

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**КАФЕДРА АРХИТЕКТУРЫ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**к выполнению курсовой работы**  
**«ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ЗДАНИЯ»**  
для студентов специальности  
1 – 69 01 01 «Архитектура»

**Брест 2023**

УДК 697.1

Методические указания содержат необходимые данные для проведения курсовой работы «Теплофизический расчёт здания» для студентов третьего курса специальности 1–69 01 01 «Архитектура».

В методических указаниях содержатся нормативные и справочные материалы для выполнения курсовой работы. Приведены примеры расчётов сопротивлений теплопередаче, паро- и воздухопроницанию ограждающих конструкций, построения в них одномерного температурного поля.

Составители: К. К. Глушко, к. т. н., старший преподаватель  
Д. В. Басова, ассистент  
А. П. Воробей, к. т. н., ассистент

Рецензенты: А. Б. Шурин, зав. кафедрой строительных конструкций БрГТУ,  
к. т. н., доцент  
И. Е. Демчук, зав. испытательной лабораторией филиала РУП  
«Институт БелНИИС», к. т. н.

## Оглавление

<b>1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....</b>	<b>4</b>
<b>2 СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....</b>	<b>5</b>
<b>3 ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ.....</b>	<b>5</b>
3.1 РАСЧЁТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ОДНОРОДНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАСЧЁТА .....	5
3.1.1 УПРОЩЁННЫЙ МЕТОД .....	7
3.1.2 ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПРАВОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ ЧЕРЕЗ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ.....	9
3.2 РАСЧЁТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ НЕОДНОРОДНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ. УПРОЩЁННЫЙ МЕТОД.....	14
<b>4 СОПРОТИВЛЕНИЕ ПАРОПРОНИЦАНИЮ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ.....</b>	<b>17</b>
<b>5 ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР И ВЛАЖНОСТЕЙ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ .....</b>	<b>20</b>
5.1 ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ БЕЗ УЧЁТА ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ .....	20
5.2 ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ.....	23
<b>6 СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЮ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ.....</b>	<b>26</b>
<b>7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ТОЛЩЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЁТОМ ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЯ .....</b>	<b>29</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>31</b>

## 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Курсовая работа предусматривает следующие расчёты ограждающих конструкций здания: теплотехнический расчёт и расчёты на паро- и воздухопроницаемость.

Настоящие методические указания разработаны для облегчения пользования студентами строительными нормами Республики Беларусь при выполнении курсовой работы, содержит теоретические сведения по выполнению инженерных расчётов на паро- и воздухопроницаемость, а также примеры их выполнения.

Тепловые потери зданий существенно зависят от сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций зданий и до настоящего времени составляют около трети затрачиваемых энергоресурсов Республики Беларусь. Задача поддержания заданного теплового режима помещений здания (поддержания на необходимом уровне температуры и влажности воздуха, его подвижности, радиационной температуры помещения) в основном выполняется инженерными системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. При этом определение тепловой мощности и режима работы этих систем невозможно без учета влияния теплозащитных и теплоинерционных свойств ограждений. Введённые в действие строительные нормы СП 2.04.01-2020 «Строительная теплотехника» и СН 2.04.02-2020 «Здания и сооружения. Энергетическая эффективность» направлены на решение указанной проблемы и содержат в себе более точные расчёты и наиболее полный перечень значений теплофизических характеристик применяемых в настоящее время строительных и конструкционных материалов.

Ограждающие конструкции зданий часто выполняют многослойными для повышения их теплозащитных качеств. При этом отдельные слои могут выполнять как отдельные функции, которые могут быть выполнены только ими, так и совмещать несколько функций. Изменение конструкций стен, переход от массивных однослойных к более лёгким многослойным требует решений вопросов конденсационного увлажнения их слоёв, а также их воздухопроницаемости в целом.

Применяемые технические решения должны предусматривать выполнение требуемого тепловлажностного режима материалов ограждающих конструкций и сохранение их теплозащитных характеристик.

## 2 СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа состоит из следующих основных разделов:

- 1) теплотехнический расчёт ограждающих конструкций;
  - 1.1) теплотехнический расчёт ограждающих конструкций упрощённым методом;
  - 1.2) теплотехнический расчёт ограждающих конструкций с применением каталога удельных потерь теплоты;
- 2) расчёт ограждающих конструкций на сопротивление паропрооницанию;
- 3) построение графиков распределения температур в ограждениях, используя математические зависимости стационарного одномерного температурного поля;
- 4) построение графиков распределения влажности в наружной стене, определение точки росы;
  - 4.1) уточнённый теплотехнический расчёт ограждающих конструкций;
- 5) расчёт ограждающих конструкций на сопротивление воздухопроницанию;
  - 5.1) определение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с учётом воздухопроницания.

При выполнении каждого задания в курсовой работе приводятся следующие сведения:

- 1) теоретическое обоснование выполняемого задания;
- 2) исходные данные и расчётные формулы;
- 3) полная последовательность расчётов;
- 4) выводы, основанные на анализе полученных результатов.

## 3 ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

### 3.1 Расчёт сопротивления теплопередаче однородных ограждающих конструкций. Теоретические предпосылки расчёта

Цель теплотехнического расчёта ограждающих конструкций – определение таких толщин их слоёв, при которых сопротивление теплопередаче будет не менее нормативного приведенного сопротивления  $R_{T,НОРМ}$ ,  $\text{м}^2\text{°C}/\text{Вт}$ , либо проверка запроектированной или эксплуатируемой конструкции тому же требованию.

#### Определения

1. Конструкция, отделяющая помещение или объем здания с нормируемой температурой или температурой и относительной влажностью от наружного воздуха, грунта или разделяющая помещения здания с температурой, отличающейся более чем на  $6\text{ °C}$  и различной относительной влажностью воздуха разделяемых конструкцией объемов.

2. Теплотехнически однородная ограждающая конструкция – ограждающая конструкция или ее часть, состоящие из одного или нескольких слоев материала с постоянными толщиной и коэффициентом теплопроводности материала слоя, границы которых расположены перпендикулярно направлению теплового потока.

Термическое сопротивление отдельного слоя однородной ограждающей конструкции  $R$ ,  $\text{м}^2\text{°С/Вт}$ , следует определять по формуле

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – толщина слоя, м,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала слоя в условиях эксплуатации,  $\text{Вт/м}^2\text{°С}$ , принимаемый согласно таблице Д1 приложения Д [1].

Термическое сопротивление многослойной ограждающей конструкции, слои которой расположены последовательно  $R_K$ ,  $\text{м}^2\text{°С/Вт}$ , следует определять по формуле

$$R_K = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n, \quad (2)$$

где  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$  – термические сопротивления отдельных слоёв конструкции,  $\text{м}^2\text{°С/Вт}$ , определяемые по формуле (1), замкнутых воздушных прослоек, принимаемых по таблице Р1 приложения Р [1].

Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции  $R_T$ ,  $\text{м}^2\text{°С/Вт}$ , следует определять по формуле

$$R_T = \frac{1}{\alpha_v} + R_K + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (3)$$

где  $\alpha_v, \alpha_n$  – коэффициенты внутренней и наружной теплоотдачи поверхностей конструкции,  $\text{Вт/м}^2\text{°С}$ , принимаемые по таблицам А1 приложения А и 6.4 [1] соответственно.

Реальные конструкции наружных ограждающих конструкций, как правило содержат в себе теплотехнические неоднородности различных типов: объёмные, линейные и точечные [1]. Места примыкания наружных стен и перекрытий, места их соединения с иными элементами, имеющими отличное термическое сопротивление, значительно искажает в их толще характер распределения температуры. Это приводит к появлению двумерных и трёхмерных температурных полей.

### **Определение**

**Теплотехническая неоднородность** – область ограждающей конструкции, характеризующаяся содержанием элементов с различными коэффициентами теплопроводности материалов и (или) с переменной толщиной сечения, расположенных параллельно направлению теплового потока и (или) имеющих углы, примыкания смежных конструкций, проемы, приводящие к искажению изолиний температуры по толщине конструкции.

Действующие нормы строительной теплотехники [1] допускают производить теплотехнический расчёт ограждающих конструкций при помощи следующих методов:

- 1) упрощённого;
- 2) с применением справочных значений удельных потерь теплоты через теплотехнические неоднородности по [2];
- 3) детального.

Согласно [1] допускается применять упрощённый метод расчёта для предварительных технико-экономических расчетов на стадии разработки предпроектной предынвестиционной документации. Теплотехнический расчёт с применением справочных значений удельных потерь теплоты через теплотехнические

неоднородности с применением каталога удельных потерь теплоты [2]. Детальный метод применяется при проектировании зданий с использованием конструкций, отсутствующих в [2] и зданий классов повышенной энергетической эффективности типа А+.

В качестве учебных примеров в методических указаниях будут рассмотрены примеры теплотехнических расчётов с использованием *упрощённого метода* и с применением справочных значений удельных потерь теплоты через теплотехнические неоднородности по [2].

### 3.1.1 Упрощённый метод

При использовании упрощённого метода ограждающая конструкция, теплотехнический расчёт которой необходимо выполнить, представляется теплотехнически однородной одно- или многослойной. При этом используется следующая формула для определения приведенного сопротивления теплопередаче:

$$R_{пр} = \frac{\sum_i A_i}{\sum_i \frac{A_i}{R_{0i}}}, \quad (4)$$

где  $A_i$  — площадь  $i$ -й части ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>;  $i = 1 \dots n$ ;

$R_{0i}$  — сопротивление теплопередаче теплотехнически однородной  $i$ -й части ограждающей конструкции, определяемое по формуле (3).

