

Строительная теплотехника

Преподаватель

Соколов Александр Николаевич

Лекция 4 - Тезисы

- Теплофизические свойства материалов
- Воздушные прослойки

Теплотехнические свойства строительных материалов

Строительные материалы обладают рядом свойств, знание которых необходимо для теплотехнических расчётов.

Пористость и объёмный вес

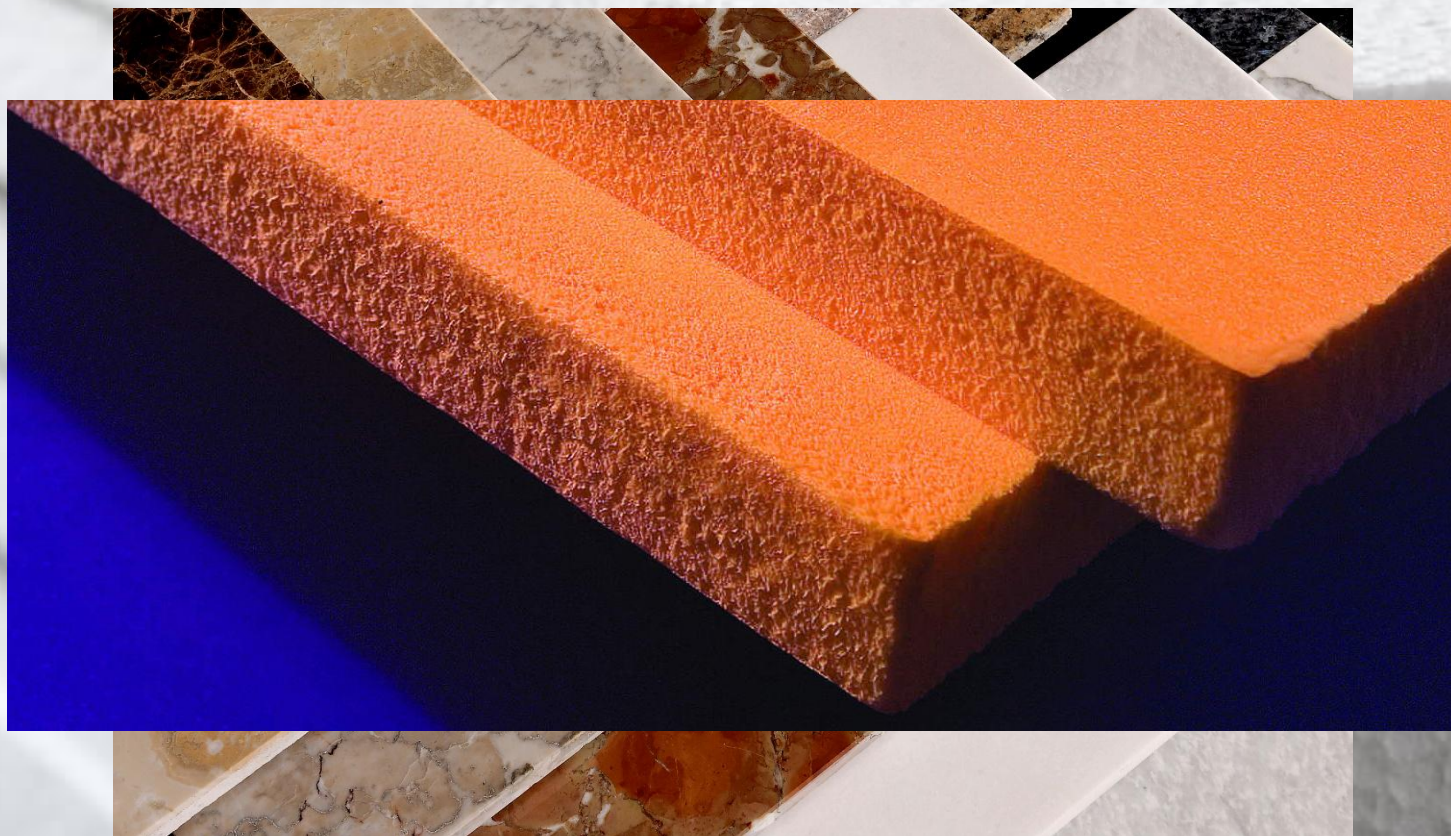
Пористость определяет процентное содержание пор (p в %) в материале и выражается процентным отношением объёма пор к общему объёму материала.

