot 50 \cdot 0,32 = 15,4$ кал).

Таким образом, тот практический прием подсчета, когда в площадь наружных стен включаются части их, заслоненные торцами перекрытий, должен считаться вполне достаточным.

Для случая, представленного на рис. 11, формула для теплопотери и величина последней будут, очевидно, аналогичны тому, что мы имели в случае 2 (рис. 9) (при иной лишь наружной температуре) и с такими же практическими выводами относительно способов обмера (верхние торцы внутренних стен включаются в площадь потолков).

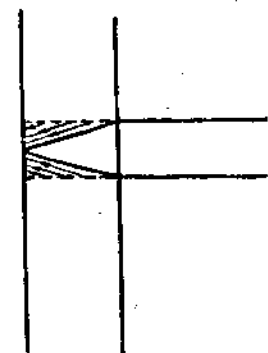


Рис. 12.

4. Теплопотеря через части наружных стен, примыкающие к торцам горизонтальных перекрытий (рис. 12), исчисляется, очевидно, так же, как и в случае 2 (рис. 9), со всеми вытекающими отсюда выводами.

5. Теплопотеря наружными углами при нишах окон и дверей (рис. 13) зависит, естественно, от глубины этих ниш b (или b'). Если проведем прямую AC под 45° , то материальные точки на этой прямой будут равно отстоять от внутренней поверхности стены и от поверхности AB , точки же слева от AC будут передавать теплоту только от поверхности AB . Эта передача, как и при наружных углах, будет происходить по путям, параллельным AC , как прямым наименьших сопротивлений. Взяв на участке AB точку m на расстоянии x от наружной поверхности стены, имеем для нее теплопроводность на вертикальном элементе ниши l . dx :

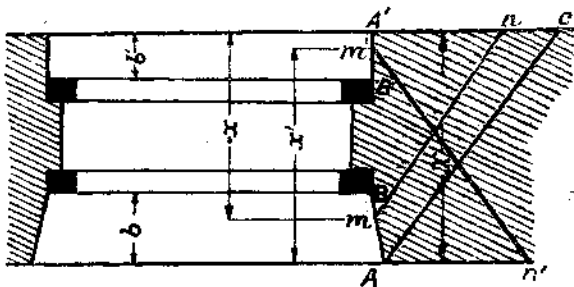


Рис. 13.

$$dQ = \frac{(t_n - t_s)}{mn} \lambda dx;$$

но $mn = 1,42 x$; интегрируя, получим:

$$Q = \int_{x=X-b}^{x=X} \frac{t_n - t_s}{1,42 x} \lambda dx = \frac{t_n - t_s}{1,42} \lambda \lg_n \frac{X}{X-b} =$$

$$= \frac{k(T_s - T_n) \cdot X}{1,42} \lg_n \frac{X}{X-b}.$$

Такая же примерно потеря происходит одновременно и по второй нише окна. Считая ниши одинаковой (средней) глубины, имеем общую потерю для 1 пог. м холодного периметра окна:

$$Q = 1,42 X \cdot k \cdot (T_n - T_s) \lg_n \frac{X}{X-b}.$$

В наших обычных кирпичных стенах при $X = 0,64$ надо полагать в среднем $b = 0,15$ м. Тогда получим

$$Q = 1,42 \cdot 0,64 \cdot 0,9 \cdot 50 \cdot \lg_{\pi} \frac{0,64}{0,49} = 10,6 \text{ кал.}$$

Изложенный расчет исходил из некоторых упрощенных представлений о тепловых потоках в периметрах окна. Действительное направление этих потоков скорее всего—криволинейное (см. рис. 14). Сводя эту кривизну к минимальной, т. е. предполагая пути теплообмена между точками m и m' прямолинейными (по mm'), мы получим, очевидно, максимальный, заведомо преувеличенный теплообмен, обозначающий как бы предел для ранее предположенных или искомым величин. Определим этот предел. Внутренняя теплопроводность между точками m и m' на вертикальном элементе площади стены $1 \cdot dx$ м, будет:

$$\Delta Q = \frac{\lambda}{x}(t_s - t_n) dx.$$

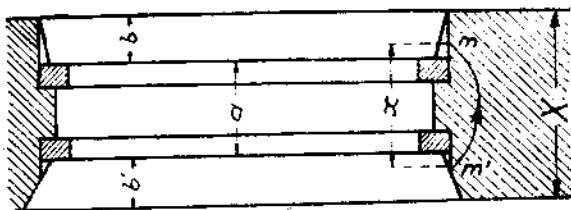


Рис. 14.

Интегрируя это в пределах $x = a$ (толщина оконного заполнения) и $x = X$ (толщина стены), получим следующую теплотерю на 1 пог м оконного периметра:

$$Q = \int_a^X \lambda(t_s - t_n) \frac{dx}{x} = \lambda(t_s - t_n) \lg_n \frac{X}{a} = X - k(T_s - T_n) \lg_n \frac{X}{a}.$$

Взяв $X = 0,64$ м, $k = 0,9$, $T_s - T_n = 50$ и $a = 0,40$ м, получим

$$Q = 13,5 \text{ кал.}$$

Этот проверочный расчет показывает, что найденное выше значение Q достаточно реально и близко к действительному.

Оно представляет довольно значительную величину, которой соответствует теплотеря вертикальной полосы наружной стены высотой 1 м, шириною 0,25 м. Указанное явление и служит основной причиной того обстоятельства, что реальная теплотеря окон всегда более всех исчисляемых теоретически для площади самого оконного заполнения (рамы), в силу чего в последнее время стали применять в интересах компенсации преувеличенные значения для k окон.

Действительно, если рассчитаем коэффициент общей теплопередачи для окна по формуле:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_k} + \frac{2 \cdot s}{\lambda} \text{ (стекла)} + \frac{X_{ss}}{\lambda'} \text{ (возд.)},$$

не принимая во внимание переплетов, то при $\alpha_s = 8,3$ ¹⁾, $\alpha_k = 20$, $s = 0,0015$, $\lambda = 0,65$, $X_{ss} = 15$ см и $\frac{X_{ss}}{\lambda'} = 0,26$ (по таблице Вирца на стр. 29 при $c = 0,8$), получим $\frac{1}{k} = 0,44$ и $k = 2,22$ кал.

Если примем во внимание переплет площадью в 20% от просвета при толщине брусков 6 см, то коэффициент снизится до k_1 , определяемого следующим образом. Переплеты с воздушным слоем дают сопротивление на 1 кв м своей площади $0,44 + \frac{2 \cdot 0,06}{0,14} = 1,30$ и теплопроводность

$\frac{1}{1,31} = 0,77$; следовательно:

$$k_1 = 2,22 \cdot 0,80 + 0,77 \cdot 0,20 = 1,93 \text{ кал.}$$

Однако учтенные нами выше холодные периметры снова увеличивают теплопотерю. Взяв среднее окно в 2 кв м, имеем периметр его в 6 пог м. Потеря ими достигает, согласно предыдущему, $10,6 \cdot 6 = 63,6$ кал, что дает на 1 кв м ≈ 32 кал на разность температур в 50°. На 1° это дает 0,64 кал и, следовательно, новое k будет: $k = k_1 + 0,64 = 2,57 \approx 2,6$.

До сих пор мы предполагали стены из однородного материала. Нет необходимости распространяться здесь о том, как все рассмотренные расчеты изменяются в случае конструкций неоднородных — например, стен с термоизоляционными слоями или с воздушными пустотами. Останем наше внимание только на одном случае — именно, на теплопотере вертикальными углами (см. выше п. 1) двухслойной стены при расположении термоизоляционного слоя то по внутренней ее поверхности, то по внешней. Даже не производя самого расчета, легко видеть, что при внешнем расположении терм. слоя потеря углами будет несколько большей, чем при обратной комбинации. В самом деле, приравнивая сначала нулю защитное влияние более теплопроводного слоя, мы получим при внешней изоляции больший объем нагреваемого помещения и большую сумму теплоотдающих

¹⁾ По существующим таблицам общая теплопередача чрез окно = 2,3; этому соответствует разность температур внутренней поверхности стекла и внутр. воздуха в 14° C; тогда по таблице IV Б $\alpha_s = 8,3$.

поверхностей, чем при внутренней — именно на сумму добавочных внешних поверхностей при углах. Очевидно, то же, хотя и в меньшей мере, будет получаться и в случаях, когда влияние изолируемой массы стены не равно 0. Равным образом, указанные соображения относятся, естественно, не только к вертикальным внешним углам, но и ко всем соответствующим нами аналогичным частям конструкций.

Это обстоятельство бросает нам свет на одно из интересных явлений в современных исследованиях по строительной теплотехнике. Korff-Petersen и Liese в Германии производили недавно опыты над экономичностью внешней и внутренней изоляции стен, определяя расходы теплоты в соответствующих камерах (1 м³). Они нашли ¹⁾, что при внутренней изоляции наблюдается несколько меньший расход теплоты, чем при внешней.

На первый взгляд это могло казаться непонятным: стены равного состава, но с иным расположением слоев, дают разную теплопотерю. Теперь же мы видим, что дело здесь не в различной теплопроводности стен, т.-е. каждого их квадр. метра, а в теплопроводности всей объемной системы камер — и именно их угловых частей всех видов.

От рассмотрения добавочных теплопотерь в стенах перейдем к тому же вопросу для полов. Это вопрос более сложный и еще менее улаженный в практических вычислениях теплопотери.

В самом деле, при висячих полах (с значительной высотой подполья) существует большое разнообразие температурного режима подполья в зависимости от его высоты и мощности боковых ограждений (цоколя). Между тем для практических вычислений в литературе обычно рекомендуется нечто постоянное. Так, проф. А. К. Павловский принимает температуру подполья в +4° Ц, проф. В. М. Чаплин в своем последнем курсе рекомендует брать разность температур подполья и жилья в 0,6 от полной расчетной разности; это последнее предположение лишь для средней зимней температуры (-5°) в нашем климате равносильно предположению проф. Павловского. Посмотрим, что дают нам более точные вычисления.

Тепловой процесс в подполье необычайно сложен. Он находится в связи с температурными условиями не только в здании и в наружном воздухе, но и в почве под зданием и вне его, со всеми дальнейшими зависимостями от внутренней земной теплоты. Исследовать математически такой сложный процесс с неопределенными границами влияния весьма трудно.

¹⁾ См. Gesundheits-Ingenieur 1922 г. 25/III, стр. 167, далее 17/VI, стр. 313—315; 1923 г. 7/IV, стр. 145. 1924 г. 20/IX, стр. 430 и др.

Такой расчет принципиально возможен более или менее в точном виде по методу Фурье. Однако в данном случае это было бы особенно сложно и в то же время, в силу ряда неизбежных произвольных предположений, лишено достаточной убедительности. Поэтому мы рекомендуем нижеследующий весьма простой, хотя и очень приближенный метод.

Возьмем сначала сплошной пол (без подполья) шириною $2X$ м и высотой h м над уровнем почвы. Определим температуру его t_N в точках N (см рис. 15), лежащих под полом на глубине $y = hm$ под средней продольной осью здания при низшей расчетной разности температур. Торцевые стороны здания предполагаем весьма удаленными друг от друга, как это и бывает в наших длинных городских зданиях и в поселковых блоках (Reihenhaus). При уравнишенном темпера-

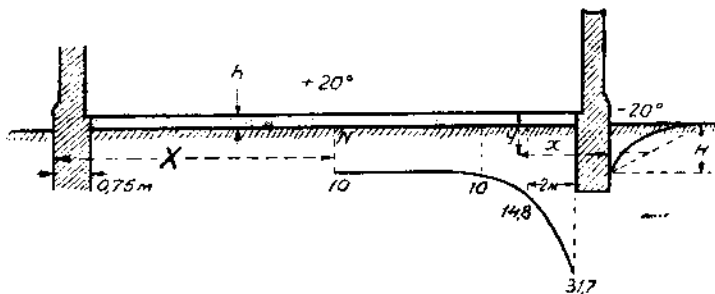


Рис. 15.

турном состоянии почвы под полом имеет место равенство между притоком теплоты к точке N из помещения чрез пол и потерей от нее теплоты в две боковые стороны холодного вольного грунта и вниз. Последняя теплотопотеря находится примерно в постоянном соотношении с первыми ¹⁾, и при грубом приближении можно поэтому принять их равными между собой.

Температуру t_n на поверхности почвы (под снегом) примем в -20° Ц (для -30° наружного воздуха).

Внутренние температуры вольного грунта расположены вообще говоря по некоторой кривой, характеризующей процесс зимнего остывания почвы. Общий тип подобных кривых нам известен из уравнений остывания тел (см. ч. II); он представлен на рис. 15 справа. Однако действительный вид кривой для каждого момента зимы нам неизвестен, так как он обусловлен многочисленными, трудно учитываемыми факто-

¹⁾ Действительно, под серединой здания уменьшаются снижения температур одновременно и в боковые стороны и вниз, а по мере приближения к одной из наружных стен увеличивается снижение в одну из боковых сторон и одновременно вниз.

рами. Если мы вместо кривой возьмем наклонную прямую, определяемую точками -20° и 0° на глубине зимнего промерзания почвы H , то погрешим; очевидно, лишь в сторону больших гарантий последующих результатов расчета.

В таком случае температура на глубине $y-h$ свободного грунта будет $t_n - \frac{t_n}{H}(y-h)$, а теплопередача к нему от

точки N будет $\left[t_N - t_n + \frac{t_n}{H}(y-h) \right] \frac{\lambda}{X}$, где λ есть средний коэффициент внутренней теплопроводности находящихся в почве материалов. С другой стороны, теплопередача от воздуха помещения к точке N составляет $k(T_a - t_N)$, где k есть коэффициент теплопередачи чрез конструкцию пола и почву до точки N . Так как точка N отдает теплоту одновременно в обе противоположные боковые стороны поровну и, по предположению, столько же вниз, то имеем:

$$3 \left[t_N - t_n + \frac{t_n}{H}(y-h) \right] \frac{\lambda}{X} = k(T_a - t_N),$$

откуда

$$t_N = \frac{T_a \cdot Xk + 3t_n \cdot \lambda + \frac{3t_n \lambda}{H}(y-h)}{3\lambda + X \cdot k} \dots \dots (t_N).$$

Определим по этой формуле температуры точек N , расположенных на разной глубине, приняв $X=6$ м, $\lambda=1$ (для полусухой почвы и каменного пола), $H=1$ м., $h=0,25$ м:

$$t_N = \frac{20,6 \cdot k - 3,20 \cdot 1 + \frac{3,20 \cdot 1}{1}(y-0,25)}{3 \cdot 1 + 6k} = \frac{120k - 60 + 60(y-0,25)}{3 + 6k}.$$

При $y=1,25$ м имеем $k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{y}{\lambda}} = \frac{1}{\frac{1}{7,5} + \frac{1,25}{1}} = 0,72$.

и $t_N = 11,8^\circ$.

В таком случае теплотеря здесь чрез пол составляет $Q = k(20 - 11,8) = 0,72 \cdot 8,2 = 5,9$, а разность температур воздуха и поверхности пола Δt определится из равенства:

$$\Delta t \cdot \alpha_a = 5,9, \text{ откуда } \Delta t = 0,8^\circ.$$

При $y=0,75$ м $k=1,13$ и $t_N=10,8^\circ$, а $Q=10,4$ кал.

При $y=0,25$ м $k=2,56$, $t_N=13,5^\circ$ и $Q=16,6$ кал.

Из трех полученных значений для Q берем среднее:

$$Q = \frac{5,9 + 10,4 + 16,6}{3} = \sim 11 \text{ кал, чему соответствует}$$

$$\Delta t = 1,5^\circ.$$

Теперь определим температуры t_n в тех же уровнях почвы для точек n , лежащих близ наружной стены. Они получают теплоту от пола и от точек N , а теряют ее в сторону ближайшего свободного грунта и вниз (в равной мере по предположению). Поэтому, обозначив расстояние их от наружной почвы через x , имеем:

$$2 \left[t_n - t_n + \frac{t_n}{H}(y-h) \right] \frac{\lambda}{x} = k(T_n - t_n) + \frac{\lambda}{X-x}(t_N - t_n),$$

откуда

$$t_n = \frac{T_n \cdot x \cdot k + \frac{x \cdot \lambda}{X-x} h_N + 2 t_n \lambda - \frac{2 t_n \lambda}{H} (y-h)}{2 \lambda + x \cdot k + \frac{x \cdot \lambda}{X-x}} \dots (t_n).$$

Полагая здесь прежние значения букв и кроме того $x = 0,75 \text{ м}$, получим

$$t_n = \frac{15k + 0,14 t_N - 40 + 40(y - 0,25)}{2,14 + 0,75k}.$$

Принимая здесь последовательно $y = 1,25$, $y = 0,75$ и $y = 0,25$ и соответствующие этим заданиям найденные выше величины k и t_N , получим:

$$t_n = 4,7^\circ, Q = 11 \text{ кал};$$

$$t_n = -0,5^\circ, Q = 23,2 \text{ кал};$$

$$t_n = +0,1^\circ, Q = 50,9 \text{ кал}$$

$$\text{В среднем } Q = \frac{11 + 23,2 + 50,9}{3} = 31,7 \text{ кал, } \Delta t = 4,2^\circ.$$

Из предыдущего видно, что у сплошного пола в здании обычной ширины теплопотери и разность температур Δt близ наружных стен превосходят почти в три раза аналогичные величины для середины здания, выходя при этом из допустимых гигиеной пределов.

Определяя приведенным способом теплопотери Q также и для промежуточных пунктов пола, получим кривую, приведенную на нашем рис. 15 снизу, под полом. Она показывает, что уже после 4 метров расстояния от наружных стен теплопотери пола почти выравниваются и при взятых размерах здания и взятом расположении пола может быть принята в среднем в 10 кал на м^2 при разности температур $\Delta t = \text{ок. } 1,5^\circ$, тогда как в полосе первых двух метров от

наружной стены она колеблется от 15 до 32 кал., а в следующей двухметровой полосе — от 15 до 10 кал с соответственным значением разности Δt .

Данные эти находят себе подтверждение в тех нормах теплотери полами, которые применяются германской отопительной техникой и основаны на практических измерениях температур пола, следовательно, разностей Δt . Так, в расчетах теплотерья в Германии обычно принимают для „сплошного“ пола коэффициент теплопередачи k в 1,4, а среднюю температуру почвы под полом в $+7^\circ$, т. е. принимают среднюю теплотерю для всего пола в $(20 - 7) \cdot 1,4 = 18,2$ кал что довольно близко, к средней из найденных нами величин для отдельных полос. И у нас при пересмотре норм для отопления в специальной комиссии В. А. И. в 1927/8 г.г. были приняты следующие нормы теплотери сплошными полами: 20 кал для первой полосы шириною в 2 м, 10 кал для следующей и 5 кал для прочих. Последняя величина, как сейчас увидим, наиболее подходит для зданий большой ширины.

Действительно, если возьмем очень обширное здание промышленного типа (гараж, прокатную мастерскую и т. п.) с шириной $2X = 48$ м, то при том же расположении пола и по тем же уравнениям получим:

Для середины здания $Q = 3,5$ кал;

для точки n около наружной стены $Q = 29,3$ кал;

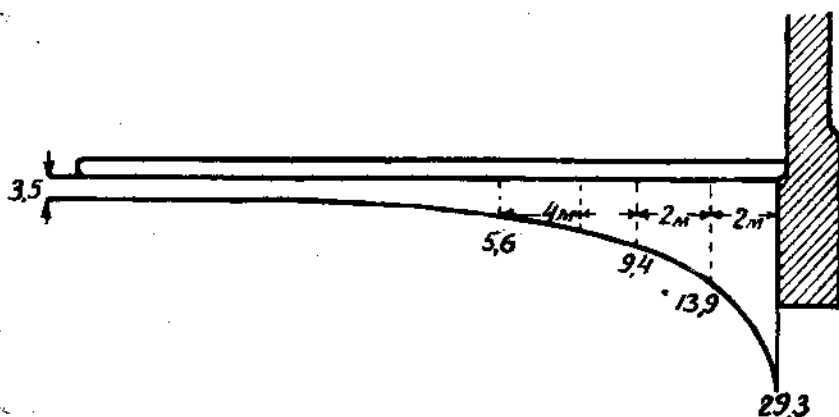


Рис. 16.

для промежуточных точек величина Q изменяется согласно кривой, представленной на рис. 16 снизу.

Из всего предыдущего можно сделать следующий вывод: В сплошных полах охлаждение сосредоточено главным образом в участках около наружных стен, при чем в зданиях обычной ширины (ок. 12 м) полоса пола вдоль наружных

стен шириною в 2 м имеет среднюю теплопотерю в 20 кал на м², следующая полоса — ок. 12,5 кал, а вся остальная площадь пола около 10 кал; в зданиях очень широких полоса пола в 2 м около наружных стен имеет ту же среднюю теплопотерю в 20 кал на м², следующая полоса той же ширины — в 10 кал, а остальная площадь пола — в среднем 5 кал на м² 1).

Сопоставим эти результаты с теми приемами учета теплопотери полами, какие применяются в практике. Так, проф. В. М. Чаплин рекомендует вводить в расчет, вместо поверхности пола, тепло-

потерю фундаментом — а именно, полную теплопотерю надземной его части под полом и 0,5—0,6 от полной теплопотери для части его, погруженной в почву одной стороной и выходящей в подполье или подвал другой (см. рис. 17 и 18). При этом охлаждаемая часть пола определяется им путем проведения прямой *CD* под углом в 45° от точки *C*, соответствующей глубине промерзания почвы (рис. 17); точка *D* пересечения ее с поверхностью пола и определяет границу остывающей части пола, а *AC* — охлаждающую часть фундамента.

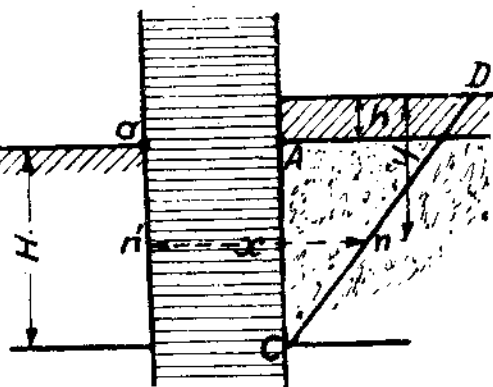


Рис. 17.

Прилагая такой способ учета к рассмотренным выше примерам полов, мы получили бы теплопотерю их на 1 пог м холодного периметра равную $k(T_a - T_n) 0,25 + 0,6k(T_a - T_n) \cdot 1 = 0,9 \cdot 50 \cdot 0,25 + 0,6 \cdot 0,9 \cdot 50 = 38,3$ кал. Равным образом вычисленные нами выше теплопотери составили бы для малого здания на 1 пог м периметра $20 + 12 + 10 \frac{1,25}{2} = 38,3$ к, т. е. получаем ту же самую величину. Но распределение этой теплопотери по поверхности пола в практическом приеме далеко не соответствует данным наших вычислений: в то время как первый учитывал бы (при распределении общей

1) В действительности все рассматриваемые величины по участкам пола несколько выравниваются между собою в порядке внутренней теплопроводности пола и почвы в горизонтальных направлениях; но это выравнивание далеко не полное, не говоря уже о том, что оно не отражается на общей величине теплопотери пола.

теплопотери между отдельными комнатами) лишь полосу пола шириною всего в 1,25 м, в более точном расчете весь пол оказывается подверженным теплопотере, и даже на расстоянии 4 м от наружных стен его охлаждение все еще

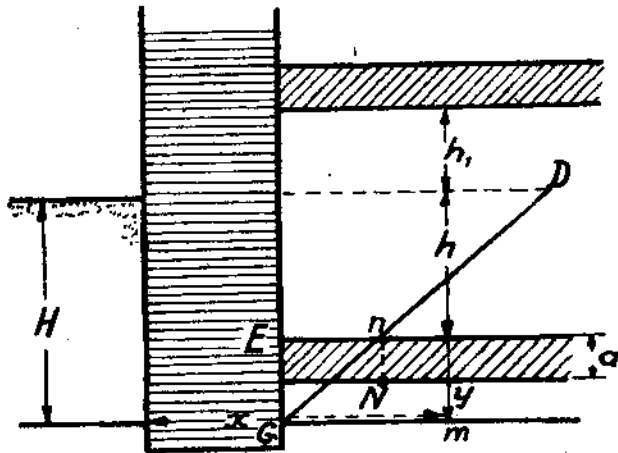


Рис. 18.

значительно. Таким образом указанный практический прием довольно правильно учитывает количество теплопотери, но весьма несовершенно представляет распределение ее, концентрируя все количество на узкой полосе холодного периметра пола.

Изложенный метод расчета применим и к полам с подпольем. Здесь в числе тепловых сопротивлений, входящих в выражение для k , имеется воздушный прослойка.

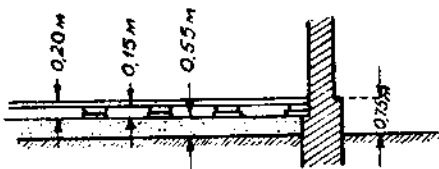


Рис. 19.

Благодаря приведенным выше таблицам Хенки и Вирца это сопротивление определяется весьма легко. Кроме того, воздух прослойка оказывает весьма сильное вы-

равнивающее действие на температуру в подполье, придавая ей некоторые средние значения.

Возьмем в качестве примера пол на лагах, представленный на рис. 19. Для него по уравнению (t_N) имеем при $h = 0,75$ м и при прежних значениях других букв:

$$t_N = \frac{120k - 60 + 60(y - 0,75)}{3 + 6k}$$

При $y = 1,25$ м и при обычной величине теплопроводности $\left(\frac{\lambda_1}{X_1}\right)$ для деревянного настила в 2,5 кал, а для воздушного горизонтального прослойка шир. 0,15 м в 4 кал, имеем:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{1}{2,5} + \frac{1}{4} + \frac{y - 0,20}{1}} = 0,55 \quad \text{и } t_N = 5,7^\circ, Q = 7,9 \text{ кал.}$$

Дополняя найденные величины аналогичными другими, получим следующую таблицу для величин t_N и Q_N , а также t_n и Q_n около холодного периметра пола:

$y =$		t	Q	t_n	Q_n
1,25	0,55	5,7°	7,9	-4,3°	13,4
0,75	0,75	4,0°	12,0	-10,3°	22,7
0,25	1,2	8,2°	14,2	-13,4	40,1
В среднем:	—	—	11,4	—	25,4

В виду выравнивающего действия воздушного прослойка различие Q_N и Q_n здесь не сохранится и будет иметь место величина Q , близкая к $\frac{Q_N + Q_n}{2} = 18,4$ кал, которой соответствует $\Delta t = \approx 2,5^\circ$.

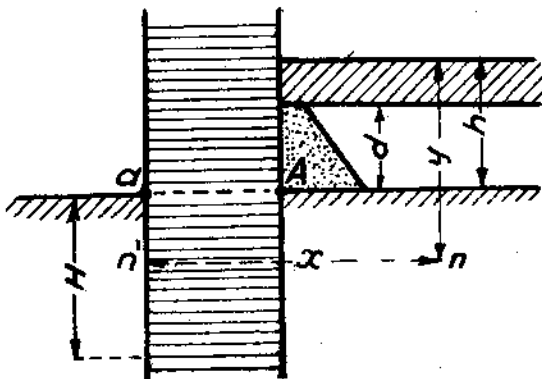


Рис. 20.

Если теперь возьмем обыкновенное наше подполье (рис. 20) высотой в 0,5 м с более теплой конструкцией двойного пола толщиной 0,25 м, то в предыдущем расчете

изменится величина k . Приняв внутреннюю теплопроницаемость двойного пола в 0,7, получим результаты, сведенные в следующей таблице:

y	k	t_N	Q_N	t_n	Q_n
1,75	0,36	8,4°	4,2	2,8°	6,2
1,25	0,44	4,0°	7,0	5,2°	11,1
0,75	0,56	1,1°	10,6	12,3°	18,1
В среднем	—	—	7,3	—	11,8

Взяв снова среднюю теплопотерю пола (выравненную в известной мере воздухом подполья), получим

$$Q = \frac{7,3 + 11,8}{2} = 9,5 \text{ кал.}$$

При коэффициенте общей теплопередачи пола $k = 0,6$ (что соответствует его внутренней теплопроницаемости 0,7), имеем среднюю температуру подполья t_x из уравнения:

$$k(T_s - t_x) = 9,5,$$

откуда

$$t_x = 4,2°.$$

Но мы при этом не учли еще охлаждения цокольной стенкой подполья, которая в данном случае уже имеет некоторое значение по своим размерам. Однако при сколько-нибудь значительной высоте этих стенок их обычно прикрывают завалинами в виде откосов сухой земли, шлака или строительной мелочи (рис. 20), чем снова уменьшается теплопередача этими стенками. Так как, кроме того, обычно и снаружи к ним прилегает зимой снег, то в конце концов непосредственное охлаждение подполья этими стенками имеет весьма мало значения сравнительно с его охлаждением от всей прилегающей к нему и подстилающей его холодной почвы.

Вышеприведенные вычисления показывают, что практическое предположение проф. Павловского принимать среднюю температуру подполья в $+4° \text{ Ц.}$ в общем дает достаточно правильную оценку действительного положения дела, а предположение проф. В. М. Чаплина рассчитывать теплопотерю полов на разность температур в 0,6 от максимальной $T_s - T_n$ равносильно предположению более низкой температуры ¹⁾.

¹⁾ Само собой разумеется, что это заключение относится только к случаям обычной высоты подполья и обычного коэффициента теплопередачи полов, как это было принято в наших числовых примерах.

Если возьмем случай полов, погруженных в почву (т.-е. полов отапливаемого подвального этажа см. рис. 18), то и к их тепловому расчету применимы наши формулы (t_N) и (t_n); надо только в них заменить величину h на $-h$. Определим, например, теплопотерю полом подвала, углубленным в почву на 0,75 м. По уравнению (t_N) при $X=6$, $\lambda=1$, $H=1$ и $h=-0,75$ получим:

$$t_N = \frac{120k - 60 + 60(y + 0,75)}{3 + 6k}$$

При $y=0,25$ будем иметь $k = \frac{1}{0,14 + \frac{0,25}{1}} = 2,6$ k $t_N =$

$16,7^\circ$ и $Q = 3,3 \cdot 2,6 = 8,6$ кал.

По уравнению (t_n) получим для крайней точки пола:

$$t_n = \frac{15k + 0,14t_N - 40 + 40(y + 0,75)}{2,14 + 0,75k}$$

При $y=0,25$ и $k=2,6$ $t_n = 10,1^\circ$ и $Q = 9,9 \cdot 2,6 = 25,7$.

Сличая это с аналогичными величинами Q для надземного сплошного пола (рис. 15), видим, что теплопотери в настоящем случае снижены против него приблизительно на 20%, и если там мы полагали ее в среднем равной 20 кал на крайней двухметровой полосе, то здесь надо считать ее около 15—16 кал.

Заметим здесь же, что теплопотеря подземной части наружной стены данного подвала составляет около 0,6 от нормальной расчетной, так как к этой стене снаружи примыкает среда с температурой от 0° до -20° , в среднем -10° и, следовательно, расчетная разность температур составляет 30° , вместо 50° . Таким образом стены подвала дают теплопотерю на первом m своей глубины $Q = k \cdot 30 = 0,9 \cdot 30 = 27$ кал, и рассмотренный выше пол с его теплопотерей в начальной точке в 25,7 кал и с дальнейшим уменьшением по кривой, аналогичной с найденными выше (рис. 15 и 16), представляет в теплотехническом отношении как бы продолжение конструкции стены. Это позволяет применять к обоим этим ограждениям те же практические приемы учета теплопотерь, какие были выведены ранее для надземных полов, т.-е. считать стены подвала как бы началом пола и к обоим ограждениям в совокупности применять учет теплопотери по полосам: 20 кал для первой двухметровой полосы (в которую входит в данном случае стена и часть пола), затем для следующей двухметровой полосы пола 12 или 10 кал, смотря по ширине здания, и т. д.

Однако необходимо заметить, что данный способ расчета теплопотерь полами подвального помещения применим только

при глубине их до линии промерзания почвы, т.-е. до того уровня, для которого мы сделали выше некоторые упрощенные предположения относительно распределения в почве ее зимних температур. Продолжать это предположение для дальнейших слоев почвы в глубину ее невозможно, так как действительное повышение температур за линией промерзания идет гораздо медленнее, чем это вытекало бы из пропорциональности глубинам (т.-е. на основании взятой нами диаграммы в виде наклонной прямой). Так как действительная кривая почвенных температур не только сложна математически, но и крайне неустойчива в течение зимы, то здесь были бы необходимы некоторые новые упрощающие предположения. Мы рекомендовали бы применять в отношении таких помещений прием учета, указанный нами для подвалов (см. ч. III гл. 2), а еще лучше следовать данным ближайших метеорологических наблюдений.

В предыдущем вопросе был рассмотрен только в отношении зданий бесконечной длины. Но тот же метод применим и к другим случаям. Так, если взять здание квадратной формы, то получим для t_N уравнение:

$$5 \left[t_N - t_n + \frac{t_n}{H} (y - h) \right] \frac{\lambda}{X} = k(T_a - t_N),$$

откуда

$$t_N = \frac{T_a \cdot X \cdot k + 5 t_n \lambda - \frac{5 t_n \lambda}{H} (y - h)}{5 \lambda + X \cdot k}.$$

Исчисленное таким образом значение t_N (меньшее, чем в приведенном выше первом примере) должно быть внесено в уравнение (t_n), и в нем оно окажет понижающее влияние на величину t_n и повышающее на Q_n .

Действительно, приняв здание, разрез которого представлен на рис. 15, в форме квадратного плана, получим:

$$t_N = \frac{120k - 100 + 100(y - h)}{5 + 6k}.$$

По этому выражению и по формуле для t_n получим следующие данные для тех же общих заданий, какие были в нашем первом примере:

$y =$	k	t_N	Q_N	t_n	Q_n
1,25	0,72	9°	7,9	4,5°	11,2
0,75	1,13	7,3°	14,4	-0,67	23,4
0,25	2,56	10,1°	25,3	0	51,2
В среднем	—	—	15,9	—	—

Сопоставляя эту таблицу с выводами первого примера, видим, что охлаждение краевых частей пола в квадратном здании усилилось незначительно в сравнении с длинным зданием, но середина его охлаждается значительно сильнее (на 40—45%), что ведет к общему повышению теплопотери полами процентов на 25.

Наконец, по тем же методам расчетов, связанным с установившимся движением теплоты (т.е. с принципом равенства прихода и расхода теплоты в наблюдаемом объекте), определяются температуры помещений, не имеющих собственных внутренних источников обогрева, но зависящих в этом отношении исключительно от соседства с отопляемыми помещениями. В планировках жилых домов случаются иногда помещения таких назначений, что они должны иметь пониженную температуру, но в то же время не спускающуюся ниже известных пределов — и притом равномерную, без резких колебаний, связанных с отоплением. То и другое достигается расположением таких помещений в соседстве с отопляемыми, но без проведения в них отопительных приборов; прогревание их чрез ограждения будет, естественно, достаточно слабым, а происходящая при этом аккумуляция теплоты передающими ее ограждениями обеспечивает большую равномерность температуры.

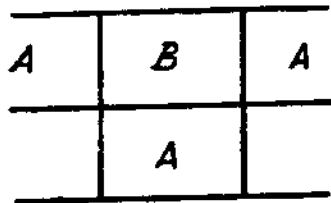


Рис. 21.

Расчет получаемой при этом минимальной температуры можно производить следующим образом. Пусть, например, между отопляемыми помещениями А (рис. 21) с гарантированной температурой T_0 при низшей наружной температуре T_n имеется помещение В, обогреваемое соседними. Его температуру t_x определим, очевидно, из уравнения, выражающего равенство прихода и расхода теплоты у помещения В, т.е.

$$\Sigma F \cdot k (T_0 - t_x) = \Sigma F_1 k_1 (t_x - T_n),$$

откуда

$$t_x = \frac{\Sigma F \cdot k \cdot T_0 + \Sigma F_1 k_1 T_n}{\Sigma F \cdot k + \Sigma F_1 \cdot k_1}.$$

Здесь F и k суть площади теплопотерь и общие коэффициенты теплопередачи для ограждений помещения В от соседних, а F_1 и k_1 — аналогичные величины для внешних (холодных) ограждений помещения В.

По тому же общему принципу установившегося теплового движения (равенства прихода и расхода теплоты)

производится расчет необходимых коэффициентов общей теплопередачи k для помещений неотапливаемых, но имеющих некоторые иные внутренние источники теплоты. Так в некоторых заводских зданиях (например, мельницах, лесопильнях) теплота, выделяемая машинами и людьми, является обычно единственным средством их согревания. Поскольку при этом все же ставятся известные температурные минимумы для внутреннего помещения (например, 0°), ограждения последнего должны быть проверены на теплопередачу, предполагая известное количество часового тепловыделения машин и людей¹⁾. Обозначив это количество чрез Q , имеем общее уравнение для теплового баланса помещения:

$$\Sigma F \cdot k \cdot (T_g - T_n) = Q.$$

Здесь левая часть представляет сумму теплопередач по всем основным ограждениям помещения (стенам, полам, потолкам, окнам и дверям) со свойственными им величинами k , F а также T_n . Если известно Q и заданы T_g и T_n , а требуется найти k для одного из важнейших ограждений (стен), то, выбрав величины k для остальных ограждений, найдем из уравнения искомое k для главного ограждения, на основании чего определяем и его конструкцию в теплотехническом отношении.

К помещениям той же категории относятся наши обычные чердачные пространства. Определим, какие температуры обычно создаются здесь при установившемся тепловом состоянии этой зоны. Не нуждаясь в большой точности этого определения, предположим, что каждое пространство чердака, соответствующее одному кв. метру потолочного перекрытия (параллелепипед с основанием в 1 кв м потолка и до кровли), имеет теплоотдающую поверхность также в 1 кв м²). Обозначим температуру чердака (среднюю) чрез t_x , коэффициент общей теплопередачи потолка чрез k_1 и кровли чрез k_2 . При обычных расчетных температурах — для помещения в $+20^\circ$ и наружной в -30° , имеем уравнение для определения t_x :

$$k_1(20 - t_x) = k_2(t_x + 30) \dots \dots \dots (a).$$

Посмотрим, что это дает нам при разных кровлях и при $k_1 = 0,64$ для потолка (см. черт. 63).

При железной кровле по брускам в 5×5 см чрез 0,20 м центр от центра, игнорируя внутр. теплопроводность железа,

1) В среднем можно полагать тепловыделение в час на 1 рабочего 100 кал, а машин, претворяющих работу в теплоту, по 632 кал на 1 лош. силу.

2) Это и близко к истине, поскольку строительные ноги и брусья с очень малой теплопроводностью занимают собой около 10—15% поверхности под кровлей.

имеем следующие величины сопротивлений и теплопроводности. Сопротивление листового материала выражается только в сумме сопротивлений теплообмену между поверхностями и воздухом:

$$\frac{1}{k_{жс}} = \frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_n} = \infty 0,20; k_{жс} = 5.$$

Сопротивление бруска определится из выражения:

$$\frac{1}{k_6} = 0,20 + \frac{0,05}{0,14} = 0,56; k_6 = 1,8.$$

Теплопередача $k_{жс}$ имеет место на 75% площади, а k_6 — на 25%; поэтому эквивалентная средняя из них k_2 будет:

$$k_2 = 5 \cdot 0,75 + 1,8 \cdot 0,25 = 4,2.$$

Подставляя в общее уравнение (а) получим:

$$t_x = -23^\circ.$$

Если железная кровля покрыта снегом с толщиной слоя 0,20 м при плотности в 500 кг в куб м ($\lambda = 0,55$), то к предыдущему среднему термическому сопротивлению кровли $\frac{1}{4,2} = 0,24$ надо прибавить еще сопротивление слоя снега равное $\frac{0,20}{0,55} = 0,36$, что даст общее сопротивление 0,6

и общий коэффициент теплопередачи $k_2 = \frac{1}{0,6} = 1,67$. В таком случае уравнение (а) дает нам $t_x = -16^\circ$.

Как видим, обе величины в среднем достаточно подходят к температуре, обычно предполагаемой для чердаков при наших расчетах теплотеря, а именно, -20° .

Как противоположность железной кровле, возьмем соломенную толщиной 0,3 м при $\lambda = 0,10$. Для нее, при отсутствии снегового покрова имеем:

$$\frac{1}{k_2} = 0,20 + \frac{0,30}{0,10},$$

откуда

$$k_2 = 0,31.$$

Тогда из уравнения (а) получим $t_x = +3,7^\circ$. При снеговом покрове 0,20 м $t_x = 4,8^\circ$.

Конечно, наличие неплотностей и неисправных слуховых окон может сильно изменить тепловой режим этого чердачного помещения, тогда как в первых случаях это не играло бы большой роли.

Кровли из других материалов дают температуры чердака средние между найденными выше для двух кровель, противоположных между собою в теплотехническом отношении.

В обычной практике расчета теплотерь, кроме исчислений согласно изложенных в главах 1 и 2 данных, принимают еще ряд практических надбавок. Таковыми являются:

1. Надбавка на ориентацию стен по странам света:

- а) на сев. и с. вост. 10%
- б) вост. и с. зап. 8%
- в) зап. и ю. в. 5%

2. Надбавка на подветренные стороны (против господствующих зимних ветров) для стен, обращенных на открытые площади > 40 м 10%

3. Надбавка на высоту помещений более 4 м — по 2% на каждый излишний метр высоты (но всего не более 15%), если способом вентиляции не предусмотрено устранение разности температур в верхней и нижней зоне помещения.

4. Надбавка для помещений, имеющих противоположные продольные наружные стены с окнами (на усиленную естественную вентиляцию) 5%

5. Надбавка теплотери в нижнем этаже многоэтажных зданий на утечку через перекрытия (см. ч. III, гл. 2) 5%

- при нежилом 1-м этаже и жилым верхнем: в 1-м 10%
- во 2-м 5%

В таблице IX приложения дан образец ведомости для учета теплотерь в здании при проектировании центрального отопления.

Интересный пример практического испытания общей теплотери зданий представляют опыты, произведенные в 1921/22 году при Норвежской Высшей Технической Школе. Было выстроено 27 малых опытных домиков (2,0 × 2,0 м) с тождественными конструкциями всех частей за исключением стен, каковые имели разные конструкции (приведенные ниже). Домики отапливались одновременно одинаковыми электрическими печами так, что в них поддерживалась одинаковая средняя температура. Учитывая затем различный расход электрической энергии (переведенной на тепловую), определяли практическую теплотерю каждого здания. Различия между ними вызывались, очевидно, только различием в конструкции стен. Выделив затем путем теоретического расчета долю всех остальных частей в общей теплотере, получали абсолютные величины теплотерь через стены разных систем. Данные этого рода сведены в нижеследующей таблице, в дополнение же к ней на рис. 22 приведены конструкции примененных стенок под соответствующими номерами.

форм I
 форм II
 форм III
 форм IV
 форм V
 форм VI
 форм VII
 форм VIII
 форм IX
 форм X
 форм XI
 форм XII
 форм XIII
 форм XIV
 форм XV
 форм XVI
 форм XVII
 форм XVIII
 форм XIX
 форм XX
 форм XXI
 форм XXII
 форм XXIII
 форм XXIV

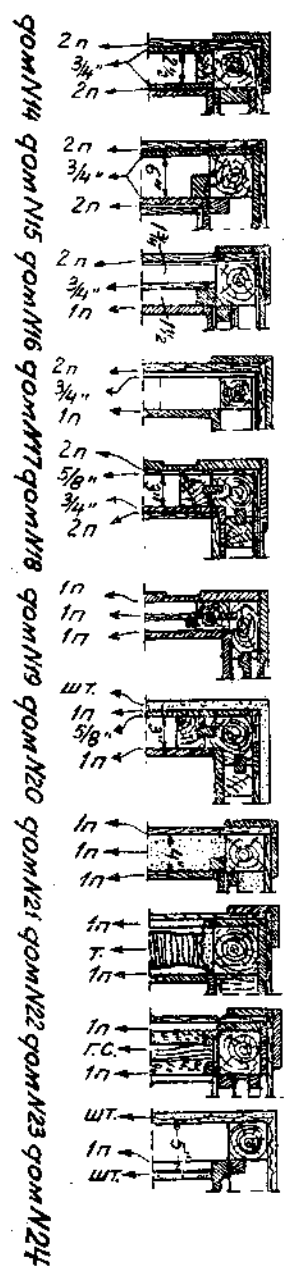


Рис. 22.

№№ домиков	Коэфф. общей теплопередачи k по сравнительному учету.	Коэфф. общей теплопередачи по измеренно приборам.	Величины $\frac{1}{\alpha_b} + \frac{1}{\alpha_k} = \frac{1}{7} + \frac{1}{15}$.	Сопротивление пустотелого про- слойка.	Коэффициент λ_1 во внешней стенке.	Коэффициент λ_2 во внутренней стенке.	Средняя теплопроводность со вклю- чением воздушных каналов (λ_m)	Сопротивление внешней стенки $\frac{d_1}{\lambda_1}$.	Сопротивление внутренней стенки $\frac{d_2}{\lambda_2}$.	Сопротивление пустотелого камня со включением воздушн. каналов.	Сопротивление слоя кокса в 5 см.	Общее сопротивление $\frac{1}{k_1}$.	Исчисленный коэффициент общей теплопередачи.
1	0,51	—	0,21	—	0,8	—	—	0,45	—	—	—	0,66	1,52
2	1,39	1,42	0,21	0,15	0,75	0,6	—	0,154	0,183	—	—	0,70	1,43
3	1,43	—	0,21	0,15	0,75	0,6	—	0,154	0,183	—	—	0,70	1,43
4	1,24	—	0,21	0,15	0,9	0,75	—	0,128	0,313	—	—	0,80	1,25
5	1,29	—	0,21	0,15	0,9	0,70	—	0,255	0,157	—	—	0,77	1,30
6	1,22	1,25	0,21	0,15	0,85	0,65	—	0,27	0,185	—	—	0,815	1,23
7	1,42	—	0,21	0,15	0,75	0,6	—	0,154	0,2	—	—	0,714	1,40
7a	1,19	—	0,21	—	0,75	0,6	—	0,154	0,2	—	0,28	0,844	1,19
8	1,62	1,58	0,21	—	—	—	0,5	—	—	0,42	—	0,63	1,58
9	1,45	—	0,21	—	—	—	0,5	—	—	0,48	—	0,69	1,45
10	1,81	1,81	0,21	—	1,2	0,28	—	0,11	0,23	—	—	0,55	1,82
11	1,21	—	0,21	—	0,9	0,31	—	0,28	0,35	—	—	0,84	1,19
25	1,60	—	0,21	0,15	1,2	0,85	—	0,11	0,15	—	—	0,62	1,61

№ домиков.	Коэффициент общей теплопередачи k по сравнительному учету.	Коефф. общей теплопередачи k по измерению приборами.	Сопротивление $\frac{d}{0,16}$ всех слоев дерева.	Сопротивление $\frac{d_2}{\lambda_2}$ заполнителей, штукаурки и т. п.	Сопротивление $\frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{7} + \frac{1}{13}$.	Сопротивление μ_1 шт. воздушных полостей = 0,2 μ_1 .	Сопротивление μ_2 шт. свободных стывков = 0,1 $\cdot \mu_2$.	Сопротивление μ_3 шт. плотных стывков.	Общее численное сопротивление $\frac{1}{k_1}$.	Исчисленный коэффициент общей теплопередачи k_1 .
12	0,77	—	0,36	—	0,21	0,4	0,2	—	1,17	0,85
13	0,68	0,65	0,75	—	0,21	0,4	0,2	—	1,56	0,64
14	0,84	—	0,51	—	0,21	0,2	—	0,3	1,22	0,82
15	0,79	—	0,51	—	0,21	0,2	—	0,3	1,22	0,82
16	0,76	—	0,40	—	0,21	0,4	0,3	—	1,31	0,76
17	0,95	0,95	0,40	—	0,21	0,2	0,1	0,15	1,06	0,94
18	0,96	—	0,44	—	0,21	0,2	—	0,3	1,15	0,87
19	0,83	—	0,30	—	0,21	0,4	0,3	—	1,21	0,83
20	1,11	—	0,22	0,03	0,21	0,2	0,1	0,1	0,86	1,16
21	0,65	—	0,27	0,91	0,21	—	—	0,2	1,59	0,63
22	0,73	—	0,27	0,40	0,21	0,2	0,3	—	1,38	0,72
23	0,87	—	0,27	0,18	0,21	0,2	0,3	—	1,16	0,86
24	1,40	—	—	0,07	0,21	0,4	—	—	0,68	1,47
26	0,88	—	0,42	—	0,21	0,4	—	—	1,03	0,94
27	0,77	—	0,48	—	0,21	0,4	0,2	—	1,29	0,77

Глава 3. Теплотери ограждений чрез естественную вентиляцию и от конденсации в них водяных паров.

Ограждения постройки обычно являются пористыми в большей или меньшей степени, а потому и газопроницаемыми. Для теплового режима помещений и для их санитарного состояния наибольшее значение имеет проникание чрез ограждения, во-первых, воздуха, а затем и водяных паров; мы увидим ниже, что два этих процесса совершенно не равнозначны между собою в качественном отношении и следовательно, совершенно различны по своему тепловому и санитарному значению.

Воздухопроницаемость ¹⁾. В тепловом отношении воздухопроницаемость дает некоторую добавочную теплотерю, а в санитарном отношении — некоторую вентиляцию внутренних помещений. Однако, поскольку идет речь о естественной пористости наших обычных ограждений, а не о щелях и вообще местных дефектах их выполнения, обе указанные величины обычно очень невелики. Та и другая зависят от количества воздуха в литрах, протекающего чрез ограждение в 1 час. По произведенным исследованиям (главным образом Ланг'а), эта величина, которую обозначим чрез l , пропорциональна площади ограждения (F) и разности давления (Δp) по ту и другую его сторону; таким образом имеем

$$l = \beta \cdot F \cdot \Delta p \dots \dots \dots (l).$$

Здесь β — коэффициент пропорциональности — есть в то же время коэффициент воздухопроницаемости данной конструкции ограждения, т. е. обозначает количество воздуха в литрах, передаваемое в 1 час чрез 1 кв м данного ограждения при разности давлений с обеих сторон в 1 мм водяного столба (аналогично величине коэффициента внутренней теплопроницаемости в предыдущих главах). В свою очередь этот коэффициент зависит, с одной стороны, от свойств материала ограждения, а с другой он обратно пропорционален его толщине. Обозначим чрез γ коэффициент воздухопроницаемости материала, т. е. количество воздуха в литрах, проходящее в 1 час чрез 1 кв м стенки из этого материала толщиной в 1,0 м и при разности давлений в 1 мм; тогда имеем:

$$\beta = \frac{\gamma}{X},$$

¹⁾ Этот вопрос еще сравнительно слабо разработан; мы следуем здесь теории К. Хенки, который впервые выступил с некоторой систематической теорией расчетов этого рода. Однако, эта система подвергается сомнению некоторыми исследователями.

где X — есть толщина ограждения в м. Если ограждение составлено из нескольких материальных слоев с соответствующими величинами $\gamma_1, \gamma_2 \dots X_1, X_2 \dots$, то аналогично выводам предыдущих глав имеем:

$$\beta = \frac{1}{\frac{X_1}{\gamma_1} + \frac{X_2}{\gamma_2} + \dots}$$

Величины коэффициентов γ для некоторых материалов даны в таблице X, где материалы предположены в совершенно сухом состоянии. В таблице X A приведены данные Ланг'а, отнесенные к 1 мм вод. столба, в таблице X Б и В подобные же данные в других измерениях. При пользовании первой таблицей можно использовать две других, беря из них относительные величины коэффициентов γ для разных материалов. При наличии влажности воздухопроводность материалов сильно уменьшается. Так, по опытам Ланг'а, после 48-часового пропитывания водой воздухопроницаемость составляла в % от первоначальной величины для сухого состояния:

у пористых известняков (туфов)	∞ 50%
у обычных кирпичей	15—20%
у раствора	7%
у бетона и портл.-цемента	0.

Из этого видно, что падение воздухопроницаемости от увлажнения тем сильнее, чем мельче зерна материала.

Для таких слоев ограждения, как окраска, обои и т. п., в силу их крайне незначительной и притом неопределенной толщины, опытами и вычислениями определяются обычно величины не для γ , а прямо для β . Так, Хенки на основании опытов Ланг'а нашел следующие примерные величины β :

Для известковой окраски	$\beta = \infty$ 4
„ клеевой за 2 раза окраски	∞ 1,5
„ масляной	0
„ жидкого стекла	0
„ обоев	0,4—0,5
то же на клею	0,3.

Для определения величины l в формуле (1) надо еще знать величину Δp . Разность давления в комнатном и наружном воздухе, как известно, различна по величине, а обычно также и по знаку, для разных высот внутреннего помещения: сверху его она обычно положительная в пользу внутреннего воздуха, внизу — отрицательная, а на некоторой средней высоте (нейтральной зоне) равна 0. Эти соотношения наглядно демонстрируются тем фактом, что при пробивке на указанных высотах трех одинаковых отверстий мы получим чрез нижнее из них преимущественно приток холодного наружного воздуха, чрез верхнее — выход внутреннего, а в среднем сечении два одинаковых течения в ту

и другую сторону ¹⁾. При указанном распределении давлений абсолютная величина их разностей зависит от разности температур наружного и внутреннего воздуха или, что то же, от разности их удельного веса при их температурах. Предположив нейтральную зону посредине высоты помещения h м и назвав чрез s_1 и s_2 удельные веса воздуха в кг на 1 куб м или в мм водяного столба при наружной и внутренней температуре, мы получим среднюю разность давлений для ограждения, лежащего ниже или выше нейтральной зоны:

$$\Delta p = \frac{h}{4} (s_1 - s_2) \dots \dots \dots (\Delta p).$$

Величины s_1 и s_2 берутся по соответствующим таблицам физики (или из руководств по отоплению и вентиляции, напр. Ритчель — Брамбе).

Но разность давлений создается не только разностью температур. Другой причиной ее может быть действие ветра на наружную поверхность ограждений; так, при перпендикулярном направлении ветра получают давления:

	При скорости ветра в метр./сек.:					
	1	2	3	5	10	15
Давление в мм водян. столба	0,07	0,29	0,65	1,8	7,3	16,4

В обычных условиях обе причины разности давлений — температуры и ветер, дают весьма небольшие величины — 0,5—1,0 мм вод. столба обе вместе.

Возвратившись теперь к формуле (1), увидим, что воздухообмен V , исчисляемый по величинам $\beta = \frac{V}{X}$ на основании таблицы X и по разностям давлений Δp , также составляет весьма незначительную величину; для нашей обычной стены в $2\frac{1}{2}$ кирпича это составляет примерно около 3—4 литров на 1 кв м в час, да и то лишь при отсутствии таких сопротивлений для воздухопроницаемости, как обои, масляная или клеевая окраска.

Легко видеть, что такой обмен воздуха не имеет почти никакого санитарного значения в обычных случаях практики каменного строительства. На 1 кв м ограждений в наших

¹⁾ Это — при отсутствии других отверстий, в практически замкнутом помещении; при наличии искусственной вентиляции, при топке печей и т. п. соотношения изменяются — часто настолько, что все наружные ограждения имеют перевес давления с холодной стороны и дают приток воздуха.

постройках приходится обычно от 1 до 3 куб м (1000—3000 литров) воздуха, а нормы смены его не спускаются ниже однократного обмена его в 1 час. Из этого видно, что естественная вентиляция через кирпичную стену составляет в общем менее 0,5% от нормальной вентиляции.

Соответственно этому незначительна и связанная с этим тепловая потеря; она определяется по формуле:

$$Q = \frac{3}{1000} \Delta p \cdot F \cdot s_1 \cdot c (T_a - T_n) \dots \dots (\beta),$$

где c есть теплоемкость 1 куб м воздуха ($c = 0,3$); в среднем это дает для стены в 2½ кирпича менее 1 кал на 1 кв м в час при расчетной разности температур у нас в 50°, когда общая теплопередача составляет около 45 кал.

Но эта величина теплопотери через воздухопроницаемость значительно возрастает для пустотелых каменных стен, а также для пустотелых деревянных, хотя достаточных экспериментальных данных по этому вопросу не имеется. Еще большее значение имеют для действительных размеров естественной вентиляции разного рода неплотности ограждений, особенно у окон и наружных дверей, а в срубных постройках — в пазах; даже при отсутствии каких-либо экспериментальных данных можно с уверенностью сказать, что эти последние обмены и связанные с ними теплопотери в несколько раз превышают вентиляцию через самый материал ограждений. Однако, более точные определения невозможны здесь по самому существу дела (зависящего от практического качества работ). По этим соображениям и в виду общей незначительности теплопотерь этого рода последние не учитываются в практике — тем более, что одна из причин их — действие ветра — учитывается особо в виде надбавок на подверженные ему ограждения.

Проницаемость для паров и их конденсация. Разность температур и давлений по обе стороны от строительного ограждения, которая создает обмен воздуха через него, вызывает и движение в том же направлении водяных паров, примешанных к воздуху; но это последнее движение в общем энергичнее первого и имеет часто более важные теплотехнические и санитарные последствия.