Формулу (4) применяют в случае нескольких конструктивных решений для ограждающих конструкций, примерно равных или незначительно отличающихся по площади частей. В остальных случаях в качестве значения  $R_{пр0i}$  принимают значение  $R_{0i}$ , которое соответствует конструктивному решению большей части конструкции, из чего следует:

$$R_{пр} = \frac{1}{\alpha_g} + R_k + \frac{1}{\alpha_n}. \quad (5)$$

*Слои конструкции, расположенные между воздушной прослойкой, вентилируемой наружным воздухом, и наружной поверхностью ограждающей конструкции, не учитываются.*

При расчёте толщины теплоизоляции и приведенного сопротивления рассматриваемым методом следует понимать, что, вообще говоря, здесь не производится учёт каких-либо конкретных теплотехнических неоднородностей, по этой причине приведенное сопротивление ограждающей конструкцией является результатом произведения базового нормативного сопротивления указанного в [3] в таблице 7.1 и повышающего коэффициента  $k$ , указанного в таблице 6.1 [1].

При расчете приведенного сопротивления теплопередаче конструкций перекрытий и покрытий упрощенным методом нормативное значение определяют умножением базового значения приведенного сопротивления теплопередаче, указанного в [3] (таблица 7.1), на коэффициент  $k = 1,1$ . При этом необходимо потребовать выполнения следующего условия:

$$R_{пр} \geq R_{Т,НОРМ} \cdot k. \quad (6)$$

При этом минимальные значения сопротивления теплопередаче необходимо определять по формуле

$$R_{T,\min} = \frac{n(t_e - t_n)}{\alpha_e \Delta t_e} \quad (7)$$

где  $n$  — коэффициент, учитывающий положение наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху; принимают по таблице 6.2 [1];

$t_e$  — расчетная температура внутреннего воздуха, °С; принимают в соответствии с таблицей 5.1 [1] или нормами технологического проектирования;

$t_n$  — расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, °С; принимают согласно [4], с учетом тепловой инерции ограждающих конструкций  $D$  (за исключением заполнений проемов) по таблице 6.3 [1];

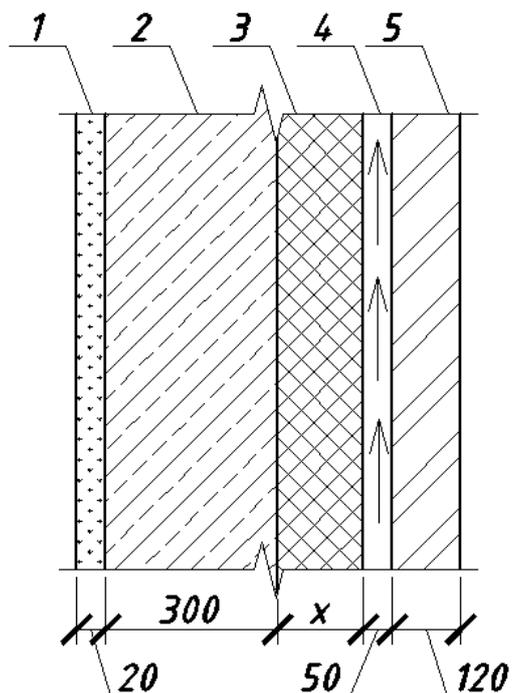
$\alpha_e$  — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С); принимают по таблице 6.4 [1];

$\Delta t_e$  — расчетный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции, °С; принимают по таблице 6.5 [1].

Тепловую инерцию ограждающей конструкции  $D$  определяют по формуле

$$D = R_1 s_1 + R_2 s_2 + R_3 s_3 + \dots + R_n s_n \quad (8)$$

**ПРИМЕР 1.** Определить толщину утеплителя многослойной стены, показанной на рисунке 1.



1 — известково-песчаная штукатурка, 2 — блок ячеистобетонный,  
3 — плиты минераловатные, 4 — вентилируемая воздушная прослойка, 5 — лицевая кладка  
**Рисунок 1 — Конструкция наружной стены**

По таблице Д1 приложения Д [1] приняты следующие величины теплопроводностей для материалов слоёв наружной стены (класс эксплуатации Б) и сведены в таблицу 1.

**Таблица 1 Параметры материалов наружной стены**

№ п/п	Наименование материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Толщина, мм	Теплопроводность, Вт/мС
1	Известково-песчаная штукатурка	1600	20	0,81
2	Блок ячеистобетонный, кладка тонкошовная на клею, толщина шва 3 мм	500	300	0,17
3	Плиты минераловатные	75	неизвестна	0,0419
4	Вентилируемая воздушная прослойка	–	50	
5	Кирпич силикатный утолщенный	1600	120	1,28

$$R_{T,НОРМ} \cdot k = \frac{1}{\alpha_6} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_n}, \quad \text{где } \delta_3 = x$$

$$x = \lambda_3 \left( R_{T,НОРМ} \cdot k - \left( \frac{1}{\alpha_6} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_n} \right) \right) = 0,0419 \left( 3,2 \cdot 1,9 - \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{0,3}{0,17} + \frac{1}{12} \right) \right) = 0,171 \text{ м,}$$

Толщина теплоизоляции наружной стены принята  $\delta_3 = 180$  мм.

Сопротивление теплопередаче наружной стены при данной толщине утеплителя:

$$R_K = \frac{1}{\alpha_6} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{0,3}{0,17} + \frac{0,18}{0,0419} + \frac{1}{12} = 6,284 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}}, \quad \text{что больше,}$$

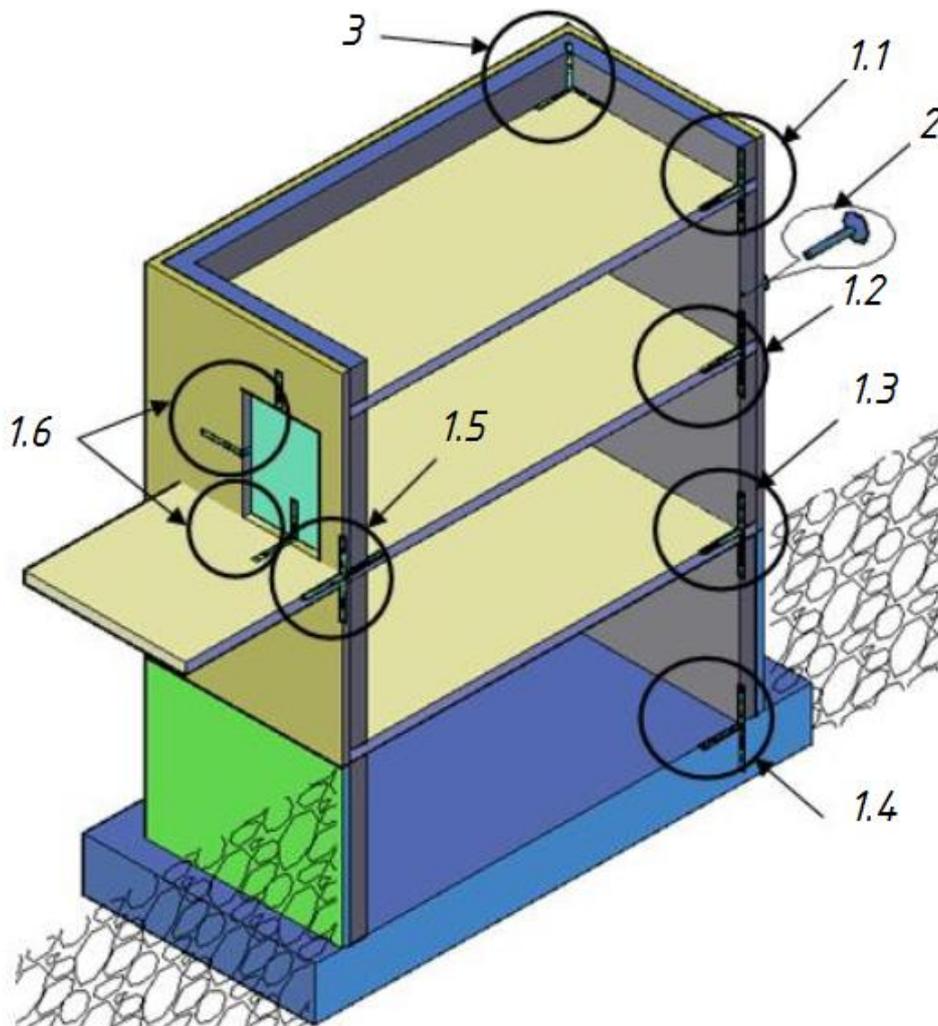
чем  $R_{T,НОРМ} \cdot k = 3,2 \cdot 1,9 = 6,08 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}}$ .

### **3.1.2 Теплотехнический расчёт с применением справочных значений удельных потерь теплоты через теплотехнические неоднородности**

При использовании этого метода производится учёт теплотехнических неоднородностей ограждающих конструкций не при помощи повышающего коэффициента, который увеличивает базовое нормативное сопротивление теплопередаче, а произвести учёт конкретных теплотехнических неоднородностей. В зависимости от характерных размеров теплотехнические неоднородности могут быть [2]:

- 1) линейными;
- 2) объёмными;
- 3) точечными.

Примеры теплотехнических неоднородностей, классификация которых приведена согласно [2], изображены на рисунке 2.