$$\rho = \frac{g - \gamma}{g} 100$$

Например

Обожжённый кирпич, состоящий из смеси глины с песком, удельный вес $g = 2600 \text{ кг/м}^3$, объёмный же вес кирпича будет изменяться в пределах от $\gamma = 1900 \text{ кг/м}^3$ для плотного кирпича до $\gamma = 600 \text{ кг/м}^3$ для высокопористого кирпича.

Д
К
И
М
К
С
У
К
М
С
Р



Для строительных материалов силикатного происхождения пористость изменяется от нуля (для плотных пород, например гранита) до 90% (для лёгкого пенобетона). У пенополистирола и мипора пористость достигает 98%.

Плотность материала γ , кг/м³

- масса 1 м³ материала в том состоянии,
в каком он будет использован

Пористость материала $\rho = (V_{\text{пор}} / V_o) \cdot 100\%$

- процентное содержание пор в материале,
выражается отношением объема пор
к общему объему материала

γ — плотность материала, ρ — плотность скелета

Влажность

Влажность характеризуется наличием в материале несвязанной химической воды. Влажность оказывает большое влияние на теплопроводность и теплоёмкость материала, а также имеет большое значение для оценки влажностного режима ограждений. Влажность можно выражать или в весовом отношении – «весовая влажность» или в объёмном отношении – «объёмная влажность».

Весовая влажность

$$\omega_{\text{в}} = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \cdot 100$$

P_1 - масса образца материала до его высушивания;

P_2 - масса того же образца после высушивания.

Объёмная влажность

$$\omega_0 = \frac{V_1}{V_2} \cdot 100$$

V_1 - объём влаги, содержащейся в образце материала, V_2 - объём самого образца

Если известны объёмный вес материала γ и его весовая влажность ω_B , то для определения объёмной влажности ω_0 можно пользоваться формулой

$$\omega_0 = \frac{\omega_B \gamma}{1000}$$

где γ – объёмный вес материала в сухом состоянии в кг/м³.

- Весовая влажность

$$\begin{aligned}\omega_{\text{в}} &= (m_{\text{влаги}} / m_{\text{сух о}}) \cdot 100\% = \\ &= ((m_{\text{вл о}} - m_{\text{сух о}}) / m_{\text{сух о}}) \cdot 100\%\end{aligned}$$

- Объемная влажность

$$\omega_{\text{о}} = (V_{\text{влаги}} / V_{\text{сух о}}) \cdot 100\%$$

$$V_{\text{влаги}} = m_{\text{влаги}} / 1000, \quad V_{\text{сух о}} = m_{\text{сух о}} / \gamma_{\text{сух}}$$

$$\omega_{\text{о}} = m_{\text{влаги}} \gamma_{\text{сух}} / 1000 m_{\text{сух о}} = \omega_{\text{в}} \gamma_{\text{сух}} / 1000$$

Нормальные влажности некоторых материалов в наружных ограждающих конструкциях

Материал	Объемный вес γ , кг/м ³	Влажность материала в %	
		весовая ω_v	объемная ω_o
Кирпич красный в сплошных стенах .	1800	1,5	2,7
Кирпич красный в стенах с воздуш- ными прослойками	1800	0,5	0,9
Кирпич силикатный	1900	2,5	4,8
Бетон тяжелый	2000	1,5	3
Шлакобетон	1300	3	3,9
Керамзитобетон	1000	6	6
Пенобетон в наружных стенах . . .	700	10	7
Пеностекло	350	3	1,1
Штукатурка известково-песчаная . .	1600	1	1,6
Шлак топливный в засыпке	750	3,5	2,6
Минераловатные плиты	200	2	0,4
Дерево (сосна)	500	15	7,5
Фибролит цементный	350	15	5,2
Торфоплиты	225	20	4,5
Пенополистирол	25	5	0,12