Обмен отдельных газов по ту и другую сторону от ограждения пропорционально разности создающихся в этих двух зонах парциальных давлений газа.

В данном случае это означает, что обмен паров через строительные ограждения пропорционален разности их парциальных давлений во внутреннем и наружном воздухе — точнее, в смеси его с парами. Но эти парциальные давления зависят в свою очередь от температур в двух рассматриваемых

зонах и от процента влажности их воздуха. Наибольшее значение эти различия получают при наших обычных расчетных температурах T_a и T_n , когда разность температур почти максимальна за весь годовой период, а проценты влажности двух зон различаются между собой не менее, чем в другие периоды года.

Величины парциальных давлений водяных паров в воздухе даются существующими таблицами физики для одинакового процента влажности воздуха, а именно — при его насыщении ¹⁾. Просматривая таблицы, легко видеть, что эти разности весьма близко соответствуют разностям содержания водяных паров в 1 куб м воздуха при его насыщении по таблице на стр. 41 в главе 1-ой.

В общем это соответствует и разности парциальных давлений самого воздуха в его смеси с парами в той и другой зоне, из чего вытекала бы равная интенсивности обмена чрез ограждение воздуха и паров. В действительности обмен паров более интенсивен, так как проницаемость многих строительных материалов для воздуха и для водяных паров совершенно различна: так, упомянутые выше жирные материалы, как масляные краски или смолистые слои (толь, обмазки), непроницаемые для воздуха, проницаемы в известной мере для паров.

Эти довольно быстрые и интенсивные потоки паров чрез строительное ограждение проходят обыкновенно без значительного влияния на них; однако, именно ими объясняется тот факт, что материалы этих ограждений никогда не бывают в совершенно сухом состоянии (см. табл. I), а их „нормальная“ влажность большей частью значительно превышает естественную норму для покрытого кровлей и непрерывно подогреваемого материала.

Весьма наглядным выражением этой особенности наружных ограждений является то, что в таблицах внутренней теплопроводности стен (см. табл. I) мы имеем для нашей обычной кирпичной кладки стен $\lambda = 0,70$ для наружной стены и $\lambda = 0,60$ для внутренней, хотя более высокая температура последней должна была бы, согласно той же табл. I, повысить ее коэффициент λ сравнительно с наружной стеной.

Это происходит оттого, что потоки водяных паров чрез конструкцию, охлаждаясь зимой при приближении к ее наружной поверхности, достигают пределов насыщения в сопутствующем воздухе (см. стр. 41) и частью конденсируются в материале. Так происходит зимой. Летом, когда внутренняя температура жилья бывает ниже наружной, пары наружного воздуха устремляются в сторону жилья (т.-е. в зону с пониженным парциальным давлением паров из

¹⁾ См. например физические таблицы в Hütte 1924 г. том I, стр. 506.

зоны повышенного давления) и, при надлежащей консистенции в сопутствующем воздухе, конденсируются в материале ограждения близ внутренней его поверхности.

Но в обычных условиях нашего строительства оба этих процесса не получают большого развития. Влага, оседающая зимой около наружной поверхности ограждения, непрерывно высыхает путем естественной вентиляции чрез поры материала — тем более, что холодный наружный воздух, проникающий в поры, имеет очень малое абсолютное содержание паров и, нагреваясь несколько в глубине материала, получает способность жадно воспринимать из него влагу, с которой и выходит обратно, уступая место новому такому же потоку. Это относится к зиме. С другой стороны, летом разность температур внутри и вне здания бывает обычно небольшой и потому вообще неспособна вызвать сколько-нибудь значительную конденсацию паров около внутренней поверхности ограждения.

Так обстоит дело, пока конструкция является обычной, т.-е. из однородного, в смысле газопроницаемости, материала (камня, дерева). Таблица I в приложении, в части „нормальных“ влажностей строительных материалов в 1—1,5% по объему, показывает результаты описанных процессов в этом обычном строительстве: это возвышение коэффициентов λ , а следовательно и k , на 25—50% против их величин при совершенно сухом состоянии материалов.

Но дело обстоит хуже, если ограждение неоднородно в отношении газопроницаемости, если в нем имеются слои с большим сопротивлением для этого процесса в среде слоев меньшего сопротивления. Когда первые расположены в холодных частях конструкции, опасных в смысле конденсации паров, то последняя и происходит обычно перед указанными повышенными сопротивлениями — например, зимой около слоя толя, покрывающего снаружи легкую деревянную, вообще газопроницаемую стену жилого здания, а летом — при внутреннем слое толя в холодильнике. Такой процесс влечет за собой ряд последствий:

1. Конструкция увлажняется в соответствующей части своей массы. В силу этого она получает больший коэффициент внутренней теплопроводности, чем это предполагалось при расчете; и так как он растет весьма сильно с повышением влажности материала, то указанное различие коэффициентов может быть очень велико и вызвать даже катастрофические условия для теплопроводности ограждения (промерзание).

2. При конденсации паров выделяется, как известно, скрытая теплота испарения. Это оказывает отрицательное влияние на тепловой режим таких помещений, в которых летом искусственно охраняется пониженная температура — холодильников, ледников, льдохранилищ, погребов, а отчасти

и в жилых помещениях. Ограждения таким образом не только увлажняются и становятся более теплопроводными, но и согреваются, повышая одновременно температуру ограждаемого помещения как раз в те сезоны, когда это нежелательно.

3. Осевшая в материале конструкции влага, не имея достаточного выхода путем испарения из-за того же сопротивления, которое вызвало ее образование, вызывает в органических частях материалов загнивание, разложение, оживление грибка и проч., что весьма быстро ускоряет разрушение постройки (особенно в дереве с помощью знаменитых домовых грибов *Merulius lacrimans* и *M. varotarius*).

Строительные материалы, представляющие большое сопротивление для паров и вызывающие при известном расположении столь отрицательные последствия, суть следующие. На первом месте стоят металлические листы (кровельное железо, цинк, свинец рольный). Затем этим же свойством обладает стекло и, повидимому, жидкое (фуксово) стекло. Далее идут такие смолистые и жирные материалы, как толь, рубероид, линолеум, масляная окраска, промасленная кровельная бумага и т. п. Они вообще уже гораздо более проницаемы для паров, находящихся в состоянии вполне газообразном, как это показали экспериментальные исследования при Вюрцбургском университете около 40 лет тому назад и позднейшие исследования проф. Нуссбаума. Однако в реальной обстановке строительных ограждений часто бывает такое положение, что проходящие через них пары, приближаясь к холодной части их и остывая, принимают перед конденсацией форму уже не газов в настоящем смысле слова, а „полужидкостей“, в виде взвешенных в воздухе мельчайших водяных частиц (тумана); для такой формы их, как и для жидкостей, указанные материалы непроницаемы. Поэтому можно вообще сказать, что они являются непроводниками для паров в холодных зонах ограждений и неполными проводниками—в теплых.

Однако, и отсутствие всех таких слоев в ограждении еще не гарантирует нас вполне от конденсации: по самому существу дела опасность заключается не столько в абсолютной величине сопротивления слоев току паров, сколько в относительных колебаниях—градиентах ее в разных слоях, обуславливающих относительное замедление, задержку паров и их остывание. Если, например, сделаем тонкую наружную кирпичную стену жилого здания в 1 кирпич и облицуем ее соломитом толщиной 7 см изнутри, то в такой стене, несмотря на ее достаточный коэффициент общей теплопередачи¹⁾, будет опасность конденсации паров

$$1) K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{0,25}{0,7} + \frac{0,07}{0,07}} = \infty 0,7, \text{ если } \lambda \text{ для кладки} = 0,7$$

и для соломита = 0,07 при норм. влажности.

в разделительной плоскости между кладкой и соломитом; это потому, что по одну сторону от указанной плоскости лежит материал с очень высокой воздухо- и паропроницаемостью, а по другую — с гораздо более низкой. Первый материал легко пропускает пары в большом количестве, а второй не успевает переводить их в достаточной мере наружу, в силу чего они сильно охлаждаются и конденсируются перед этим относительным препятствием.

Эта конденсация ведет, естественно, к падению парциального давления паров в данной части воздуха — к относительному вакууму в ней, что вызывает приток сюда новых паров с нормальным давлением и новую их конденсацию; получается таким образом нечто вроде автоматического накачивания паров к холодному сопротивлению и скопление здесь отлагающейся влаги.

Таким образом, для предотвращения конденсации важно, чтобы вообще в составе ограждения не было сильных сокращений паропроницаемости на пути движения паров, особенно же в холодной зоне ограждения.

Вторым немаловажным условием для уменьшения конденсации и вредных ее последствий является отсутствие в местах вероятного ее появления всякого рода гигроскопичных материалов, жадно воспринимающих влагу и передающих ее через себя далее в другие части ограждения. Таковы разного рода рыхлые материалы засыпок (особенно же торф), слои дерева. Осевшая в них влага широко распространяется и с трудом может высыхать даже при изменившихся условиях — не говоря уже о связанных с этим процессах загнивания, брожения и проч. Напротив, наличие в опасных местах лишь материалов, мало восприимчивых на влагу (твердый камень, железо и т. п.), или воздушных прослоек ограничивает ее распространение в конструкции и облегчает ее последующее удаление с поверхностей, где она скопляется в капельном виде. Практические выводы из рассмотренного выше общего положения сделаем отдельно по двум категориям гражданских сооружений с искусственной внутренней температурой: с одной стороны — жилым, или вообще с охраняемой повышенной температурой в зимнее время, с другой — холодильным, т. е. с охраняемой пониженной температурой в летнее время и часто — повышенной в зимнее.

В помещениях первого рода опасно расположение паронепроницаемых слоев главным образом около наружной поверхности (сравни приведенные выше примеры внешней толевой одежды деревянных стен и кирпичной обкладки соломитовых щитов), так как всякая задержка течения паров, идущих изнутри, в этой холодной зоне влечет за

собой их охлаждение и конденсацию. Для лета, когда эти помещения имеют более низкую температуру, чем наружная, становится опасным и расположение таких слоев близ внутренней поверхности; но, как было упомянуто, в силу небольших разностей температур, эта конденсация незначительна и при обычных условиях опасность от нее невелика.

Помимо указанных слоев, неблагоприятны в данном отношении и воздушные пустоты в ограждениях. Они, во-первых, представляют известное сопротивление для протекания паров своими двойными токами воздуха в перпендикулярном направлении к первому течению — а именно, по ограничивающим полость стенкам (конвекция); это перебивает и тормозит потоки паров. А затем пустоты всегда образуют одновременно температурные градиенты в виде значительной разности температур на двух своих стенках; к этим поверхностям, естественно, и приурочивается конденсация паров (особенно к более холодной из них).

Наиболее ясно сказываются такие дефекты в стенах с одной пустой полостью, где указанный градиент бывает особенно большим; такие конструкции всегда склонны к образованию внутри их сырости. При большем числе воздушных прослоек (рядов) в ограждении температурные градиенты в них, естественно, снижаются, разбиваясь на несколько рядов полостей; поэтому, с одной стороны, остывание протекающих паров происходит более медленно и более равномерно по всему сечению ограждения, а с другой, в полостях уменьшается скорость конвекции, внутренней циркуляции воздуха по поверхностям (из-за меньшей разности их температур), и создается меньшее препятствие для протекания паров. Поэтому последние конденсируются в таких конструкциях в меньшей мере, а главное — более равномерно по разным полостям, нигде не достигая большой степени увлажнения. По этой причине, например, постройки из бетонных пустотелых камней с несколькими рядами пустот менее склонны к сырости в стенах, чем с одним, двумя рядами. Если же пустоты заполнены каким-либо термоизоляционным порошком, то указанные выше градиенты температур и сопротивлений парам еще более сглаживаются, и такие стены приближаются в данном отношении к однородным.

Другой пример пустотелых конструкций имеем в облегченных деревянных постройках, так называемого, стандартного типа. В них, кроме воздушных пустот, имеются обычно и паронепроницаемые слои (точнее — слабые проводники водяных паров) — толь, рубероид и т. п. Но в конструкциях этого рода есть ряд обстоятельств, уменьшающих опасности конденсации в них паров: во-первых, множественность пустот — следовательно, снижение градиентов и внутренней

конвекции; затем обычное отсутствие рыхлых гигроскопичных засыпок, вместо которых имеются лишь воздушные пустоты; наконец, обычное наличие не одного слоя дурного паропроводника, а нескольких, расположенных близ той и другой поверхностей ограждения, в силу чего пары вообще мало проникают во внутрь такой конструкции¹⁾). Поэтому стены этого рода вообще не подвержены значительной внутренней сырости. Однако при неблагоприятных сочетаниях в составе и расположении строительных слоев могут оказаться явления конденсации; из сказанного выше нетрудно представить себе несколько примеров таких неблагоприятных комбинаций.

В помещениях второй категории, т.-е. с охраняемой летом пониженной температурой, а зимой — повышенной, очень опасным является прежде всего расположение паронепроницаемых слоев около внутренней поверхности ограждений, так как проникающие в массу ограждения пары наружного воздуха конденсируются внутри его перед расположенным здесь сопротивлением в холодной атмосфере около внутренней поверхности; падение парциального давления паров при этой конденсации вызывает новый приток их и новую конденсацию и т. д. Таким образом в ограждении накапливается атмосферная влага со всеми отрицательными последствиями этого процесса. Поскольку некоторая часть паров проходит чрез сопротивление во внутрь помещения, она конденсируется на внутренних поверхностях ограждений, выделяя в помещение скрытую теплоту этой конденсации.

Расположение тех же слоев близ внешней поверхности ограждений будет более благоприятным для летнего сезона, но зимой оно будет давать конденсацию паров внутреннего воздуха (всегда сырого в хранилищах) около указанных слоев, т.-е. опять же внутри конструкции ограждения. Расположение в середине конструкции будет, очевидно, иметь недостатки того и другого из предыдущих типов, но частично в ослабленной мере. Наконец, расположение паронепроницаемых слоев около обеих поверхностей ограждения будет более благоприятным, но лишь при условии, что применяемые при этом строительные материалы достаточно сухи. Однако, полный эффект этого расположения возможен лишь при полных непроводниках паров (металлах). Если же речь идет лишь о частичных непроводниках (толь и проч.), то симметричное их расположение не только не прекращает

¹⁾ Однако, в соответствии со сказанным выше о газопроницаемости смолистых полотниц и слоев, надо заметить, что те из них, которые расположены в более теплой части ограждения, гораздо более паропроницаемы, чем расположенные в холодной зоне, так как пары в первом случае могут оставаться еще полными газами, а не обращаться в „полужидкости“, как это бывает во втором.

вполне тока паров чрез ограждение, но даже и не выравнивает вполне их притока и выхода, так как в теплой части ограждения эти слои более паропроницаемы, чем в холодной.

Как и в отношении первой категории помещений, здесь имеют значение и относительные сопротивления проходу паров, в виде наличия слоев с резко отличающейся от других паропроницаемостью, например, воздушных пустот и твердых каменных слоев. Расположение всех подобных перепадов (градиентов) близ холодной зоны всегда влечет за собою большее или меньшее отсыревание частей конструкции, прилегающих к этим перепадам со стороны притока паров. Заполнение пустот рыхлыми термоизоляционными веществами дает при некоторых условиях благоприятные результаты, согласно изложенным выше мотивам. Но подобная же операция при паронепроницаемых слоях, а именно, засыпка порошков при них со стороны притока паров, повлечет за собою обратный результат, т.е. увеличит отрицательные проявления конденсации в виду выясненного выше значения этих гигроскопичных материалов в деле аккумуляции сырости и распространения ее на дальнейшие части ограждения.

Более конкретно эти вопросы трактуются нами в части III, главе I.

ЧАСТЬ II.

Переменное (неустановившееся) движение теплоты через строительные ограждения.

Глава I. Остывание и нагревание. Общее уравнение и метод Фурье.

Основное уравнение физики, приведенное в гл. 1 части I, под знаком (1), может быть выражено на языке высшей математики следующим образом:

$$dQ = -\lambda f \frac{dt}{dx} dz \dots \dots \dots (1)$$

Здесь dQ есть количество теплоты, передаваемое в dz часа через элемент продольного сечения стенки f к такому же другому сечению, находящемуся на расстоянии dx от первого, причем разность температур в этих сечениях составляет dt градусов. Знак (—) стоит потому, что при положительном dQ (притоке теплоты в сторону первого сечения) величина $\frac{dt}{dx}$ т. е. изменение температуры на единицу длины ¹⁾, является отрицательной (в первом сечении t ниже второго) и наоборот. Такой процесс можно представить себе в любом пункте какого-либо тела или среды, имеющей любое тепловое состояние — устойчивое или неустойчивое во времени, всюду одинаковое или же различное в пространстве среды; разница будет только в конкретных величинах, особенно же в величинах выражения $\frac{dt}{dx}$ (изменяемость температуры на ед. длины), которая, например, при установившемся движении теплоты является постоянной (см. часть I, гл. 1, стр. 7), в среде со всюду одинаковой и потому неподвижной температурой она равна 0, а в среде с температурой переменной во времени для разных точек она

¹⁾ графически это — tg угла наклона к оси абсцисс касательной к температурной кривой в данной точке — см. $\frac{EF}{AF}$ на рис. 23. Уравнение кривой в этом случае имеет, очевидно, следующую форму: $t = a + bx$.

не постоянна и не равна 0. В этом последнем, наиболее общем случае температура какой-либо точки среды t есть, очевидно, функция положения этой точки на линии теплового потока (x) и времени (z), т.е.

$$t = f(x, z).$$

Определим общее свойство этой функции, независимо от тех или других конкретных заданий.

В общем случае заданий, когда $\frac{dt}{dx}$ не равно 0, мы имеем, очевидно, тепловой поток; говоря еще в более общем виде, мы имеем его всегда; но с разной интенсивностью, причем в случае $\frac{dt}{dx} = 0$ эта интенсивность также равна 0.

Тепловой поток, как и всякий, имеет известную скорость движения, которую назовем чрез v . Количество теплоты q , проходящей в этом потоке чрез сечение f (перпендикулярное к его направлению) в промежуток времени dz , пропорционально указанным величинам v , f и dz . Кроме того, оно пропорционально общей термической плотности среды, т.е. теплосодержанию в единице ее объема для данного пункта (сечения f). Эта термическая плотность, которую обозначим чрез D , выражается произведением $c\rho t$, т.е. теплоемкости, веса единицы объема и температуры в исследуемый момент. Таким образом имеем:

$$q = f \cdot v \cdot D \cdot dz, \text{ где } D = c\rho t \dots \dots \dots \text{ (II)}$$

Для соседнего сечения, находящегося от данного в расстоянии dx (по направлению потока), имеем, очевидно:

$$q_1 = f \cdot v_1 \cdot D_1 \cdot dz, \text{ где } v_1 = v + \frac{dv}{dx} \cdot dx \text{ и } D_1 = D + \frac{dD}{dx} \cdot dx.$$

В общем случае (неустановившегося движения) величины q и q_1 не равны между собою; от этого неравенства прихода и расхода теплоты чрез два соседних сечения происходит в соответствующем объеме среды $f \cdot dx$ изменение температурного состояния, т.е. термической плотности D , во времени; это изменение можем обозначить чрез $\frac{dD}{dz} \cdot dz$.

Таким образом получим:

$$q - q_1 = f \cdot dx \cdot \frac{dD}{dz} \cdot dz.$$

Вставим сюда выше найденные выражения для q и q_1 , а в последнем также выражения для v_1 и D_1 . Кроме того,

так как $D = c \cdot \rho \cdot t$, то $\frac{dD}{dz} = c\rho \frac{dt}{dz}$. Вставив и эту величину, имеем:

$$f \cdot v \cdot D \cdot dz - f \left(v + \frac{dv}{dx} \cdot dx \right) \left(D + \frac{dD}{dx} \cdot dx \right) dz = \\ = f \cdot dx \cdot c\rho \frac{dt}{dz} \cdot dz - \left(v \frac{dD}{dx} + D \frac{dv}{dx} + \frac{dv}{dx} dx \cdot \frac{dD}{dx} \right) = c\rho \frac{dt}{dz}.$$

Пренебрегая в скобках третьим членом, как бесконечно малым наряду с двумя конечными, и замечая, что два оставшихся члена представляют не что иное, как $d \frac{(v \cdot D)}{dx}$, получим:

$$-d \frac{(v \cdot D)}{dx} = c\rho \frac{dt}{dz}.$$

Но из уравнений I и II имеем $v \cdot D = -\lambda \frac{dt}{dx}$.

Поэтому окончательно:

$$\lambda \frac{d^2t}{dx^2} = c\rho \frac{dt}{dz} \text{ или } \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{d^2t}{dx^2} = \frac{dt}{dz} \dots \dots \text{ (III).}$$

Это и есть известное общее уравнение Фурье для всякого движения теплоты. Физический смысл его может быть выражен так: изменяемость температуры точек в направлении оси X (потока), т.-е. $\frac{dt}{dx}$, не является здесь величиной постоянной (иначе говоря, диаграмма внутренних температур есть не прямая наклонная, а кривая); но уклонение этой величины в какой-либо точке от средней для данного места нормы, т.-е. от нормы для соседних по обе стороны точек, пропорционально скорости изменения температуры в этом пункте во времени. Или еще иначе: искривление диаграммы температур в данной точке сравнительно с высотами температур в соседних по обе стороны точках или сравнительно с соединяющей их прямой (см. рис. 23), пропорционально скорости изменения температуры данного пункта во времени¹⁾.

¹⁾ Для большей наглядности уравнения (III) заметим, что при установившемся движении $\frac{d^2t}{dx^2} = 0$, но тогда по уравнению (III) и $\frac{dt}{dz} = 0$, что и означает установившийся режим движения. Но в таком случае $\frac{dt}{dx}$ не равно 0, так как $\frac{dt}{dx} = 0$ означало бы общее равенство всех температур в среде и отсутствие всякого движения теплоты.

Коэффициент указанной пропорциональности, а именно, величина $\frac{\lambda}{c\rho} = a$, носит название коэффициента температуропроводности и дает нам, как это легко понять из самого смысла формулы, скорость распространения температуры внутри тела (не смешивать с распространением теплоты).

Уравнение (III) есть общее уравнение для всякого движения теплоты в массе тела, если иметь в виду температурное поле одного измерения (т.е. с изменением только в направлении оси x). Роль этого уравнения в решении каких-либо конкретных вопросов по расчету тепловых процессов заключается в следующем. Когда нам дается какое-либо конкретное задание для расчета температур, то, очевидно, вопрос сводится к отысканию определенной функции от z и x для t ; $t = f(z, x)$. Эта функция и должна прежде всего удовлетворять требованию уравнения Фурье: а именно, вторая производная от этой функции по x должна быть пропорциональна первой производной от той же функции по z . Затем, само собою разумеется, искомая функция должна удовлетворять и тем конкретным заданиям, которые ставятся для ее отыскания. Сюда относятся обычно следующие задания.

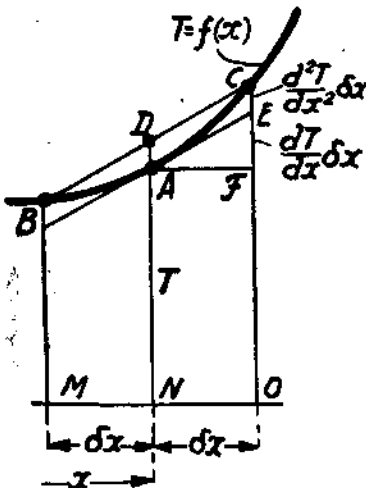


Рис. 23.

а) В начальный момент времени ($z=0$) или вообще в какой-либо определенный момент ($z=m$) функция должна иметь определенные конкретные значения для всех рассматриваемых пунктов тела по оси X ; например — всюду одинаковая температура у тела, начинающего остывать, или расположение температур по определенному закону — например, по наклонной прямой зимою в наружной стене здания, начинающей остывать.

б) Во время всего температурного процесса поверхности тела (например, стены) подвергаются заданному воздействию внешней (по отношению к теплоте самой стены) температуры; например, стена остывает при такой-то наружной температуре и такой-то комнатной.

В то время, как перечисленные конкретные задания могут быть весьма разнообразными и не могут быть наперед учтены в какой-либо общей форме, требование уравнения Фурье носит общий характер и потому заранее может

дать нам некоторые общие указания о способах решения разных заданий по тепловым расчетам. Действительно, мы теперь же можем поставить себе вопрос следующим образом: какого рода математические функции вообще могут удовлетворять требованиям уравнения Фурье? Очевидно, они и будут подходящими для решения тепловых вопросов.

Простейший вид эти функции принимают, конечно, при каком-либо частном значении z , т. е. для распределения температур в теле в какой-либо определенный момент времени. С такого частного вида искомых функций, т. е. $f(x)$, мы и будем начинать — с тем, чтобы затем восходить к более полному их виду $f(x, z)$.

Для этого обратим внимание на те виды, какие может принимать диаграмма распределения температур в теле при остывании или нагревании. В общем случае это, очевидно, есть некоторая кривая: так, для стены, остывающей с поверхности, это будет восходящая от этой поверхности кривая (рис. 24). Какие имеются типы уравнения для этой кривой, которые могут быть развиты затем в функции от двух переменных x и z , удовлетворяющие закону Фурье?

Возьмем сначала уравнение температурной линии при установившемся движении: $t = C + Dx$. Оно выражает некоторое реальное распределение температур в стене

в определенный момент времени (z) и в этом смысле представляет интерес, как частный случай искомой общей закономерности. Но может ли оно быть развернуто в $f(x, z)$? Взяв вторую производную его по x (согласно закону Фурье), имеем 0. Если бы мы развернули функцию введением в нее члена с z , то первая производная этой развернутой функции по z должна также равняться 0. Но легко видеть, что такое развитие функции затруднительно; единственная форма ее, удовлетворяющая указанному условию, есть $t = C + Dx + 0 \cdot z$, т. е. все та же взятая нами функция, которая формально все же удовлетворяет требованию $\frac{dt}{dz} = 0$. Таким образом, формально она может быть взята в число функций $t = f(x, z)$, удовлетворяющих закону Фурье.

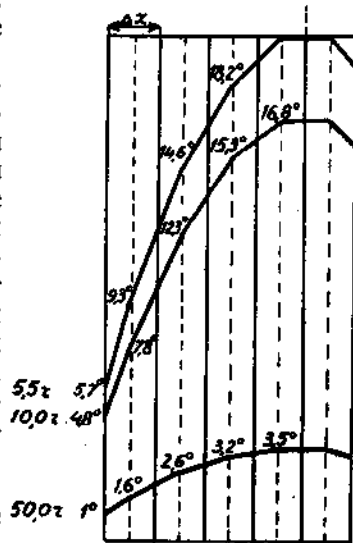


Рис. 24.

Другой тип функций, подходящий для восходящей кривой температур, имеем в функциях snx и csx или, в более общем виде, $sn(mx)$ и $cs(mx)$, которые дают при некоторых значениях m плавные кривые восходящего типа. Возьмем одну из таких функций для t :

$$t = A \cdot cs(mx)$$

и попробуем развить ее вышеуказанным способом в $f(x, z)$. Берем первую и затем вторую производную ее по x :

$$\frac{dt}{dx} = -Am \operatorname{sn}(mx);$$

$$\frac{d^2t}{dx^2} = -Am^2 \operatorname{cs}(mx) = -m^2 t.$$

Чтобы удовлетворять закону Фурье, эта производная, умноженная на коэффициент пропорциональности $\frac{\lambda}{c} = a$, должна быть равна $\frac{dt}{dz}$,

т. е.

$$-a \cdot m^2 t = \frac{dt}{dz}.$$

Из этого уравнения можем вывести ту функцию от z , которую мы должны ввести добавочно в рассматриваемый тип выражения для t . Именно, из этого уравнения видим, что $\frac{dt}{t}$ должно быть равно $-a \cdot m^2 \cdot dz$,

т. е.

$$\frac{dt}{t} = -am^2 dz$$

или, интегрируя,

$$\lg_n t = -am^2 z + C.$$

Постоянное интегрирования C можно всегда представить в виде \lg некоторого постоянного числа M ; поэтому имеем:

$$\lg_n t = -am^2 z + \lg_n M;$$

$$\lg_n t - \lg_n M = -am^2 z;$$

$$\lg_n \frac{t}{M} = -am^2 z$$

или $t = Me^{-am^2 z}$, где e — основание натуральных логарифмов.

Так как взятая выше функция $t = A \operatorname{cs}(mx)$ должна представлять собой лишь частное значение искомой полной функции при $z = 0$, то, приняв в найденной форме функции это значение для z и приравнявая результат к $A \operatorname{cs}(mx)$, получаем:

$$t = Me^0 = M = A \operatorname{cs}(mx).$$

Внося это выражение для M в найденную форму искомой функции, получаем, наконец, ее развитой вид:

$$t = A \operatorname{cs}(mx) e^{-am^2 z}.$$

Так мы получили для t функцию от x и z , удовлетворяющую закону Фурье и дающую нам, судя по начальному моменту (при $z = 0$), правдоподобную кривую температур. Совершенно аналогичным образом получим и другую функцию:

$$t = B \operatorname{sn}(mx) e^{-am^2 z}.$$

Эта функция, как и предыдущая, удовлетворяет закону Фурье при произвольных значениях m . Поэтому каждая из них представляет, в сущности, ряд функций; например, первая распадается на следующие:

$$A_1 \operatorname{cs}(m_1 x) e^{-am_1^2 z}, A_2 \operatorname{cs}(m_2 x) e^{-am_2^2 z}.$$

и т. д. Но если каждая из этих отдельных функций удовлетворяет закону Фурье, то и сумма их будет обладать тем же свойством (что понятно из самого способа получения производных). Поэтому для полноты всех возможных решений тепловых вопросов заменим каждую из двух тригонометрических функций суммами, т. е. положим

$$t = \Sigma A_m \operatorname{cs}(mx) e^{-am^2 z}$$

и

$$t = \Sigma B_m \operatorname{sn}(mx) e^{-am^2 z}$$

или короче

$$t = A_m \operatorname{cs}(mx) e^{-am^2 z}$$

и

$$t = B_m \operatorname{sn}(mx) e^{-am^2 z}.$$

Если к этим решениям вопроса о типе функций присоединить первое наше решение, т. е. $t = C + Dx$, то мы имеем таким образом три типа функций, дающих для начального момента времени правдоподобные кривые внутренних температур, а в последующем — удовлетворяющие закону Фурье. По соображениям, уже упомянутым выше,

мы можем совместить все эти три типа функций в одну путем их сложения. Таким образом имеем окончательно:

$$t = C + Dx + A_m \operatorname{cs}(mx) e^{-am^2x} + B_m \operatorname{sn}(mx) e^{-am^2x} \dots \dots \dots (IV)$$

Это и есть одна из форм решения вопроса на основах метода Фурье, каковой мы будем пользоваться ниже в практических примерах ¹⁾. Это уравнение носит пока еще очень общую форму в виду неопределенности величин A_m , B_m , C , D и m . При наличии более конкретных заданий эти величины примут определенное значение, вместе с тем изменится и вид уравнения.

В числе таких конкретных заданий, как выше упомянуто, обычно фигурирует определенное температурное воздействие среды на поверхность остывающего или нагревающегося тела — например, воздействие воздуха определенной температуры на стену постройки. Нам уже знаком этот процесс из части I гл. I в связи с рассмотренными там коэффициентами α_n и α_s . Количество теплоты, переходящее при этом от поверхности стены к среде или обратно в 1 час и на 1 кв м, выражается формулой $\alpha(t - T_n)$ где t — температура поверхности, а T_n — температура воздуха; с другой стороны, количество теплоты, притекающей на поверхность стены из ее внутренней массы, составляет по уравнению (I) ч. II при $dz = 1$ и $f = 1$ величину $\lambda \cdot \frac{dt}{dx}$ при x бесконечно близком к 0; поэтому имеем вообще:

$$\alpha(t - T_n) = \lambda \frac{dt}{dx}_{x=0} \dots \dots \dots (V)$$

После этих предварительных замечаний перейдем к вопросу о применении метода Фурье к вычислениям процессов остывания и нагревания строительных конструкций, например, стены толщиной X м. Последнюю будем предполагать однородной по материалу и имеющей перед началом процесса — например, остывания — всюду одинаковую температуру T . Остывание пусть будет происходить под влиянием воздуха с температурой 0° по обе стороны стены ²⁾.

¹⁾ Другие формы решений оставляем в стороне, ограничиваясь лишь необходимыми для строительных задач. Полное рассмотрение вопроса относится к области математической физики.

²⁾ Заметим здесь кстати, что так как для процесса остывания имеют значение лишь относительные температуры воздуха и стены, то мы всегда можем положить первую равной 0° , придав второй соответствующее значение. Так это и предположено в дальнейшем.

Только что приведенное выше общее уравнение (V) дает нам для двух поверхностей остывающей стены:

$$\frac{dT}{dx}_{x=0} = -\frac{\alpha}{\lambda} T_{x=0} \dots \dots \dots (VI)$$

$$\frac{dT}{dx}_{x=x} = \frac{\alpha}{\lambda} T_{x=0} \dots \dots \dots (VII)$$

Принимая $\alpha_s = \alpha_n$, как для всех теоретически общих случаев, найдем выражения для $\frac{dT}{dx}_{x=0}$ и для T первого уравнения.

Взяв производную $\frac{dT}{dx}$ от функции (IV), имеем:

$$\frac{dT}{dx} = D - m A_m \operatorname{sn}(mx) e^{-am^2 z} + m \cdot B_m \operatorname{cs}(mx) e^{-am^2 z}.$$

При $x=0$ это дает:

$$\frac{dT}{dx}_{x=0} = D + m B_m e^{-am^2 z} \dots \dots \dots (VIII)$$

В то же время при $x=0$ по уравнению (IV)

$$T_{x=0} = C + A_m e^{-am^2 z}.$$

Подставляя эти величины в уравнение (VI), получим:

$$\begin{aligned} D + m B_m e^{-am^2 z} &= \frac{\alpha}{\lambda} (C + A_m e^{-am^2 z}) = \\ &= \frac{\alpha}{\lambda} \cdot C + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot A_m e^{-am^2 z}. \end{aligned}$$

Так как это уравнение должно иметь место при всяких величинах m , то неизбежно в нем должно быть:

$$D = \frac{\alpha}{\lambda} C \dots \dots \dots (IX)$$

и

$$m B_m e^{-am^2 z} = \frac{\alpha}{\lambda} A_m e^{-am^2 z}$$

или

$$m B_m = \frac{\alpha}{\lambda} A_m.$$

1) Обратный знак необходимо ставить здесь потому, что процесс на другой стороне имеет направление, обратное предыдущему — иначе говоря, t_g угла наклона касательной к температурной кривой будет здесь со знаком обратным (см. рис. 23).

Для уравнения (VII) имеем:

$$\frac{dT}{dx}_{x=x} = D - m A_m \operatorname{sn}(mX) e^{-am^2 z} + m B_m \operatorname{cs}(mX) e^{-am^2 z}$$

и

$$T_{x=x} = C + D \cdot X + A_m \operatorname{cs}(mX) e^{-am^2 z} + B_m \operatorname{sn}(mX) e^{-am^2 z}.$$

Вставляя все это в уравнение (VII), получим подобно предыдущему:

$$D = -\frac{\alpha}{\lambda} (C + DX) \dots \dots \dots (X)$$

$$-m A_m \operatorname{sn}(mX) + m B_m \operatorname{cs}(mX) = -\frac{\alpha}{\lambda} [A_m \operatorname{cs}(mX) + B_m \operatorname{sn}(mX)].$$

Разделив обе части последнего уравнения на $\operatorname{cs}(mX)$ и вставив из предыдущего вывода, вместо $\frac{A_m}{B_m}$, величину

$m \cdot \frac{\lambda}{\alpha}$, получим для определения m уравнение:

$$\operatorname{tg}(mX) = \frac{m \cdot 2 \alpha \lambda}{m^2 \lambda^2 - \alpha^2}.$$

Это уравнение (с одним неизвестным) разрешимо проще всего графическим путем. Для большей наглядности этого разрешения возьмем числовой пример для рассматриваемого общего задания. Пусть нам дана бетонная стена толщиной $X = 0,4$ м., нагретая до $T = 20^\circ$ Ц. и остывающая при температуре воздуха с обеих сторон в 0° ; возьмем для бетона $\lambda = 1,0$ и $\alpha = 5$ при весе 1 куб м $\rho = 2000$ кг и теплоемкости

$c = 0,25$ кал. Тогда $a = \frac{\lambda}{c\rho} = 0,002$.

Уравнение для m примет вид:

$$\operatorname{tg} 0,4 m = \frac{10 m}{m^2 - 25}.$$

Чтобы определить m , возьмем произвольную ось координат (рис. 25) и построим по точкам в выбранном масштабе две кривые: одну по уравнению $y = \operatorname{tg} 0,4x$ (4 ветви) и другую по уравнению: $y = \frac{10 x}{x^2 - 25}$ (2 ветви).

Обе кривые представлены на рисунке; абсциссы точек их пересечений и дают нам, очевидно, величины m в выбранном масштабе. Они суть: 4,3 — 9,8 — 17 — 24,6.

Коэффициенты C и D получим путем решения относительно их уравнений (IX) и (X). Очевидно, из последних имеем $C=0$ и $D=0$. Коэффициенты A_m , как выведено, равны $B_m \cdot m \frac{\lambda}{\alpha}$.

Таким образом наше основное уравнение получает для данных конкретных заданий следующий вид:

$$T = B_1 [0,86 \operatorname{cs} 4,3 x + \operatorname{sn} 4,3 x] e^{-0,087 z} + \\ + B_2 [1,96 \operatorname{cs} 9,8 x + \operatorname{sn} 9,8 x] e^{-0,192 z} + \text{и т. д.}$$

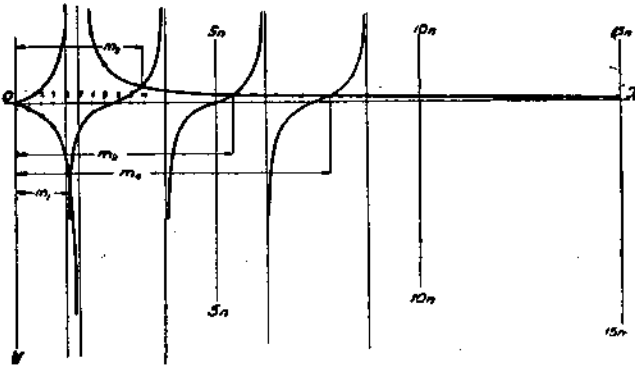


Рис. 25.

Для определения коэффициентов B обратим внимание на то обстоятельство, что при $z=0$ будет $T_{x=0} = 20^{\circ}$ и $T_{x=X} = 20^{\circ}$; поэтому имеем:

$$20 = B_1 \cdot 0,86 + B_2 \cdot 1,96 + \dots \\ 20 = B_1 [0,86 \operatorname{cs} 1,72 + \operatorname{sn} 1,72] + B_2 [1,96 \operatorname{cs} 3,92 + \\ + \operatorname{sn} 3,92] + \dots$$

Так как выбор коэффициентов B является, по смыслу всех этих уравнений, произвольным, лишь бы они удовлетворяли этим уравнениям, то полагаем $B_3=0$, $B_4=0$ и т. д. Тогда получаем 2 уравнения с двумя искомыми коэффициентами B_1 и B_2 , которые и определяем из них; получим $B_1 = 23,7$ и $B_2 = -0,176$, а искомое уравнение будет:

$$T = 23,7 [0,86 \operatorname{cs} 4,3 x + \operatorname{sn} 4,3 x] e^{-0,087 z} - \\ - 0,176 [1,96 \operatorname{cs} 9,8 x + \operatorname{sn} 9,8 x] e^{-0,192 z}$$

Очевидно, введя дальнейшие добавочные условия для начального состояния температур, например, то условие, что при $z=0$ $T_{x=\frac{X}{2}} = 20$ или аналогичное условие для какого-либо другого пункта стены, можем получить, вместо двух

уравнений, три, четыре и т. д. с соответствующим числом искомых коэффициентов, каковые и определим из них; это даст нам лишь дальнейшие уточнения тех приближенных величин, какие можем иметь из последнего полученного уравнения для T .

Однако надо заметить, что сколько-нибудь достаточная точность получается лишь при вычислении не менее пяти коэффициентов. Из этого видно, насколько длительны и хлопотливы подобные решения тепловых вопросов даже в их простейшей постановке.

Правда, в данном случае вид уравнений может быть несколько упрощен, если мы возьмем начало координат не на поверхности стены, а в ее середине. Тогда, в виду симметричности кривой температур относительно этой середины, касательная к этой кривой здесь будет горизонтальной прямой, т. е. tg угла ее наклона к горизонту равен нулю. Иначе говоря, мы имеем здесь для всякого момента времени:

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = 0.$$

В виду уравнения (VIII) имеем:

$$D + m B_m e^{-am^2 z} = 0,$$

откуда неизбежно следует,

$$\text{что } D = 0 \text{ и } m B_m e^{-am^2 z} = 0.$$

Поэтому основное уравнение примет для этого случая вид:

$$T = C + A_m cs(mx) e^{-am^2 z},$$

что проще предыдущего случая.

Кроме того замечаем, что при $z = \infty$ должно быть $T = 0$, из чего следует по предыдущему уравнению, что $C = 0$.
Итак

$$T = A_m cs(mx) e^{-am^2 z}.$$

При

$$x = \frac{X}{2}$$

имеем

$$T_{x=\frac{x}{2}} = A_m cs\left(m \cdot \frac{X}{2}\right) e^{-am^2 z}.$$

Так как для поверхности плиты должно иметь место соотношение

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{x=\frac{X}{2}} = \pm \frac{\alpha}{\lambda} T,$$

то, взяв производную от предыдущего уравнения, получим;

$$- m A_m \operatorname{sn} \left(m \frac{x}{2} \right) e^{-am^2 x} = \frac{\alpha T_{x=\frac{x}{2}}}{\lambda}$$

Разделив это на предыдущее уравнение, получим для определения m :

$$\operatorname{tg} \left(m \frac{x}{2} \right) = \frac{\alpha}{m \lambda};$$

при принятых конкретных числовых значениях, это дает нам:

$$\operatorname{ctg} (0,2 m) = 0,2 m.$$

Построив кривую $y = \operatorname{ctg} 0,2 x$ и наклонную прямую $y = 0,2 x$ (см. рис. 26) найдем, величины m и заканчиваем расчет аналогично предыдущему.

Однако нетрудно видеть, что и этот расчет лишь немного уступает предыдущему по сложности и длительности, являясь в то же время совершенно частным случаем (симметричного остывания плиты), тогда как первая рассмотренная нами форма расчета является более общей и обычной, применимой в тех случаях, когда с обеих сторон стены на нее действуют разные температуры. Но и она выглядит такую, как мы ее представили здесь, только для однородной остывающей или нагревающейся строительной массы. При составе ее из нескольких слоев дело еще необычайно усложняется и уже не применяется при этих условиях даже в теоретических исследованиях, не говоря уже о практических расчетах. Наконец, было бы бесполезно упоминать о таких еще более сложных случаях, как неустановившиеся тепловые процессы в конструкциях с воздушными прослойками.

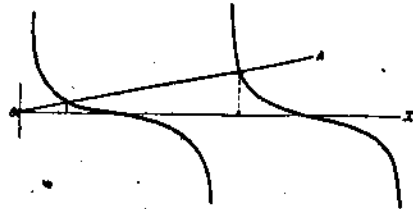


Рис. 26.

Таким образом метод Фурье, при всех его теоретических достоинствах, как общность и доступность неограниченного уточнения, практически мало применим в строительной теплотехнике с ее весьма разнообразными и сложными конструкциями ограждений.

Этим и объясняется то обстоятельство, что в последнее время появился ряд методов более простых, дающих достаточно для практики точность и потому вполне применимых даже в рядовых расчетах самих строителей (см. гл. 2, 3 и 4 этой части). При этом становится доступным расчет температур и в составных ограждениях; в самых же упрощенных видах

этих приближенных вычислений (см. гл. 4) наиболее важные для практики величины теплового процесса весьма легко определяются даже для ограждений весьма сложных, имеющих помимо разных твердых слоев также и воздушные прослойки.

Глава 2. Остывание и нагревание. Приближенный метод вычисления проф. Э. Шмидта (Мюнхен) ¹⁾.

Выше было выведено общее уравнение Фурье:

$$\frac{dt}{dz} = a \frac{d^2t}{dx^2}.$$

Если представим это уравнение в виде дифференциалов или конечных приращений, то получим:

$$\Delta_z t = a \cdot \frac{\Delta_x^2 t}{(\Delta x)^2} \cdot \Delta z \dots \dots \dots \text{(XI)},$$

причем значки под знаками Δ показывают, под влиянием какого фактора происходят приращения. Этих факторов два: время (z) и место наблюдаемой точки на оси абсцисс (x). Обозначим чрез $t_{n, k}$ температуру в пункте тела, отстоящем от начала координат на n элементов длины Δx , и в момент времени, отстоящий от начала наблюдения на k элементов времени Δz , причем те и другие элементы — т.е. Δx и Δz — суть малые, но конечные величины. Тогда можем по существу обозначений написать для отдельных величин $\Delta_z t$ и $\Delta_x t$ приведенного выше уравнения:

$$\Delta_z t = t_{n, k+1} - t_{n, k}$$

$$\Delta_x t = t_{n+1, k} - t_{n, k}$$

Величину $\Delta_x^2 t$ того же уравнения получим, если последнее полученное выражение сопоставим с тем, что было бы на его месте в предшествующий момент, и найдем их разность. В предшествующий момент здесь было бы, очевидно, $t_{n, k} - t_{n-1, k}$; вычтя это из полученного, имеем:

$$\Delta_x^2 t = t_{n+1, k} + t_{n-1, k} - 2t_{n, k}$$

¹⁾ Опубликован впервые в декабре 1924 г. в *Gesundheits-Ingenieur* 1924 Heft 50 „Neue Untersuchungen über die Wärmebedarf von Gebäuden und die Wärmeabgabe von Heizkörpern“, а затем в более полном и научном изложении в *Beiträge zur technischen Mechanik u. techn. Physik*. Berlin 1924 в статье: „Über die Anwendung der Differenzenrechnung auf technische Anheiz- und Abkühlungsprobleme“.

Вставив найденные выражения для $\Delta_z t$ и $\Delta_x^2 t$ в уравнение (XI) получим:

$$t_{n, \kappa+1} - t_{n, \kappa} = a \cdot \frac{\Delta z}{(\Delta x)^2} (t_{n+1, \kappa} + t_{n-1, \kappa} - 2t_{n, \kappa}) \dots \text{(XII)}$$

Это равенство показывает, что если нам известны температуры $t_{n+1, \kappa}$, $t_{n, \kappa}$, $t_{n-1, \kappa}$ трех соседних точек $n+1$, n и $n-1$ для некоторого времени κ (отстоящего от начала наблюдений на $\kappa \cdot \Delta z$ элементов времени), то мы можем весьма простыми действиями вычислить температуру средней точки в следующий (через Δz) момент времени, т.е. температуру $t_{n, \kappa+1}$.

И если первоначальное распределение температур дано нам для всех точек тела (что обычно и бывает при заданиях), то по такой кривой температур мы можем построить кривую для следующего момента.

Прежде чем рассматривать этот способ в более конкретном виде, остановимся на его графическом воспроизведении, данном тем же автором.

Пусть на рис. 27 линия $n-2$, $n-1$, n , $n+1$, $n+2$ дает нам распределение температур в слоях Δx тела для момента κ (отстоящего от начала на $\kappa \cdot \Delta z$ часов); таким образом ординаты $t_{n-2, \kappa}$, $t_{n-1, \kappa}$ и т. д. представляют величины температур в соответствующих точках.

Соединим прямой точки $n-1$ и $n+1$; это прямая пересекает ординату $t_{n, \kappa}$ в точке n' ; причем по элементарным геометрическим соображениям получаем:

$$nn' = \frac{1}{2} (t_{n+1, \kappa} + t_{n-1, \kappa} - 2t_{n, \kappa})^2$$

Сопоставляя это с последним выведенным выше равенством, видим, что величина nn' , при умножении ее на постоянное (при заданной величине Δz и Δx) количество

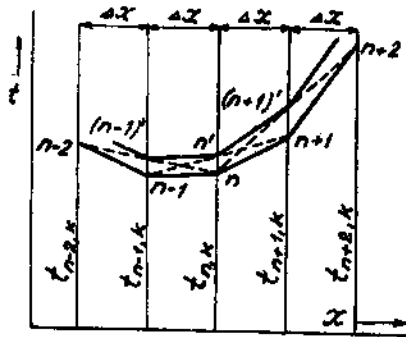


Рис. 27.

1) В трапеции, образуемой прямыми $t_{n-1, \kappa}$, $n-1$, $n+1$ и $t_{n+1, \kappa}$ средняя прямая $t_{n, \kappa} + nn'$ равна полусумме крайних, т.е. $t_{n, \kappa} + nn' = \frac{t_{n-1, \kappa} + t_{n+1, \kappa}}{2}$. Вычтя из обеих частей этого равенства по $t_{n, \kappa}$, получим указанное в тексте выражение.

$a \frac{\Delta z}{(\Delta x)^2} \cdot 2$, дает нам действительное приращение (положительное или отрицательное) температуры в данном пункте. Поступая так со всеми точками данного сечения тела, мы, очевидно, построим новую кривую температур весьма простым образом (см. линию $(n-1)'$, n' , $(n+1)'$ на нашем рисунке), а умножив приращения ординат на $2a \cdot \frac{\Delta z}{(\Delta x)^2}$ будем иметь приращения температур и, следовательно, самые температуры.

При практическом пользовании этим приемом мы получим еще большее упрощение, если подберем величины Δx и Δz так, чтобы

$$a \cdot \frac{\Delta z}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{2},$$

что всегда возможно и не ограничивает общности метода. В таком случае отрезки, подобные nn' , дадут нам непосредственно величины температурных приращений, а формула (XII) примет вид:

$$t_{n, n+1} = \frac{1}{2} (t_{n+1, n} + t_{n-1, n}),$$

т. е. температура в наблюдаемой точке по прошествии Δz часа равна полусумме температур в соседних двух точках (слева и справа) в предшествующий момент времени.

До сих пор мы говорили о внутренних температурах тела (ограждения). Но метод проф. Шмидта дает весьма простой подход и к определению температур поверхности ограждения в связи с кривой внутренних температур и с температурой прилегающей к ограждению среды (воздуха).

В аналитическом расчете для этих взаимоотношений служит, как известно, уравнение (V). Написав его в виде:

$$\frac{dt}{dx_{x=0}} = \frac{\alpha}{\lambda} (t - T_n) = \frac{t - T_n}{\lambda : \alpha}$$

получаем, что tg угла наклона касательной к температурной кривой в точке пересечения последней с поверхностью ограждения равен частному от деления разности температур указанной поверхности и прилегающей среды (воздуха) на величину $\frac{\lambda}{\alpha}$. Отсюда следует весьма простой способ геометрического построения этой касательной (способ, бывший известным отчасти и ранее опубликования метода профессора Шмидта).

Пусть на рис. 28 AA есть поверхность ограждения, с которой пересекается кривая его внутренних температур

в точке n , причем ордината nA пусть означает температуру t поверхности. Отложим от оси абсцисс вверх температуру T_n , проведя соответствующую горизонтальную прямую,

а от поверхности AA отложим влево расстояние $\frac{\lambda}{\alpha}$ и проведем здесь вертикальную, параллельную указанной поверхности. Пересечение двух проведенных прямых в точке R и дает нам ту точку, от которой прямая к точке n изображает нам вышеуказанную касательную к кривой внутренних температур в точке поверхности ограждения ¹⁾.

Это обстоятельство весьма облегчает нам завершение вышеуказанного метода графического построения последовательных во времени кривых, равно как и аналитического

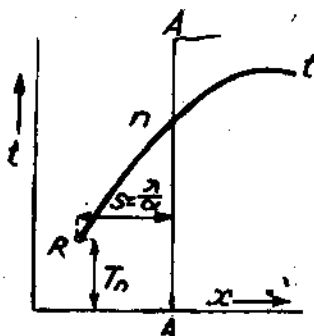


Рис. 28.

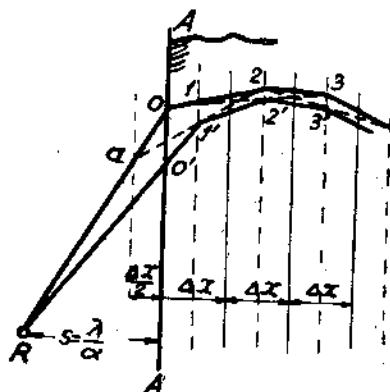


Рис. 29.

расчета температурных приращений. Действительно, пусть нам дана кривая $0, 1, 2, 3$ внутренних температур в слоях некоторого ограждения (см. рис. 29) и требуется построить кривую для следующего момента времени. Первая слева точка, какую мы можем построить для этой кривой, есть $2'$, которую получаем при соединении точек 1 и 3 прямой, в пересечении последней с ординатой середины 2-го слоя. Далее вправо, если бы ограждение имело большое число слоев, мы могли бы продолжать это построение беспрепятственно; но для нахождения точек около поверхности, как точки $1'$ и $0'$, мы не можем применить указанного построения. Здесь нам и оказывает помощь вышеприведенное построение касательной.

¹⁾ Нетрудно видеть, что тем самым воздух учитывается в качестве воображаемой добавочной составной части ограждения с условной теплопроводностью $\frac{\lambda}{\alpha}$, что и дает возможность завершить построение температурной линии до последней заданной точки ее — температуры внутреннего воздуха.

Действительно, построим для данного случая уже известным нам способом точку R и соединим ее прямой с точкой O . Проведем влево от поверхности ординату на расстоянии $\frac{\Delta x}{2}$ от нее (как середину воображаемого слева слоя ограждения); пересечение этой ординаты с RO , т.е. точка a , явится для нас вспомогательной точкой для завершения всего построения.

Соединим ее с точкой 2 первоначальной кривой; тогда в пересечении этой прямой $a2$ с ординатой середины первого слоя получим точку I' искомой кривой, а соединив последнюю с R прямою $I'R$, получим в пересечении последней с поверхностью ограждения точку O' — как последнюю для искомой кривой.

Легко убедиться, что указанное построение в предположении воображаемого добавочного слоя действительно обеспечивает основное требование — касательность всех проведенных из R лучей к получаемым новым кривым температур.

Если бы во время процесса остывания или нагревания изменились величины T_n или α , то пришлось бы только перенести точку R в новый пункт соответствующим построением и продолжать построение дальнейших кривых тем же порядком. Это последнее обстоятельство также является большим преимуществом данного метода, ибо аналитический учет влияния указанных перемен величины T_n или α крайне сложен (он возможен был ранее лишь по методу Фурье).

Прежде чем останавливаться на других возможностях, даваемых излагаемым методом, приведем практический пример расчета. Возьмем тот самый пример, на котором мы демонстрировали метод Фурье: остывание в воздухе с температурой 0° бетонной плиты толщиной $0,4$ м с температурой 20°C при физических характеристиках:

$$\lambda = 1,0, c = 0,25, \rho = 2000, \alpha = 5, a = \frac{\lambda}{c\rho} = 0,002.$$

Предполагая начало координат в середине остывающей стены (рис. 30) ¹⁾, имеем $\frac{X}{2}$ (см. обозн. гл. 1) $= 0,2$ м, $T = 20^\circ$ при $T_n = 0$. Взяв абсциссу RO^0 и отложив от нее вверх заданную температуру плиты 20° , найдем на абсциссе точку R путем отложения от поверхности стены влево расстояния $\frac{\lambda}{\alpha} = 0,2$ м.

Задаемся далее произвольно толщиной слоя Δx , которую примем равной $0,05$ м; таким образом имеем от поверхности

¹⁾ На рис. показана полностью лишь левая половина сечения стены в виду симметричности процесса.

стены до ее середины 4 слоя. Температуры поверхности стены и в срединах слоев будем обозначать соответственно t_0, t_1, t_2 и т. д.

Промежуток времени Δz для определения последующих кривых понижения температуры (начальная линия температур изображается, очевидно, верхней горизонтальной прямой чертежа) должен быть взят уже не произвольно — чтобы не усложнять дела, а по уравнению:

$$\Delta z = \frac{(\Delta x)^2}{2a} = \frac{5}{8} \text{ часа.}$$

После этого приступаем к построению кривых для периодов времени $\frac{5}{8}, \frac{5}{4}, \frac{15}{8}$ и т. д. до 5 часов от начала на-

блюдений. После этого, чтобы ускорить дело, слои взяты уже двойной толщины. Вместе с тем, как это видно из предыдущей формулы, промежутки времени соответственно учетверятся; они будут следовательно, после 5 часов: 7,5—10—12,5 и т. д. до 20 час. После этого еще раз удваиваем толщину слоев, и тогда соответствующие промежутки времени будут 30, 40 и 50 час. Но при указанных удвоениях надо новое построение сделать сначала для той же кривой, для которой было сделано построение при более тонких слоях, и уже из вновь нанесенной вторичной линии исходить при построении следующих кривых для увеличенных слоев.

