

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.53078/20778481_2023_2_144

УДК 621.1.016

М. А. Шкильнюк, Д. В. Иванов

АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

M. A. Shkilniuk, D. U. Ivanou

ANALYSIS OF HEAT FLOW IN THE BUILDING ENVELOPE

Аннотация

Проведены исследование и анализ теплового потока в ограждающей конструкции. Даны результаты фактических и теоретических значений теплотехнических характеристик. Приведены основные проблемы, возникающие при теплотехническом расчете.

Ключевые слова:

тепловой поток, теплотехнические характеристики, плотность теплового потока, теплотехника.

Для цитирования:

Шкильнюк, М. А. Анализ теплового потока в ограждающей конструкции / М. А. Шкильнюк, Д. В. Иванов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 144–152.

Abstract

A study and analysis of the heat flow in the enclosing structure have been carried out. The results of actual and theoretical values of thermo-technical characteristics are given. The main problems arising in the thermo-technical calculations are presented.

Keywords:

heat flow, thermos-technical characteristics, heat flow density, heat engineering.

For citation:

Shkilniuk, M. A. Analysis of heat flow in the bulding envelope / M. A. Shkilniuk, D. U. Ivanov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 2 (79). – P. 144–152.

Введение

Динамические тепловые характеристики внешних стеновых конструкций напрямую связаны с температурным комфортом в помещениях. Упрощенные методы расчета, изложенные в нормативных документах, без дополнения аналитической оценки не обеспечивают полноту проводимых расчетов, а лишь

содержат обобщенные, зачастую укрупненные значения и показатели, не привязанные к конкретному объекту. При этом моделирование в обязательном порядке включает в себя применение специализированных программ, позволяющих провести оценку рисков, аналитическую предиктивную оценку на конкретном объекте, основанную на искусственном интеллекте, современных технологиях и

методах расчета [1, 2].

Цель исследования заключалась в сравнении фактических и теоретических теплотехнических значений.

Изучение тепловых характеристик ограждающих конструкций может помочь с выбором рационального решения по утеплению зданий, что повлечет за собой экономию как на материалах, так и на затратах энергии для поддержания комфортных условий в зданиях и сооружениях [3].

Проведение исследования

Было проведено исследование ограждающей конструкции здания корпуса № 5 Белорусско-Российского университета, расположенного по адресу г. Могилев, ул. Ровчакова, д. 7.

В рамках исследования был применен измеритель плотности теплового потока и температуры ИТП-МГ 4.03/10(I) «ПОТОК» (рис. 1). Данный прибор предназначен для измерения плотности

теплового потока, проходящего через теплообменные поверхности теплоэнергетических объектов, а также температуры таких поверхностей и окружающих их газообразных и сыпучих сред.

Принцип действия, положенный в основу работы данного прибора, заключается в измерении термоЭДС контактных термоэлектрических датчиков теплового потока и сопротивления датчиков температуры.

Плотность теплового потока q вычисляется по формуле

$$q = K \cdot E,$$

где K – коэффициент преобразования, Вт/(м²·мВ); E – величина термоэлектрического сигнала, мВ.

Для получения данных были расположены четыре датчика температуры и три датчика измерения плотности теплового потока (рис. 2 и 3).



