

ванием инновационных решений, ИИ уже сейчас может стать полезным элементом процесса созидания.

Как мы видим теперь искусственный интеллект может предоставить возможности и учащимся, а не только людям, уже работающим в этой области. Поэтому архитектура является областью, перспективной для применения искусственного интеллекта в будущем. ИИ для нее — идеальный инструмент.

#### **Список цитированных источников**

1. Schmidt, K. Ordering systems: coordinative practices and artifacts in architectural design and planning / K. Schmidt // in International Acm Siggroun Conference on Supporting Group Work, New York, USA, 2003.

2. Seely, J. C. K. Digital fabrication in the architectural design process / J. C. K. Seely // Massachusetts Institute of Technology. 2004. Vol. 66. no. 2 – P. 87–90.

3. Guangtian, Z. Innovation of architectural design and extension thinking modes / Z. Guangtian // Journal of Harbin Institute of Technology. – 2006. – Vol. 38, no. 7 – P. 1120–1123.

4. Концепт будущего от нейросети: город будущего и здания, которые смогут расти и дышать [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://novate.ru/blogs/131222/64957/>. – Дата доступа: 18.05.2023.

5. Хабибуллин, И. Р. Актуальность использования нейросетей в образовательных целях / И. Р. Хабибуллин, О. В. Азовцева, А. Д. Гареев. // Молодой ученый. — 2023. — № 13 (460). — С. 176–178. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/460/101127/>. Дата доступа: 17.05.2023.

6. 5 способов изменить архитектуру с помощью искусственного интеллекта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://novate.ru/blogs/270620/55044/>. – Дата доступа: 18.05.2023.

7. Long Hua Ji Application and Optimization of Artificial Intelligence Technology in Architectural Design [Electronic resource]. – Mode access: <https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2022/5170068/>. – Data of access: 18.05.2023.

УДК 563.2

*Юркевич Е. В. Шпаковская А. С.*

*Научный руководитель: старший преподаватель, к. т. н. Глушко К. К.*

### **ПОСТРОЕНИЕ ОДНОМЕРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПЛОСКИХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ В НИХ ВЛАЖНОСТИ**

В работе рассмотрены вопросы построения одномерного температурного поля в плоских ограждающих конструкциях с применением метода конечных разностей для решения уравнения Лапласа стационарной теплопроводности, а также определения влажности в их материалах.

Стационарный процесс теплопередачи через ограждающие конструкции связан с распределением температур внутри их слоев. Математические зависимости, предложенные для проведения теплотехнических расчетов, заложенные в строительных нормах [1], основаны, вообще говоря, на одномерном представлении температурного поля в ограждающих конструкциях [2, 3]. При этом ин-

женеру важно знать не только приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, но и температуру на их внутренних гранях с целью определения местоположения температур точек росы и оценки влажностного режима их эксплуатации.

Конечно-элементные программные комплексы, широко используемые в практике проектирования, требуют высокой квалификации проектировщика и достаточно большого опыта работы с ними. Аналитические методы расчёта могут использоваться для крайне ограниченного круга задач, численные методы решения уравнения теплопроводности для стационарного процесса теплопередачи могут быть достаточно простыми и приспособленными для ручного расчёта без использования дорогостоящего программного оборудования. Их применение также является важным при проверке полученного машинного расчёта.

Представленная работа имеет прежде всего учебную направленность для облегчения проведения вычислений, связанных с построением графиков изменения температур по слоям ограждающих конструкций и определением их влажности. Из этого следует, что разработка математической модели построения одномерного температурного поля с использованием метода конечных разностей является актуальной задачей.

#### **Теоретические предпосылки расчёта.**

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

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) можно записать в следующем виде:

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

конечно-разностное представление которого может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{\Delta^2 t}{h^2} = 0, \quad (3)$$

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

$$t_{i-1} - 2t_i + t_{i+1} = 0, \quad (4)$$

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

Следует отметить, что для многослойной ограждающей конструкции невозможно использовать уравнение (4) в полной мере из-за различия величин теплопроводностей для каждого из слоёв 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 показана схема расстановки точек с номерами от 0 до n=14.

