

Research Article

Received: July 10, 2023

Accepted: August 7, 2023

Published: August 14, 2023

ISSN 2658-5553

Detailed modeling of temperature fields and thermophysical processes in enclosing structures

Badenko, Vladimir Lvovich¹ Mikhalkov, Dmitry² Shkilniuk, Maksim^{2*} Olshevskiy, Vyacheslav Yanushevich ¹

¹ Saint Petersburg State Polytechnical University: Saint Petersburg, Russian Federation; badenko_vl@spbstu.ru (B.V.L.), olshevskij_vya@spbstu.ru (O. V. Y.)

² Belarusian Russian University: Mogilev, Republic of Belarus; mikhalkovdv@yandex.by (M.D.); eeld9696@gmail.com (S.M.)

Correspondence:* email eeld9696@gmail.com; contact phone [+375298489894](tel:+375298489894)

Keywords:

Heat engineering calculation; Thermophysical processes; Heat engineering characteristics; Heat transfer; Calculation detailing; Calculation automation

Abstract:

The object of research is to study the thermal characteristics of exterior wall structures. This work aims to study the influence of small-sized elements inside the wall on its thermal characteristics. **Method.** In this study, thermal engineering calculations were carried out manually following the regulatory documents of the Republic of Belarus and the program method using the ELCUT program. Thermal imaging of the studied sections of the wall was carried out. **Results.** It was shown that the presence of small-sized elements in the structural model would significantly impact the amount of heat flow of this enclosing structure, and considering small-sized elements in enclosing structures when designing is crucial to achieving thermal comfort indoors and energy efficiency of buildings.

1 Introduction

Коммунальное хозяйство является одним из крупнейших энергетических потребителей в мире. Например, в Европе на отопление приходится 40% от общего конечного потребления энергии в ЕС [1]. Отопление жилых помещений составляет 60% от общего энергопотребления, 36% выбросов углекислого газа [2], [3] и 50% на спрос на электроэнергию [4] в мире. Наблюдается тенденция к увеличению числа исследований по снижению энергопотребления жилых зданий, включая разработку подходящих моделей для оценки энергоэффективности [5].

Одним из факторов, которые позволят повысить адекватность оценки энергоэффективности зданий, является проведение подробного и детализированного анализа теплопереноса через ограждающие конструкции [6], [7]. При этом важно учитывать, что в настоящее время мало примеров систем идентификации и мониторинга величины тепловых потерь на объектах капитального строительства и отдельных их составляющих [8].

Теплотехника ограждающих конструкций представляет собой систему конструктивных решений, направленных на обеспечение соответствия температурно-влажностного режима зданий как требованиям действующих нормативных документов, так и условиям эксплуатации и микроклимата, позволяющих человеку чувствовать себя комфортно внутри помещения. Строительные материалы, используемые в ограждающих конструкциях, должны иметь в том числе низкий коэффициент теплопроводности для обеспечения требований по энергоэффективности в условиях поддержания комфортного микроклимата в помещении [9-11].

Badenko, V.; Mikhalkov, D.; Shkilniuk, M.; Olshevskiy V.

Detailed modeling of temperature fields and thermophysical processes in enclosing structures; 2023; *AlfaBuild*; 29 Article No 2904. doi: 10.57728/ALF.29.4



В связи с вышеуказанным в мире проводится значительный объем исследований для изучения влияния типа теплоизоляционных материалов, их толщины и расположения на теплотехнические свойства ограждающих конструкций [12], [13]. Кроме того, рациональному, экономному и правильному использованию теплоизоляционных материалов способствует разработка и использование различных систем моделирования для анализа тепловых потерь и проектирования энергоэффективных зданий и сооружений [14]-[15].