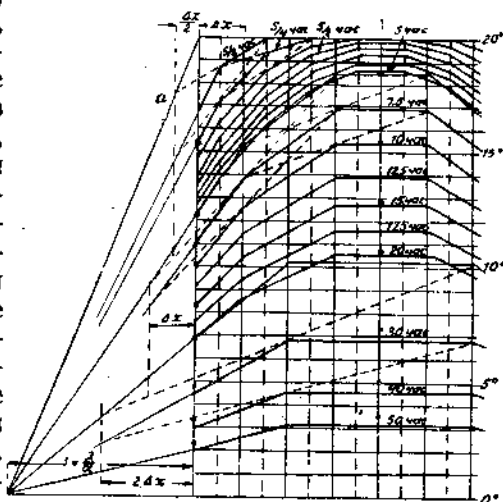


Рис. 30.

Все построение подробно указано на рис. 30.

Параллельный этому аналитический подсчет исходит

из предварительного определения „вспомогательной“ температуры в воображаемом пункте a . Нетрудно видеть (из подобия соответствующих треугольников), что

$$\frac{t_a}{t_0} = \frac{\frac{\lambda}{a} \frac{\Delta x}{2}}{\frac{\lambda}{a}}$$

т. е.

$$t_a = t_0 \cdot \frac{\frac{\lambda}{\alpha} \frac{\Delta x}{2}}{\frac{\lambda}{\alpha}}$$

В свою очередь t_0 определяется чрез температуру t_1 среды 1-го слоя по формуле (также из подобия треугольников):

$$t_0 = t_1 \cdot \frac{\frac{\lambda}{\alpha}}{\frac{\lambda}{\alpha} + \frac{\Delta x}{2}}$$

После этих предварительных замечаний самый подсчет располагается так, как показано в прилагаемой таблице.

Таблица расчета температур Э. Шмидта.

	Время		t_0	t_a	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
	Δz	Час.							
$\Delta x = 5 \text{ см}$ $\Delta z = \frac{5}{8} \text{ час.}$ $t_a = \frac{17,5}{22,5} t_1$ $t_0 = \frac{20,0}{22,5} t_1$	0	0	20	17,50	20	20	20	20	20
	1	—	16,67	14,59	18,75	20	20	20	20
	2	1,25	15,38	13,46	17,30	19,38	20	20	20
	3	—	14,60	12,78	16,42	18,65	19,69	20	20
	4	2,50	13,98	12,23	15,72	18,06	19,33	19,85	19,85
	5	—	13,47	11,78	15,15	17,53	18,96	19,59	19,59
	6	3,75	13,02	11,39	14,66	17,06	18,56	19,28	19,28
	7	—	12,65	11,08	14,23	16,61	18,17	18,92	18,92
	8	5,00	12,31	10,77	13,85	16,20	17,77	18,55	18,55
$\Delta x' = 2\Delta x = 10 \text{ см}$ $\Delta z' = 4\Delta z = 2,5 \text{ см}$ $t_a = \frac{15}{25} t_1$ $t_0 = \frac{20}{25} t_1$	8	5,0	12,31	9,23	15,30		18,42	18,42	
	12	7,5	11,06	8,30	13,83		16,86	16,86	
	16	10,0	10,06	7,54	12,58		15,33	15,33	
	20	12,5	9,16	6,87	11,44		13,96	13,96	
	24	15,0	8,34	6,25	10,42		12,70	12,70	
	28	17,5	7,59	5,68	9,48		11,56	11,56	
	32	20,0	6,90	5,18	8,62		10,52	10,52	
$\Delta x'' = 4\Delta x = 20 \text{ см}$ $\Delta z'' = 16\Delta z = 10 \text{ ч.}$ $t_a = \frac{10}{80} t_1$ $t_0 = \frac{20}{30} t_1$	32	20	6,90	3,45		10,17		10,17	
	48	30	4,54	2,27		6,81		6,81	
	64	40	3,02	1,51		4,54		4,54	
	80	50	2,02	1,01		3,03		3,03	

Так как в начале процесса все температуры стены равны 20° , то для 1-й строки (начальный момент при $z=0$) имеем везде 20° за исключением вспомогательной температуры t_a , которая определяется по приведенной выше формуле (при $t_0=20^\circ$). Во второй строке (для момента чрез $\frac{5}{8}$ часа) все температуры составляем из вышележащих по вышеприведенному правилу полусумм ¹⁾, за исключением t_0 , которая определяется по последней из выведенных выше формул (при определенном уже t_1).

Если вычислить температуры тех же пунктов данной стены по методу Фурье, то при точности, достигаемой нахождением пяти членов ряда, получим следующие величины для некоторых пунктов стены:

$x =$	0	0,05	0,10	0,15	0,20
$z = \frac{5}{4}$	20,00	19,93	19,67	18,40	15,40
$z = \frac{5}{2}$	19,70	—	—	—	13,98
$z = 5$	18,46	18,10	16,94	15,12	12,30
$z = 10$	15,48	—	—	—	10,08
$z = 15$	12,86	—	—	—	8,38
$z = 20$	10,68	—	—	—	6,96
$z = 30$	7,36	—	—	—	4,80
$z = 40$	5,09	—	—	—	3,52
$z = 50$	3,52	—	—	—	2,30

Сличая цифры этой таблицы с аналогичными цифрами предыдущей, замечаем, что точность вычислений по методу Шмидта достаточно велика при числе часов до 20; при большем числе часов расхождения достигают до $0,5^\circ$.

Соответственно достигаемому данным методом большому упрощению расчета процессов остывания и нагревания однородной стены становится практически доступным расчет тех же процессов даже в неоднородной конструкции, состоящей из нескольких твердых слоев.

¹⁾ Т.-е. цифры каждой строки составляют полусумму двух цифр предыдущей строки, стоящих справа и слева над искомой.

Возьмем пример стены, состоящей из двух разных частей с различными a и λ , которые назовем соответственно a_1, λ_1 и a_2, λ_2 . Для возможности построения последовательных непрерывных кривых надо, очевидно, иметь для обеих составных частей одинаковые промежутки времени Δz . В то же время должно быть соблюдено для обеих составных частей и основное условие простоты построения, а именно:

$$a_1 \frac{\Delta z}{(\Delta x)_1^2} = a_2 \frac{\Delta z}{(\Delta x)_2^2} = \frac{1}{2},$$

откуда следует условие для выбора толщины слоев той и другой составной части:

$$\frac{a_1}{(\Delta x)_1^2} = \frac{a_2}{(\Delta x)_2^2}$$

или

$$\frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}.$$

Кроме того следует предусмотреть еще особый излом кривой температуры на разделительной плоскости между двумя составными частями стен. Действительно, пусть мы имеем в AA (рис. 31) разделительную плоскость между двумя частями стены, при чем слева и справа от плоскости показаны ординатами середины слоев каждой части (подобранных по толщине согласно с приведенным условием), а в точках 2, 3, 4, 5 имеем температуры слоев. Если бы мы для получения кривой температур просто соединили прямой точки 3 и 4 так, как другие между собой, то прямая 3—4 дала бы нам одинаковый наклон кривой (т.-е. ее $\text{tg}'ca$) к AA в обоих слоях. Между тем равенство количества теплоты, выходящей из одного слоя чрез поверхность AA и входящей отсюда в другой слой, неизбежно приводит к уравнению:

$$\lambda_1 \left(\frac{dt}{dx} \right)_1 = \lambda_2 \left(\frac{dt}{dx} \right)_2,$$

которое говорит, что упомянутые углы наклона обратно пропорциональны коэффициентам внутренней теплопроводности материала слоев. Таким образом, между 3 и 4 должна быть не прямая, а ломаная линия.

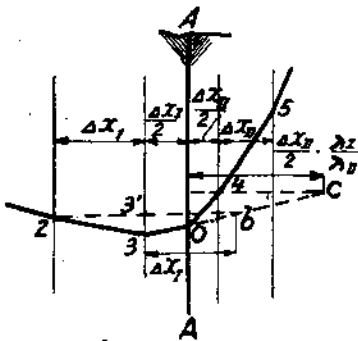


Рис. 31.

Укажем ее построение, удовлетворяющее только что приведенному условию.

На горизонтали через точку 4 откладываем от AA вправо величину $\frac{\Delta x_2}{2} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ до точки C ; соединяя последнюю с точкой 3, получим в пересечении с AA искомую точку O .

При построении по этой кривой таковой же для следующего момента не встретится затруднений для наших точек, как 2 или 5, имеющих нормальные соседние точки по обе стороны. Но для таких точек, как 3 или 4, нужны вспомогательные приемы. Так, для отыскания перемещения точки 3, мы должны продолжить вправо прямую 3— O и отложить равную ей на этом продолжении до точки b ; соединив последнюю с точкой 2, получим искомую точку 3'. Таким же приемом строится и точка 4'.

Метод проф. Шмидта весьма прост и остроумен. Его практическое применение для решения некоторых конкретных вопросов строительной теплотехники будет демонстрировано в главе 4.

Но следует отметить тот важный недостаток метода, что он допускает лишь сплошной расчет температур ограждения с самого начала за все последовательные промежутки времени, притом принудительно вытекающие из выбранной толщины слоев. Если даже нам нужны лишь температуры некоторых пунктов и в некоторые моменты, мы вынуждены считать или строить всё сначала, подобно тому, как неумелые танцоры танцуют лишь от печки. Это, конечно, неудобно; требуются более общие математические приемы, в виде определенных функций для t по z и x .

Глава 3. Остывание и нагревание. Приближенный метод автора.

Желая получить температуру какой-либо точки остывающего или нагревающегося тела (в среде с иной температурой) ¹⁾ в функции от места этой точки на оси абсцисс и времени от начала остывания, обратим сначала внимание на то обстоятельство, что необычайная сложность метода Фурье происходит из его общей постановки вопроса, а именно — из стремления получить в одном выражении все решение вопроса в самой общей его форме, т.-е. представить t как функцию сразу от обеих переменных z и x и для всего процесса остывания в целом. Между тем в этом последнем явно замечаются две совершенно разнохарактерные стадии (см. рис. 30): первая, начальная, наиболее переменная, пока

¹⁾ Это совершенно аналогично явлениям скоростей движения в подпертой жидкости (плотине) после спуска подпирающего затвора.

процесс лишь внедряется в ограждение, захватывая все новые и новые слои (от поверхности к середине) и постепенно замедляясь по мере этого захватывания; и вторая, более уравновешенная стадия, когда ограждение участвует в процессе постоянно всей своей массой. В первом периоде темп процесса постоянно видоизменяется двумя меняющимися факторами: все увеличивающимся числом участвующих слоев и все уменьшающейся разностью температур поверхности ограждения и окружающей среды; во втором же периоде изменение происходит под влиянием лишь последней из названных причин, а потому спокойнее и медленнее первого.

Отсюда вполне понятно, что при очень общей постановке вопроса, когда не учитывается указанное различие, получается весьма сложное решение, что мы и видим в рядах Фурье. Это — очень обычное и понятное явление во всяком математическом решении вопросов — в частности, технических: если, например, возьмем изгиб балки на двух опорах силами, не предполагая их в одной плоскости, и будем решать вопрос в более общей форме, то вместо наших обычных и простых решений в виде моментов сопротивления получим нечто гораздо более сложное. И как в этом последнем примере было бы практически невыгодным каждый раз исходить из общих формул при решении вопросов с силами нашего обычного их расположения, так практически невыгодно пользоваться и методом Фурье для расчета сравнительно простых процессов остывания и нагревания. Это, конечно, несколько не умаляет значения названного классического метода, имеющего бесспорные преимущества величайшей общности и применимости в самых различных областях физики и техники в тех сложных случаях, когда другие методы бессильны¹⁾.

Ниже приводимый метод расчета ставит себе гораздо более ограниченную задачу: найти простые линейные уравнения для процессов остывания и нагревания в телах той формы, какую обычно имеют все наши строительные ограждения — в форме плиты однородного или разнородного состава. Упрощение достигается тем, что вместо одной функции для всего решения находятся отдельные функции для двух указанных стадий процесса и отдельно по каждой из двух переменных z и x .

Для вывода этих уравнений возьмем пример остывающей плиты рассмотренного ранее типа: бетонная толщиной 0,4 м с характеристиками $\rho = 2000$ кг, $c = 0,25$ кал, $\lambda = 1,0$ кал, $\alpha = 5$ кал; температура плиты $T = 20^\circ$ Ц., температура окружающего воздуха $= 0^\circ$. Пользование этим примером имеет

¹⁾ В последнее время метод Фурье применяется, например, для расчета безбалочных железобетонных перекрытий (сравни расчеты инж. Д. Леше).

Вставляем это в ур-ие для t_2 :

$$t_2 = 3st - 2t - \frac{\alpha \Delta x}{4s\lambda} \cdot t = 1,312t \dots \dots (t_2)$$

Для t_3 имеем аналогично предыдущему:

$$\frac{\lambda}{\Delta x} dz = (t_3 - t_2) dz + c\rho \Delta x \cdot dt_2 = \frac{\lambda}{\Delta x} (t_2 - t_1) dz,$$

откуда, при $dt_2 = sdt$, имеем:

$$t_3 = 2t_2 - t_1 - \frac{c\rho(\Delta x)^2}{\lambda} \cdot \frac{dt_2}{dt} = 2t_2 - t_1 - \frac{\alpha \Delta x}{4\lambda} \cdot t, \dots (t_3)$$

$$t_3 = 1,436t.$$

Наконец, таким же образом получим для t_4 :

$$t_4 = 2t_3 - t_2 - \frac{c\rho(\Delta x)^2}{\lambda} \cdot \frac{dt_3}{dz} = 2t_3 - t_2 - \frac{\alpha \Delta x}{4\lambda} \cdot t = 1,497t \dots (t_4)$$

Уравнениями (t_1) , (t_2) , (t_3) и (t_4) определяются взаимоотношения внутренних температур плиты с температурой t ее поверхности при остывании всей ее массой. Заметив, что в этих уравнениях величины $\frac{\alpha \Delta x}{\lambda}$ представляют собою $2(s-1)$, можем написать их в следующем виде:

$$t_1 = s \cdot t;$$

$$t_2 = \left[3s - 2 - \frac{1 \cdot 2 \cdot (s-1)}{4} \right] t;$$

$$t_3 = \left[5s - 4 - \frac{2 \cdot 3 \cdot (s-1)}{4} \right] t;$$

$$t_4 = \left[7s - 6 - \frac{3 \cdot 4 \cdot (s-1)}{4} \right] t.$$

Эти выражения представляют собой известную закономерность; приняв во внимание, что число 4 в знаменателе дробей есть число слоев массы, которое обозначим через N , можем свести все приведенные формулы к одной для n -го слоя массы;

$$t_n = \left[(2n-1)s - (2n-2) - \frac{(n-1)n(s-1)}{N} \right] t \dots (t_n)$$

По этой формуле можем всегда определить температуру любого слоя массы в функции от температуры поверхности t независимо от предыдущих слоев, взяв, конечно, величину s по условиям задания и зная общее число слоев N .

Покончивши таким образом с определением внутренних температур плиты, перейдем к нахождению величин t' и z' . В момент достижения процессом остывания стены середины 4-го слоя в процессе участвуют полностью лишь $3^{1/2}$ слоя плиты. Определим по уравнению (t_n) температуру 4-го слоя стены в этот момент, полагая $N = 3^{1/2}$. Тогда получим:

$$t'_4 = \left[7s - 6 - \frac{3 \cdot 4 \cdot (s - 1)}{3^{1/2}} \right] t' = 1,445 t'.$$

Так как по существу момента это должно быть равно T , то имеем:

$$1,445 t' = 20^\circ$$

откуда

$$t' = 13,8^\circ.$$

Имея температуру поверхности для переходного момента, определим и соответствующее ему время z' из следующих соображений. Остывание за все предшествующее время z' час., при внешней теплоотдаче* в каждый элемент времени, равной $\alpha \cdot t \cdot dz$, дало в результате потерю теплоты внутри стены, выражаемую формулой:

$$Q = c_p \Delta x \left(3T - \frac{t'}{4} - \frac{3}{4} t'_1 - t'_2 - t'_3 \right),$$

как это легко вывести из подсчета соответствующих площадей на рис. 32 *d*, изображающем распределение температур в рассматриваемый момент. Значки ($'$) при температурах t в последней формуле обозначают, что они должны быть вычислены по формулам (t_1), (t_2) и (t_3) для $t = t' = 13,8^\circ$ и с учетом процесса в $3^{1/2}$ слоях вместо 4.

Сделав это, получим: $t'_1 = 1,125 t'$; $t'_2 = 1,304 t'$ и $t'_3 = 1,415 t'$.

Следовательно, $Q = c_p \Delta x (3T - 3,813 t') = 184,5$ кал.

С другой стороны, приближительная величина теплоотдачи внешней поверхностью плиты за z' часов, при средней ее температуре за этот период в $\frac{20 + 13,8}{2}$ градусов,

составляет $z' \cdot \alpha \cdot \frac{20 + 13,8}{2}$.

Из уравнения

$$z' \cdot \alpha \cdot \frac{20 + 13,8}{2} = 184,5$$

получаем

$$z' = 2,2 \text{ час.}$$

Таким образом уравнение (t) для данной стадии остывания плиты принимает в нашем конкретном примере следующий вид:

$$t = 13,8 e^{-0,04444 (z - 2,2)},$$

каковое и может служить для вычисления температур поверхности плиты для всех периодов времени больших 2,2 часа.

После определения по этому весьма простому линейному уравнению температуры наружной поверхности плиты, ее внутренние температуры определяются: для 1-го слоя — уравнением $t_1 = s \cdot t$, а для последующих — по уравнению (t_n).

Выше, при выводе основного уравнения (t), мы исходили из предположения, что $dt_1 = dt_2 = dt_3$ и т. д. Теперь, имея определение самых температур t_2, t_3 и т. д., мы можем и не держаться указанной предпосылки. В виду того, что создавшееся к началу данной стадии различие внутренних температур между собою (см. ур-ия (t_2), (t_3) и т. д.) в дальнейшем постепенно сглаживается и в пределе сходит на нет (см. рис. 30), будет более правильным предполагать, что снижения внутренних температур пропорциональны их наличным величинам в соответствующий момент. В таком случае во взятом нами конкретном примере мы имели бы для дифференциального уравнения (dt_n):

$$dt_1 = s dt; dt_2 = 1,312 dt = 1,166 s dt; dt_3 = 1,436 dt = 1,276 s dt; dt_4 = 1,497 dt = 1,3331 s dt,$$

а сумма их дает нам $4,77 s dt$, вместо прежних $4 s \cdot dt$. Так как подсчет всех t_n и dt_n при большом числе утомителен, а уравнение (t_n) позволяет нам сразу определить наибольшее t_N и dt_N , то можно, вместо указанной полной суммы,

взять $4 \cdot \frac{dt_1 + dt_N}{2}$, что в нашем конкретном примере дало бы $4,66 s dt$, а в уравнении (t) пришлось бы принять $N = 4,66$.

Чтобы испытать степень точности этого последнего уравнения, приводим ниже сопоставление его показаний с данными вычислений по методу Фурье и Э. Шмидту:

$z =$	2,5	5	10	50
по Фурье $t =$	13,98	12,30	10,08	2,30
по Шмидту	13,98	12,25	10,06	2,02
по ур. (t)	13,70	12,39	10,25	2,23

Как видим, уступая несколько в точности методу Шмидта при небольшом z , наше уравнение дает более точности при $z=50$ ч.

Что касается точности нашего определения внутренних температур по уравнению (t_n) , то при $N=4$ и соответствующих t имеем следующие цифры в сопоставлении с теми же проверочными источниками:

$z =$	2,5			5			10			50		
	t	t_2	t_4	t	t_2	t_4	t	t_2	t_4	t	t_2	t_4
По Фурье . .	13,98	—	19,70	12,30	—	18,46	10,08	—	15,48	2,30	—	3,52
„ Шмидту . .	13,98	18,06	19,85	12,25	16,20	18,55	10,06	12,58	15,33	2,02	3,03	3,03
„ ур. (t) и (t_n) .	13,7	17,97	20	12,39	16,26	18,40	10,25	13,45	15,3	2,23	2,93	3,30

Однако и определение внутренних температур оказывается более точным, если мы примем в уравнении (t_n) $N=4,66$, как это сделано нами для уравнения (t) , и возьмем величины t из этого последнего.

Мало того: указанное уточнение может быть повторяемо: найдя внутренние температуры при $N=4,66$, мы получим новые величины для dt_2, dt_3 и т. д. и, следовательно, новую сумму $dt_1 + dt_2 + \dots$ или $4 \cdot \frac{dt_1 + dt_4}{2}$ — бóльшую, чем $4,66 s dt$; эту новую величину опять вставляем в уравнение (t) , находим из него уже несколько иные t_1 , а затем и t_n и т. д. Конечно, изменения числовой величины для N в показателе уравнения (t) будут все менее значительными, а потому и менее полезными.

2. Стадия начального остывания. Мы можем и для этого случая использовать наше дифференциальное уравнение (dt_n) , придав ему вид:

$$\alpha \cdot t \cdot dz = -cp\Delta x \cdot ns \cdot dt \dots (dt'_n)$$

Но здесь n — число вовлеченных в процесс слоев — является уже не постоянной величиной, как было N , а переменной, притом третьей в данном уравнении. Нам необходимо выразить ее через основную переменную t , чтобы уравнение стало разрешимым. Для этого войдем в рассмотрение внутренних температур в слоях плиты при этой стадии остывания. Мы можем найти выражения для этих температур чрез соответствующую температуру поверхности t в моменты достижения процессом середины каждого слоя.

Для этого мы используем вновь предположение, что $dt_1 = dt_2 \dots$, и возьмем уравнения (t_n), но, вместо полного числа слоев плиты N , будем брать то, которое соответствует моменту, т.е. $3/2$ для середины второго слоя, $5/2$ — для третьего, $7/2$ для четвертого. Таким образом получим:

$$t_1 = s \cdot t.$$

$$t_2 = 3t_1 - 2t - \frac{\alpha \Delta x}{1^{1/2} \lambda} t = \left(3s - 2 - \frac{1 \cdot 2 \cdot \alpha \Delta x}{3 \lambda} \right) t$$

$$t_3 = 2t_2 - t_1 - \frac{\alpha \Delta x}{2^{1/2} \lambda} t = \left(5s - 4 - \frac{3 \cdot 2 \cdot \alpha \Delta x}{5 \lambda} \right) t$$

$$t_4 = 2t_3 - t_2 - \frac{\alpha \Delta x}{3^{1/2} \lambda} t = \left(7s - 6 - \frac{6 \cdot 2 \cdot \alpha \Delta x}{7 \lambda} \right) t.$$

Очевидно, и эти формулы сводятся к одной общей для температуры n -го слоя в момент достижения процессом остывания его середины:

$$t_n = \left[(2n-1)s - (2n-2) - \frac{2n(n-1)n}{2n-1}(s-1) \right] t \dots (t_n).$$

Эта формула может дать нам новые, весьма важные выводы. Действительно, приняв во внимание, что температура внутреннего n -го слоя t_n в момент достижения его середины процессом остывания равна первоначально заданной температуре тела T , можем написать уравнение:

$$(2n-1)s - (2n-2) - \frac{2(n-1)n}{2n-1}(s-1) \Big] t = T.$$

Положив здесь

$$\frac{2n(n-1)}{2n-1} = n - 0,5, \text{ получим:}$$

$$[n(s-1) - 0,5s + 1,5] t = T, \text{ откуда}$$

$$n = \frac{1}{s-1} \left(\frac{T}{t} - 1 \right) + 0,5$$

Это уравнение связывает создающиеся на поверхности массы температуры t с числом захваченных процессом слоев. Так как последний из этих слоев участвует в процессе не всей своей толщиной, а лишь половиной, да и то лишь частично (от нуля), то его участие можно приравнять к полному участию $1/4$ его толщины: поэтому для определения

числа слоев, вполне вовлеченных в процесс, надо уменьшить предыдущее выражение на 0,75 и мы получим:

$$n = \frac{1}{s-1} \left(\frac{T}{t} - 1 \right) - 0,25 \dots \dots \dots (n)$$

Последнее уравнение и дает нам возможность выразить наше дифференциальное уравнение (dt'_n) чрез две переменных и сделать его разрешимым. Вставляя в него выражение для n , получим:

$$t \cdot dz \cdot a = c_s \Delta x s \left[\frac{1}{s-1} \left(\frac{T}{t} - 1 \right) - 0,25 \right] dt.$$

Интегрируя это уравнение в пределах $z=0$, $z=z$ и $t=T$, $t=t$, получим:

$$z = \frac{c_s \Delta x \cdot s}{a} \left[\frac{1}{s-1} \left(-\frac{T}{t} + 1 \right) + \left(\frac{1}{s-1} + 0,25 \right) \lg_n \frac{T}{t} \right] \dots (z)$$

Это и есть уравнение остывания плиты в его начальной стадии. Для решения его относительно t полагаем приближенно:

$$\lg_n \frac{T}{t} = 2 \frac{T-t}{T+t} \text{)}.$$

Кроме того, для сокращения формулы положим:

$$\frac{c_s \Delta x s}{a} = m; \quad \frac{1}{s-1} = n \text{ и } \frac{1}{s-1} + 0,25 = p.$$

тогда

$$t = T \left(\frac{2p + \frac{z}{m}}{2 \left(-\frac{z}{m} + 2p - n \right)} - \sqrt{\left[\frac{2p + \frac{z}{m}}{2 \left(-\frac{z}{m} + 2p - n \right)} \right]^2 - \frac{n}{\frac{z}{m} - 2p + n}} \right) \dots (t')$$

Уравнения (z) или (t') дают решение вопроса о движении температуры на поверхности плиты во времени при начале ее остывания в такой же общей форме, в какой уравнение (t) дает его для последующей стадии остывания плиты всей ее толщиной. Проследим степень точности этого уравнения. Взяв пример рассмотренного выше остывания

1) Первый член разложения логарифма в ряды.

бетонной плиты, когда $\Delta x = 0,05$, $\rho = 2000$, $c = 0,25$, $s = 1,125$ и $n = 4$, сопоставим показания нашего уравнения с соответствующими величинами Фурье и проф. Шмидта:

при $t =$	Шмидт	Фурье	Ур. (z)
16,67	$z = 0,626$	—	0,52
15,36	—	1,25	1,33
13,98	2,5	2,5	2,81

Как видим, точность уравнения не велика, но она вполне достаточна для той обстановки, в какой эти расчеты приходится применять в практике. Действительно, главными практическими вопросами, требующими этих расчетов, являются: величины т. н. „натопочных надбавок“ при расчете центральных отоплений и теплоемкость строительных систем. То и другое по самой обстановке дела допускают лишь крайне грубые определены. При их расчете мы вынуждены игнорировать такие обстоятельства, как наличие в рассматриваемых помещениях мебели, вообще обстановки, поглощающей тепло помимо строительных масс ограждений.

Это поглощение решительно не может быть учтено сколько-нибудь точно, а потому и в остальном расчете большая точность лишена значения. Вообще, все подобные расчеты возможны лишь в предположении некоторых упрощенных заданий. Это будет наглядно видно и в приводимых ниже в гл. 4 практических приложениях рассмотренных методов.

Для полной математической ясности всего вопроса в целом необходимо еще указать столь же общий способ определения „пограничных“ величин между двумя процессами, т. е. величин t' и z' . Первую из них мы определим, если в уравнении (n) положим $n = N$, т. е. полному числу слоев плиты и определим соответствующее t (т. е. t'). Так, для взятого примера имеем:

$$4 = \frac{1}{1,125 - 1} \left(\frac{20}{t'} - 1 \right) + 0,5; t' = 13,8^\circ,$$

Найдя таким образом t' , мы получим z' из уравнения (z). Так решается вопрос о пограничных величинах между двумя стадиями процесса, и этим заканчивается вся задача расчета поверхностных температур для процесса в его целом.

Внутренние температуры плиты (в средине ее слоев) определяются для начальной стадии по уравнению (t_n),

принимая в нем $N =$ числу действительно вовлеченных в процесс слоев (каковым и задаемся при этом).

Помимо рассмотренных вопросов о расчете температур остывания и нагрева, часто бывает необходимым определять расход теплоты при первоначальном нагреве ограждений, т.е. поглощение ее строительной массой при постепенном проникновении нагрева во внутрь последней (или соответственно — выделение теплоты при остывании). Иначе говоря, приходится определять количество поглощенной теплоты Q , как функцию времени z . Выведем относящееся сюда общее уравнение.

Возьмем моменты проникновения процесса остывания рассмотренной ранее плиты сначала до середины 1-го слоя, потом 2-го и т. д. до полной глубины плиты и определим, согласно описанному выше, создающиеся при этом темпе-

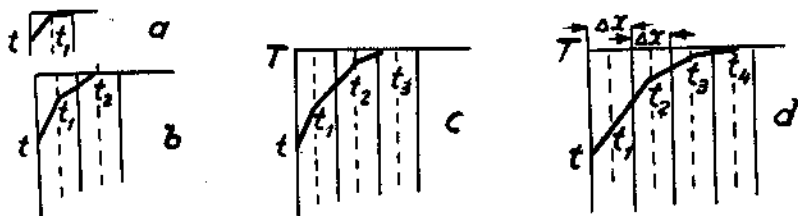


Рис. 32.

ратуры как на поверхности плиты, так и внутри ее. На рис. 32 *a, b, c* и *d* показаны, ради наглядности, четыре примера таких температурных кривых. Расчет выделенной теплоты сводится, очевидно, к определению площади фигур, ограниченных снизу указанными кривыми. Элементарный подсчет этих площадей дает нам:

$$\text{для 1-го случая } Q = c\rho \Delta x \cdot \frac{T-t}{4}$$

$$\text{„ 2-го „ } Q = c\rho \Delta x \left(T - \frac{t}{4} - \frac{3}{4}t_1 \right)$$

$$\text{„ 3-го „ } Q = c\rho \Delta x \left(2T - \frac{t}{4} - \frac{3}{4}t_1 - t_2 \right)$$

$$\text{„ 4-го „ } Q = c\rho \Delta x \left(3T - \frac{t}{4} - \frac{3}{4}t_1 - t_2 - t_3 \right)$$

Если бы в плите было большее число слоев, то, очевидно, и дальнейшие выражения для Q составлялись бы по тому же виду на данных случаях закону. Поэтому можем

вообще написать следующее выражение для выделенной (или при нагревании — поглощенной) теплоты:

$$Q = c\rho \Delta x \left(k \cdot T - \frac{t}{4} - \frac{3}{4} t_1 - t_2 - t_3 - \dots - t_k \right) \dots (Q)$$

где k есть число слоев, предшествующих последнему, захваченному процессом, а для 1-го слоя $k = 1/4$. Таким образом, когда известны температуры слоев, является возможность непосредственно определить количество выделенной теплоты от начала процесса, а следовательно — и для разных промежуточных этапов его. Как мы уже видели, это бывает иногда нужно для определения времени z , в течение которого выделено найденное количество теплоты. Для этой цели уравнение (Q) должно быть переписано в виде:

$$z \cdot a \cdot \frac{T + t}{2} = c\rho \Delta x \left(kT - \frac{t}{4} - \frac{3}{4} t_1 - t_2 - t_3 - \dots - t_k \right) \dots (Q')$$

Наконец, нас может интересовать при расчетах этого рода еще глубина проникновения процесса в плиту в функции от создающейся на поверхности температуры или от времени. Эта величина или равнозначная с ней n (число слоев, захваченных процессом) может быть определена из уравнения (n) в функции от t , а с помощью уравнения (t') также и в функции от z .

Заканчивая на этом изложение математической части метода, можем сказать, что для всякого, знающего трудности классического метода этих вычислений, ясно, в чем заключается преимущество предлагаемого: он сокращает время вычислений по крайней мере в 10—20 раз¹⁾. Эта именно легкость расчетов позволяет нам допустить себе такую роскошь, как применить их в большом числе исключительно для иллюстрации следующего вопроса: как будут выглядеть кривые внутренних температур остывания для стенок из разных материалов, с различными характеристиками λ , c , ρ ? Рис. 30-й достаточно знакомит нас с характером этих кривых для бетона — строительного материала как бы средних качеств с точки зрения указанных величин. Возьмем более крайние полюсы: с одной стороны, деревянный массив тех же размеров и при тех же заданных условиях остывания, а с другой — железный массив. Сопоставление их физических характеристик с принятыми выше для бетона приведено в нижеследующей табличке:

¹⁾ Для интересующихся укажем на пример расчета температур по методу Фурье, сделанный — G. Recknagel'ем в „Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure“ за 1901 стр. 1801, или в нашей литературе — на брошюру инж. Я. Карчевского „О влиянии теплоемкости зданий на температуру при центральных увлажнителях прядильных и ткацких фабрик“.

Материалы	λ	c	ρ
Бетон	1,0	0,25	2 000
Дерево	0,20	0,65	600
Железо	55,0	0,115	7 880

Коэффициент α принимается нами одинаковым во всех случаях. На рис. 24 и 33 приведены типы получающихся

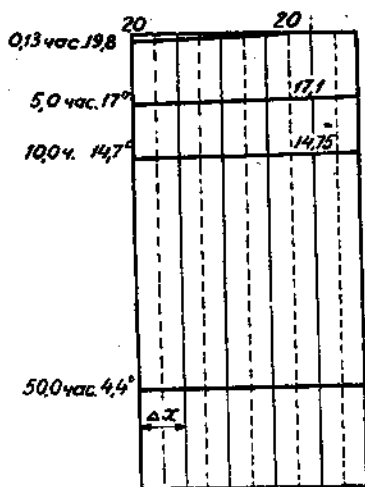


Рис. 33.

кривых для внутренних температур остывания деревянной и железной стенок, причем для первой характерна крайняя медленность углубления процесса остывания в массу стенки, сравнительно с ходом падения температуры поверхностей, и сильная кривизна линий; у второй, наоборот, кривые показывают быстрое распространение температуры во внутрь, слабое падение ее на поверхности, причем самая форма кривых весьма близка к горизонтальным прямым.

Воспроизведение подобных иллюстраций путем вычислений классическим методом потребовало бы большого труда, в силу чего, вероятно, мы почти и не встречаем их в научно-технической литературе.

Если стена состоит из нескольких разнородных составных частей — например, из двух — то для остывания ее всей массой имеем первоначально дифференциальное уравнение

$$\alpha t dz = c_1 \rho_1 \Delta_1 x \cdot N s_1 dt + c_2 \rho_2 \Delta_2 x M s_2 d\theta + \dots$$

где N и M суть числа слоев, на которые мы делим каждую из составных частей стены. Выберем толщину этих слоев так, чтобы $\frac{\Delta_2 x}{\Delta_1 x} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$; тогда $s_1 = s_2$ и $s_2 d\theta = s_1 dt$, так как согласно уравнениям (t_1) , (t_2) , (t_3) , а также ур-ия (t_n) соотношения внутренних температур в слоях зависят только от величин $\frac{\Delta x}{\lambda}$ (которые у данных материалов одинаковы) и не зависят от теплоемкости материалов. Таким образом получаем:

$$\alpha t dz = S dt (c_1 \rho_1 \Delta_1 x \cdot N + c_2 \rho_2 \Delta_2 x \cdot M + \dots),$$

откуда

$$t = t' e^{-\frac{\alpha}{s(Nc_1 \rho_1 \Delta_1 x + Mc_2 \rho_2 \Delta_2 x + \dots)}(z - z')}$$

при указанном выше условии выбора $\Delta_2 x$ относительно $\Delta_1 x$, а следовательно и числа M относительно N .

Если в стене имеется воздушный прослойка, то согласно изложенного в гл. 1 части I его можно приравнять по теплопроводности к некоторому твердому слою, а потому и ввести в рамки только что указанного расчета.

Изложенный выше метод расчета имел в виду исключительно практические цели; в нашу задачу входило дать в руки инженера-практика способ расчета, неизмеримо более простой сравнительно с классическим методом Фурье и в то же время достаточно точный для практических целей.

Но, не говоря уже о том, что и в практике иногда могут быть нужны расчеты высокой точности, данный вопрос представляет интерес и с чисто математической стороны; а именно, он теснейшим образом связан с вопросом о том, нельзя ли подобный же простой метод сделать точным в желаемой степени — попросту, вывести метод, равносильный по точности с классическим (но, конечно, имеющий гораздо более частное значение).

Ниже приводим краткие данные по этому вопросу.

Отбросим все упрощающие предпосылки предыдущего способа за исключением той, которая заключается в делении плиты на известное число слоев, с одной температурой в каждом; эту предпосылку сохраняем — тем более, что вызываемая ею неточность будет неопределенно уменьшаться по мере увеличения числа слоев в той же плите.

Начнем с формул, определяющих внутренние температуры. Сохраняя обозначения предыдущего изложения, имеем для определения температуры 1-го слоя плиты (в ее середине) уравнение, уже известное нам из предыдущего и выражающее равенство внешней теплопотери плиты и внутренней теплопередачи в ней от середины 1-го слоя на внешнюю поверхность:

$$\frac{2\lambda}{\Delta x} (t_1 - t) \cdot dz = \alpha \cdot t dz, \text{ откуда } t_1 = \left(1 + \frac{\alpha \Delta x}{2\lambda}\right) t = st \dots (t_1)$$

Для температуры 2-го слоя имеем уравнение, также известное из предыдущего:

$$\frac{\lambda}{\Delta x} (t_2 - t_1) dz = \frac{2\lambda}{\Delta x} (t_1 - t) dz - c \rho \Delta x dt_1,$$

откуда

$$t_2 = 3t_1 - 2t - c \frac{\rho (\Delta x)^2}{\lambda} \cdot \frac{dt_1}{dz}$$

Согласно уравнения (t_1) $\frac{dt_1}{dz} = \frac{sdt}{dz}$.

Величина $\frac{dt}{dz}$ (производная внешней температуры по времени) предполагает известной функцию $t = f(z)$. На основании предыдущего можем принять эту функцию в таком общем виде:

$$t = t' e^{-\frac{z}{c \rho \Delta x N_1 s} (Z - Z_1)},$$

где N_1 — есть некоторое число большее числа слоев стены. Таким образом имеем $\frac{dt}{dz} = \frac{a}{c \rho \Delta x N_1 s} \cdot t$, а для t_2 получим, после подстановки этой величины:

$$t_2 = \left(3 - \frac{\alpha \Delta x}{\lambda N_1 s}\right) t_1 - 2t = k_1 t_1 - 2t \quad \text{где } k_1 = 3 - \frac{\alpha \Delta x}{\lambda N_1 s}$$

Для t_3 подобным же образом имеем:

$$t_3 = 2t_2 - t_1 - c \rho \frac{(\Delta x)^2}{\lambda} \frac{dt_2}{dz}$$

Так как по предыдущему

$$\begin{aligned} \frac{dt_2}{dz} &= \frac{d(k_1 t_1 - 2t)}{dz} = \frac{d(k_1 s - 2)t}{dz} = (k_1 s - 2) \frac{dt}{dz} = \\ &= (k_1 s - 2) \cdot \frac{a}{c \rho \Delta x N_1 s} t, \end{aligned}$$

то, подставляя, получим:

$$t_3 = \left(2 - \frac{\alpha \Delta x}{\lambda N_1 s}\right) t_2 - t_1 = k_2 t_2 - t_1 \quad (\text{где } k_2 = k_1 - 1).$$

Так же получим и далее:

$$t_4 = k_2 t_3 - t_2; \quad t_5 = k_2 t_4 - t_3 \quad \text{и т. д.}$$

Эти весьма простые выражения для внутренних температур дадут нам их в функции от t и от N_1 . Примем сначала N_1 равным числу слоев плиты и вычислим все внутренние температуры в функции от t . Тогда для известного нам дифференциального уравнения:

$$\alpha dz \cdot t = c \rho \Delta x (dt_1 + dt_2 + dt_3 + \dots dt_n)$$

составим для суммы членов в скобках некоторое общее количество $N_2 s \cdot dt$ и получим для вычисления температур t на поверхности уравнение:

$$t = t' e^{-\frac{z}{c \rho \Delta x N_2 s} (Z - Z_1)} \dots \dots \dots (t_{N_2}).$$

В таком случае найденные выше внутренние температуры и температуры t поверхности плиты, определенные по последнему уравнению, будут для нас серией величин первого приближения. Если теперь найденное N_2 вставим в выражения для k_1 и k_2 вместо N_1 и определим вновь все внутренние температуры в функции от t , а путем сложения их по всем слоям найдем новое N_3 вместо N_2 , то вставив его в наше последнее уравнение (t_{N_1}), получим серию величин 2-го приближения. Ниже приведены результаты таких вычислений на примере рассмотренной выше бетонной плиты.

Первое приближение $N_1 = 4$		Второе приближение: $N_2 = 4,73$
$k_1 =$	2,944	2,956
$k_2 =$	1,944	1,956
$t_1 =$	1,125 t	1,125 t
$t_2 =$	1,312 t	1,326 t
$t_3 =$	1,426 t	1,467 t
$t_4 =$	1,460 t	1,543 t
$N_2 = 1 + \frac{1,312 + 1,426 + 1,460}{1,125} = 4,73$		$N_3 = 1 + \frac{1,326 + 1,467 + 1,543}{1,125} = 4,85$

Так получаем искомые температуры с желаемой точностью для периода остывания плиты всей ее массой. Аналогично этому поступаем и для начального периода, определяя в нем температуры при достижении процессом остывания середины 1-го, 2-го и т. д. слоя. Так, например, для момента достижения середины 4-го слоя будем иметь в качестве первого приближения $N_1' = N_1 - 0,5 = 3,5$; вычисляя подобно предыдущему по уравнениям для t_1 , t_2 и т. д. получим для той же плиты в этот момент:

Первое приближение		Второе приближение
$N_1' = N_1 - 0,5 = 3,5$		$N_2' = 1 + \frac{1,304 + 1,401}{1,125} = 3,4$
$k_1 =$	2,937	2,934
$k_2 =$	1,937	1,935
$t_1 =$	1,125 t	1,125 t
$t_2 =$	1,304 t	1,302 t
$t_3 =$	1,401 t	1,394 t
$t_4 =$	1,410 t	1,395 t

Приравнивая последнюю величину для t_4 к начальной заданной температуре в 20° , определим температуру t' на поверхности плиты в переходный момент к остыванию всей массы: $t' = 14,33^\circ$.

Для определения соответствующего времени z' имеем, с одной стороны, уравнение (Q_1), дающее несколько преуменьшенные значения для z' ¹⁾, с другой, аналогичное уравнение, в котором $\frac{T+t'}{2}$ заменено чрез t' , что дает несколько преувеличенные значения для z' . Взяв среднее из двух полученных, найдем для данного случая величину $z' = 1,83$ часа. Найдя t' и z' , можем проделать в числовой форме все выясненные выше операции точного исчисления. Результаты их при втором приближении сопоставлены в нижеследующей таблице с данными вычислений по уравнению Фурье и методу Шмидта.

	Фурье	Шмидт	наше ур-ие	Фурье	Шмидт	наше ур-ие	Фурье	Шмидт	наше ур-ие
0,15	—	—	1778	—	—	20	—	—	20
0,54	—	—	16,56	—	—	20	—	—	20
0,625	—	16,67	—	—	20	—	—	20	—
0,780	—	—	15,88	—	—	19,98	—	—	20
1,25	15,4	15,38	—	19,03	19,38	—	19,96	20	—
1,83	—	—	14,33	—	—	18,66	—	—	20
1,875	—	14,6	—	—	18,65	—	—	20	—
2,5	13,98	13,98	13,98	—	18,20	18,20	—	19,85	19,50
5	12,3	12,31	12,75	16,03	16,2	16,57	18,28	18,55	17,79
10	10,08	10,06	10,60	—	12,58	13,80	—	15,33	14,79
50	2,30	2,02	2,44	—	3,03	3,18	—	3,03	3,40

Из этого сопоставления мы видим, что уже при втором приближении у нас получаются величины весьма близкие к тому, что дается сопоставляемыми источниками. Однако очевидно, что этот способ менее удобен для практики, чем ранее изложенный, так как, не давая выражений для всех

¹⁾ Процесс понижения температуры поверхности идет вначале с темпом „быстрого замедления“, потому эквивалентная средняя температура будет меньше, чем $\frac{T+t'}{2}$.

внутренних температур непосредственно чрез t , он не допускает и тех обобщений, какие были возможны при приближенном способе [сравн. ур. (n) и (z)].

Глава 4. Практические применения предыдущих методов. Теплоемкость строительных ограждений.

Известный коэффициент общей теплопередачи внешних ограждений отапливаемого здания¹⁾ обеспечивает нам определенную внутреннюю температуру помещения лишь при условии непрерывного равномерного отопления, а при периодическом отоплении он обеспечивает нам лишь предусмотренную расчетом среднюю суточную температуру, нисколько не гарантируя от больших или меньших колебаний ее около этой средней величины. Между тем эти колебания, при известном размере их, представляют явную опасность в гигиеническом отношении и вполне понятные неудобства, в силу чего гигиена и ограничивает их известными пределами, т. е. предельными разностями температур за 1 сутки; у нас таковыми считаются 3° при центральном отоплении и $5—6^\circ$ — при местном. Со строительно-технической стороны величина этих колебаний температуры, относительная ее устойчивость или тепловая инерция здания, зависят от большей или меньшей теплоемкости ограждений. Последние во время сильнейшего нагревания помещений системой отопления поглощают в себе, аккумулируют известное количество теплоты (прогреваются) и тем умеряют под'ем температуры в воздухе помещения. Затем, когда отопление бездействует, а здание продолжает свою теплопотерю наружными ограждениями, эта аккумулированная теплота питает собою указанный процесс теплоотдачи вместо того, чтобы передать его тотчас же на внутренний воздух и обстановку помещения. Иначе говоря, указанной теплотой замедляется остывание ограждений, а в меру этого замедляется и охлаждение всего помещения. Поскольку же некоторые из ограждений (как окна, отчасти потолки), в силу малой своей теплоемкости, остывают быстрее и начинают охлаждать внутренний воздух и обстановку быстрее, чем остывают внутренние поверхности более теплоемких ограждений (стен, отчасти полов), то последние выделяют в помещение часть своей аккумулированной теплоты и таким образом отапливают его своим тепловым запасом. Наконец, в некоторых специальных случаях указанная только-что частичная роль ограждений выступает на первый план: в этом состоит, например, основной процесс

¹⁾ Все нижесказанное относится также и к помещениям, в которых охраняется не повышенная, а пониженная температура (холодильники, ледники и т. п.), если только все тепловые характеристики применять к ним с обратным знаком (согревание—охлаждение и т. п.).

в тепловых регенераторах при металлургических печах и других промышленных устройствах, а в обыкновенных постройках нечто подобное создается в нагревательных камерах духовых отоплений во время впуска в них воздуха при бездействии калорифера, в обогревательных печных каналах для „внутренней циркуляции“ воздуха и т. п., наконец — просто при проветривании комнат зимой форточками, когда впущенный в комнату холодный воздух обогревается аккумулярованной теплотой ограждений и обстановки.

Но само сабою разумеется, что в меру своей полезности для последующих периодов перерыва в отоплении теплоемкость ограждений замедляет нагрев помещения данной системой отопления — и если этот нагрев должен по заданию осуществляться в более или менее ограниченный период времени, то соответственно степени этого ограничения требуется увеличенная мощность системы сравнительно с расчетом ее на поддержание уже достигнутой температуры; это совершенно аналогично тому, что тяга паровоза для первоначального смещения поезда должна быть больше нормальной его тяги, так как при увеличении скорости энергия аккумулируется в виде живой силы движения.

Соответствующий расчет добавочной нагрузки, а потому и мощности системы отопления (особенно котла), основан также на учете теплоемкости ограждений.

Но эта последняя теплоемкость далеко не всегда пропорциональна физической теплоемкости ограждений. Особенно это нужно сказать о неоднородных строительных конструкциях частей здания, каковые обычно и имеются в наших постройках (полы, потолки, часто и стены). На их теплоемкость в указанном выше смысле влияют не только теплоемкость их материалов в смысле физики, но и способ расположения этих материалов в ограждении, взаимное положение слоев большой и малой теплопроводности — словом, конструкция ограждения; так что ограждения, составленные из одних и тех же материальных слоев, но с различным их расположением относительно друг друга, могут иметь различие в два и более раза в смысле своей способности аккумулировать теплоту внутреннего помещения (в виду возможности ее притекания лишь с одной стороны) и оказывать ею умеряющее влияние на температуру воздуха в периоды бездействия отопления. Поэтому в дальнейшем уместно говорить об особой строительно-технической теплоемкости ограждений в отличие от теплоемкости в общем смысле физики.

Еще удобнее называть первую полезной или активной теплоемкостью ограждения.

Таким образом учет полезной теплоемкости строительных частей необходим главным образом для двух целей: во-первых, для соблюдения в строительстве упомянутой выше

гигиенической нормы температурных колебаний в жилых помещениях, а во-вторых— для правильного расчета центральных систем отопления по максимальной нагрузке, задаваемой теплоемкостью здания.

Мы начнем относящиеся сюда расчеты с первого рода заданий, как более общих.

Пока строительство протекало в известных традиционных формах, по одним и тем же конструкциям ограждений—как, например, наши бревенчатые стены и сплошные кирпичные кладки в $2\frac{1}{2}$ кирпича, можно было обходиться без всяких расчетов теплоемкости; многовековой опыт давал здесь гарантии за им же установленные приемы. Но при переходе к облегченному и удешевленному строительству с новыми, непривычными конструкциями стен, полов, потолков, знание этих расчетов становится необходимым примерно в такой же мере, как учет теплопроводности новых систем. Одновременно происходящие изменения в технике отопления, особенно печного, еще более усиливают эту необходимость; ибо ясно, что различная теплоемкость систем отопления и продолжительность периодов их действия должны находиться в самой тесной связи с полезной теплоемкостью ограждений.

Но вопрос о количественном определении последней предполагает прежде всего отсутствие разногласий в понимании существа этой величины, ее общего мерила. Ниже мы будем понимать под полезной теплоемкостью строительного ограждения его способность аккумулировать в себе большее или меньшее количество теплоты со стороны охраняемой температурной зоны¹⁾ и соответствующую этому способность к более или менее медленному остыванию конструкции при перерывах отопления. Этим определяется и его защитная роль при указанных перерывах в отношении охраняемой внутренней температуры.

При таком понимании термина полезной теплоемкости расчет ее сводится к расчету скорости остывания ограждений и, конечно, главным образом в смысле понижения температуры по их внутренней поверхности, непосредственно влияющей на температуру внутреннего воздуха и угрожающей нам конденсацией его паров.

Расчет этот может быть произведен по одному из методов, изложенных в предыдущих главах. Конечно, и здесь классический метод Фурье оказывается основным, но в то же время слишком сложным и практически неудобным, в силу чего приходится говорить лишь о более простых приближенных способах.

¹⁾ В холодильнике этому соответствует аккумуляция холода в массе ограждения со стороны охраняемой зоны.

По методу проф. Шмидта способ расчета вполне ясен, несмотря на то, что сам автор не занимался специально таким именно его применением. Для определения скорости остывания ограждения надо, очевидно, построить или подсчитать последовательные этапы его внутренних температур и отметить время, когда этот процесс снижения температур распространится, начиная с наружной поверхности ограждения, до его внутренней поверхности — момент, соответствующий диаграмме температур рис. 32*d*. Время, соответствующее этому моменту, будет первой показательной величиной для скорости остывания ограждения; чем оно больше, тем больше полезная теплоемкость последнего, его охранительное значение для внутренней температуры. Другой интерес представляет дальнейший процесс: скорость снижения внутренней поверхности ограждения при продолжающейся теплоотдаче внешней поверхностью; не давая по существу ничего нового, эти соотношения лишь дополняют первую характеристику, делают более наглядным темп остывания и его воздействие на внутреннюю температуру.

Пусть, например, нам надо определить эти данные для бетонного ограждения толщиной 0,20 м, предварительно прогретого на 20° выше окружающего воздуха и имеющего те физические характеристики, какие были приняты для бетонной плиты в примерах главы 2 и 3. В таком случае, строя или рассчитывая кривые температур по методу Шмидта (см. гл. 2, рис. 30 и табл. на стр. 100), мы найдем, что процесс охлаждения достигнет внутренней поверхности плиты в 0,20 м (или середины плиты в 0,4 м) приблизительно чрез 2 часа, а следующее понижение температуры внутренней поверхности на 1° получается приблизительно еще чрез 2 часа (при разности температур наружной поверхности плиты и воздуха около 14°).

Способ этот имеет уже известное нам неудобство, а именно, требует определения всех промежуточных температур чрез известные промежутки времени.

По нашему способу аналитических уравнений те же интересующие нас величины определяются непосредственно для желаемых моментов. Для демонстрации возьмем, вместо прогретой равномерно бетонной плиты, более реальный пример наружной стены в ее обычном для зимы температурном состоянии.

Возьмем стену теплого помещения толщиной в 1½ кирпича (37,5 см), находящуюся в устойчивом температурном состоянии при внешней температуре — 20° Ц и внутренней +20° Ц (рис. 34). Температура наружной поверхности стены, согласно обычному расчету, будет — 17,5°, а внутренней +13,02°. Взяв в стене 7 слоев ($N=7$, $\Delta x=0,055$ м), будем иметь обозначенные на рисунке превышения их внутренних

температур пад наружной. Возьмем еще следующие значения характеристических величин: $c = 0,20$, $\rho = 1600$, $\alpha_2 = 20^1$, $\lambda = 0,60$. Предположим теперь, что эта стена перестала получать теплоту от внутреннего воздуха и начала остывать. Тогда через некоторое время (z') ее внутренние температуры, при той же внешней, расположатся по типичным для остывания кривым и, на основании уравнения (t_n), будут иметь следующие величины:

$$t_1 = s t, \text{ где } s = 1 + \frac{\alpha_2 \Delta x}{2\lambda} = 1,92;$$

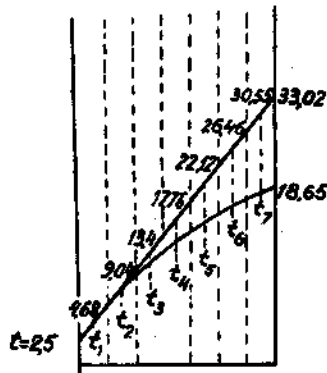


Рис. 34.

след.

$$t_1 = 1,92t = 4,8^\circ; \quad t_2 = (3s - 2 - \frac{2(s-1)}{7}) \cdot t = 3,5t = 8,75^\circ.$$

Таким же образом

$$t_3 = 4,81t = 12,02^\circ; \quad t_4 = 5,87t = 14,67^\circ;$$

$$t_5 = 6,67t = 16,65^\circ; \quad t_6 = 7,19t = 17,98^\circ$$

и $t_7 = 7,46t = 18,65^\circ$.

Падения температур после их начального состояния будут следующими:

$$\Delta t_1 = -0,12^\circ; \quad \Delta t_2 = 0,29^\circ; \quad \Delta t_3 = 1,38^\circ; \quad \Delta t_4 = 3,09^\circ; \quad \Delta t_5 = 5,47^\circ;$$

$\Delta t_6 = 8,50^\circ$ и $\Delta t_7 = 12,19^\circ$.

На основании уравнения (dt_n) время остывания z' до рассматриваемого состояния температур определится следующим образом:

$$t \cdot z' \cdot \alpha = c_2 \Delta x (\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_7),$$

откуда

$$z' = \frac{0,20 \cdot 1600 \cdot 0,055}{2,5 \cdot 20} \cdot 30,8 = 10,84 \text{ час.}$$

Так как температура внутренней поверхности падает за это время на $12,19^\circ$, то в среднем понижение ее на 1° требует времени

$$z = \frac{10,84}{12,19} = \infty 0,9 \text{ часа.}$$

¹⁾ Коэффициент теплопередачи с внешней поверхности стены к прилегающему воздуху.

Заметим здесь же, что после установления данной кривой температур в стене — дальнейшее остывание ее будет происходить в составе всей ее массы и по обеим поверхностям, а потому оно будет более медленным. Действительно, оно вычисляется по уравнению (t), где для данного случая надо положить:

$$t' = 2,5, N = \frac{1,92 + 3,5 + 4,81 + 5,87 + 6,67 + 7,19 + 7,46}{1,92} = 19,5, \text{ а } z', \text{ при отсчете времени } z \text{ от момента установления нашей кривой, надо принять } = 0. \text{ Взяв } z = 1 \text{ часу получим:}$$

$$t = 2,5e^{-0,03020} = 2,425^\circ,$$

т.е. имеем падение температуры наружной поверхности на $0,075^\circ$. По внутренней поверхности оно будет:

$$\Delta t_7 = 7,46 \cdot 0,075 = 0,56^\circ.$$

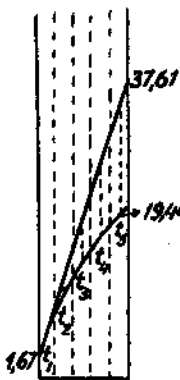


Рис. 35.

Следовательно, в этой стадии понижение на 1° по внутренней поверхности происходит в $\frac{1}{0,56} = 1,8$ ч.

Рассчитаем теперь аналогичные величины для деревянной стены толщиной $0,15$ м при тех же температурах зон и при величинах: $c = 0,45$, $\rho = 600$ и $\lambda = 0,14$. Температура наружной поверхности стены будет в данном случае $-18,33^\circ \text{Ц}$ и внутренней $+17,5^\circ$. Разделив стену на 5 слоев по $0,03$ м каждый, будем иметь превышения ее температур над наружной, обозначенные на рис. 35.