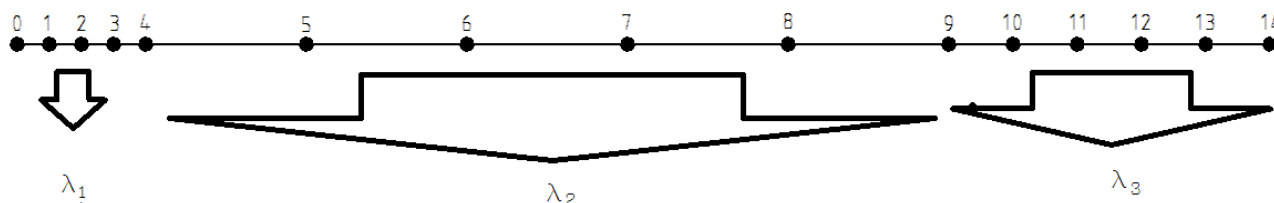


Рисунок 1 – Схема расстановки точек

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

$$t_0 = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_T \cdot \alpha_в}, \quad t_n = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_T} \left( \frac{1}{\alpha_в} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right), \quad (5)$$

где  $t_в$ ,  $t_н$  – расчётные температуры внутреннего и наружного воздуха, °С,  
 $R_T$  – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>°С/Вт,  
 $\alpha_в$  – коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности, Вт/м<sup>2</sup>С.

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

При составлении уравнений типа (4) следует рассмотреть следующие случаи:

1) температура в точке 1:

$$t_0 - 2t_1 + t_2 = 0, \quad (6)$$

откуда:

$$-2t_1 + t_2 = -t_0, \quad (7)$$

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

$$t_{n-2} - 2t_{n-1} + t_n = 0, \quad (8)$$

откуда:

$$t_{n-2} - 2t_{n-1} = -t_n, \quad (9)$$

3) граница слоёв (использован закон Фурье):

$$q = \lambda_{j-1} \frac{t_{i-1} - t_i}{h_{j-1}}; \quad q = \lambda_j \frac{t_i - t_{i+1}}{h_j}, \quad (10)$$

где j – порядковый номер слоя. Выражая числитель выражений (11) и вычитая полученные выражения друг из друга, можно получить

$$t_{i-1} - 2t_i + t_{i+1} = \frac{q}{n} \left( \frac{\delta_{j-1}}{\lambda_{j-1}} - \frac{\delta_j}{\lambda_j} \right), \quad (11)$$

где

$$q = \alpha_n (t_e - t_0) = \alpha_n (t_n - t_n), \quad (12)$$

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 (4) –(13) можно составить систему линейных уравнений для каждой внутренней точки ограждающей конструкции в порядке её разбиения по толщине слоёв. Решение этой системы уравнений можно произвести матричным методом:

$$[\Lambda] \cdot [t] = [S], \quad (13)$$

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:

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 \end{bmatrix}, \quad [S] = \begin{bmatrix} -t_0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \frac{q}{n} \left( \frac{\delta_{j-1}}{\lambda_{j-1}} - \frac{\delta_j}{\lambda_j} \right) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ -t_n \end{bmatrix}, \quad (14)$$

Решение уравнения (13) можно представить в следующем виде:

$$[t] = [\Lambda]^{-1} \cdot [S], \quad (15)$$

результатом которого является вектор температур в каждой расчётной точке.

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

$$e_x = e_e - \frac{e_e - e_n}{R_{\Pi}} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\mu_i}; \quad (16)$$

где  $e_e$  – парциальное давление внутреннего воздуха:

$$e_e = 0,01 \cdot \varphi_e E_e, \quad (17)$$

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

$E_e$  – 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

$$e_n = 0,01 \cdot \varphi_n E_n, \quad (18)$$

$\varphi_n$  – 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];

$R_{п}$  – 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 путём интерполяции либо в виде значения функции, аппроксимирующей нормативные значения парциальных давлений:

1) парциальное давление над поверхностью воды:

$$E(t) = 1000 \cdot e^{\frac{16,57t - 115,72}{233,77 + 0,997t}}, \quad (19)$$

2) общемировой стандарт:

$$E(t) = 611,2 \cdot e^{\frac{17,62t}{243,12 + t}}, \quad (20)$$

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

$$E(t) = -2 \cdot 10^{-7} \cdot t^6 + 7 \cdot 10^{-6} \cdot t^5 + 0,0006 \cdot t^4 + 0,0213 \cdot t^3 + 1,3463 \cdot t^2 + 46,245 \cdot t + 604,71. \quad (21)$$

Выявлено, что наиболее близко величины максимальных величин парциальных давлений описывает функция (21), которая и была принята для последующих расчётов.

