

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Кафедра архитектуры

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**к выполнению курсовой работы**  
**«ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЖИЛОГО ЗДАНИЯ»**  
для студентов специальности

1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»

**Брест 2023**

Методические указания содержат необходимые данные для проведения курсовой работы «Теплофизический расчет жилого здания» для студентов третьего курса специальности 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение и вентиляция».

В методических указаниях содержатся нормативные материалы для выполнения курсовой работы. Приведены примеры расчетов сопротивлений теплопередаче, паро- и воздухопроницанию ограждающих конструкций, построения в них одномерного температурного поля, графиков изменения парциальных давлений водяного пара и относительной влажности с применением аналитических и численных методов расчета.

Составители: К. К. Глушко, к. т. н., старший преподаватель  
Д. В. Коваленко, ассистент

Рецензенты: В. Г. Новосельцев, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Учреждения образования «Брестский государственный технический университет», к. т. н., доцент  
В. Н. Деркач, директор филиала РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, д. т. н.

## Оглавление

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	4
2 СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	5
3 ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ .	5
3.1 Расчет сопротивления теплопередаче однородных ограждающих конструкций. Теоретические предпосылки расчета .....	5
3.1.1 Упрощенный метод .....	6
3.1.2 Теплотехнический расчет с применением справочных значений удельных потерь теплоты через теплотехнические неоднородности.....	9
3.2 Расчет сопротивления теплопередаче неоднородных ограждающих конструкций. Упрощенный метод.....	13
4 СОПРОТИВЛЕНИЕ ПАРОПРОНИЦАНИЮ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ .....	17
5 ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР И ВЛАЖНОСТЕЙ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ.....	20
5.1 Построение графиков распределения температуры в ограждающих конструкциях без учета воздухопроницаемости. Теоретические предпосылки	20
5.2 Построение графиков распределения влажности в ограждающих конструкциях. Теоретические предпосылки .....	23
6 СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЮ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ .....	26
7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ТОЛЩЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЯ .....	29
ЛИТЕРАТУРА .....	31
Приложение 1 .....	32
1 Определение величин температур и относительной влажности в плоской ограждающей конструкции .....	32
2 Определение величин температур в слоях криволинейной ограждающей конструкции .....	37

## 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Курсовая работа предусматривает следующие расчеты ограждающих конструкций здания: теплотехнический расчет и расчеты на паро- и воздухопроницаемость.

Настоящие методические указания разработаны для облегчения использования студентами строительных норм Республики Беларусь при выполнении курсовой работы, содержит теоретические сведения по выполнению инженерных расчетов на паро- и воздухопроницаемость, а также примеры их выполнения.

Тепловые потери зданий существенно зависят от сопротивления теплопередаче 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 тепловлагозащитных и теплоинерционных свойств ограждений. Введенные 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 расчеты и наиболее полный перечень значений теплофизических характеристик применяемых в настоящее время строительных и конструкционных материалов.

Ограждающие конструкции зданий часто выполняются многослойными для повышения их теплозащитных качеств. При этом отдельные слои могут осуществлять как отдельные функции, которые могут быть выполнены только ими, так и совмещать несколько функций. Изменение конструкций стен, переход от массивных однослойных к более легким многослойным требует решения вопросов конденсационного увлажнения их слоев, 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 расчет ограждающих конструкций;

1.1) теплотехнический расчет ограждающих конструкций упрощенным методом;

1.2) теплотехнический расчет ограждающих конструкций с применением каталога удельных потерь теплоты;

2) расчет 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) уточненный теплотехнический расчет ограждающих конструкций;

5) расчет ограждающих конструкций на сопротивление воздухопроницанию;

5.1) определение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с учетом воздухопроницания.

При выполнении каждого задания в курсовой работе приводятся следующие сведения:

1) теоретическое обоснование выполняемого задания;

2) исходные данные и расчетные формулы;

3) полная последовательность расчетов;

4) выводы, основанные на анализе полученных результатов.

## 3 ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

### 3.1 Расчет сопротивления теплопередаче однородных ограждающих конструкций. Теоретические предпосылки расчета

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

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

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

где  $\delta$  – толщина слоя, м,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала слоя в условиях эксплуатации,  $\text{Вт}/\text{м} \text{°C}$ , 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 слоев 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

$$R_T = \frac{1}{\alpha_в} + R_K + \frac{1}{\alpha_н}, \quad (3)$$

где  $\alpha_в, \alpha_н$  – 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: объемные, линейные и точечные [1]. Места примыкания наружных стен и перекрытий, места их соединения с иными элементами, имеющими отличное термическое сопротивление, значительно искажают в их толще характер распределения температуры. Это приводит к появлению двумерных и трехмерных температурных полей.

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

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

Согласно [1] допускается применять упрощенный метод расчета для предварительных технико-экономических расчетов на стадии разработки предпроектной предынвестиционной документации. Теплотехнический расчет 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 расчетов с использованием *упрощенного метода* и *с применением справочных значений удельных потерь теплоты* через теплотехнические неоднородности по [2].

### 3.1.1 Упрощенный метод

При использовании упрощенного метода ограждающая конструкция, теплотехнический расчет которой необходимо выполнить, представляется теплотех-

нически 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:

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

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

При расчете толщины теплоизоляции и приведенного сопротивления рассматриваемым методом следует понимать, что, вообще говоря, здесь не производится учет 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 минимальное значение сопротивления теплопередаче необходимо определять по формуле

$$R_{т,мин} = \frac{n(t_e - t_n)}{\alpha_e \Delta t_e}. \quad (7)$$

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];

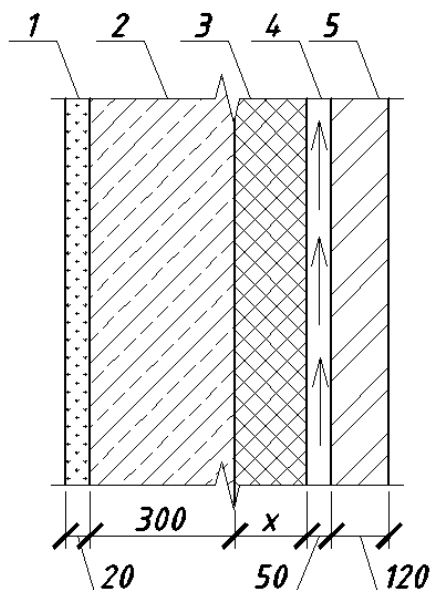
$\alpha_6$  — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С); принимают по таблице 6.4 [1];

$\Delta t_6$  — 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 слоев 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 3мм	500	300	0,17
3	Плиты минераловатные	75	неизвестна	0,0419
4	Вентилируемая воздушная прослойка	–	50	
5	Кирпич силикатный утолщенный	1600	120	1,28



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

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

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

Сопротивление теплопередаче наружной стены при данной толщине утеплителя:

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

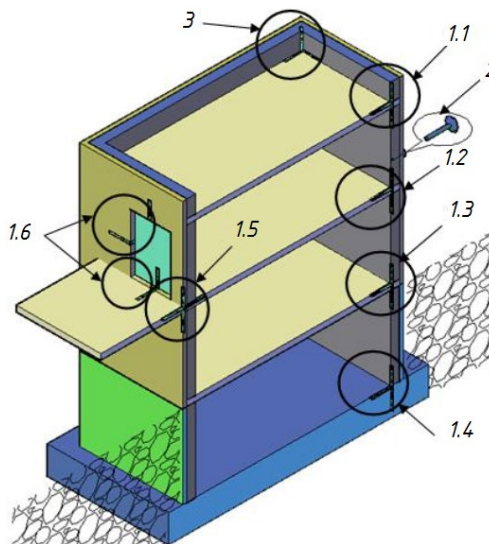
чем  $R_{T,НОРМ} \cdot k = 3,2 \cdot 1,9 = 6,08 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}}$ .