Примечание. Приведенные значения влажности материалов относятся только к конструкциям, правильно спроектированным и находящимся в нормальных условиях эксплуатации. При нарушении нормальных условий эксплуатации конструкций (особенно недостаточно просушенных после окончания строительства) влажность материалов может быть очень высокой.

Теплопроводность

$Q = \lambda (\Delta t / \delta) S \theta$, Дж – количество тепла,
проходящее через слой площадью S толщиной δ
за время θ при разности температур Δt

Коэффициент теплопроводности материала
характеризует способность материала в той или иной
степени проводить тепло через свою массу

$$\lambda = Q \delta / (\Delta t S \theta), \text{ Вт} / (\text{м} \text{ К})$$

– количество тепла, проходящее за 1 с через 1 м² слоя
толщиной 1 м при разности температур на границах
слоя в 1 градус

Зависимость коэффициента теплопроводности от его объёмного веса. С увеличением объёмного веса λ возрастает и, наоборот, при уменьшении объёмного веса λ уменьшается.

Таблица 2

Зависимость λ от γ и ρ для глиняного обожженного кирпича

Кирпич	Объемный вес γ , кг/м ³	Пори- стость ρ , %	Коэффициент теплопровод- ности	
			λ (Вт/(мК))	в % от наи- большого значения λ
Сухого прессования	1900	27	0,8	100
Плотный машинный	1800	31	0,76	94
Слабопористый	1400	46	0,52	64
Пористый	1200	54	0,44	54
Высокопористый	800	69	0,29	36

Коэффициент теплопроводности скелета

Кристаллические материалы 4 - 6 Вт/(м К)

Органические материалы 0,3 – 0,4

Пластмасса 0,2 – 0,3

Коэффициент теплопроводности воздуха

в порах размером 0,1-2 мм 0,02 – 0,03

Зависимость коэффициента теплопроводности от его влажности

Коэффициент теплопроводности

воздуха в порах размером 0,1-2 мм

0,02 – 0,03 Вт/(м К)

воды

0,55 Вт/(м К)

льда

2,2 Вт/(м К)