Влажность в расчётных точках слоёв ограждающей конструкции может быть найдена по формуле:

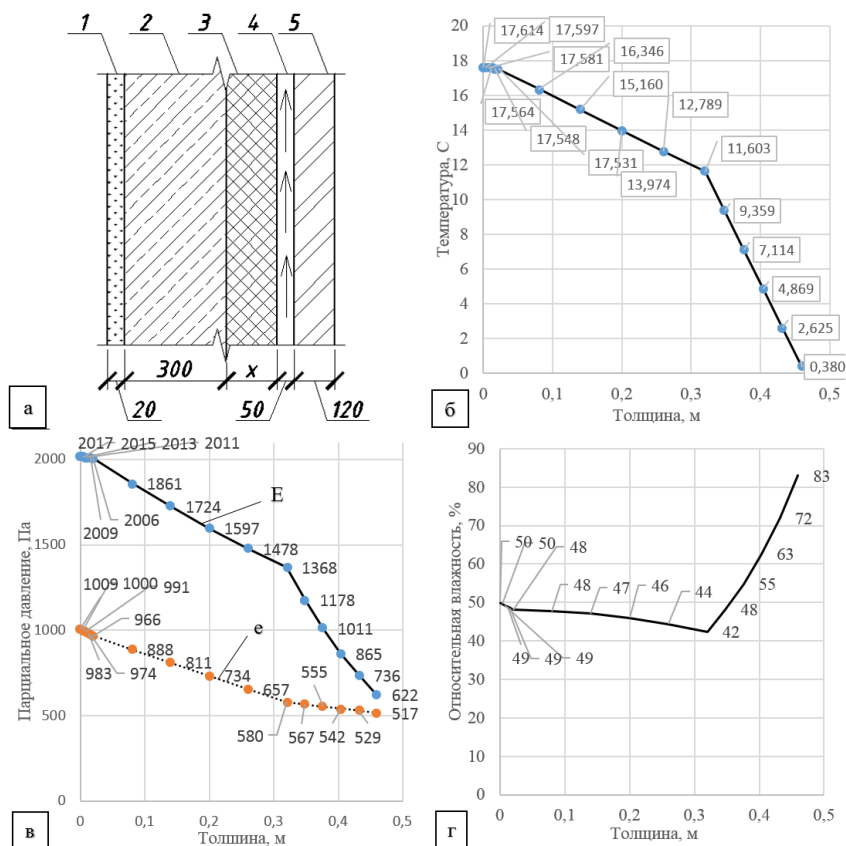
$$\varphi = \frac{e}{E} \cdot 100\%. \quad (22)$$

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 расчёта.

В качестве примера приведён расчёт наружной стены состава, указанного на рисунке 2а, результаты расчёта приведены на рисунках 2б – 2г. В таблицу 1 сведены основные параметры материалов наружной стены.

Таблица 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	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 2 – Конструкция наружной стены

## **Выводы.**

1. Полученные зависимости для построения температурного поля и графиков влажности позволяют сократить время расчёта величин температур и парциальных давлений в слоях плоских ограждающих конструкций без потери точности.

2. Предложенная работа может быть использована для ознакомления студентов с решением задач строительной теплофизики и выполнения части расчётов в рамках курсовых работ и дипломных проектов без применения сложного программного оборудования.

## **Список цитированных источников**

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.

УДК 563.2

*Юркевич Е. В., Шпаковская А. С.*

*Научный руководитель: старший преподаватель, к. т. н. Глушко К. К.*

## **ПОСТРОЕНИЕ ОДНОМЕРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ**

В работе рассмотрены вопросы построения одномерного температурного поля в криволинейных ограждающих конструкциях с применением метода конечных разностей для решения уравнения Лапласа стационарной теплопроводности, а также определения влажности в их материалах.

Стационарный процесс теплопередачи через ограждающие конструкции связан с распределением температур внутри их слоев. Математические зависимости, предложенные для проведения теплотехнических расчетов, заложенные в строительных нормах [1], основаны, вообще говоря, на одномерном представлении температурного поля в ограждающих конструкциях [2, 3]. При этом инженеру важно знать не только приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, но и температуру на их внутренних гранях с целью определения местоположения температур точек росы и оценки влажностного режима их эксплуатации. В существующих нормах, вообще говоря, отсутствуют какие-либо зависимости или рекомендации для проведения теплотехнических расчетов криволинейных ограждающих конструкций.