Внутренние температуры, при $s = 1 + \frac{20 \cdot 0,03}{2 \cdot 0,14} = 3,14$, будут следующие:

$$t_1 = 3,14 t = 5,24^\circ; t_2 = 6,56 t = 10,94^\circ; \\ t_3 = 9,12 t = 15,2^\circ; t_4 = 10,82 t = 19,0^\circ \text{ и } \\ t_5 = 11,66 t = 19,44^\circ,$$

а их падения будут:

$$\Delta t_1 = 0,31^\circ, \Delta t_2 = 1,48^\circ, \Delta t_3 = 4,39^\circ, \Delta t_4 = 7,76^\circ \text{ и } \\ \Delta t_5 = 14,49^\circ.$$

В таком случае

$$z = \frac{0,45 \cdot 600 \cdot 0,03}{1,67 \cdot 20} \cdot 28,13 = 6,8 \text{ ч.},$$

а на 1° понижения температуры внутренней поверхности

$$z = \frac{6,8}{14,49} = 0,47 \text{ ч.}$$

Аналогичное вычисление для последующего остывания всей стены дает нам падение температуры на ее внутренней поверхности за 1 час на $1,17^\circ$.

Таким образом полезная теплоемкость кирпичной стены взятой толщины оказывается большей, чем у деревянной при их начальном остывании в $\frac{0,9}{0,47} = \approx 1,9$ раза, а при последующем длительном — в $\frac{1,17}{56} = \approx 2,1$ раза. В среднем имеем превышение в 2 раза.

Проделав подобные операции с разными конструкциями стен и перекрытий, мы можем составить таблицы относительных величин их полезной теплоемкости. В случае желания проверить в этом отношении какую-либо новую конструкцию, строитель легко произведет подобный расчет для нее и, сопоставив полученную величину с табличными величинами для обычных конструкций, может судить о достоинствах в данном отношении новой системы. Чем меньшая получится величина полезной теплоемкости ограждения, тем более равномерной по своему действию должна быть система отопления проектируемого здания.

Другим случаем проявления полезной теплоемкости ограждений будет тот, когда при неизменной внутренней температуре помещения быстро изменяется наружная. Предположив это изменение мгновенным, можем рассчитать, во сколько времени оно достигнет внутренней поверхности стены при той или другой ее конструкции.

Пусть, например, стена, изображенная на рис. 34, претерпевает быстрое понижение температуры наружного воздуха на 5°Ц . Тогда все относительные температуры в стене увеличатся на 5° и будут такими, какие представлены верхней прямой на рис. 36. Температуры в стене будут снижаться постепенно от слоя к слою, пока достигнут внутренней поверхности стены (сравни рис. 32 *a, b, c* и *d*).

По уравнению (t_n) имеем при $N=6,5$:

$$t_1 = 1,92 t; t_2 = 3,48 t; t_3 = 4,76 t; t_4 = 5,76 t;$$

$$t_5 = 6,48 t; t_6 = 6,92 t \text{ и } t_7 = 7,08 t.$$

Полагая $t_7 = 7,08 t = 7,5^\circ$, имеем $t = 1,06^\circ$. Это — наружная температура стены при достижении остыванием середины

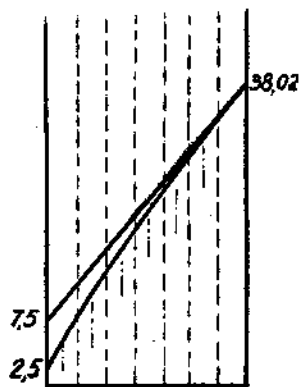


Рис. 36.

последнего (во внутрь) слоя. Абсолютные величины превышений внутренних температур над внешней будут¹⁾:

$$t_1 = 2,04^\circ; t_2 = 3,69^\circ; t_3 = 5,05^\circ; t_4 = 6,11^\circ; t_5 = 9,87^\circ; \\ t_6 = 7,34^\circ.$$

По уравнению (Q'):

$$z \cdot 20 \cdot \frac{7,5 + 1,06}{2} = 0,20 \cdot 1600 \cdot 0,055 \times \\ \times (6,75 - \frac{1,06}{4} - \frac{1}{4} \cdot 2,04 - 3,69 - 5,05 - 6,11 - 6,87 - 7,34),$$

откуда

$$z = 2,9 \text{ часа.}$$

Произведя такой же расчет для взятой выше деревянной стены при $N = 4,5$, получим $z = 1,45$ ч. т.-е. получим в общем такое же соотношение теплоемкостей, как и в первом случае остывания.

Если от этих примеров расчета подойти к более общему вопросу о том, чем же именно определяется полезная теплоемкость ограждений, от каких величин и как она зависит, то ответ на это мы получим рассмотрением уравнения (z) стр. 112. Из него видно, что полезная теплоемкость, понимаемая в смысле длительности остывания ограждений, пропорциональна массивности ограждения ($ср \Delta x \cdot n$), но уменьшается с увеличением его внутренней теплопроводности λ (скрытой в величине z), стало быть, и с увеличением коэффициента общей теплопередачи.

Это показывает, что, облегчая конструкции ограждений в удешевленном строительстве, мы должны для поддержания на некотором уровне их полезной теплоемкости (для замедления остывания их при перерывах отопления) уменьшать коэффициент их внутренней теплопроводности или общей теплопередачи. Практика инстинктивно и пошла в этом направлении, делая, например, бревенчатые стены всегда с меньшим коэффициентом „ k “, чем кирпичные, или вводя, вместо тяжелых материалов, легкие термоизоляционные всегда с меньшим „ k “.

Но для практики приведенные расчеты все еще могут казаться слишком сложными. Поэтому нами предложен еще более простой метод, основанный на некоторых условных упрощающих предположениях. Именно, допустим, что при остывании ограждения внутренние температуры его

¹⁾ Это независимо от температур, созданных первоначальным прогревом состоянием стены, см. рис. 32*d*. В данном случае $7,5^\circ - t_n$ будут ординаты между верхней прямой (рис. 36) и нижней кривой.

(см. рис. 37) имеют диаграммы не криволинейные, как показывает, например, рис. 30, а в виде наклонных прямых. Пусть в начале наблюдения это была прямая AB , а затем, когда при остывании снизилась температура внутренней поверхности при неизменной (почти) наружной, прямая снизилась в AC . Иначе говоря, мы условно берем как бы два соседних устойчивых температурных состояния ограждения, вместо реально имеющих неустойчивых и криволинейных.

Это сильнее всего упрощает все дело. По площади треугольника ABC мы сразу получаем все тепловыделение стены во время указанного процесса, а зная среднюю теплоотдачу за то же время наружной поверхностью стены, легко определим время остывания стены при понижении температуры ее внутренней поверхности на величину BC .

Действительно, взяв в качестве стандарта снижение этой последней температуры на 1°Ц ., имеем тепловыделение стены $c \cdot \rho \cdot X \cdot 0,5 \text{ кал.}$, где c — теплоемкость материала, ρ — вес 1 куб. м его, X — толщина стены и $0,5$ — среднее снижение ее температуры за рассматриваемый процесс; все же написанное выражение представляет площадь треугольника ABC , умноженную на физические характеристики стены $c \cdot \rho$. Обозначив продолжительность процесса чрез z час. и приняв во внимание, что за это время стена передала наружу количество теплоты, равное $k \cdot (T_a - T_n) z$, имеем:

$$k(T_a - T_n)z = c \cdot \rho \cdot X \cdot 0,5.$$

Так как остывание стены предполагается при полном прекращении притока теплоты от внутреннего воздуха, то правильнее брать разность температур, вместо $(T_a - T_n)$, $t_a - T_n$, т. е. разность их между внутренней поверхностью стены и наружным воздухом; кроме того эту величину надо снизить еще на $0,5^\circ$ в качестве среднего изменения внутренней температуры за данное время. Соответственно этому и коэффициент теплопередачи должен быть взят больший — без учета сопротивления $\frac{1}{\alpha_a}$; назвав его через k' , имеем:

$$k'(t_a - T_n - 0,5)z = c \rho X \cdot 0,5,$$

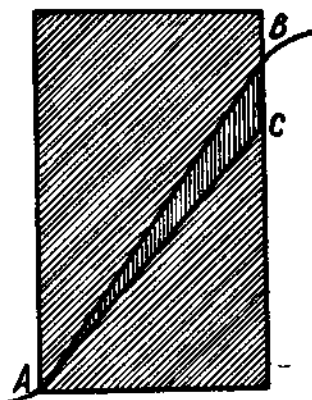


Рис. 37.

откуда

$$z = \frac{c \rho X 0,5}{k' (t_s - T_n - 0,5)},$$

где

$$k' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{X}{\lambda}},$$

а t_s определим по известному уже нам принципу равенства частных теплопередач общей:

$$(T_s - t_s) \alpha_s = k (T_s - T_n).$$

Приняв

$$T_s = +20^\circ, T_n = -30^\circ \text{ и } \alpha_n = 20, \alpha_s = 5$$

и для кирпичной кладки

$$c = 0,20, \rho = 1600, \lambda = 0,70, X = 0,70,$$

получим

$$k = 0,83, k' = 0,95, t_s = +14,3^\circ \text{ и } z = \infty 2,7 \text{ час.}$$

Для стены в $1\frac{1}{2}$ кирпича ($x = 0,4 \text{ м}$) таким же образом получим:

$$k = 1,3, k' = 1,6, t_s = 10,7^\circ, \text{ а } z = \infty 1,0 \text{ ч.}$$

Для деревянной массивной стены $X = 0,20 \text{ м}$ при

$$\lambda = 0,15, c = 0,45 \text{ и } \rho = 600 \text{ кг}$$

найдем

$$k = 0,63, k' = 0,7, t_s = 15,4^\circ \text{ и } z = 0,83 \text{ ч.}$$

Если сравним полученные величины времени остывания с вычислениями по предыдущему более точному способу, то увидим, что для начальных стадий остывания здесь получаются преувеличенные величины времени, а для последующих стадий остывания полной толщиной ограждения — преуменьшенные. Но относительные значения их — например, в отношении к нормальной стене в $2\frac{1}{2}$ кирпича — весьма близко согласуются между собою.

Это последнее обстоятельство и дает нам возможность применять данный наиболее упрощенный способ к определению относительных величин времени остывания и, следовательно, полезной теплоемкости разных ограждений. Так, приняв за 1 полезную теплоемкость стены в $2\frac{1}{2}$ кирпича старого размера, получим для стены в $1\frac{1}{2}$ кирпича полезную теплоемкость 0,37 и для деревянной 0,31 (в отношении стены в $2\frac{1}{2}$ кирпича нового размера это последнее будет 0,37).

Для стен, составленных из нескольких слоев разнородных материалов, для применения этого метода требуется предварительное определение внутренних температур в разделительных плоскостях между слоями стены. Пусть, например, даны нам стены, представленные на рис. 38 и 39, из которых первая состоит из кладки в $1\frac{1}{2}$ кирпича и наружного изоляционного слоя (торфяной плиты) толщ. в 5 см, а вторая из тех же слоев, но с расположением плиты с внутренней стороны стены. Примем для плиты $\lambda = 0,10$, $c = 0,20$, $\rho = 300$.

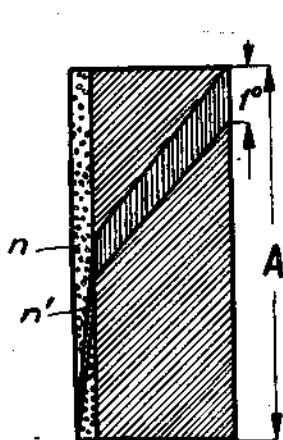


Рис. 38.

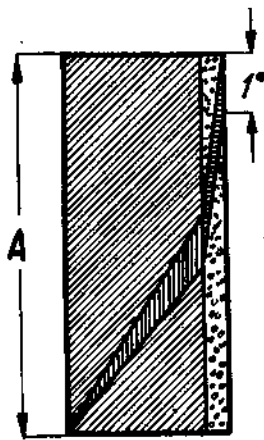


Рис. 39.

Определим при этих условиях: $k = 0,80$, $k' = 0,90$, $t_s = 14,3^\circ$. Температура точки n в стене рис. 38 определится обычным способом и получится равной $-8,6^\circ$. При понижении внутренней температуры на 1° такое же вычисление даст для точки n' температуру $-9,2^\circ$, т. е. имеем понижение здесь на $0,6^\circ$. В силу этого для определения времени остывания на 1° имеем (если обозначим величины c, ρ, X для кирпичной кладки и изоляционной плиты с соответствующими значками):

$$z = \frac{c_1 \rho_1 \cdot X_1 \cdot \frac{1 + 0,6}{2} + c_2 \rho_2 \cdot X_2 \cdot \frac{0,6}{2}}{k' (t_s - T_n - 0,5)} = \frac{102,4 + 0,90}{39,4} \approx 2,6 \text{ ч.}$$

В составе числителя последней дроби видим, что изоляционная плита почти ничего не дала непосредственно для увеличения полезной теплоемкости стены; но благодаря

ее защитному влиянию массивная часть конструкции содержится все время при высокой температуре, включая и часть ее близ изоляции; затем именно на эту теплоемкую часть приходится главное падение температуры, а потому при остывании она выделяет большое количество теплоты для питания наружной теплоотдачи вместо того, чтобы это делалось за счет внутренней теплоты помещения. В результате данная стена, несмотря на свою гораздо меньшую массу сравнительно с обыкновенной стеной в $2\frac{1}{2}$ кирпича, имеет почти равную ей полезную теплоемкость. Это служит наглядным примером того, насколько не совпадают иногда между собой понятия полезной теплоемкости и теплоемкости в смысле физики.

Если аналогичным путем определим соответствующие величины для стены рис. 39, то получим: температура в точке $n = -5,7^\circ$, а в $n' = -6,4^\circ$, т. е. имеем понижение на $0,7^\circ$. Поэтому

$$z = \frac{c_2 \rho_2 \cdot X_2 \cdot \frac{1+0,7}{2} + c_1 \rho_1 \cdot X_1 \cdot \frac{0,7}{2}}{k' (t_a - T_n - 0,5)} = \frac{2,5 + 44,8}{39,4} = 1,2 \text{ ч.}$$

Мы видим из этого вычисления, что изоляционная плита не только сама почти ничего не дала в смысле аккумуляции (или выделения) теплоты, но помешала этому процессу и в массивной части стены, так как, во-первых, главное понижение температуры при остывании пало на нетеплоемкую плиту, а во-вторых, теплоемкая часть все время находилась при пониженной температуре и потому принимала очень малое участие в аккумуляции теплоты. В результате полезная теплоемкость рассматриваемой стены в 2 с лишним раза менее, чем у предыдущей, хотя физический состав их одинаков.

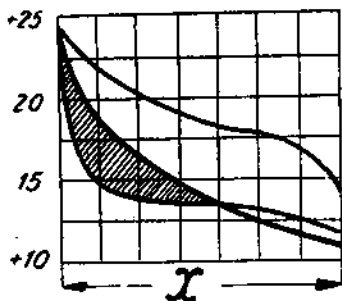


Рис. 40.

Весьма наглядную иллюстрацию влияния внутренней и внешней термоизоляции на полезную теплоемкость ограждения дает нам рис. 40, в котором приведены снятые с натуры диаграммы температур внутри наружной стены для трех случаев: нижняя кривая — при наложении термоизоляции по внутренней поверхности стен, верхняя — при

термоизоляции по наружной поверхности, а средняя — при отсутствии всякой термоизоляции. Кривые наглядно показывают различие в аккумуляции теплоты стеной, а заштрихованная часть демонстрирует величину ущерба в аккумуляции при внутренней изолировке стены сравнительно с отсутствием таковой.

Этот вывод имеет весьма большое значение для строительной практики, указывая определенные пути для увеличения полезной теплоемкости ограждений и для получения в проектируемых помещениях более равномерной (во времени) температуры. Если прямое расположение термоизоляционных слоев с наружной поверхности ограждений не всегда оказывается удобным и целесообразным с других точек зрения (прочности, пожарной безопасности), то, несомненно, имеются многочисленные отдельные возможности для применения выведенного выше принципа. Так, одним из видов термоизоляционных слоев являются воздушные прослойки. Из предыдущего можно заключить, что наиболее выгодным будет расположение их около внешней поверхности ограждений. Это — с точки зрения увеличения полезной теплоемкости последнего. Выше, в главе 1 ч. I мы видели, что и в отношении теплопроводности желательнее такое же расположение (для уменьшения величины c , см. гл. 1 ч. I). Наконец, там же мы упоминали, что такое же расположение выгодно в том отношении, что масса стены предохраняется подобными прослойками от увлажнения атмосферными осадками.

Другие случаи применения выведенного принципа представляются нам в конструкциях верхних перекрытий (потолков, выходящих в холодные чердачные помещения), где расположение термоизоляционных слоев сверху (засыпок, настилов) не представляет затруднений. Более детально эти данные изложены в части III.

Во многих случаях возможно и в стенах применение термоизоляционных наружных облицовок, если покрывать их более прочными и негоряемыми листами — металла, асбестово-цементного шифера. Это особенно относится к холодильникам, причем в случае металлических облицовок должны быть приняты меры против конденсации под ними паров зимою (см. гл. 3 ч. I и гл. 1 ч. III).

Наконец, во многих случаях имеет выгоды расположение термоизоляции в середине ограждения, вместо расположения ее по внутренней поверхности. Выделяя для аккумуляции теплоты при отоплении лишь одну половину ограждения, эта термоизоляция увеличивает зато интенсивность аккумуляции в форме высокой температуры выделенного слоя, даже в частях его, прилегающих к середине ограждения. Это дает в общем некоторый средний выход в решении вопроса о по-

вышений полезной теплоемкости ограждения без вреда для других строительных интересов.

Не останавливаясь здесь на практических деталях, отметим, что крайняя простота изложенного метода чрезвычайно расширяет сферу его применения. Так как определение внутренних температур в разделительных плоскостях составного ограждения не представляет затруднений даже и при наличии воздушных пустот, то метод легко применим ко всяким строительным ограждениям—стенам и перекрытиям. На рис. 41 приведена графическая иллюстрация расчета полезной теплоемкости пустотелой стены, состоящей из наружной стенки в $\frac{1}{2}$ кирпича, воздушной прослойка в 0,07 м и внутренней стенки в 1 кирпич. Самый расчет дает нам для этого случая $z \approx 0,63$ (относительно стены в $2\frac{1}{2}$ кирп.).

Подобным же образом могут быть исчислены характеристические величины для всех обычных конструкций, тепловой эффект которых нам уже известен из практики, а затем и для новых конструкций, которые мы хотим сравнить в этом отношении с прежними или проверить их достаточность. В качестве санитарно-технического минимума следует применять величину полезной теплоемкости массивной деревянной стены, т.е. по приведенной выше системе—величину 0,37.

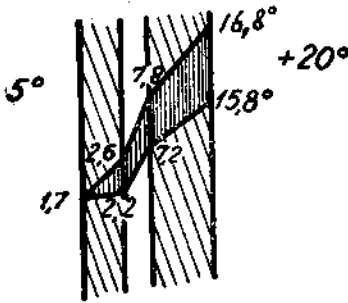


Рис. 41.

Легкость метода позволяет учесть при его помощи в грубых чертах также и совместное действие разных ограждений здания на его тепловой режим.

Действительно, предположим, что по прекращении подачи теплоты отоплением и другими источниками здание начало остывать и понизило температуру внутренних поверхностей всех своих холодных ограждений на 1° . Тогда имеем при этом процессе общее выделение теплоты ограждения в следующем виде:

$$Q = \Sigma F_N W_N.$$

Здесь F_N есть площадь каждого из N ограждений, а W_N —количество выделяемой им теплоты при понижении температуры внутренней поверхности на 1° , т.е. величина, соответствующая числителем приведенных выше выражений для z ; эти числители, как мы знаем, несколько различны для сплошных конструкций и для составных, но всегда могут быть легко вычислены согласно изложенному выше. Внутренние ограждения (стены, перегородки) должны также

входить в расчет. С другой стороны, теплоотдача наружными поверхностями всех ограждений рассчитывается также по известным уже приемам и может быть выражена формулой:

$$Q = \Sigma F_n k'_n \cdot (t_n - T_n - 0,5) \cdot z.$$

Здесь k'_n суть коэффициенты теплопередачи разных ограждений от внутренней поверхности к наружному воздуху, t_n — соответствующие температуры внутренней поверхности каждого ограждения при заданных расчетных температурах, T_n — расчетные наружные температуры для каждого ограждения (различные, как известно, для стен, полов и потолков) и z — искомое время остывания. Приравнивая величину освобождаемой ограждениями теплоты и величину теплопотери, имеем:

$$\Sigma F_N W_N = \Sigma F_n k'_n (t_n - T_n - 0,5) \cdot z,$$

откуда

$$z = \frac{\Sigma F_N \cdot W_N}{\Sigma F_n k'_n (t_n - T_n - 0,5)}$$

Мы применили этот метод к случаю остывания одного из опытных домиков, испытывавшихся под руководством норвежского проф. Бугге при Норвежской Высшей Технической Школе в 1922 г. (см. ч. I гл. 2), а именно, домика с конструкцией стен по рис. 42 (№ 6 по наименованию опытов) причем, в силу очень малой величины домика, пришлось предварительно учесть расчетом влияние углов и аналогичных пересечений¹⁾. Мы получили $z = 0,48$ час.; по наблюдениям же в опытах отмечено, что температура в домике, по прекращении нагрева его электрической печью, снизилась за первые 5 час. на $10,2^\circ$. Из этого видно, что имеется довольно близкое соответствие между теоретическими вычислениями и опытом.

Переводя подсчет на язык высшей математики, мы имеем для 1 кв м какого-либо наружного ограждения следующее само собою понятное дифференциальное уравнение:

$$k' (t_s - T_n) \cdot dz = W dt_s,$$

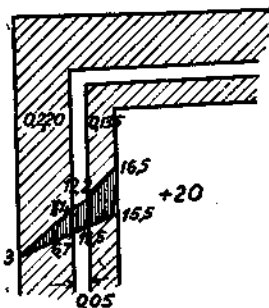


Рис. 42.

¹⁾ Этот расчет, как и все детали метода, приведены в нашей брошюре "Теория активной теплоемкости жилых зданий" 1925 г. изд. Гл. Упр. Ком. Хоз.

которое по интегрировании дает нам:

$$t_s = T_n + (t'_s - T_n) e^{-\frac{k'}{W} z}$$

причем t'_s — есть начальная заданная температура внутренней поверхности ограждения, а t_s — искомая чрез z часов.

Для случаев учета целой совокупности ограждений какого-либо помещения с площадями их F_n надо, очевидно, величину k' заменить чрез $\Sigma F_n k'_n$, а W — чрез $\Sigma F_n W_n$. Этот переход представляет еще то затруднение, что разность температур $(t'_s - T_n)$, вполне определенная для отдельного ограждения, является различной в отношении разных ограждений при их совокупности. Чтобы миновать это затруднение и представить всю совокупность ограждений, как некоторое единое ограждение со средними теплотехническими свойствами и с одной расчетной разностью температур, можем в разности $t'_s - T_n$ изменить последнюю величину на θ_n так, чтобы это компенсировало все упомянутые различия. Очевидно, θ_n определится из уравнения:

$$(t'_s - \theta_n) \Sigma F_n \cdot k'_n = F_1 \cdot k'_1 (t''_s - T''_n) + F_2 \cdot k'_2 (t'''_s - T'''_n) + F_3 \cdot k'_3 \cdot (t''''_s - T''''_n),$$

где t'_s — есть начальная температура внутренней поверхности стен, t''_s — полов, t'''_s — потолков, а F , k' и T_n с соответствующими значками суть их площади, коэффициенты теплопередачи и расчетные температуры с холодной их стороны. Тогда имеем для такого комбинированного ограждения:

$$t_s = T_n + (t'_s - \theta_n) \cdot e^{-\frac{\Sigma F_n k'_n}{\Sigma F_n W_n} z}$$

Рассчитывая по этой формуле остывание опытного домика № 6 в норвежских опытах при $T_n = -1^\circ$ и $t'_s = 16,3^\circ$ ¹⁾, мы получили $\theta_n = T_n = -1^\circ$, $\Sigma F_n \cdot k'_n = 40$ и $\Sigma F_n W_n = 675$, после чего для наблюдавшихся там моментов времени $z = 5$ час., $z = 10$ ч. и $z = 15$ ч. получили температуры внутренних поверхностей (они же и воздуха²⁾) соответственно $11,8^\circ$, $8,5^\circ$ и 6° .

¹⁾ Определенная нами обычным путем по заданной в опытах температуре внутреннего воздуха в 20°Ц и наружно -1°Ц .

²⁾ Действительно, в столь малом остывающем домике без всяких внутренних предметов и при ничтожной теплоемкости воздуха, после полного прекращения толки (электр. током), прекращается процесс перехода теплоты от воздуха на стены, а потому нет места и связанной с этим процессом разности температур $t_s - T_s$; иначе говоря, в уравнении

$$Q = \alpha_s (t_s - T_s) = 0$$

неизбежно должно быть $t_s - T_s = 0$.

Сравнивая это с данными наблюдений, а именно $9,8^\circ$, $7,5^\circ$ и $5,9^\circ$, мы видим, что для начальных периодов времени расхождения получаются более значительными. Это и понятно, так как рассматриваемый метод совершенно не учитывает начальных стадий охлаждения, когда кривые понижений температуры еще не проникли во всю толщину ограждения и когда процесс идет несколько более ускоренным темпом (сравни стр. 126 и рис. 30). Эта неточность начального периода в последующем все более растворяется в больших промежутках времени при более согласном темпе процесса, и потому показания последующих моментов у теоретического расчета и у наблюдений все более сближаются между собою. Из этого особенно наглядно видим, что и весь данный метод расчета, исходящий из упрощенного представления о процессе остывания ограждения всей его массой, приложим лишь при этом последнем предположении и потому неуместен в таких расчетах, как скорость начального остывания, натопочные надбавки и т. п. Выше он и применялся главным образом как средство сличения разных ограждений в смысле их полезной теплоемкости при условии остывания всей массой или в течение достаточно длинных периодов времени, а затем при тех же условиях — для очень грубых расчетов процессов остывания целых комплексов ограждений известного помещения (пустого, без обстановки и при полном прекращении притока теплоты).

В еще более грубом виде можно применять тот же прием для расчета температурных изменений во всяком отапливаемом (или охлаждаемом) помещении, если приток (или убыль) теплоты постоянен за время наблюдения, равно как и воздействующая на здание наружная температура. Приведем пример подобного расчета.

Положим, что мы рассчитываем искусственное охлаждение вентиляцией фабричного помещения летом при тепловыделении машин и людей в количестве q кал в час и хотим проверить правильность намеченной нами силы охлаждения Q кал в 1 ч. для самой жаркой части дня. Очевидно, что если мы не будем принимать во внимание теплоемкости ограждений и внутренней нагрузки помещения, то должны будем брать Q равным сумме величин q и притока теплоты чрез внешние ограждения в тот же наиболее жаркий период дня.

Но такой выбор невыгоден, так как благодаря указанной теплоемкости мы можем допустить Q меньшим — с тем, что излишки теплоты в жаркое время будут временно аккумулярованы ограждениями и товарами (следовательно, без значительного повышения температуры внутреннего воздуха), а затем, в более прохладное ночное время, будут выделены в атмосферу. Иначе говоря, нам выгодно использовать

массу ограждений и товаров, как даровых переносчиков теплоты с одних периодов времени на другие. Проверку уменьшенного таким образом Q можем произвести следующим способом.

Назвав внутреннюю температуру (воздуха) чрез T и продолжительность наблюдения чрез z часов, можем написать следующее само собою понятное дифференциальное уравнение, выражающее тепловой баланс в помещении за элемент времени dz при повышении его внутренней температуры на dT под действием вышеупомянутых притоков теплоты и искусственного охлаждения:

$$qdz + \Sigma(T_n - T) \cdot F_n k_n dz - Q \cdot dz - \Sigma F_N W_N \cdot dT = 0.$$

Здесь $\Sigma(T_n - T) F_n k_n$ есть сумма теплопередач внешними ограждениями, причем k_n представляет их общие коэффициенты (полные, от воздуха к воздуху); величина T_n требует, конечно, той же оговорки относительно отдельных ограждений, как это мы видели ранее; величина $\Sigma F_N W_N$ уже известна нам.

Интегрируя это уравнение и введя для краткости обозначения:

$$\Sigma F_N W_N = W; q + \Sigma F_n k_n T - Q = Q_1 \text{ и } \Sigma F_n k_n = K_1$$

получим:

$$T = \frac{Q_1}{K_1} - \left(\frac{Q_1}{K_1} - T' \right) e^{-\frac{K_1}{W} z}$$

где T' — есть начальная температура в помещении. Если при заданных нам q , k_n , T , F_N и подсчитанных предварительно W_N выберем Q и получим по приведенному уравнению достаточно незначительный подъем температуры при $z = 1$ час. (например, в $0,1^\circ$ или менее), то выбранную величину Q можем считать достаточной. Подробный расчет наш по этой формуле для одного из заданий этого рода (а именно, для здания, исследованного инж. Я. Карчевским по методу Фурье в брошюре, упомянутой выше на стр. 115) читатель найдет в „Вестнике инженеров“ за 1925 г. № 11 в статье „К расчетам вентиляции на температуру“. Согласие с более точным расчетом (но неизмеримо сложнейшим и длительным) сказалось в том, что при получаемых в последнем максимальных значениях T' ¹⁾ наша формула давала почти полную стабилизацию внутренней температуры (T превосходило T' чрез 1 час. всего на $0,01^\circ$).

¹⁾ Они находились Я. Карчевским в предположении, периодически колеблющейся в течение суток наружной температуре, по методу гармонических функций Фурье, что и заняло собою всю его брошюру.

По такой же самой формуле можно проверять и необходимую силу охлаждения в холодильнике при учете теплоемкости его ограждений и товаров для уменьшения благодаря этому максимальной нагрузки холодильных машин в жаркие части дня. Но там при расчете $\Sigma F_N \cdot W_N$ имеет большее значение товарная нагрузка холодильника, каковая по своему тепловому влиянию может даже в несколько раз превосходить влияние строительных ограждений.

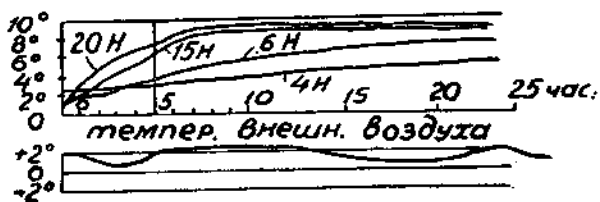


Рис. 43.

В качестве практических иллюстраций ко всем этим теоретическим расчетам могут служить: опыт проф. Э. Шмидта с нагреванием помещения, приведенный ниже в главе 5 и на черт. 47, а также наблюдения проф. Бугге в норвежских опытных домиках, причем полученные кривые поднятия в них температур при нагревании (электрическими печами), а затем кривые падения их по прекращении тока приведены на рис. 43 и 44.

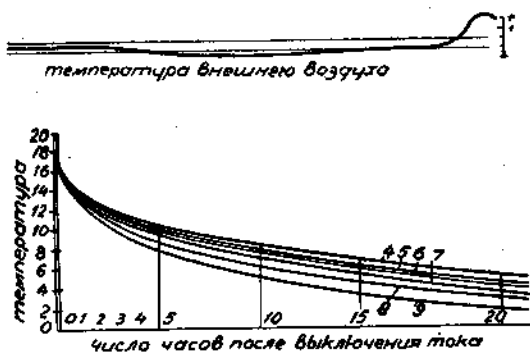


Рис. 44.

При практических расчетах влияния теплоемкости приходится постоянно пользоваться физическими величинами s и r . Приводим краткие таблицы их для наиболее обычных строительных материалов.

Теплоемкость некоторых строительных материалов (по „Hütte“ 1924 г.)

Зола	0,20	Кокс	0,20
Базальт, гранит	0,20	Мрамор, известняк	0,21
Бетон	0,27	Песчаник	0,22
Лед	0,50	Шлак	0,18
Гипс	0,20	Каменный уголь	0,31
Стекло	0,20	Кирпич	0,22
Дуб	0,57	Железо	0,115
Сосна	0,65		
Древесн. уголь	0,20		

Вес некоторых строительных материалов (в клгр на м³) по „Hütte“ 1924 г.

Земля, песок, глина	2100	Кладка из порист. пустотелого кирпича	1000
Тоже сухие	1600	„ из известков. песчаного кирпича	1800
Хрящ	2000	Раствор цементный	2100
Тоже сухой	1700	„ известк.-цементн.	1900
Коксовая зола	750	„ известковый	1700
Кладка гранитн. и т. п.	2800	Бетон с твердым балласт.	2200
„ из известк. камня	2500	Железо-бетон. „	2400
„ из туфа	2000	Бетон с кирпичн. и шлаковым балластом	1800-1600
„ из песчаника	2700	Сосна, ель и т. п.	600-700
Тоже — выдержанного	2400	Дуб, лиственница и т. п.	800-900
Кладка из клинкера	1900		
„ из кирпича	1800		
„ из порист. кирп.	1100		
„ из пустотелого кирпича	1300		

Глава 5. Натопочные надбавки.

Впервые более или менее правильный математический подход к решению этого вопроса дан проф. Шмидтом. Его теория и метод расчета натопочных надбавок заключаются в следующем.

Когда системы отопления (особенно котел и сеть центральной системы) рассчитаны только на возмещение теплотерь в установившемся состоянии внутренней и наружной температур, то при пуске системы (после некоторого перерыва и охлаждения) температура воздуха в помещении поднимается более

или менее медленно в зависимости от теплоемкости нагреваемых внутренних предметов и воздуха и от полезной теплоемкости наружных ограждений—стен, нижних полов, верхних потолков. Получающиеся при этом процессы очень сложны в смысле учета их и, как обычно бывает в подобных случаях, для упрощения дела учитывается лишь самое главное и наиболее определенное в задании. Поэтому все внутренние предметы обстановки совсем не учитываются; теплоемкость воздуха, в силу ее незначительности, учитывается только в очень больших помещениях. Остаются одни холодные ограждения и внутренние стены, которые и учитываются при некоторых упрощающих предположениях.

В зависимости от наличия того или иного типа ограждения — даже при одинаковом коэффициенте их общей теплопередачи — указанное выше повышение температуры воздуха при пуске системы отопления будет различным. При однородных стенах здесь будет оказывать влияние их материал и толщина, при составных ограждениях—также и их конструкция, расположение слоев разной теплопроводности и теплоемкости¹⁾. На рис. 45 даны примеры кривых, показывающих ход повышения температуры воздуха (во времени) при нагревании одним и тем же тепловым источником помещений со стенами равной теплопередачи, но из различных материалов. В ограждениях теплоемких повышение температуры идет гораздо медленнее, чем в конструкциях термоизоляционного характера. Если бы мы пожелали ускорить ход повышения температуры до намеченного предела (в рисунке он намечен в 20°), т.е. укоротить время нагоя, то, очевидно, пришлось бы для этого усилить источник подачи

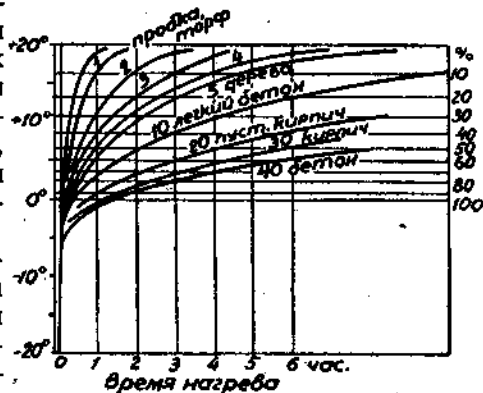


Рис. 45.

$$\delta = 2, k = 1,33$$

	x	d	c	ρ	$z = \frac{d^2}{2a}$
Бетон	1,1	0,55	0,25	2200	75
Кирпич сыр.	0,80	0,40	0,25	1750	43
сухой	0,60	0,30	0,20	1600	24
Пустот. кирп.	0,60	0,30	0,15	1200	13,5
Туф	0,40	0,20	0,20	1100	11
Легк. бетон .	0,25	0,13	0,25	800	6,25
Дерево	0,14	0,07	0,45	600	4,7
Кизельгур.					
кирпич . .	0,10	0,09	0,20	509	1,25
Пробка, торф	0,05	0,025	0,45	300	0,84

примеры кривых, показывающих ход повышения температуры воздуха (во времени) при нагревании одним и тем же тепловым источником помещений со стенами равной теплопередачи, но из различных материалов. В ограждениях теплоемких повышение температуры идет гораздо медленнее, чем в конструкциях термоизоляционного характера. Если бы мы пожелали ускорить ход повышения температуры до намеченного предела (в рисунке он намечен в 20°), т.е. укоротить время нагоя, то, очевидно, пришлось бы для этого усилить источник подачи

¹⁾ Расчет для таких конструкций не демонстрируется Шмидтом в виду его большой сложности.

теплоты приблизительно во столько раз, во сколько желаемая высота температуры (20°) превосходит получаемую в соответствующий момент при данном ограждении; иначе говоря, при заданном ограждении для получения натопочного множителя следует разделить ординату, соответствующую 20° , на ординату кривой этого ограждения для того же момента. Если затем перейти от определения множителей—к разностям или натопочным надбавкам в силе источника, то мы найдем готовый трафарет для этого определения в том ряде горизонтальных прямых, который помещен на чертеже под прямой,

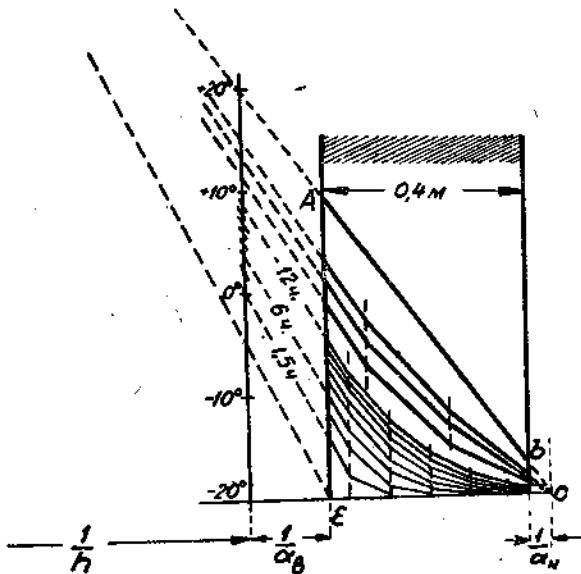


Рис. 46.

изображающей 20° , с надписями против каждой из них (справа) соответствующих надбавок. Обратимся к способу получения этих кривых, решающих, очевидно, весь вопрос о надбавках.

Для упрощения вопроса, как было уже упомянуто, предполагаем, что все ограждения данного помещения одинаковы с тем, какое подлежит исследованию в смысле своего влияния на температуру при натопе.

Представим себе, что заданное нам для исследования ограждение (например, стена в $1\frac{1}{2}$ кирпича или 0,4 м при $K=1,33$, $\alpha_B=5$, $\alpha_N=20$, $\lambda=0,4$, $\frac{\lambda}{X}=2$) находится в уравновешенном тепловом состоянии при внутренней температуре в $+20^\circ$ и наружной -20° . Пусть Ab на рис. 46 есть темпе-

ратурная линия внутри стены для этого состояния. Тогда, согласно изложенному в главе 2 этой части, касательная к этой линии в точке b — т. е. продолжение взятой прямой вправо — должна дать в пересечении с уровнем наружной температуры (-20°) точку c , отстоящую от стены на расстоянии $\frac{\lambda}{\alpha_n}$. Поэтому, отложив эту последнюю величину от

стены и проведя соответствующую вертикаль, найдем в пересечении ее с продолжением прямой Ab точку c и, следовательно, температурный уровень наружного воздуха. Подобным же образом и слева от стены, продолжив Ab до пересечения с ординатой, отстоящей от стены на $\frac{\lambda}{\alpha_a}$,

мы получим на ней точку температуры внутреннего воздуха $+20^\circ$ (измеряя от выше найденного уровня наружной температуры), а продолжив прямую bA еще далее, мы найдем в пересечении ее с уровнем температуры отопительного прибора (в данном примере 75°) точку M , соответствующую последнему¹⁾; на нашем рисунке она лежит вне размеров чертежа.

Теперь представим себе, что начальная температура всего помещения и стены равна, как и наружная, -20° и что мы начинаем прогревать это помещение, дав отопительному прибору температуру 75° (для упрощения предполагается, что это последнее сделано не постепенно, а внезапно). Тогда в начальный момент пуска прибора мы имеем, очевидно, линию температур только для воздуха, каковая изобразится прямой ME ; в пересечении последней с ординатой нормальной внутренней температуры мы будем иметь, очевидно, температуру воздуха, прилегающего к стене (на той границе слоя от стены, которая даст нам в уравновешенном состоянии нормальную температуру помещения).

Далее начинается прогрев самой стены. Строя в ней от полюса S диаграммы внутренних температур для выбранных слоев и соответственно подобранных промежутков времени (см. гл. 2)²⁾, мы будем получать соответствующие точки на внутренней поверхности стены, а соединяя их с полюсом M , получим в пересечениях с ординатой нормальных температур внутреннего воздуха соответствующие температуры прилегающего к стене воздуха в том удалении

¹⁾ Если в предыдущем мы как бы включали в состав частей стены воздух, прилегающий к стене в том слое его, в каком его температура повышается от температуры внутренней поверхности стены до его собственной нормальной температуры, то последним актом мы включаем и дальнейший слой с повышающейся температурой до самого прибора, предполагая это повышение равномерным.

²⁾ В примере рис. 46 промежутки времени были взяты по 1,5 часа до величины 12 час., после чего промежутки брались по 6 часов.

от последней, где он впоследствии даст нам нормальную температуру.

Полученные ординаты и послужат нам для построения кривых рис. 45. Взяв по оси абсцисс, соответствующей начальной температуре всего помещения и ограждений, выбранные промежутки времени, отложим по соответствующим ординатам найденные предыдущим построением высоты и соединим полученные точки плавной кривой; после этого можем иметь на оси абсцисс уже любые промежутки времени (каковые и нанесены на рис. 45 в виде 1, 2, 3, и т. д. часов). Для каждого из них видим на кривой достигаемую при нагреве температуру, а по горизонталям надбавок с их надписями справа видим, какую надбавку требовалось бы применить при данном типе ограждений, чтобы за данный промежуток времени достигалась полная нормальная температура. Так, для рассмотренной стены в $1\frac{1}{2}$ кирпича (если бы таковыми же были все ограждения в помещении) мы имеем, при нормальной влажности, кривую с цифрой 40, для которой достижение нормальной температуры в помещении в течение 3 часов при температуре нагревательных приборов в 75° требует надбавки в 80° против теплоснабжения, соответствующего уравновешенной теплопотере стены при разности температур в 40° .

Подобным же образом определяем (для сравнения) кривые и надбавки для ограждений из других материалов с той же общей теплопередачей и при тех же заданиях для начальной внутренней и наружной температур и для приборов отопления. Характеристики этих ограждений приведены в табличке при рисунке, а на самом рисунке приведены соответствующие кривые и видны требуемые ими надбавки.

По аналитическим расчетам проф. Шмидта ход нагрева ограждения ближе всего определяется величиной:

$$z = \frac{X^2}{2a}$$

где a есть известная уже нам величина — коэффициент температурной проводимости $\left(\frac{\lambda}{c\rho}\right)$. Значение z для разных ограждений приведены в той же табличке и надписаны на соответствующих кривых рисунка.

Из рассмотрения всех кривых видим, что при первоначальном пуске отопления происходит сначала поднятие температуры воздуха без всякого влияния на это ограждений; примерно до температуры -5° все кривые совпадают в одном вертикальном стволе. Это очень краткий период, особенно при небольших помещениях, в которых теплоемкостью воздуха можно пренебречь. После этого момента начинается

расхождение кривых соответственно различиям типов ограждений.

Чтобы проверить показания этих графических методов, Шмидтом в сотрудничестве с Вреде был поставлен опыт нагрева помещения с кирпичными стенами толщиной в 60 см, при чем измерялась температура воздуха во времени. Данные полученных температур приведены в виде пунктирной кривой на рис. 47, где соседняя сплошная кривая показывает результат теоретического расчета тех же температур вышеизложенным методом. Принимая во внимание влияние разных упрощающих предположений при теоретических расчетах, можно признать отклонение их от опытных данных достаточно приемлемым.

Рассмотренный выше случай нагрева помещения от -20° до $+20^{\circ}$ редко возможен в практике. Обычно нагрев при-

ходитсЯ производить не на 40° , а на гораздо меньшую величину, соответственно тем реальным понижениям температуры, которые имеют место в действительности при обычных перерывах отопления. Э. Шмидт принимает, что и надбавки уменьшаются пропорционально величине требуемого нагрева. Так, например, при нагреве на 8° (вместо 40°) для кирпичных стен по-

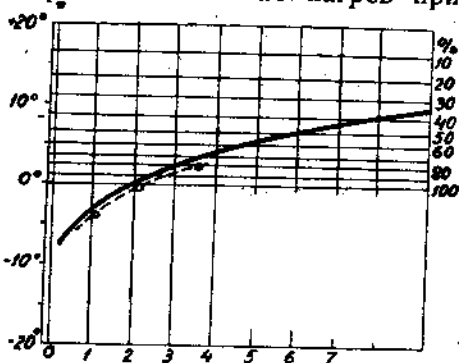


Рис. 47.

требовалась бы надбавка в $\frac{80}{5} = 16\%$ (вместо 80%)¹⁾.

Другим приближением к реальным условиям расчета является раздельность подобных подсчетов по разным частям здания: стенам, полам, перекрытиям. Исходя из обычного расчета теплопотерь для каждой из них в отдельности, можно рассчитывать отдельно и надбавки сообразно особенностям их конструкции: так полы и деревянные перекрытия могут быть приравнены к деревянным стенам (тем более, что при нагреве дает теплопоглощение главным образом лишь

¹⁾ Поэтому в нормах, составленных им по поручению Союза Промышленности по центральному отоплению (Verband der Zentralheizungs-Industrie E. T.), Шмидт дает расписание надбавок на нагрев стен разных типов в зависимости от величины перерывов отопления, при чем для наиболее длинных перерывов (в церквях, наемных залах и т. п.) надбавки близки к тому, что мы видели в предыдущем (см. „Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs und der Heizkörper- und Kesselgrößen von Warmwasser- und Niederdruckdampf-Heizungsanlagen“ Berlin, 1926, стр. 27).

внутренняя часть ограждения, обращенная в сторону помещения), и потому для них может быть использована кривая 4 или 5 в рис. 45.

При ограждениях неоднородных (составных) наибольшее значение имеет материал, расположенный по внутренней поверхности ограждения, сообразно чему и следует выбирать для такого ограждения кривую повышения температур в рис. 45.

Наконец, в очень обширных помещениях следует учитывать еще, кроме теплоемкости стен, также и теплоемкость воздуха.

Внутренние стены, перегородки и обстановка помещений обычно не учитываются с точки зрения теплопоглощения — как ради упрощения дела, так отчасти и потому, что необходимый для них подъем температуры обычно бывает меньшим, чем для наружных ограждений (они менее остывают во время перерывов). Окна и двери не учитываются в силу ничтожной их теплоемкости.

После сказанного станет в общем понятной следующая таблица на топочных надбавок, даваемая Шмидтом для практических расчетов (см. предыд. подстрочн. примеч.):

№№	Род ограждений	При непрерывном отоплении без обслуживания ночью	При работе отопления 13 час. в день	При работе отопления 9 — 12 час. в день	При продолжительных перерывах на сколько дней
1	Массивные стены из бетона или натур. камня	20	40	60	100
2	Стены из обыкновенн. кирпича или силикатн. кирпича	15	30	45	70
3	Пустотел. кирпичные или шлакобетонные стены	10	20	30	50
4	Стены из пензового бетона	5	10	15	25
5	Массивные деревянные стены	4	8	12	20
6	Пустотелые деревянные стены	2	4	6	10
7	Разные стены с внутренн. термозоляцией из пробки или торфа .	2	4	6	10

Нет нужды оговаривать, что в виду всех упрощающих предпосылок цифры этой таблицы весьма приблизительны.

Но не в этом, по нашему мнению, главный дефект норм проф. Шмидта. По существу постановки вопроса они были бы правильны лишь для случаев нагрева помещений с разными ограждениями, исходя из одной и той же начальной температуры этих ограждений и всего помещения (как в рассмотренном выше примере Шмидта с нагревом помещений от -20° Ц). Тогда — и только тогда — состав ограждений влияет исследованным способом на расход теплоты. Когда же вопрос переносится на практическую почву, где нам задаются не исходные температуры для нагрева, а периоды перерывов отопления, то надо иметь в виду, что за эти перерывы более теплоемкие ограждения (как кирпичные, бетонные и т. п.) дают нам меньшие понижения температуры в помещениях, чем нетеплоемкие ограждения, поэтому требуют поднятия ее на меньшее число градусов до нормы ($+20^{\circ}$) и, несмотря на относительно больший расход теплоты для поднятия на каждый градус, в общем требуют для восстановления температуры небольших затрат теплоты, чем ограждения противоположных свойств.

В виду этого мы полагаем, что пользование данными Шмидта для обычной практики уместно только для тех случаев, когда нагрев для всех ограждений производится с одного начального уровня температур, т. е. для некоторых из случаев, предусмотренных преимущественно последней графой приведенной выше таблицы. Для всех остальных случаев надбавки не должны зависеть от материала ограждений (как это и трактуется обычно школой Ритчеля). Тем не менее проф. Шмидту принадлежит большая заслуга в данном вопросе, который впервые переведен им на почву расчета, вместо глазомерных и гадательных приемов, основанных притом на учете не действительно полезной теплоемкости, а на данных физики.

Пишущий эти строки подошел к разрешению того же вопроса исключительно с аналитической стороны, прибегая к диаграммам только как к средству для большей наглядности и, пожалуй, еще для интерполяции. Вывод наш основан главным образом на выведенных выше наших уравнениях для процессов остывания и нагрева ограждений.

Возьмем помещение, в котором на 1 кв м поверхности некоего однородного внешнего ограждения приходится $W \text{ куб м}$ воздуха. Это помещение начинает согреваться от начальной температуры в 0° путем введения в него теплоты в количестве $Q \text{ кал}$ в час на 1 кв м ограждения. Определим прогрев ограждения, поглощение им теплоты и создающийся при этом чрез z час. тепловой режим в помещении. Обозначив чрез t_x среднюю температуру воздуха в течение рассматриваемого периода, чрез ρ_1 — вес его 1 м^3 и чрез c_1 — его теплоемкость, найдем, что в конце периода

воздух имел температуру T_x и им поглощено всего теплоты $T_x \cdot c_1 \cdot \rho_1 \cdot W$ кал. Определим теперь, сколько поглощено ее ограждением (на 1 кв м). Средняя температура воздуха t_x идентична с ранее бывшей у нас величиной T : это тот самый фактор, под влиянием которого ограждение повысило свою первоначальную температуру 0° до t° на своей внутренней поверхности ¹⁾. Из уравнения (t') в гл. 3 ч. II можем определить, при заданном z , величину t как функцию T , а именно:

$$t = k \cdot T,$$

где k обозначает кратко выражение, находящееся в уравнении (t') в скобках. Тогда поглощенная ограждением теплота выразится формулой:

$$z \cdot \alpha \cdot \frac{T+t}{2} = z \cdot \alpha \cdot \frac{T(1+k)}{2} = z \cdot \alpha \cdot \frac{t_x(1+k)}{2}$$

Таким образом, имеем:

$$T_x \cdot c_1 \cdot \rho_1 \cdot W + z \cdot \alpha \cdot \frac{t_x(1+k)}{2} = Q \dots (t_x)$$

откуда и подлежат определению величины t_x и T_x . Обычно первый член левой части этого уравнения имеет чрезвычайно малую величину сравнительно со второй ²⁾. Отбрасывая ее, имеем:

$$z \cdot \alpha \cdot \frac{t_x(1+k)}{2} = Q.$$

Величина Q есть не что иное, как проверяемая данным уравнением нагрузка отопления.

Возьмем, в качестве числового примера, задания, использованные проф. Е. Шмидтом в его вышеприведенных исследованиях. Помещение ограждено стенами с коэффициентом общей теплопередачи $K = 1,33$ при наружной температуре -20°C . Нагревается оно до 20°C внутренней температуры. В таком случае при расчетной разности температур в 40° мы имели бы после установившегося прогрева ограждений теплопотерю в 1 час, равную $1,33 \cdot 40 = 53,2$ кал. Для увеличенной нагрузки примем подачу теплоты в 1,5 раза большую; придав сюда еще 2—3 кал на нагрев W м³ воздуха, примем для проверки величину $Q = 82$ кал в 1 час. Кроме того, примем одинаково с Э. Шмидтом $\alpha = 5$ и его же величины для s и λ , а именно:

1) „Иначе говоря, ход повышения температуры t от 0° под влиянием температуры воздуха t_x математически одинаков с понижением ее у стены от $t_x(T)$ под влиянием температуры воздуха в 0° .

2) т. к. в наших жилых помещениях на 1 м³ внешних ограждений приходится обыкновенно всего от 1 до 3 м³ воздуха.

	$c =$	$\rho =$	$\lambda =$	$\Delta x =$ м
для кирпичной стены . . .	0,25	2200	1,1	0,01
" деревянной " . . .	0,45	600	0,14	0,01
" пробковой " . . .	0,45	300	0,05	0,01

Для определения средней температуры воздуха t_x за первый час полагаем в уравнении (t_x) и в выражении ур-ия (t') для $kz=1$. Кроме того, для последнего выражения легко найдем предварительно:

$$s = 1,125, m = 1,125, n = 44,05 \text{ и } p = 44,3.$$

Поэтому

$$k = 0,825.$$

Тогда из ур-ия (t_x) имеем:

$$t_x = -2^\circ (18^\circ - 20^\circ).$$

Для определения средней температуры воздуха за двухчасовой период полагаем $z=2$ и т. д. Подобным же образом делаем вычисления для деревянной и пробковой стен при величинах:

$$\text{для первой } s = 1,18, m = 0,64, n = 5,6, p = 5,85;$$

$$\text{для второй } s = 1,5, m = 0,405, n = 2,0, p = 2,25.$$

Результаты этих вычислений сведены в следующей таблице:

$z =$	Бетонн. стена.	Деревянн. стена.	Пробков. стена.
1 ч.	-2°	$+1,7^\circ$	$+5,4^\circ$
2 ч.	$-1,4^\circ$	$+3,3^\circ$	$+7,3^\circ$
3 ч.	$0,0^\circ$	$+4,3^\circ$	

Сопоставим это с вычислениями проф. Шмидта. Взяв его кривые повышения температур для трех вышеназванных стен (рис. 48) и измерив в них приблизительно средние по величине ординаты для каждого из намеченных промежутков времени, получим примерно такие величины:

z	Бетонн. стена.	Деревянн. стена.	Пробков. стена.
1	$-2,5^\circ$	$+1,5^\circ$	$+5^\circ$
2	$-1,5^\circ$	$+4^\circ$	$+7^\circ$
3	$0,0^\circ$	$+6^\circ$	

Как видим, результаты довольно близки к предыдущим. По найденным средним температурам t_x за каждый период времени построим их общие плавные кривые — и тогда по ним найдем конечные температуры каждого периода. Эти кривые даны на рис. 49.

Дальнейшее использование таких кривых не представляет затруднений. При заданной отопительной нагрузке они непосредственно дают нам получаемые при этом температуры воздуха. Когда, напротив, заданы желаемые температуры воздуха и требуется определить необходимые для того

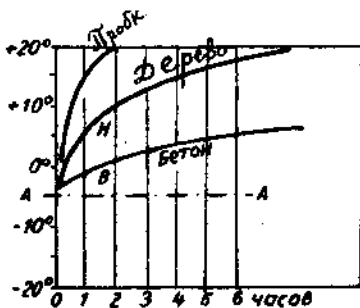


Рис. 48.

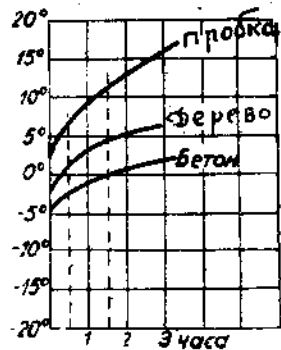


Рис. 49.

нагрузки, то вопрос можно решить путем пробных вычислений приведенного типа. Для более общего решения можно составить для каждого вида ограждений диаграмму, в которой будут сведены температурные кривые при разных топливных нагрузках. По этим диаграммам будут непосредственно находиться необходимые нагрузки. Во всех этих операциях не встретится уже никаких теоретических затруднений.

Другие вопросы, связанные с натопочными надбавками, решаются уже выясненными ранее способами. Глубина проникновения нагрева за данный промежуток времени — по ур-ию (n) в гл. 3 ч. II, количество поглощенной при этом теплоты — по ур-ию (Q').

В практических расчетах систем центрального отопления натопочные надбавки при периодической эксплуатации системы берутся по Ритчелю в зависимости от величины предполагаемых максимальных перерывов, но вне зависимости от рода ограждений. Это последнее оправдывается, как было замечено выше, тем обстоятельством, что более теплоемкие ограждения, требующие больших затрат теплоты для подогрева на каждый градус, дают нам, с другой стороны, меньшее падение температуры за намеченные таблицами перерывы эксплуатации.