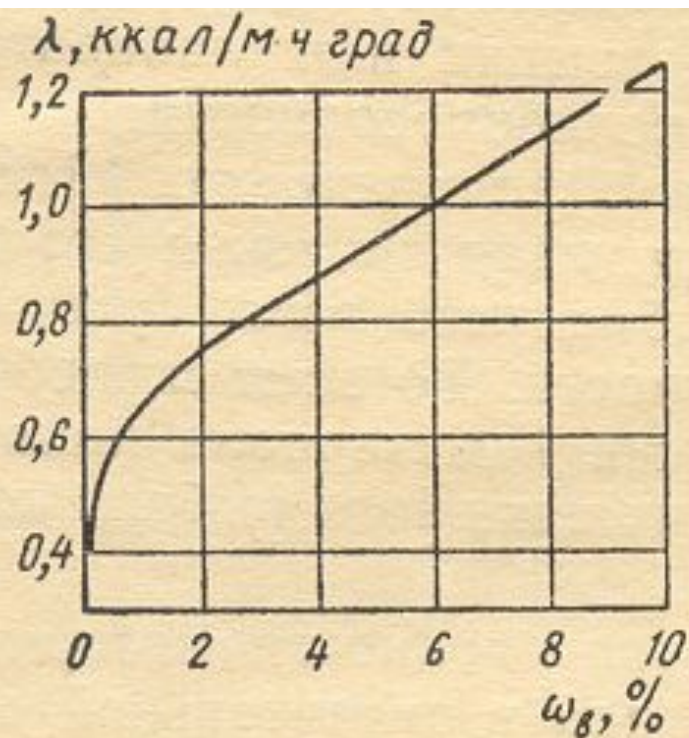


Рис. 4. Зависимость теплопроводности кирпичной кладки от влажности кирпича

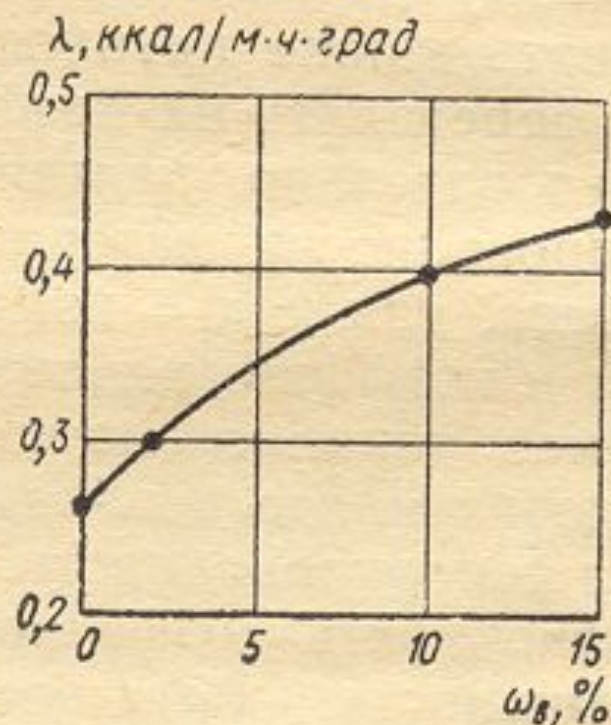


Рис. 5. Зависимость теплопроводности керамзитобетона объемного веса 1000 кг/м^3 от его влажности (по данным НИИ Мосстроя)

Зависимость коэффициента теплопроводности материала от его температуры

Коэффициент теплопроводности материала увеличивается с повышением его средней температуры, при которой происходит передача тепла.

Зависимость величины коэффициента теплопроводности от направления теплового потока наблюдается только у анизотропных материалов.

Таблица 4

Изменение λ древесины в зависимости от направления теплового потока

Древесина	Объемный вес γ , кг/м ³	λ древесины при направлении потока тепла		Увеличение λ при направлении потока тепла параллельно волокнам в %
		перпендикулярно волокнам	параллельно волокнам	
Сосна	550	0,15	0,3	100
Дуб	800	0,2	0,35	75

Данные по выбору расчетных значений коэффициентов теплопроводности
в зависимости от условий эксплуатации ограждающих конструкций

Влажностный режим помещений и значения относительной влажности в них	Зоны влажности по схематической карте		
	сухая	нормальная	влажная
Сухой; $\varphi < 50\%$	Пониженные значения λ (графа А)		Нормальные значения λ (графа Б)
Нормальный; φ от 50 до 60%	Пониженные значения λ (графа А)	Нормальные значения λ (графа Б)	Расчетные значения λ , приведенные в графе Б, следует повышать на 10% для наружных ограждающих конструкций, выполняемых из медленно высыхающих материалов
Влажный; φ от 61 до 75%	Нормальные значения λ (графа Б)		
Мокрый 75%			

* Наружными ограждающими конструкциями, выполняемыми из медленно высыхающих материалов, являются, например, стены сплошной кладки из силикатного кирпича или блоков, шлакобетона, гипсобетона, золобетона, газозолобетона, газосиликата, перлитобетона, керамзитобетона с объемным весом более 1200 кг/м^3 и т. д.

Теплоёмкость

– это свойство материалов поглощать тепло при повышении температуры. Показателем теплоёмкости является удельная теплоёмкость материала c [Дж / (кг·К)].

Для строительных материалов c измеряется в пределах от 756 (для минеральной ваты) до 2520 (для дерева). Наибольшей удельной теплоёмкостью обладает вода 4200.