Нормативные документы различных стран Европы регламентируют расчет теплотехнических характеристик ограждающих конструкций с учетом потребности проектирования зданий с низким энергопотреблением, т.н. энергоэффективных зданий. Целью такого проектирования является разработка зданий с минимизируемыми затратами на отопление путем использования эффективной теплоизоляции строительных конструкций, новых инженерных систем, учета местности, моделирования отопительных приборов и т.д. Нормативные документы требуют обеспечить соответствие температурно-влажностного режима здания как мероприятия, непосредственно влияющего на обеспечение безопасности. Соответственно мы можем говорить о том, что исследование эффективности теплоизоляции строительных конструкций является актуальной задачей, обеспечивающей безопасность. Учет тепловых потерь через строительные конструкции оказывает существенное влияние, а зачастую является основополагающим фактором, при выборе систем тепловой защиты здания. Влияние толщины и других геометрических характеристик теплоизоляционного слоя на теплотехнические свойства внешней конструкции стены различно для различных типов изоляционных материалов [16], [17].

Согласно требованиям нормативных документов расчет можно проводить по достаточно упрощенной методике подбора толщины утеплителя путем определения приведенного сопротивления теплопередаче конструкций перекрытий и покрытий, стеновых ограждающих конструкций с учетом справочных данных значений удельных сопротивлений строительных материалов и усредненных климатических характеристик. При этом нормы Беларуси требуют увеличения расчетного значения приведенного сопротивления теплопередаче на 10% в случае использования упрощенных методов расчета, что, на наш взгляд, является в достаточной степени обоснованным. Это позволяет не учитывать особенности строения конструкций, принимая обобщенно ограждающую конструкцию как плоскую многослойную площадку однородных слоев, но при этом увеличивает затраты на утепление. Одновременно нормы допускают снижать приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен на 20% и перекрытий на 10% при проведении детализированных расчетов с учетом наличия в ограждающих конструкциях физических, в первую очередь теплотехнических неоднородностей в плоских, в обобщенных расчетах однородных элементах. Такими неоднородностями могут являться различные закладные детали, анкера, неоднородности и включения в слое и т.д.

Упрощенный метод расчета теплотехнических характеристик непрозрачной неоднородной строительной конструкции в целом сводится к расчету приведенного сопротивления теплопередаче. В отличие от него детальный метод расчета позволяет эффективно конструировать тепловую защиту здания вследствие расчета индивидуальных тепловых потерь через теплотехнические неоднородности на основе анализа тепловых полей и основан на расчете теплового потока. [18]

Важнейшей составляющей анализа и проводимых расчетов является конструирование ограждающих конструкций как системы, т.е. определенного набора взаимосвязанных элементов, что не учитывается нормативными документами. Теплотехнические расчеты конструкции стены не позволяют учитывать взаимосвязь ее с перекрытиями, что не позволяет учитывать изменение структуры, толщины и, как следствие, распределение теплового поля в узле сопряжения конструкций.

Применение методов расчета, изложенных в нормативных документах, без дополнения аналитической экспертной оценкой не могут обеспечивать полноту проводимых расчетов, а лишь обобщенные, зачастую укрупненные значения и показатели, не привязанные к конкретному объекту. При этом экспертный анализ, а тем более моделирование в обязательном порядке включают применение специализированных программ, позволяющих провести моделирование, оценку рисков, аналитическую предиктивную оценку на конкретном объекте, основанную на искусственном интеллекте и компьютерных технологиях. Соответственно, потребление энергии для конкретного здания может быть значительно снижено при внедрении новых методов проектирования с использованием специализированного программного обеспечения,

позволяющего реализовать детализированный, научно-обоснованный расчет и подбор параметров тепловой защиты проектируемого здания. [19]-[21]

Целью работы является сравнительный анализ результатов детального и упрощенного теплотехнического расчетов ограждающих конструкций с применением специализированных программных комплексов как одного из элементов информационной модели объекта капитального строительства, проводимого на этапе конструирования наружных ограждающих конструкций здания.