Рис. 1. Измеритель плотности теплового потока

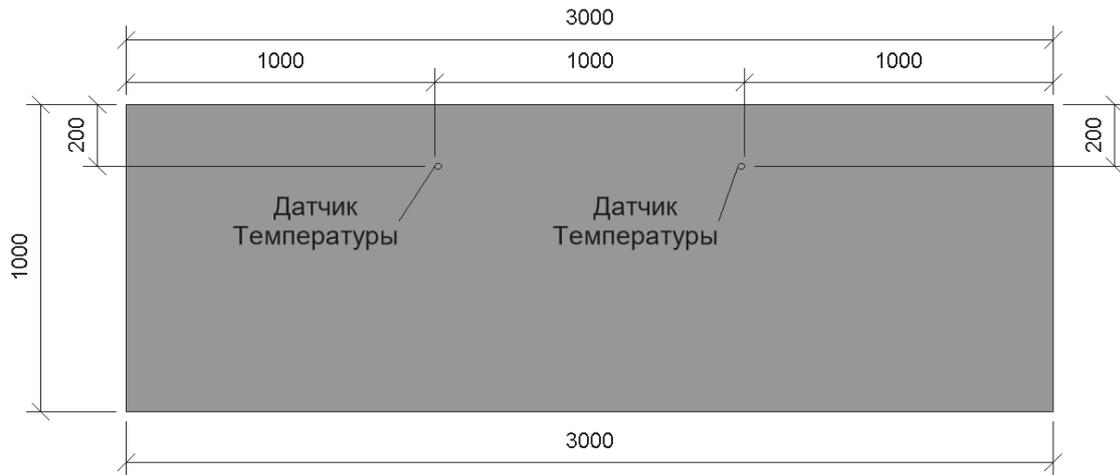


Рис. 2. Схема расположения датчиков температуры на наружной поверхности стены

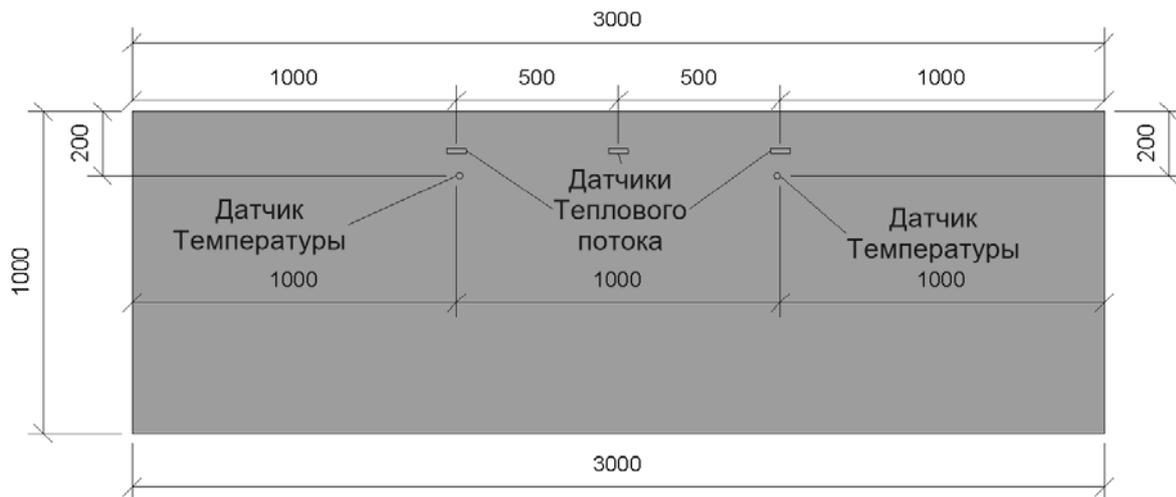


Рис. 3. Схема расположения датчиков температуры и датчиков теплового потока на внутренней поверхности стены

Исследование проводилось 2 ч с интервалом измерений 2 мин. Температура внутри помещения составляла 12 °С,

снаружи помещения – 19 °С. В результате было получено 60 значений, приведенных в табл. 1.

Табл. 1. Результаты измерения прибора ИТП-МГ4.03/10(1) «ПОТОК»

| Номер измерения | q_1 , Вт/м ² | q_2 , Вт/м ² | q_3 , Вт/м ² | t_1 , °С | t_2 , °С | t_3 , °С | t_4 , °С |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 12 | 14,3 | 10,6 | 17,5 | 18,7 | 13,8 | 13,8 |
| 2 | 11 | 10,7 | 9 | 17,5 | 18,5 | 13,8 | 13,8 |
| 3 | 10 | 13,1 | 9 | 17,5 | 18,4 | 13,8 | 13,8 |