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

При использовании этого метода производится учет 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) объемными;
- 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:

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

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:

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

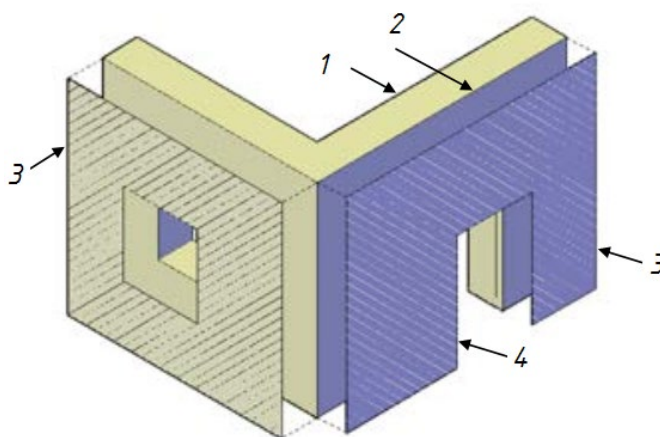
$R_{0i}$  — сопротивление теплопередаче теплотехнически однородной  $i$ -й части ограждающей конструкции, определяемое по формуле (3).

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 расчета 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 расчета.

**Таблица 3 – Расчет 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 тепло-технической неоднородности	Краткое описание расположения	на всю площадь конструкции	удельный, на единицу площади конструкции	Значение, единица измерения	Ссылка, обоснование		
Плоский теплотехнически однородный элемент	–	Наружная стена	264,4186	0,8923	0,1877		0,1674	54,228
Плоский теплотехнически однородный элемент	–	Окна	31,9214	0,1077	1,0000		0,1077	34,886
Выпуклый угол наружных стен	Линейная	Вертикальный выпуклый угол	26,4	0,0891	–0,0893	6.1.6.2	–0,0080	–2,577
Примыкание междуэтажного перекрытия	Линейная	Горизонтальная, места примыкания перекрытий к поперечным наружным стенам	18,94	0,0639	0,0300	6.1.1.1	0,0019	0,621
Примыкание цокольного перекрытия	Линейная	Горизонтальная, места примыкания перекрытий к поперечным наружным стенам	18,94	0,0639	0,1371	6.1.4.1	0,0088	2,838

### Окончание таблицы 3

Примыкание чердачного перекрытия	Линейная	Горизонтальная, места примыкания перекрытий к поперечным наружным стенам	18,94	0,0639	0,0690	6.1.3.1	0,0044	1,428
Примыкание оконного блока к перемычкам из железобетона	Линейная	Горизонтальная, места примыкания перемычек к наружным стенам	21,14	0,0713	0,0460	6.1.5.6	0,0033	1,063
Боковое и нижнее примыкание оконного блока к наружным стенам	Линейная	Горизонтальная, места примыкания окон к перемычкам	63,42	0,2140	0,0242	6.1.5.1	0,0052	1,677
Кронштейн системы теплоизоляции	Точечная	Стальной сердечник		7	0,0025	6.2.2.1	0,0175	5,668
Примыкание междуэтажной плиты перекрытия к наружным стенам	Объемная	Выпуклый угол примыкания перекрытий к наружным стенам	4	0,013498009	0,008	6.3.1.1	0,0001	0,035
Примыкание наружных стен к чердачной плите перекрытия	Объемная	Выпуклый угол примыкания чердачного перекрытия к наружным стенам	4	0,013498009	0,0302	6.3.3.1	0,0004	0,132
Итого							0,3088	100
Итого R							3,239	

Величина приведенного сопротивления теплопередаче  $R_{ПП} = 3,239 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}$  получена при толщине утеплителя по наружным стенам 14 см. Это соответствует сопротивлению теплопередаче глухого однородного участка наружной стены

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

### 3.2 Расчет сопротивления теплопередаче неоднородных ограждающих конструкций. Упрощенный 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  $R_{ка}$ , м<sup>2</sup>·°C/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), м<sup>2</sup>;  
 $R_1, R_2, \dots, R_n$  — термическое сопротивление, м<sup>2</sup>·°C/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  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, по формуле

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

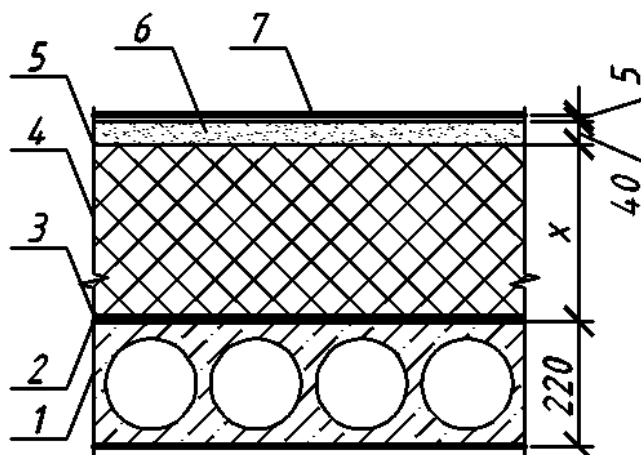
где  $\alpha_{в}, \alpha_{н}$  — то же, что в формуле (3);

$t_{в}$  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 – наплавливаемый рулонный ковер

*Рисунок 4 – Конструкция неэксплуатируемой совмещенной 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 совмещенной 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:

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

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

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

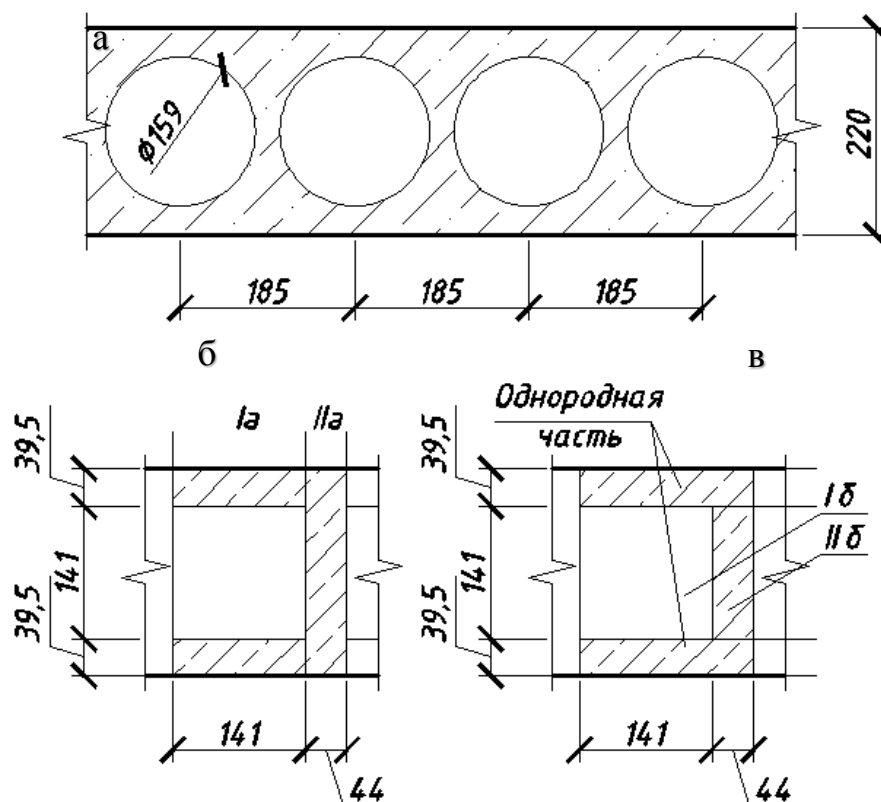


Рисунок 5 – Приведение круглых пустот плиты к равновеликим квадратным (а), разделение плиты на расчётные участки (б, в)

