

Опубликовано SECLIFE - Ваш гид в области безопасности, информационный портал по безопасности (<http://www.seclife.ru>)

[Главная](#) > [Новости](#) > ООО "Технологический институт "ВЕМО" стало лауреатом Всероссийской премии "Предприятие года" 2011 г.

## ООО "Технологический институт "ВЕМО" стало лауреатом Всероссийской премии "Предприятие года" 2011 г.



[1]

ООО «Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО» (г. Москва) стало лауреатом Всероссийской премии «Предприятие года» 2011 г.

ООО «Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО» (г. Москва) стало лауреатом Всероссийской премии «Предприятие года» 2011 г. Более подробно с работой института можно познакомиться на сайте [www.wemo.ru](http://www.wemo.ru) [2].

Цель Премии - отметить достижения предприятий и организаций, успешно работающих в различных областях экономики, сочетающих в себе устойчивое положение на рынке, интенсивное развитие, информационную открытость, а также содействовать повышению их репутации и конкурентоспособности на российском рынке.

Всероссийская Премия «Предприятие года» учреждена в 2006 году.

Организатором VI Торжественной церемонии награждения Всероссийской Премией «Предприятие года» в 2011 году выступили Межрегиональная Организация Предпринимателей, Международная Лига Производителей и Потребителей совместно с Русским Земельным Банком при поддержке Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации, Министерства регионального развития Российской Федерации и Межрегиональной ассоциации региональных энергетических комиссий.

УДК 697.133

# Время тепловой инерции и термическое сопротивление слоистых стен

**О. В. Коршунов,**

Объединённый институт высоких температур РАН,  
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

**В. И. Зуев,**

Технологический институт энергетических обследований,  
диагностики и неразрушающего контроля «Вемо», заведующий лабораторией

Выведены универсальные критерии квазистационарности теплообмена в слоистых стенах, применимые для анализа любого числа слоёв. Отличие от однородных стен выражается фактором слоистости, для которого получены несложные аналитические зависимости от теплотехнических характеристик материала слоёв. Этим же фактором определяется и время тепловой инерции слоистых стен, вычисленное для целого ряда характерных случаев. Даны объяснения выявленным особенностям теплопередачи в разных типах наружных ограждающих частей зданий.

**Ключевые слова:** слоистые стены, теплообмен, тепловая инерция, термическое сопротивление, квазистационарность.

Продолжая начатое исследование условий квазистационарности тепловых процессов [1, 2], происходящих в наружных стенах зданий, необходимо рассмотреть особенности теплопередачи слоистых стен, как наиболее часто встречающихся в строительных конструкциях.

Численный нестационарный метод тепловой диагностики таких стен, альтернативный нашему подходу, изложен в [3, 4].

Временные зависимости температур и тепловых потоков в двух-, трёхслойных (и более) стенах весьма сложны даже в аналитически разрешимых случаях. Соответственно, усложняются полученные критерии квазистационарности теплопередачи. Нельзя использовать и время тепловой инерции в том простом виде, как оно введено в [1, 2] для однородной стенки:

$$\tau_{и} = \pi^{-2} c \rho D R,$$

где  $c$  – теплоёмкость;

$\rho$  – плотность;

$R = D/\lambda$  – термическое сопротивление;

$D$  – толщина;

$\lambda$  – теплопроводность материала стены.

Однако в квазистационарном приближении, которое здесь и применимо, удаётся отыскать физически наглядные решения и для критериев квазистационарности, и для времени инерции многослойных стен. Тем самым квазистационарный подход [1, 2] к определению термического сопротивления наружных стен распространяется на любое число слоёв. Этой задаче посвящена данная статья.

## Двухслойная стенка

Рассмотрим вначале двухслойные ограждающие конструкции. Решение ищем, как и в [2], для одного изменяющегося во времени граничного условия (наружной температуры стены).