Линейные теплотехнические неоднородности: 1.1 – стык с покрытием;  
 1.2 – стык с междуэтажным перекрытием; 1.3 – стык с цокольным перекрытием;  
 1.4 – стык с полом по грунту; 1.5 – стык с плитой лоджии;  
 1.6 – стык с заполнением проема (откос). Точечные ТН: 2 – анкерное устройство системы теплоизоляции. Объемные ТН: 3 – угловой стык наружных стен и покрытия  
**Рисунок 2 – Примеры теплотехнических неоднородностей наружных стен**

Виды и количество теплотехнических неоднородностей определяется по рабочим чертежам проекта. Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции можно определить по формуле

$$R_{\text{пр}} = \frac{1}{\sum_i \frac{a_i}{R_{0i}} + \sum_j l_j \psi_j + \sum_k n_k \chi_k + \sum_m n_m \chi_m}, \quad (9)$$

где  $a_i$  – удельная площадь плоского участка конструкции  $i$ -го вида, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> всей ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>, определяют по формуле

$$a_i = \frac{A_i}{\sum A_i}, \quad (10)$$

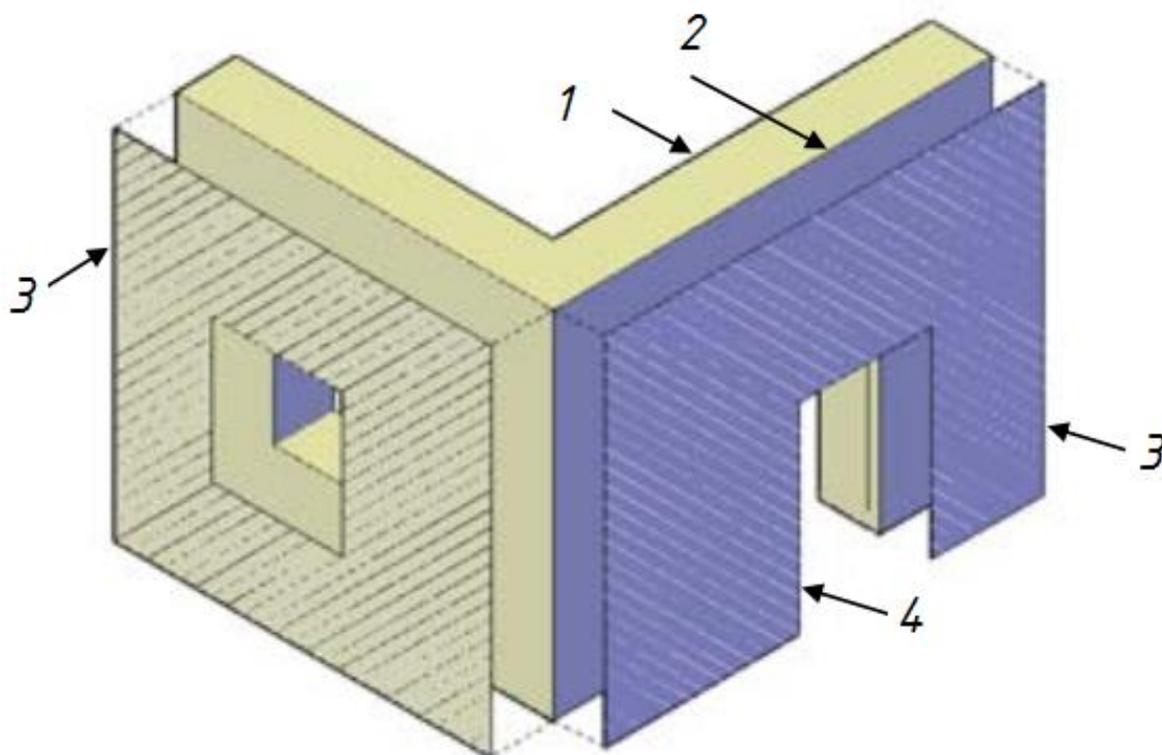
$R_{0i}$  — сопротивление теплопередаче теплотехнически однородной  $i$ -й части ограждающей конструкции, определяемое по формуле (3).

В таблице 2 приведены формулы для определения удельных величин теплотехнических неоднородностей различных видов, входящих в формулу (9).

**Таблица 2 – Формулы для определения удельных величин теплотехнических неоднородностей**

Наименование теплотехнической неоднородности	Кол-во, штук	Формула для её определения	Коэффициент учёта, удельные потери теплоты
Линейная	j	$l_j = \frac{L_j}{\sum A_i}$ , м/м <sup>2</sup>	$\psi_j$
Объёмная	k	$n_k = \frac{N_k}{\sum A_i}$ шт/м <sup>2</sup>	$\chi_k$
Точечная	m	$n_m = \frac{N_m}{\sum A_i}$ шт/м <sup>2</sup>	$\chi_m$

Размеры ограждающих конструкций следует определять, исходя из проектной документации. Для расчёта принимаются проекции площадей ограждающих конструкций, перпендикулярных тепловому потоку (см. рисунок 3).



1 – внутренняя поверхность стены, 2 – наружная поверхность стены,  
3 – проекция наружной поверхности, 4 – проем

**Рисунок 3. – Определение площади наружных стен в области углов и проемов**

**ПРИМЕР 2** Определить толщину утеплителя многослойной стены, показанной на рисунке 1. Площадь брутто фасада здания – 296,34 м<sup>2</sup>, размеры окон 1510(*l*)x1510(*h*) мм, количество окон – 14, форма здания в плане – прямоугольная. В таблицу 3 внесены исходные данные для теплотехнического расчёта.

**Таблица 3 – Расчёт приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены**

Элемент ограждающей конструкции			Геометрический параметр, единица измерения		Удельные потери теплоты		Удельный поток теплоты, обусловленный элементом	Доля от общего удельного потока теплоты, %
Наименование	Вид теплотехнической неоднородности	Краткое описание расположения	на всю площадь конструкции	удельный, на единицу площади конструкции	Значение, единица измерения	Ссылка, обоснование		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Плоский теплотехнически однородный элемент	–	Наружная стена	264,4186	0,8923	0,1877		0,1674	54,319
Плоский теплотехнически однородный элемент	–	Окна	31,9214	0,1077	1,0000		0,1077	34,945
Выпуклый угол наружных стен	Линейная	Вертикальный выпуклый угол	26,4	0,0891	-0,0893 м/м <sup>2</sup>	6.1.6.2 [2]	-0,0080	-2,581
Примыкание междуэтажного перекрытия	Линейная	Горизонтальная, места примыкания перекрытий к поперечным наружным стенам	18,94	0,0639	0,0300 м/м <sup>2</sup>	6.1.1.1 [2]	0,0019	0,622
Примыкание цокольного перекрытия	Линейная	Горизонтальная, места примыкания перекрытий к поперечным наружным стенам	18,94	0,0639	0,1371 м/м <sup>2</sup>	6.1.4.1 [2]	0,0088	2,843

### Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Примыкание чердачного перекрытия	Линейная	Горизонтальная, места примыкания перекрытий к поперечным наружным стенам	18,94	0,0639	0,0690 м/м <sup>2</sup>	6.1.3.1 [2]	0,0044	1,431
Примыкание оконного блока к перемычкам из железобетона	Линейная	Горизонтальная, места примыкания перемычек к наружным стенам	21,14	0,0713	0,0460 м/м <sup>2</sup>	6.1.5.6 [2]	0,0033	1,065
Боковое и нижнее примыкание оконного блока к наружным стенам	Линейная	Горизонтальная, места примыкания окон к перемычкам	63,42	0,2140	0,0242 м/м <sup>2</sup>	6.1.5.1 [2]	0,0052	1,680
Кронштейн системы теплоизоляции	Точечная	Стальной сердечник	–	7	0,0025 шт/м <sup>2</sup>	6.2.2.1 [2]	0,0175	5,677
Итого							0,3083	100
Итого R							3,244	

Величина приведенного сопротивления теплопередаче  $R_{ГП} = 3,244 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$  получена при толщине утеплителя по наружным стенам 14 см. Это соответствует сопротивлению теплопередаче глухого однородного участка наружной стены

$$R_K = \frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{0,3}{0,17} + \frac{0,14}{0,0419} + \frac{1}{12} = 5,329 \frac{\text{м}^2\text{°C}}{\text{Вт}}$$

### 3.2 Расчёт сопротивления теплопередаче неоднородных ограждающих конструкций. Упрощённый метод

Сопротивление теплопередаче неоднородной ограждающей конструкции необходимо определять следующим образом:

а) плоскостями, параллельными направлению теплового потока, ограждающую конструкцию (или ее часть) условно разрезать на участки, из которых одни участки могут быть однородными (однослойными) — из одного материала, а другие — неоднородными — из слоев разных материалов, и определить термическое сопротивление конструкции  $R_{ка}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , по формуле

$$R_K = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2} + \dots + \frac{A_n}{R_n}}, \quad (11)$$

где  $A_1, A_2, \dots, A_n$  — площадь отдельных участков (или части конструкции),  $\text{м}^2$ ;  
 $R_1, R_2, \dots, R_n$  — термическое сопротивление,  $\text{м}^2 \text{C}/\text{Вт}$ , указанных отдельных участков конструкции, определяемое по формуле (1) для однослойных участков и по формуле (2) — для многослойных участков;

б) плоскостями, перпендикулярными направлению теплового потока, ограждающую конструкцию (или ее часть, принятую для определения  $R_{ка}$ ) условно разрезать на слои, из которых одни слои могут быть однородными — из одного материала, а другие — неоднородными — из однослойных участков разных материалов. Определить термическое сопротивление однородных слоев по формуле (1), неоднородных слоев — по формуле (11) и термическое сопротивление  $R_{кб}$  ограждающей конструкции — как сумму значений термического сопротивления отдельных однородных и неоднородных слоев — по формуле (2);

в) если  $R_{ка}$  не превышает  $R_{кб}$  более чем на 25 %, термическое сопротивление ограждающей конструкции необходимо определять по формуле

$$R_K = \frac{R_{ка} + 2R_{кб}}{3}, \quad (12)$$

г) если  $R_{ка}$  превышает  $R_{кб}$  более чем на 25 % или ограждающая конструкция не является плоской (имеет выступы на поверхности и др.), то термическое сопротивление такой конструкции необходимо определять на основании расчета температурного поля следующим образом:

— по результатам расчета температурного поля при расчетных значениях температуры внутреннего ( $t_{в}$ ) и наружного ( $t_{н}$ ) воздуха определить среднюю температуру внутренней ( $t_{в.п}$ ) и наружной ( $t_{н.п}$ ) поверхностей ограждающей конструкции и вычислить значение теплового потока  $q$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , по формуле

$$q = \alpha_{в} \cdot (t_{в} - t_{в.п}) = \alpha_{н} \cdot (t_{н.п} - t_{н}), \quad (13)$$

