



УДК 536.2 (075) 46

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СТЕН ЗДАНИЙ С УЧЁТОМ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ВНУТРЕННИХ И НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

**Хикмаев Эмиль Римович**

Магистрант

Кафедра Теоретические основы теплотехники и гидромеханики

Самарский государственный технический университет

[xaker0282@gmail.com](mailto:xaker0282@gmail.com)

**Гладышева Екатерина Витальевна**

Магистрант

Кафедра Теоретические основы теплотехники и гидромеханики

Самарский государственный технический университет

[katerinagladysheva77@gmail.com](mailto:katerinagladysheva77@gmail.com)

**Трошин Михаил Михайлович**

Магистрант

Кафедра Теоретические основы теплотехники и гидромеханики

Самарский государственный технический университет

[troshinmihail@mail.ru](mailto:troshinmihail@mail.ru)

**Фролов Сергей Алексеевич**

Магистрант

Кафедра Теоретические основы теплотехники и гидромеханики

Самарский государственный технический университет

[Frolov.sergej.98@mail.ru](mailto:Frolov.sergej.98@mail.ru)

### Аннотация

---

Выполнены расчёты температурного состояния двуслойной стенки здания (кирпичная кладка – слой тепловой изоляция) для различных температур окружающей среды. Рассмотрены два варианта: тепловая изоляция на наружной и на внутренней поверхности стенки. Показано, что максимальные градиенты температур наблюдаются в

слое тепловой изоляции. В связи с чем, наложение изоляции на внутренней поверхности стенки при пониженных температурах окружающей среды приводят к температурам внутренних поверхностей стен зданий, ниже температуры точки росы и, следовательно, к отложению на этих поверхностях водяных паров. В результате в зимнее время может наблюдаться промерзание стен и появление грибков на их внутренних поверхностях, что приводит к ухудшению их прочностных характеристик. Показано, что при наложении тепловой изоляции на наружных поверхностях стен указанные эффекты не наблюдаются.

---

**Ключевые слова:** стационарная теплопроводность; двухслойная стенка; аналитическое решение; неоднородные граничные условия третьего рода, температура точки росы.

---

## **STUDY OF TEMPERATURE STATE OF WALLS BUILDINGSs WITH THERMAL INSULATION ON INTERNAL AND EXTERNAL SURFACES**

### **Emil R. Khikmaev**

Undergraduate

Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering and Hydromechanics

Samara State Technical University

[xaker0282@gmail.com](mailto:xaker0282@gmail.com)

### **Ekaterina V. Gladysheva**

Undergraduate

Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering and Hydromechanics

Samara State Technical University

[katerinagladysheva77@gmail.com](mailto:katerinagladysheva77@gmail.com)

### **Mikhail M. Troshin**

Undergraduate

Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering and Hydromechanics

Samara State Technical University

[troshinmihail@mail.ru](mailto:troshinmihail@mail.ru)

### **Sergei A. Frolov**

Undergraduate

Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering and Hydromechanics

Samara State Technical University

[Frolov.sergej.98@mail.ru](mailto:Frolov.sergej.98@mail.ru)

## ABSTRACT

Calculations of the temperature state of a two-layer building wall (brickwork - thermal insulation layer) for various ambient temperatures have been carried out. Two options are considered: thermal insulation on the outer and on the inner surface of the wall. It is shown that the maximum temperature gradients are observed in the thermal insulation layer. In this connection, the imposition of insulation on the inner surface of the wall at low ambient temperatures leads to temperatures of the inner surfaces of the walls of buildings below the dew point temperature and, consequently, to the deposition of water vapor on these surfaces. As a result, in winter, freezing of the walls and the appearance of fungi on their inner surfaces can be observed, which leads to a deterioration in their strength characteristics. It is shown that when thermal insulation is applied on the outer surfaces of the walls, these effects are not observed.

**Keywords:** stationary thermal conductivity; two-layer wall; analytical solution; inhomogeneous boundary conditions of the third kind; dew point temperature.

**Введение.**

Температура наружных поверхностей стен зданий в летнее время, ввиду нагрева стен не только от окружающего воздуха, но и от солнечного излучения, может достигать величин, превышающих  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При такой температуре наружных поверхностей температура внутренних поверхностей может принимать значения, превышающие  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В зимнее время при температурах окружающего воздуха, меньших  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура внутренних поверхностей стенок может оказаться, меньшей температуры точки росы. В связи с чем, на стенках будут отлагаться водяные пары, что может приводить к промерзанию стен и к появлению на их внутренних поверхностях грибков. Все эти факторы приводят к ухудшению экологической ситуации и к уменьшению срока службы конструкции [1 – 4].