Для первого (внутреннего) слоя:

$$T = T_{в} - \Delta T_1 z / D_1;$$

$$dT/dt = (dT_{г}/dt) z / D_1. \quad (1)$$

Для второго (внешнего) слоя:

$$T = T_{г} - \Delta T_2 \Delta z / D_2.$$

$$dT/dt = (dT_{н}/dt) \Delta z / D_2 + (dT_{г}/dt) (D_2 - \Delta z) / D_2. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta T_1 = T_{в} - T_{г}$ ;

$\Delta T_2 = T_{г} - T_{н}$ ;

$T_{в}$ ,  $T_{г}$ ,  $T_{н}$  – температуры поверхностей стенки внутренней, граничной (между слоями) и наружной, соответственно.

Изменением внутренней температуры пренебрегаем ( $dT_{в}/dt \approx 0$ ).

В квазистационарном состоянии тепловой поток равен:

$$q = \Delta T_1 / R_1 = \Delta T_2 / R_2,$$

где  $R_1 = D_1/\lambda_1$ ,  $R_2 = D_2/\lambda_2$  – термические сопротивления слоёв;

$R = R_1 + R_2$  – термическое сопротивление всей стены.

Окончательно для однослойной стенки:

$$Rq = \Delta T + \gamma T_n(t) \tau_{ин} S_2 / 0,6. \quad (3)$$

Фактор двухслойности  $S_2$  при данном расположении слоёв определяется выражением:

$$S_2 = [D_1^3 + 3D_2 D_1^2 + c_2 \rho_2 D_2^2 (3D_1 + \lambda_1 D_2 / \lambda_2) / c_1 \rho_1] D^{-3}. \quad (4)$$

Время  $\tau_{ин}$  – это время инерции однородной стены толщиной  $D$  с параметрами первого слоя:

$$\tau_{ин} = c_1 \rho_1 D^2 / \pi^2 \lambda_1, \quad (5)$$

так что произведение  $\tau_{ин} S_2$  является эффективным временем инерции двухслойной стены, определяющим временные масштабы температурных изменений, квазистационарных по отношению к теплопередаче через данное ограждение.

Таким образом, для двухслойных стен все полученные в [2] временные критерии следует использовать с учётом фактора  $S_2$ , подразумевая под временем тепловой инерции величину:

$$\tau_{ин} = \tau_{ин} S_2. \quad (6)$$

Понятно, что для однослойной стенки  $S_2 = 1$ .

В случае, если толщину и тепловую инерцию стенки определяет не первый, а второй слой, в выражении (5) индексы «1» следует заменить на индексы «2», а для фактора двухслойности использовать следующее выражение:

$$S_2' = [D_2^3 + 3D_1 D_2^2 \lambda_2 / \lambda_1 + c_1 \rho_1 \lambda_2 D_1^2 (D_1 + 3D_2) / c_2 \rho_2 \lambda_1] D^{-3}. \quad (7)$$

Итак, искомые критерии найдены. Оценим  $S_2$  и  $\tau_{ин}$  в двух случаях, характерных для современного гражданского домостроительства.

1. Керамзитобетонная стена ( $D_1 = 40$  см), облицованная кирпичом ( $D_2 = 13$  см).

Для керамзитобетонных блоков:  $c_1 = 0,84$  кДж/кг·К,  $\rho_1 = 1200$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_1 = 0,47$  Вт/м·К; для силикатного кирпича:  $c_2 = c_1$ ,  $\rho_2 = 1900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_2 = 0,87$  Вт/м·К [6, 7].

В этом случае  $\tau_{ин} = 18$  ч, а  $S = 1,08$ . Отличие от сплошной керамзитобетонной стены толщиной 53 см всего 8%. Если кирпич щелевой ( $c_2 = c_1$ ,  $\rho_2 = 1400$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_2 = 0,64$  Вт/м·К [6, 7]), то  $\tau_{ин} = 17$  ч, а  $S = 1,02$ , т. е. отличие ещё меньше.

Таким образом, для рассматриваемого типа стен двухслойность не обязательно учитывать при оценках временной релаксации теплопередачи.