Продолжение табл. 1

| Номер измерения | q_1 , Вт/м ² | q_2 , Вт/м ² | q_3 , Вт/м ² | t_1 , °C | t_2 , °C | t_3 , °C | t_4 , °C |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 4 | 10,5 | 11,8 | 9,9 | 17,4 | 18,4 | 13,8 | 13,8 |
| 5 | 10,6 | 11,2 | 9,4 | 17,4 | 18,3 | 13,8 | 13,8 |
| 6 | 10,2 | 11,8 | 9,2 | 17,4 | 18,3 | 13,8 | 13,8 |
| 7 | 9 | 10,3 | 8,3 | 17,4 | 18,3 | 13,8 | 13,8 |
| 8 | 9 | 9,8 | 8 | 17,5 | 18,3 | 13,8 | 13,8 |
| 9 | 8,7 | 10,4 | 8,3 | 17,4 | 18,3 | 13,8 | 13,8 |
| 10 | 10,1 | 10,7 | 9,1 | 17,4 | 18,2 | 13,8 | 13,8 |
| 11 | 8,9 | 11 | 8,9 | 17,5 | 18,2 | 13,8 | 13,8 |
| 12 | 8,7 | 10,3 | 7,9 | 17,5 | 18,3 | 13,8 | 13,8 |
| 13 | 8,8 | 10,6 | 9 | 17,4 | 18,2 | 13,8 | 13,8 |
| 14 | 9,5 | 10,9 | 9,4 | 17,5 | 18,2 | 13,8 | 13,8 |
| 15 | 9,5 | 11 | 9 | 17,4 | 18,2 | 13,8 | 13,8 |
| 16 | 9,2 | 11,4 | 8,8 | 17,4 | 18,2 | 13,8 | 13,8 |
| 17 | 9,3 | 11,1 | 9,4 | 17,5 | 18,3 | 13,8 | 13,8 |
| 18 | 8,4 | 10 | 8,5 | 17,4 | 18,2 | 13,8 | 13,8 |
| 19 | 9,6 | 11,5 | 9 | 17,4 | 18,1 | 13,8 | 13,8 |
| 20 | 10,9 | 11,8 | 10 | 17,5 | 18,2 | 13,8 | 13,8 |
| 21 | 10,5 | 11,4 | 9,8 | 17,4 | 18,1 | 13,8 | 13,8 |
| 22 | 12 | 11,9 | 10,5 | 17,4 | 18,1 | 13,8 | 13,8 |
| 23 | 9 | 10,6 | 8,5 | 17,4 | 18,1 | 13,8 | 13,8 |
| 24 | 9,7 | 10,5 | 9,1 | 17,5 | 18,2 | 13,8 | 13,8 |
| 25 | 9,9 | 11 | 9,4 | 17,5 | 18,2 | 13,8 | 13,8 |
| 26 | 10,4 | 11,2 | 10 | 17,5 | 18,3 | 13,8 | 13,8 |
| 27 | 11,1 | 13,1 | 11,2 | 17,6 | 18,4 | 13,8 | 13,9 |
| 28 | 9,4 | 11,5 | 9,8 | 17,7 | 18,4 | 13,8 | 13,9 |
| 29 | 9,3 | 11,2 | 9,3 | 17,6 | 18,4 | 13,8 | 13,9 |
| 30 | 10,4 | 11,7 | 10,8 | 17,6 | 18,4 | 13,9 | 13,9 |
| 31 | 11,1 | 12,1 | 10,6 | 17,6 | 18,4 | 13,9 | 13,9 |
| 32 | 11,1 | 12,7 | 10,3 | 17,7 | 18,5 | 13,9 | 13,9 |
| 33 | 11 | 12,2 | 10,6 | 17,8 | 18,5 | 13,9 | 13,9 |
| 34 | 10 | 12,3 | 10 | 17,8 | 18,6 | 13,9 | 13,9 |
| 35 | 10,8 | 11,7 | 11,2 | 17,9 | 18,6 | 13,9 | 13,9 |
| 36 | 10,1 | 11,6 | 9,8 | 17,8 | 18,5 | 13,9 | 13,9 |
| 37 | 11,7 | 12,9 | 11,4 | 17,9 | 18,6 | 13,9 | 13,9 |
| 38 | 10,3 | 11,7 | 11,1 | 17,9 | 18,6 | 13,9 | 13,9 |
| 39 | 11,3 | 11,8 | 10,5 | 17,9 | 18,6 | 13,9 | 13,9 |
| 40 | 9,8 | 11,8 | 9,9 | 17,9 | 18,6 | 13,9 | 13,9 |