Сталь имеет 483 Дж/(кг·К)

Удельная теплоемкость c , Дж / (кг·К)
характеризует свойство материала поглощать тепло
при повышении температуры

$c = Q / (m \cdot \Delta t)$ – количество тепла, необходимое
для повышения температуры на 1 градус
массы вещества в 1 кг

Удельная теплоемкость воды $c = 4200$, Дж / (кг·К)

$c = (c_0 + 0,01\omega_B) / (1 + 0,01\omega_B)$ – удельная теплоемкость
при влажности ω_B

c_0 – удельная теплоемкость в сухом состоянии

Коэффициент излучения

характеризует способность материала излучать тепло

$$C = Q / ((T_1/100)^4 S \theta) \quad \text{Вт} / (\text{м}^2 \text{ К}^4)$$

— количество тепла излучаемого

1 м² поверхности материала за 1 с в пустоту

при абсолютной температуре поверхности 100 К

Коэффициент излучения

- Асбестовый картон 5,5 Вт/(м²К⁴)
- Кровельная сталь 3,9
- Бетон 3,5
- Полированная сталь 1,4
- **Алюминий 0,26**

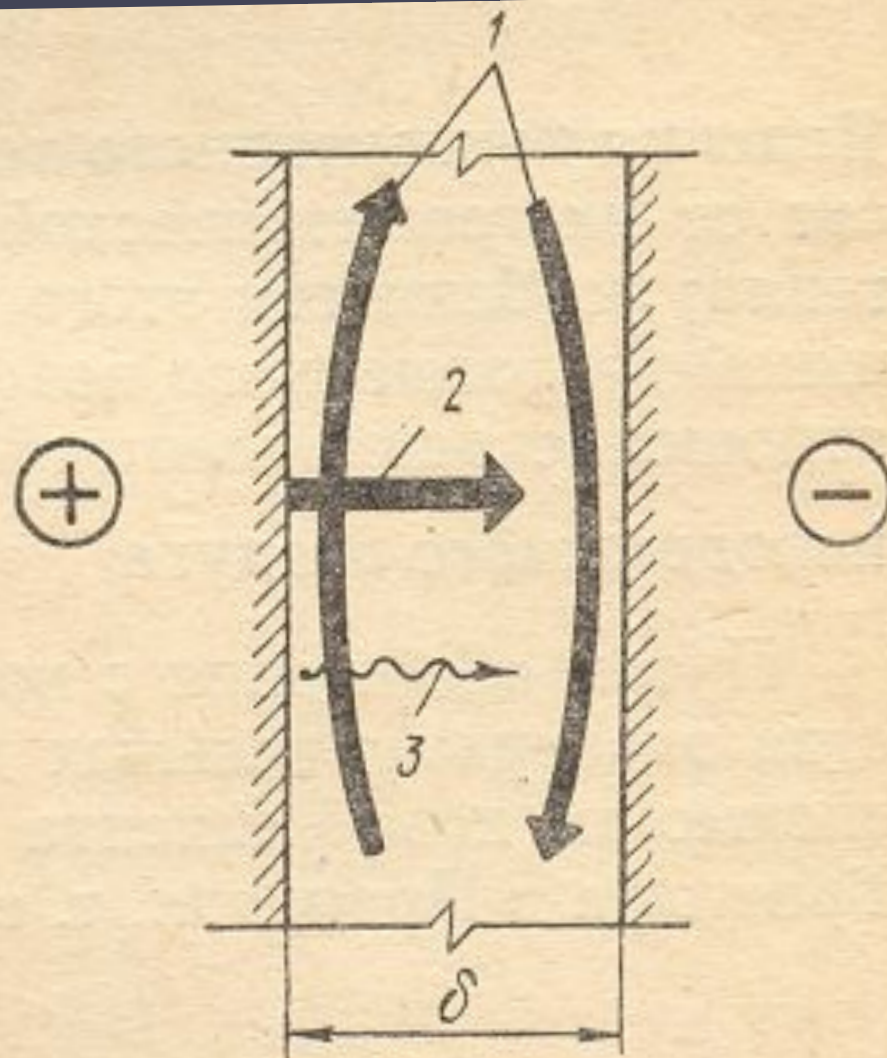


Рис. I.12. Схема передачи тепла через воздушную прослойку:
1 — путем конвекции; 2 — путем излучения; 3 — путем теплопроводности