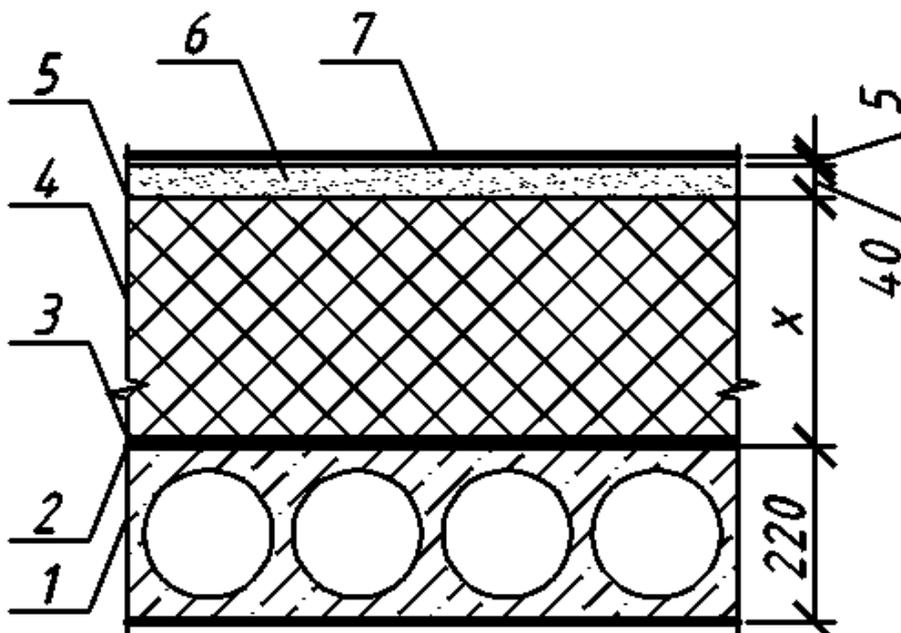
где  $\alpha_{в}, \alpha_{н}$  — то же, что в формуле (3);

$t_{в}$  и  $t_{н}$  — то же, что в формуле (7);

— определить термическое сопротивление конструкции по формуле

$$R_K = \frac{t_{в.п} - t_{н.п}}{q}. \quad (14)$$

**ПРИМЕР 3** Определить толщину утеплителя в конструкции покрытия, показанной на рисунке 4.



- 1 – железобетонная многопустотная плита,  
 2 – затирка из цементно-песчаного раствора для выравнивания поверхности,  
 3 – пароизоляция, 4 – теплоизоляция (для создания уклона применены клиновидные плиты из минеральной ваты), 5 – разделительный слой, 6 – стяжка из цементно-песчаного раствора для наплавления рулонного ковра,  
 7 – наплавляемый рулонный ковёр

**Рисунок 4 – Конструкция неэксплуатируемой совмещённой кровли**

По таблице Д1 приложения Д [1] приняты следующие величины теплопроводностей для материалов слоёв конструкции кровли (класс эксплуатации Б) и сведены в таблицу 4.

**Таблица 4 – Параметры материалов конструкции неэксплуатируемой совмещённой кровли**

№ п/п	Наименование материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Толщина, мм	Теплопроводность, Вт/мС
1	Железобетон	2500	220	2,04
2	Плиты минераловатные	200	неизвестна	0,0446
3	Сложный раствор	1700	20	0,87
4	Гидроизоляционный слой	600	5	0,17

На рисунке 5а показан фрагмент плиты перекрытия, рассматриваемый как теплотехнически неоднородный участок. Необходимо заменить круглые пустоты равновеликими квадратными. Размер квадратной пустоты в сечении:

$$\pi \frac{d^2}{4} = a^2 \Rightarrow a = \frac{d}{2} \sqrt{\pi} = \frac{159}{2} \sqrt{\pi} = 141 \text{ мм.}$$

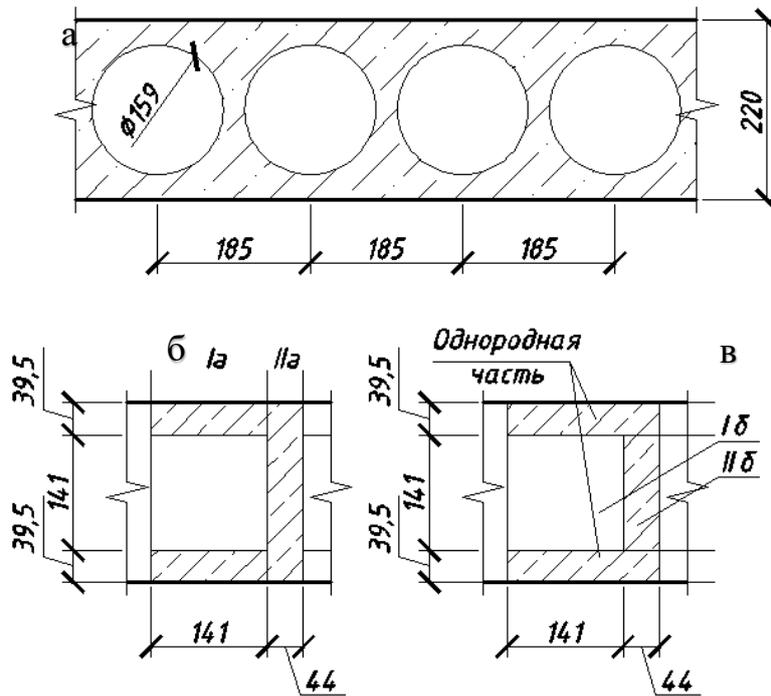


Рисунок 5 – Приведение круглых пустот плиты к равновеликим квадратным (а),  
разделение плиты на расчётные участки (б, в)

Плоскостями, параллельными направлению теплового потока плита может быть разделена на участки, обозначенные условно Ia и IIa. Толщины участков железобетона  $\delta_{Ia}$  над и под воздушной прослойкой и ширина стенки между пустотами определяются как

$$\delta_{Ia} = \frac{220 - 141}{2} = 39,5 \text{ мм}, \quad b_{Ia} = 185 - 141 = 44 \text{ мм}.$$

Площади этих участков:

$$A_{Ia} = 0,22 \cdot 0,141 = 0,031 \text{ м}^2, \quad A_{IIa} = 0,22 \cdot 0,044 = 0,001 \text{ м}^2.$$

Термические сопротивления этих участков, приняв по приложению Р из таблицы Р1 [1] термическое сопротивление замкнутой горизонтальной воздушной прослойки  $0,15 \text{ м}^2\text{С} / \text{Вт}$ :

$$R_{Ia} = 2 \cdot \frac{0,0395}{2,04} + 0,15 = 0,189 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}}, \quad R_{IIa} = \frac{0,22}{2,04} = 0,108 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}}.$$

Термическое сопротивление неоднородной части можно вычислить по формуле (11):

$$R_{ка} = \frac{0,031 + 0,001}{\frac{0,031}{0,189} + \frac{0,001}{0,108}} = 0,185 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}}.$$

Плоскостями, перпендикулярными направлению теплового потока, плита может быть разделена на участки, обозначенные условно Ib и IIb. Термическое сопротивление однородного участка железобетонной плиты при этом направлении разделения на участки:

$$R_o = 2 \cdot \frac{0,0395}{2,04} = 0,039 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}},$$

неоднородной части:

$$R_{I\sigma} = 0,15 \frac{M^2C}{Bm}, \quad R_{II\sigma} = \frac{0,141}{2,04} = 0,069 \frac{M^2C}{Bm}.$$

Площади этих участков:

$$A_{I\sigma} = 0,141 \cdot 0,141 = 0,02 \text{ м}^2, \quad A_{II\sigma} = 0,141 \cdot 0,044 = 0,006 \text{ м}^2.$$

Термическое сопротивление неоднородной части:

$$R_{KH} = \frac{0,02 + 0,006}{\frac{0,02}{0,15} + \frac{0,006}{0,069}} = 0,118 \frac{M^2C}{Bm}.$$

Суммарное термическое сопротивление в рассматриваемом случае деления плиты перекрытия может быть найдено как сумма сопротивлений теплопередаче однородной и неоднородной частей:

$$R_{K\sigma} = R_O + R_{KH} = 0,039 + 0,118 = 0,157 \frac{M^2C}{Bm}.$$

Разница между термическими сопротивлениями  $R_{Ka}$  и  $R_{K\sigma}$  составляет

$(R_{Ka} - R_{K\sigma}) / R_{Ka} \cdot 100\% = (0,185 - 0,157) / 0,185 \cdot 100\% = 15,14\%$ , что меньше допустимых 25 %, расчётные предпосылки выполняются и сам расчёт может быть продолжен.

Используя формулу (12), можно определить величину термического сопротивления неоднородной конструкции – многпустотной плиты перекрытия:

$$R_K = \frac{0,185 + 2 \cdot 0,157}{3} = 0,166 \frac{M^2C}{Bm}.$$

Используя формулы (2) и (3), можно определить толщину утеплителя, учитывая, что при расчёте приведенного сопротивления теплопередаче конструкций перекрытий и покрытий упрощенным методом нормативное значение определяют умножением базового значения приведенного сопротивления теплопередаче, указанного в [3] (таблица 7.1), на коэффициент  $k = 1,1$ :

$$R_{T,НОРМ} \cdot k = \frac{1}{\alpha_e} + R_K + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_n}, \quad \text{где } \delta_2 = x.$$

$$x = \lambda_2 \left( R_{T,НОРМ} \cdot k - \left( \frac{1}{\alpha_e} + R_K + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_n} \right) \right) =$$

$$= 0,0446 \left( 6,0 \cdot 1,1 - \left( \frac{1}{8,7} + 0,166 + \frac{0,04}{0,87} + \frac{0,005}{0,17} + \frac{1}{23} \right) \right) = 0,276 \text{ м},$$

Толщина теплоизоляции, показанной на рисунке 4, совмещённой кровли принята  $\delta_2 = 280$  мм.

Сопротивление теплопередаче покрытия при данной толщине утеплителя:

$$R_K = \frac{1}{\alpha_e} + R_K + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{8,7} + 0,166 + \frac{0,28}{0,0446} + \frac{0,04}{0,87} + \frac{0,005}{0,17} + \frac{1}{23} = 6,632 \frac{M^2C}{Bm},$$

что больше, чем  $R_{T,НОРМ} \cdot k = 6,0 \cdot 1,1 = 6,6 \frac{M^2C}{Bm}$ .