2. Керамзитобетонная стена ( $D_1 = 30$  см) с внешним пенополистироловым утеплением ( $D_2 = 15$  см). Величины  $c_1, \rho_1, \lambda_1$  те же, что и в предыдущем случае. Параметры второго слоя:  $c_2 = 1,47$  кДж/кг·К,  $\rho_2 = 30$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_2 = 0,05$  Вт/м·К [6, 7].

Тепловая инерционность меньше, чем в предыдущем случае:  $\tau_{ин} = 9$  ч. Для  $S$  получаем неожиданную величину:  $S = 0,77 < 1$ , т. е. второй слой слабо инерционен и временные характеристики нестационарной теплопередачи полностью определяет бетонная основа стены. Условия квазистационарности даже смягчаются.

Это обусловлено малой плотностью утеплителя и его низкой теплопроводностью. В нём гораздо быстрее, чем в бетонной основе, происходит релаксация температуры и содержится основной её перепад  $\Delta T$ .

Теперь поменяем слои местами, воспользовавшись на этот раз для вычисления фактора  $S$  выражением (7), поскольку керамзитобетонный слой становится наружным. Результаты расчёта настолько сильно отличаются от предыдущих, что приходится говорить о такой стенке, как о своеобразном клапане или диоде, пропускающем тепловые импульсы только в одну сторону. Действительно, фактор двухслойности резко возрастает:  $S' = 4,6$ , и время инерции оказывается равным:  $\tau_{ин} = 55$  ч. Это ровно в 6 раз больше, чем при обратном расположении слоёв (напомним, что мы рассматриваем только колебания наружной температуры).

Данное явление тоже объясняется низкой теплопроводностью утеплителя, только на этот раз в бетонной основе, ставшей наружным слоем стены, происходят значительные изменения температуры (тогда как в предыдущем случае изменение температуры на внутреннем бетонном слое составляло небольшую долю наружных изменений). При этом в уравнении (7) существует лишь второй член в квадратных скобках, так что время тепловой инерции при данных толщинах слоёв приблизительно равно:

$$\tau_{ин} = c_2 \rho_2 D_2^2 / \lambda_1 \pi^2.$$

Видно, что оно определяется параметрами второго инертного слоя за исключением теплопроводности, которая соответствует первому теплоизоляционному слою. Такая комбинация параметров и приводит к значениям  $\tau_{ин}$ , намного превышающим найденные для обратного расположения слоёв.

Рассматриваемый тип стен, в отличие от предыдущего (с внешней облицовкой), требует учёта слоистости стены и даже порядка расположения слоёв.

### Многослойная стенка

Рассмотрим особенности теплопередачи в многослойных ограждающих конструкциях зданий.

$$Rq = \Delta T \gamma_n + T_n(t) \tau_{ин} S_n / 0,6. \quad (8)$$

Фактор слоистости здесь определяется выражением

$$S_n = \left\{ 3DD_1^2 - 2D_1^3 + \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1} \sum_{i=2}^n c_i \rho_i D_i^2 \times \left[ \frac{\Delta D_i}{\lambda_i} + \left( 1 + 2 \frac{\Delta D_i}{D_i} \right) \left( 3 \sum_{j=1}^{i-1} \frac{D_j}{\lambda_j} + \frac{D_1}{\lambda_1} \right) \right] \right\} D^{-3}, \quad (9)$$

где  $\Delta D_i = \sum_{j=i+1}^n D_j$ .

Правая часть уравнения (8), как и выше для одно- и двухслойной стенок, стремится к  $\Delta T$  при  $T_n' \rightarrow 0$  (квазистационарное состояние).

В случае если толщину и тепловую инерцию стенки определяет не первый, а *i*-й слой, в выражении (5) индексы «1» следует заменить на индексы «*i*», а для фактора многослойности использовать следующее выражение:

$$S_n = S_n c_{p1} \lambda_i / c_i \rho_i \lambda_1,$$

где  $S_n$  определяется по-прежнему выражением (9).

Проведём численные оценки для комбинированной панельной стенки, содержащей от 3 до 5 разных слоев. Инвариантами системы примем общую толщину стенки  $D=45$  см и внутренний слой из керамзитобетонных блоков толщиной  $D_1=20$  см. Вторым или третьим слоем будет утеплитель пенополистирол толщиной 10 см. Их характеристики приведены выше.