Окончание табл. 1

| Номер измерения | q_1 , Вт/м ² | q_2 , Вт/м ² | q_3 , Вт/м ² | t_1 , °C | t_2 , °C | t_3 , °C | t_4 , °C |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 41 | 10,3 | 11,6 | 9,6 | 17,9 | 18,5 | 13,9 | 13,9 |
| 42 | 10 | 11,2 | 9,8 | 18 | 18,6 | 14 | 14 |
| 43 | 12,1 | 12,9 | 10,8 | 18 | 18,7 | 14 | 14 |
| 44 | 9,9 | 11,8 | 9,6 | 18 | 18,7 | 14 | 14 |
| 45 | 9,7 | 11,2 | 9,7 | 17,9 | 18,6 | 14 | 14 |
| 46 | 9,6 | 11,3 | 8,3 | 17,8 | 18,5 | 14 | 14 |
| 47 | 10,3 | 12,4 | 10,8 | 17,8 | 18,5 | 14 | 14 |
| 48 | 10,9 | 12,7 | 11,7 | 17,8 | 18,5 | 14 | 14 |
| 49 | 11,2 | 14,5 | 12,2 | 17,8 | 18,4 | 14 | 14,1 |
| 50 | 11,5 | 11,1 | 9,2 | 17,7 | 18,4 | 14 | 14,1 |
| 51 | 9,6 | 10,8 | 8,9 | 17,7 | 18,3 | 14 | 14 |
| 52 | 8,9 | 10,3 | 8,3 | 17,6 | 18,2 | 14 | 14,1 |
| 53 | 10,9 | 12,3 | 10,4 | 17,7 | 18,4 | 14 | 14,1 |
| 54 | 10,8 | 12,2 | 10,6 | 17,8 | 18,5 | 14 | 14,1 |
| 55 | 10,8 | 12,1 | 10,3 | 17,8 | 18,5 | 14 | 14,1 |
| 56 | 9,3 | 11,3 | 9 | 17,9 | 18,6 | 14 | 14,1 |
| 57 | 10,9 | 14,8 | 12,6 | 18 | 18,7 | 14,1 | 14,1 |
| 58 | 11,7 | 13,1 | 10,9 | 18,1 | 18,8 | 14,1 | 14,1 |
| 59 | 12,1 | 12,8 | 11,3 | 18,1 | 18,8 | 14,1 | 14,1 |
| 60 | 10,4 | 11,5 | 10 | 18,1 | 18,8 | 14,1 | 14,1 |

По результатам измерений были построены графики температуры внутри помещения и снаружи (рис. 4 и 5).

По результатам измерений был построен график изменения плотности теплового потока в течение 2 ч (рис. 6).