Указанные проблемы могут быть решены путём наложения на поверхности стен тепловой изоляции. В настоящей работе выполнены исследования температурного состояния двухслойной стенки здания при наложении слоя тепловой изоляции на её наружной и внутренней поверхности.

Решим стационарную задачу теплопроводности для двухслойной стенки (кирпичная кладка – тепловая изоляция), используя уравнение теплопроводности с переменным по пространственной координате коэффициентом, что позволит получить точное аналитическое решение задачи при несимметричных граничных условиях третьего рода.

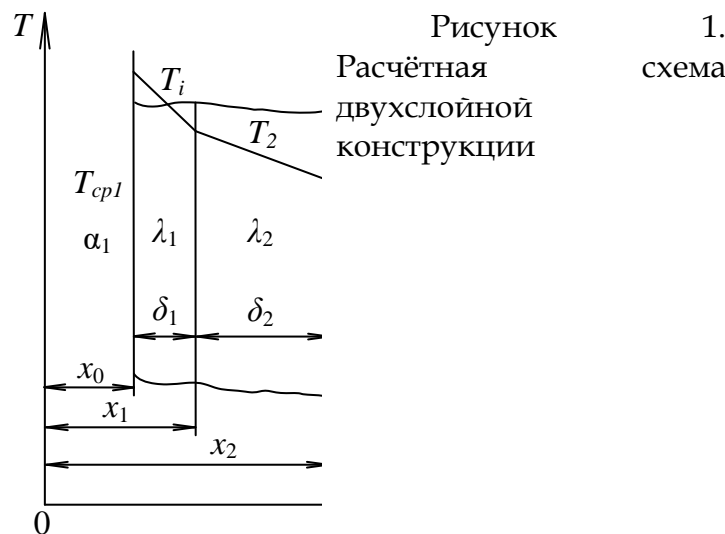
Математическая постановка задачи в данном случае имеет вид

$$\frac{d}{dx} \left[ \lambda(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right] = 0 \quad ; \quad (1)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T(x_0)}{\partial x} = \alpha_1 [T(x_0) - T_{cp1}] \quad ; \quad (2)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T(x_2)}{\partial x} = \alpha_2 [T_{cp2} - T(x_2)] \quad (3)$$

где  $T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $x$  – координата,  $\text{м}$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $T_{cp1}, T_{cp2}$  – температуры среды с внутренней и наружной поверхностей стен,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda(x) = \lambda + (\lambda_2 - \lambda_1)H(x - x_1)$ ;  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности слоёв,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $H(x - x_1) = 0$  при  $x < x_1$ ;  $H(x - x_1) = 1$  при  $x \geq x_1$ ;  $H(x - x_1)$  – симметричная единичная функция (функция Хевисайда).



Решение задачи (1) – (3) было получено нами в виде

$$T(x) = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \lambda_1 (T_{cp2} - T_{cp1})}{B + \alpha_1 \lambda_1} \left[ \frac{x - x_0}{\lambda_1} + \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) H(x - x_1) \right] \times (T_{cp1} B - T_{cp2} \alpha_2 \lambda_1) / (B + \alpha_2 \lambda_1) \quad (4)$$

$$B = \alpha_1 \lambda_1 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) [\lambda_2 + \alpha_2 (x_2 - x_1)] + \alpha_1 \alpha_2 (x_2 - x_0) + \alpha_1 \lambda_2$$

где

Результаты расчётов по формуле (4) даны на рис. 2.

Исходные данные для решения задачи были следующие:  $\delta_{из}$  – толщина изоляции,  $\text{м}$  ( $\delta_2$  на рис. 2а и  $\delta_1$  на рис. 2б) в обоих случаях принималась равной:  $\delta_{из} = 0,1 \text{ м}$ ;  $\lambda_{из} = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\lambda_{ст}$  ( $\lambda_1$  на рис. 2а и  $\lambda_2$  на рис. 2б) принимался равным:  $0,73 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $T_{cp1} = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_1 = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\alpha_2 = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Расчеты выполнялись для следующих температур окружающей среды:  $T_{cp2} = -40^{\circ}\text{C}$ ;  $-30^{\circ}\text{C}$ ;  $-20^{\circ}\text{C}$ ;  $-10^{\circ}\text{C}$ ;  $0^{\circ}\text{C}$ ;  $10^{\circ}\text{C}$ ;  $20^{\circ}\text{C}$ ;  $30^{\circ}\text{C}$ ;  $40^{\circ}\text{C}$ .