Надбавки по Ритчелю требуются:

1. При непрерывном отоплении, но без обслуживания его ночью (загрузка на ночь топлива) 10%.
2. При продолжительности отопления в 13—15 час. в сутки, включая время растопки 15%.
3. При продолжительности отопления 9—12 час. в сутки, включая время растопки 20%.

Способ использования этих норм состоит, как известно, в том, что проектирующий заранее намечает то предельное снижение наружной температуры, до которого система работает периодически, а затем уже непрерывно. Тогда обычный расчет тепловой нагрузки всей системы при низшей температуре проверяется вторым расчетом нагрузки при намеченной переходной температуре с добавлением натопочной надбавки. Та величина нагрузки, которая окажется большей, и принимается обычно в основание для последующего расчета котлов и всей сети.

Глава 6. Переменное колебательное движение теплоты в строительных ограждениях.

Некоторые температурные воздействия на строительные ограждения носят периодический, волнообразный характер; например, периодическое отопление, периодическое изменение летней температуры днем и ночью. Поэтому иногда бывает полезно учитывать, как эти колебания воздействуют на ограждения, какие создают в них внутренние температуры, скорость этих температурных волн и проч.

Посмотрим, как может быть использован для этих целей изложенный выше общий метод Фурье¹⁾.

Когда температура (воздуха), воздействующая на плиту (ограждение) колеблется, то и внутренние температуры в каждом слое плиты также имеют колебательные изменения. Но всякое такое изменение может учитываться общей формулой следующего типа:

$$t = U \sin (nz + r) \dots \dots \dots (sn)$$

где t есть температура слоя, U —амплитуда колебаний, n —число последних, r —исходная фаза колебания и z —время, соответствующее температуре t . Действительно, указанная функция есть периодическая, колеблющаяся между пределами $+U$ и $-U$, при чем первое, например, значение

¹⁾ Как и при первом изложении этого метода, оговариваемся, что ограничиваемся здесь минимальными данными в виде одного варианта применений, знание которого полезно строителю, считая, что углубление в эти вопросы есть дело математической физики.

она принимает последовательно при $nz + r = \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \frac{9\pi}{2}$ и т. д., а при $z = 0$ имеем $t = U \cdot \text{sn} r$. Это последнее замечание подтверждает нам указанный выше смысл величины r , которая должна быть выражена в угловых единицах, т.е. чрез π ; а первое замечание приводит нас к определению продолжительности одного колебания. Действительно, если для известного момента z_1 имеем $nz_1 + r = \frac{\pi}{2}$, для следую-

щего чрез 1 волну $nz_2 + r = \frac{5\pi}{2}$, то, вычитая, имеем:

$$n(z_2 - z_1) = 2\pi,$$

где $z_2 - z_1$, т.е. продолжительность волны (одного колебания), равна $\frac{2\pi}{n}$, при чем n означает, очевидно, число колебаний в 2π часов.

Вышеприведенная функция для температуры любого слоя дает нам эту температуру в функции времени z . Но она в неявной форме зависит, конечно, и от положения слоя, т.е. от абсциссы x . Именно, от последней зависят U и r (тогда как n не зависит от x и является для всех слоев одинаковым).

Так как по основному уравнению Фурье

$$a \frac{d^2 t}{dx^2} = \frac{dt}{dz}$$

для всякого закономерного теплового состояния среды, то найдем эти производные от функции (sn):

$$\frac{dt}{dz} = U n \text{cs}(nz + r);$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{dU}{dx} \text{sn}(nz + r) + \frac{dr}{dx} U \text{cs}(nz + r);$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 t}{dx^2} = & \left[\frac{d^2 U}{dx^2} - U \left(\frac{dr}{dx} \right)^2 \right] \text{sn}(nz + r) + \\ & + \left(2 \frac{dU}{dx} \cdot \frac{dr}{dx} + U \cdot \frac{d^2 r}{dx^2} \right) \text{cs}(nz + r). \end{aligned}$$

Приравнивая теперь между собою первое и третье уравнения с умножением последнего на a , видим, что для

удовлетворения этого нового равенства достаточны следующие равенства:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = U \left(\frac{dr}{dx} \right)^2 \text{ и } 2 a \frac{dU}{dx} \cdot \frac{dr}{dx} + a \cdot U \cdot \frac{d^2 r}{dx^2} = Un.$$

Предположим теперь, что первоначальное распределение фаз колебания в слоях плиты имеет простейший характер, а именно изменения этих фаз пропорциональны глубине расположения слоев, т.е. величине x . Тогда производная $\frac{dr}{dx}$ есть величина постоянная. Обозначив ее чрез m , имеем первое из двух последних уравнений в виде:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = Um^2.$$

Такое уравнение удовлетворяется при условии, что $U = Ae^{mx}$ где A — постоянное интегрирования (это решение легко проверить, продифференцировав последнюю функцию два раза по x). В таком случае для решения второго из тех же двух уравнений выводим предварительно

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dx} &= Um, \\ a \frac{d^2 r}{dx^2} &= 0 \quad (\text{раз } \frac{dr}{dx} = \text{Const}). \end{aligned}$$

Тогда самое это уравнение примет вид:

$$2a \cdot Um^2 = Un,$$

откуда

$$m = \sqrt{\frac{n}{2a}}.$$

Наконец, из уравнения $\frac{dr}{dx} = m$ имеем по интегрировании $r = mx + p$, где p есть постоянная интегрирования. Если полагать начало координат на той поверхности плиты, с которой начинаются воздействия на плиту колеблющихся температур, то волны последних, очевидно, запаздывают для каждого данного момента в своих фазах по мере углубления в плиту (т.е. в каждый данный момент времени z фаза колебания в более глубоком слое будет меньшей, чем в более близком к поверхности); поэтому правильнее будет для этого случая полагать $\frac{dr}{dx} = -m$ и во всех дальнейших выводах $+m$ заменить на $-m$, т.е. принять:

$$U = Ae^{-mx}, \quad r = -mx + p.$$

После всего этого наше основное уравнение (sn) принимает вид:

$$t = Ae^{-mx} sn(2am^2z - mx + p).$$

Это уравнение дает нам температуры, возникающие в слоях плиты исключительно от колебательных процессов и отклоняющиеся от заданной начальной всюду одинаковой температуры. Но так как начальные температуры слоев могут быть и не одинаковыми, а во внешних строительных ограждениях при установившемся тепловом процессе они распределяются по уравнению $t = C + Dx$, то для большей общности предыдущее уравнение должно быть заменено следующим:

$$t = Ae^{-mx} sn(2am^2z - mx + p) + C + Dx. \quad (Sn')$$

Из уравнения видим, что амплитудой колебательного движения температур в слое x будет Ae^{-mx} ; она, очевидно, тем меньше, чем более x , т.е. чем глубже, в плите лежит

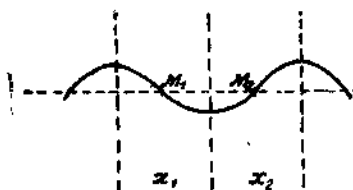


Рис. 50.

на передней поверхности плиты, принимающей воздействие колебательных температур ($x = 0$), и для начального момента $z = 0$ имеется исходная температура $t = Asnp$. Температуры в 0° получаются на той же поверхности всякий раз, когда

$$2am^2z + p = K\pi,$$

где K — есть любое целое число.

Для какого-либо заданного z температуры в 0° получаются одновременно во всех тех слоях плиты, для которых

$$2am^2z - mx + p = K\pi.$$

Взяв один из таких слоев x_1 с нулевой температурой в момент z (см. точку M_1 на рис. 50) и следующий такой же x_2 , имеем для них, очевидно:

$$2am^2z - mx_1 + p = K\pi$$

и

$$2am^2z - mx_2 + p = (K - 1)\pi.$$

Вычитая, получим:

$$m(x_2 - x_1) = \pi.$$

Так как $x_2 - x_1$ есть не что иное, как половина длины волны, то полную длину волны колебаний имеем:

$$L = z - \frac{2\pi}{m}.$$

Выше мы находили, что продолжительность одного колебания равняется $\frac{2\pi}{n}$ час. Теперь, найдя еще и длину волны, мы получаем скорость продвижения колебательного процесса температур в плите в виде

$$\frac{2\pi}{m} : \frac{2\pi}{n} = \frac{n}{m} \text{ метр/сек.}$$

Но выше мы видели, что $m = \sqrt{\frac{n}{2a}}$; таким образом, указанная скорость v определяется выражением:

$$v = \frac{n}{\sqrt{\frac{n}{2a}}} = \sqrt{2an}.$$

Это последнее выражение представляет для нас большую важность. Дело в том, что скорость распространения колебательных движений в материале строительного ограждения может считаться в известной степени мерилом для теплоустойчивости этого материала ограждения — совершенно аналогично тому, как в пределах процессов остывания и нагрева ограждений таковым же мерилом теплоустойчивости (или полезной теплоемкости) последних могла считаться скорость их остывания по прекращении притока к ним теплоты. Из изложенного видим, что при волнообразных воздействиях температур на ограждение теплоустойчивость его материала (обратно пропорциональная скорости v) определяется величиной:

$$1 : \sqrt{2an} = 1 : \sqrt{\frac{2\lambda n}{c\rho}} = \sqrt{\frac{c\rho}{2\lambda n}},$$

а при заданных для разных ограждений одних и тех же величинах $2n$ зависит от физических свойств материала ограждения в форме выражения

$$\sqrt{\frac{c\rho}{\lambda}}$$

Заметим здесь однако, что это относится исключительно к ограждениям однородным (не состоящим из разных слоев), так как это именно предположение было исходным во всех наших предшествующих выводах.

Наконец, чтобы перейти от теплоустойчивости *материала* ограждения к теплоустойчивости этого последнего при его толщине l , мы должны, очевидно, принять формулу

$$l \sqrt{\frac{c\rho}{\lambda}}$$

Заметим здесь же, что при учете теплоустойчивости ограждения (т.е. полезной теплоемкости) по времени его остывания в перерывы отопления мы имели в главе 3 ч. II характеристическую величину для однородных ограждений $\frac{c \cdot \rho \cdot X}{2k}$ — при очень грубом практическом методе, затем величину $\frac{c\rho \Delta x \cdot Ns}{a}$ (формула) при более точном расчете для периода остывания всей толщиной ограждения и, наконец, величину

$$\frac{c \cdot \rho \cdot \Delta x \cdot s}{a} \cdot \left[\frac{1}{s-1} \left(-\frac{T}{T-1} + 1 \right) + \left(\frac{1}{s-1} + 0,25 \right) \lg \frac{T}{T-1} \right]$$

(формула при $t=T-1$) — для начального периода остывания. При отсутствии в науке вполне установившегося взгляда на способ учета теплоустойчивости возможны, конечно, и другие подходы к решению этого вопроса.

Теперь перейдем к рассмотрению способов применения выведенных выше формул.

В строительном деле обычным случаем возникновения в ограждении волнообразных температурных колебаний является такое же волнообразное воздействие внутренней температуры (при периодическом отоплении) или внешней (день — ночь). Эти колебания предполагаются заданными для последующих расчетов; но для удобства последних эти задания должны быть сделаны в виде числовых значений для коэффициентов некоего общего уравнения, выражающего периодичность воздействующей температуры T . Такое уравнение проще всего может быть взято в форме:

$$T = B \sin(qz) + E.$$

Так, например, колебания воздействующей температуры воздуха между $+15^\circ \text{Ц}$ и $+25^\circ \text{Ц}$ в течение 24 часов могут быть выражены уравнением:

$$T = 5 \sin \frac{2\pi}{24} \cdot z + 20.$$

Теперь представим себе подобного рода задание для некоего строительного ограждения — положим, той же самой бетонной плиты толщиной 0,4 м, на которой ранее демон-

стрировались нами другие тепловые расчеты. Для распространения заданных нам колебаний температуры воздуха на материал плиты имеем, как и ранее, основное уравнение:

$$\lambda \frac{dt}{dx_{x=0}} = \alpha (t_{x=0} - T)^1 \text{ или } t_{x=0} - \frac{\lambda}{\alpha} \frac{dt}{dx_{x=0}} = T \dots (a)$$

Далее, заданная нам частота колебаний (в 1 час), т.е. величина q , равна по предыдущим выводам $2am^2$, откуда имеем для данного случая:

$$m = \sqrt{\frac{q}{2a}}$$

Тогда левая часть нашего предшествующего уравнения (a), по внесении в нее, вместо t , выражения (sn) при $x=0$, даст нам:

$$t_{x=0} - \frac{\lambda}{\alpha} \frac{dt}{dx_{x=0}} = A \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha} m\right) sn(2am^2z + p) + A \frac{\lambda}{\alpha} m cs(2am^2z + p) + C - \frac{\lambda}{\alpha} D.$$

Но постоянные величины этого уравнения $(A + \frac{\lambda}{\alpha} m)$ и $A \frac{\lambda}{\alpha} m$ всегда могут быть представлены в виде:

$$A \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha} m\right) = B csb \text{ и } A \frac{\lambda}{\alpha} m = B snb.$$

Тогда по известной тригонометрической формуле $sn(a+b) = snacsb + csasnb$ получим:

$$t_{x=0} - \frac{\lambda}{\alpha} \frac{dt}{dx_{x=0}} = B sn(2am^2z + p + b) + C - \frac{\lambda}{\alpha} D.$$

Это—левая часть уравнения (a); правая его часть по заданию равна $B sn(2am^2z) + E$. Приравнявая это только что полученному выражению, выводим, что:

$$C - \frac{\lambda}{\alpha} D = E \text{ и } p = -b,$$

1) Пишем $t - T$, а не $T - t$, в виду того, что $\frac{dt}{dx}$ по существу вопроса есть в данном случае величина отрицательная (в глубине плиты температуры снижаются).

а вспомогательный угол b определяется из приведенных выше условий так:

$$\frac{B \operatorname{sn} b}{B \operatorname{cs} b} = \frac{A \frac{\lambda}{\alpha} m}{A \left(1 + \frac{\lambda}{\alpha} m\right)}$$

откуда

$$b = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\lambda m}{\alpha + m};$$

после чего найдем коэффициент A :

$$A = \frac{\alpha}{\lambda m} B \cdot \operatorname{sn} b.$$

Этим и заканчивается определение всех коэффициентов разрешаемого уравнения $T = Ae^{-mx} \operatorname{sn} (2am^2z - mx + p) + C + Dx$.

Пусть, например, нам дано задание упомянутого выше характера, когда $T = 5 \operatorname{sn} \frac{2\pi}{24} \cdot z + 20$, а температуры в плите для начального момента распределены по наклонной прямой $t = C + Dx$ при -20° по наружной поверхности. Пусть, как и ранее.

$$x = 20, \quad \lambda = 1,0, \quad a = \frac{\lambda}{c\rho} = 0,0025.$$

В таком случае имеем:

$$m = \sqrt{\frac{2\pi}{24}}; \quad 2a = \sqrt{\frac{\pi}{0,06}} = 7,2;$$

$$b = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{7,2}{27,2} = 0,26 = 14^\circ 40';$$

$$A = \frac{20}{7,2} \cdot 5 \operatorname{sn} b = 3,48.$$

Уравнение температур будет:

$$t = 3,48e^{-7,2x} \operatorname{sn} (0,083\pi z - 7,2x - 0,26) + C + Dx.$$

Согласно выведенному выше, $C - \frac{\lambda}{\alpha} D = E = 20$.

Кроме того при $Z = 0$ и $x = 0,4$, t должно быть равно -20 , что дает второе уравнение для C и D :

$$-20 = 3,48e^{-2,88} \operatorname{sn} (-3,14) + C + D \cdot 0,4 = C + 0,4D.$$

Определяя из двух уравнений C и D , имеем:

$$C = 15,5, \quad D = -89.$$

Таким образом имеем окончательно:

$$t = 3,48 e^{-7,2 x} \sin (0,083 \pi z - 7,2 x - 0,26) + 15,5 - 89 x.$$

Из уравнения видно, что амплитуда температурных колебаний на поверхности плиты (т.-е. при $x=0$) составляет всего $3,48^\circ$ вместо 5° у воздуха; температура поверхности колеблется между $19,03^\circ$ и $12,07^\circ$ и ее фазы отстают от соответствующих фаз колебаний воздушной температуры на $14^\circ 40'$. По величине $3,48 e^{-7,2 x}$ можем судить о том, как уменьшается амплитуда колебаний с увеличением x .

Ограничиваясь этими замечаниями, обратим внимание на то, что расчет волнообразных колебаний на основе метода Фурье носит вообще более простой, компактный и изящный характер, чем расчет по тому же методу процессов остывания и нагревания.

В строительном деле эти волнообразные процессы имеют, однако, меньшее значение, чем предыдущие. Полезная теплоемкость ограждений и расчет натопочных надбавок правильнее определяются, по нашему мнению, условиями остывания или нагрева однозначного направления (т.-е. без учета их периодичности), так как периоды колебаний температуры в зависимости от отопления весьма значительны, особенно при господствующих у нас отопительных системах большой теплоемкости и имеется достаточно времени для „сквозного“ остывания ограждений (всей их массой), как мы это видели в предыдущей главе ¹⁾.

Вообще с теоретической точки зрения учет теплоустойчивости ограждения путем определения его реакций на волнообразные колебания теплоотдачи отоплением и такого же колебания наружных температур не дает бесспорных преимуществ перед учетом теплоустойчивости в виде скорости остывания ограждений при прекращении притока теплоты и при неизменной наружной температуре.

В самом деле, действительные колебания воздействующих температур весьма далеки от синусоид и косинусоид, предполагаемых теорией волнообразного движения. Что касается влияния отопления, то мы легко представим себе характер действительных кривых, взяв для их восходящих частей левую часть кривой рис. 43, а для нисходящих—левую часть кривой рис. 44; получим очертание волны, подобное зубцу храпового колеса.

Кроме того, между волнами в узком смысле слова (т.-е. между энергично вибрирующими кривыми) при отоплении

¹⁾ Наша обычная стена в $2\frac{1}{2}$ кирпича, если ее внезапно лишить притока теплоты изнутри помещения при расчетной разности температур в 50° , будет охлаждаться вначале так, что температура ее внутренней поверхности будет снижаться в среднем в 2,5 часа на 1° Ц.

и в ходе наружной температуры всегда имеются весьма значительные промежутки стационарных, „вялых“ кривых, близких к слабо наклонным и к параллелям относительно оси абсцисс (сравни правые части тех же рисунков); это периоды наименьшего действия отопительной системы стационарной наружной температуры, когда ограждения почти только остывают.

Вся указанная реальная кривая, состоящая из волн и более длинных вялых участков, интерпретируется двумя указанными выше теоретическими подходами к учету теплоустойчивости различным образом: один прием состоит в замене всей кривой одними энергичными волнами синусоид и косинусоид, выбрасывая наиболее длинные вялые участки; другой—берет из всего лишь эти последние, как важнейшие в смысле тепловой опасности, и учитывает „поведение“ ограждений под их влиянием в соответствующие часы дня.



Рис. 50

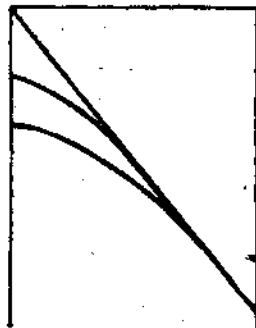


Рис. 51

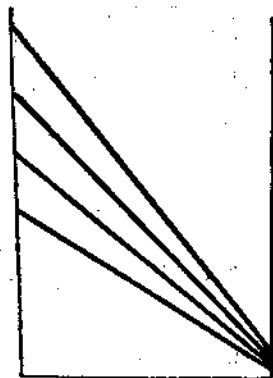


Рис. 52.

Ни одному способу, нельзя отказать в логике, ни один не свободен от упрощающих искажений действительности.)

Так обстоит дело в отношении колебательных воздействий внутренних температур помещения.

Что же касается периодичности изменений внешней температуры, то эти колебания еще более медленны, и потому для нас более важны не как колебания, а лишь как отдельные повышения или понижения.

Едва ли не наиболее уместным применением методов расчета волнообразных температурных колебаний в строительном деле является расчет низших температур, создающихся в наружных железобетонных массивах (мостах и т. п.) зимою в каждой из климатических областей страны в зависимости от колебаний наружной температуры—для учета наибольших возможных здесь температурных колебаний и соответственных внутренних напряжений материала

и его деформаций. Но это не входит в рамки настоящей работы, ограничивающейся областью гражданского строительства.

Вне того же гражданского строительства колебательные температурные процессы и их расчет имеют место в расчетах тепловых регенераторов—тем более, что здесь и периоды колебаний весьма кратки, а потому отдельные части их нельзя рассматривать как случаи простого остывания или нагрева.

Весьма наглядное представление о том, какое влияние может оказать учет колебательных процессов на наши представления о внутренних температурах, создающихся зимой в ограждении жилого дома, дает рис. 51, где приведены изменения внутренних температур в стене при трех методах учета: слева—при учете остывания стены от плавного (волнообразного) снижения воздействующей температуры (при перерывах отопления), следующий тип кривых — при остывании в чистом виде, т.е. при полном прекращении какого-либо притока теплоты к стене изнутри помещения; наконец, третий тип—при учете процессов остывания ограждений по нашему условному и простейшему методу установившегося течения теплоты чрез них.

ЧАСТЬ III.

Практические строительные ограждения с теплотехнической точки зрения.

Строительные ограждения помещений, в которых охраняется повышенная или пониженная температура, должны рассматриваться, помимо общетехнических и экономических принципов, еще с точки зрения теплотехники; а именно в них нужно учитывать:

а) их внутреннюю теплопроводность и общую теплопередачу, от которых зависит средняя суточная температура помещения и расход топлива (или энергии холодильных установок) для ее поддержания;

б) полезную теплоемкость ограждений, определяющую собой амплитуду колебаний внутренней температуры около упомянутой выше средней, если отопление периодическое;

в) воздухопроницаемость ограждений, обуславливающую собой естественную вентиляцию помещения, и

г) паропроницаемость их, от которой зависят явления конденсации паров на внутренней поверхности или внутри ограждений, а следовательно, их теплопроводность, санитарные качества и долговечность.

С этих точек зрения ниже и будут рассмотрены некоторые из наиболее употребительных у нас типов ограждений, а также те, которые входят в практику в качестве новых ее явлений ¹⁾.

Глава I. Стены.

Стены должны удовлетворять всем перечисленным выше требованиям. В частности, полезная теплоемкость их, понимаемая в смысле скорости остывания, соответствует, при

¹⁾ Приводимые ниже данные о газопроницаемости разных конструкций, как об этом было оговорено нами в гл. 3 ч. I, пока нельзя еще считать достаточно достоверными. Некоторые из них приводятся нами на основании таблицы X и расчетов Хенки и даются в литрах воздуха на 1 м.м водстолба избыточного давления; другие, извлеченные непосредственно из практических измерений (хотя и отрывочных), даны в литрах на 1° разности температур.

однородных и близких к ним конструкциях, их физической теплоемкости и находится примерно в обратном отношении с теплопроводностью; из чего следует, что при облегченных конструкциях необходимо для поддержания их защитной роли против больших колебаний суточной температуры придавать им меньшие коэффициенты общей теплопередачи, чем у соответствующих по массивности нормальных стен. При неоднородных конструкциях полезная теплоемкость стен часто не находится ни в каком соответствии с физической теплоемкостью, но зависит еще от чисто конструктивных особенностей — взаимного расположения слоев с сильно различающимися теплотехническими качествами (теплопроводностью и теплоемкостью); от этого расположения полезная теплоемкость изменяется, при том же физическом составе стены, часто в 2—2,5 раза.

Но это представляет известную важность для строителя только при периодическом отоплении. При непрерывном или вообще длительно работающем отоплении, далее в таких помещениях, как скотные дворы, или, наоборот, в помещениях, согреваемых редко и на короткое время (общественные залы, храмы) — строителю не нужна теплоемкость стен, а в помещениях последней категории даже нежелательна из-за лишних расходов на „натоп“. Тогда становятся излишними и их физическая массивность и особые конструктивные меры в смысле расположения слоев (термоизоляции).

Большое значение имеет в стенах их способность конденсировать водяные пары. Всего нагляднее это проявляется у дефективных стен уже на их внутренней поверхности (потение, промерзание). Так как это явление возможно временно и у правильно устроенных стен, но при повышенной влажности воздуха и при отсутствии большого запаса в величине коэффициента общей теплопередачи k , то за границей часто применяют к материалам стен особое требование, чтобы они легко всасывали в себя конденсационную влагу в моменты ее появления, а впоследствии, с улучшением влажностного режима, испаряли ее обратно. Такие требования предъявляются часто в Германии к кирпичу — в противоположность нашим, которые обыкновенно ограничивают его способность влагопоглощения. Деревянные стены обладают этой способностью в весьма высокой степени, в силу чего обычно и не потеют видимым образом. И большинство других материалов удовлетворительны в этом отношении; исключение составляют очень плотные камни и бетоны, а затем жирные и смолистые прослойки, масляные окраски. Из этого следует, что внутренние облицовки последнего рода нежелательны в помещениях с повышенной влажностью — кухнях, прачечных, в перенаселенных квартирах, скотных дворах, в сырых производственных помещениях и т. п.

Менее наглядной бывает конденсация паров внутри стен, как это изложено в ч. I гл. 3; но тем более она опасна. Как предвидеть и устранять эти опасности, вытекает из только что упомянутого изложения.

Другой особенностью стен среди остальных ограждений является наличие у них многочисленных наружных углов, дающих добавочное охлаждение помещений (см. ч. I, гл. 2). Для уменьшения последнего полезно снабжать углы пилястрами (у каменных стен) и добавочными обшивками (у деревянных).

Ниже приводим краткое теплотехническое обозрение разных видов стен.

1. *Нормальная кирпичная стена.* Для климата нашего центрального района эта стена имеет $2\frac{1}{2}$ кирпича, что при вновь установленном размере кирпича ($25 \times 12 \times 6,5$ см) составляет толщину в 64 см. Коэффициент общей теплопередачи ее получим из уравнения (при $\lambda = 0,70$ для нормальной влажности ок. $1,5\%$ по объему или $0,75\%$ по весу):

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{7,5} + \frac{1}{15} + \frac{0,64}{0,70} = 0,20 + 0,91$$

откуда $k = 0,9$.

Полезная теплоемкость стены определяется ее способностью аккумулировать в себе, по условному расчету в гл. 3 ч. II, при одностороннем повышении ее температуры внутренней поверхности на 1°C приблизительно 110 кал теплоты, что обеспечивает продолжительность остывания ее на 1° по внутренней поверхности при максимальной расчетной разности температур в 2,5 часа. В сравнительной шкале полезных теплоемкостей разных ограждений эта величина принимается нами за 1.

Воздухопроницаемость стены составляет приблизительно 3,5 литра воздуха на 1 кв м в 1 час при разности давлений в 1 мм вод. столба.

Паропроницаемость—равномерная во всей массе при слабой конденсации паров, равномерно распределяющейся в толщине стены.

2. *Обыкновенная деревянная рубленая стена из бревен* в 22—27 см, с оштукатуркой изнутри.

Коэффициент общей теплопередачи, принимая среднюю толщину стены в обтеске и пазах в 0,20 м, получим из уравнения (при $\lambda = 0,14$):

$$\frac{1}{k} = 0,20 + \frac{0,20}{0,14},$$

откуда $k = 0,61$.

Полезная теплоемкость стены составляет 0,35—0,40 от нормальной кирпичной стены в $2\frac{1}{2}$ кирпича. Эта величина

была бы еще меньшей, если бы не более низкий коэффициент k теплопередачи деревянной стены. В последующем при рассмотрении других типов деревянных стен мы всегда будем находить у них сравнительно низкие величины k , — и они должны быть тем более низкими, чем „легче“ стена, чем меньше ее физическая теплоемкость.

Воздухопроницаемость цельной древесины поперек волокон, повидимому, недостаточно еще установлена. Кроме того, в рубленой стене имеют большое значение пазы, воздухопроницаемость которых, естественно, всецело зависит от качества выполнения работ. По некоторым практическим измерениям воздухообмена можно заключить, что воздухопроницаемость неоштукатуренной бревенчатой стены составляет приблизительно 12—15 литров в 1 час на 1 кв м и на 1° разности температур. Так как в обычных жилых постройках на 1 кв м наружных стен приходится в среднем 2—2,5 куб м воздуха, то заключаем, что при средней зимней разности температур в 25° рубленая стена в состоянии обеспечить обмен воздуха в помещении в количестве от 0,12 до 0,18 объема помещения в час (что совместно с деревянными потолками и полами даст от 0,20 до 0,30 объема).

Паропроницаемость рубленой стены — равномерная во всей массе при слабой конденсации паров, равномерно распределяющейся в толщине стены. Конденсат на внутренней поверхности легко всасывается материалом.

При обшивке снаружн тесом стена имеет коэффициент общей теплопередачи, определяемый из формулы:

$$\frac{1}{k} = 0,20 + \frac{0,20}{0,14} + \frac{0,025}{0,14} \text{ откуда } k = 0,55,$$

если совершенно не учитывать влияния воздушного прослойка под обшивкой в силу многочисленных его сообщений с наружным воздухом при обычном способе обшивки.

В тех случаях, когда обеспечена особыми мерами полная замкнутость прослойка (например, обшивкой наружной поверхности металлическими листами с закрытыми швами, рубероидом и т. п.), коэффициент теплопередачи при средней толщине прослойка в 6 см будет определяться формулой (сравн. гл. 1 ч. I):

$$\frac{1}{k} = 0,20 + \frac{0,225}{0,14} + 0,20, \text{ откуда } k = 0,5.$$

Если замкнутость прослойка обеспечена не в достаточной мере — например, путем обыкновенной оштукатурки по тесовой обшивке, — то правильнее считать сопротивление прослойка теплопередаче в половину нормального, и тогда получим $k = \infty 0,52 - 0,53$.

Если, наконец, засыпать прослойку сухими опилками или торфом ($\lambda = 0,06$), то для k будет служить формула:

$$\frac{1}{k} = 0,20 + \frac{0,225}{0,14} + \frac{0,06}{0,06}, \text{ откуда } k = 0,36.$$

Из этого видно, что последний тип стены является одним из наименее теплопроводных в нашем обычном строительстве.

С другой стороны обкладка рубленых стен кирпичом сравнительно мало затепляет их и еще менее увеличивает их полезную теплоемкость; при жирном же растворе это может увеличить конденсацию паров между деревом и обкладкой.

Однако вообще про рубленые стены следует сказать, что их тепловые качества сильно зависят от тщательности сборки венцов. Особенно это относится, конечно, к стенам неоштукатуренным и необшитым тесом — и, например, в серии санитарно-технических обследований Мосздравотдела в 1925—26 г. постройка с рублеными стенами без оштукатурки и обшивки (в поселке „Красный Химик“, по Звенигородскому шоссе д. 18) оказалась неудовлетворяющей санитарным нормам при одновременном наличии явных строительных дефектов (промерзание венцов, кирпичный цоколь в 2 кирпича при пустом подполье).

3. *Массивная бетонная стена.* Так как коэффициент теплопроводности нормального жирно-плотного бетона ¹⁾ весом около 2300 кг/м^3 составляет при совершенно сухом его состоянии $0,65$, а при нормальной влажности (5—6% по объему или 2—3% по весу) $1,1$, то стена из него, эквивалентная по теплопередаче нормальной кирпичной стене в $0,64 \text{ м}$, должна иметь толщину, определяемую из формулы:

$$\frac{x}{1,1} = \frac{0,64}{0,7}, \text{ откуда } x = 1,0 \text{ м.}$$

При дороговизне жирноплотного бетона такая стена, конечно, неэкономична, а потому и не применяется.

Тощеплотный бетон одновременно и дешевле и менее теплопроводен. У наиболее тощих применяемых для стен бетонов из цемента и песка (без гравия) в пропорции 1:12, при весе их около 2050 кг/м^3 , имеем коэффициент внутренней теплопроводности в состоянии нормальной влажности около $0,90$, а если бетон слабо трамбован и „сух“, следова-

¹⁾ Жирно-плотным бетоном называется бетон такого состава, в котором цемент заполняет с нормальным избытком (ок. 15%) пустоты песка, а указанный раствор заполняет таким же образом пустоты щебня или гравия; например, состав 1:2:4.

тельно, хорошо сохраняет при работе свои пустоты незаполненными, то и до 0,80—0,75, т.е. весьма близок к обыкновенной кирпичной кладке¹⁾.

То же нужно сказать и о тощих известково-цементных бетонах для т. н. „песчанобитных“ стен (например, 1:1:12) и, наконец, о тощепористых бетонах (например, $1_{ц} : 4_{п} : 10_{ц}$), в которых раствор делается, для сохранения прочности, более жирным, но зато имеется много замкнутых пустот и пор. Во всех этих случаях эквивалентная кирпичной стене имеет толщину около 0,75 м.

Полезная теплоемкость таких стен выше нормальной кирпичной. При $c = 0,20$, $\rho = 2000$, $x = 0,75$, и при нормальном коэффициенте k (0,9) она составляет 1,4 в отношении кирпичной.

Воздухопроницаемость стен из тощего бетона указанной толщины составляет около 6—7 литров в час на разность давлений в 1 мм вод. столба, что значительно превосходит воздухопроницаемость таких же стен из жирноплотных бетонов (в 3—6 раз) и даже воздухопроницаемость нормальной кирпичной стены.

Паропроницаемость равномерна, с таковой же конденсацией паров.

Шлаковый бетон значительно менее теплопроводен, особенно если шлак введен не только в качестве щебня, но и песка. Допускаемой толщиной стены из этого последнего бетона ($1_{ц} : 9_{п}$) при весе его около 900 кг/м³ для нашего климата будет 0,4 м—0,45 м, для каковой коэффициент k определится из формулы (при $\lambda = 0,40$):

$$\frac{1}{k} = 0,20 + \frac{0,40}{0,40}, \text{ откуда } k = 0,83.$$

При этом предполагается, что стена оштукатурена с обеих сторон, что важно не из-за теплового сопротивления самой оштукатурки (она даже не учитывается нами), а с точки зрения закрытия пор стены и замкнутости ее пустот и не в меньшей мере—как защита от проникновения в стену дождевой влаги и от выдувания сильными ветрами²⁾. Все три вида опасностей имеют большое значение для теплопередачи стены, а потому наружная оштукатурка делается плотной и водонепроницаемой—особенно в стенах, подверженных господствующим в данной местности зимним ветрам

¹⁾ Следует заметить, что лабораторных данных о теплопроводности тощих бетонов пока еще очень мало.

²⁾ Эти последние при большом напоре выдувают из стены аккумулярованную в ней теплоту, заставляя затем вновь прогревать ее при отоплении.

С этой целью состав оштукатурки делается смешанным известково-цементным, а за границей в него еще прибавляют (с подветренной стороны) водоупорные примеси, как церезит, флюрезит, „зика“ и проч.

Если шлаковый бетон жирен (1:3—1:4) или в него при тощем составе входит частью кварцевый песок или, наконец, если тощий шлаковый бетон готовится как литой бетон (при чем жидкий раствор заполняет значительную часть пустот в шлаковых кусках), то вес 1 м³ бетона возрастает до 1000—1250 кг куб м и коэффициент его внутренней теплопроводности λ следует принимать приблизительно равным 0,50, а нормальной толщиной такой стены считать для среднего климата 0,5 м. Коэффициент общей теплопередачи ее найдем из уравнения:

$$\frac{1}{k} = 0,20 + \frac{0,5}{0,5}, \text{ откуда } k = 0,83.$$

При этом оштукатурка с обеих сторон, не учитываемая здесь непосредственно по своей теплопроводности, является обязательной, как условие реальности примененного в формуле коэффициента $\lambda = 0,50$.

Полезная теплоемкость стены всецело шлаковой при толщине 0,4 и весе 1 куб м 870 кг составляет около 0,35, т.е. она немного низка даже сравнительно с бревенчатой.

Воздухопроницаемость этой стены составляет от 25 до 100 литров в час на 1 мм водяного столба — в зависимости от степени пористости.

Конечно, при этом не учитывается влияние той или иной оштукатурки стен, а равно и дальнейшей их отделки; для учета последних нами были приведены особые данные в ч. I, гл. 3.

Паропроницаемость этой стены также велика, но при ее однородности конденсация паров не может быть обильной. Однако не следует нарушать этой однородности введением разных оштукатурок с наружной и внутренней сторон.

На последней уместно делать такую же цементную или известково-цементную оштукатурку, как и снаружи, чтобы ограничить приток паров из жилья насколько возможно более, раз ограничен их выход из стены; это уменьшит их конденсацию внутри последней.

Для более плотных шлаковых бетонов ($\lambda = 0,50$) величина полезной теплоемкости возрастает, а воздухо- и паропроницаемость понижается в некотором соответствии с весом единицы объема.

4. Стена системы Герарда обычно состоит из двух стенок по $\frac{1}{2}$ кирпича со шлаковой засыпкой между ними толщиной в 13,5 см при соединении стенок между собою

железными скобами. Коэффициент общей теплопередачи k определится из уравнения (при $\lambda = 0,24$ для шлака):

$$\frac{1}{k} = 0,20 + \frac{2 \cdot 0,12}{0,70} + \frac{0,135}{0,24},$$

откуда $k = 0,9$.

Из этого видим, что указанная стена дает нам максимальный допустимый коэффициент теплопередачи. Так как, кроме того, при уменьшенной теплоемкости ограждений им надо придавать всегда несколько меньший против нормы коэффициент k , то практически можно рекомендовать данный тип стен с прослойком шлака не меньшим 18 см, при чем коэффициент k снижается до 0,82.

При сухом и тщательном заполнении ($\lambda = 0,06$) $k = 0,36$, хотя трудность плотного заполнения торфом, последующие осадки его и увлажнение в силу гигроскопичности могут значительно повысить коэффициент теплопередачи и приблизить к 0,6—0,8.

Полезная теплоемкость кладки Герарда, вычисленная простейшем образом (по внутренним температурам), составляет ок. 0,5 от нормальной кирпичной стены.

Воздухопроницаемость стены составляет ок. 9 л воздуха в 1 час на разность давлений в 1 мм водяного столба. Конденсация паров в стене—значительная, преимущественно на более холодной поверхности стенки, соприкасающейся со шлаком, так как она представляет для паров большее сопротивление, чем шлак и сухая внутренняя стенка. В силу этого коэффициент λ для шлака взят в приведенной формуле для 3,4% влажности его по объему (ок. 5% по весу). В постройках с влажным внутренним режимом (бани, прачечные, скотные помещения и т. п.) следует и обе кирпичные стенки считать с двойной влажностью против нормы (т. е. 3% по объему) и потому с коэффициентом $\lambda = 0,80$; тогда $k = 0,94$, и стена будет промерзать.

Санитарно-технические обследования над постройками этого типа со стороны Мосэдровотдела в 1926 году установили вполне нормальный тепловой режим для здания с заполнением торфом-сфагнум (Октябрьская ул. № 51 2-й и 3-й этажи постр. Мосстроя) — правда, при наличии центрального отопления. Для Герарда со шлаком¹⁾ в слое толщиной в 16 см, но с тычковыми кирпичами чрез 1,35 м, не доходящими до противоположной стенки всего на 2,5 см, температурные условия также оказались нормальными, но наблюдались сырость стен и другие дефекты, относящиеся главным образом к неправильному выполнению работ и лишь отчасти к особенностям конструкции (тычковые перевязки).

¹⁾ Уг. Б. Семеновской и Мажорова пер. постройки Госстроя.

5. Тонкая кирпичная или бетонная стена с внутренней термоизоляцией. Один пример такой конструкции мы уже видели в гл. 4 ч. II и на рис. 39, где были приведены величины коэффициента общей теплопередачи стены ($k = 0,8$) и полезной теплоемкости (0,45). Воздухопроницаемость стены определяется почти исключительно в зависимости от кладки и составляет около 6 литров в час на разность давлений в 1 мм вод. столба. Что касается условий конденсации паров в стене, то разделительная плоскость между кладкой и торфяной плитой во этом типе (рис. 39) представляет некоторый градиент сопротивлений и температуры, вызывающий эту конденсацию. Однако, так как температура в этой плоскости при средней зимней температуре положительна и неспособна вызвать обильную конденсацию паров в воздухе, проходящем из жилища, то отсырание стены и торфяной плиты в этом месте не должно быть особенно сильным. Но при влажном режиме ограждаемых помещений этот дефект придется учитывать и принимать меры к уменьшению доступа паров в стену путем облицовки стены изнутри толем, руберойдом и пр., по которым уже должна производиться оштукатурка и, по возможности, окраска масляными красками или обоями на клею. Но эти меры, конечно, почти полностью парализуют естественную вентиляцию стены.

Усиливая термоизоляционный слой, например, в виде плит соломы толщиной 5 см с коэффициентом $\lambda = 0,08$, можем возвести стену толщиной всего в 1 кирпич с такой внутренней облицовкой. Для ее коэффициента общей теплопередачи имеем формулу:

$$\frac{1}{k} = 0,20 + \frac{0,25}{0,70} + \frac{0,05}{0,08}, \text{ откуда } k = 0,84,$$

при чем внутренняя оштукатурка обязательна для обеспечения замкнутости пустот соломы.

Полезная теплоемкость такой стены составляет, однако, всего лишь 0,20 от нормальной кирпичной и потому допустима лишь при центральной системе отопления, если не возмещена усиленной полезной теплоемкостью прочих ограждений.

Воздухопроницаемость стены составляет около 9 литров в 1 час на 1 мм давления. Конденсация паров будет весьма значительной в разделительной плоскости между кладкой и соломитом в силу господствующей здесь низкой температуры и одновременно—градиента сопротивлений потоку паров из жилья к наружной поверхности. Это поведет к значительному увлажнению всей конструкции и к повышению ее коэффициента общей теплопередачи против выведенной выше величины. Для предупреждения этих явлений стена должна быть облицована изнутри слоями толя или руберойда, по которым

оштукатурка должна быть окрашена масляными красками или обоями на клею. Еще лучше было бы, вместо смолистых полотнищ, обшить соломит изнутри листовым железом.

Из изложенного видно, что указанные дополнительные меры способны поглотить ту экономию, какую эта конструкция дает по первому впечатлению сравнительно со стенами Герарда, шлакобетонной и др.; в силу этого она и не может считаться более экономичной, чем упомянутые.

В нашей строительной практике часто применялись еще подобные же тонкие стены из бетонных пустотелых камней (например, в 1 камень „Торонто“ или сист. Прохорова) с так называемой американской оштукатуркой, т. е. с тесовой обшивкой кладки изнутри, оставляя воздушный прослойк по толщине обшивочных реек и оштукатуривая обшивку по войлоку ¹⁾. Не говоря уже о том, что коэффициент теплопередачи при этом не всегда достигал нормальной величины, такое устройство сильно снижало полезную теплоемкость всей стены, а в воздушном прослойке создавались благоприятные условия для конденсации паров на холодной поверхности каменной кладки. Ясно, что и здесь требовались добавочные меры для ограничения притока паров, поскольку вообще нужна была самая эта система устройства.

6. *Стена из пористого кирпича.* Пористым кирпичем называется тот, который готовится из смеси глины с горючими порошками (древесными опилками, угольной мелочью, торфом) с тем, что эти порошки, выгорая при обжиге, оставляют после себя в материале массу мелких пустот, уменьшающих внутреннюю теплопроводность материала.

Стена в $1\frac{1}{2}$ пористых кирпича, эквивалентная по теплопередаче нормальной кирпичной стене, должна иметь в состоянии нормальной влажности коэффициент внутренней теплопроводности кладки в соответствии с пропорцией:

$$\frac{x}{0,70} = \frac{0,38}{0,64}$$

откуда

$$x = 0,43.$$

В интересах последующего сравнения переведем исчисление на случай совершенно сухой кладки.

По таблице I (№№ 128 г и 129) видим, что при этом коэффициент кирпичных кладок уменьшается обычно в $\frac{0,60}{0,38}$ раза. Предполагая то же самое и для кладки из пористого

¹⁾ Этот же прием применялся у нас в период 1911—1916 г.г. для утепления неправильно построенных, слишком тонких стен из бетонных пустотелых камней в период увлечения последними.

кирпича, найдем необходимый ее коэффициент для совершенно сухого состояния в виде

$$0,43 : \frac{0,60}{0,38} = 0,27.$$

Чтобы определить необходимый для этого коэффициент λ самого кирпича, надо принять во внимание, что в силу большей теплопроводности швов этой кладки и их значительной толщины из-за рассасывания раствора по порам, коэффициенты λ для кладки и для кирпича здесь сильно различаются между собой. Из таблиц теплопроводности видим, что это различие должно быть не меньшим, как в 1,5 раза ¹⁾ (тогда как в кладке из обыкновенного кирпича оно составляет лишь ок. 1,07 раза). Из этого заключаем, что для указанной стены кирпич должен иметь для совершенно сухого состояния коэффициент $\lambda = \frac{0,27}{1,5} = 0,18$. По той же

таблице I найдем среди немецких образцов (№ 118), что такому коэффициенту соответствует вес кирпича в 812—850 кг в 1 куб м, т.-е. около 5 фунтов в нашем старом формате кирпича. Производство такого сорта весьма затруднительно и дорого и у нас пока еще не имело места.

Полезная теплоемкость рассматриваемой стены составляет приблизительно 0,30, т.-е. ниже рубленой стены, принимаемой часто за низшую норму.

Воздухопроницаемость такой стены, повидимому, недостаточно еще исследована. Можно предполагать ее близкой к тому, что мы видели для шлакобетонной стены, т.-е. до 100 литров в час на 1 мм давления, если не учитывать влияния оштукатурок. При одной цементной оштукатурке и одной известковой это дает около 25 литров в час на 1 мм.

Оштукатурки здесь необходимы — и наружная должна быть очень плотной по составу. Это нужно, во-первых, для закрытия пустот кирпича, прилегающих к поверхностям, затем для предохранения стен от выдувания ветром аккумулярованной в них теплоты и, в-третьих — для предохранения стены от пропитывания косыми дождями. Подветренные стороны (в отношении господствующих ветров) должны оштукатуриваться снаружи, по возможности, водоупорными составами (с прибавкой церезита и т. п.). Все это сильно

¹⁾ Действительно, в кирпичной кладке — в частности, в кладке из 1½ кирпичей — швы при их толщине в 1 см составляют $\infty 25\%$ объема всей кладки, а при учете двух оштукатурок — 30 — 35%, примем 25%. Далее примем $\lambda = 0,50$ для сухого известково-цементного раствора. Тогда для коэффициента x сухого пористого кирпича имеем уравнение: $0,50 \cdot 0,25 + x \cdot 0,75 = 0,27$, откуда $x = \infty 0,19$, т.-е. почти то же, что дано и ниже в тексте.

сокращает указанную выше воздухопроницаемость стен, следовательно, их естественную вентиляцию.

Но те же оштукатурки, особенно наружная, ухудшают влажностный режим стены. Так как последняя весьма паропроницаема, то проходящие в нее пары внутреннего воздуха, встречая в холодной зоне стены, около наружной штукатурки, большее сопротивление, задерживаются здесь и конденсируются. Этому содействуют еще особые соли, получающиеся в пористом кирпиче при обжиге (и проявляющиеся обычно в виде белых налетов на нем): они в большинстве весьма гигроскопичны. Таким образом, при очень плотных оштукатурках, требующихся для защиты стенки от наружной влаги, возникает большая опасность от влаги внутренней, так как ее конденсация в стене способна сильно повысить коэффициент ее внутренней теплопроводности против выведенного выше. Поэтому будет более целесообразным делать

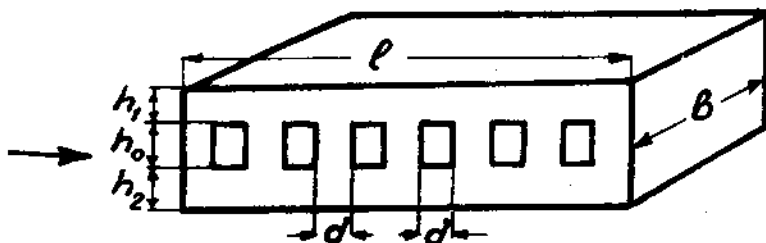


Рис. 52.

обе оштукатурки с одинаковым водонепроницаемым составом, который представляет большее сопротивление и для паров; тогда приток паров из жилья несколько ограничится и сближится с выходом наружу. Воздухопроницаемость при этом снизится до 15 литров.

Наконец, рассматриваемая стена из кирпича с указанным весом его весьма непрочна и пригодна только для одноэтажных и, самое большее, двухэтажных зданий.

Все это указывает на неизбежность возведения стен из пористого кирпича толщиной не менее, как в 2 кирпича с той же обязательностью оштукатурки с обеих сторон. Экономическая выгодность таких стен, естественно, весьма невелика.

7. Стена из пустотелого глиняного кирпича. Пустотелым называется такой кирпич, в котором при формовке сырца выделаны пустоты более или менее значительной величины и определенного вида для придания материалу меньшего веса и теплопроводности. Пример подобного кирпича дан на рис. 52. Чтобы иметь понятие о значении подобных пустот в теплотехническом отношении, определим в приблизительном виде внутреннюю теплопроводность такого

кирпича и сравним ее с тем, что дает нам обыкновенный сплошной кирпич ¹⁾.

Обозначим в кирпиче рис. 52 через h_1 и h_2 — высоты (толщины) сплошных слоев, верхнего и нижнего; через h_0 — высоту (толщину) среднего пустотелого слоя, через r_1 — сопротивление каждого из воздушных прослоек и через n — их число, через d — толщину кирпичных стенок между пустотами и m — их число, через l — длину кирпича, b — его ширину и λ — коэффициент внутренней теплопроводности его сплошной массы.

Тогда имеем: на площади $b(h_1 + h_2)$ теплопроводность кирпича составляет $\frac{\lambda}{l}$, что дает для всей этой площади

$$b(h_1 + h_2) \frac{\lambda}{l} \text{ кал,}$$

а на единицу площади всего кирпича

$$\frac{b(h_1 + h_2) \frac{\lambda}{l}}{b(h_0 + h_1 + h_2)}$$

Далее на площади $b \cdot h_0$ имеем теплопроводность

$$\frac{1}{nr_1 + \frac{md}{\lambda}}$$

что дает на этой площади всего $h_0 \cdot \frac{1}{nr_1 + \frac{md}{\lambda}}$, а на единицу площади кирпича

$$bh_0 \frac{1}{nr_1 + \frac{md}{\lambda}} : b(h_1 + h_2 + h_0).$$

Таким образом, имеем общую теплопроводность на единицу площади:

$$x = \frac{(h_1 + h_2) \frac{\lambda}{l} + h_0 \frac{1}{nr_1 + \frac{md}{\lambda}}}{h_1 + h_2 + h_0}$$

¹⁾ Более точный расчет должен был бы, очевидно, учитывать ряд таких обстоятельств, как вторичные тепловые потоки в кирпиче, температуру воздуха в пустотах и пр.

Приняв $h = 0,7$, $h_1 = h_2 = 0,02$ м; $h_0 = 0,025$, $l = 0,26$, $n = 6$, $m = 7$, $r_1 = 0,18$ ¹⁾, $d = 0,02$, получим $x = 1,95$ кал. Внутренняя теплопроводность обыкновенного кирпича того же размера, т.-е. $\frac{\lambda}{l}$, составляет $\frac{0,7}{0,26} = 2,7$; т.-е. один пустотелый кирпич указанного типа эквивалентен всего 1,38 сплошных кирпича. Из этого видим, что выгода в теплопроводности от пустотелого кирпича сравнительно невелика, и кладка из последнего должна для эквивалентности с нормальной иметь толщину в 2 кирпича.

Полезная теплоемкость такой стены составляет приблизительно 0,6 сравнительно с нормальной стеной.

Воздухопроницаемость, конечно, значительно более, чем у последней, и составляет примерно 10 литров в 1 час. на 1 мм вод. столба. Конденсация паров имеет место главным

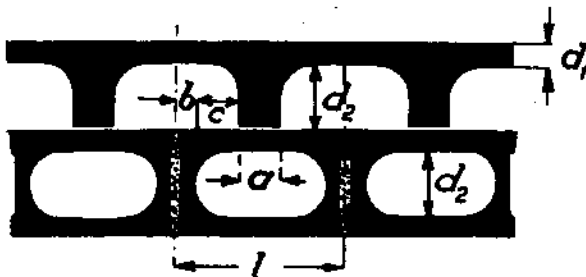


Рис. 53.

образом на более холодных стенках пустот, но в силу большого числа последних распределяется сравнительно равномерно и не концентрируется в каких-либо частях до состояния видимой сырости.

8. *Стены из бетонных пустотелых камней.* Расчет их теплопроводности производится при упрощенном порядке тем же способом, каким сделан предыдущий расчет для пустотелого глиняного кирпича. Так, например, для кладки, представленной на рис. 53, при обозначениях, показанных на самом рисунке и при коэффициенте внутренней теплопроводности для бетона камней λ , имеем следующие данные для определения коэффициента общей теплопередачи кладки k . (при сквозных пустотах камней). Сопротивление на двух участках c камня равно

$$\frac{3 d_1}{\lambda} + 2r_2,$$

¹⁾ Эту величину берем из таблицы теплопроводности воздушных прослоек Хенки в части I главе 1 при $C'c = 4$, или по таблице Вирца при $c = 0,9$.

при чем r_2 означает сопротивление воздушного прослойка d_2 по таблице в гл. 1 ч. I. Теплопроводность на этом участке составляет, следовательно, величину

$$\frac{1}{\frac{3 d_1}{\lambda} + 2 r_2},$$

а на единицу длины кладки

$$\frac{1}{\frac{3 d_1}{\lambda} + 2 r_2} \cdot \frac{2 c}{l}.$$

Подобным же образом составим выражение для теплопроводности на участке a и на двух участках b . Взяв их сумму, получим:

$$x = \frac{1}{\frac{3 d_1}{\lambda} + 2 r_2} \cdot \frac{2 c}{l} + \frac{1}{\frac{3 d_1}{\lambda} + \frac{d_2}{\lambda} + r_2} \left(\frac{a}{l} + \frac{2 b}{l} \right)$$

Так, приняв $l = 0,40$ м, $d_1 = 0,05$ м, $d_2 = 0,15$ м, $a = 0,10$ м, $b = 0,05$ м, $c = 0,10$ м, $\lambda = 1,0$ и подобрав $r_2 = 0,23$, получим $x = 1,77$.

При указанных выше числовых значениях букв получим эквивалентную толщину сплошного бетона $x_0 = \frac{1}{1,77} = 0,56$ м, тогда как толщина самой кладки составляет 0,45 м. Из этого примера видим, что теплоизолирующее действие пустотелой бетонной кладки весьма невелико, и для получения стен, эквивалентных по теплопроводности с нормальной кирпичной, пришлось бы при нормальном бетоне по меньшей мере удвоить рассмотренную систему прослоек.

При наличии в кладке горизонтальных диафрагм вводим еще разделение кладки по участкам горизонтальными плоскостями, разделяющими камень и диафрагму. Так, в рассмотренном примере диафрагма имеется обычно только над полными камнями („Лиллипут“). Введя ее с толщиной 0,05 м при общей высоте камня в 0,20 м, мы должны, следовательно, найденную выше теплопроводность принять для горизонтального слоя в 0,75 высоты, а для остальных 0,25 высоты составить вышеприведенным методом новое выражение. Оно будет:

$$x' = \frac{l - 2b}{l \left(\frac{3 d_1 + d_2}{\lambda} + r_2 \right)} + \frac{2b \cdot \lambda}{l(3 d_1 + 2 d_2)}.$$

При принятых выше числовых величинах это даст:

$$x' = 2,03 \text{ кал.}$$

Средняя величина для обоих горизонтальных участков будет:

$$x'' = 1,77 \cdot 0,75 + 2,03 \cdot 0,25 = 1,84.$$

Это и есть теплопроводность кладки „Лиллипут“ в 1½ камня из обыкновенного бетона.

Вторым примером пусть будет у нас кладка из бетонных пустотелых камней одной из наиболее распространенных систем — а именно „Торонто“ в 2 камня (см. рис. 54).

На участке l кладки имеем в I ряду: сопротивление на участках одного рода, а именно через овальные пустоты (которые считаем прямоугольными) составляет

$$\frac{4d_1}{\lambda} + 3r_2,$$

(где r_2 — сопротивление воздушного прослойка d_2), а теплопроводность будет

$$\frac{1}{\frac{4d_1}{\lambda} + 3r_2} \text{ и на единицу длины или площади } \frac{1}{\frac{4d_1}{\lambda} + 3r_2} \cdot \frac{2l_1}{l}.$$

На участке второго рода сопротивление равно $\frac{2b}{\lambda} + r_2$, теплопроводность на единицу длины или площади всей кладки составляет $\frac{1}{\frac{2b}{\lambda} + r_2} \cdot \frac{2d_1}{l}$.