#### 4 СОПРОТИВЛЕНИЕ ПАРПРОНИЦАНИЮ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Потенциал переноса пара – парциальное давление водяных паров, содержащихся в воздухе. Внутри ограждающих конструкций влажный воздух находится в порах материала. Пар перемещается от большего парциального давления к меньшему при наличии сообщающихся пор.

## Определение

Паропроницаемость – это свойство материалов и конструкций, выполненных из них, пропускать сквозь себя водяной пар.

Паропроницание – это процесс проникания пара через материал или ограждение; процесс диффузии водяного пара сквозь толщу ограждающей конструкции, связанный с замещением молекул воздуха в порах на молекулы воды.

Для расчета нормируемого сопротивления паропроницанию по [1] ограждающей конструкции принимают, что плоскость возможной конденсации (ПВК) в однородной (однослойной) конструкции находится на расстоянии, равном  $2/3$  толщины конструкции, от ее внутренней поверхности, а в многослойной конструкции — совпадает с поверхностью теплоизоляционного слоя, ближайшей к наружной поверхности ограждающей конструкции.

Сопротивление паропроницанию отдельного слоя ограждающей конструкции  $R_{п}$ ,  $m^2 \cdot ч \cdot Па/мг$ , может быть найдено при помощи следующей формулы

$$R_{п} = \frac{\delta}{\mu}, \quad (15)$$

где  $\delta$  – то же, что и в формуле (1);

$\mu$  – расчетный коэффициент паропроницаемости материала слоя ограждающей конструкции,  $мг/(м \cdot ч \cdot Па)$ ; принимается в соответствии с приложением Д [1].

Сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации  $R_{п}$ ,  $m^2 \cdot ч \cdot Па/мг$ , должно быть не менее нормативного сопротивления паропроницанию  $R_{п,норм}$ , которое следует определять по формуле

$$R_{п,норм} = R_{п,н} \cdot \frac{e_в - E_к}{E_к - e_{н,от}}, \quad (16)$$

где  $R_{п,н}$  — сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции в пределах от ПВК до наружной поверхности ограждающей конструкции,  $m^2 \cdot ч \cdot Па/мг$ ; данная величина определяется по формуле

$$R_{п,н} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\mu_i}, \quad (17)$$

$n$  – количество слоёв ограждающей конструкции от наружной поверхности до ПВК;

$e_в$  – парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, при средней температуре наружного воздуха за отопительный период  $t_{н,от}$ ; определяют по формуле

$$e_в = 0,01 \cdot \varphi_в E_в, \quad (18)$$

$\varphi_в$  – расчетная относительная влажность внутреннего воздуха, %, принимаемая в соответствии с [4];

$E_в$  – максимальное парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчетной температуре воздуха; принимают в соответствии с приложением П [1];

$E_к$  – максимальное парциальное давление водяного пара в плоскости возможной конденсации, Па; принимают согласно приложению П [1] при температуре в плоскости возможной конденсации  $t_к$ , °С, определяемой по формуле

$$t_K = t_e - \frac{t_e - t_{n.om}}{R_0} \left( \frac{1}{\alpha_e} + \sum R_{Ti} \right), \quad (19)$$

$t_{n.om}$  – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °С; принимают согласно таблице 3.1 [4];

$R_{Ti}$  – термическое сопротивление слоев ограждающей конструкции от внутренней поверхности конструкции до плоскости возможной конденсации, м<sup>2</sup>·°С/Вт; определяют по формуле (1) и приложению Р [1];

$e_{n.om}$  – парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, при средней температуре наружного воздуха за отопительный период  $t_{n.om}$ ; определяют по формуле

$$e_{n.om} = 0,01 \cdot \varphi_{n.om} E_{n.om}, \quad (20)$$

$\varphi_{n.om}$  – средняя относительная влажность наружного воздуха за отопительный период, %; принимают согласно [4];

$E_{n.om}$  – максимальное парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, при средней температуре за отопительный период  $t_{n.om}$ , °С; принимают в соответствии с таблицей П1 приложения П [1].

**ПРИМЕР 4** Определить сопротивление паропроницанию многослойной стены жилого здания, показанной на рисунке 1. Район строительства – г. Брест.

По таблице Д1 приложения Д [1] приняты следующие величины расчётных коэффициентов паропроницаемости и теплоусвоения для материалов слоёв наружной стены и сведены в таблицу 5.

**Таблица 5 – Параметры материалов наружной стены**

№ п/п	Наименование материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Толщина, мм	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)
1	Известково-песчаная штукатурка	1600	20	0,12
2	Блок ячеистобетонный, кладка тонкошовная на клею, толщина шва 3мм	500	300	0,2
3	Плиты минераловатные	75	140	0,57
4	Вентилируемая воздушная прослойка	–	50	–
5	Кирпич силикатный утолщенный	1600	120	0,12

Плоскость возможной конденсации в наружной стене приведенной выше конструкции находится на наружной грани утеплителя, разделяя по обе стороны слои 1, 2, 3, 4 от 5. При анализе приведенной конструкции стены следует исходить из предположения, что дренирование воздушного промежутка между утеплителем и лицевой кладкой крайне затруднено или отсутствует. При этом стоит задача удалить водяной пар за пределы всей толщи стены. Таким образом, воздушную прослойку 4 следует принимать замкнутой. Сопротивление теплопередаче глухого участка стены в этом случае составит

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_e} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + R_{\text{вп}} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{0,3}{0,17} + \frac{0,14}{0,0419} + 0,17 + \frac{0,12}{1,28} + \frac{1}{23} = 5,553 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}}.$$

Расчётная температура внутреннего воздуха составляет 18 °С для жилых зданий, температуру наружного воздуха можно определить по таблице 3.1 [4], значение которой  $t_{\text{н.ом}} = 0,1$  °С.

Сопротивление паропроницанию слоёв наружной стены от внутреннего пространства до ПВК:

$$R_{\text{п}} = \frac{0,02}{0,12} + \frac{0,3}{0,2} + \frac{0,14}{0,57} + 0 = 1,91 \frac{\text{м}^2\text{ч} \cdot \text{Па}}{\text{мг}},$$

сопротивление паропроницанию слоёв наружной стены от наружного пространства до ПВК:

$$R_{\text{п.н}} = \frac{0,12}{0,12} = 1 \frac{\text{м}^2\text{ч} \cdot \text{Па}}{\text{мг}}.$$

Влажность внутреннего воздуха для помещений жилых зданий  $\varphi_e = 50\%$ , при которой парциальное давление внутреннего воздуха составит

$$e_e = 0,01 \cdot 50\% \cdot 2064 = 1032 \text{ Па},$$

где  $E_e = 2064$  Па, взято по таблице П1 приложения П [1].

Температура в ПВК:

$$t_{\text{к}} = 18 - \frac{18 - 0,1}{5,553} \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{0,3}{0,17} + \frac{0,14}{0,0419} + 0,17 \right) = 0,543 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Максимальное парциальное давление водяного пара в ПВК:  $E_{\text{к}} = 683$  Па, найдено путём интерполяции по таблице П1 приложения П [1].

Влажность наружного воздуха для района строительства  $\varphi_n = 83\%$ , при которой парциальное давление наружного воздуха составит

$$e_n = 0,01 \cdot 83\% \cdot 612 = 508 \text{ Па},$$

где  $E_n = 612$  Па, найдено путём интерполяции по таблице П1 приложения П [1].

$R_{\text{п.норм}} = 1 \cdot \frac{1032 - 638}{638 - 508} = 3,031 \frac{\text{м}^2\text{ч} \cdot \text{Па}}{\text{мг}}$ , что больше, чем  $R_{\text{п}} = 1,91 \frac{\text{м}^2\text{ч} \cdot \text{Па}}{\text{мг}}$ , следовательно требуется устройство дополнительной пароизоляции.

## 5 ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР И ВЛАЖНОСТЕЙ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

### 5.1 Построение графиков распределения температуры в ограждающих конструкциях без учёта воздухопроницаемости.

#### Теоретические предпосылки

При построении графика изменения температуры в толще ограждения принимается во внимание следующее:

- 1) процесс передачи тепла является стационарным;
- 2) ограждающая конструкция является глухой и однородной;
- 3) температурное поле внутри ограждающей конструкции является одномерным.

Исходные данные для расчета:

1) средняя температура воздуха за отопительный период для района строительства;

2) температура и относительная влажность внутреннего воздуха, определяемые в зависимости от функционального назначения здания по 5.1 [1];

3) коэффициенты теплоотдачи поверхностей, определяемые по таблицам 6.4 и А.1 [1];

4) наименование, плотность и значения толщины материалов слоев конструкции;

5) коэффициенты теплопроводности и паропроницаемости материалов слоев ограждающих конструкций, предварительно принимаемые по приложению Д в соответствии с влажностным режимом помещений и условиями эксплуатации ограждающих конструкций по 5.4 [1].

При отсутствии градиента температур по ширине и высоте ограждающей конструкции изотермы в её слоях являются плоскостями, а температура в какой-либо точке по толщине может быть найдена по формуле, приведенной в [1] приложении В:

$$\tau_x = t_g - \frac{t_g - t_n}{R_T} \left( \frac{1}{\alpha_g} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right); \quad (21)$$

где  $t_g$  – то же, что в формуле (7);

$t_n$  – расчётная зимняя температура наружного воздуха, °С, принимаемая по таблице 3.1 [4] с учётом тепловой инерции ограждения, определяемой по формуле (8);

$R_T$  – сопротивление теплопередаче конструкции м<sup>2</sup>°С/Вт.

Температура на внутренней поверхности стены может быть определена по формуле

$$\tau_1 = t_g - \frac{t_g - t_n}{R_T \cdot \alpha_g}. \quad (22)$$

Проверкой правильности является равенство тепловых потоков на наружной и внутренней поверхностях ограждающей конструкции:

$$\alpha_g (t_g - \tau_1) = \alpha_n (\tau_n - t_n). \quad (22)$$

**ПРИМЕР 5.** Построить график распределения температур в многослойной стене жилого здания, показанной на рисунке 1. Район строительства – г. Брест. Графики изменения температур в этом примере будут построены для двух случаев:

1) при температуре наружного воздуха равной расчётной зимней температуре наружного воздуха;

2) при температуре наружного воздуха равной средней температуре наружного воздуха за отопительный период.