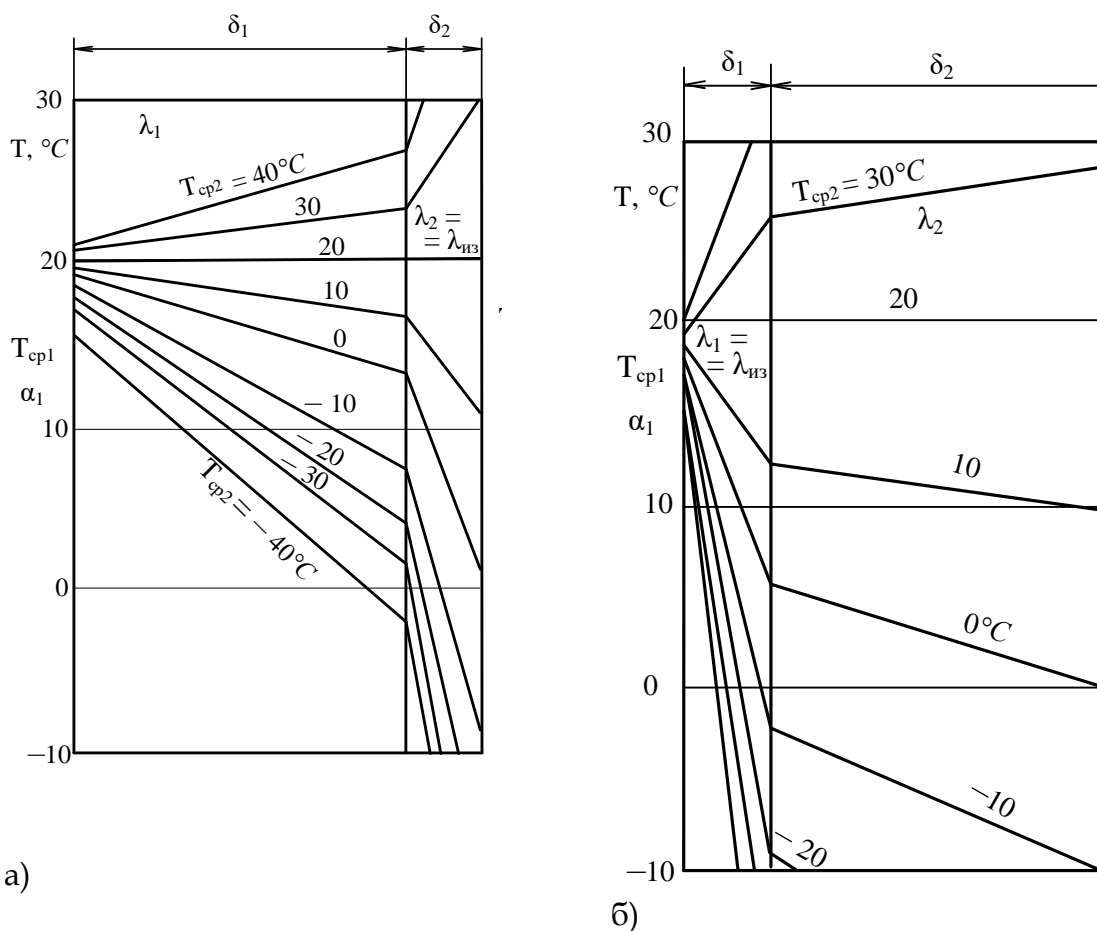


Рисунок 2. Распределение температуры в двухслойной стенке (кирпичная кладка – слой тепловой изоляции). а) изоляция на наружной поверхности; б) изоляция на внутренней поверхности

Результаты расчетов для варианта со слоем изоляции снаружи зданий даны на рис. 2а и табл. 1.

Таблица 1 (Распределение температуры в двухслойной стенке с изоляцией на наружной поверхности)

$T_{cp2}$				20	10		-10	-20	-30	-40
, °C				20	11		-9	-18	-28	-37
$T(x_2)$				20	19,5		18,5	18	17,5	16
, °C				20	17		7	4	2	2,5
$T(x_1)$										
, °C										

Анализ этих результатов позволяет заключить, что максимальные температурные градиенты наблюдаются в слое изоляции. Стены зданий в этом случае находятся в условиях

незначительных температурных градиентов и, в частности, температура внутренней поверхности стенки (со стороны жилых помещений) изменяется в пределах от  $T_{\text{п}} = T(0) = 16^{\circ}\text{C}$  (при температуре окружающей среды  $T_{\text{ср}2} = -40^{\circ}\text{C}$ ) до  $T_{\text{п}} = T(0) = 22^{\circ}\text{C}$  (при  $T_{\text{ср}2} = 40^{\circ}\text{C}$ ). Такие температурные условия внутренней поверхности стенки являются благоприятными ввиду того, что диапазон изменения температуры невелик, также как невелики значения максимальной ( $22^{\circ}\text{C}$ ) и минимальной ( $16^{\circ}\text{C}$ ) температур. Следовательно, тепловая изоляция зданий с их наружной стороны позволяет создавать наиболее благоприятные условия проживания во внутренних помещениях. При этом вероятность выпадения влаги на внутренних поверхностях стенок минимальна, так как их температура ( $16^{\circ}\text{C}$ ) даже при самой низкой температуре окружающей среды ( $-40^{\circ}\text{C}$ ) не достигает температуры точки росы, при которой происходит конденсация влаги, содержащейся в жилых помещениях зданий. Следует, к тому же, отметить, что при незначительных градиентах температур в стенах зданий незначительными будут и температурные напряжения в основной кладке. При этом вероятность появления трещин уменьшается, а срок службы возрастает.