2 Materials and Methods

Моделирования тепловых полей и теплового потока в ограждающих конструкциях. Для проведения детальных расчетов величины и направления теплового потока, проходящего через строительные конструкции, воспользуемся программным комплексом ELCUT (<https://elcut.ru>). Модули программы позволяют проводить анализ физических полей, в том числе температурных. Программный комплекс позволяет провести анализ и двумерное моделирование строительных конструкций методом конечных элементов с последующим расчётом переходного и установившегося температурного поля с учётом конвективного и радиационного теплообмена. Программа ELCUT сертифицирована (сертификат соответствия №РОСС.RU.HB25.H03458, срок действия по 18.03.2023 г.).

Проведем детальное моделирование комплексных характерных узлов ограждающих конструкций гражданского здания (рисунки 1–5). На рисунках 1, 3, 4 при конструировании были учтены гибкие связи в ограждающих конструкциях. Характеристики применяемых материалов указаны в таблице 1.

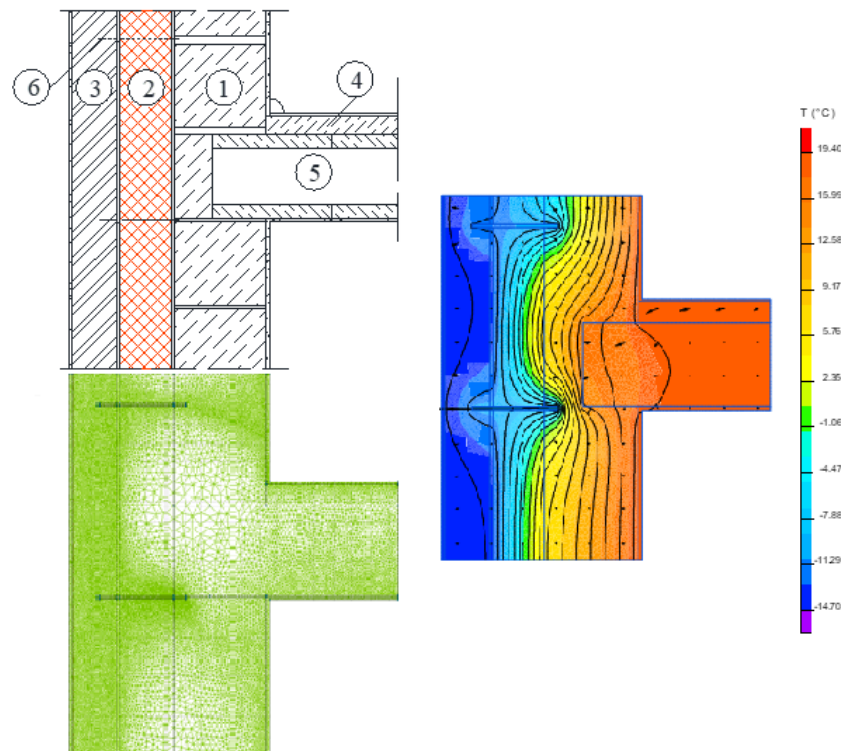


Рис. 1 – Распределение температурных полей в ограждающих конструкциях междуэтажного перекрытия с гибкими связями

Fig. 1 – Distribution of temperature fields in the enclosing structures of the floor-to-floor overlap with flexible connections