**Расчёт изменения температуры 1.** В таблицу 6 сведены величины коэффициентов теплоусвоения материалов стены.

**Таблица 6 – Параметры материалов наружной стены**

№ п/п	Наименование материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Толщина, мм	Коэффициент теплоусвоения $s$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С), при периоде 24 ч
1	Известково-песчаная штукатурка	1600	20	9,76
2	Блок ячеистобетонный, кладка тонкошовная на клею, толщина шва 3 мм	500	300	2,48
3	Плиты минераловатные	75	140	0,447
4	Вентилируемая воздушная прослойка	–	50	–
5	Кирпич силикатный утолщенный	1600	120	9,01

$$D = \frac{0,02}{0,81} 9,76 + \frac{0,3}{0,17} 2,48 + \frac{0,14}{0,0419} 0,447 = 6,11.$$

Принимая во внимание полученную величину тепловой инерции наружной стены и используя таблицу 6.3 [1], необходимо принять температуру наружного воздуха, равную температуре наиболее холодных трёх суток по таблице 3.1 [4]. Среднюю температуру наиболее холодных трех суток определяют как среднее арифметическое значений температуры наиболее холодных суток и наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92. Значения величин температур наружного воздуха следует брать из таблицы 3.1 [4]. В рассматриваемом случае температура наружного воздуха равна  $t_n = -23$  °С. Температура будет определена в четырёх точках:

- 1) на внутренней поверхности стены;
- 2) на стыке штукатурки и кладки из ячеистобетонных блоков;
- 3) на стыке ячеистобетонных блоков и теплоизоляции;
- 4) на наружной поверхности теплоизоляции.

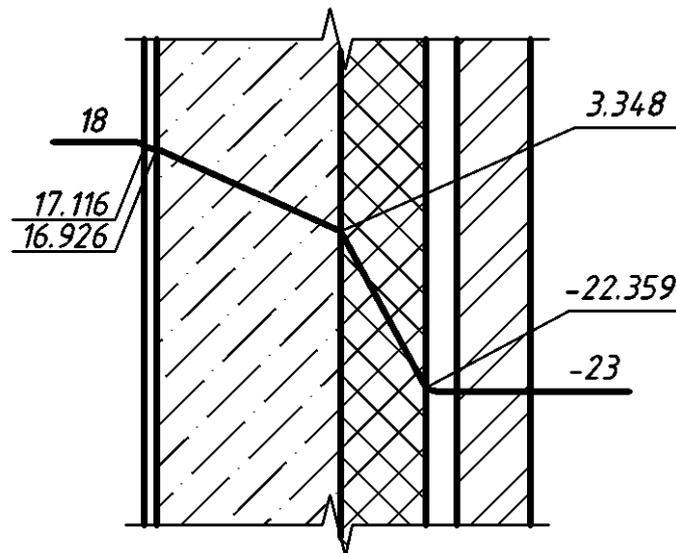
$$\tau_1 = 18 - \frac{18 + 23}{5,329 \cdot 8,7} = 17,116 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tau_2 = 18 - \frac{18 + 23}{5,329} \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} \right) = 16,926 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tau_3 = 18 - \frac{18 + 23}{5,329} \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{0,3}{0,17} \right) = 3,348 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tau_4 = 18 - \frac{18 + 23}{5,329} \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{0,3}{0,17} + \frac{0,14}{0,0419} \right) = -22,359 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

График распределения температур по слоям наружной стены показан на рисунке 6.



**Рисунок 6 – График распределения температур в °С по слоям наружной стены**

**Расчёт распределения температуры 2.** Необходимо построить график распределения температуры по слоям наружной стены при температуре наружного воздуха равной средней температуре наружного воздуха за отопительный период  $t_n = t_{n,от} = 0,1$  °С.

$$\tau_1 = 18 - \frac{18 - 0,1}{5,329 \cdot 8,7} = 17,614 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tau_2 = 18 - \frac{18 - 0,1}{5,329} \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} \right) = 17,531 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tau_3 = 18 - \frac{18 - 0,1}{5,329} \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{0,3}{0,17} \right) = 11,603 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tau_4 = 18 - \frac{18 + 23}{5,329} \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{0,3}{0,17} + \frac{0,14}{0,0419} \right) = 0,380 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

График распределения температур по слоям наружной стены показан на рисунке 7.

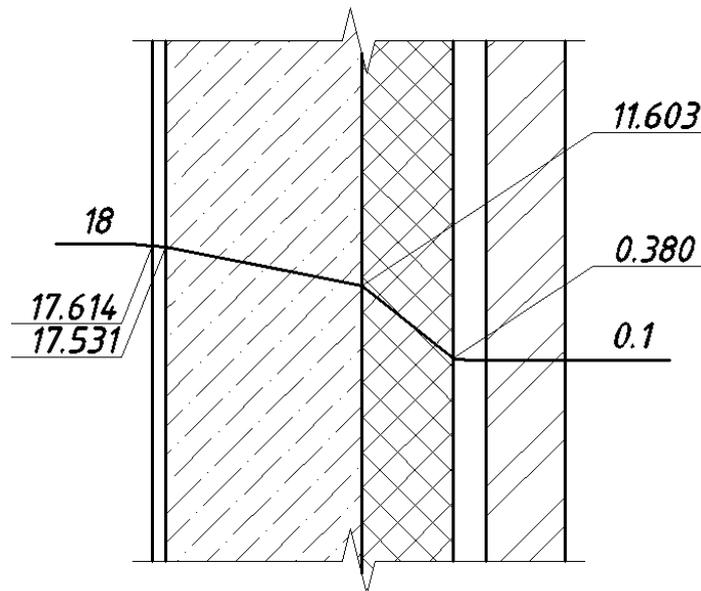


Рисунок 7 – График распределения температур в  $^\circ\text{C}$  по слоям наружной стены

## 5.2 Построение графиков распределения влажности в ограждающих конструкциях. Теоретические предпосылки

Расчёт величин парциальных давлений на стыках слоёв ограждающей конструкции производится аналогично расчёту температур по следующей формуле, пренебрегая за малостью влагоотдачей внутренней и наружной поверхностей:

$$e_x = e_g - \frac{e_g - e_n}{R_{\Pi}} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\mu_i}; \quad (23)$$

где  $e_g$  – то же, что в формуле (18);

$e_n$  – парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, при температуре наружного воздуха за отопительный период  $t_n$ ; определяют по формуле

$$e_n = 0,01 \cdot \varphi_n E_n, \quad (24)$$

$\varphi_n$  – средняя относительная влажность наружного воздуха за отопительный период, %; принимают согласно [4];

$E_n$  – максимальное парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, при средней температуре за отопительный период  $t_n$ ,  $^\circ\text{C}$ ; принимают в соответствии с таблицей П1 приложения П [1];

$R_{II}$  – то же, что в формуле (17).

Для построения графика распределения влажности по слоям ограждающей конструкции следует определить сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции. Здесь полагается, что вентиляция воздушной прослойки (при её наличии) не затруднена и слои за ней наружу от помещения не учитываются. Расчёт сопротивления паропроницанию производится по формуле (15).

Используя таблицу П1 приложения П [1], следует построить график изменения максимальных значений парциальных давлений в толще ограждающей конструкции. В месте пересечения графиков парциального давления воздуха в материалах ограждения с максимально возможной его величиной относительная влажность материала будет равна 100 %, т. е. в этом месте при найденной ранее температуре произойдёт конденсация влаги, а сама температура, при которой происходит этот процесс, – точка росы.

При расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции коэффициенты теплопроводности материалов предварительно принимают по условиям эксплуатации, указанным в таблице 5.2 [1], с последующим уточнением их по результатам расчета относительной влажности воздуха в слое материала при средних климатических параметрах наружного воздуха за отопительный период. Если по результатам расчета в указанных условиях средняя относительная влажность воздуха в слое материала не превышает 75 %, коэффициент теплопроводности материала принимают по условиям эксплуатации А. В противном случае коэффициент теплопроводности материала принимают по условиям эксплуатации Б.

**ПРИМЕР 6.** Построить график распределения влажностей в многослойной стене жилого здания, показанной на рисунке 1, используя решение данной задачи в примере 5, рисунок 7. Район строительства – г. Брест.

Сопротивление паропроницанию наружной стены от внутренней грани до воздушной прослойки (воздушная прослойка и лицевая кладка в расчёте не учитываются):

$$R_{II} = \frac{0,02}{0,12} + \frac{0,3}{0,2} + \frac{0,14}{0,57} = 1,91 \frac{m^2 \cdot ch \cdot Pa}{mг}$$

Влажность внутреннего воздуха для помещений жилых зданий  $\varphi_e = 50\%$ , при которой парциальное давление внутреннего воздуха составит

$$e_e = 0,01 \cdot 50\% \cdot 2064 = 1032 \text{ Па},$$

где  $E_e = 2064$  Па, взято по таблице П1 приложения П [1].

Влажность наружного воздуха для района строительства  $\varphi_n = 83\%$ , при которой парциальное давление наружного воздуха составит:

$$e_n = 0,01 \cdot 83\% \cdot 616 = 511 \text{ Па},$$

где  $E_n = 616$  Па, найдено по таблице П1 приложения П [1] для температуры наружного воздуха  $t_n = t_{n,om} = 0,1$  °С.