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  $0,15 \text{ м}^2\text{°C /Вт}$ :

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

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

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

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

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

неоднородной части:

$$R_{Iб} = 0,15 \frac{\text{м}^2\text{°C}}{\text{Вт}}, \quad R_{IIб} = \frac{0,141}{2,04} = 0,069 \frac{\text{м}^2\text{°C}}{\text{Вт}}.$$

Площади этих участков:

$$A_{I6} = 0,141 \cdot 0,141 = 0,02 \text{ м}^2, \quad A_{II6} = 0,141 \cdot 0,044 = 0,006 \text{ м}^2.$$

Термическое сопротивление неоднородной части:

$$R_{кн} = \frac{0,02 + 0,006}{\frac{0,02}{0,15} + \frac{0,006}{0,069}} = 0,118 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}}.$$

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

$$R_{кб} = R_O + R_{кн} = 0,039 + 0,118 = 0,157 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}}.$$

Разница между термическими сопротивлениями  $R_{ка}$  и  $R_{кб}$  составляет

$(R_{ка} - R_{кб}) / R_{ка} \cdot 100\% = (0,185 - 0,157) / 0,185 \cdot 100\% = 15,14\%$ , что меньше допустимых 25 %, расчетные предпосылки выполняются и сам расчет может быть продолжен.

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

$$R_K = \frac{0,185 + 2 \cdot 0,157}{3} = 0,166 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}}.$$

Используя формулы (2) и (3), можно определить толщину утеплителя, учитывая, что 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  $k = 1,1$ :

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

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

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

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

Сопротивление теплопередаче покрытия при данной толщине утеплителя:

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

что больше, чем  $R_{T,НОРМ} \cdot k = 6,0 \cdot 1,1 = 6,6 \frac{\text{м}^2\text{С}}{\text{Вт}}$ .



## 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.

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  $R_{\Pi}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ , может быть найдено при помощи следующей формулы

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

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

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

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

$$R_{\Pi, \text{НОРМ}} = R_{\Pi, \text{Н}} \cdot \frac{e_{\text{в}} - E_{\text{К}}}{E_{\text{К}} - e_{\text{н.от}}}, \quad (16)$$

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

$$R_{\Pi, \text{Н}} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\mu_i}, \quad (17)$$

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

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

$$e_{\text{в}} = 0,01 \cdot \varphi_{\text{в}} E_{\text{в}}, \quad (18)$$

$\varphi_{\text{в}}$  – расчетная относительная влажность внутреннего воздуха, %, принимаемая в соответствии с [4];

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

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

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

$t_{n.om}$  – 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 паропрооницанию многослойной стены жилого здания, показанной на рисунке 1. Район строительства – г. Брест.

По таблице Д1 приложения Д [1] приняты следующие величины расчетных коэффициентов паропрооницаемости и теплоусвоения для материалов слоев 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 паропрооницаемости, мг/(м·ч·Па)
1	Известково-песчаная штукатурка	1600	20	0,12
2	Блок ячеистобетонный, кладка тонкошовная на клею, толщина шва 3 мм	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

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_6} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + R_{ВП} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{0,3}{0,17} + \frac{0,14}{0,0419} + 0,17 + \frac{0,12}{1,28} + \frac{1}{23} = 5,553 \frac{m^2C}{Вт}$$

Расчетная температура внутреннего воздуха составляет 18 °С для жилых зданий. Температуру наружного воздуха можно определить по таблице 3.1 [4], значение которой  $t_{н,от} = 0,1^\circ C$ .

Сопротивление паропрооницанию слоев наружной стены от внутреннего пространства до ПВК:

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

сопротивление паропрооницанию слоев наружной стены от наружного пространства до ПВК

$$R_{II,н} = \frac{0,12}{0,12} = 1 \frac{m^2ч \cdot Па}{мг}$$

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

$$e_в = 0,01 \cdot 50\% \cdot 2064 = 1032 Па,$$

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

Температура в ПВК:

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

Максимальное парциальное давление водяного пара в ПВК:  $E_K = 683$  Па, найдено путем интерполяции по таблице П1 приложения П [1].

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

$$e_н = 0,01 \cdot 83\% \cdot 612 = 508 Па,$$

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

$R_{II,НОРМ} = 1 \cdot \frac{1032 - 638}{638 - 508} = 3,031 \frac{m^2ч \cdot Па}{мг}$ , что больше, чем  $R_{II} = 1,91 \frac{m^2ч \cdot Па}{мг}$ , следова-

тельно, требуется устройство дополнительной пароизоляции.

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

### 5.1 Построение графиков распределения температуры в ограждающих конструкциях без учета 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 паропроницания 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 ее 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);

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

$R_T$  – сопротивление теплопередаче конструкции  $\text{м}^2\text{°С/Вт}$ .

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:

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

Для упрощения построения графиков температуры в плоских ограждающих конструкциях рекомендуется использовать алгоритм, приведенный в Приложении 1, для криволинейных – в Приложении 2.

**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 расчетной зимней температуре наружного воздуха;

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

**Расчет 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 3мм	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 трех 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 четырех 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.

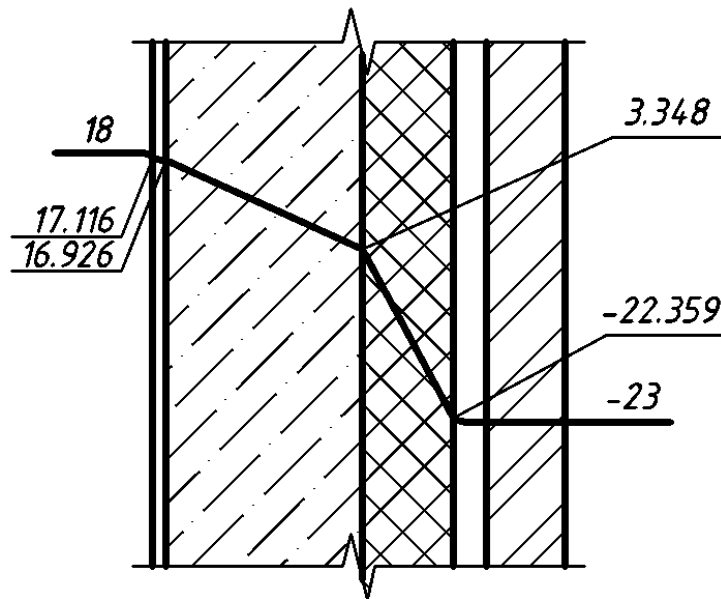


Рисунок 6 – График распределения температур в  $^\circ\text{C}$  по слоям наружной стены

**Расчет изменения температур 2.** Необходимо построить график распределения температуры по слоям наружной стены при температуре наружного воздуха равной средней температуре наружного воздуха за отопительный период  $t_n = t_{н.от} = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