Общая внутренняя теплопроводность на единицу площади всей этой кладки будет:

$$x = \frac{2l_1}{l \left(\frac{4d_1}{\lambda} + 3r_2 \right)} + \frac{2d_1}{l \left(\frac{2b}{\lambda} + r_2 \right)}$$

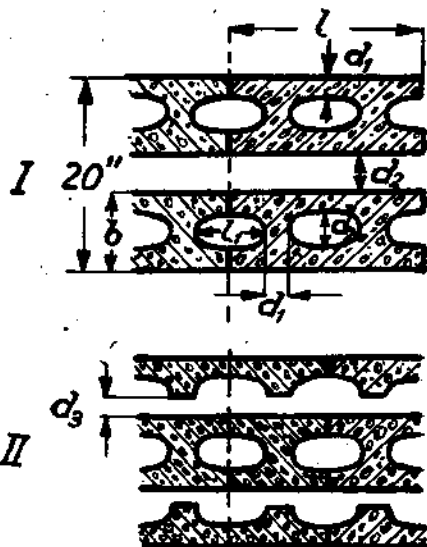


Рис. 54.

Для второго (II) ряда кладки (см. рис. 54) таким же образом получим:

$$x_{II} = \frac{2l_1}{l\left(\frac{4d_1}{\lambda} + 3r_2\right)} + \frac{2d_1}{l\left(\frac{2b}{\lambda} + 2r_3\right)},$$

где r_3 — есть сопротивление прослойка d_3 . Обычно в этой кладке имеем следующие величины: $l=0,5$ м, $l_1=0,2$ м, $d_1=0,05$ м, $b=0,20$ м, $\lambda=1$, $d_2=0,10$ м и, следовательно, $r_2=0,22$, затем $d_3=0,05$ м и, следовательно, $r_3=0,19$. Тогда получим для I ряда $x=1,25$ и для II $x_{II}=1,19$. След-

довательно, имеем вообще для этой кладки $x = \frac{x_I + x_{II}}{2} = 1,22$.

Сопоставляя это со сплошной бетонной стеной из бетона того же состава ($\lambda=1$), видим, что кладка в 2 камня „Торонто“ толщ. 0,5 м эквивалентна со сплошной при толщине последней в 0,82 м. В то же время она хуже нормальной стены в $2^{1/2}$ кирпича нового размера с внутренней теплопроводностью $\frac{\lambda}{e} = \frac{0,7}{0,64} = 1,1$ в 1,1 раза.

Выведенные выше формулы дают возможность легко учесть и разные способы затепления таких кладок — например, применение в них, вместо обыкновенного бетона — шлакового, а также учесть и влияние засыпки пустот тем или другим порошком. Для первой цели надо только в формулах подставить вместо $\lambda=1$ величину $\lambda_1=0,40-0,50$, а для второй, вместо r_2 и r_3 величины $\frac{d_2}{\lambda_2}$ и $\frac{d_3}{\lambda_2}$, где λ_2 есть коэффициент внутренней теплопроводности засыпаемого материала. Так при $\lambda_1=0,4$ получим для „Торонто“ $x_I=0,86$ и $x_{II}=0,84$, следовательно, $x=0,85$, что означает значительное утепление кладки даже сравнительно с нормальной кирпичной стеной. При введении в пустоты сухого шлака ($\lambda=0,24$) получим для кладки камней Торонто из обыкновенного бетона $x_I=0,79=x_{II}=x$ (при $r_2=\frac{0,10}{0,24}=0,42$ и $r_3=0,21$); а при введении шлака в кладку из шлакобетонных камней получим $x_I=0,59=x_{II}=x$.

Для кладки в $1^{1/2}$ камня „Торонто“ имеем формулу:

$$x = \frac{2l_1}{l\left(\frac{3d_1}{\lambda} + 2r_2\right)} + \frac{2d_1}{l\left(\frac{1,5b}{\lambda} + r_3\right)}.$$

Применив в ней одновременно шлаковый бетон и засыпку сухим шлаком, получим $x=0,86$. Таким образом, эта кладка

при своей общей толщине в 0,35 м значительно теплее нормальной стены в 2½ кирпича (хотя одновременно уступает ей в полезной теплоемкости).

Другим средством теплотехнического улучшения этой кладки является применение систем камней и кладок с более узкими пустотами. Степень влияния этого обстоятельства на теплопроводность кладки легко видеть по табл. в гл. I ч. I, сравнивая, например, теплопроводность воздушных полостей толщиной в 2 см и в 4 см или, еще лучше, сопоставляя сопротивления двух первых со второй. Полезно также ограничение высоты пустот путем введения в камни горизонтальных перекрышек (диафрагм), хотя именно для узких пустот это имеет очень малое значение и может даже оказаться вредным из-за увеличения сплошных прослоек бетона внутри кладки в горизонтальном направлении. По этим принципам строились ранее даже особые типы бетонных пустотелых камней (напр., система инж. Прохорова и Смирнова).

Но из указанного сопоставления легко видеть, что эффект от этих видоизменений невелик. Ниже мы увидим, что в позднейшее время это вообще утратило значение в связи с введением в норму заполнения пустот термоизоляционными порошками и с выработкой для этого более дешевых специальных типов камней (Амби, Феникс и т. п.).

Полезная теплоемкость пустотелой бетонной кладки, естественно, близка к тому, что мы видели для кладки из пустотелых кирпичей, с некоторым понижением в виду крупности пустот и большего процентного участия их в объеме кладки. При большом разнообразии типов камней и кладок здесь нельзя дать каких-либо общих решений. Однако, в виду обычно равномерного чередования в этих кладках пустот и сплошного материала, можно без большой ошибки учитывать их теплоемкость, как однородных ограждений (по формуле $\frac{c \cdot \rho \cdot x}{k}$), т. е. по их физической теплоемкости и коэффициенту общей теплопередачи.

Воздухопроницаемость кладки из бетонных пустотелых камней, несмотря на очень слабую воздухопроницаемость цементных бетонов, не уступает тому, что мы видели для нормальной кирпичной кладки. Действительно, приняв по таблицах воздухопроницаемость для 1 м жирноплотного бетона в 0,64, имеем для обычного наличия в стене 0,2—0,25 м сплошных бетонных стенок уже 0,64 · 5 или 0,64 · 4, т. е. 3,2—2,56 литров в 1 час на 1 мм, а при бетоне менее жирном — еще несколько более; это не отличается в общем от того, что имеем в обыкновенной сплошной кирпичной стене в 2½ кирпича, а при учете швов может даже оказаться перевес на стороне бетонной кладки.

Паропроницаемость кладки из бетонных пустотелых камней также не представляет существенных различий от других подобных стен из минеральных твердых материалов. Конденсация паров в пустотах имеет место преимущественно на холодных поверхностях, обращенных к пустотам, и по количеству своему бывает тем большей, чем менее число рядов пустот. По той же причине она значительнее, чем в кладке из пустотелого кирпича, что несколько повышает ее теплопроводность.

Как было выяснено выше, пустоты такой кладки выгоднее заполнять хорошими термоизоляционными порошками (кизельгуром, золой, торфом, шлаком); это одновременно увеличивает и сопротивление теплопотере и полезную теплоемкость стены и гарантирует в известной мере строителя от слишком вредного влияния обычных в этой кладке трещин и неплотностей швов. Поэтому указанная засыпка стала в настоящее время уже обычным техническим приемом.

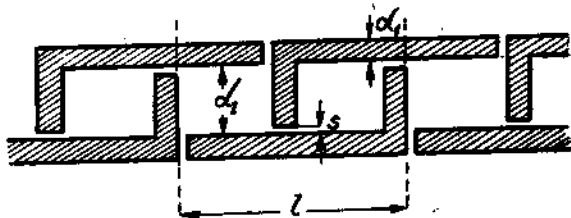


Рис. 55.

Вместе с тем, в сущности, отпал самый принцип пустотелости стен, и камни стали рассматриваться уже с точки зрения их удобств для заполнения пустот, почему снова получили первенствующее значение те, которые дают более широкие и сквозные в вертикальном направлении пустоты, а также специальные типы камней, приспособленные исключительно к засыпке.

Приведенные выше теоретические выводы достаточно согласуются с обследованиями, произведенными Мосздравотделом в 1925—26 г. над постройками Дукстроя на Ходынском поле, которые имели стены в $1\frac{1}{2}$ камня Торонто из шлакового бетона и с засыпкой пустот шлаком. В более высохшей после отстройки квартире (№ 2) констатирована удовлетворительная средняя температура, но несколько превышающая норму неустойчивость этой температуры во времени.

9. *Бетонные стены с внутренней засыпкой.* Раз принцип пустотелости отпадает в виду его практической невыгодности, становятся излишними те сложные формы бетонных пустотелых камней, которые были выработаны в интересах полу-

чения замкнутых воздушных пустот. Если бетонный камень рассматривается только как оболочка для засыпки в стену термоизоляционных порошков, то можно придать ему гораздо более простые формы, обеспечивая в то же время при минимальной толщине облицовки достаточную ее устойчивость. Таковы формы камней „Амби“, рис. 55, или „Феникс“, рис. 56. Та и другая форма могут служить для кладки стен различной толщины, смотря по теплопроводности засыпаемого в них материала; при этом будет изменяться лишь длина той ветви камня, которая направлена вовнутрь стены, так как эти ветви в вышеследующих рядах кладки взаимно перекрываются поочередно с той и другой стороны облицовки, и это перекрытие должно быть по возможно большей части длины ветви.

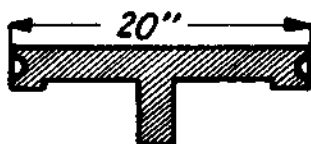


Рис. 56.

Выведем общую формулу для расчета теплопроводности кладки Амби, по которой можно рассчитывать те или другие элементы ее при заданных остальных — например, толщину шлаковой засыпки, если выбран состав бетона для самых камней или при обратном задании.

Обозначим чрез d_1 — толщину камня, d_2 — ширину прослойка, чрез λ_1 и λ_2 — соответствующие коэффициенты теплопроводности бетона и засыпки, чрез l — длину камня и чрез s — зазор кладки. Тогда на участке стены l высотой в 1,0 м (рис. 55) имеем:

а) 2 участка общей длиной $l - 2d_1$ с сопротивлением

$$\frac{2d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}$$

и с теплопроводностью

$$\frac{1}{\frac{2d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}}$$

что дает на единицу длины стены теплопроводность

$$\frac{l - 2d_1}{\left(\frac{2d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}\right) l}$$

б) 2 участка общей длиной $2d_1$ с сопротивлением

$$\frac{2d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2 - s}{\lambda_1} + \frac{s}{\lambda_2}$$

и теплопроводностью на единицу длины стены равной

$$\left(\frac{2d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2 - s}{\lambda_1} + \frac{s}{\lambda_2} \right) l.$$

Таким образом

$$x = \frac{l - 2d_1}{\left(\frac{2d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right) l} + \frac{2d_1}{\left(\frac{2d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2 - s}{\lambda_1} + \frac{s}{\lambda_2} \right) l}$$

Задавшись желаемой внутренней теплопроводностью этой стены — например, одинаковой с тем, что имеем для нормальной кирпичной (1,1), можем определить необходимую толщину засыпки и, следовательно, длину загнутой части камня при заданных других размерах его, а равно и при величине отступки s , при определенном составе бетона и засыпки. Так, приняв размеры $l = 0,5$ м, $d_1 = 0,05$ м, $s = 0,01$ м, $\lambda_1 = 1$ и $\lambda_2 = 0,24$ и решив уравнение (при $x = 1,1$) относительно d_2 , получим $d_2 = 0,28$ м, при чем длина загиба камня внутрь кладки будет $d_2 - s = 0,27$ м. При шлаковом бетоне камней и $\lambda_1 = 0,4$ получим $d_2 = 0,18$ м ($d_2 - s = 0,17$ м).

Таким образом, при обыкновенном бетоне камней в нашем климате требуется толщина шлаковой засыпки не менее 0,28 м, а при шлаковом бетоне она может снижаться в крайнем случае до 0,16 м. Очевидно, в случае применения в кладке обыкновенных бетонных камней по одной стороне стены (наружной) и шлакобетонных по другой — величина d_2 должна иметь среднее значение между найденными, т. е. $d_2 = 0,22$ м.

Однако все это — только в отношении теплопроводности. Полезная теплоемкость этой стены весьма мала, а именно, составляет при нормальном бетоне и ширине шлаковой засыпки $d_2 = 0,28$ м около 0,30.

Воздухопроницаемость стены довольно значительна: ее можно считать около 6 литров в 1 час на 1 мм при жирноплотном бетоне камней и обыкновенной известковой оштукатурке; при шлаковом бетоне и двух цементных оштукатурках получим около 15 литров в час на 1 мм.

Паропроницаемость стены значительна; но опасность большой конденсации паров внутри ее уменьшается симметричностью сопротивлений (двух бетонных стенок). Эту симметричность нежелательно нарушать введением разных оштукатурок; можно было бы скорее допустить (для жилых помещений) внутреннюю оштукатурку менее паропроницаемой (цементной), чем обратное положение. По той же логике, если внутренняя стенка кладки сделана из шлакового бетона, а наружная из обыкновенного, то следует первую оштукату-

турить более плотным раствором (цементным), чем вторую, или же последнюю не оштукатуривать совсем (чистая кладка с расшивкой швов).

Бетонные стены с засыпками могут возводиться не только из кладки камней, но и набивными в формах с оставлением в бетоне пустот путем помещения в нем переставных „пробок“; пустоты затем засыпаются термоизоляционными порошками. В виду этой последней операции пустоты делаются сквозными и возможно более широкими, насколько это позволяют соображения о прочности стен. Если бетон сделать шлаковым и обеспечить полную сухость засыпки (шлака, торфа и т. п.) как при первоначальном введении их, так и впоследствии (последнее — путем соответствующей оштукатурки поверхностей), то получаются стены с весьма низким коэффициентом теплопередачи и очень небольшой стоимости. Им легко придать размеры, обеспечивающие весьма низкие коэффициенты теплопередач, как это бывает нужно для холодильных складов, сушилок и проч. ($k = \approx 0,3$). Расчет их вполне аналогичен с изложенными выше приемами для пустотелых и засыпных систем.

10. *Деревянная каркасная стена с обшивками тесом и набивкой внутренней полости* теплым бетоном или термоизоляционными порошками. Типичным примером такой стены может служить та, в которой обе обшивки состоят из теса толщиной 2,5 см, а промежуток шириною от 12,5 до 17,8 см заполнен влажной смесью из 90% древесных опилок с 5% гипса и 5% извести, которые при высыхании дают некоторое подобие бетона; обе стороны стены оштукатурены обыкновенным известково-алебастровым или известково-цементным раствором. Система применима только при сухих материалах, так как, в отличие от бревенчатой рубки, эти стены не имеют способности самоуплотнения при усушке, и прибитые гвоздями обшивки дают множество щелей для утечки теплоты.

Коэффициент общей теплопередачи такой стены при толщине набивки в 12,5 см определим из уравнения:

$$\frac{1}{k} = 0,20 + 2 \cdot \frac{0,025}{0,14} + \frac{0,125}{0,08},$$

откуда

$$k = 0,51,$$

а при толщине набивки в 17,8 см $k = \approx 0,39$.

При этом обе оштукатурки мы не учитываем непосредственно, так как их главное назначение — прикрывать, насколько возможно, неплотности обшивок, и этими неплотностями вполне погашается добавочное сопротивление самых оштукатурок.

Полезная теплоемкость этих стен составляет: для первой — около 0,30, второй — около 0,35, т. е. несколько не достигают нормы для бревенчатой стены.

Воздухопроницаемость стены значительна, достигая норм бревенчатой стены, т. е. 12—15 литров в час на 1° разности температур. Паропроницаемость значительна, но конденсация не выходит из обычных норм для деревянной стены, так как хотя конструкция и неоднородна, но симметрична. Однако если эта симметричность (в смысле паропроницаемости) нарушена, то возможны дефективные результаты. Так, расположив по наружной обшивке под штукатуркой толь, получим значительную конденсацию паров под ним в обшивке, что, совместно с недостаточной сухостью самых материалов, вызовет сырость, загнивание дерева и засыпки и оживление грибка, если лес был заражен им. Современное строительство дало нам несколько весьма ярких иллюстраций к этому теоретическому положению.

Менее опасно расположение сопротивлений парам близ внутренней поверхности стены, ибо возможная при этом летняя конденсация паров наружного воздуха около данного сопротивления не будет значительной в силу малой разности температур наружной и внутренней, — особенно в зданиях облеженного типа, в которых такие стены применяются.

Наконец, при желании во чтобы то ни стало иметь подобный слой близ наружной поверхности, пришлось бы ввести еще более сильный слой (двойной) и близ внутренней стороны, чтобы соблюсти хоть некоторое равновесие между притоком и выходом паров. Но при этом материал всей стены должен быть совершенно сух, а при неполной сухости (но все же при воздушно-сухом состоянии) верхний торец стены (под кровлей) должен быть открыт для выхода паров вверх, т. е. верхняя обвязка здесь не должна плотно закрывать собой набивку, а несколько возвышаться над ней и над внутренней обшивкой.

Рассматриваемый тип построек был обследован Мосздравотделом и Московским Санитарным Институтом на ряде объектов (уг. Гагаринского и Чертельского пер. № 7/8, Верхн. Красносельская № 5-Б и др.). Результаты в общем были удовлетворительными; но в одном из домов, в котором наблюдения производились также и в предыдущем году, было констатировано ухудшение теплового режима — очевидно, из-за недостаточной сухости первоначально примененного леса. Со строительной точки зрения недостатками этой системы, сравнительно с бревенчатой рубкой, являются также: недолговечность стен из-за тонкости обшивок и неудобство смены нижних частей, не отделяемых от остальной конструкции подобно венцам рубки, трудность пополнения засыпок в случае их осадки, наконец, разведение в засыпках

паразитов (насекомых и мышей), так как до сих пор неизвестны достаточно долговечные и дешевые средства против этого (антисептики).

11. *Деревянная пустотелая стена типа „Стандарт“* состоит из легкого скелета и ряда деревянных обшивок, тесовых и фанерных, перемежающихся с воздушными прослойками и теплоизоляционными полотнищами шевелина, морозина, войлока, соломита, пробки, а также со слоями толя и т. п. На рис. 57 и 58 приведены два примера таких конструкций — одна в вертикальном разрезе, другая в горизонтальном.

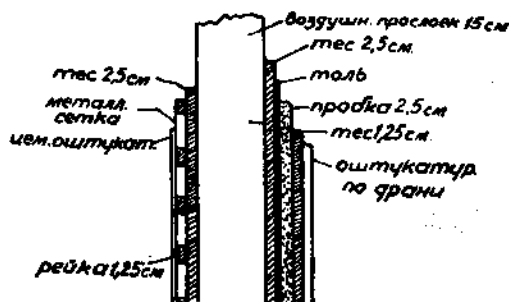


Рис. 57.

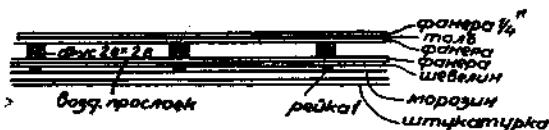


Рис. 58.

Теплопроводность их определяется по общим приемам

для твердых слоев и по табл. в гл. 1 ч. I, для воздушных прослоек. Так, система рис. 57 имеет коэффициент общей теплопередачи, определяемый из формулы:

$$\frac{1}{k} = 0,20 + \frac{2 \cdot 0,025}{0,14} (\text{дерев.}) + \frac{0,0125}{0,14} (\text{дерев.}) + \frac{0,025}{0,06} (\text{пробка}) + 0,22 (\text{возд.}) + 0,15 (\text{возд.}), \text{ откуда } k = 0,7,$$

при чем не учитываются обе оштукатурки и толь, предназначенные лишь компенсировать неплотность досчатых обшивок.

Полезная теплоемкость такой стены, естественно, очень низка — около 0,18 — 0,20, что особенно усугубляется расположением близ внутренней стены сильнейших термоизоляторов пробки и одной из дюймовых обшивок, а в типе рис. 58 — шевелина с морозином.

Воздухопроницаемость этой стены не может быть подсчитана при существующем состоянии лабораторных данных (относительно толя, дерева поперек волокон и пр.). Но по аналогии с другими подобными же материалами можно предполагать, что она соответствует общей норме для деревянных

бревенчатых стен. Паропроницаемость неравномерна. Однако большее сопротивление потоку паров — толь с тесовой обшивкой — расположено около внутренней поверхности, что не грозит сколько-нибудь значительной конденсацией паров внутри стены. Хуже обстоит дело в типе стены рис. 58, где главное сопротивление — толь с двумя фанерными слоями — расположено по наружной поверхности. Здесь в зимнее время неизбежна значительная конденсация, вредные последствия которой ограничиваются лишь тем обстоятельством, что отсыревание и загнивание не могут распространиться за пределы одного слоя фанеры в виду примакающей к последней воздушной полости.

При более правильной конструкции не было бы и этого единственного слоя фанеры, а холодная поверхность толя была бы обращена непосредственно в воздушную полость (при чем наружная фанера была бы заменена для прочности двумя деревянными слоями).

Постройка этого типа была обследована Мосздравотделом в 1925 г. (Хлебный пер., д. 24). В результате была установлена нормальность средней суточной температуры, но колебания ее в горизонтальном и вертикальном направлениях найдены чрезмерными.

Что касается колебаний во времени, то, к сожалению, наблюдениям этого рода в исследованной комнате помешал (по словам заключения) постоянный приток сюда теплого воздуха из жилой кухни и коридора.

12. Стены из соломита или камышита состоят из деревянного пустотелого каркаса, обшитого с обеих сторон плитами соломита или камышита толщиной около 6 см с оштукатурками по наружной и внутренней сторонам. В здании, обследованном Мосздравотделом, воздушный прослойк был 13 см; к этому присоединен еще слой толя по холодной поверхности воздушного прослойка.

Коэффициент общей теплопередачи определим из уравнения:

$$\frac{1}{k} = 0,20 + 2 \cdot \frac{0,06}{0,06} (\text{камышит}) + 0,22 (\text{возд.}),$$

откуда

$$k = 0,41,$$

при чем оштукатурки и толь не учтены, так как предназначены исключительно для закрытия пор камышита¹⁾.

Полезная теплоемкость стены весьма незначительна — всего около 0,15 — и система возможна только при длительно

¹⁾ Эта мера не применена в данном случае ко второй поверхности камышита в прослойке, в силу чего его изолирующее действие несколько снижено, и действительный коэффициент k будет большим найденного нами.

действующем отоплении. Воздухопроницаемость стены существенно зависит от наличия в ее составе, кроме солоμίта и оштукатурок, также и толя. При составе стены, упомянутом выше, воздухопроницаемость должна быть близкой к тому, что имеем для деревянной рубленой стены. Более точные расчеты здесь невозможны за отсутствием достаточных лабораторных данных.

Паропроницаемость вообще весьма значительна, поэтому опасность конденсации паров внутри стены возникает при наличии в холодной зоне сколько-нибудь значительных (сравнительно с соломитом) сопротивлений. В приведенном примере толь расположен не в самой холодной части стены и обращен своей внутренней поверхностью в воздушный прослойк. Поэтому конденсация паров будет и незначительной, и без возможности распространения в массу конструкции. Расположение толя по наружной поверхности камышита было бы, согласно выясненному выше, гораздо более опасным.

Постройки данного типа были обследованы Мосздравотделом в 1923—1924 г. (Проезд Девичьего поля, д. 10) и в 1925 г. (Ходынский поле, жилищно-строит. кооператив „Свет и Воздух“). Результаты исследования вполне подтверждают указанные теоретические характеристики (большая неравномерность температуры в пространстве и времени), в силу чего постройки признаны неудовлетворительными.

13. *Кирпичная стена с пустотелыми швами* (архит. Вутке). Если при кладке рядов стены оставлять один из продольных швов незаполненным раствором и, напротив, предохранить его от этого заполнения закладкой перегнутого многократно кусочков толя или промасленной бумаги, то получим в стене ряд весьма узких воздушных прослоек толщиной около 2 см, которые будут новым сопротивлением для теплопередачи. Однако, в силу неопределенности размеров воздушных прослоек и неполного их разобщения между собою, величина этого сопротивления неопределенна. Предположив его двойным против одного прослойка шириною в 2 см, получим по таблице Вирца при $s = 0,9$ сопротивление 0,36. Таким образом, для кладки в 2 кирпича получим:

$$\frac{1}{k} = 0,20 + \frac{0,52}{0,70} + 0,36,$$

откуда

$$k = \infty 0,8$$

т.е. получим величину, почти одинаковую с Герардом.

Из этого видно, что дальнейшее утонение кладки неуместно. Это подтверждается и данными обследования такой опытной постройки со стенами в 1½ кирпича со стороны Мосздравотдела (см. „Строит. Промышленность“

1927 г., № 10. „Наблюдения над режимом помещения со стенами „теплой кладки“ по Вутке“ д-ра Прокофьева).

Таким образом мы выгадываем в кладке стены $1\frac{1}{2}$ кирпича, расходясь взамен того на вышеуказанные прокладки.

При сомнительной экономии кладка связана со следующими недостатками:

1) указанные прокладки мало долговечны и по своей прочности не гармонируют с прочим материалом стены;

2) эти смолистые или жирные прокладки (толь и т. п.) уменьшают естественную вентиляцию стены;

3) те же прокладки, представляя увеличенные сопротивления на пути паров, вызывают их конденсацию в стене;

4) незаполнение швов ослабляет кладку, лишая ее монолитности и уменьшая сопротивление на неравномерное (эксцентричное) сжатие от перекрытий, перемычек и т. п.;

5) полезная теплоемкость стены, хотя и допустима по величине, но все же меньше, чем у нормальной стены в $2\frac{1}{2}$ кирпича.

В виду сомнительности экономии и перечисленных дефектов данный тип стены не может конкурировать с лучшими из приведенных выше типов (Герарда, шлакобетонными, Амби и др.).

14. Стены холодильников и надземных ледников. Надземные постройки, в которых летом охраняется пониженная температура, а зимой повышенная ¹⁾, ставят строителю особые задачи, трудность которых еще не вполне сознается заинтересованными кругами. Обычно учитываются при этом соображения двух порядков: теплопроводность ограждений, при чем коэффициент k общей теплопередачи снижается приблизительно до 0,3, и затем предупреждается отсыревание термоизоляционных слоев путем прокладок и обмазок по ним смолистых слоев. Но совсем не считаются с полезной теплоемкостью ограждений, а в противосырьстных операциях упускают из вида три весьма важных обстоятельства:

1) что отсыревание весьма нежелательно также и в основной конструкции ограждений (помимо термоизоляционных слоев), для чего также нужна защита;

2) что смолистые слои, как толь, руберойд, обмазки, довольно проницаемы для водяных паров при вполне газообразном состоянии последних и становятся непроводниками лишь для паров уже конденсирующихся, т.-е. в холодных зонах ограждений;

3) что источником паров является не только сам холодильник, но не в меньшей мере и наружная атмосфера (летом).

¹⁾ Последнее часто отсутствует.

Из этого видно, насколько недействительными являются обычно применяемые „противосыrostные“ слои при термоизоляции. Если они расположены лишь с одной стороны от последних, то, помогая делу в один сезон, они сильно вредят ему в другой; например, внутренний смолистый слой (т. е. со стороны холодильника) будет недостаточно полезным зимой ¹⁾, но вреден летом, внешний — наоборот. Если они расположены по обе стороны термоизоляции, то в каждый из двух ответственных сезонов один из них будет слабо препятствовать доступу паров к термоизоляции, а другой — несколько сильнее задерживать при ней прошедшие сюда пары; например, летом смолистый слой, ближайший к внешней поверхности ограждения, окажет мало сопротивления парам из атмосферы в силу более высокой температуры в этой части ограждения и, следовательно, полной газообразности здесь паров; а раз они прошли, то дальнейший смолистый слой, как более холодный, окажет уже большее сопротивление их движению, и они будут конденсироваться в массе самой термоизоляции.

Из этого видно, насколько непродуманы наши обычные приемы противосыrostной защиты в виду отсутствия у строителей ясного представления об источниках и порядке течения паров в конструкциях.

Вообще же два отмеченных выше общих дефекта в строительстве холодильников — игнорирование полезной теплоемкости ограждений и недостаток учета процессов конденсации паров — достаточно проявили себя в практике. Первый дефект обусловил собою господство в обычном холодильном строительстве ограждений без достаточной холодоустойчивости, с большой склонностью к температурным колебаниям внутри помещений. Второе обстоятельство вызвало то общеизвестное положение, что обычные термоизоляционные слои наших холодильников, даже самые прочные на загнивание, как пробка, гнивают примерно каждые 10 лет, а ограждения, пропитываясь конденсационной влагой, дают гораздо ббльшие коэффициенты общей теплопередачи, чем это предполагается в расчете. Так называемые „противосыrostные“ слои часто увеличивают отсырение стен, а не уменьшают его, что зависит всецело от их расположения в общей системе слоев и относительных сопротивлений последних протоку паров.

Для увеличения полезной теплоемкости стен холодильников следует располагать сильнейшие термоизоляционные слои с наружной стороны стен, одевая их для прочности и огнестойкости листовым металлом или асбестовой цементной

¹⁾ Говорим „недостаточно“, потому что он находится тогда в теплой части ограждения и потому довольно проникаем для паров холодильника.

фанерой (искусственным шифером, этернитом). Согласно приведенным в части II данным, это способно увеличить полезную теплоемкость стен в 2—2½ раза.

Еще важнее предотвратить, насколько возможно, конденсацию паров внутри всего ограждения путем целесообразного расположения сопротивлений току паров. Так как в холодильниках расчетная температурная разность приблизительно одинакова для лета и зимы (достигая в обоих случаях 25—30° Ц), то при работе холодильника в оба сезона одинаково невыгодно расположение прогивосыростных слоев (металлических листов, руберойда, смоляной обмазки и т. п.) как всецело близ наружной, так и исключительно близ внут-

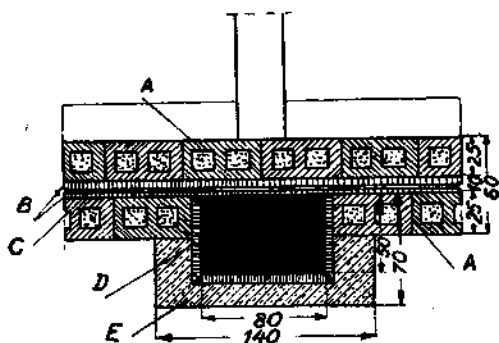


Рис. 59.

A — бетонные камни. | C — воздушные пустоты.
B — торфолеум. | D — пробка.

ренней поверхности стены. Остаются три более приемлемых способа:

1. Расположение этих слоев в середине стены, притом не в геометрической середине, а в тепло-технической, с примерно равной теплопроводностью по обе стороны. Тогда указанный процесс конденсации будет иметь место в оба сезона (в каждый с особой стороны от слоя), но в уменьшенной степени, так как снижение температуры около противосыростного слоя будет всегда сравнительно небольшим. Кроме того, положительной стороной этого расположения является и то, что накопившаяся за один сезон влага внутри ограждения легко испаряется и удаляется в течение следующего с его обратными термическими условиями, так что в общем не происходит долговременного и прогрессирующего отсырения конструкции.

Пример подобного устройства представляют стены Кельнского холодильника (рис. 59), в котором противосыростные слои, однако, так слабы, что этот вид стен можно отнести и к типу пункта 3-го настоящего перечня.

2. Постановка двух сильных непроводников для пара (металл листовой): одного близ внутренней поверхности ограждения, другого близ наружной. Тогда приток паров вовнутрь ограждения будет вполне парализован в оба главных сезона эксплуатации. Однако при этом собственные материалы ограждения между обшивками должны быть

с самого начала достаточно сухими; а поскольку в этом обычно не бывает полной уверенности, необходимо в верхних торцах ограждения (под мауэрлатами кровли) оставлять выходы для остатка внутренних паров, свободное „дыхание“ для материала¹⁾.

3. Полное отсутствие противосыростных слоев. Оно вполне приемлемо при условии, что в остальных слоях стены нет больших различий в паропроницаемости, особенно же в слоях близ внутренней и наружной поверхностей. Поэтому здесь вполне уместны или однородные стены, или стены с симметричной конструкцией относительно середины толщины.

Заметим, что с точки зрения полезной теплоемкости расположение сильных термоизоляторов в середине представляется сравнительно более приемлемым, чем по внутренней поверхности стены, так как при этом вся внутренняя половина конструкции весьма сильно аккумулирует тепло. Таким образом в симметричном типе стен на оси симметрии может быть расположена не только пароизоляция, но и термоизоляция. Это мы видим в Кельнском холодильнике, в котором в середине расположены оба сильнейших термоизолятора — две плиты терфолеума, имеющие в себе и смолистую пароизоляцию.

Наши же обычные типы стен холодильников конструируются беспринципно (в указанных двух отношениях — полезной теплоемкости и конденсации) и достаточно нерационально, за что мы и платим столь высокий налог, как частая смена изоляций и слабое ее действие.

Стены ледников (надземных) должны удовлетворять тем же требованиям, как и у холодильников; но, поскольку лед в них ставится не пиленный, не отдельно от стен и может соприкасаться с ними, стены его должны иметь изнутри соответствующие предохранительные обшивки, — например, тесовые по рейкам (с воздушным прослойком в толщину реек).

14. Общие выводы о способах уменьшения теплопередачи стенами зданий. Предыдущее рассмотрение стен разной конструкции и вычисления их теплопроводности и полезной теплоемкости, при одновременном учете естественной вентиляции и опасностей конденсационного увлажнения, показывает, что при стремлении техники отступить от довольно дорогих нормальных типов сплошных однородных стен и перейти к более легким и дешевым встретились разнообразные затруднения, то в отношении полезной теплоемкости, то по опасностям конденсации. При последующем

¹⁾ Упомянутая выше в гл. 3 ч. II в связи с вопросом о полезной теплоемкости обшивка наружных стен металлическими листами для прочности и огнестойкости влечет за собою таким образом постановку такой же обшивки и с внутренней стороны стены с принятием только-что указанной меры для дыхания последней вверх.

опыте и анализе, конструкции пустотелые в общем не оправдали первоначальных надежд на них,—надежд на выгоду использования „дарового“, „самого легкого и нетеплопроводного“ строительного материала—воздуха, и в настоящее время в отношении их господствуют в научно-технических кругах пессимистические мнения. „Девять десятых примененных (в строительстве) воздушных полостей увеличивают теплопотерю, вместо того, чтобы уменьшать ее“,—говорит известный профессор Н. Gröber в своем *Einführung in die Lehre von der Wärmeübertragung*“ Berlin 1926, стр. 158. Причина этого—не только увеличение теплопроводности таких прослоек от конвекции и лучеиспускания, но и трудность достижения полной их замкнутости, без чего теплопроводность их возрастает еще более. Мы прибавим к этому опасность уменьшения этими прослойками полезной теплоемкости стен и при некоторых условиях—увеличение в них конденсации паров.

Другое важное средство для конструирования облегченных стен—это применение термоизоляционных порошков и плит. В виде засыпок пустотелых систем они уже заменили собой вышеуказанный неоправдавший себя принцип пустотелости, а в строительстве холодильном издавна играли выдающуюся роль. Но их обычное расположение—по внутренней поверхности стен—грозит большим снижением их полезной теплоемкости и потому должно применяться в постройках для постоянного пребывания людей осторожно, в известном согласовании с системой отопления (или искусственного охлаждения в холодильниках).

Напротив, в таких помещениях, где не нужна длительная устойчивость температуры при перерывах отопления или эти перерывы совсем отсутствуют, нам выгодно иметь внутреннюю термоизоляцию, облегчающую начальный нагрев (натоп) помещения и несколько уменьшающую его теплопотерю, а именно: рядовую (за каждый час эксплуатации помещения)—в силу сокращения добавочных теплопотерь всякого рода углами ограждений—и общую—в силу отсутствия потери аккумулированной теплоты по окончании эксплуатации помещения. У нас, при редкости систем непрерывного отопления (за весь отопительный сезон), примером выгоды внутренней термоизоляции могут служить ограждения помещений, не отапливаемых ежедневно, так как пользование ими носит такой же прерывистый характер—например, храмы, сдаваемые внайма свадебные залы и т. п. Здесь для пользования помещением нет необходимости прогревать его ограждения в нормальной степени во всю их толщину, ибо от них нужна для краткого пользования помещением только известная теплота воздуха, а последняя может быть достигнута скорее всего и с меньшей затратой топлива именно при внутренней термоизоляции.

Короче говоря, внутренняя термоизоляция и вообще малая теплоемкость ограждений уместны во всех тех случаях, когда периоды пользования помещением и периоды отопления его совпадают; когда же этого совпадения нет и период пользования включает в себя большие перерывы отопления, уместна внешняя термоизоляция и вообще большая полезная теплоемкость ограждений.

Глава 2. Прочие части постройки. Подвалы.

1. *Фундаменты.* При обычном устройстве фундаменты не имеют почти никакого теплового значения для наших зданий. Как легко видеть из таблиц теплопроводности, сырой бетон фундамента или его сырая кирпичная кладка, никогда не просыхающие в почве, имеют почти те же коэффициенты внутренней теплопроводности, как и самая почва. Поэтому фундамент в своей подземной части почти не затепляет почвы подполья.

Между тем, здесь именно происходят главные теплотери этой почвы. По методу расчета подпольных температур, данному в гл. 2, ч. I, легко убедиться, какое важное значение имело бы затепление этой почвы фундаментом — особенно для сплошных полов, расположенных на почве и имеющих весьма неравномерную по площади жилища температуру.

Но почти всякий материал, пропитавшись в почве влагой, приближается по своей теплопроводности к этой почве и влаге. Даже шлаковый бетон существенно помогает делу лишь при увлажнении, не превышающем значительно влажность обыкновенного бетона или кладки. Но при своей пустотности он именно способен увеличивать свою влажность более названных материалов, если только почва сыра и может насытить водой его пустоты. Поэтому лишь в сухих почвах можно затеплять им почву под зданием.

Более общее значение имели бы фундаменты с воздушным прослойком (рис. 60). Здесь, независимо от сырости материала фундамента, мы имели бы по крайней мере одно верное сопротивление тепловому потоку — слой воздуха. Лишь в очень сырых и жирных грунтах этот прослойк подвергается опасности заполнения водою, и потому устройство его было бы излишним.

Совершенно особый род теплотехнических соображений вызывается вопросом об общей глубине фундаментов гражданских сооружений, о необходимости углублять их подошву ниже линии зимнего промерзания почвы. В противном случае,

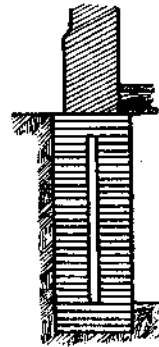


Рис. 60.

как известно, стены капитального типа (кирпичные, бетонные, каменные) дают при обычных глинистых грунтах трещины. Эти дефекты объясняются выпучиванием под подошвой мокрых глинистых грунтов при замерзании, что и тревожит фундамент и выше стоящую стену.

Однако выпучивание замерзающего грунта не расстраивает стен непосредственно. Упомянутые трещины не появляются зимой,—они получаются только весной при оттаивании. Лишь очень малые и легкие кладки—как, например, крыльца, мелко заложенные столбики и т. п. — выпучиваются непосредственно зимою. Обыкновенные тяжелые стены не дают видимых деформаций от замерзания, но дают трещины явно от неравномерной осадки при оттаивании почвы весной. Как возможна эта осадка, раз не было предварительного поднятия вверх, выпучивания зимою?

Ответ на этот вопрос может быть дан, повидимому, только один. Замерзающий под тяжелой стеной грунт выпучивается из-под фундамента в боковые стороны, главным образом в сторону талого грунта под зданием. Это выпучивание, одновременное с замерзанием, представляет собою процесс пластического передвижения, знакомого нам по примеру течения ледников. В силу большого веса стены процесс расширения грунта направляется в стороны меньшего сопротивления — обыкновенно внутрь здания, где талый грунт легко уступает давлению. При этом количество грунта под фундаментом фактически убывает зимой, после чего весной, при оттаивании, неизбежна осадка фундамента и стен. Но эта осадка не может происходить равномерно: южная сторона, как и вообще более солнечные стороны здания, дает более ранее оттаивание почвы на всю глубину промерзания и потому оседает ранее северных и теневых стен. Отсюда — неизбежность трещин, преимущественно в западных и восточных стенах над более слабыми их сечениями (по перемычкам оконных и дверных проемов). Поскольку и одновременно оседающие части южной стены или северной имеют под собой неоднородный грунт и разную степень его влажности (с осени), эти стены также могут давать трещины, особенно при значительной длине, когда указанные различия условий бывают большими; однако интенсивность трещин здесь вообще должна быть меньшей, чем по западным и восточным стенам.

Указанное объяснение делает понятным ряд попутно наблюдаемых явлений при устройстве мелких фундаментов. Так, из практики известно, что раз появившиеся в стенах трещины такого „фундаментного“ характера не могут быть залиты или заделаны прочно: они возобновляются каждую весну при оттаивании почвы, так как указанные выше пластические выпучивания грунта, естественно, повторяются ка-

жду ю зиму. При этом стены должны давать ежегодно некоторую новую осадку вниз: на это явление также имеются некоторые практические указания. Далее в практике известны многочисленные случаи вполне благополучного существования тяжелых каменных стен на очень мелких фундаментах, даже при глинистых и растительных почвах. Однако, эти случаи сводились до сих пор к вполне понятным причинам местного характера; это бывало или в очень сухих грунтах на скатах местности с очень жирным поверхностным слоем (водонепроницаемым), или же в затененных местах: в лесу, в тесной дворовой застройке и т. п., когда нет упомянутой выше неравномерности весеннего оттаивания почвы.

Есть и некоторые данные экспериментального характера. В 1925 году в районе Воробьевых гор по инициативе автора была выстроена на средства Главного Правления Госуд. Страхования опытная станция огнестойкого строительства. В числе других опытов там подверглись исследованию и мелкие фундаменты на жирном глинистом грунте. Все постройки (сист. Герарда) очень малой величины не дали трещин даже на мелких фундаментах (глубиною 0,5 м) при тощем бетоне с кирпичным щебнем (1:6:9). Но постройки большей величины обнаружили трещины преимущественно по западным и восточным сторонам.

Из выясненного выше процесса осадки стен на мелких фундаментах вытекает некоторая возможность бороться с этим явлением средствами более дешевыми, чем углубление фундаментов ниже линии промерзания почвы. Раз фундамент дает место осадке только путем изгиба его вниз нагрузкой стен при весеннем оттаивании почвы под ним, то ясно, что при бетонном материале этого фундамента он должен быть снабжен верхней арматурой. Так и было испытано с одним зданием большего размера на указанной опытной станции: это здание не дало никаких дефектов в стенах, тогда как два других таких же здания и с той же ориентацией по странам света, но не имевших указанной арматуры или имевших ее не вверху, дали трещины (как указано выше, преимущественно по западным и восточным стенам).

Арматура, оказавшаяся достаточной, состояла из 4 железных прутков с диам. $\frac{1}{2}$; по сделанным вычислениям, эта арматура оказалась в 3 раза дешевле, чем стоило бы углубление фундаментов до линии промерзания. Конечно, число объектов малой опытной станции слишком недостаточно, чтобы делать на основании этих опытов решительные выводы. Но соответствие этих единичных результатов с теоретическим истолкованием процесса придает большую вероятность тому, что вопрос разрешится в этом именно направлении, и мы получим одно из новых средств для удешевления строительства малых каменных зданий.

Под зданиями деревянными в практике обычно делаются кирпичные фундаменты с глубиной меньшей, чем глубина промерзания почвы, так как деревянным стенам не угрожает появление трещин в силу самой их конструкции и материала. Однако и фундаменты под ними обычно не дают при этом трещин. Это происходит потому, что такие кладки не тяжелы. Под ними не бывает в значительной мере указанного выше пластического выпучивания грунта в боковые стороны. Расширение грунта происходит частью вверх, частью в боковые стороны, а потому ни в одном из этих направлений не достигают больших величин. Кроме того, зимнее выпучивание грунта вверх происходит довольно равномерно по периметру здания для разных стен его, так как подмерзание почвы под фундаментом происходит всегда в такую позднюю пору солнечного года (декабрь — для климата центральной полосы), когда влияние солнечных лучей на почву около разных стен здания весьма незначительно и не может вызвать различия во времени промерзания подошвы¹⁾. Таким образом, это замерзание и выпучивание фундамента вверх не имеет тех несовпадений по времени и различий по величине для разных стен, отчего собственно только и могут получаться трещины в последних. Далее, при весеннем оттаивании, когда могла бы получаться небольшая осадка солнечных сторон под влиянием небольшого частичного зимнего выпучивания грунта, этот процесс задерживается тем обстоятельством, что в силу своего малого веса фундамент деревянного здания не садится непосредственно за ослаблением оттаявшего грунта — так как даже разреженный оттаявший грунт способен выдерживать его нагрузку²⁾. Короче говоря, фундамент деревянного здания не настолько легок, чтобы его видимым образом выпучивало морозом вверх, как крыльца или мелкие столбики, и не на столько тяжел, чтобы непосредственно оседать при весеннем ослаблении под ним грунта.

Явления промерзания грунта под фундаментами зданий и около них представляют большой интерес для строителя, особенно в областях с суровым климатом. Здесь этими явлениями объясняется ряд дефектов в постройках, возведенных даже на глубоких фундаментах или на вечной мерзлоте. Так произведенные в свое время исследования над дефектами и раз-

¹⁾ Это как-раз обратно тому, что происходит весной, когда оттаивание глубоких слоев почвы происходит уже при высоком стоянии солнца и при большом влиянии его лучей. Это различие вытекает из общезвестного несовпадения стадий солнечного года с температурными условиями под влиянием теплоемкости почвы и скрытой теплоты таяния снежного покрова.

²⁾ Подошва фундамента под деревянным зданием обычно у нас сильно недогружена до допускаемого напряжения на грунт, что и дает последнему возможность выдерживать это давление даже в ослабленном состоянии (при уменьшенной плотности, разрежении).

рушениями каменных зданий Дальневосточного края ¹⁾ выяснили, что указанное выше выпучивание замерзающего около зданий грунта в сторону талой почвы под зданиями вызывает изгиб всех фундаментов и расположенных над ними стен в горизонтальном направлении, так что стены, особенно в своих нижних частях, оказываются вогнутыми в сторону середины зданий. При этом они дают трещины, характерные для таких именно деформаций, при которых точками опор и реакций служат поперечные стены и, в частности, наружные углы. Эти последние испытывают, кроме того, в большей мере, чем прочие части стен, еще действие примерзающего к ним грунта при его выпучивании вверх под влиянием расширения замерзающих нижних слоев. От этого действия углы зданий часто несколько приподнимаются вверх, что также наглядно бывает выражено особым типом трещин. В порядке таких процессов многие весьма капитально выстроенные здания на Дальнем Востоке оказались сильно поврежденными, а частью даже разрушенными (вагонный цех Читинских ж.-д. мастерских, военные казармы во Владивостоке и др.).

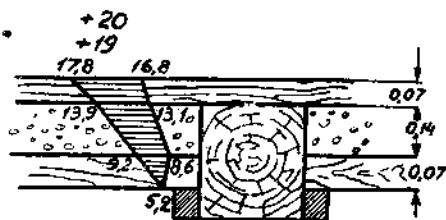


Рис. 61.

При подобных условиях указанные выше пустотелые фундаменты, конечно, неприменимы. Здесь необходимы только сплошные фундаменты из цементного бетона с принятием мер:

а) к легкому скольжению стеной кладки по поверхности цоколя, чтобы изгиб последнего менее затрагивал расположенные над ним стены;

б) к получению гладких стенок у всего фундамента (включая его подземную часть) для уменьшения примерзаемости грунта к фундаменту и подпора последнего при выпучивании почвы.

2. *Полы* (нижние). Возьмем обыкновенные двойные полы над воздушным пространством подполья (рис. 61), с заполнением полости между накатом и верхним настилом смазкой и шлаком с коэффициентом $\lambda = 0,24$. Тогда общий коэффициент теплопередачи определим из уравнения:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{2d_1}{\lambda_1} + \frac{0,14}{0,24} = \frac{1}{7,0} + \frac{1}{5} + \frac{2 \cdot 0,07}{0,14} + \frac{0,14}{0,24},$$

¹⁾ См. инж. В. И. Свинын „Деформация зданий и сооружений“, „Инженерный журнал“, № 10, 1912 г.

откуда $k = 0,49$. С учетом влияния балок получим приблизительно $k = 0,47$.

Однако тепловые качества пола должны удовлетворять несколько иным требованиям, чем другие части здания, как стены или потолки. Так как мы находимся почти постоянно в непосредственном соприкосновении с полом, то от него требуются, помимо общего ограничения теплопередачи, еще следующие условия: а) Особенно малая разность температур его поверхности и воздуха в помещении. Относительно других ограждений (стен, потолков, окон) здесь пределом было такое снижение температуры на их внутренней поверхности сравнительно с воздухом помещения, при котором возникала опасность конденсации на них паров жилья; это давало все же возможную разность до 6—7%. Для полов это совершенно недопустимо, и указанная разность не должна переходить предела 2—3° Ц¹⁾. При найденном выше коэффициенте $k = 0,47$ это требование будет удовлетворено лишь при условии, что температура воздуха в подполье не будет значительно ниже 0°. Действительно, из уравнения:

$$\alpha_s \cdot \Delta t = k (T_s - x)$$

при $\alpha_s = 7,0$, $k = 0,47$, $T_s = 20^\circ$

имеем:

$$x = 20 - \frac{7,0 \Delta t}{0,47},$$

что дает нам $x = 0$ при $\Delta t = 1,3^\circ$.

Температура подполья обычных размеров бывает у нас близкой к 0° при расчетной разности температур (наружной и в помещении). При необычных размерах надо делать расчет согласно приема гл. 2, ч. I.

Если подполье сделано совсем холодным, с тонкими докольными стенками, как это делалось иногда в некоторых стандартных деревянных постройках — то указанный расчет на температуру поверхности пола даст нам при $x = -25^\circ$ (при -30° наружной температуры) и $\Delta t = 2^\circ$ $k = 0,31$, что достижимо лишь с большим трудом при помощи многослойных термоизоляций. Кроме того, полезная теплоемкость подобных конструкций (расчитываемая уже на разность температур в 45° вместо 20) получается весьма низкой, и вся система оказывается невыгодной.

б) Малая непосредственная внутренняя теплопроводность (λ) материала верхней части пола — независимо от ве-

¹⁾ Очень характерно, что для обитателей вредна также и большая разность температур в обратном смысле (превышение температуры пола над температурой воздуха), как это показали случаи отопления помещений путем нагревания пола в Швейцарии (см. Готтингер „Отопление и вентиляция“).

личины коэффициента общей теплопередачи. В основе этого требования лежит общеизвестный процесс непосредственного оттягивания теплоты от нашего тела при соприкосновении его с предметами более низкой температуры, при чем решающее значение имеет скорость этого оттягивания ближайшим материальным слоем предмета; это то самое различие, в силу которого железный предмет кажется нам холоднее на ощущение, чем деревянный при той же температуре. В Германии Ридль произвел опыты для сравнения в этом отношении различных половых настилов, прикладывая к ним металлическую плиту с температурой в 40° и наблюдая снижение ее температуры. Через 6 минут оно было:

на асфальтовом полу	на 6° Ц.
„ цементном	2,9—3,9°
„ глинобитном	3,1°
„ метлахском	2,7°
„ паркетном	1,6—2,2°
„ покрытом кожей	2,1°
„ „ пробков. линолеумом в 4 мм	1,9°
„ „ то же в 7 мм	1,7°
„ „ кокосовой тканью	1,1°.

В ч. I гл. 2 приведены наши исчисления теплотерь полов сплошных, на лагах и над подпольями. Здесь добавим только ряд практических соображений.

Весьма выгодно затепление пола путем засыпки по его периметру, прилегающему к наружным стенам, шлака или иного теплоизоляционного материала, а также устройство здесь воздушных пустот, равно как и в самом фундаменте близ поверхности почвы (см. рис. 62). Так, если в составе пола,

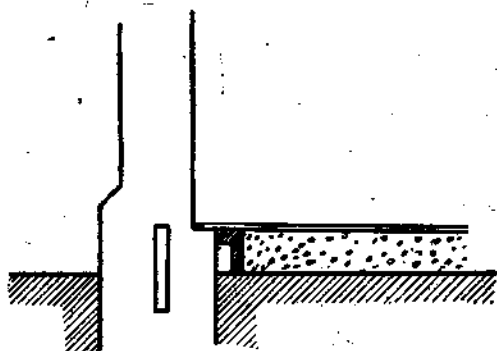


Рис. 62.

представленного на рис. 15 и рассмотренного в гл. 2 ч. I, будем иметь около наружных стен 0,5 м шлака с коэффициентом $\lambda = 0,25$, углубленного до уровня промерзания, то получим теплотерю на расстоянии 1 м от стены не 20 кал, как это представлено в диаграмме на рис. 15, а всего 12 кал, т. е. достигнем здесь того же режима, какой был

ранее лишь в следующей 2-метровой полосе пола¹⁾. Весьма полезно так-же разсыпка шлака и по всему подполью, а еще лучше — сочетание этой меры с углубленной изоляцией его периметра.

К этим мерам может быть присоединено общее улучшение теплотехнических свойств самого пола путем выстилки его каким-либо нетеплопроводным настилом, который, наряду с уменьшением непосредственного охлаждения при соприкосновении, уменьшит и общую теплопотерю (паркет в асфальте, ксилолит и т. п.). Влияние этой выстилки, в зависимости от ее состава и толщины, легко проследить по уравнению (t_n), вставив в него надлежащее значение для k по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b} + \frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} + \dots}$$

где x_1 и λ_1 , x_2 и λ_2 и т. д. суть известные нам характеристики добавочных слоев настила. Из данных тех же расчетов в гл. 2 ч. I вытекают еще следующие строительные выводы.

Теплопотеря пола на единицу его площади значительно уменьшается вместе с увеличением ширины здания, что наглядно видно из сопоставления примеров 1 и 2 (рис. 15 и 16) приведенных расчетов. Это отражается главным образом на теплопотере средних частей пола, каковая может достигать двойной величины у зданий меньшей ширины сравнительно с более широкими (10 и 5 кал на кв м).

Далее, при одинаковой ширине теплопотеря полов уменьшается с увеличением длины здания, как это видно из сопоставления данных для здания длинного (рис. 15) и квадратного с той же шириной. В последнем теплопотеря краевых частей пола мало увеличена сравнительно с первым, но в средних частях она больше на 40—45%, а в общем для всего пола потеря возрастает примерно на 25%. Наконец, из формул (t_N) и (t_n) в гл. 2 ч. I легко видеть, что как температуры почвы под полом, так и его теплопотери сильно зависят от коэффициента λ почвы. Мы принимали его = 1. Но в местах сырых он возрастает до 1,5 и более. Наши обычные фундаменты по своему составу не способны воспрепятствовать передаче наружной почвенной влажности внутрь здания — в порядке капиллярности в сторону более сухого подпольного грунта — не говоря уже о том, что всегда остаются пути подобного же отсырения снизу, через более глубокие слои почвы. Следовательно, здесь все зависит

¹⁾ Для учета этого влияния надо величину X в формуле (t_N) и x в формуле (t_n) (x , стоящее вне разности $X-x$), заменить большими эквивалентными новому сопротивлению величинами, а именно 7,5 м и 3,25 м.

главным образом от естественных качеств почвы. Если к этому добавим, что ими же определяется и глубина промерзания H , играющая весьма важную роль в наших формулах (t_N) и (t_n), то станет ясным, насколько большое значение для теплоты полов имеет сухость почвы, занимаемой под здание. Формулы (t_N) и (t_n) дают полную возможность учесть все эти факторы на примерах практических вычислений, подобных сделанным нами в гл. 2 ч. I.

Полезная теплоемкость обыкновенного двойного пола, вычисленная по простейшему способу (для которого графическая иллюстрация дана на рис. 61), дает нам величину 0,8 при своей нормальной расчетной разности температур в 20° .

Воздухопроницаемость такого пола близка к тому, что мы имели для всех деревянных стен.



Рис. 63.

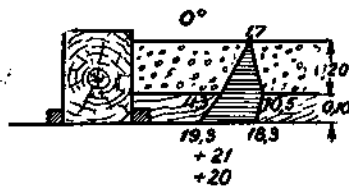


Рис. 64.

То же надо сказать и о паропроницаемости. Конденсация паров, проникающих чрез пол из жилья, нормально имеет место в подполье, где особенно заметна при более теплопроводных, холодных почвах; значительное оседание этих паров бывает и на песчаных грунтах.

3. *Перекрытия.* Верхние потолки, обращенные к холодному чердаку, делаются у нас обычно двойными (черт. 63).

Коэффициент общей теплопередачи такого потолка, при размерах, показанных на рисунке, получится из формулы:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{0,025}{0,14} + \frac{0,05}{0,14} + 0,20 \text{ (возд.)} + \frac{0,15}{0,30}$$

что при

$$\alpha_a = 7,5 \text{ и } \alpha_n = 12$$

дает нам

$$k = 0,69,$$

а с учетом балок даст приблизительно

$$k = 0,64.$$

Полезная теплоемкость выражается приблизительно величиной 0,70. Такую же величину полезной теплоемкости имеет и одинарный массивный потолок по рис. 64, в котором материалы слои расположены более благоприятно в смысле аккумуляции внутренней теплоты. На рисунке дана

графическая иллюстрация последнего расчета полезной теплоемкости.