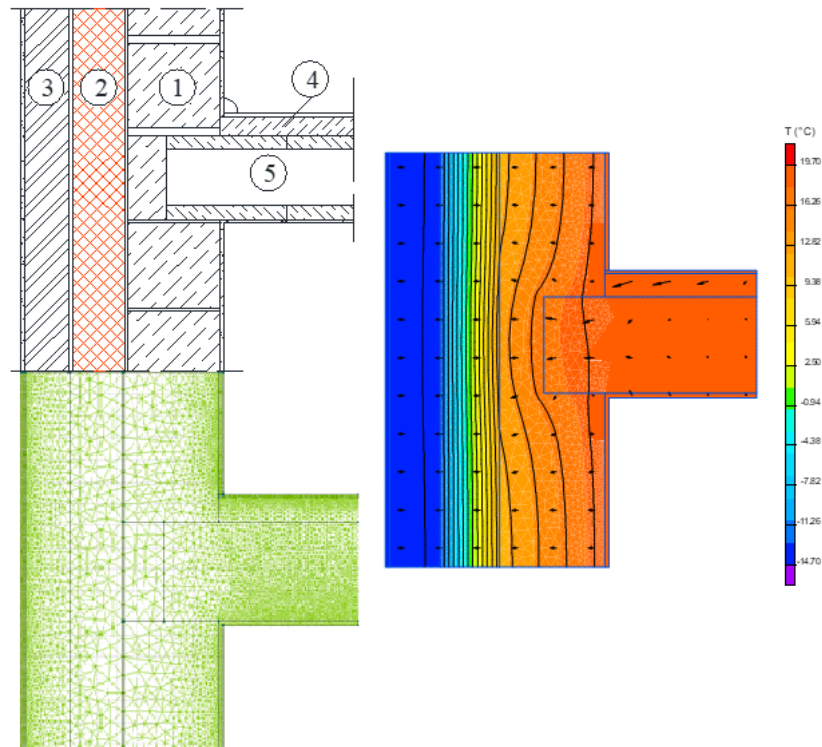


Рис. 2 – Распределение температурных полей в ограждающих конструкциях междуэтажного перекрытия без гибких связей.

Fig. 2 – Distribution of temperature fields in the enclosing structures of the floor-to-floor overlap without flexible connections

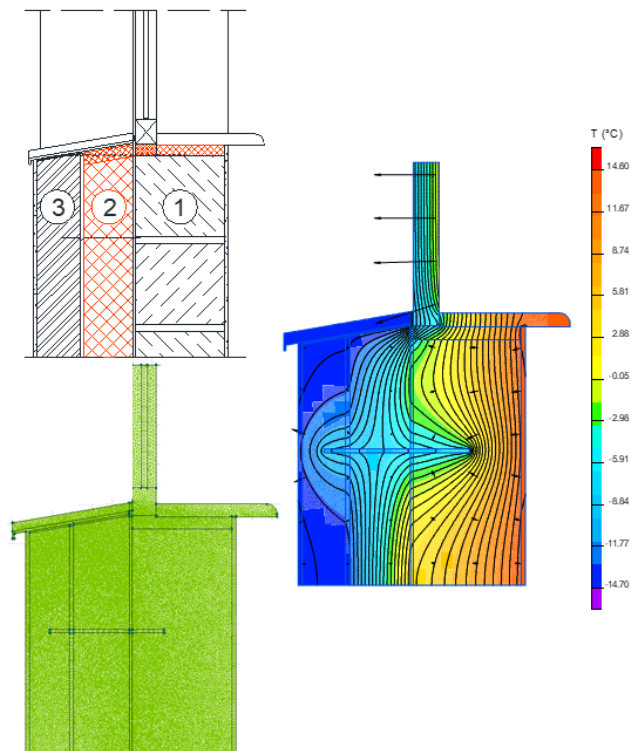


Рис. 3 – Распределение температурных полей в ограждающих конструкциях узла оконного проема с гибкими связями.

Fig. 3 – Distribution of temperature fields in the window opening node enclosing structures with flexible connections.