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

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

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

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

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

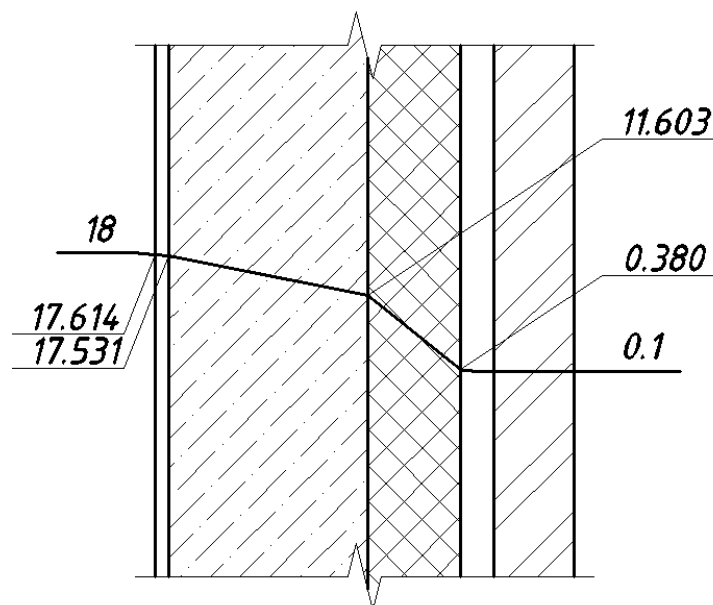


Рисунок 7 – График распределения температур в °C по слоям наружной стены

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

Расчет величин парциальных давлений на стыках слоев ограждающей конструкции производится аналогично расчету температур по следующей формуле, пренебрегая за малостью влагоотдачей внутренней и наружной поверхностей:

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

где  $e_e$  – 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  $t_n$ , °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 паропрооницанию ограждающей конструкции. Здесь полагается, что вентиляция воздушной прослойки (при ее наличии) не затруднена и слои за ней наружу от помещения не учитываются. Расчет сопротивления паропрооницанию 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 относитель-

ная влажность материала будет равна 100 %, т. е. в этом месте при найденной ранее температуре произойдет 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.

Для упрощения построения графиков распределения влажностей рекомендуется использовать алгоритм, приведенный в Приложении 1.

**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 паропроонианию наружной стены от внутренней грани до воздушной прослойки (воздушная прослойка и лицевая кладка в расчете не учитываются):

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

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].

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 четырех 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.

$$e_1 = 1032 \text{ Па};$$

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

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



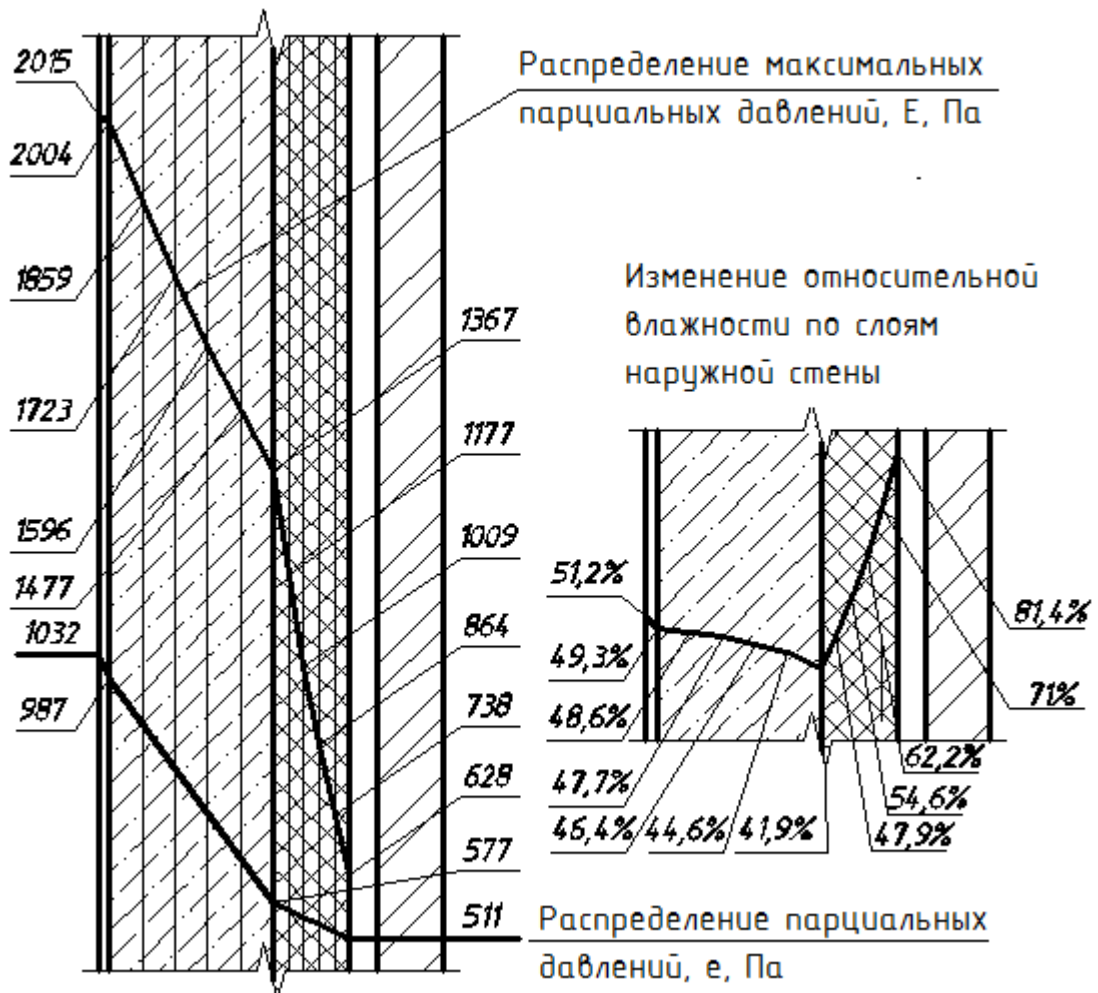
$$e_4 = 1032 - \frac{1032 - 511}{1,91} \left( \frac{0,02}{0,12} + \frac{0,3}{0,2} + \frac{0,14}{0,57} \right) = 511 \text{ Па};$$

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 теплотехнические 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 слоев 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 3мм	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 уточненную величину сопротивления теплопередаче глухого однородного участка наружной стены с учетом различных классов эксплуатации слоев:

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

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

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

Потенциал инфильтрации и эксфильтрации – перепад полных давлений воздуха  $\Delta P$ , Па, с разных сторон ограждения. Разность давлений воздуха изнутри здания и снаружи вызвана различной плотностью холодного наружного воздуха и теплого внутреннего (гравитационной составляющей), а также 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

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

$c_n, c_n$  — 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.

Сопrotивление 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].

Сопrotивление 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, м<sup>2</sup>·ч·Па/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 3мм	$\frac{21}{400}$	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  $k_l$  при коэффициентах  $c_0(z) = 1, k = 1, z_0 = 0,05$ :

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

Расчетная 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  $G_{НОРМ} = 0,5$  кг/( $\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ), при которой нормируемое сопротивление воздухопроницанию составляет:

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

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

## 7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ТОЛЩЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ 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 °С;

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

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

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

$R_T$  – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>°С /Вт;

$R_x$  – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции от наружной поверхности до исходной точки или плоскости, м<sup>2</sup>°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 учетом воздухопроницания.

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

2.  $t_g = 18$  °С.

3.  $t_n = -23$  °С.

4.  $C = 0,24$  кКал/кг°С.

5.  $\Delta p = 38,640$  Па (см. Пример 7).