Воздухопроницаемость деревянных потолков приблизительно одинакова с тем, что дают нам деревянные стены разных видов. Конденсация паров угрожает потолкам в тех случаях, когда поверх них или поверх наката располагаются слои со значительным сопротивлением току паров, — например, толь. Практика строительства за последние годы дала весьма наглядные иллюстрации к этому теоретическому положению. Для потолков указанная опасность является тем большей, что к ним устремляется из помещения наиболее теплый и влажный воздух, пары которого в изобилии протекают через это ограждение. В сильные морозы при железных кровлях можно наблюдать весьма обычное явление инея на нижней стороне (изнанке) железа в результате конденсации паров жилья, прошедших через перекрытие и не успевших перейти в наружный воздух (при слабой вентиляции чердака).

Междуэтажные перекрытия, не имеющие вообще теплового назначения, являются, однако, в практике проводниками теплоты из нижних этажей в верхние в силу той разности температур, которая обычно имеет место по ту и другую сторону такого перекрытия, т.-е. у пола и потолка каждого помещения. Так как эта разность обычно достигает 2—3°, то сравнительно теплопроводная конструкция перекрытия пропускает некоторое количество теплоты (несколько калорий на кв м в час) вверх, и таким образом в многоэтажном здании образуется непрерывный поток теплоты снизу вверх, замещаемый снизу притоками более холодного воздуха в первый этаж из подполья, оконных рам, наружных дверей.

Отсюда и происходит в значительной мере то общеизвестное явление, что при обычных расчетах центральных отоплений по теплопотерям нижние этажи многоэтажных зданий оказываются практически в менее благоприятных тепловых условиях, чем верхние; этим вызывается специальная надбавка в таких расчетах для нижних этажей.

Плоские крыши. При большом разнообразии систем плоских перекрытий, водонепроницаемых и достаточно нетеплопроводных, замечается некоторая бессистемность в расположении различных слоев, выполняющих различные функции: поддержания кровли, водонепроницаемости, затепления. Первую функцию выполняют обычно железобетонные перекрытия, иногда деревянные; вторую — слои гольц-цемента с кровельной бумагой, также толь и руберойд с соответствующей мастикой, иногда асфальт (наиболее нежелательный в верхних частях в силу своих больших деформаций и трещин); третья функция выполняется термоизоляционными слоями пробки,

торфолеума, шлака или шлакового бетона и т. д. и в том числе воздушными прослойками. Вот все эти многослойные (часто сдвоенные и строенные) слои и комбинируются обычно, в смысле состава и порядка, без определенной системы — просто по индивидуальному усмотрению строителя.

Нам кажется, что принципы строительной теплотехники могли бы внести сюда некоторое упорядочение. Применим здесь наши обычные три принципа учета: теплопроводность, полезная теплоемкость и увлажняемость парами.

Коэффициент общей теплопередачи перекрытия K должен быть настолько малым, чтобы на внутренней поверхности не могло происходить конденсаций паров. Из гл. 1 ч. I мы уже знаем, что для этого должно быть соблюдено условие:

$$K \approx \frac{(T_a - \theta) a_a}{T_a - T_n}$$

где T_a и T_n суть расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха, a_a — коэффициент теплопередачи от внутреннего воздуха на поверхность стены, а θ — температура воздуха, при которой предполагаемое максимальное содержание паров в помещении является насыщенным. Тем самым числовая величина K ставится в определенную зависимость от температуры и особенно от влажности внутреннего воздуха, следовательно, от назначения покрываемых помещений. В промышленных предприятиях без особой влажности производства, а также в жилых постройках величина K может быть близкой к 0,6. В помещениях с влажным воздухом (хлебопекарни, кухни, прачечные, текстильные фабрики и т. п.) эта величина должна быть значительно понижена.

Другой род соображений о теплопроводности плоского перекрытия, влияющих уже на самое расположение его слоев, состоит в том, что перекрытие не должно, по возможности, вызывать подтаивания снега, лежащего на нем при температуре наружного воздуха в несколько градусов ниже нуля; такое подтаивание в одном месте ведет к обледенению и намерзанию в других частях льда, образующего на покрытии валы, запруды, подпоры вод, а потому и последующие подтекания в вышележащих частях и соединениях при наступлении оттепели. Чтобы гарантировать устройство от подтаивания, в расчете должны быть определены внутренние температуры конструкции (методами, указанными в ч. I гл. 1) при наружной температуре в -3 , -5 градусов. Очевидно, слои должны быть расположены так, чтобы нулевая температура не выходила из пределов конструкции на его поверхность соприкосновения со снегом, даже принимая во внимание термическое сопротивление этого снежного пласта. При этом берется та толщина последнего, которая будет обычно

сохраняться даже при нормальной очистке, а коэффициент внутренней теплопроводности снега берется по таблице I приложения сообразно предполагаемой плотности снега.

Приложение к плоским перекрытиям принципов наибольшей полезной теплоемкости заставляет строителя стремиться к тому, чтобы наиболее сильные термоизоляционные слои конструкции располагались преимущественно близ внешней, холодной ее поверхности, так как это значительно увеличивает ее полезную теплоемкость. Наиболее теплоемкая несущая часть конструкции, естественно, оказывается при этом внизу и под прикрытием указанных слоев сильно аккумулирует теплоту. Желательно, чтобы и другие, сколько-нибудь массивные слои всего устройства находились под термоизоляцией, — конечно, за исключением тех поверхностных слоев песка, гравия и настила, которые являются защитными и по существу должны быть расположены поверх всего остального.

К числу термоизоляционных слоев должны быть отнесены и узкие воздушные прослойки в плоском перекрытии, которые таким образом должны быть расположены также по возможности в верхней его части. За такое же расположение их говорит, как мы знаем, и то обстоятельство, что при низкой температуре воздуха прослоек теплопроводность их несколько снижается против обычной нормы (в связи со снижением температурного фактора c — см. ч. I гл. 1).

Наконец, дальнейшие указания на желательный порядок расположения различных слоев плоского перекрытия дает нам теория конденсации паров внутри ограждений. Согласно ей (см. ч. I гл. 3), в помещениях с охраняемой повышенной температурой все более сильные сопротивления парам, как смолистые слои, должны располагаться по возможности близ внутренней поверхности перекрытия (т.-е. со стороны помещения) или, по крайней мере, по обеим поверхностям симметрично относительно середины конструкции; особенно же надо сказать это о металлических листах (цинка, оцинкованного свинца), представляющих собою полных непроводников для пара. Само собою разумеется, что эти соображения должны быть принимаемы строителем во внимание лишь в той мере, в какой покрываемое помещение способно давать более или менее обильные пары в своем воздухе (жилые, хлебопекарни, различные мокрые производства).

С другой стороны, в помещениях с охраняемой пониженной температурой (холодильных) для уменьшения внутренней конденсации паров надо располагать сопротивления газам преимущественно близ наружной поверхности их для избежания конденсации внутри ограждения паров наружного воздуха (летом). Если, наконец, помещение функционирует в два основных сезона с охраной то повышенной, то пониженной температуры, то сопротивления парам должны

быть расположены одновременно близ наружной и близ внутренней поверхностей или же, в качестве компромисса, в середине конструкции (сравни. об этом „Стены холодильников“ гл. 1 ч. III). Совмещая все три указанных порядка соображений— о теплопроводности, полезной теплоемкости и паропроницаемости,—строитель уже не будет так произвольно располагать слои, как это часто наблюдается в практике. В качестве небольшого примера приводим эскиз (рис. 65) подобного перекрытия с предусмотренными теплотехническими качествами в указанных выше отношениях. Снизу находится массивная несущая конструкция — она же и наиболее теплоемкая (железобетон); затем идут два слоя толя с промазкой стыков мастикой в качестве сопротивления проникновению наружной влаги и хотя бы неполного — для внутренних паров. Далее уложены деревянные рейки, между которыми положен слой соломы или насыпан термоизоляционный слой порошка (пробковой или торфяной мелочи, кизельгура и т. п.) и оставлен

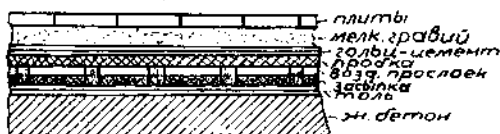


Рис. 65.

еще воздушный прослойку толщиной в 1—2 см, а затем по рейкам уложена пробковая плита или тесовый настил, покрытый пробковой плитой.

Над последней может быть расположен основной водонепроницаемый слой гольца-цемента, над которым уже расположены слои дренирующие и защитные. К сожалению, в теоретическом пояснении нельзя идти дальше, в область более конкретных вычислений и размеров, так как многое зависит от заданий: температурных, конструктивных, экономических. Поэтому не даем здесь определения нулевой точки, ограничившись указанием, что она должна быть вблизи основного водонепроницаемого слоя. Не останавливаемся также на ряде возможных вариаций в материалах и в их расположений при соблюдении всех выше перечисленных требований.

Окна и двери. Упомянутые в ч. I, гл. 2 шведские опыты над теплопроводностью воздушных прослоек доказали почти полную бесполезность увеличения ширины междурамного (точнее—межстекольного) промежутка свыше 10 см. Это обстоятельство весьма благоприятно для удешевленного строительства с тонкими стенами, где часто нет места для широких оконных коробок.

Однако наше исследование о добавочных теплотерях окнами в ч. I, гл. 2 показывает, что в этих случаях

удешевленного строительства надо опасаться охлаждения не столько от узких промежутков между стеклами, сколько обходных токов теплоты через углубления ниш. Поэтому часто применяемая в строительной практике прокладка войлоков в сопряжениях косяков со стенами—недостаточна, так как устраняет только непосредственное дутье холодного воздуха через неплотности этих соединений. Для затепления же холодных оконных периметров, т.-е. стеной кладки в нишах окна, необходимо одевание стенок ниш („откосов“) деревом, т.-е. уширение оконных коробок до полной толщины стен, чтобы преградить все пути для „короткого замыкания“ тепловых токов. Примером подобного затепления ниш могут служить косяки со щитками, как это показано на рис. 66¹⁾.

Но обычное устройство окон дает нам вокруг них холодные периметры, повышающие их охлаждающее влияние сверх обычно принимаемых норм теплопроводности k . Поэтому является всегда желательным возможное ограничение

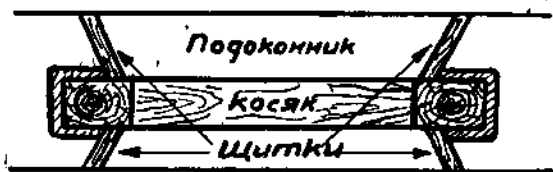


Рис. 66.

длины этих периметров. При заданной (по санитарно-гигиеническим нормам) общей необходимой площади оконных просветов это ограничение возможно только таким путем, что требуемая световая площадь выполняется меньшим числом окон более значительных размеров. Сумма их периметров и охлаждение через последние при этом значительно снижаются сравнительно с тем, что имеем при большем числе окон меньшей величины. И так как указанный прием представляет выгоду одновременно и в общестроительном смысле (вязка меньшего числа углов у коробок и переплетов), то проведение этого принципа весьма важно для практики. Одно окно на комнату в жилых квартирах в громадном большинстве случаев вполне достаточно, если иметь в виду соответствующие размеры этого окна, а также некоторые довольно широкие

¹⁾ Весьма характерен в этом отношении случай на одном недавнем ремонте большого скотного двора, где после наложения на стены внутреннего термоизоляционного слоя, не заходившего в оконные откосы, последние стали сильно мокнуть и промерзать. Наложение термоизоляции на прилегающих участках стен лишило откосы прежнего согревания изнутри и привело к сильному понижению температуры их поверхности.

пределы колебания санитарно-гигиенических норм освещения (от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{9}$ от площади пола). Другой полезной мерой для уменьшения холодных периметров окон является приданием квадратной формы. Таким образом, теплотехнические соображения приводят нас к положению: меньшее число больших окон квадратной формы („итальянских“). Те же соображения надо иметь в виду и относительно косяков наружных дверей, обычных или двойных с очень узкими коробками (в виде общего косяка для обеих дверей).

Что касается полезной теплоемкости окон и наружных дверей, то она, конечно, ничтожна. У массивных наружных дверей она может быть несколько увеличена путем обивки их с наружи термоизоляционной одеждой (войлоками с клеевой, замыкающей пустоты войлоков).

Воздухо- и паропроницаемость окон и дверей значительно усиливается, как известно, непосредственными токами через неплотности этих ограждений. Конденсация паров при этом особенно неудобна в окнах, так как получающиеся мерзлые налеты на стеклах застилают свет и вид из окон, а при оттепелях и усиленной толчке образуют сырость и течь с подоконников. Для устранения этого необходимо при зимней вставке вторых рам делать возможно более плотными закрытия щелей во внутренней (теплой) раме (путем заклейки стыков и притворов со стороны внутреннего помещения), но не делать особенно тщательной закупорки стыков наружной рамы. Иначе говоря, следует возможно более ограждать междурамное пространство от притоков жилого воздуха с его парами и меньше — от вентилирующего действия наружного более холодного и сухого воздуха, который, попадая в междурамную полость и повышаясь здесь по температуре, уходит затем (верхними неплотностями) наружу и таким образом автоматически выполняет осушительную работу¹⁾.

Воздухопроницаемость окон и, следовательно, охлаждение через них особенно чувствуются при зимних ветрах, направленных на окна. Теплопотеря при этом бывает меньше у тех окон, которые имеют летние створки наружу, так как напором ветра их прижимает к четвертям и, следовательно, автоматически уменьшаются неплотности створных частей. Такое устройство господствует у нас в провинции, тогда как в столичном строительстве обычно имеем створки во-внутрь, более дефективные в этом отношении, хотя и удобные в других.

5. Подвалы. Если подвал находится под отапливаемым помещением, то нет принципиальной разницы между ним и рассмотренным в ч. 1 гл. 2 подпольем в теплотехническом

¹⁾ Сравни это с тем, что выше в гл. 3, ч. 1 было сказано об аналогичной роли наружного воздуха в отношении внешней сырости стен в отличие от роли внутреннего воздуха при внутренней их сырости.

отношении; поэтому расчет создающихся в нем температур при условии установившегося теплового состояния может быть произведен по изложенным для подполья приемам.

Но если подвал представляет отдельное сооружение вне теплового влияния отапливаемых помещений, то вопрос о расчете его температур, даже при установившемся тепловом состоянии, весьма осложняется. В этом случае мы не имеем той внутренней зоны с определенной температурой, от которой мы могли бы отсчитывать другие температуры (в предыдущем случае это была зона жилого воздуха или температура на поверхности пола). Даже температуры внешние (для подвала) частью остаются неизвестными; такова температура прилегающей к нему почвы, особенно же почвы под его полом. Взяв схему подвала на рис. 67, видим, что при заданной температуре наружного воздуха или, точнее, температуре поверхности почвы под снежным покровом T_n , при заданной глубине промерзания почвы h_1 (где температура = 0°) мы еще

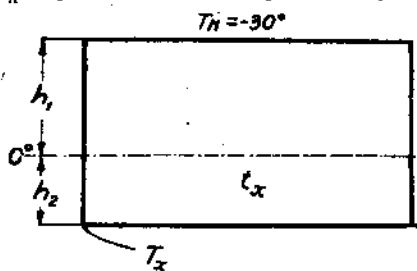


Рис. 67.

можем с некоторым приближением считать перекрытие подвала находящимся под влиянием внешней температуры T_n , а его боковые стенки до глубины промерзания почвы — под действием температуры $\frac{T_n}{2}$ (в сред-

нем). Но температура почвы под полом подвала T_x нам неизвестна, равно и температура $\frac{T_x}{2}$, воздействующая на

часть боковых стенок h_2 ниже линии промерзания. Сколько-нибудь точное определение этих температур представляет большие, почти непреодолимые трудности. Дело в том, что почва почти все время находится в процессе или нагрева или охлаждения — следовательно, ее внутренние температуры, начиная от поверхности, имеют диаграммы тех типов, которые приводились в части II гл. 1—4 настоящей книги. Но эти кривые изменчивы, в зависимости от температурных периодов погоды, и потому определение их нетолько сложно по существу метода, но и затруднительно по неопределенности заданий для этого разрешения.

Весьма простой, но, конечно, и очень грубый подход к определению температуры T_x дадут нам соображения о среднем тепловыделении почвы в период наиболее глубокого промерзания ее. В этом периоде со средней температурой на поверхности почвы под снегом

примерно в -10° уровень промерзания почвы и указанная средняя температура ее поверхности фиксируют нам более или менее определенную мощность тепловыделения почвы. В самом деле, если наибольшая глубина промерзания составляет, положим, 1,5 м и по обе стороны этого слоя господствуют более или менее устойчиво указанные температуры, то при коэффициенте внутренней теплопроводности почвы $\lambda = 1,5$ — имеем количество теплоты, передаваемое почвой через 1 кв м:

$$Q = \frac{\lambda}{1,5} (0 + 10) = 10 \text{ кал.}$$

В более сильные морозы, когда температура наружного воздуха спускается до -30°Ц , эти понижения должны сначала передаваться на поверхность почвы через слой снега, а затем от этой поверхности вглубь ее ниже линии промерзания; это очень медленный процесс (в силу большой теплоемкости почвы), и он не успевает далеко продвинуться до спада холодной волны в погоду. В силу этого и можно с известной условностью считать за период в 1—2 месяца зимы процесс теплообмена между уровнем 0° и поверхностью почвы до известной степени установившимся, а потому применять к нему соответствующие приемы расчета. Если уровень 0° отдает вверх 10 кал в час, то он их, очевидно, и получает снизу. Если возьмем глубину h_2 м ниже уровня промерзания, то температура там T_x определится из уравнения:

$$\frac{\lambda}{h_2} (T_x - 0^\circ) = 10, \text{ откуда } T_x = \frac{10 \cdot h_2}{\lambda}.$$

В таком случае, обозначив среднюю внутреннюю температуру подвала через t_x , имеем следующее уравнение, выражающее равновесие между расходом и приходом теплоты в подвале:

$$k_1 F_1 (t_x - T_n) + k_2 \cdot P \cdot h_1 \left(t_x - \frac{T_n}{2} \right) = \alpha F_1 (T_x - t_x) + k_2 P \cdot h_2 \left(\frac{T_x}{2} - t_x \right),$$

где P — есть периметр плана подвала, F_1 — площадь пола или перекрытия, k_1, k_2 коэффициенты общей теплопередачи соответственно перекрытия и стен, α — коэффициент теплопередачи с поверхности пола к воздуху подвала. Из этого уравнения легко определим создающуюся в подвале температуру t_x при упомянутых выше заданиях и упрощающих предположениях. Так, приняв $P = 20$ м, $h_1 = 1,5$ м, $h_2 = 1,0$ м, $F_1 = 24$ кв м, $T_n = -30^\circ \text{Ц}$, $k_1 = 0,3$, $k_2 = 0,6$, $\alpha = 7$, мы найдем $T_x = \frac{10}{1,5} \cdot 1,0 =$

$= +6,7^{\circ}\text{Ц}$, а из предыдущего общего уравнения получим $t_x = +2,0^{\circ}\text{Ц}$.

Если мы, в отличие от предыдущего, будем исходить в подобных расчетах из заранее заданных температур для подвала (например, $+1^{\circ}$ или $+2^{\circ}\text{Ц}$ при низшей наружной температуре), то можем вычислить необходимые для этих заданий коэффициенты k_1 , k_2 его ограждений (из них важнейшим является, конечно, k_1). Путем таких вычислений легко найти, что для условий нашего среднего климата коэффициент теплопроводности k_1 для погруженных в почву подвалов должен быть вообще близким к 0,3, а для надземных хранилищ (овощных и т. п.) даже близким к 0,2.

Эти величины вполне оправдываются существующей практикой данного строительства в том смысле, что выстроенные с такими коэффициентами хранилища действительно не дают промерзания и понижения температуры ниже 0° . Это показывает, что приведенные выше приемы расчетов, при всей своей неточности и некоторой произвольности предположений, все же достаточно реальны, а потому практически полезны — особенно, конечно, в отношении новых, необычных конструкций и материалов этого строительства.

Глава 3. Использование теплоты дымовой трубы.

Особое внимание строителей должно быть обращено на те непроизводительные потери теплоты в постройках, которые носят массовый характер по числу пунктов этих потерь или по постоянству их действия. Одной из важнейших потерь такого рода является та, какую дают нам наши обычные дымовые трубы, действующие во множестве пунктов нашего строительного оборудования страны и с большим постоянством (особенно в топливный период). Чтобы отдать себе отчет в связанных с этим излишних потерях теплоты, подсчитаем, сколько теряется ее стенками нашей обычной дымовой трубы.

Обычная температура газов в прогретой дымовой трубе — это $250 - 300^{\circ}$, обычная толщина стенок ее — $\frac{1}{2}$ кирпича, а высота стояка в холодной зоне — около 4 метров. Коэффициент теплопередачи k определим из уравнения:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_b} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{0,125}{0,70} = \frac{1}{10^4} + \frac{1}{25} + 0,18,$$

откуда

$$k = 3,1.$$

¹⁾ Это значение для α взято по соображению с табл. IV. В приложении при больших разностях температур газа и стенки, с увеличением еще на усиленную скорость течения газов по этой стенке.

При внутреннем периметре сечения трубы в 1,0 м и средней зимней температуре в -5°C имеем теплопотерю трубы в час:

$$Q = 3,1.1.4.(275 + 5) = 3472 \text{ кал.}$$

При ежедневной топке в среднем по 3 часа, имеем потерю в день около 10 тыс. калорий. Можно себе представить, что это даст для большого дома со многими трубами, затем для всего селения, города, страны и за весь топочный период.

Между тем, эта потеря — совершенно излишняя, ненужная с теплотехнической точки зрения (чего нельзя сказать в полной мере, например, о гораздо большей потере теплоты вместе с самыми топочными газами, выходящими из трубы наружу, так как здесь известная температура их необходима для тяги). Поэтому всякое использование теплоты отходящих газов, не понижающее их температуру ниже необходимого предела, должно представлять большой практический интерес.

Не говоря об относящихся сюда специальных приборах, остановимся только на способе использования, уже известном в практике, но недостаточно учитываемом и бессистемном: это — применение отходящих газов для форсирования вытяжной вентиляции.

Покажем на нескольких примерах, что может дать дымовая труба в этом отношении и как можно простейшим образом рассчитывать вентиляцию этого рода.

Возьмем сначала самую невысокую домовую трубу с высотой в холодной зоне всего в 3 м. Если дым этой трубы заключим в круглую железную трубу диам. 0,3 м, а концентрично с ней на расстоянии 0,10 м поставим вторую железную трубу, которую укрепим снаружи термоизоляцией, кладкой и т. п., то эта вторая труба может дать нам определенную скорость вытяжной вентиляции. Определим ее простейшим способом, исходя из представления о некоторых средних температурах в обеих трубах и пренебрегая теплопотерей воздушной трубы в окружающий наружный воздух.

Для расчета могут служить два следующих элементарных уравнения:

$$F \cdot k (T - t_x) = 3600 \cdot f \cdot v_x \cdot c (t_x - t_1)$$

и

$$\Sigma (Rl + Z) \leq H (\gamma - \gamma_x).$$

В первом из них F — есть площадь прогрева вентиляции трубой топочными газами, T — средняя температура последних в трубе, k — коэффициент теплопередачи

от стенок внутренней трубы к вентиляционному воздуху, c — теплоемкость 1 куб м воздуха, t_1 — температура воздуха в вентилируемом помещении, t_x — средняя температура воздуха в вентил. трубе, f — площадь ее сечения, γ и γ_x — удельный вес воздуха при температурах наружного воздуха и вентиляционной трубы. Первое уравнение выражает, очевидно, равенство расхода теплоты внутренней трубой с приходом ее на подогрев воздуха в вентиляционной трубе, а второе — равенство сопротивлений движению воздуха в вентиляционной трубе с напором в ней.

Примем в первом уравнении для данного случая: $F = \pi \cdot 0,3 \cdot 3 = 2,8$ кв м; $T = 250^\circ$, $k = 2,0$ (по табл. Браббе ¹⁾,

$f = \frac{\pi}{4} (0,5^2 - 0,3^2) = 0,126$ кв м, $c = 0,3$, $t_1 = 20^\circ$ и наружную

температуру $= 0^\circ$. Имея в уравнениях две неизвестные величины t_x и v_x , примем предположительно $t_x = 30^\circ$, определим соответствующее v_x из первого уравнения, а затем проверим его по уравнению второму. Из первого уравнения $v = 1,13$ м в сек.

В уравнении втором $H = 3$ м, а $\gamma - \gamma_x$ по таблицам Браббе для наружной температуры в 0° и внутренней в $+30^\circ = 0,128$ мм водян. столба; следовательно, правая часть уравнения дает нам 0,38 мм. Для левой части имеем: $\Sigma \zeta = 5$ (по табл. Браббе, изменение струи при входе и выходе и две решетки у канала), что при скорости $v_x = 1,13$ (1,2) дает потерю напора 0,3 мм (табл. Браббе). Для определения K , потери напора на трение, определим предварительно круглый диаметр трубы, эквивалентный по трению данному; получим по таблице Браббе или по формуле:

$$d_0 = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 1,26}{1,36} = 0,19 \text{ м.}$$

Для такого диаметра при скорости 1,13 м (1,2) имеем по таблицам Браббе $R = 0,012$, а $Rl = 0,036$. Теперь видим, что сумма $\Sigma (Z + Rl) = 0,30 + 0,036 = 0,336$, что весьма близко подходит к напору в трубе (0,38 мм), особенно в теплое время, когда этот напор снижается (при $+5^\circ$ 0,315). Таким образом, предположенная нами температура подогрева и соответствующая ей скорость $v_x = 1,13$ м в сек. оправдываются обстоятельствами дела. Если бы этого не случилось, то, очевидно, пришлось бы расчет переделать при измененном предположении. Но при сечении воздушной трубы в 0,126 кв м и скорости v_x имеем вытяжку воздуха в 1 час. $f \cdot v_x \cdot 3600 = 0,126 \cdot 1,13 \cdot 3600 =$

¹⁾ При скорости дымовых газов 2 м в сек. и при подогреве на 10° .

= 511 куб м, что достаточно для весьма большого жилого помещения или такого производственного, как кузница, кустарная мастерская и т. п.

Если труба более высока, напр. 10—15 м, как это бывает в многоэтажных зданиях или у небольших производственных предприятий, то напор в окружающей ее вентиляционной трубе может быть доведен до такой величины, когда он может быть использован не только для санитарного вентилирования, но и для производственного — например, для получения тяги воздуха в сушильных камерах. Приведем пример подобного расчета.

Железная труба небольшого заводика, имеющая высоту 15 м и диаметр 0,25 м, окружена кольцевым сечением толщиной в 0,07 м в виде концентричной железной трубы (из более тонкого железа), которая затеплена слоем золы 0,12 м ($\lambda = 0,06$) и кирпичной кладкой от 0,27 м (низу) до 0,135 м (вверху) ($\lambda = 0,7$). Коэффициент теплопередачи трубы в наружный воздух (в верхней ее половине):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{0,12}{0,06} + \frac{0,135}{0,7}} = 0,45 \text{ (при } \alpha_b = 10 \text{ и } \alpha_n = 25).$$

Обозначим далее:

F — боковая поверхность обогрева воздуха дымом = $15 \cdot 0,78 = 11,7$ кв м,

F_1 — наруж. поверхность дым. трубы = $15 \cdot 2,8 = 42$ кв м,

T — средняя температура дыма трубы — принята в 250° ,

k_1 — коэфф. теплопередачи от дыма к воздуху = 2,8 (табл. Браббе)¹⁾.

f — сечение вытяжной трубы = $0,78 \cdot 0,07 = 0,055$ кв м,

c — теплоемкость 1 куб м воздуха = 0,3,

T_n — температура наружного воздуха = -10° ,

t_1 — температура подогреваемого воздуха = $+30^\circ$,

v — скорость в вытяжной трубе.

Тогда, обозначив среднюю температуру воздуха в вытяжной трубе через t_x , имеем уравнение теплового баланса трубы:

$$\frac{F \cdot k_1 \cdot (T - t_x)}{3600} = f \cdot v \cdot c \cdot (t_x - t_1) + F_1 \frac{k(t_x - T_n)}{3600}$$

Предположим, что для сушильных камер завода нужно гнать воздуха 500 куб м в 1 час или $\frac{500}{3600} = 0,138$ куб м

¹⁾ При скорости дыма 1 м в сек и разности температур $> 60^\circ$.

в сек. Тогда должно быть $v = \frac{0,138}{0,055} = \approx 2,5$ м в сек.

Вставив эту величину и все предыдущие числовые значения в формулу, получим из нее $t_x = 62^\circ$.

Вес воздуха при 62° составляет 1,054 кг на куб м, а при наружной температуре в -10° он будет 1,342. Разность их составляет 0,288 мм водяного столба. Поэтому в нашей вентиляционной трубе созданся такой же напор на 1 м высоты. На всю высоту это дает напор в $0,288 \cdot 15 = 4,3$ мм водян. столба.

Из него расходуется на сопротивление в самой вентиляционной трубе:

на трение $0,067 \cdot 15 = 1,0$ мм (табл. Браббе),	
на местн. сопротивл. (вход и выход) 0,8 мм	”
Всего 1,8 мм	”

Остаются свободными 2,5 мм водян. столба, каковые обыкновенно вполне достаточны, например, для обыкновенной сушилки со скоростями воздуха в приводящих и отводящих каналах около 1 м—1,5 м в сек.

Выше мы привели упрощенный расчет напора, получаемого подогреванием вентиляционного канала дымовой трубой. Более точный расчет делается следующим образом.

При обогреве дымовой трубой вентиляционного воздуха дымовые газы теряют в 1 час следующее количество теплоты:

$$Q = G \cdot p \cdot c \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \dots \dots \dots (a)$$

где G — вес газов в кг от 1 кг топлива,

p — вес топлива, сжигаемого в час,

c — теплоемкость газов на 1 кг.

ϑ_1 и ϑ_2 — температуры газов соответственно в начале и в конце дымовой трубы.

С другой стороны, на нагревание воздуха в вентиляционной трубе от температуры t_1 до t_2 и на наружную теплопотерю q нужно количество теплоты:

$$Q = \frac{0,3}{1 + \alpha t_1} L (t_2 - t_1) + q^1 \dots \dots \dots (b)$$

где L есть количество воздуха, проходящего через трубу в час, t_1 и t_2 — температуры воздуха соответственно при вступлении в вентиляционную трубу¹⁾ и при выходе из нее, α — коэффициент расширения газов при повышении температуры до t_1° .

¹⁾ Данный метод расчета приведен у Браббе Heiz-und Luftungstechnik (1922, стр. 91—93), но по какому-то недоразумению он не ввел в расчет остывания вентиляционной трубы.

Наконец, теплопередача от дымовых газов к воздуху вентиляционной трубы может быть выражена формулой:

$$Q = F \cdot k \left(\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} - \frac{t_1 + t'_2}{2} \right) \dots \dots \dots (8)$$

В то время, как в формуле (6) t_2 — есть средняя температура воздуха в вентиляционной трубе, здесь по существу дела мы должны брать реальную температуру лишь того слоя воздуха, который непосредственно обогревается дымовой трубой — притом до температуры t'_2 (большей, чем средняя t_2).

Положим, что лишь $\frac{1}{n}$ -ая часть всего вентиляционного воздуха обогревается до температуры t'_2 ; тогда уравнение (6) можем написать в виде:

$$Q = \frac{0,3 L}{1 + at_1} \cdot \frac{1}{n} (t'_2 - t_1) + q.$$

Сопоставляя это с самым уравнением (6), имеем:

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{n} (t'_2 - t_1), \text{ откуда } t'_2 = n (t_2 - t_1) + t_1.$$

Тогда уравнение (8) принимает вид:

$$Q = Fk \left(\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} - t_1 \frac{n (t_1 - t_2)}{2} \right) \dots \dots \dots (B')$$

Обычно полагают $n = 2$ и тогда имеем:

$$Q = Fk \left(\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} - t_2 \right) \dots \dots \dots (B')$$

Таким образом мы имеем три уравнения — (а), (б) и (в') на одну и ту же величину Q ¹⁾, из которых можем определить как это Q , так равно ϑ_2 и t_2 , после чего задача определения напора трубой может считаться решенной.

Покажем это решение на рассмотренном выше примере. Пусть $p = 12$ кг угля в час.

Тогда по таблице теоретически необходимого веса воздуха для горения, удваивая его, получим $G = 22,3$ кг, а по таблицам объема получающихся топочных газов найдем $W = 16,9$ куб м; затем по таблицам теплоемкости продуктов горения разного топлива найдем $c = 0,245$, ϑ_1 примем в 300° , $t_1 = +30^\circ$, высоту трубы H возьмем попрежнему в 15 м,

¹⁾ При установившемся движении теплоты в обеих трубах, эти величины по смыслу своему должны быть действительно равны.

сохранив все прочие размеры, наружную температуру в -10° и количество проводимого через вентиляционную трубу воздуха в 0,138 куб м в сек.

$$\text{Наконец, } q = F_1 \kappa \left(\frac{t_1 + t_2}{2} - T_n \right).$$

Уравнение (а) дает нам:

$$Q = 22,3 \cdot 12 \cdot 0,245 (300 - \vartheta_2) = 19680 - 6,5 \vartheta_2.$$

Уравнение (б):

$$Q = \frac{0,3 \cdot 400}{1 + \alpha \cdot 30} (t_2 - 30) + \\ + 42 \cdot 0,45 \left(\frac{30 + t_2}{2} + 10 \right) = 144,5 t_2 - 3578.$$

Уравнение (в):

$$Q = 11,7 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{300 + \vartheta_2}{2} - t_2 \right) = 4914 + 16,38 \vartheta_2 - 32,76 t_2.$$

Решая эти уравнения, получим:

$$t_2 = 67^1) \left(\frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{30 + 67}{2} = 48,5^\circ \right),$$

$$\text{и } \vartheta_2 = 206^\circ \left(\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} = 253^\circ \right).$$

По таблицам Браббе имеем при наружной температуре -10° и средней температуре воздуха в вентиляционной трубе в $48,5^\circ$ напор на 1 м высоты трубы в 0,246 мм водяного столба, а на всю трубу в $0,246 \cdot 15 = 3,7$ мм. Потеря напора в самой трубе и остающийся излишек напора для производственных целей производятся по обычным методам вентиляционных расчетов, как было показано в предыдущем примере.

Приведенный более точный способ расчета дает более реальные величины напора. Поэтому его и следует применять во всех тех случаях, когда нам известно количество сжигаемого в час топлива и количество образующихся при этом газов, — т.е. во всех более или менее стандартизованных, культурных топках. В топках же обыкновенных, когда упомянутые величины неизвестны (особенно объем газов, зависящий от количества впускаемого в топку воздуха), или в таких, как кузнечные горны, мы часто бываем вынуждены прибегать к первому способу.

¹⁾ Различие с предыдущим случаем получается отчасти потому, что в последнем случае мы задались довольно произвольным количеством сжигаемого в час топлива.

Само собою разумеется, что рассчитанный для зимних условий напор летом снижается, и если производство по своему характеру требует одинаковой работы трубы во все сезоны, то необходимо начинать расчет с менее благоприятного для тяги летнего сезона. При этом часто оказывается, что указанное выше затепление трубы нужно более для теплых сезонов года, чем для зимы; если же по расчету оказывается возможным получить необходимый напор в эти теплые сезоны без большого затепления (а, например, путем повышения трубы), то такое затепление обычно бывает не нужно и зимой, так как усиленное охлаждение трубы с избытком возмещается увеличением напора от низкой наружной температуры. Точные ответы на эти вопросы может дать только каждый отдельный расчет вышеприведенного типа.

Так, в рассмотренном выше случае мы имеем для летнего времени, при наружной температуре в $+20^{\circ}$, напор в нашей затепленной трубе при первом способе расчета всего в 2,4 мм, а при затеплении только кирпичной кладкой — в 1,8 мм; последнее покрывает только собственные сопротивления трубы, не оставляя напора свободного, производственного. Ясно, что труба должна быть затеплена, а если создающийся при этом свободный напор 0,6 мм недостаточен, то еще и повышена; но можно это повышение увеличить настолько, чтобы летом получался достаточный напор и без затепления; тогда последнее будет ненужно и для зимы, если, конечно, задания для работы трубы остаются неизменными.

Приведенные выше примеры носят совершенно случайный характер. При других заданиях и другом подборе исходных величин мы можем получить от дымовых труб той же высоты гораздо большую продуктивность в смысле количества вытягиваемого вентиляционного воздуха. Особенно сильно влияет на это последнее количество выбор более просторного кольцевого сечения для вентиляции. Так, взяв его, вместо 7 см, в 17 см и произведя новый расчет, можем получить вытяжку примерно в 3 раза большую, чем было в нашем примере (1500 куб м в час). Словом здесь открываются довольно широкие возможности для решения вопросов в тех случаях, когда отсутствует механическая энергия для приведения в действие вентиляторов — например, в условиях кустарных и кооперативных производств в провинции.

Следует еще учитывать величину теплоемкости стенок внутренней дымовой трубы при концентричной с ней вентиляционной. В указанных промысловых устройствах эта теплоемкость может быть такой малой, какой мы ее брали в примерах (железные стенки), поскольку время топки

совпадает с производственным функционированием топки. Но иногда и в этих производственных устройствах и почти всегда при санитарной вентиляции обычных жилых зданий топка бывает лишь периодически, а вентиляция нужна постоянно. В этих случаях, очевидно, внутренняя труба должна быть обложена кладкой (в $\frac{1}{4}$ кирпича), что, конечно, отразится и на соответствующем расчете подогрева.

Глава 4. Планировка зданий в теплотехническом отношении. Общая величина теплотерь.

Наиболее экономичной в тепловом отношении является такая форма здания, при которой его теплоотдающие поверхности, особенно наружные стены, затем полы и верхние потолки, наконец, окна и наружные двери достигают наименьшей величины на единицу объема здания или—на единицу его внутренней площади, раз высота помещений задана. По геометрическим соображениям это означает прежде всего возможно ббльшую простоту ф о р м ы здания и близость между собою трех его основных размеров—длины, ширины и высоты. Но так как по условиям освещения и техники перекрытий ширина зданий оказывается ограниченной довольно тесными пределами сравнительно с длиной (а отчасти и с высотой), то практически указанный выше принцип означает просто требование придавать нашим постройкам возможно ббльшую ширину, а высоту—по возможности, не меньшую этой максимальной ширины. На выгодность еще большей высоты сильно влияют другие факторы не теплового характера, с одной стороны, экономия на устройстве фундамента и кровли при многоэтажном здании, с другой—стоимость подачи строительных материалов на высоту; поэтому мы и ограничиваемся более умеренным требованием, вытекающим из геометрических начал, о возможном приближении высоты (т.-е. числа этажей) к максимальной ширине здания.

Так, взяв одноэтажную постройку сложной формы (рис. 68) и простую квадратную с той же площадью, получим во второй площадь наружных стен, меньшую на 20—25%; к этому присоединяется еще уменьшение теплотерь полами в силу сокращений их холодного периметра, прилегающего к наружным стенам и холодной почве около постройки (см. ч. III гл. 2).

Если же возьмем трехэтажную постройку с тем же планом (следовательно, с тройной площадью), то на прежнюю площадь помещений получим уменьшение общей площади охлаждающихся ограждений (включая нижние полы и верхние потолки) на 50%. Столь значительная экономия как в первоначальном устройстве, так и в последующем тепловом содер-

жании зданий, должна обращать на себя величайшее внимание строителей.

Другой не менее серьезный источник тепловой экономии заключается в увеличении общих размеров постройки. В основе этой экономии лежат также геометрические соотношения о меньшей величине ограждающих поверхностей на единицу внутреннего объема (или жилой площади) в больших зданиях сравнительно с малыми при одинаковой их форме.

Взяв, например, постройку жилого дома в 300 куб м и постройку той же формы в 2500 куб м, найдем, что во второй из них на единицу внутреннего объема или площади приходится наружных стен меньше почти на 50%, и всех

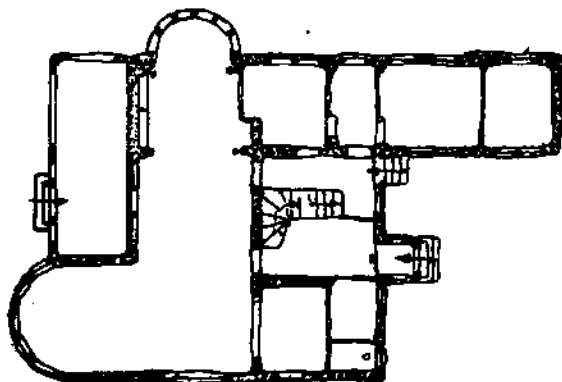


Рис. 68.

вообще охлаждающихся ограждений также на 50%. Правда, увеличение размеров здания при неизменной его внешней форме влечет за собою обыкновенно дополнительные затраты на устройство внутренних капитальных стен, более сложных перекрытий и проч. Однако более детальные подсчеты показывают, что за вычетом всех накладных расходов остается все же около половины первоначальной экономии, — в данном случае около 25% во всех капитальных стенах (наружных вместе с внутренними). Но нам важно было отметить здесь лишь различие в теплотехническом отношении, означающее постоянный ежегодный расход на отопление.

В результате обоих указанных выше факторов, — а именно формы и величины построек, — мы имеем такие, например, колебания в размерах средней теплопотери на 1 куб м внешнего объема зданий: в то время как в малых особняках поселкового типа часовая теплопотеря при расчетной разности температур составляет не менее 30 кал на 1 куб м,

в средних столичных зданиях она снижается до 10 кал, а для таких зданий, как Большой театр — всего до 3 кал на 1 куб м.

Для уменьшения общей теплотери здания имеет немаловажное значение еще прием его внутренней планировки. Очевидно, всегда будет выгодным в тепловом отношении располагать отдельные помещения плана таким образом, чтобы те, которые менее нуждаются в поддержании зимой высокой и равномерной температуры — как лестничные клетки, передние, корридоры, кладовые, черные кухни — были расположены более по внешнему периметру здания, а более теплые помещения располагались бы внутри плана и имели бы наименьший внешний периметр. Понижение температуры в холодные дни для названных служебных помещений более допустимо, чем для жилых — и потому расчет может вестись для первых на более низкую внутреннюю температуру, тогда как их расположение внутри плана автоматически вынуждает предполагать в них ту же температуру, как и в жилых комнатах.

Немаловажное значение имеет далее положение постройки относительно господствующих ветров. Влияние ветра заключается не только в увеличении коэффициента α_n в выражении для k (ч. I гл. I уравн. (3) и (4)), но и в усилении естественной вентиляции стены и связанной с этим теплотери; так как эти величины пропорциональны избыточному давлению на стену, то по табличке в части I гл. 3 легко видеть получаемые в зависимости от силы ветра давления в мм водяного столба, а по уравнению (9) в той же главе — вызываемую этим теплотерю. Из этих данных видно, например, что при скорости ветра ок. 10 м в сек указанная потеря возрастает в 7 раз против норм обычного времени. Одним из средств уменьшения этой теплотери является расположение зданий торцевой стеной (короткой и с малым числом окон) в сторону господствующих зимних ветров.

Наконец, теплотеря зданий уменьшается при благоприятном расположении их относительно стран света; примерное представление об этом уменьшении дают те надбавки в расчетах теплотери на ориентацию по странам света, которые приведены в гл. 2 ч. I. К этому остается добавить требование, чтобы именно наиболее отапливаемые, жилые комнаты были обращены на солнечную сторону, тогда как в служебных помещениях надбавки на неблагоприятную их ориентацию могли бы и не учитываться.

В практике имеются некоторые данные о реальных величинах общих теплотери в гражданских сооружениях. Так, инж. Убер в Германии произвел статистические иссле-

дования этого рода и дал следующие цифры теплотер в 1 час на расчетную разность температур в Германии (40° Ц.) на 1 куб м внутреннего объема помещений:

Наименование зданий.	Наружный объем м ³	Отапливаемые помещения в % от наружного объема.	Кал. на 1 м ³ в час.
Здания судебных учреждений	5000—7500	50	30
	7500—10000	60	27
	10000—50000	70	25
	> 50000	75	20
Тюрьмы	5000—10000	50	32
	10000—20000	65	27
	20000—50000	75	22
Больницы тюремные	1600—4100	55	60
Административные здания	7400—50000	70	28
	50000—122000	60	20
Высшие школы	10000—20000	65	30
Интернаты	22500—31700	65	22

Ииж. Готтингер дает в своем курсе „Отопление и вентиляция“ следующие нормы теплотер на 1 куб. м помещения при расчетной разности температур в 38°:

- Для строений с объемом < 2000 куб м 30—50 кал
- „ „ „ от 2000 до 20000 30—15
- Для зал „ „ „ 2000 „ 20000 30—75
- Для фабричных помещений с верхним освещением 35—20
- „ „ „ многоэтажных „ „ . . . 25—15

Для наших климатических условий эти величины должны быть увеличены пропорционально большей расчетной разности температур (т.-е. в 1,25—1,30 раза).

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Т а б л и ц а I.

А. Коэффициенты теплопроводности строительных и изоляционных материалов.

№ по порядку	Наименование материалов	Объемный вес материала кг/м ³	Влажность в % от объема	Средние температуры в °С	Коэффци. теплопров. λ кал/ж° Цм.	Опытные учреждения и исследователи
1	Алюминий	—	—	± 0 100 200 400 600	173 176 187 212 245	Среднее от различных исследований. (сводка E. Schmidt'a).
2	Асбест свободно набитый	383	—	0 50 100	0,096 0,099 0,102	Мюнх. Лаб. Техн. Физ. (Grosber).
3	Асбест, свободно набитый	470	—	— 200 — 100 — 50 ± 50 + 50 + 100	0,072 0,117 0,127 0,132 0,137 0,139	"
4	Асбест чистый, свободный	576	—	± 0 100 200 300 600	0,130 0,167 0,180 0,186 0,204	Мюнх. Лаб. Техн. Физ. (Nusselt).
5	Асбест	540	—	50 175 250	0,125 0,130 0,133	Мюнх. Лаб. Техн. Физ. (Knoblauch Ralsch u. Reiber).
6	Асбестовый войлок, мягкий и гнущийся	420	—	30	0,0738	Стандартн. Бюро (Америка).
7	Асбестовый картон	980	—	20—100	0,130	Тайуог.

9	Асбестовая плита, прессованная, несколько грубая	—	—	970	—	30	0,104	Стандарт. Бюро (Америка).
10	Асбест и магнезия (смесь) изоляция для трубопроводов	—	0	240	0	100—200	0,049—0,060	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ratsch u. Reither).
10а	То же	—	0	390	0	100—200	0,060—0,067	"
11	Асбест и кизельгур (инфузорная земля), смесь (изоляция для трубопроводов)	—	0	300 500 700	0	100—200 100—200 100—200	0,072—0,077 0,082—0,087 0,088—0,093	"
12	Асбестовый шифер (асбест и цемент)	—	0	1790	0	0—60	0,13—0,17	"
13	Асбестовый шифер, сильно прессованный, твердый и крепкий	—	—	1970	—	30	0,334	Стандарт. Бюро (Америка).
14	Асфальт (для мостовых)	—	—	2120	—	0—30	0,52—0,64	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Roensgen).
15	Базальт	—	—	—	—	20—100	1,87	Неcht.
16	Бетон из 1 объема, части портландск. цемента, 2-х частей промытого песка и 2-х частей промытой гальки	—	сухой	2180	—	20—23	0,65—0,66	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Groeber).
17	Бетон	—	сухой	1600	—	0	0,72	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ratsch u. Reither).
18	Бетон (раствор 1:5)	—	8,6	1900	—	0	1,17	Комиссия Шведской Академии Инж. Наук (Kreiger u. Eriksson).
19	Бетон	—	10,2	2270	—	0	1,10	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ratsch u. Reither).

№ по порядку	Наименование материалов	Объем. вес материала кг/м ³	Влажность в %/объема	Средние температуры в °Ц	Кoeffиц. теплопров. λ кал/м °Цч.	Опытные учреждения и исследователи
20	Бетон шлаковый из 9-объемных частей очень пористого шлака и 1 объема части цемента .	550	—	20—90	0,19	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Nusselt).
21	Бетон из 3 объемных частей пробковой мелочи (объемн. вес = 87 кг/м ³), 2-х частей мелкого песка и 1 части поргланск. цемента	1269	—	85	0,222	Desvignes.
22	Бетон из очень пористого шлака доменных печей, состоящий из 9-объема. частей доменн. шлака и 1 части цемента	550	—	20—90	0,19	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Nusselt).
23	Бетон легкий: а) из пемзы б) » шлаков в) » пемзы	800 850 871	10,3 10,3 0	0 0 20—60	0,24 0,29 0,245—0,255	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Raisch u. Reiber). » » Griffiths.
24	Бетон шлаковый	—	—	31	1,01	
25	Бетонная стена из бетонных кирпичей					
26	Бетонная стена из кирпичей из легкого бетона (пемзы и цемента), сложенная на извести, с обеих сторон известковая штукатурка, общая толщина 27 см, после 2,4 мес. воздушной сушки	1165	—	10	0,44	Мюнхенск. Институт по исслед. теп. изол. (Schmidt u. Grossmann).
26а	Та же стена после 4,3-месячн. воздушн. сушки.	1158	—	10	0,40	
27	Бетонная стена из кирпичей шлакового бетона, сложенная на извести, с обеих сторон оштукатуренная, общ. толщ. 26 см после 4 мес. воздушной сушки	1372	—	10	0,59	

27а	Та же стена после 6,3-месячной сушки	1369	—	10	0,57	
28	Бетонная стена из пустотелых кирпичей из шлакового бетона 25 × 25 × 50 см, с двумя параллельными воздушными прослойками с обеих сторон оштукатуренн., общ. толщ. 26 см, после 3,5-месячн. воздушн. сушки	1216	—	10	0,55	Мюнхенск. Институт по исследов. теплоизм.ящ.
29	Бетонные кирпичи из пемзы и поргланнского цемента	735	сухие	0—50	0,133—0,201	Мюнхенск. Институт по исследов. теплоизм.ящ.
30	Бетонные кирпичи из шлакового бетона	1115	0	0—20	0,218—0,255	Мюнхенск. Инст. по исследован. теплоизм. (Schmidt и Grossmann).
30а	То же	1250	0	10	0,26	Трондхем'ская Высш. Техн. Школа (Норвегия).
31	Железобетонная стена, 10 см толщины, армированная проволокой сеткой, толщиной в 1/4", размер ячейки 1", раствор цемента 1:5	—	норм	0	1,2	Jäger и Disselhorst.
32	Бронза (Cu — 85,79%; Zn — 7,15%; Sn — 6,89%; Ni — 0,58%)	—	—	18—20	51,0—61	Lees и Chorlton.
33	Бумага пропускная	—	—	—	0,054	Barral.
34	Буковое дерево	900	—	20—100	0,130—0,148	Германск. Физ.-Техн. Институт (M. Jakob).
35	Вода	—	—	7,8—72,4	0,465—0,580	Сводка Grosberga.
36	Водяной пар	—	—	100	0,0201	
				200	0,0258	
				300	0,0315	
37	Воздух атмосферный	—	—	0—20	0,0204—0,0216	Eucken.
				100	0,0259	
				300	0,0361	
				500	0,0453	

№ п. по порядку	Наименование материала	Объем вес ма- териала кг/м ²	Влаж- ность в %/10 объема	Средние температу- ры в °С	Коэфф.ц. теплопров. λ кал/м °Сч.	Опытные учрежден. и исследователи
38	Волос конский, слабо прессов.	172	0	20—65	0,044—0,047	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ratsch и. Reiter).
39	Воск пчелный	—	—	20	0,0745	Melmert.
40	Войлок волосной, тепловой поток перпенди- кулярно к волокнам	270	—	30	0,0306	Стандартн. Бюро (Америка).
41	Войлок из темносеровой шерсти	150	—	40—70	0,0536—0,063	Taylor.
42	Войлок, пропитанный асфальтом	880	—	30	0,0864	Стандартн. Бюро (Америка).
43	Галька промытая, величина кусков 3—8 см	1850	0	0—20	0,29—0,32	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Groeber).
44	Гипс строительный (плита)	840	7,6	20	0,22	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Schenk).
45	Гипс строительный (плита)	1250	—	0—50	0,36—0,38	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Poelsgen).
46	Гипс строительный, плита, с примесью пробки или волокна	660	0	0—49	0,117—0,124	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ratsch и. Reiter).
47	Гипсовая штукатурка	740	—	30	0,288	Стандартн. Бюро (Америка).

48	Глинобитная пластина	1900	5,7	5—45	0,54—0,66	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ratsch u. Reiter).
49	Глинобитная стена существующего дома	—	—	—	0,20	Hencky.
50	Гнейс	—	—	20	2,74	Stadler.
51	Гранит	—	—	—	3,00	H. Weber.
52	Графит твердый	1580	—	50	38,0	Taylor.
53	Графитовый порошок просеянный через сито: а) в 20—40 ячеек на 1"	700	—	20	1,025	"
	б) " 40 ячеек на 1"	420	—	40	0,332	"
	в) " 100 " 1"	480	—	40	0,158	"
54	Грунт естественный, поросший суглинистый мелкий песок	2020	28,3 (18,9 ⁰ / ₁₀ по весу)	0	2,0	Redtenbacher.
55	Древесный войлок с бумажной фабрики	330	—	30	0,045	Стандартн. Бюро (Америка).
56	Древесная кора	337	0	0—40	0,062—0,065	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ratsch u. Reiter).
57	Древесные опилки, чистые, без древесных кусков	215	—	0—20	0,060—0,062	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Nusselt).
58	Древесные опилки	190	—	30	0,0504	Стандартн. Бюро (Америка).
59	Древесные стружки, мелкие	140	—	30	0,0504	"
60	Древесная зола	—	—	—	0,06	Pécle.
60a	То же, мягкая порода	—	—	ок. 20	0,0284	Melmer.

№ по порядку	Наименование материалов	Объем, вес материала кг/м ³	Влажность в % от объема	Средние температуры в °C	Кэффиц. теплопров. λ кал/ж° Цч.	Опытные учреждения и исследователи
61	Древесный уголь из лнштейв (изоляция для судов)	215	—	0 50 100	0,050 0,056 0,063	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Nusselt).
62	Древесный уголь, пластина	230	—	15	0,046	Biquard.
(Древесный уголь, свободн.	185	—	25	0,052	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Klopplauch, Raisch u. Reihner).
	Древесный уголь, пластина	204	—	20—50	0,048—0,049	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Roepsen).
65	Дубовая пластина, тепловой поток перпендикулярно к слоям	610	—	30	0,126	Стандартн. Бюро (Америка).
66	Дубовая пластина, тепловой поток перпендикулярно к слоям	825	сухая	0—15	0,17—0,18	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Roepsen).
67	Дубовая пластина, тепловой поток параллельно к слоям	819	сухая	12—50	0,30—0,37	Стандартное Бюро (Америка).
68	Еловая пластина из виргинской ели, тепловой поток перпендикулярно к слоям	550	—	30	0,119	Среднее от разл. исследов. (сводка E. Schmidt'a).
69	Железо ковкое	—	—	10—90	48,5	
70	Железо ковкое, содержание углерода C = 0,1%	—	—	100 300 600 900	45 40 32 29	

C = 0,6%

70а Железо ковкое, содержание углерода C = 1,5%

71 Земля сухая

72 Земля сырая (см. также грунт)

73 Земля с грубой галькой

74 Золото

75 Известковый раствор, состоящий из 3-х объемных частей мелкого песку и 1 части известки

76 Известняк

77 Известняк твердый

78 Известково - песчанниковый камень, крупнозернистый

78а То же, мелкозернистый

79 Известково-песчанниковая каменная стена

80 Изволяционная масса, состоящая из смеси пробковой мелочи, асбеста, кизельгура, соломенных частиц и связующего порошка, свободная

Среднее от разл. исследований. (сводка E. Smidt'a).

Lees и Chorlton.

Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Groeber).

Meissner.

Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Raisch и Reiber).

Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики.

Desvignes.

Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Groeber).

Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Raisch и Reiber).

Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Nusselt).

36

36

600

29

900

32

31

600

29

900

0,119

0,576

0,43—0,50

268—266

0,57—0,58

1,08—1,14

1,11

0,80—0,85

0,57—0,62

0,8

100

300

600

900

100

300

600

900

—

—

0

0—70

0—200

0—20

100—300

93,8

25—40

15—40

24

—

50

100

200

—

—

0

1,4

—

—

—

1820

2555

2550

1987

1662

1650

405

№ по порядку	Наименование материалов	Объем. вес материала кг/м³	Влажность в % от объема	Средние темпера. у- в °Ц	Кэффци. теплопров. λ кал/м° Цч.	Опытные учрежден. и исследователи
80а	То же, разведенная в воде и высушенная	690	—	150 220	0,100 0,120	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Nusselt).
81	Изоляционные кирпичи, жженные, состоящие из 28% древесных опилок, 43% молотого кокса и 29% глины	752	—	50 100 300 500	0,187 0,198 0,241 0,284	Мюнхенск. Инст. по исследов. тепло-изоляц. (Schmidt u. Wrede).
82	То же, состоящие из 34% древесных опилок, 44% молотого кокса и 22% глины	997	—	50 100 300 500	0,255 0,267 0,315 0,364	"
83	Карбуровудум	—	—	600	3,35	Hering.
84	Каменный уголь, газовый	1420	—	20—100	3,06—3,42	Barrat.
85	Каменноугольная пыль	730	сухая	30 150	0,0954 0,107	Taylor.
86	Каучук твердый	1190	—	25—50°	0,137	"
87	Каучук твердый	—	—	— 190 — 78 ± 0	0,119 0,131 0,133	Eucken.
88	Каучук вулканизированный, твердый, серый	—	—	49	0,198	Herschel, Lebour u. Dunn.
89	То же, мягкий, серый	—	—	49	0,158	Herschel, Lebour u. Dunn.
90	Каучковая губка, вулканизированная	224	—	—	0,0468	Griffiths.