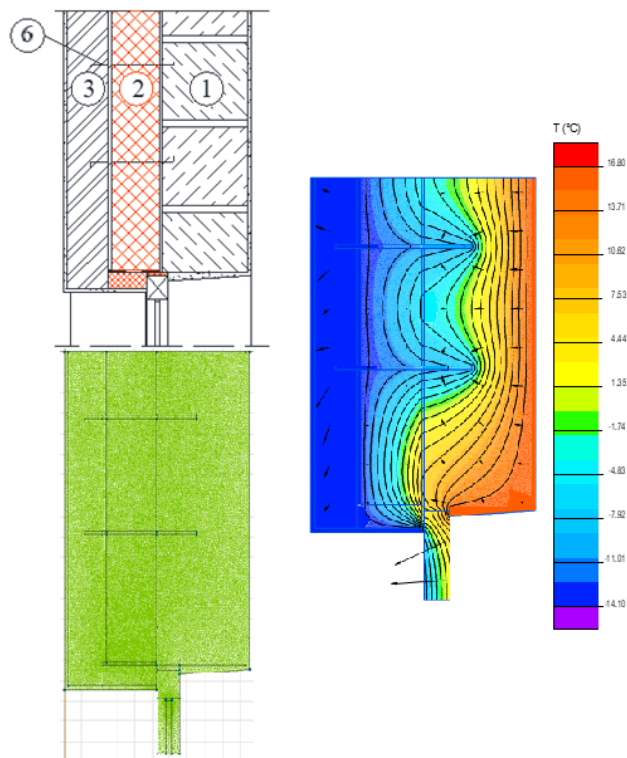


Рис. 4 – Распределение температурных полей в ограждающих конструкциях узла оконного проема с гибкими связями.

Fig. 4 – Distribution of temperature fields in the window opening node enclosing structures with flexible connections.

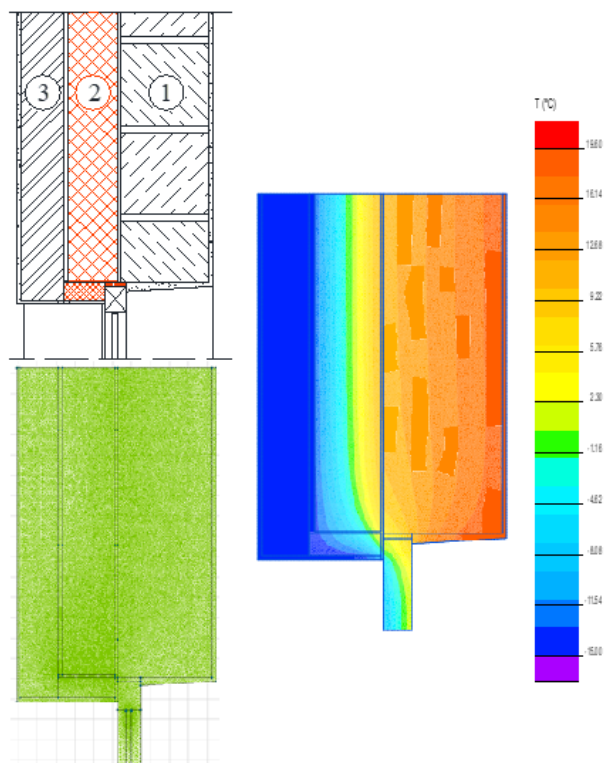


Рис. 5 – Распределение температурных полей в конструкции узла оконного проема без гибких связей.

Fig. 5 – Distribution of temperature fields in the design of the window opening node without flexible connections.

Таблица 1. Характеристики материалов
Table 1. Characteristics of materials

Наименование материала	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, кДж/кг·°С	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Толщина, мм
1) Газо-и пенозолобетон на цементном вяжущем	1200	0.84	0.66	250
2) Плиты минераловатные из каменного волокна	180	0.84	0.048	140
3) Кирпич силикатный	1800	0.88	0.7	120
4) Раствор цементно-песчаный	1800	0.84	0.93	40
5) Железобетонная плита	2500	0.84	1.69	220
6) Сталь стержневая арматурная	7850	0.482	58	8

Детальный теплотехнический расчет конструкции наружной стены. Проведем детальный теплотехнический расчет вышеуказанной конструкции участка стены, показанной на рисунке 6, в соответствии с методикой расчета, изложенной в действующем белорусском национальном нормативном документе. Конструкция простенка показана на рисунке 6.