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

Фактическое количество воздуха, проходящее сквозь наружную стену:

$$G = \frac{38,640}{48,017} = 0,805 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}.$$

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.

$$R_1 = \frac{1}{12} = 0,083 \frac{M^2 \cdot ^\circ C}{Bm};$$

$$\tau_1 = -23 + (18 + 23) \frac{e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 0,083} - 1}{e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 5,627} - 1} = -22,663 \text{ } ^\circ C;$$

$$R_2 = \frac{1}{12} + \frac{0,028}{0,0419} = 0,752 \frac{M^2 \cdot ^\circ C}{Bm};$$

$$\tau_2 = -23 + (18 + 23) \frac{e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 0,752} - 1}{e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 5,627} - 1} = -19,739 \text{ } ^\circ C;$$

$$R_3 = \frac{1}{12} + \frac{0,028}{0,0419} + \frac{0,112}{0,0419} = 3,483 \frac{M^2 \cdot ^\circ C}{Bm};$$

$$\tau_3 = -23 + (18 + 23) \frac{e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 3,483} - 1}{e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 5,627} - 1} = -2,978 \text{ } ^\circ C;$$

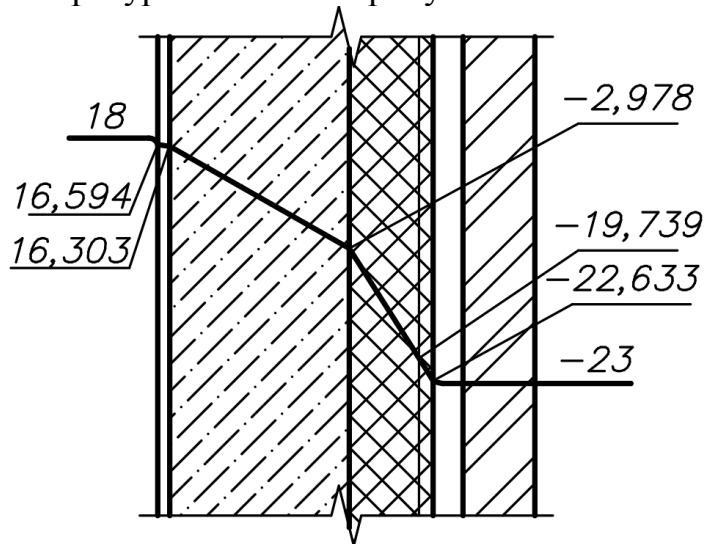
$$R_4 = \frac{1}{12} + \frac{0,028}{0,0419} + \frac{0,112}{0,041} + \frac{0,3}{0,15} = 5,483 \frac{M^2 \cdot ^\circ C}{Bm};$$

$$\tau_4 = -23 + (18 + 23) \frac{e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 5,483} - 1}{e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 5,627} - 1} = 16,303 \text{ } ^\circ C;$$

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

$$\tau_5 = -23 + (18 + 23) \frac{e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 5,508} - 1}{e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 5,627} - 1} = 16,594 \text{ } ^\circ C.$$

Распределение температур показано на рисунке 9.



**Рисунок 9 – График распределения температур в °C по слоям наружной стены с учетом воздухопроницаемости**

Сопротивление наружной стены с учетом воздухопроницаемости составляет

$$R_T^B = \frac{e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 5,627} - 1}{0,24 \cdot 0,805 \cdot e^{0,24 \cdot 0,805 \cdot 5,627}} = 3,431 \frac{M^2 \cdot ^\circ C}{Bm},$$

что меньше вычисленного ранее в примере 6 на  $(5,627 - 3,431) / 3,431 \cdot 100 \% = 64 \%$ .

## 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. – 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.

## 1 Определение величин температур и относительной влажности в плоской ограждающей конструкции

Трехмерное температурное поле, возникающее в толще ограждающих конструкций при рассматриваемом стационарном процессе теплопередачи, описывается при помощи дифференциального уравнения Лапласа для стационарного процесса теплопередачи:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = 0, \quad (1.1)$$

где  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – теплопроводности материала по направлениям X, Y, Z соответственно, Вт/(мС).

При принятии равным нулю градиента температур по высоте и ширине ограждающей конструкции, принятии величины теплопроводности материала постоянной величиной уравнение (1.1) можно записать в следующем виде:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0, \quad (1.2)$$

конечно-разностное представление которого может быть представлено в следующем виде с использованием [6–8]:

$$\frac{\Delta^2 t}{h^2} = 0, \quad (1.3)$$

где  $h$  – шаг конечно-разностной сетки в пределах рассматриваемого слоя. Также из этого уравнения следует:

$$t_{i-1} - 2t_i + t_{i+1} = 0, \quad (1.4)$$

где  $i$  – порядковый номер точки, в которой решается уравнение (1).

Следует отметить, что для многослойной ограждающей конструкции невозможно использовать уравнение (1.4) в полной мере из-за различия величин теплопроводностей для каждого из слоев ограждающей конструкции. Слои ограждающей конструкции разделены на равное количество промежуточных слоев, при этом толщины их в пределах каждого слоя одинаковы, но неодинаковы в разноименных слоях. На рисунке 1.1 показана схема расстановки точек с номерами от 0 до  $n = 14$ .

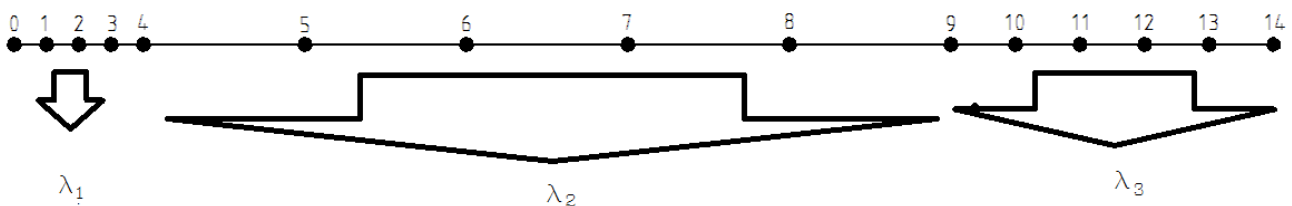


Рисунок 1.1 – Схема расстановки точек



При решении данной задачи принято, что температуры внутренней и наружной поверхностей вычислены при помощи следующих зависимостей:

$$t_0 = t_g - \frac{t_g - t_n}{R_T \cdot \alpha_g}, \quad t_n = t_g - \frac{t_g - t_n}{R_T} \left( \frac{1}{\alpha_g} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right), \quad (1.5)$$

где  $t_g, t_n$  – расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха, °С;  
 $R_T$  – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>°С/Вт;  
 $\alpha_g$  – коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности, Вт/м<sup>2</sup>С.

Таким образом, требуется вычислить величины температур в n-1 точках, поскольку температуры в начальной и конечной точке определены при помощи зависимостей (1.5).

При составлении уравнений типа (1.4) следует рассмотреть следующие случаи:

1) температура в точке 1:

$$t_0 - 2t_1 + t_2 = 0, \quad (1.6)$$

откуда:

$$-2t_1 + t_2 = -t_0; \quad (1.7)$$

2) температура в точке n-1 (предпоследней):

$$t_{n-2} - 2t_{n-1} + t_n = 0, \quad (1.8)$$

откуда:

$$t_{n-2} - 2t_{n-1} = -t_n; \quad (1.9)$$

3) граница слоев (использован закон Фурье):

$$q = \lambda_{j-1} \frac{t_{i-1} - t_i}{h_{j-1}}; \quad q = \lambda_j \frac{t_i - t_{i+1}}{h_j}, \quad (1.10)$$

где j – порядковый номер слоя. Выражая числитель выражений (1.10) и вычитая полученные выражения друг из друга, можно получить

$$t_{i-1} - 2t_i + t_{i+1} = \frac{q}{n} \left( \frac{\delta_{j-1}}{\lambda_{j-1}} - \frac{\delta_j}{\lambda_j} \right), \quad (1.11)$$

где

$$q = \alpha_g (t_g - t_0) = \alpha_n (t_n - t_n), \quad (1.12)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности, Вт/м<sup>2</sup>С,  
 $t_n$  – температура в точке n температура наружной поверхности стены, С.

На основе выражений (1.4) – (1.12) можно составить систему линейных уравнений для каждой внутренней точки ограждающей конструкции в порядке ее разбиения по толщине слоев. Решение этой системы уравнений можно произвести матричным методом:

$$[\Lambda] \cdot [t] = [S], \quad (1.13)$$

где  $[\Lambda]$  – матрица из коэффициентов из неизвестных величинах температур;  
 $[t]$  – вектор неизвестных температур;  
 $[S]$  – вектор свободных членов.