- $q = q_T + q_K + q_L$
- $q_T = \lambda_1(\tau_1 - \tau_2) / \delta$
 λ_1 – коэффициент теплопроводности
неподвижного воздуха
- $q_K = \lambda_2(\tau_1 - \tau_2) / \delta$
 λ_2 – условный коэффициент передачи тепла
конвекцией
- $q_L = \alpha_L(\tau_1 - \tau_2)$
 α_L – коэффициент теплоотдачи излучением

$$q = q_T + q_K + q_L = (\lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_L \delta)(\tau_1 - \tau_2) / \delta$$

$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_L \delta$ — эквивалентный коэффициент
теплопроводности воздушной прослойки

$R_{\text{в п}} = \delta / \lambda_{\text{экв}}$ — термическое сопротивление
воздушной прослойки

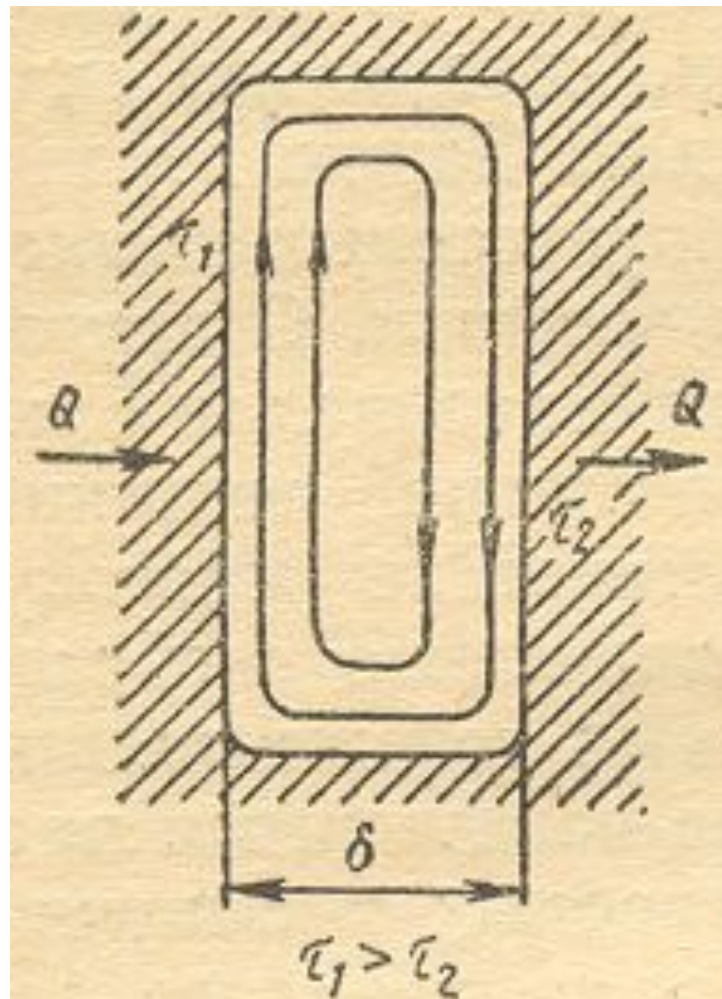


Рис. 19. Схема передачи тепла в воздушной прослойке

Таблица 6

Значения величин $\lambda_1 + \lambda_2$ при температуре воздуха 0°C для вертикальных воздушных прослоек в зависимости от толщины прослойки δ и разности температур на ее поверхностях $\tau_1 - \tau_2^*$