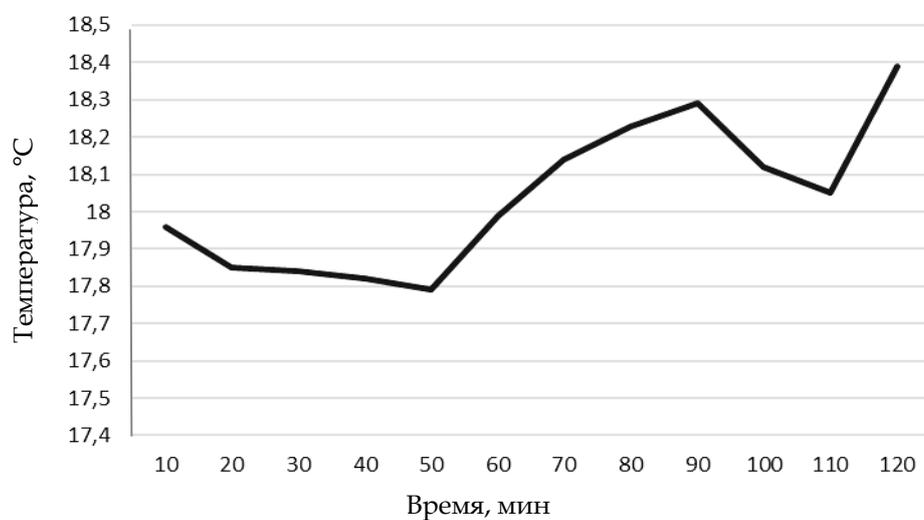


Рис. 4. График изменения температуры на наружной поверхности стены

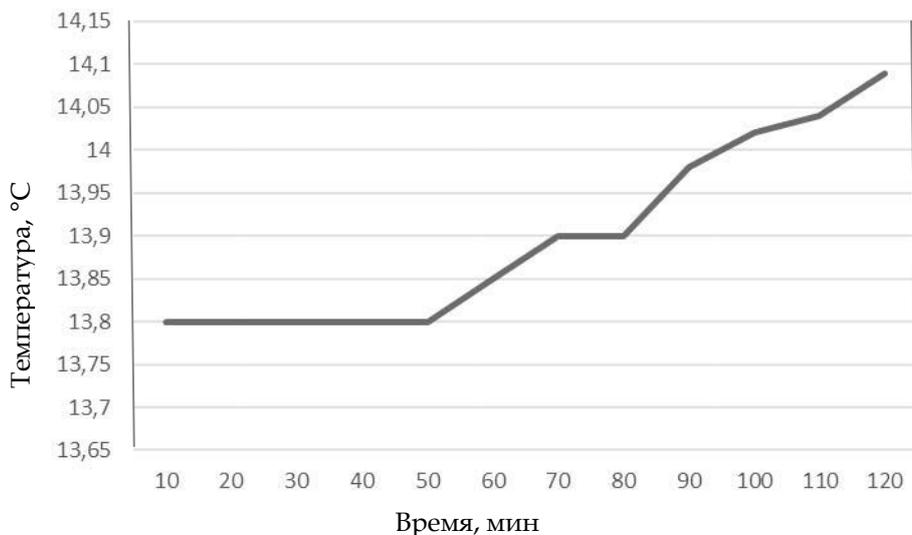


Рис. 5. График изменения температуры на внутренней поверхности стены

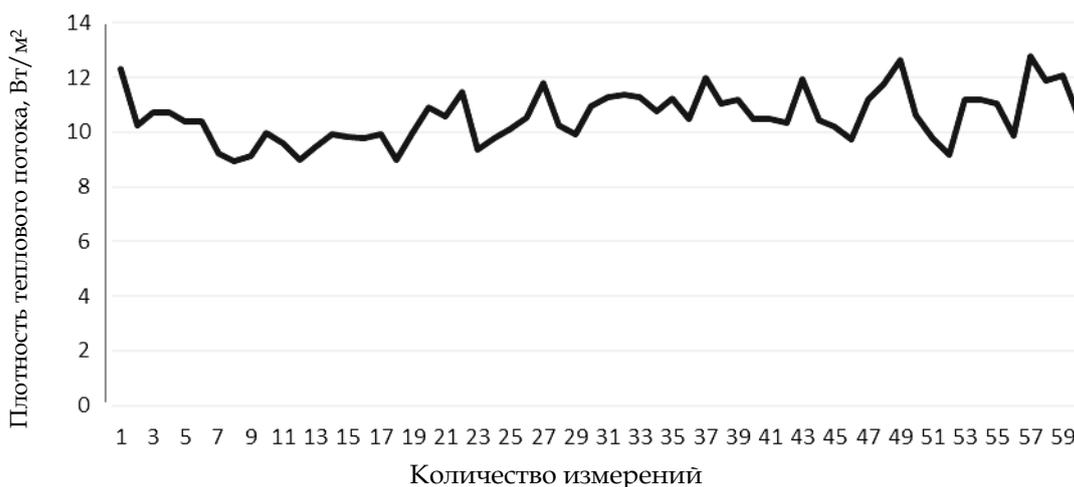


Рис. 6. График изменения плотности теплового потока

Было получено среднее значение теплового потока, равное $10,57 \text{ Вт/м}^2$.

Проведение теоретического расчета

Для проведения теоретического расчета было использовано программное обеспечение Ansys. Была построена модель участка стены, соответствующая по размерам и параметрам участку исследования.

Методом конечных элементов мо-

дель стены была разбита на 9600 элементов и для каждого из них был проведен теплотехнический расчет (рис. 7).

Был проведен динамический расчет теплотехники смоделированной стены. Время, заданное для моделирования, – 2 ч (рис. 8).