1. Трёхслойная стенка.

Второй слой – пенополистирол, третий – оштукатуренный кирпич ( $D_3=15$  см,  $c_3=0,84$  кДж/кг·К,  $\rho_3=1800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_3=0,87$  Вт/м·К [6, 7]).

Фактор слоистости рассчитывается по формуле (9):  $S_3=1,3$ , а время инерции – по формуле (6):  $\tau_{и}=16$  ч.

2. Трёхслойная стенка.

Третий слой – железобетон ( $D_3$  и  $c_3$  те же,  $\rho_3=2500$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_3=1,9$  Вт/м·К [6, 7]). В этом случае  $S_3=2,2$ ,  $\tau_{и}=26$  ч.

3. Четырёхслойная стенка.

Отличается от предыдущей наличием воздушной прослойки  $D_3=2$  см в качестве третьего слоя. На эту же величину уменьшается толщина железобетона:  $D_3=13$  см.

В формуле (9) пренебрегаем членом с множителем  $c_3\rho_3$  в силу его малости ( $\rho_3 \sim 1$  кг/м<sup>3</sup>). Эффективную теплопроводность неventилируемой воздушной прослойки, анализируя данные [6, 7], примем равной:  $\lambda_3=0,04$  Вт/м·К. (Это среднее значение. Минимальное значение определяется собствен-

но теплопроводностью и равно:  $\lambda_3=0,023$  Вт/м·К. Конвекция и тепловое излучение повышают её для рассматриваемых толщин ~2 см до 0,025–0,06 Вт/м·К).

Для такой стенки получаем:  $S_4=2$ ,  $\tau_{и}=24$  ч.

4. Четырёхслойная стенка.

Третий слой – раствор или лёгкий бетон ( $D_3=10$  см,  $c_3=0,84$  кДж/кг·К,  $\rho_3=1800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_3=0,93$  Вт/м·К), четвёртый – облицовочный камень типа известняка ( $D_4=5$  см,  $c_4=0,92$  кДж/кг·К,  $\rho_4=\rho_3$ ,  $\lambda_4=1$  Вт/м·К) [6, 7]. В этом случае  $S_4=1,7$ ,  $\tau_{и}=21$  ч.

5. Пятислойная стенка.

Второй слой – раствор или лёгкий бетон (см. третий слой в предыдущем случае), третий слой – пенополистирол, четвёртый слой – воздух ( $D_4=2$  см), пятый – облицовочный камень типа известняка ( $D_5=3$  см, четвёртый слой как и в предыдущем случае).

Пренебрегаем как и в п. 3 членом с множителем  $c_4\rho_4$  и принимаем теплопроводность воздушной прослойки равной:  $\lambda_4=0,04$  Вт/м·К.

Эта стенка отличается от предыдущих:  $S_5=0,94 < 1$ ,  $\tau_{и}=11$  ч (сравн. с 2-слойной стенкой с наружным утеплением:  $S_2=0,77 < 1$ ,  $\tau_{и}=9$  ч).

Сравнивая полученные результаты, видим, что при одном и том же утеплителе и сохранении внутреннего керамзитобетонного слоя в стенах равной толщины расположение слоев и их выбор дают разброс тепловой инерции в 2,5 раза. В первом и последнем из рассмотренных случаев фактор слоистости ~1 и временные характеристики мало отличаются от характеристик однослойной керамзитобетонной стенки толщиной 45 см ( $\tau_{и}=12$  ч). В трех остальных случаях фактор слоистости ~2, т. е. квазистационарность устанавливается вдвое медленнее. Причиной этого являются инерционные внешние слои, состоящие из плотных теплоемких веществ.

В табл. 1 приведены временные характеристики всех видов стен, рассмотренных в данной статье.