Формирование матриц и векторов можно представить в следующем виде:

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 \end{bmatrix}, \quad [S] = \begin{bmatrix} -t_0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \frac{q}{n} \left( \frac{\delta_{j-1}}{\lambda_{j-1}} - \frac{\delta_j}{\lambda_j} \right) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ -t_n \end{bmatrix}, \quad (1.14)$$

Решение уравнения (1.13) можно представить в следующем виде:

$$[t] = [\Lambda]^{-1} \cdot [S], \quad (1.15)$$

результатом которого является вектор температур в каждой расчетной точке.

Величины парциального давления водяного пара, диффундирующего сквозь ограждающую конструкцию, можно определить, применяя следующие зависимости:

$$e_x = e_g - \frac{e_g - e_n}{R_{II}} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\mu_i}, \quad (1.16)$$

где  $e_g$  – парциальное давление внутреннего воздуха

$$e_g = 0,01 \cdot \varphi_g E_g, \quad (1.17)$$

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

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

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

$$e_n = 0,01 \cdot \varphi_n E_n, \quad (1.18)$$

$\varphi_n$  – 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  $t_n$ , °С; принимают в соответствии с таблицей П1 приложения П [1];

$R_{II}$  – сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>·ч·Па/мг.

Величина максимального парциального давления  $E$ , представленная в таблице приложения П [1], при дробных величинах температур в заданном интервале их

величин может быть найдена путем интерполяции либо в виде значения функции, аппроксимирующей нормативные значения парциальных давлений:

1) парциальное давление над поверхностью воды

$$E(t) = 1000 \cdot e^{\frac{16,57t-115,72}{233,77+0,997t}}; \quad (1.19)$$

2) общемировой стандарт

$$E(t) = 611,2 \cdot e^{\frac{17,62t}{243,12+t}}; \quad (1.20)$$

3) аппроксимирующая функция, подобранная по значениям в таблице приложения П [1] при помощи метода наименьших квадратов

$$E(t) = -2 \cdot 10^{-7} \cdot t^6 + 7 \cdot 10^{-6} \cdot t^5 + 0,0006 \cdot t^4 + 0,0213 \cdot t^3 + 1,3463 \cdot t^2 + 46,245 \cdot t + 604,71. \quad (1.21)$$

Выявлено, что наиболее близко величины максимальных величин парциальных давлений описывает функция (1.21), которая и была принята для последующих расчетов.

Влажность в расчетных точках слоев ограждающей конструкции может быть найдена по формуле:

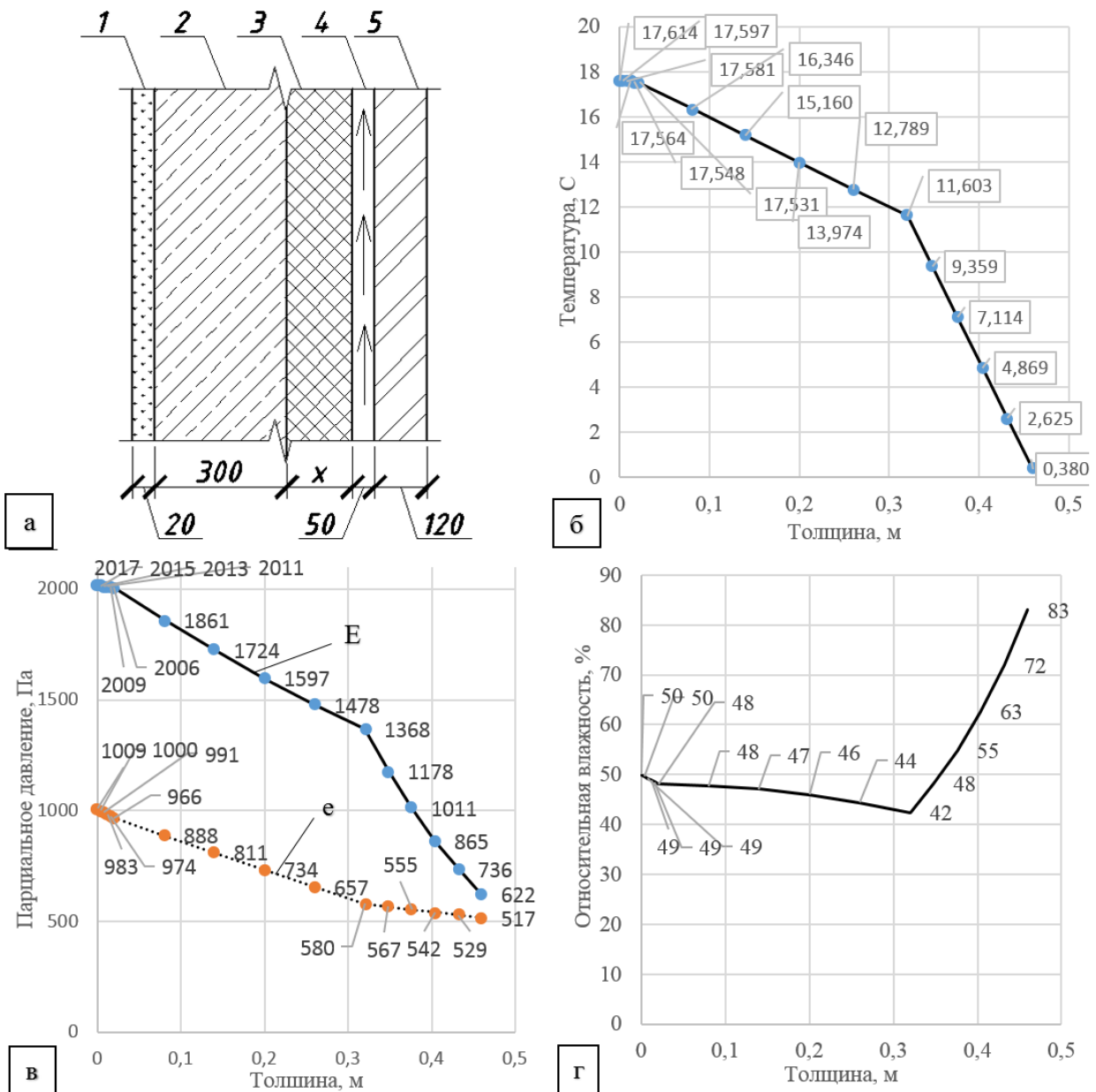
$$\varphi = \frac{e}{E} \cdot 100 \%. \quad (1.22)$$

Среднее значение влажности промежуточного слоя может быть найдено как полусумма величин влажности в соседних точках. Полученное значение средней влажности промежуточного слоя в дальнейшем используется для классификации его режима эксплуатации (А или Б по [1]) и дальнейшего проведения уточнённого теплотехнического расчета.

В качестве примера приведен расчет наружной стены состава, указанного на рисунке 1.2а, результаты расчета приведены на рисунках 1.2б – 1.2г. В таблицу 1.1 сведены основные параметры материалов наружной стены. Каждый слой разделен на пять равных по ширине участков.