На рис. 9 представлен результат моделирования стены на момент окончания моделирования (2 ч). Полученное значение плотности теплового потока равно $9,5038 \text{ Вт/м}^2$.

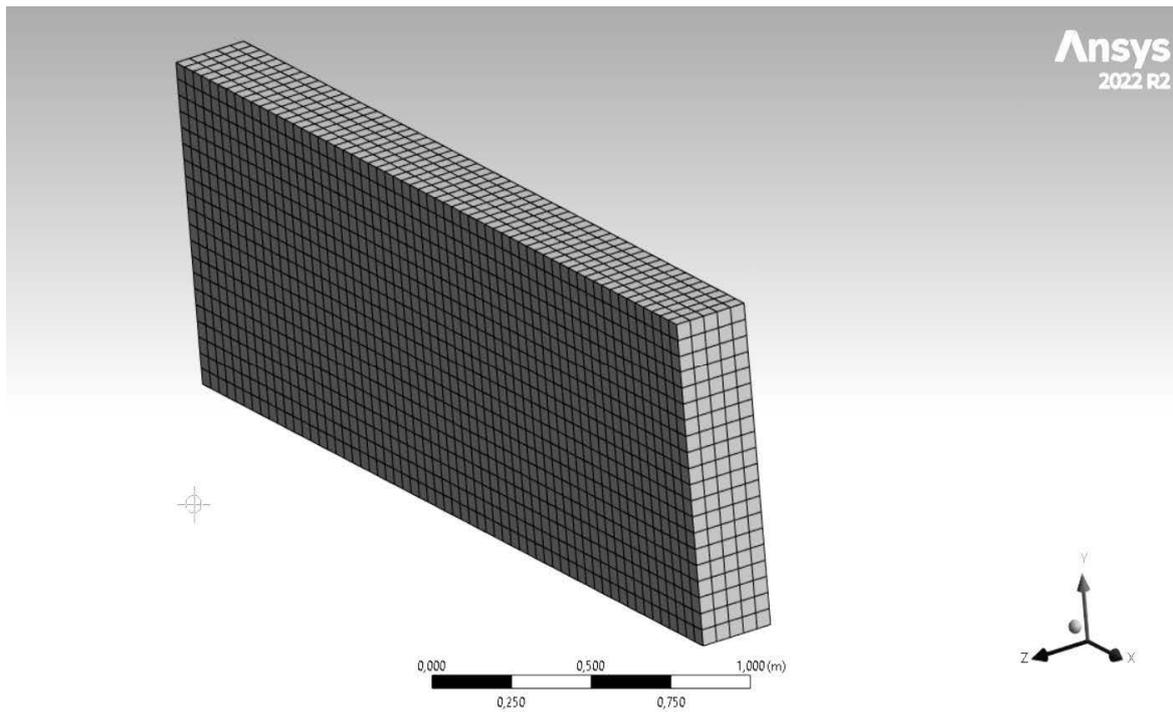


Рис. 7. Конечно-элементная модель стены

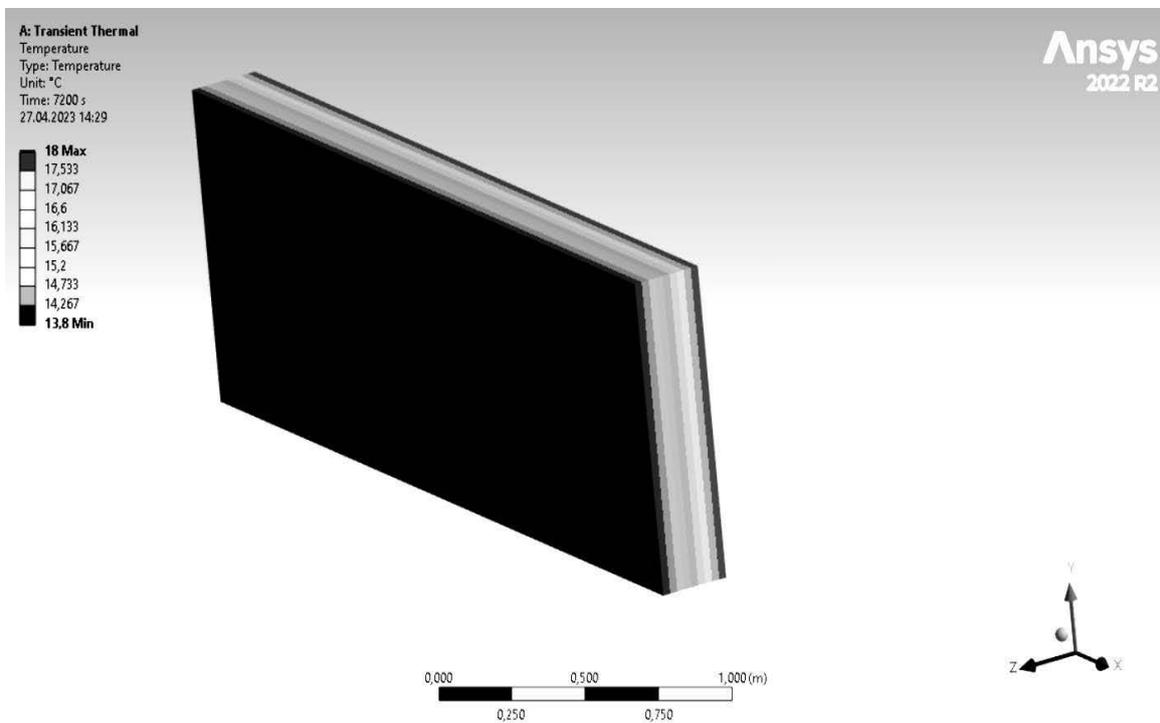