Парциальные давления будут определены в четырёх точках:

- 1) на внутренней поверхности стены;
- 2) на стыке штукатурки и кладки из ячеистобетонных блоков;
- 3) на стыке ячеистобетонных блоков и теплоизоляции;
- 4) на наружной поверхности теплоизоляции.

$$e_1 = 1032 \text{ Па};$$

$$e_2 = 1032 - \frac{1032 - 511}{1,91} \left( \frac{0,02}{0,12} \right) = 987 \text{ Па};$$

$$e_3 = 1032 - \frac{1032 - 511}{1,91} \left( \frac{0,02}{0,12} + \frac{0,3}{0,2} \right) = 577 \text{ Па};$$

$$e_4 = 1032 - \frac{1032 - 511}{1,91} \left( \frac{0,02}{0,12} + \frac{0,3}{0,2} + \frac{0,14}{0,57} \right) = 511 \text{ Па};$$

Разбивая на пять частей по толщине каждый слой, можно определить максимальные величины парциального давления водяного пара. В первом слое разбиение по толщине не производится в силу тонкости этого слоя. Для определения максимальных величин парциальных давлений следует использовать график изменения температур по толщине наружной стены и таблицу П1 приложения П [1].

График распределения парциальных давлений водяного пара по слоям наружной стены показан на рисунке 8.

Используя полученные результаты, можно вычислить величины относительных влажностей для каждой части слоя наружной стены.

Как видно из рисунка 8, наружная часть теплоизоляции имеет среднюю влажность  $\varphi = 0,5 \cdot (81,4 + 71) = 76,2\%$ . Из этого следует, что эта часть имеет тепло-технические характеристики, соответствующие классу эксплуатации Б, остальная часть наружной стены – классу А.

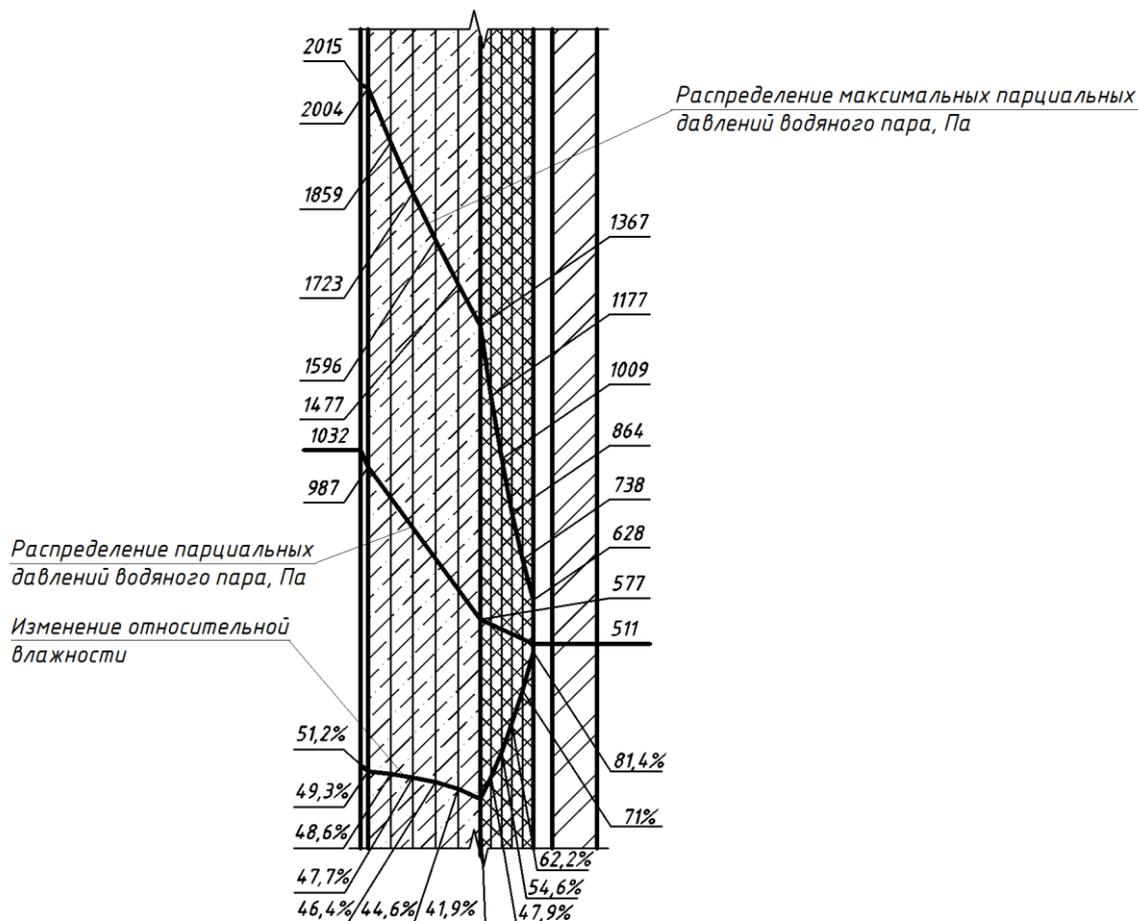


Рисунок 8 – Графики распределения парциальных давлений в Па по слоям наружной стены

По таблице Д1 приложения Д [1] приняты следующие величины теплопроводностей для материалов слоёв наружной стены и сведены в таблицу 7.

**Таблица 7 – Параметры материалов наружной стены**

№ п/п	Наименование материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Толщина, мм	Теплопроводность, Вт/мС
1	Известково-песчаная штукатурка	1600	20	0,70
2	Блок ячеистобетонный, кладка тонкошовная на клею, толщина шва 3 мм	500	300	0,15
3	Плиты минераловатные	75	112	0,041
4	Плиты минераловатные	75	28	0,0419
5	Вентилируемая воздушная прослойка	–	50	
6	Кирпич силикатный утолщенный	1600	120	1,28

Теперь можно определить уточнённую величину сопротивления теплопередаче глухого однородного участка наружной стены с учётом различных классов эксплуатации слоёв:

$$R_T = \frac{1}{\alpha_e} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_n} =$$

$$= \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,3}{0,15} + \frac{0,112}{0,041} + \frac{0,112}{0,041} + \frac{0,028}{0,0419} + \frac{1}{12} = 5,627 \frac{m^2C}{Вт}$$

Данное значение превосходит ранее полученное значение сопротивления теплопередаче этой же стены (см. пример 2) на  $(5,627 - 5,329) / 5,627 \cdot 100\% = 5,296\%$ .

## **6 СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЮ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

### **Определение**

Воздухопроницаемость – свойство строительных материалов и ограждающих конструкций пропускать сквозь себя поток воздуха; воздухопроницаемость – расход воздуха в кг, который проходит через 1м<sup>2</sup> ограждения за час G, кг/(м<sup>2</sup>·ч).

Воздухопрониение через ограждения – процесс проникновения воздуха сквозь их неплотности.

Проникновение воздуха снаружи внутрь помещений называется инфильтрацией, а из помещения наружу – эксфильтрацией.

Потенциал инфильтрации и эксфильтрации – перепад полных давлений воздуха ΔP, Па, с разных сторон ограждения. Разность давлений воздуха изнутри здания и снаружи вызвана различной плотностью холодного наружного воздуха и теплого внутреннего (гравитационной составляющей) и ветрового давления в набегающем потоке с наветренной стороны и разрежения с подветренной (ветровой составляющей).

Расчетную разность давления воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающей конструкции  $\Delta p$ , Па, следует определять по формуле

$$\Delta p = H(\gamma_n - \gamma_e) + 0,5\rho_n v_{cp}^2 (c_n - c_e) k_i, \quad (25)$$

где  $H$  — высота здания от поверхности земли до устья вытяжной шахты, м;

$\gamma_n, \gamma_e$  — удельный вес соответственно наружного и внутреннего воздуха, Н/м<sup>3</sup>; который может быть найден по формуле

$$\gamma = \frac{3463}{273 + t}, \quad (26)$$

здесь  $t$  — температура воздуха, °С принимают: внутреннего — согласно таблице 5.1 [1], наружного — равная средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 (принимается согласно [4]);

$v_{cp}$  — максимальная из средних скоростей ветра по румбам в январе, повторяемость которых составляет 16 % и более, м/с (принимается согласно [4]);

$\rho_n$  — плотность наружного воздуха, кг/м<sup>3</sup>; определяют по формуле

$$\rho_n = \frac{\rho_n}{9,8}; \quad (27)$$

$c_n, c_e$  — аэродинамические коэффициенты соответственно наветренной и подветренной поверхностей ограждающих конструкций здания; принимают в соответствии с [5] по таблице 7.1;

$k_i$  — коэффициент учета изменения скоростного давления ветра в зависимости от высоты здания; принимают в соответствии с [5], рисунком 4.2 (в приведенных нормах обозначен как  $c_e(z)$  — коэффициент экспозиции), либо вычисляемый по формулам:

$$k_i = 1 + 7l_v(z); \quad (28)$$

где интенсивность турбулентности

$$l_v(z) = \frac{\kappa}{c_0(z) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}; \quad (29)$$

$\kappa$  — коэффициент турбулентности, рекомендуемое значение  $\kappa = 1$ ;

$c_0(z)$  — орографический коэффициент, вычисляется по формулам (А.1) – (А.3) приложения А3 [5];

$z_0$  — параметр шероховатости, принимаемый по таблице 4.1 [5] в зависимости от типа местности.

Сопротивление воздухопроницанию ограждающих конструкций зданий и сооружений  $R_B$ , за исключением заполнений световых проемов, должно быть не менее нормируемого сопротивления воздухопроницанию  $R_{B,НОРМ}$ , м<sup>2</sup>·ч·Па/кг, определяемого по формуле

$$R_{B,НОРМ} = \frac{\Delta p}{G_{НОРМ}}; \quad (30)$$

где  $\Delta p$  — расчетная разность давления воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций, Па;

$G_{НОРМ}$  — нормативная воздухопроницаемость ограждающих конструкций, кг/(м<sup>2</sup>·ч); принимается по таблице 9.1 [1].

Сопротивление воздухопроницанию многослойной ограждающей конструкции  $R_B$ , м<sup>2</sup>·ч·Па/кг, определяют по формуле

$$R_B = R_{B1} + R_{B2} + \dots + R_{Bn}; \quad (31)$$

где  $R_{B1}, R_{B2}, R_{Bn}$  — сопротивления воздухопроницанию отдельных слоев ограждающей конструкции,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$ ; принимается в соответствии с приложением Н [1].