Результаты расчетов для варианта со слоем изоляции, наложенной на стены во внутренних помещениях зданий, даны на рис. 2б и в таблице 2. Их анализ позволяет заключить о том, что диапазон изменения температуры в кирпичной кладке в данном случае значительно возрастает.

Таблица 2(Распределение температуры в двуслойной стенке с изоляцией на внутренней поверхности)

$T_{\text{ср}2}$ , $^{\circ}\text{C}$				20	10		-10	-20	-30	40
$T(x_2)$ , $^{\circ}\text{C}$				20	11		-9	-19	-28	38
$T(x_1)$ , $^{\circ}\text{C}$				20	13		-1	-8	-13	21
$T(0)$ , $^{\circ}\text{C}$				20	19		17	16	15	14

И, в частности, температура наружной стенки изменяется от  $T(x_2) = 39^{\circ}\text{C}$  (при температуре окружающей среды  $T_{\text{ср}2} = 40^{\circ}\text{C}$ ) до  $T(x_2) = -38^{\circ}\text{C}$  (при  $T_{\text{ср}2} = -40^{\circ}\text{C}$ ). Следует особо отметить наличие большого диапазона изменения температуры внутренней поверхности кирпичной кладки (со стороны жилых помещений) в зависимости от изменения температуры окружающей среды. Так, температура внутренней поверхности стенки, находящейся под слоем изоляции, изменяется от  $T(x_1) = 33^{\circ}\text{C}$  (при  $T_{\text{ср}2} = 40^{\circ}\text{C}$ ) до  $T(x_1) = -21^{\circ}\text{C}$  (при  $T_{\text{ср}2} = -40^{\circ}\text{C}$ ). Такие температурные условия являются неблагоприятными для кирпичной кладки, в связи с тем, что влага, диффундирующая через изоляционный слой внутренних помещений, ввиду низкой температуры стенки (ниже

температуры точки росы) будет конденсироваться на стенке, которая в течение продолжительного периода времени года будет находиться во влажном состоянии. Более того, уже при температуре наружного воздуха  $T_{cp2} \leq -10^\circ\text{C}$  стенка будет промерзать, так как ее температура  $T(x_1)$  будет отрицательной (см. табл. 2 и рис. 2б).

#### **Выводы.**

1. Используя асимметричную единичную функцию (функцию Хевисайда), получено точное аналитическое решение стационарной задачи теплопроводности для двухслойной стенки (кирпичная кладка – тепловая изоляция) при несимметричных граничных условиях третьего рода.

2. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что для исключения отложения водяных паров на внутренних поверхностях стенки тепловую изоляцию следует располагать на её наружной поверхности

#### **Благодарность.**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-70021.

#### **Список литературы.**

1. Кудинов В.А. Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях / В.А. Кудинов, Б.В. Аверин, Е.В. Стефанюк. – М.: Высшая школа, 2008. – 305 с.

2. Карташов Э.М. Теория тепломассопереноса: решение задач для многослойных конструкций / Э.М. Карташов, В.А. Кудинов, В.В. Калашников. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 435 с.

3. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – 2-е изд., стер. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

4. Одельский Э.Х. Теплотехнические и гидравлические расчёты современных систем отопления зданий полносборного строительства / Э.Х. Одельский. – Минск: «Вышэйшая школа», 1968. – 244 с.

#### **References.**

1. Kudinov V.A. Thermal conductivity and thermoelasticity in multilayer structures / V.A. Kudinov, B.V. Averin, E.V. Stefanyuk. – M.: Higher school, 2008. – 305 p.

2. Kartashov E.M. Theory of heat and mass transfer: solving problems for multilayer structures / E.M. Kartashov, V.A. Kudinov, V.V. Kalashnikov. – Moscow: Yurayt Publishing House, 2018. – 435 p.

3. Mikheev M.A. Basics of heat transfer / M.A. Mikheev, I.M. Mikheeva. – 2nd ed., Erased. – Moscow: Energiya, 1977. – 344 p.

4. Adelsky E.Kh. Heat engineering and hydraulic calculations of modern heating systems for prefabricated buildings / E.Kh. Adelsky. – Minsk: "Higher School", 1968. – 244 p.