Рис. 8. Распределение температуры внутри стены

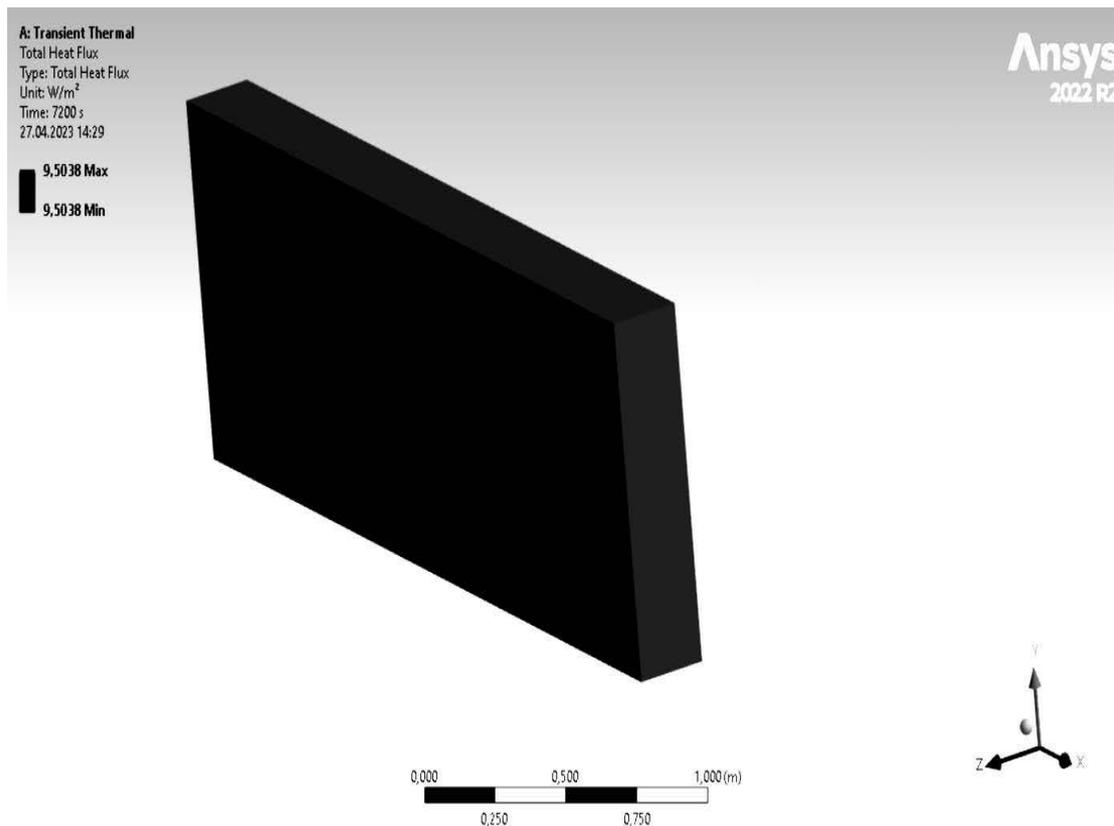


Рис. 9. Распределение плотности теплового потока в стене

Тепловой поток через участок ограждающей конструкции определяют по результатам расчета температурного поля по формуле