**Таблица 1.1 – Параметры материалов наружной стены**

№ п/п	Наименование материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Толщина, мм	Теплопроводность, Вт/мС	Паропроницаемость, мг/мчПа
1	Известково-песчаная штукатурка	1600	20	0,81	0,12
2	Блок ячеистобетонный	500	300	0,17	0,2
3	Плиты минераловатные	75	140	0,0419	0,57
4	Вентилируемая воздушная прослойка	–	50	–	–
5	Кирпич силикатный утолщенный	1600	120	1,28	0,12



**а** – конструкция наружной стены, **б** – график распределения температуры, **в** – график распределения парциальных давлений: при заданных влажностях наружного и внутреннего воздуха (**е**), максимального (**Е**), **г** – график распределения относительных влажностей; 1–5 – слои стены согласно таблице 1

*Рисунок 1.2 – Конструкция наружной стены*

## 2 Определение величин температур в слоях криволинейной ограждающей конструкции

Температурное поле, возникающее в толще криволинейных ограждающих конструкций, в общем случае может быть представлено законом Фурье в цилиндрической системе координат:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \left( \lambda_r \cdot r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda_\varphi \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = 0, \quad (2.1)$$

где  $\lambda_r, \lambda_\varphi, \lambda_z$  – теплопроводности материала по направлениям  $r, \varphi, z$  соответственно, Вт/(мС).

При принятии равным нулю градиента температур по высоте и углу в ограждающей конструкции, принятии величины теплопроводности материала постоянной величиной уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{r} \frac{dt}{dr} \left( \lambda_r \cdot r \frac{dt}{dr} \right) = 0, \Rightarrow \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} + \frac{d^2 t}{dr^2} = 0, \quad (2.2)$$

или в упрощенной форме записи с использованием конечных разностей вместо дифференциалов с использованием [6–8]:

$$\frac{\Delta r}{r} \Delta t + \Delta^2 t = 0. \quad (2.3)$$

Решение дифференциального уравнения (2.2) существует, однако представление результатов в табличной форме Excel неудобно и связано с вводом длинных, громоздких формул, запись которых изменяется на стыках слоев многослойной ограждающей конструкции. Такое решение не может быть применено для всего массива данных универсально.

Для решения уравнения (2.3) в конечно-разностной форме необходимо представить запись отдельных входящих величин в следующем виде:

$$r = r_0 + i \frac{r_n - r_0}{n}, \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{r_n - r_0}{r_0 (n - i) + i r_n}, \quad (2.5)$$

$$dt = \Delta t = t_{i+1} - t_i, \quad (2.6)$$

$$d^2 t = \Delta^2 t = t_{i-1} - 2t_i + t_{i+1}, \quad (2.7)$$

где  $r_0, r_n$  – меньший и больший радиус кривизны цилиндрических поверхностей ограждающей конструкции, м;

$i$  – порядковый номер точки, в которой решается уравнение (1).

Уравнение (3) с учетом записей (4) – (7) и приведением подобных запишется следующим образом:

$$t_{i-1} - \left( \frac{r_n - r_0}{r_0 (n - i) + i r_n} + 2 \right) t_i + \left( \frac{r_n - r_0}{r_0 (n - i) + i r_n} + 1 \right) t_{i+1} = 0, \quad (2.8)$$

Следует рассмотреть формирование системы линейных алгебраических уравнений, используя рисунок 1.1. Слои 1 – N (в качестве иллюстрации N = 3) наружной ограждающей конструкции разделены на равное количество проме-

жуточных слоев, при этом толщины их в пределах каждого слоя одинаковы, но неодинаковы в разноименных слоях.

При решении данной задачи принято, что температуры внутренней и наружной поверхностей вычислены при помощи следующих зависимостей:

$$t_0 = t_в - \frac{t_в - t_n}{R_T \cdot \alpha_в}, \quad (2.9)$$

$$t_n = t_в - \frac{t_в - t_n}{R_T} \left( R_T - \frac{r_0}{r_n} \cdot \frac{1}{\alpha_n} \right), \quad (2.10)$$

где  $t_в$ ,  $t_n$  – расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха, °С,  
 $R_T$  – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м<sup>2</sup> °С/Вт:

$$R_T = \frac{1}{\alpha_в} + r_0 \sum_{j=1}^N \frac{1}{\lambda_j} \ln \left( \frac{r_j}{r_{j-1}} \right) + \frac{r_0}{r_n} \cdot \frac{1}{\alpha_n}, \quad (2.11)$$

$\alpha_в$ ,  $\alpha_n$  – коэффициенты теплоотдачи с внутренней и наружной поверхностей, Вт/м<sup>2</sup>С,

$j$  – порядковый номер слоя.

Таким образом, требуется вычислить величины температур в  $n-1$  точках.

При составлении уравнений типа (2.8) следует рассмотреть следующие случаи:

1) температура в точке 1

$$-\left( \frac{r_n - r_0}{r_0(n-1) + r_n} + 2 \right) t_1 + \left( \frac{r_n - r_0}{r_0(n-1) + r_n} + 1 \right) t_2 = -t_0; \quad (2.12)$$

2) температура в точке  $n-1$  (предпоследней)

$$t_{n-2} - \left( \frac{r_n - r_0}{r_0 + (n-1) \cdot r_n} + 2 \right) t_{n-1} = - \left( \frac{r_n - r_0}{r_0 + (n-1) \cdot r_n} + 1 \right) t_n; \quad (2.13)$$

3) граница слоев (использован закон Фурье)

$$q = \frac{t_{i-1} - t_i}{\frac{r_i}{\lambda_j} \ln \left( \frac{r_i}{r_{i-1}} \right)}; \quad q = \frac{t_i - t_{i+1}}{\frac{r_i}{\lambda_{j+1}} \ln \left( \frac{r_{i+1}}{r_i} \right)}. \quad (2.14)$$

Приравнивая друг к другу выражения (14) можно получить

$$t_{i-1} \frac{1}{\frac{r_i}{\lambda_j} \ln \left( \frac{r_i}{r_{i-1}} \right)} - t_i \left( \frac{1}{\frac{r_i}{\lambda_j} \ln \left( \frac{r_i}{r_{i-1}} \right)} + \frac{1}{\frac{r_i}{\lambda_{j+1}} \ln \left( \frac{r_{i+1}}{r_i} \right)} \right) + t_{i+1} \frac{1}{\frac{r_i}{\lambda_{j+1}} \ln \left( \frac{r_{i+1}}{r_i} \right)} = 0, \quad (2.15)$$

$t_n$  – температура в точке  $n$  температура наружной поверхности стены, С.

На основе выражений (2.4) – (2.15) можно составить систему линейных уравнений для каждой внутренней точки ограждающей конструкции в порядке ее разбиения по толщине слоев. Решение этой системы уравнений можно произвести матричным методом:

$$[\Lambda] \cdot [t] = [S], \quad (2.16)$$

где  $[\Lambda]$  – матрица из коэффициентов из неизвестных величинах температур,

$[t]$  – вектор неизвестных температур,

$[S]$  – вектор свободных членов.

Формирование матриц и векторов можно представить в следующем виде:

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\frac{r_i}{\lambda_j} \ln\left(\frac{r_i}{r_{i-1}}\right)} - \left( \frac{1}{\frac{r_i}{\lambda_j} \ln\left(\frac{r_i}{r_{i-1}}\right)} + \frac{1}{\frac{r_i}{\lambda_{j+1}} \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)} \right) \frac{1}{\frac{r_i}{\lambda_{j+1}} \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$[S] = \left[ -t_0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad -t_n \left( \frac{r_n - r_0}{r_0 + (n-1) \cdot r_n} + 1 \right) \right]^T. \quad (2.18)$$

Решение уравнения (2.16) можно представить в следующем виде:

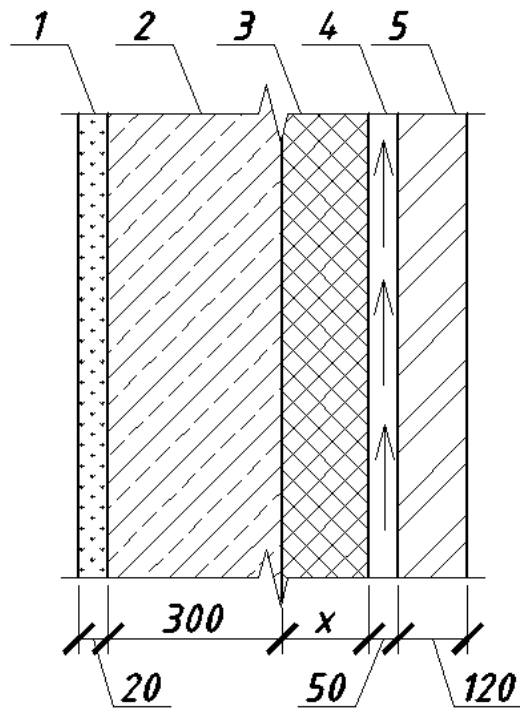
$$[t] = [\Lambda]^{-1} \cdot [S], \quad (2.19)$$

результатом которого является вектор температур в каждой расчетной точке.