91	Каучук слабо вулканизированный	1100	—	—	—	—	—	—	0,1511	Стандарт. Бюро (Америка).
92	Картон для облейки стен	690	—	—	—	—	—	—	0,0612	"
93	Картон соломенный	—	—	—	—	—	—	—	0,119	Barrat.
93a	Картон слоистый	—	—	—	—	—	—	—	0,048—0,060	Biquard.
94	Керосин	—	—	—	—	—	—	—	0,13	Graetz, R. Weber.
95	Кизельгур (инфуз. земля), в порошке	150	—	—	—	—	—	—	0,046	Biquard.
95a	То же	—	—	—	—	—	—	—	0,029	Smoluchowsky.
96	Кизельгур	480	—	—	—	—	—	—	0,0774	Griffiths.
			—	—	—	—	—	—	0,0820	
97	Кизельгур американский	450	—	—	—	—	—	—	0,072	Стандарт. Бюро (Америка).
98	Кизельгур кальцинированный	245	—	—	—	—	—	—	0,0455	Мюнхенск. Инст. по исследованию теплоизоляции.
			—	—	—	—	—	—	0,0480	
			—	—	—	—	—	—	0,0520	
			—	—	—	—	—	—	0,0580	
99	Кизельгур (инфузорная земля), свободный	350	—	—	—	—	—	—	0,052	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Nusseit).
			—	—	—	—	—	—	0,060	
			—	—	—	—	—	—	0,066	
			—	—	—	—	—	—	0,078	
100	Кизельгур (инфузорная земля), уплотненный	580	—	—	—	—	—	—	0,083—0,123	"
101	Кизельгур, разведенный в воде и высушенный	448	—	—	—	—	—	—	0,062	Мюнхенск. Инст. по исследованию теплоизоляции
			—	—	—	—	—	—	0,064	"
			—	—	—	—	—	—	0,069	"
102	То же	553	—	—	—	—	—	—	0,082	"
			—	—	—	—	—	—	0,085	"
			—	—	—	—	—	—	0,091	"
103	То же	700	—	—	—	—	—	—	0,102	"
			—	—	—	—	—	—	0,105	"
			—	—	—	—	—	—	0,111	"
104	То же	840	—	—	—	—	—	—	0,146	"
			—	—	—	—	—	—	0,148	"
			—	—	—	—	—	—	0,151	"

№ по порядку	Наименование материалов	Объем материала кг/м ³	Влажность в % от объема	Средние температуры в °С	Коефф. теплопров. λ кал/м° С.	Опытные учреждения и исследователи
105	Кизельгуровые кирпичи, жженые	200	—	50 100 200 400	0,071 0,078 0,092 0,020	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Nusselt).
106	Кизельгуровые кирпичи (кизельгур и асбест)	260	—	30	0,0612	Стандартн. Бюро (Америка).
107	Кизельгуровые кирпичи, жженые	358	—	50 100 300 500	0,067 0,072 0,094 0,115	Мюнхенск. Инст. по исследованию теплоизоляции. (Schmidt и Wrede).
108	То же	499	—	50 100 300 500	0,092 0,098 0,123 0,148	"
109	То же	671	—	50 100 300 500	0,119 0,124 0,144 0,163	"
110	Кизельгуровые кирпичи, жженые	300 400 500 748	0 0 0 0	100—200 100—200 100—200 50 100 150	0,074—0,087 0,082—0,094 0,090—0,110 0,132 0,158 0,186	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Raiesch и Reither).
111	Кизельгур, смешанный с пробковой мелочью и сформованный (см. пробков. мелочь, смеш. с кизельгуром)	323	0	10—95	0,065—0,075	"

112	Кирпичи из обожженной глины, машинной формовки	1620	0,00 0,08 0,09 1,8	50,8 50,4 — 43,3	0,414 0,429 0,60 0,823	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ratsch u. Reither).
113	То же	1672	0	0—80	0,44—0,47	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Roelsingen).
114	Кирпичи ручной формовки	1568	0	0—25	0,33—0,34	"
115	Кирпичи из средне обожженной глины	1800	0	—	0,51	Trondhjem'skaja Выш. Техн. Школа (Норвегоз).
115а	То же	1800	10% по весу	—	0,67	"
116	Кирпичи из сильно обожженной глины	2100	0	—	0,52	"
117	То же	2100	20% по весу	—	0,69	"
118	Кирпичи из очень пористой обожженной глины.	812	0	20—80	0,167—0,175	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ratsch u. Reither).
119	Кирпичи из очень пористой обожженной глины.	739	1,2	20	0,145	Мюнх. Инст. по исследов. теплоизоляц. (Sammerer).
120	То же	797	5,8	20	0,21	"
121	То же	943	21,5	20	0,34	"
122	Кирпичи из легкой обожженной глины	1010	0	100—300	0,263—0,303	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики.
123	То же	1268	0,15	0—50	0,285—0,315	"
124	Кирпичи пустотелые из обожженной глины с тремя параллельными воздушными прослойками	—	—	0—20	0,17—0,19	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики. (Knoblauch, Ratsch u. Reither).

№ п/п	Наименование материалов	Объем, вес материала кс/м ³	Влажность в % от объема	Средние температуры в °С	Кoeffициент теплопроводности λ кал/м °С	Опытные учреждения и исследователи
125	Кирпичи из необожженной глины (сырец)	1775	7,4	25	0,60	Мюнх. Лаб. Техн. Физ. (Knoblauch, Ralsch u. Reither)
126	То же	1775	10,0	25	0,80	"
127	Кирпичи из необожженной глины, смешанные с соломой (саманные)	1505	0	0—20	0,35—0,38	"
128	Кирпичная стена из обожженного кирпича, с обеих сторон штукатурка, общая толщина 28 см, вскоре после кладки	1961	ок. 25	10	1,20	Мюнх. Институт по исследованию теплоизоляции
128a	То же после 4,5 мес. воздушной сушки	1763	3,4	10	0,84	"
128b	" " 6,4 "	1748	1,9	10	0,74	"
128в	" " 9,1 "	1737	1,0	10	0,65	"
128г	" " 12,5 "	1715	0,5	10	0,60	"
129	Кирпичная стена из обожженного кирпича от старого дома	1850	очень сухая	0—47	0,328—0,38	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Groeber)
130	Кирпичная стена из обожженного кирпича с воздушным прослойком: а) внешняя стена из сильно обожженного кирпича б) внутренняя стена из средне обожженного кирпича	2100 1800	норм. норм.	0 0	0,75 0,60	Трондхеймская Высш. Техн. Школа (Норвегия)
131	Кирпичная стена из обожженного пустотелого кирпича, с двух сторон оштукатурен, общая толщина 31,2 см: а) после 1,8 мес. воздушной сушки б) " 5,0 "	1332 1327	— —	10 10	0,70 0,64	Мюнх. Институт по исслед. теплоизоляции (Schmidt u. Grossmann)

132	Кожа подопшвенная	1000	—	30	0,137	Стандартное Бюро (Америка).
133	Коксовая пыль	1000	—	0—20	0,12—0,13	Hencky.
134	Константан (Cu — 60%, Ni — 40%)	—	—	18 100	19,4 23,0	Meissner.
135	Котельная накипь (котельный камень): $CaCO_3$ — 15,2%; $CaSO_4$ — 80,8%; $MgCO_3$ — 2,4%	—	—	—	1,91	Reutlinger.
136	То же — ($CaCO_3$ — 2,7%; $CaSO_4$ — 82,2%; $MgCO_3$ — 14,6)	—	—	—	2,96	Морало.
137	Лава	—	—	16—99	0,723	Средн. от разн. исследов. (сводка E. Schmidt'a).
138	Латунь красная	—	—	20—100	94—100	"
139	Латунь желтая	—	—	20—100	79—90	Neumann.
140	Лед	—	—	—	2,05	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики
141	Линолеум (см. пробковый линол.)	1183	0	0—20	0,15—0,16	(Клоблаунч, Раисч и Рейтер).
142	Льняные волокна, положенные между листами бумаги	180	возд. сухие	30	0,0371	Стандартное Бюро (Америка).
143	Льняные волокна, смешанные с шерстью и за- ключенные между бумажными листами	180	—	30	0,0407	"
144	Льняно-бумажная изоляция, предназначенная специально для изоляции железных стен железнодорожных вагонов	—	—	30	0,043—0,057	Стандартное Бюро (Америка).
145	Льняная ткань, покрытая лаком и просушенная	—	—	30	0,126	Synops и Walker.
146	Магнезия в форме полуцилиндрических полови- нок для изоляции трубопроводов	266	—	50 100 200	0,063 0,066 0,072	Мюнх. Институт по исследованию теплоизоляции

№ по порядку	Наименование материалов	Объемн. вес материала кг/м ³	Влажность в % от объема	Средние температуры в °Ц	Кoeffиц. теплопров. λ кал/м °Ц.	Опытные учреждения и исследователи
147	Магnezия в форме полубиндрических половинок для изоляции трубопроводов, твердая (185% магнезии и 15% асбеста)	310	—	30	0,064	Стандартное Бюро (Америка).
148	Магнезия, разведенная в воде и высушенная	214	—	50 100 200	0,052 0,055 0,063	Мюнх. Институт по исследованию теплоизоляции.
149	Магнезия с примесью асбеста	189	0	0 40 70—140	0,049 0,051 0,052—0,053	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Kloblauch, Rausch u. Reilher).
149a	Магнезито-древесный бетон (древесные опилки—58% и магнезит—42%)	—	—	47—100	0,173	Георгиевский.
150	Масло парафиновое	—	—	17	0,125	R. Weber.
151	Масло цилиндрическое	—	—	81	0,104	Ernst.
152	Медь электролитная	—	—	20—200	332—335	Среднее от разных исследований. (сводка E. Ssfimidt'a).
153	Мел	—	—	—	0,79	Herschel, Lebour и Dunn.
153a	Морозин ¹⁾ водоупорный	309	—	22,4	0,052	Цылик и Арбатский.
153б	" чистой костры	315	—	19,9	0,054	"
153в	" водоупорный	324	—	19,2	0,055	"
153г	" огнеупорный	346	—	18,4	0,058	"
153д	" с волокном, сильно пресованный	364	—	21,2	0,058	"
153е	" водоупорный, сильно пресованный	370	—	19,8	0,058	"

154	Мрамор	—	—	—	—	—	—	—	5,22 3,03 2,57	Елькен.
155	Никель (97%)	—	—	—	—	—	—	—	50 49 300 45 38	Среднее от различных исследователей (сводка E. Schmidt'a).
156	Новое серебро	—	—	—	—	—	—	—	16 23 29	Lees.
157	Олово	—	—	—	—	—	—	—	56—52	Среднее от различных исследователей (сводка E. Schmidt'a).
158	Ореховое дерево	—	—	—	—	—	—	7	0,238	Ott.
159	Парафин (Parowax), темп. плавления 52°Ц	890	—	—	—	—	—	30	0,198	Стандартн. Бюро (Америка).
160	Парафин, темп. плавл. 66°Ц	920	—	—	—	—	—	23	0,230	Jakob u. Erk.
161	Пемзовый щепень, величина кусков 1—2 см	292	сухой	—	—	—	—	20—65	0,2	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Nusselt).
161a	То же, величина кусков 1—20 мм	300	сухой	—	—	—	—	0—30	0,075—0,081	Groeber.
162	Перья	80	—	—	—	—	—	0—25	0,0305—0,0320	Мюнх. Институт по исследованию теплоизоляции.
162a	То же	—	—	—	—	—	—	47,7—52,0	0,0206	Smoluchowsky.
163	Песок речной, мелкий	1520	0	—	—	—	—	0—20	0,26—0,28	Мюнх. Лабор. Техн. Физ. (Groeber).
164	Песок речной	1640	11,3 (6,30% по весу)	—	—	—	—	160 20—50	0,33 0,97—0,99	

¹⁾ Прессованная костра.

№ по порядку	Наименование материалов	Объем, вес материала кг/м ³	Влажность в %/объема	Средние температуры в °Ц	Кoeffиц. теплопров. λ кал/м °Ц	Опытные учреждения и исследователя
165	Песчаник, естественный, серый, только что обработанный	2259	норм.	10-40	1,33-1,53	Мюнх. Лаб. Техн. Физ. (Groeber).
165a	То же, после 6 мес. возд. сушки	2251	—	10-30	1,08-1,14	—
166	Платина, очень чистая	—	—	0-200	60,1	Meissner.
167	Пробковая мелочь из крупных кусочков	86	—	— 5 + 3	0,0396 0,0403	Griffiths.
168	Пробковая мелочь, обыкновенная, величина кусков 4-5 мм	85	0	0-60	0,038-0,050	Мюнх. Лаб. Техн. Физ. (Groeber).
169	Пробковая мелочь, обыкновенная, величина кусков 5 мм	130	0	30	0,0385	Стандартн. Бюро (Америка).
170	Пробковая мелочь с искусственно увеличенную пористостью					
	а) величина кусков 4-5 мм	45,4	0	20-60	0,033-0,037	Мюнх. Лаб. Техн. Физ. (Groeber).
	б) " 1-2 "	47,6	0	20-100	0,029-0,036	Стандартн. Бюро (Америка).
171	Пробковая пыль, величина кусков 1,5 мм	150	0	30	0,0367	Smoluchowsky.
171a	Пробковый порошок	—	—	41,7-52	0,0262	—
172	Пробковая пыль, полученная из остатков пробковых плит, величина кусочков 1-3 мм	161	—	0 50 100 200	0,031 0,041 0,048 0,055	Мюленск. Лабор. Техн Физики (Nisselt).
173	Пробковая мелочь, смешанная с кизельгуром (инфузорной землей), в сформованном виде	323	—	10,95	0,065-0,075	Мюнх. Лаб. Техн. Физ. (Knoblauch, Ransch u. Reiber)

174	Пробковая мелочь, смешанная с кварцпеском и известью	318	—	79,8	0,0888	Desvignes.
175	Пробковая пластина	61—483	0	0	0,033—0,094	Мюнх. Лаб. Техн. Физ. (Klopplauch, Raisch u. Reither, Цыдлик и Арбатский).
175a	Пробковая пластина	128	—	27,0	0,038	"
175b	То же	150	—	26,7	0,046	"
175в	То же	177	—	19,5	0,041	"
176	Пробковая пластина	110,5	—	0—80	0,0310—0,0384	Стандартн. Бюро (Америка).
176a	То же	160	—	30	0,0374	"
176b	То же	224	—	0 80	0,039—0,0453	"
177	Пробковая пластина, пропитанная лаком	250	—	30	0,0436	"
178	Пробковая пластина, пропитанная лаком	131	—	0	0,0345	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Klopplauch, Raisch u. Reither).
179	Пробковая пластина, составленная из мелких частиц, соединенных жидким стеклом	195	—	76,4	0,674	Desvignes.
180	Пробка, древесная кора и еловая хвоя (смесь)	434	0	0—50	0,063—0,075	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Klopplauch, Raisch u. Reither).
181	Пробковый линолеум	535	0	0	0,069	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Roensgen).
181a	Роговая масса (прессованная)	—	—	65—100	0,202	Георгиевский.
181b	Руберойд	—	—	84—100	0,135	"
182	Сажа ламповая	165	—	40	0,0561	Taylor.
182a	Сажа ламповая	—	—	41,7—52	0,0203	Smoluchowsky.

№№ по порядку	Наименование материалов	Объем материала кг/м³	Влажность в 0,0/0 объема	Средние температуры в °C	Коэфф. теплопров. λ кал/м °C	Опытные учреждения и исследователи
183	Свинец	—	—	$\left\{ \begin{array}{l} 0 \\ 100 \\ 300 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 30,6 \\ 2,88 \\ 27,0 \end{array} \right.$	Среднее от различных исследователей (сводка E. Schmidt'a).
184	Серебро	—	—	от -160 до +100	360	Lees, Jäger и Diesselhorst.
185	Сосновая пластина, тепловой поток перпендикулярно к слоям	546	сухая	0—50	0,12—0,14	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ralsch u. Reiher, Poesngen).
186	То же, тепловой поток параллельно слоям	551	сухая	20—25	0,30—0,32	Poesngen.
187	Слюда	—	—	41,3	0,31	Symons u. Walker.
188	Снег разной структуры	100 500 900	— — —	— — —	0,04 0,55 1,90	Среднее от разных исследователей (сводка E. Schmidt'a).
189	Солома пресованная	132	0	30—105	0,05—0,075	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ralsch u. Reiher).
190	Сталь не закаленная	—	—	20	39,6	Среднее от разных исследователей (сводка E. Schmidt'a).
190а	То же, закаленная	—	—	20	34,2	Meuer.
191	Стекло зеркальное	—	—	12,5	0,645	Taylor.
192	Стекло пластинчатое	2490	—	20—100	0,7	

193	Степленная вата, тепловой поток перпендикулярно к волокнам	186	—	—	0 50 100 200 300	0,030 0,038 0,047 0,068 0,092	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики.
194	Тополь	580	—	—	0—100	0,147—0,162	Barrat,
195	Торфяные волокна, расчесанные	190	возд. сухие	—	—	0,060	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ralsch и. Reither).
195а	То же	190	0	—	—	0,041	"
196	Торфолеум, размельченный	130	возд. сухой	—	0—50	0,033—0,041	Мюнх. Инст. по исслед. теплоизоляц.
196а	То же в плите	163	—	—	0—50	0,0335—0,0410	"
197	Торфяная плита, легкая	120	1,3	—	0—50	0,0345—0,044	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ralsch и. Reither).
198	То же	192	0	—	0—54	0,048—0,050	"
199	То же	374	0	—	0—48	0,062—0,095	"
200	То же, плотная	613	0	—	0—50	0,084—0,098	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Knoblauch, Ralsch и. Reither).
201	Торфяные кирпичи	694	0	—	0—50	0,143—0,156	"
202	Тростниковая пластина	75	0	—	—	0,040	"
203	Фибра красная	1290	—	—	20—100	0,403—0,428	Barrat,
204	Фибра белая	1220	—	—	20—50	0,239—0,250	Taylor,
205	Хлопчатая бумага	81	—	—	— 200 — 100 — 50 ± 0	0,0275 0,0375 0,0425 0,0480	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Groeber).

№№ по порядку

Наименование материалов

№№ по порядку	Наименование материалов	Объем вес материала кг/м ³	Влажность в % от объема	Средние температуры в °С	Кoeffиц. теплопров. λ кал/м °С	Опытные учреждения и исследователи
206	Хлопчатая бумага	81	возд. сухая	0 50 100 150	0,0480 0,0535 0,0590 0,0650	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Nusselt).
207	Хлопчатая бумага (перевязочная вата)	80	—	30	0,036	Стандартное Бюро (Америка).
208	Целлюлоза светлый	1400	—	30	0,18	Стандартное Бюро (Америка).
209	Целлюлоза иррессованная	1425	—	15	0,210	Biquard.
210	Цементный раствор чистого порландского цемента	1715 1886	—	88,6 89,6	0,289 0,460	Desvignes.
212	Цементно-древесная плита (порландский цемент и опилки)	715	0,4	40—20	0,11—0,12	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физ. (Nusselt).
213	То же	824	12,4	0	0,14	"
214	Цинк	—	—	0—400	95—79	Среднее от разн. исслед. (сводка С. E. Schmidt'a).
214a	Чугун	—	—	10	43,0	"
214a	Шевелин ¹⁾ в два слоя, в свободном состоянии	139	—	19,8	0,0360	Цылик и Арбатск.
214b	То же, легко сжатый	182	—	16,5	0,0390	"
214b	То же, сильно сжатый	261	—	13,7	0,0400	"
215	Шелк	100	—	0 50 100	0,038 0,045 0,051	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (Nusselt).

Мюнхенск. Лабор.
Техн. Физики
(Stroeber).

Мюнхенск. Лабор.
Техн. Физики
(Nusselt).

Мюнхенск. Лабор.
Техн. Физики
(Nusselt).

Стандартн. Бюро
(Америка)

Мюнх. Лаб. Техн.
Физ. (Knoblauch,
Raisch u. Reiher).

Herschel, Lebour
и Dupin.

Мюнхенск. Лабор.
Техн. Физики
(Knoblauch, Raisch
и. Reiher).

Непску.

Мюнхенск. Лабор.
Техн. Физики
(Knoblauch, Raisch
и. Reiher).

Мюнхенск. Лабор.
Техн. Физики.

0,020	200	возд.	100
0,032	100	сухой	
0,0375	50		
6,0425	0		
0,0480	50		
0,039	0		
0,047	50		
0,052	100		
0,033	0		
0,042	50		
0,050	100		
0,0303-0,0324	30	возд.	80-105
0,032-0,041	0-50	сухая	90
1,13-1,3	--		
1,98-2,34	--		
0,12	0		687
0,13-0,14	0-20		750
0,14	0		785
0,40-0,44	0-30	16,6 (9,4% по весу)	1775

216	Шлак, остатки от прядильных машин, изоляционный материал для трубопроводов	100
217	Шелковый жгут (для изоляции трубопроводов)	147
218	Шерсть овечья	136
219	Шерсть чистая	80-105
220	Шерсть	90
221	Шифер, тепловой поток перпендикулярно к слоям	
222	То же, темп. поток параллельно к слоям	
223	Шлаки каменноугольные	687
224	Шлаки котельные	750
225	Шлаки доменных печей	785
226	Шлаковые кирпичи	1775

1) Очисти от льняных волокон.

№ по порядку	Наименование материалов	Объем, вес материала кг/м³	Влажность в % от объема	Средние температуры в °С	Кoeffициент теплопроводности λ кал/м °С	Опытные учреждения и исследователи
227	То же	1400	—	15	0,400	Вiquard.
228	Шлаки доменных печей, очень пористые, свободные	360	—	25—128	0,095	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физ. (Nusselt).
229	Шлаки доменных печей, очень пористые, свободные, величина кусков 2—5 мм	360	—	0—20	0,088—0,090	Ненску.
230	То же, величина кусков 30 мм	360	—	0—20	0,12—0,13	"
231	Шлаковая вата в форме толстой ткани, теплов. поток перпендикул. к волокнам	290	—	30	0,0356	Стандартн. Бюро (Америка).
232	Шлаковая вата сильно уплотненная	340	—	30	0,0367	"
233	Шлаковая вата, английская	210	—	от—16 до+18	0,037	Griffiths.
234	Шлаковая вата, уплотненная	300	—	0	0,0495	Мюнх. Институт по исследованию теплоизоляц. ши.
				50	0,055	
				100—200	0,065—0,072	
235	То же	200	—	30	0,0342	Стандартн. Бюро (Америка).
236	Шлаковая вата, как изоляц. матер. для трубопр. в форме полуцилинд. покрышек	400	—	50—200	0,061—0,080	Мюнх. Инст. по исслед. теплоизоляц.
237	Штукатурка, состоящая из 12 объемных частей песку, 4 частей извести и 1 части цемента	1870	2,0	0	0,46	Мюнх. Лаб. Техн. Физ. (Knoblauch, Ratsch и Reiter).
238	Штукатурка известковая	1690	возд. сухая	20	0,68	Мюнх. Лаб. Техн. Физ. (Grosber).
239	Эбонит	—	—	49	0,133	Herschel, Lebour и Дипл.

Б. Коэффициенты теплопроводности огнеупорных материалов.

№ по порядку	Наименование материалов	Объемный вес материала кг/м ³	Пористость материала в % от объема	Средние температуры в °С	Коэфф. теплопр. λ кал/м °С	Научные учреждения и исследователи
1	Бокситовые кирпичи: SiO ₂ — 28,0% Al ₂ O ₃ — 66,0% Fe ₂ O ₃ — 5,0% температ. обжига 1050° С	1899	41,5	155—1130	1,183	Вологда.
2	То же, температура обжига 1300° С	1920	38,4	170—965 170—1155	1,116 1,260	
3	Графит французский: C — 48,5% SiO ₂ — 30,5% Al ₂ O ₃ — 18,0% Fe ₂ O ₃ — 2,0% температура обжига 710° С	—	—	180—900	2,195	* * *
4	То же, температура обжига 1050° С	—	—	208—607	5,220	
5	То же, температура обжига 1300° С	1700	28,4	175—405 405—865	6,480 6,850	* * *
6	Графит английский	1790	26,0	330—600	8,63	
6а	То же	—	—	430—705 285—485	9,350 8,640	* * *
7	Огнеупор. кирпич: SiO ₂ — 64,5% Al ₂ O ₃ — 32,0%	—	—	200 600 1000	0,740 0,930 1,130	

№ п/п по порядку	Наименование материалов	Объем, вес материала кг/м ³	Пористость материала в % от объема	Средние температуры в °С	Коефф. теплопров. λ ккал/м. °С.	Опытные учреждения и исследователи
8	Отгепорн. кирпичи	1817	—	200 300 500	1,040 1,300 1,380	Мюнх. Институт по исследованию теплоизоляции.
9	Железо-хромовые кирпичи	3190	23,3	145—570 210—855 295—1190	2,050 2,090 2,160	
10	Железо-хромовые кирпичи, без примесей, температура обжига 1050° Ц	2630	35,9	70—1124	0,90	
11	Железо-хромовые кирпичи, смеш. ин., состав, температур. обжига 1050° Ц	3210	31,7	160—1120	0,935	"
12	То же, температура обжига 1300° Ц	2490	26,4	125—1180	1,225	"
13	Карбундовые кирпичи: SiC — 87,0%/ ₀ SiO ₂ — 12,0%/ ₀ Fe ₂ O ₃ — 0,40%/ ₀ температура обжига 1050° Ц	—	—	270—690 280—750 300—650	5,040 5,400 6,850	"
14	То же, температура обжига 1300° Ц	—	—			"
15	Карбундовые кирпичи: SiC — 75,0%/ ₀ SiO ₂ — 20,0%/ ₀ Al ₂ O ₃ — 3,0%/ ₀ Fe ₂ O ₃ — 1,0%/ ₀ CaO + MgO — 1,0%/ ₀ температура обжига 1050° Ц	1960	35,2	205—1210	1,152	"
16	То же, температур. обжига 1300° Ц	1960	30,6	225—555 290—730 420—1000	4,670 5,040 5,400	"

17	Кисельгуровые кирпичи	1030	58	100—630 140—910	0,576 0,720	"
18	Кирпичи из белой глины (фансовые), температ. обжига 1050° Ц.	1900	25,7	195—830 203—875	1,295 1,368	"
19	Кирпичи из красной обожженной глины: SiO ₂ — 74,0%/ ₀ Al ₂ O ₃ — 16,8%/ ₀ Fe ₂ O ₃ — 6,5%/ ₀ CaO — 2,5%/ ₀ MgO — 1,0%/ ₀ температура обжига 1050° Ц.	1950	23,0	135—695	1,260	"
20	Кирпичи из легкой обожженной глины	1410	45,7	60—550 95—885 110—1135	0,792 0,864 0,935	"
21	Магнезитные кирпичи MgO — 87,90%/ ₀ CaO — 4,70%/ ₀ Fe ₂ O ₃ — 2,60%/ ₀	2560	—	500 700 900 1100	1,140 1,040 0,972 0,900	Green.
22	Магнезитные кирпичи SiO ₂ — 1,00%/ ₀ Fe ₂ O ₃ — 0,50%/ ₀ Al ₂ O ₃ + MgO — 95,00%/ ₀ температура обжига 1050° Ц.	2000	35,1	230—1000	2,087	Володин.
23	То же, температура обжига 1300° Ц.	2000	41,0	134—540 200—720 155—795 185—915	2,520 2,320 2,230 2,160	"
24	Магнезитные кирпичи MgO — 86,40%/ ₀ SiO ₂ — 2,70%/ ₀ Al ₂ O ₃ — 6,50%/ ₀ Fe ₂ O ₃ — 4,40%/ ₀	2340	34,0	20 250 500 1000	4,350 4,040 3,670 2,780	Гоетелс.

№ по порядку	Наименование материалов	Объем. вес материала кг/м ³	Пористость материала в % от объема	Средние температуры в °Ц	Коэфф. теплопров. λ кал/м °Ц.	Опытные учреждения к исследователям
25	Огнеупорная глина	—	—	380—750	1,34—1,32	Слемент и Егу.
26	Огнеупорная глина обыкновенная SiO ₂ — 78,0%/о Al ₂ O ₃ — 18,0%/о Fe ₂ O ₃ — 3,3%/о CaO — 0,50%/о температура обжига 1050° Ц.	1810	30,8	125—840 145—1010	1,296 1,366	Вологдин.
27	То же, температура обжига 1300° Ц.	1900	24,1	310—1000	1,943	"
28	Огнеупорная масса (для газовых регорт)	1870	27,3	105 - 685 140—990 140 1120	1,259 1,367 1,440	"
29	Силикатные кирпичи SiO ₂ — 94,0%/о Al ₂ O ₃ — 1,0%/о Fe ₂ O ₃ — 2,0%/о CaO — 2,0%/о температура обжига 1050° Ц.	1580	42,58	110—1005	0,720	"
30	Силикатные кирпичи из аморфного кварцита	1510	—	200 600 1000	0,510 0,880 1,240	Мюнхенск. Лабор. Техн. Физики (van Rinsum).
31	Силикатные кирпичи SiO ₂ — 96,0%/о Al ₂ O ₃ — 1,8%/о	1870	23,0	50 400 750	1,000 1,105 1,260	Goetens.
32	Стекло кварцевое	—	—	— 190 — 78 ± 0 + 100	0,570 1,000 1,190 1,640	Eucken.

	1860	1950	1960	2130	1800	1750	1810
33	Тяжелая масса для плавки стекла, температура обжига 1200° Ц.						
34	То же, температура обжига 1600° Ц.						
35	Фарфор не глазированный, температура обжига 1050° Ц.						
36	То же, глазированный, температура обжига 1300° Ц.						
37	Фарфор глазированный, Севрский $SiO_2 - 79,32\%$ $Al_2O_3 + Fe_2O_3 - 18,42\%$ $K_2O + Na_2O - 2,14\%$ температура обжига 1300° Ц.						
38	Шамотные кирпичи $SiO_2 - 67,7\%$ $Al_2O_3 - 28,2\%$						
39	Шиферные кирпичи (кирпичи из шиферной глыбы) $SiO_2 - 53,0\%$ $Al_2O_3 - 45,3\%$						
40	Шиферные кирпичи $SiO_2 - 53,9\%$ $Al_2O_3 - 40,2\%$						

Бокотджин.

0,927
 0,935
 1,512
 1,726
 1,115
 1,188
 1,690
 1,870

29,7
 21,9
 23,4
 10,1

1860
 1950
 1960
 2130

90—640
 190—1035
 140—615
 255—990
 70—610
 115—845
 135—675
 200—1000

280—795

Доеренс.

1,620
 0,750
 0,890
 1,100
 0,720
 0,760
 0,840
 0,78
 1,01
 1,18

50
 450
 850
 50
 500
 960
 50
 500
 950

1800
 1750
 1810

29,0
 39,0
 31,0

Литература по вопросу о теплопроводности изоляционно-строительных материалов.

1. Boyer-Guillon. Manière de mesurer les pertes de chaleur des enveloppes calorifiques. Bull. d. cons. nat. des artes et métiers, № 7. 1905—1906.
2. A. Bugge und A. Kolflaath. Ergebnisse von Versuchen für den Bau warmer und billiger Wohnungen etc. 1924.
3. Н. Н. Георгиевский. Результаты определения теплопроводности некоторых худых проводников тепла. Журн. Русск. Физико-Химич. Общ-ва, т. XXXV, вып. 8.
4. E. Griffith. First Report on Heat Insulators. Spec. Rep. № 5 by the Eng. Com. of the Board. 1924.
5. H. Groeber. Wärmeleitfähigkeit von Isolier- und Baustoffen. Mitteil. über Forschungsarb. V. D. I., Heft 104, 1911.
6. K. Hencky. Der Wärmeverlust durch ebene Wände. 1921.
7. C. H. Herfer. Refrig. Eng., 1924.
8. M. Jakob. Сводка в Физикальш-chemische Tabellen von Landolt-Börnstein Roth-Scheele. 5 Aufl., 1923.
9. M. Jakob. Über einige neuere praktische Verfahren zur Messung des Wärmeleitungsvermögens von Bau- und Isolierstoffen. V. D. I., 1919.
10. Osc. Knoblauch, E. Raisch und H. Reiher. Die Wärmeleitahlen von Bau- und Isolierstoffen und die Wärmedurchlässigkeit. Gesundh. Ing., 1920.
11. H. Kreüger und A. Eriksson. Untersuchungen über das Wärmeleitungsvermögen der Baukonstruktionen. 1923.
12. Mitteilungen aus dem Forschungsheim für Wärmeschutz, Hefte 1—5 (K. Hencky, J. S. Cammerer, E. Schmidt и др.).
13. W. Nusselt. Die Wärmeleitfähigkeit von Wärmeisolierstoffen. Mitteil. über Forschungsarb. V. D. I., Heft 63 и 64.
14. E. Péclet. Traité de la chaleur etc., t. 1-er, 4-me edit., 1878.
15. R. Poensgen. Ein technisches Verfahren zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit plattenförmiger Stoffe. Mitteil. über Forschungsarb. V. D. I., Heft 130, 1912.
16. W. van Rinsum. Die Wärmeleitfähigkeit von feuerfesten Steinen bei hohen Temperaturen etc. V. D. I., 1918.
То же, Mitteil. über Forschungsarb. V. D. I., Heft 228.
17. А. П. Серебровский. Теория и практика термозоляции. 1913.
18. P. Sale and A. Hedrick. Measurement of Heat Insulation etc. Technol. rap. of the Bureau of Standards, № 266, 1924.
19. S. Wologdine. Recherches sur la conductibilité, porosité et la perméabilité des matières réfractaires. Revue de Métallurgie, 1909.
20. О. Д. Хвольсон. Курс физики. Т. III, изд. 5-е, 1923.
21. В. Е. Цыдзик и И. В. Арбатский. Определение коэффициентов теплопроводности изоляционных материалов „Шевелина“, „Морозина“ и пробковых пластин. Известия Механ. Инст. М. В. Т. У., вып. XVIII, 1916. (Отдельный оттиск: „Вестн. Инжен.“ № 10, 1916).

Т а б л и ц а II.

Коэффициент C лучеспускания.

Материал	Состояние поверхности	C
а) Величины из опыта:		
Абсолютно черное тело .	Пустоты с одинаковой температурой и мелкими порами.	4,70
Стекло	гладкое	4,4
Латунь	матовое	1,05
Сажа ламповая	гладкая	4,30
Медь	слабо полированная	0,79
Железо сварочное	матовое оксидированное	4,32
" "	белое	1,60
" "	хорошо полированное	1,31
Цинк	матовый	0,97
Железо литое	шероховатое, сильно оксидир.	4,39
Известковый раствор	шероховатый, белый	4,30
Базальт	гладко шлифованн.; но не блест.	3,42
Натур. шифер	—	3,29
Гумус	—	3,14
Песчаник красный	—	2,86
Мрамор итальянский	—	2,70
Гранит	—	2,12
Доломитов. известняк	—	1,96
Глина	—	1,85
Земля растительная	—	1,79
Мел плавленый	—	1,45
Гравий	—	1,37
Вода	—	3,20
Лед	—	3,06
Золото гальваническ.	—	2,35
б) Величины рассчитанные:		
Кирпич	шероховатый	4,3
" "	гладкий	3,5
Бетон, туф	шероховатый	4,5
Дерево	неостроганное	3,5—4,0
" "	остроганное	3,0
Бумага кровельная	шероховатая	4,5
Стена из глинян. кирпича	—	3,5—4,0

Таблица III.

А. Величина c в зависимости от температур t_1 и t_2 .

Температуры t_2	Температуры t_1						
	-10	-5	0	+5	+10	+15	+20
-20	0,690	0,709	0,729	0,75	0,772	0,796	0,820
-15	0,708	0,729	0,749	0,771	0,792	0,816	0,840
-10	0,728	0,749	0,769	0,791	0,814	0,838	0,862
-5	0,748	0,769	0,791	0,814	0,836	0,860	0,884
0	0,770	0,792	0,814	0,837	0,859	0,883	0,908
+5	0,792	0,814	0,836	0,859	0,882	0,907	0,932
+10	0,814	0,837	0,859	0,882	0,906	0,931	0,957
+15	0,838	0,861	0,883	0,907	0,930	0,956	0,983
+20	0,862	0,884	0,908	0,931	0,954	0,981	1,008

Б. Величина c в зависимости от средней температуры

$$\frac{t_1 + t_2}{2}$$

$\frac{t_1 + t_2}{2}$	c	$\frac{t_1 + t_2}{2}$	c	$\frac{t_1 + t_2}{2}$	c
-10	0,730	+1	0,823	+12	0,926
-9	0,739	+2	0,832	+13	0,935
-8	0,747	+3	0,841	+14	0,945
-7	0,755	+4	0,850	+15	0,955
-6	0,762	+5	0,860	+16	0,965
-5	0,771	+6	0,869	+17	0,975
-4	0,780	+7	0,879	+18	0,986
-3	0,788	+8	0,888	+19	0,996
-2	0,797	+9	0,897	+20	1,006
-1	0,805	+10	0,907		
0	0,814	+11	0,916		

Таблица IV.

А. Величина α_k при разных Δt .

Δt	Вертикальн. стены		Горизон- тальные ограждения (полы, пере- крытия)	Δt	Вертикальн. стены, на- ружн. или внутренняя сторона *	Горизон- тальные ограждения (полы, пере- крытия)
	Внутрен. сторона	Наружн. сторона				
1°	2,2	3,1	2,8	9°	3,8	4,9
2	2,6	3,2	3,3	10	3,9	5,0
3	2,9	3,2	3,7	12	4,1	5,2
4	3,1	3,3	4,0	14	4,3	5,4
5	3,3	3,4	4,2	16	4,4	5,6
6	3,4	3,5	4,4	18	4,5	5,8
7	3,6	3,6	4,6	20	4,7	5,9
8	3,7	3,7	4,7	25	4,9	6,3

Б. Величина α_0 при $C = 4,2$ по Нуссельту и Вирцу
[форм. $\alpha_0 = C_c + 0,55 l (t_1 - t_2)^{0,25}$]

Δt	α_0 при $l =$		
	4	5	6
1—3°	7,4	—	—
6	7,5	8,4	9,3
7	7,7	8,6	9,5
8	7,8	8,7	9,6
9	7,9	8,9	9,8
10	8,0	9,0	10,0
11	8,0	9,0	10,0
12	8,1	9,1	10,2
13	8,2	9,2	10,3
14	8,3	9,3	10,4
16	8,3	9,4	10,5
18	8,3	9,4	10,6
20	8,5	9,6	10,8
22	8,6	9,8	11,0
24	8,6	9,8	11,0

Таблица V.

Определение C' по C_1 и C_2 : $\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}$

C_2	C_1								
	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	
1	0,56	0,688	0,777	0,842	0,892	0,932	0,946	0,990	
1,5	0,688	0,89	1,05	1,17	1,27	1,35	1,42	1,48	
2,0	0,777	1,05	1,27	1,46	1,61	1,75	1,86	1,96	
2,5	0,842	0,17	1,46	1,70	1,92	2,11	2,29	2,45	
3,0	0,892	1,27	1,61	1,91	2,21	2,46	2,70	2,92	
3,5	0,932	1,35	1,75	2,11	2,46	2,79	3,10	3,39	
4,0	0,96	1,42	1,86	2,29	2,70	3,10	3,48	3,86	
4,5	0,990	1,48	1,96	2,45	2,92	3,39	3,86	4,33	

Таблица VI.

Величины $\lambda' = \lambda_{\sigma_3} + \lambda_{\kappa} + C \cdot c \cdot X_{\sigma_3}$ для вертикальных пустот.

X_{σ_3} в см	В е л и ч и н ы $C \cdot c$:									
	0	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,7
1	0,030	0,04	0,045	0,05	0,055	0,06	0,065	0,07	0,075	0,077
2	0,041	0,061	0,071	0,081	0,091	0,101	0,111	0,121	0,131	0,135
3	0,052	0,082	0,097	0,112	0,127	0,142	0,157	0,172	0,187	0,193
4	0,058	0,098	0,118	0,138	0,158	0,178	0,198	0,218	0,238	0,246
5	0,064	0,114	0,139	0,164	0,189	0,214	0,239	0,264	0,285	0,299
6	0,067	0,127	0,157	0,187	0,217	0,247	0,277	0,307	0,337	0,349
7	0,070	0,140	0,175	0,210	0,245	0,280	0,315	0,350	0,385	0,399
8	0,071	0,151	0,191	0,231	0,271	0,311	0,351	0,391	0,431	0,447
9	0,072	0,162	0,207	0,252	0,297	0,342	0,387	0,432	0,477	0,495
10	0,073	0,173	0,223	0,273	0,323	0,373	0,423	0,473	0,523	0,543
11	0,073	0,183	0,238	0,293	0,348	0,403	0,458	0,513	0,568	0,590
12	0,074	0,193	0,253	0,313	0,373	0,433	0,493	0,553	0,613	0,637
15	0,075	0,225	0,300	0,375	0,450	0,525	0,600	0,675	0,750	0,780

Таблица VII.

Величины $\lambda' = \lambda_{\theta_0} + C' \cdot c X_{\theta_0}$ для горизонтальных пустот (теплопередача сверху вниз).

X_{θ_0} в см	Величина $C'c$:									
	0	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	4,7
1	0,02	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,055	0,06	0,065	0,067
2	"	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,110	0,114
3	"	0,05	0,065	0,08	0,095	0,11	0,125	0,14	0,155	0,161
4	"	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,200	0,208
5	"	0,07	0,095	0,12	0,145	0,17	0,195	0,22	0,245	0,255
6	"	0,08	0,11	0,14	0,170	0,20	0,23	0,26	0,29	0,302
7	"	0,09	0,125	0,16	0,195	0,23	0,265	0,30	0,335	0,349
8	"	0,10	0,14	0,18	0,22	0,26	0,300	0,34	0,38	0,396
9	"	0,11	0,155	0,20	0,245	0,29	0,335	0,38	0,425	0,443
10	"	0,12	0,17	0,22	0,270	0,32	0,37	0,42	0,47	0,490
11	"	0,13	0,185	0,24	0,295	0,35	0,405	0,46	0,515	0,537
12	"	0,14	0,20	0,25	0,32	0,38	0,44	0,50	0,560	0,584
15	"	0,17	0,245	0,32	0,395	0,47	0,545	0,62	0,695	0,725

Коэффициенты K общей теплопередачи.

1. Стена наружная кирпичная, оштукатуренная с одной стороны толщ. в м.

	0,13	0,27	0,40	0,55	0,64	0,71	0,85	1,03	1,16
$K =$	2,30	1,60	1,25	1,10	0,90	0,85	0,70	0,60	0,55

2. Стена деревянная, рубленая из бревен толщ. 5 в.

без оштукатурок и обшивки $K = 0,60$;

при обшивке тесом $K = 0,52$;

то же с засыпкой прослойка опилками . $K = 0,36$.

3. Бетонная стена из тощего бетона весом около 2000 кг. м³ при толщ. 1,0 м имеет $K = 0,8$.

При пористом шлаковом бетоне (1:9) веса 800—900 кг/м³ толщина 0,4 м (при $\lambda = 0,40$) $K = 0,83$.

То же при обыкновенном шлаковом бетоне толщ. 0,5 м и весе 1000—1250 кг/м³ ($\lambda = 0,50$) $K = 0,83$.

4. Стена сист. Герарда из 2 стенок по $\frac{1}{2}$ кирпича с сухой шлаковой засыпкой в 13,5 см. ($\lambda = 0,24$) $K = 0,9$; при толщине засыпки в 18 см $K = 0,83$.

При сухом торфяном заполнении $K = 0,36—0,5$.

5. Стена в $\frac{1}{2}$ кирпича с изоляционной обшивкой торфяной плитой толщ. 5 см. ($\lambda = 0,10$) и с оштукатуркой по ней $K = 0,8$.

Стена в 1 кирпич с обшивкой соломитом в 5 см. ($\lambda = 0,08$) с оштукатуркой по нему $K = 0,84$.

6. Стена из пористого кирпича толщ. в $\frac{1}{2}$ кирпича при весе в 5 ф. с оштукатурками на обеих сторонах $K = 0,90$.

7. Стена из пустотелого кирпича разных видов имеет в среднем при толщине в 0,5 м и двух оштукатурках $K = 0,90$.

8. Стена из бетонных пустотелых камней толщиной X м при разных системах их (без заполнения пустот) и при обыкновенном бетоне ($\lambda = 1,0$) имеет в среднем K , эквивалентное со сплошной бетонной стеною из того же бетона толщиной 1,25 X и в лучших системах камней со сплошными или с узкими пустотами — до 1,6 X .

При шлаковом бетоне ($\lambda = 0,40$) пустотелая кладка эквивалентна сплошной с толщиной $\sim 0,9 X$, в лучших системах — 1,0 X .

9. Стена из шлако-бетонных пустотелых камней (1:9, 800—900 кг/м³, $\lambda = 0,4$) с засыпкой пустот сухим шлаком ($\lambda = 0,24$) эквивалентна в среднем сплошной стене из того же шлакового бетона с толщиной 1,3 X , в лучших системах (со сквозными отступками) до 1,4 X .

10. Стена из камней Апби при обыкновенном бетоне ($\lambda = 1,0$) со шлаковым заполнением ($\lambda = 0,24$) толщиной 0,28 м $K = 0,9$.

При шлаковом бетоне камней ($\lambda = 0,40$) и толщине заполнения шлаком в 0,18 м $K = 0,9$.

11. Деревянная обшивная стена (тес в 2,5 см.) с набивкой внутренней полости термолитом толщ. 12,5 см. ($\lambda = 0,08$) $K = 0,51$.

То же при толщине термолита 17,8 см. $K = 0,39$.

12. Деревянная пустотелая стена типа „Стандарт“, по рис. 57, при $\lambda = 0,06$ для пробки и $\lambda = 0,14$ для дерева, $K = 0,7$.

13. Стены пустотелые с деревянным каркасом, обшитым с обеих сторон соломитом или камышитом $K = 0,41$.

14. Пол по рис. 61 $K = 0,47$.

15. Потолок по рис. 62 $K = 0,64$.

16. Окна двойные $K = 2,3—2,6$.

17. Стекланный потолок двойной — $K = 2,1—2,4$.

18. Двери наружные одинарные $K = 3,0$.

Коэффициенты γ воздухопроницаемости некоторых строительных материалов.

А. по Лангу в литрах воздуха на 1 час, 1 кв. м. и 1 м. толщины при разности давлений в 1 мм. вод. столба.
(Сводка К. Хенки).

М а т е р и а л ы	Пределы колебаний	Средние величины	Примечание
Туф	570—60.000	2,500	—
Известковый песчаник	0,5—15	10	—
Пустотелый кирпич	1,4—11	6	—
Кирпич ручной	2,3	2,3	—
” машинный	0,6—2,5	1,5	—
Штукатурка	4,25—4,99	5	изв., пес. 1:4.
Смешанный раствор	1,36	1,4	ром. цем., изв., пес. 1:1:3.
”	0,64	0,64	портл. цем., изв., пес. 1:1:3.
Порландский цемент	0,57	0,57	—

Б. По Ланг'у в сводке „Kalender für Gesamtdits—und Wärme-Technik“ 1927. (в других измерителях).

М а т е р и а л	λ	М а т е р и а л ы	γ
Песчаник	0,118—0,130	Воздушный раствор	0,907
Кирпич	0,087—0,383	Бетон (сухой)	0,258
Клинкер глазурованный	0	Портл. цемент (сухой)	0,137
„ неглазурованный	0,145	Гипс плавленый	0,041
Шлаковый кирпич (измельченный шлак с тащевой известью	1,687—7,597	Сосна (вдоль волокон)	0,1
		Дуб (вдоль волокон)	0,007

В. Сводка по Ланг'у и Ильху (в относительных цифрах к γ известкового раствора).

М а т е р и а л ы	Воздухопрор.	М а т е р и а л ы	Воздухопрор.
Известк. раствор 1:3	1	Кирпич машинный	0,25
Цементы „ 1:3	0,15	„ ручной	0,6
Бетон цем., изв., пес. 1:2:4	0,8	Гипс	0,4
„ 1:2,6:3,6	0,2	Песчаник	0,1
„ 1:1:5	0,1	Ель и сосна вдоль волокон	1
„ 1:1/2:6	0,3	Дуб вдоль волокон	0,1
„ 1:1/2:7	0,4	Клинкер неглазуров	0,2
„ 1:1:10	0,5		
„ 1:1:12	1		



ОГЛАВЛЕНИЕ.

ЧАСТЬ I.

Установившееся движение теплоты через строительные ограждения.

	Стр.
Глава 1. Формулы и коэффициенты	7
Глава 2. Теплопотери в гражданских сооружениях	43
Глава 3. Теплопотери ограждений через естественную вентиляцию и от конденсации в них водяных паров	70

ЧАСТЬ II.

Переменное (неустановившееся) движение теплоты через строительные ограждения.

Глава 1. Остывание и нагревание. Общее уравнение и метод Фурье	81
Глава 2. Остывание и нагревание. Приближенный метод вычисления проф. Э. Шмидта (Мюнхен)	94
Глава 3. Остывание и нагревание. Приближенный метод автора.	103
Глава 4. Практические применения предыдущих методов. Теплоемкость строительных ограждений	121
Глава 5. Натопочные надбавки	140
Глава 6. Переменное колебательное движение теплоты в строительных ограждениях	151

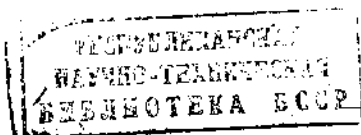
ЧАСТЬ III.

Практические строительные ограждения с теплотехнической точки зрения.

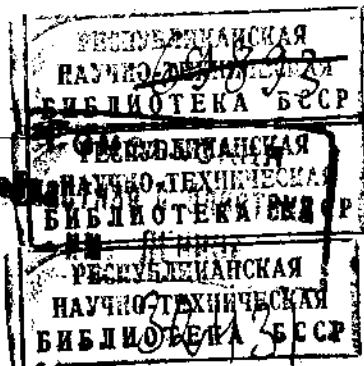
Глава 1. Стены	162
Глава 2. Прочие части постройки. Подвалы	193
Глава 3. Использование теплоты дымовой трубы	210
Глава 4. Планировка зданий в теплотехническом отношении. Общая величина теплопотерь	218
Приложение. Таблицы I—X.	222

Сочинения, послужившие источниками для настоящего издания.

- Dr.-Ing. K. Hencky, Die Wärmeverluste durch ebene Wände, 1921.
Dr.-Ing. H. Gröber. Einführung in die Lehre von der Wärmeübertragung. Berlin 1926.
—, —Die Grundgesetze der Wärmeleitung und Wärmenberganges. Berlin 1921.
Ing. F. Krauss. Die Grundgesetze der Wärmeleitung. Berlin 1917.
Rietschel-Brabbée. Heiz- und Lüftungstechnik Изд. 1922 и 1925 г.
Mitteilungen aus dem Forschungsbereich für Wärmeschutz (E. V.) München 1924—1925 г.г.
Dr.-Ing. E. Schmidt—упомянутые в тексте статьи в разн. немецких изданиях
Инж. М. Готтингер. Отопление и вентиляция. Русск. изд. 1928.
Проф. В. М. Чаплин. Курс отопления и вентиляции. Госуд. Изд-во.
Г. Крейгер и А. Эриксон. Исследование теплопроводности частей здания
Госуд. изд. 1927 г.
Prof. A. Bugge und. Dipe-Ing. A. Kolflaath—Ergebnisse von Versuchen für den
Bau warmer und billiger Wohnungen. Berlin 1924 г.
Ing. A. Nessi et L. Nisolle. Régimes variables de fonctionnement... de chauffage central. Paris 1925 г.
И ряд отдельных брошюр и статей различных авторов, поименованных в тексте.



41037



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
МОСКОВСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
„МАКИЗ“

Москва, „6“, Цветной бульвар, дом 25.

Телефон 32-21.

СТРОИТЕЛЬНОЕ ДЕЛО

Германский Бетонный Союз (E. V.).

Том I. Проектирование и расчет железобетонных сооружений. — Проф.: О. Граф, В. Петри, Е. Мбрш, Г. Рут.

Перевод с немецкого под редакцией и с дополнениями проф. П. А. Велихова. Подписная цена 12 р.

Том II. Статика железобетонных сооружений. — Профессор К. Бейер.

Перевод с немецкого под редакцией проф. П. А. Велихова. Подписная цена 12 р.

Герольский, С. М., проф. — Атлас конструктивных чертежей жилых зданий. Подписная цена 17 руб.

Справочник для инженеров строительной специальности. Пособие при проектировании и расчете инженерных сооружений. Под общей редакцией проф. П. А. Велихова и инж. С. Р. Брилинг.

Краткое содержание: I. Математические формулы и таблицы. Инж. С. Р. Брилинг. II. Геодезия. Проф. М. Дм. Соловьев. III. Механика твердых и жидких тел. Инж. С. Р. Брилинг. IV. Механика тепла и газов. Проф. Н. Р. Брилинг. V. Строительные материалы. Инж. С. Р. Брилинг. VI. Сопротивление материалов. Проф. П. А. Велихов. VII. Статика сооружений. Проф. П. А. Велихов. VIII. Теория грунтов. Проф. Д. П. Крынин. IX. Основания и фундаменты. Проф. В. К. Дмоховский. X. Деревянные конструкции. Проф. П. Я. Камеицев. XI. Каменные конструкции. Инж. С. Р. Брилинг. XII. Железные конструкции. Проф. К. М. Дубяга. XIII. Железобетонные конструкции. Проф. В. М. Келдыш и инж. С. С. Забелло. XIV. Здания жилые и общественные. Проф. И. И. Дюмулен. XV. Фабрично-заводские здания. Проф. Л. К. Серк. XVI. Шоссеиные, мощеные и грунтовые дороги. Проф. Д. П. Крынин. XVII. Железные дороги. Проф. Н. Т. Митюшин. XVIII. Мосты. Проф. Н. С. Стрелецкий и инж. М. П. Холшевников. XIX. Водопровод. Инж. С. Р. Брилинг. XX. Канализация. Проф. Б. А. Дроздов и инж. Б. С. Тикунев. XXI. Отопление и вентиляция. Проф. В. И. Кашкаров. XXII. Планировка городов. Проф. В. Н. Семенов.

Подписная цена за два тома 18 руб.

- Бене.** — Новейшая архитектура зданий специального назначения. (Печатается).
- Бок-Наврат,** инж. — Кирпичное производство (с приложением промстандартов ВСНХ СССР). Ц. 2 р. 50 к.
- Брилинг, С. Р.,** инж. — Нормы для расчета и проектирования инженерных сооружений. Ц. 6 р. 75 к.
- Гейзен, Л.,** инж. — Металлические конструкции. Ц. 6 р.
- Гелер, В.,** проф. — Жесткие рамы. Ц. 5 р. 75 к.
- Гелер, В.,** проф. — Металлические рамы. Ц. 3 р. 75 к.
- Гельдель, П.,** инж. — Таблицы для расчета железобетонных конструкций. Ц. 8 р. 25 к.
- Грио, Г.,** инж. — Неразрезные балки. Таблицы. Ц. 2 р. 25 к.
- Дмоховский, В. К.,** проф. — Основания и фундаменты. Ц. 2 р. 50 к.
- Кайзер, Г.,** проф. — Железобетонные конструкции. Ц. 3 р.
- Керстен, К.,** проф. — Железобетонные гражданские и инженерные сооружения. Ц. 5 р.
- Керстен, К.,** проф. — Расчет железобетонных сооружений. Ц. 6 р.
- Леве, Д.,** инж. — Безбалочные покрытия. Ц. 5 р.
- Литинский, Я.,** проф. — Шамотный и кварцевый кирпич, их свойства, применение и испытание. Ц. 7 р.
- Липшиц, Л. Л.,** инж. — Туннельные печи для обжига огнеупорных фарфоровых изделий и динаса. Ц. 1 р. 50 к.
- Наске, К.** — Цементное производство. Ц. 8 р.
- Нейтра,** инж. — Строительство в Америке. (Печатается).
- Столкин, М. Я.,** инж. — Плоские железобетонные крыши, их устройство и изоляция. Ц. 3 р.
- Таут, Б.** — Новейшая архитектура жилых домов. (Печатается).
- Флюгге, Р.,** инж. — Теплые жилые постройки. Ц. 4 р.
- Шматолла, Э.,** инж. — Печи для обжига кирпича, извести, цемента, магнезита, фарфора. Ц. 2 р. 50 к.
- Шпрингер, К.** — Стекольное производство и его достижения за последние 10 лет. Ц. 6 р.