**ПРИМЕР 7** Определить сопротивление воздухопроницанию наружной стены, конструкция которой приведена на рисунке 1, район строительства – г. Брест, высота здания 7,2 м, ширина в плане 10,2 м, длина 12,5 м, тип местности II. В таблицу 8 сведены сопротивления воздухопроницанию материалов.

**Таблица 8 – Сопротивления воздухопроницанию материалов наружной стены**

№ п/п	Наименование материала	Сопротивление воздухопроницанию $R_B, \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$ Толщина по [1], мм	Толщина, мм	Сопротивление воздухопроницанию $R_B, \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$ слоя заданной толщины
1	Известково-песчаная штукатурка	$\frac{142}{15}$	20	26,667
2	Блок ячеистобетонный, кладка тонкошовная на клею, толщина шва 3 мм	$\frac{21}{400}$	300	15,75
3	Плиты минераловатные	$\frac{2}{50}$	140	5,6
4	Вентилируемая воздушная прослойка	0	50	0
5	Кирпич силикатный утолщенный	$\frac{2}{120}$	120	2

Используя данные таблицы 8, можно определить сопротивление воздухопроницанию наружной стены:

$$R_B = 26,667 + 15,75 + 5,6 + 0 + 2 = 48,017 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}}{\text{кг}}$$

Удельный вес внутреннего и наружного воздуха, плотность наружного воздуха при средней температуре наиболее холодной пятидневки  $-21^\circ \text{C}$  с обеспеченностью 0,92 (по [4]) составляют:

$$\gamma_v = \frac{3463}{273+18} = 11,9 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}, \quad \gamma_n = \frac{3463}{273-21} = 13,742 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}, \quad \rho_n = \frac{13,742}{9,8} = 1,402 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Величина коэффициента  $k_I$  при коэффициентах  $c_0(z) = 1, k = 1, z_0 = 0,05$ :

$$l_v(7,2) = \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{7,2}{0,05}\right)} = 0,201; \quad k_i = 1 + 7 \cdot 0,201 = 2,409.$$

Расчётная разность давлений воздуха составит при средней скорости ветра  $v_{cp} = 3,7$  м/с и аэродинамических коэффициентах  $c_n = 0,8, c_n = -0,5$ :

$$\Delta p = 7,2 \cdot (13,742 - 11,9) + 0,5 \cdot 1,402 \cdot 3,4^2 (0,8 - (-0,5)) \cdot 2,409 = 38,640 \text{ Па}.$$

Величина нормативной воздухопроницаемости для жилых зданий составляет  $G_{НОРМ} = 0,5$   $\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , при которой нормируемое сопротивление воздухопроницанию составляет

$$R_{B.HOPM} = \frac{38,640}{0,5} = 77,28 \frac{m^2 \cdot ч \cdot Па}{кг}$$

Поскольку  $R_g$  меньше, чем  $R_{B.HOPM}$ , то конструкция стены не соответствует требованиям.

## 7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ТОЛЩЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЁТОМ ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЯ

Поток воздуха, проходящий сквозь сообщающиеся поры материалов, из которых состоят строительные конструкции, вообще говоря, изменяет температурное поле в их толще. Температура в любой точке ограждения может быть определена по формуле для глухой части ограждающей конструкции [6]:

$$\tau_x = t_n + (t_g - t_n) \frac{e^{CGR_x} - 1}{e^{CGR_T} - 1}, \quad (32)$$

где  $C = 0,24$  кКал/кг $^{\circ}$ С;

$G$  – фактическое количество воздуха, проходящее через ограждение, кг/(м $^2$ ·ч), которое определяется по формуле

$$G = \frac{\Delta p}{R_g}, \quad (33)$$

$R_B$  – сопротивление воздухопроницанию ограждающих конструкций зданий и сооружений м $^2$ ·ч·Па/кг;

$R_T$  – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м $^2$ °С /Вт;

$R_x$  – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции от наружной поверхности до исходной точки или плоскости, м $^2$ °С /Вт, определяется по формуле

$$R_x = \sum_{i=1}^n R_K + \frac{1}{\alpha_n}. \quad (34)$$

Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции:

$$R_T^B = \frac{e^{CGR_T} - 1}{C \cdot G \cdot e^{CGR_T}}. \quad (35)$$

**ПРИМЕР 8** Определить сопротивление теплопередаче наружной стены, показанной на рисунке 1, с учётом воздухопроницания.

1.  $R_B = 48,017$  м $^2$ ·ч·Па/кг (см. Пример 7).

2.  $t_g = 18$  °С.

3.  $t_n = -23$  °С.

4.  $C = 0,24$  кКал/кг $^{\circ}$ С.

5.  $\Delta p = 20,324$  Па (см. Пример 7).

6.  $R_T = 5,627$  м $^2$ °С /Вт (см. Пример 6).

Фактическое количество воздуха, проходящее сквозь наружную стену:

$$G = \frac{20,324}{48,017} = 0,423 \frac{кг}{m^2 \cdot ч}$$

Температура будет определена в пяти точках:

- 1) на наружной поверхности теплоизоляции;
- 2) на границе разделения теплоизоляционного слоя по классам эксплуатации А и Б;
- 3) на стыке ячеистобетонных блоков и теплоизоляции;
- 4) на стыке штукатурки и кладки из ячеистобетонных блоков;
- 5) на внутренней поверхности стены.

$$R_1 = \frac{1}{12} = 0,083 \frac{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Вт}};$$

$$\tau_1 = -21 + (18 + 21) \frac{e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 0,083} - 1}{e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 5,627} - 1} = -22,550 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$R_2 = \frac{1}{12} + \frac{0,028}{0,0419} = 0,752 \frac{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Вт}};$$

$$\tau_2 = -21 + (18 + 21) \frac{e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 0,752} - 1}{e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 5,627} - 1} = -18,772 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$R_3 = \frac{1}{12} + \frac{0,028}{0,0419} + \frac{0,112}{0,0419} = 3,483 \frac{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Вт}};$$

$$\tau_3 = -21 + (18 + 21) \frac{e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 3,483} - 1}{e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 5,627} - 1} = -0,428 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$R_4 = \frac{1}{12} + \frac{0,028}{0,0419} + \frac{0,112}{0,041} + \frac{0,3}{0,15} = 5,483 \frac{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Вт}};$$

$$\tau_4 = -21 + (18 + 21) \frac{e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 5,483} - 1}{e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 5,627} - 1} = 16,633 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$R_5 = \frac{1}{12} + \frac{0,028}{0,0419} + \frac{0,112}{0,041} + \frac{0,3}{0,15} + \frac{0,02}{0,7} = 5,512 \frac{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Вт}};$$

$$\tau_5 = -21 + (18 + 21) \frac{e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 5,508} - 1}{e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 5,627} - 1} = 16,906 \text{ } ^\circ\text{C};$$

Распределение температур показано на рисунке 9.

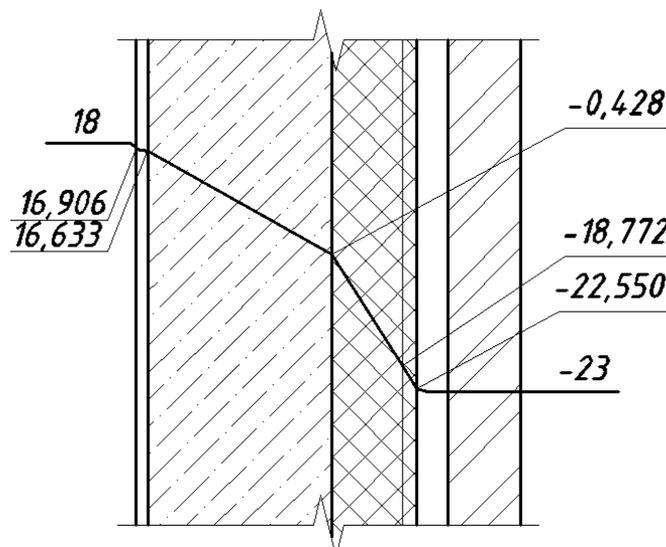


Рисунок 9 – График распределения температур в  $^\circ\text{C}$  по слоям наружной стены с учётом воздухопроницаемости

Соппротивление наружной стены с учётом воздухопроницаемости составляет

$$R_T^B = \frac{e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 5,627} - 1}{0,24 \cdot 0,423 \cdot e^{0,24 \cdot 0,423 \cdot 5,627}} = 4,221 \frac{M^2 \cdot oC}{Bm},$$

что меньше вычисленного ранее в примере 6 на  $(5,627 - 4,221) / 4,221 \cdot 100\% = 33,310\%$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Строительная теплотехника : СП 2.04.01–2020. – Введ. 20.01.2021. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 73 с.
2. Каталог удельных потерь теплоты (тепловых мостиков) теплотехнически неоднородных узлов ограждающих конструкций жилых и общественных зданий. – Введ. 0.01.2021. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 211 с.
3. Здания и сооружения. Энергетическая эффективность : СН 2.04.02–2020. – Введ. 30.03.2021. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 21 с.
4. Строительная климатология : СНБ 2.04.02–2000 – Минск : Минстройархитектуры, 2001. – 37 с.
5. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Ветровые воздействия : СН 2.01.05–2019. – Введ. 08.09.2020. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 128 с.
6. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика: теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха : учебник для вузов / В. Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1992. – 415 с.

Учебное издание

**Составители:**

*Глушко Константин Константинович*

*Басова Дина Викторовна*

*Воробей Александр Петрович*

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к выполнению курсовой работы  
**«ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ЗДАНИЯ»**  
для студентов специальности  
1 – 69 01 01 «Архитектура»

Ответственный за выпуск: Глушко К. К.

Редактор: Митлошук М. А.

Компьютерная вёрстка: Вашкевич Ю. А.

Корректор: Дударук С. А.

---

Подписано в печать 05.05.2023 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л 1,86. Уч. изд. л. 2. Заказ № 507. Тираж 20 экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/235 от 24.03.2014.