$$Q_i = \alpha_e \cdot (t_e - t_{e,n}) \cdot A_i,$$

где t_e , $t_{e,n}$ – температура внутреннего воздуха и температура внутренней поверхности соответственно, °C; A_i – площадь участка ограждающей конструкции, м².

$$Q_i = 8,7 \cdot (12 - 13,6) \cdot 3 = -41,76 \text{ Вт.}$$

Знак «минус» означает, что направление теплового потока направлено в другую сторону. При ручном расчете плотность теплового потока равна 13,92 Вт/м² [4, 5].

Сравнение фактических и теоретических данных

В теоретическом расчете было получено значение плотности теплового потока, равное 9,5038 Вт/м². Фактически было получено значение плотности теплового потока, равное 10,57 Вт/м². По ручному расчету, которым пользуются в конструкторской деятельности при проектировании зданий, получили значение 13,92 Вт/м². Сравнительный анализ приведен в табл. 2.

После анализа полученных значений можно сказать, что износ здания влияет на значение теплотехнических характеристик и при расчете таких зданий необходимо введение поправочного коэффициента.

Также значение, полученное при ручном расчете, оказалось слишком велико, что может привести к перерасходу

материалов и, как следствие, повышению стоимости здания.

Табл. 2. Сравнительный анализ полученных результатов

| Номер | Способ проведения | Значение теплового потока Q , Вт | Значение плотности теплового потока q , Вт/м ² | Процентное соотношение полученных результатов от фактического |
|-------|----------------------|------------------------------------|---|---|
| 1 | Фактические значения | 31,71 | 10,57 | 100 % |
| 2 | Ручной расчет | 41,76 | 13,92 | 131,7 % |
| 3 | Расчет в Ansys | 28,51 | 9,5038 | 89,8 % |

Заключение

Было проведено исследование, в результате которого получены следующие результаты.

1. Упрощенный теплотехнический расчет приводит к последующему упрощенному конструированию тепловой защиты зданий и сооружений. Это выражается в нерациональном запасе закладываемого утеплителя, что приводит к увеличению стоимости строительства и наличию ошибок при проек-

тировании.

2. Использование программного обеспечения позволяет проводить подбор тепловой защиты зданий и сооружений без ошибок на этапе проектирования.

3. По результатам исследования было получено, что теплотехнические характеристики зданий и сооружений со временем ухудшаются. Для качества их машинного расчета необходимо введение поправочного коэффициента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. EPBD. On the energy performance of buildings // Official Journal of the European Union. – 2010.
2. Dixon, W. The impacts of construction and the built environment / W. Dixon // Briefing Notes, Willmott-Dixon Group. – 2010.
3. Poel, B. Energy performance assessment of existing dwellings / B. Poel, G. van Cruchten, C. A. Balaras // Energy and Buildings. – 2007. – Vol. 39, № 4. – P. 393–403.
4. СП 2.04.01–2020. Строительная теплотехника. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 72 с.
5. Ульянов, Ю. Н. Основы теплотехники / Ю. Н. Ульянов, С. Ф. Вольвак. – Майский: Белгород. гос. аграрный ун-т им. В. Я. Горина, 2020. – 92 с.

Статья сдана в редакцию 2 мая 2023 года

Максим Александрович Шкильнюк, магистр, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-48-98-94.

Дмитрий Владимирович Иванов, магистрант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-14-13-66.

Maksim Alexandrovich Shkilniuk, Master Sc. (Tech.), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, post-graduate student, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-298-48-98-94.

Dzmitriy Uladzimirovich Ivanou, master's degree student, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-298-14-13-66.