$\tau_1 - \tau_2$	Значения $\lambda_1 + \lambda_2$ при δ в см									
	1	2	3	5	7	10	12	15	20	25
1°	0,02	0,021	0,029	0,042	0,054	0,07	0,08	0,096	0,12	0,14
$2,5^\circ$	0,02	0,027	0,036	0,053	0,068	0,089	0,101	0,12	0,15	0,177
5°	0,021	0,032	0,043	0,063	0,081	0,106	0,121	0,143	0,178	0,207
10°	0,022	0,038	0,051	0,075	0,096	0,125	0,142	0,17	0,213	0,255
15°	0,024	0,042	0,056	0,083	0,106	0,138	0,158	0,188	0,236	0,276
20°	0,026	0,045	0,061	0,089	0,114	0,149	0,17	0,202	0,253	0,297
25°	0,028	0,048	0,064	0,094	0,121	0,157	0,18	0,214	0,268	0,314
30°	0,029	0,05	0,067	0,099	0,126	0,164	0,19	0,224	0,28	0,329

Для горизонтальных прослоек при потоке тепла снизу вверх приведенные значения $\lambda_1 + \lambda_2$ увеличивать на:

20%	40%	42%	43%	38%	26%	20%	13%	6%	3%
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----	----

Тепло, передаваемое излучением от более нагретой поверхности S_1 к поверхности S_2

$$Q = 5,67 \varepsilon_{\text{ПР}} S_1 \psi ((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4)$$

$\varepsilon_{\text{ПР}}$ — приведенный относительный коэффициент излучения при теплообмене между двумя серыми поверхностями

ψ — угловой коэффициент излучения

$$Q = 5,67 \varepsilon_{\text{ПР}} S_1 \psi ((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4)$$

$$q = 5,67 \varepsilon_{\text{ПР}} \psi ((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4)$$

$$((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4) = b (\tau_1 - \tau_2)$$

$$q = 5,67 \varepsilon_{\text{ПР}} \psi b (\tau_1 - \tau_2) = \alpha_{\text{л}} (\tau_1 - \tau_2)$$

$$b = 0,81 + 0,01 (\tau_1 + \tau_2) / 2$$

Таблица 7

Значения температурного коэффициента в зависимости от средней температуры воздушной прослойки

Средняя температура воздушной прослойки $\frac{t_1 + t_2}{2}$	+25°	+20°	+15°	+10°	+5	0°	-5°	-10°	-15°	-20°	-25°
Температурный коэффициент	1,06	1,01	0,96	0,91	0,86	0,81	0,77	0,73	0,69	0,65	0,61

$$q = q_T + q_K + q_L = (\lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_L \delta)(\tau_1 - \tau_2) / \delta$$

$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_L \delta$ — эквивалентный коэффициент
теплопроводности воздушной прослойки

$R_{\text{в п}} = \delta / \lambda_{\text{экв}}$ — термическое сопротивление
воздушной прослойки

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАМКНУТЫХ ВОЗДУШНЫХ ПРОСЛОЕК

Толщина воздушной прослойки, м	Термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки $R_{в.п.}$, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$			
	горизонтальной при потоке тепла снизу вверх и вертикальной		горизонтальной при потоке тепла сверху вниз	
	при температуре воздуха в прослойке			
	положи- тельной	отрица- тельной	положи- тельной	отрица- тельной
0,01	0,13	0,15	0,14	0,15
0,02	0,14	0,15	0,15	0,19
0,03	0,14	0,16	0,16	0,21
0,05	0,14	0,17	0,17	0,22
0,1	0,15	0,18	0,18	0,23
0,15	0,15	0,18	0,19	0,24
0,2—0,3	0,15	0,19	0,19	0,24