Предложенный вариант построения одномерного температурного поля в криволинейных ограждающих конструкциях реализован в табличной форме Excel для наружной стены, конструкция которой представлена на рисунке 2.1, характеристики материалов которой сведены в таблицу 2.1. Каждый слой разделен на пять равных по ширине участков.

**Таблица 2.1 – Параметры материалов наружной стены**

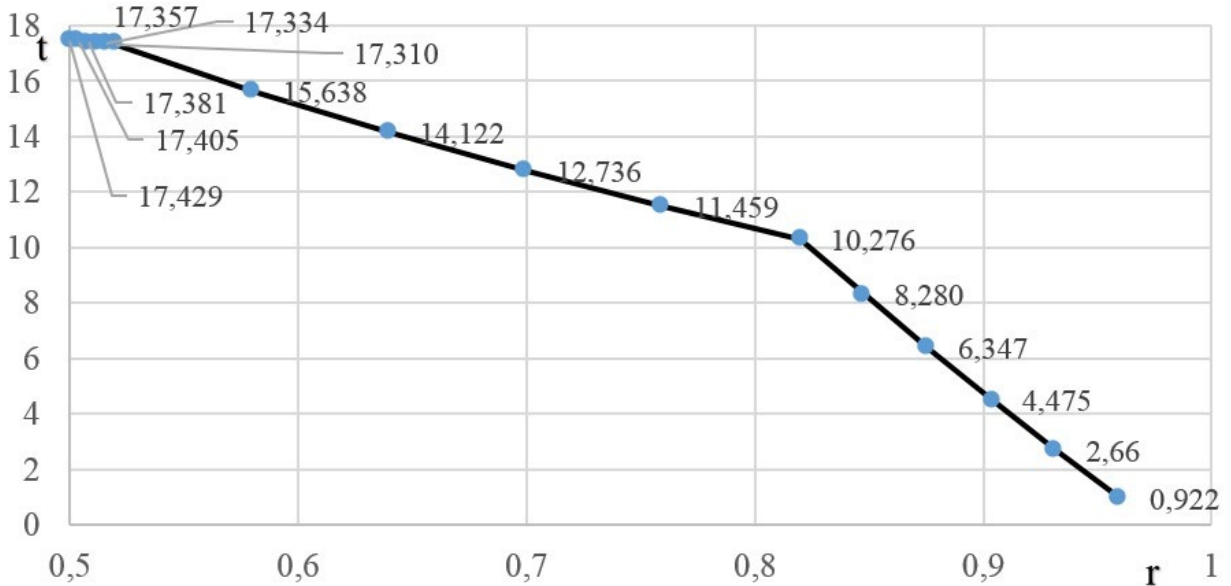
№ п/п	Наименование материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Толщина, мм	Теплопроводность, Вт/мС
1	Известково-песчаная штукатурка	1600	20	0,81
2	Блок ячеистобетонный	500	300	0,17
3	Плиты минераловатные	75	140	0,0419
4	Вентилируемая воздушная прослойка	–	50	
5	Кирпич силикатный утолщенный	1600	120	1,28



1 – известково-песчаная штукатурка, 2 – блок ячеистобетонный, 3 – плиты минераловатные, 4 – вентилируемая воздушная прослойка, 5 – лицевая кладка

*Рисунок 2.1 – Конструкция наружной стены*

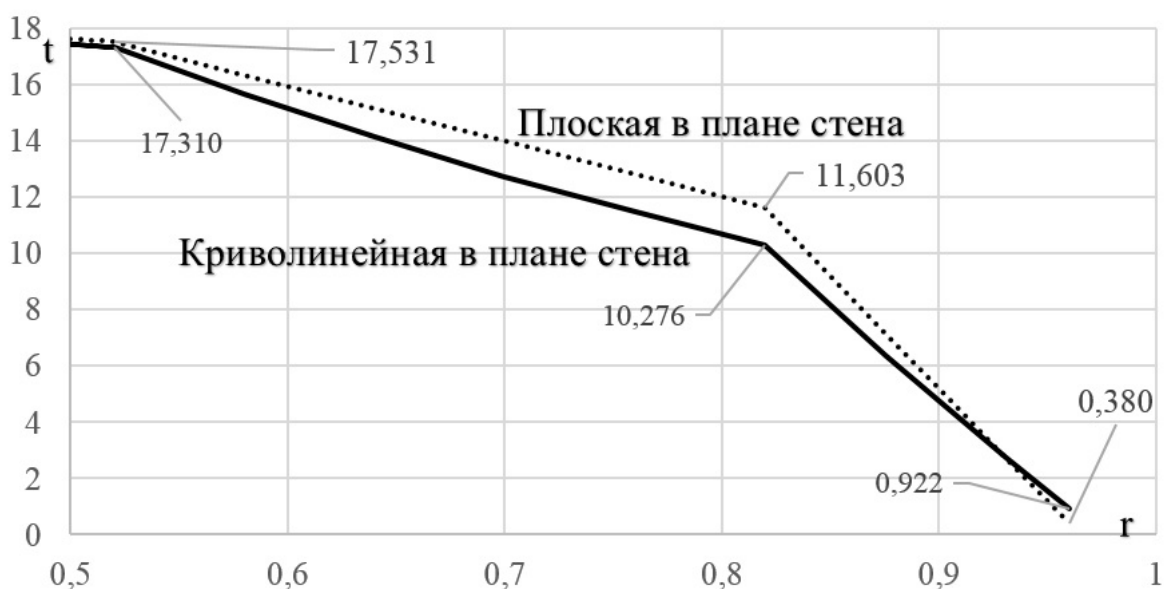
Результаты расчета представлены на рисунке 2.2.



*Рисунок 2.2 – График изменения температуры по слоям наружной стены с внутренним радиусом кривизны 0,5 м*

Для сравнения на рисунке 2.3 приведены результаты расчета величин температур в тех же точках без учета криволинейности ограждающих конструкций.





**Рисунок 2.3 – Сравнение графиков изменения температур в толще криволинейной в плане и плоской наружной стены одинакового состава**

Несовпадение результатов расчета в приведенном примере составляет до 1,4 °С. В связи с этим нельзя достоверно утверждать, что применение методов теплотехнического расчета для плоских ограждающих конструкций применимо для криволинейных, а также разница в результатах может значительно сказаться на расчетном местоположении точки росы в подобном ограждении.

Учебное издание

Составители: Глушко Константин Константинович  
Коваленко Дина Викторовна

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к выполнению курсовой работы  
**«ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЖИЛОГО ЗДАНИЯ»**  
для студентов специальности

1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»

Ответственный за выпуск:	Глушко К. К.
Редактор	Митлошук М. А.
Компьютерная верстка	Ковальчук Е. Н.
Корректор	Северянина А. Г.

---

Подписано в печать 20.12.2023 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 2,56. Уч. изд. л. 2,75. Заказ № 1381.  
Тираж 19 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 г.