Таблица 1

Время тепловой инерции слоистых стен

Число слоёв	Перечень слоёв	Толщина слоёв, см	Фактор слоистости $S_n$	Время инерции $\tau_{и}$ , ч
1	Керамзитобетон	53	1	17
2	Керамзитобетон	40	1,08	18
	Кирпич силикатный	13		
2	Керамзитобетон	40	1,02	17
	Кирпич щелевой	13		
1	Керамзитобетон	45	1	12
2	Керамзитобетон	30	0,77	9
	Пенополистирол	15		
2	Пенополистирол	15	4,6	55
	Керамзитобетон	30		
3	Керамзитобетон	20	1,3	16
	Пенополистирол	10		
	Кирпич и штукатурка	15		
3	Керамзитобетон	20	2,2	26
	Пенополистирол	10		
	Железобетон	15		

Число слоёв	Перечень слоёв	Толщина слоёв, см	Фактор слоистости $S_n$	Время инерции $\tau_{и}$ , ч
4	Керамзитобетон	20	2,0	24
	Пенополистирол	10		
	Воздух	2		
	Жслзобетон	13		
4	Керамзитобетон	20	1,75	21
	Пенополистирол	10		
	Лёгкий бетон	10		
	Камень известняк	5		
5	Керамзитобетон	20	0,94	11
	Лёгкий бетон	10		
	Пенополистирол	10		
	Камень известняк	3		

**Примечание.** Нумерация слоёв начинается изнутри помещения

### Заключение

Таким образом, критерии квазистационарности теплообмена в однослойных стенах пригодны для любого числа слоёв, если учитывать выведенный здесь фактор слоистости  $S_n$ , имеющий несложную

аналитическую зависимость от теплотехнических характеристик материала слоёв. Этим же фактором определяется и время тепловой инерции слоистых стен  $\tau_{и}$ . Анализ величин фактора слоистости и времени тепловой инерции, вычисленных для разных типов многослойных стен, выявляет ряд особенностей теплообмена в наружных ограждающих частях зданий.

## Литература

1. Коршунов О. В., Зуев О. В. Измерения термического сопротивления наружных стен зданий // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2011. – № 2. – С. 40–45.
2. Коршунов О. В., Зуев В. И. Применимость квазистационарного метода определения термического сопротивления стен // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2011. – № 3. – С. 27–34.
3. Лебедев О. В., Будадин О. Н., Баранов С. В., Авраменко В. Г. Тепловая дефектometрия многослойных изделий на основе решения обратных задач нестационарной теплопроводности // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 6. – С. 16–23.
4. Будадин О. Н., Лебедев О. В., Авраменко В. Г., Киржанов Д. В., Ким-Серебряков Д. В. Метод теплового контроля с использованием быстрого преобразования Фурье // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 6. – С. 23–30.
5. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Введ. пост. Гос. ком. СССР по делам строительства 2.08.84, № 127, М., 1985.
6. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. 5-е изд. – АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
7. Свод правил СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. М., 2004. Рекомендован в качестве нормативного документа Госстроем России 26.03.04.

### The thermal inertia and thermal resistance of the layered wall

**O. V. Korshunov,**

*Ph. D., Senior Researcher,*

*Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences*

**V. I. Zuev,**

*Head of Laboratory of the Technological Institute of Energy survey, diagnosis and nondestructive testing «Vemo»*

*We derive the universal criteria for quasi-steady heat transfer in layered walls that are applicable to the analysis of any number of layers. A difference from homogeneous walls is expressed by the layering factor, for which the simple analytical dependences on thermal characteristics of the layers material are obtained. The same factor is for the thermal inertia time of the layered walls, calculated for a number of typical cases. Explaining to the revealed features of heat transfer in different types of non-load-bearing outsides of building is given.*

**Keywords:** layered wall, heat transfer, thermal inertia, thermal resistance, quasi-stationary.

# ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

2011 **4**

июль -  
август



Методология экспресс-оценки потенциала энергосбережения муниципального образования (региона)

(стр. 9)



Эффективность ветро-дизельной электрической станции

(стр. 16)

Об утверждении правил осуществления государственного контроля за соблюдением требований законодательства об энергосбережении  
(стр. 49)