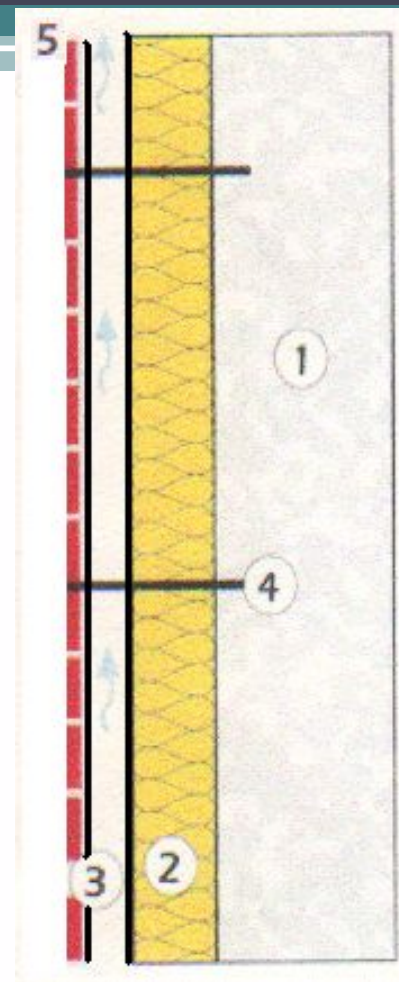
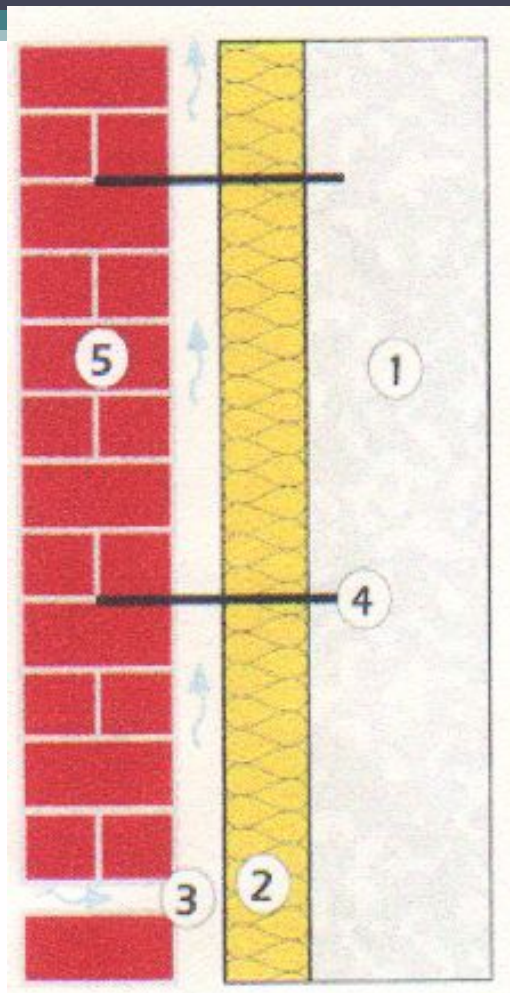
Примечание. При оклейке одной или обеих поверхностей воздушной прослойки алюминиевой фольгой термическое сопротивление следует увеличивать в 2 раза.

Таблица 9

Количество тепла, проходящего через вертикальные воздушные прослойки, при разности температур на их поверхностях 5°

Толщина прослойки δ , см	Количество тепла Q , ккал/м ² ·ч	Количество тепла в % передаваемого			Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{э}}$, ккал/м·ч·град
		теплопроводностью	конвекцией	излучением	
1	26,5	38	2	60	0,053
5	22,3	9	19	72	0,223
10	21,3	5	20	75	0,426
20	20,5	2	19	79	0,818

Примечание. Приведенные в таблице величины соответствуют температуре воздуха в прослойке, равной 0°C , и коэффициентам излучения ее поверхностей $C=4,4$.



- 1 – несущая стена (ж/б, кирпич)
- 2 – утеплитель плитный с защитной дышащей пленкой
- 3 – вентилируемая воздушная прослойка ~ 50 мм
- 4 – связи или подобилицовочная конструкция
- 5 – наружный облицовочный кирпич или фасадный лист