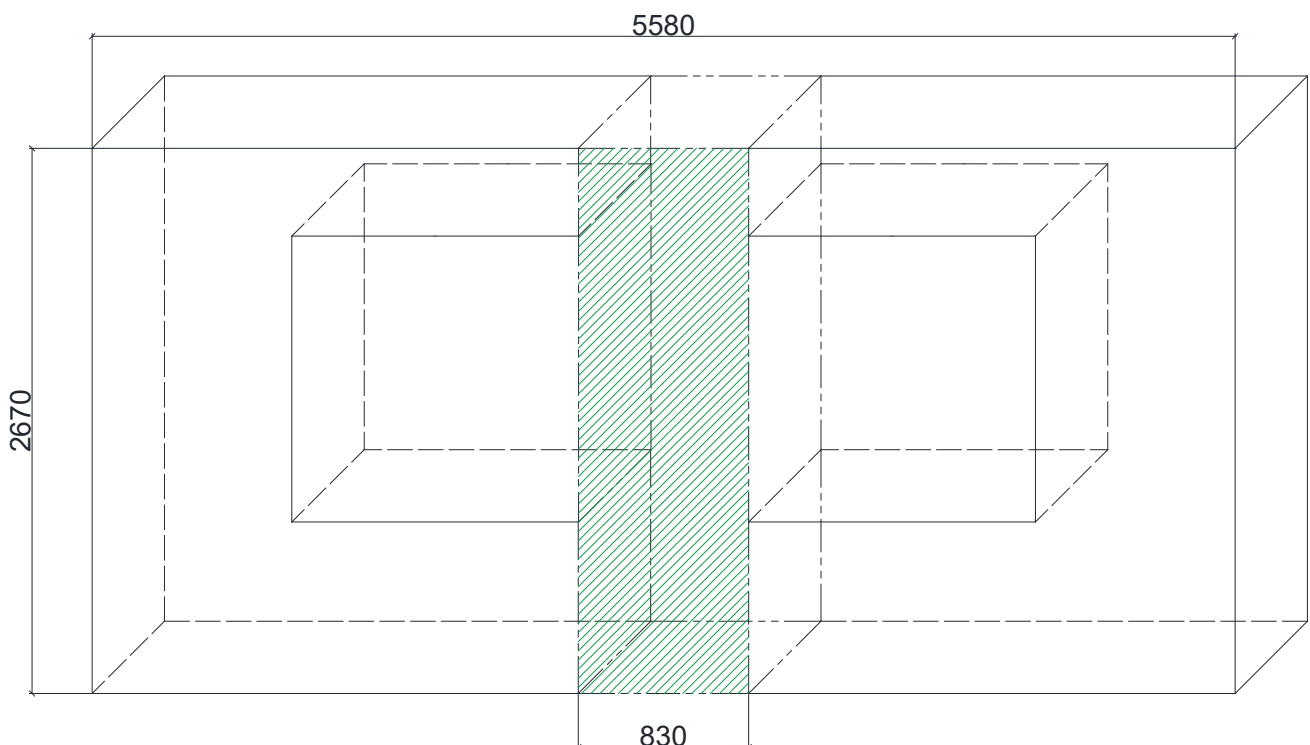


Рис. 6 – Рассчитываемый участок стены.

Fig. 6 – The calculated section of the wall.

Значение приведенного сопротивления теплопередаче определяется по формуле:

$$R_{npi} = \frac{(t_e - t_n) \cdot A_i}{Q_i}, \quad (1)$$



где t_b, t_n – температура внутреннего и наружного воздуха соответственно, °C;
 A_i – площадь участка ограждающей конструкции, м².

$$R_{npi} = \frac{(20+24) \cdot 2.21}{103.82} = 0.94 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

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

$$Q_i = Q_{ig} = \alpha_g \cdot (t_g - t_{g,n}) \cdot A_{ig}, \quad (2)$$

где $t_b, t_{b,n}$ – температура внутреннего воздуха и температура внутренней поверхности соответственно, °C;

A_{ib} – площадь участка ограждающей конструкции, м².

$$Q_i = 8.7 \cdot (20 - 14.6) \cdot 2.21 = 103.82 \text{Вт}.$$

Учет приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции через мелкогабаритные теплопроводные элементы ограждающих конструкций (дюбели, кронштейны, закладные детали, арматуру), определяют по формуле:

$$R_{np} = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{R_{npi}}} = \frac{(t_g - t_n) \cdot A_i}{Q_i \sum q_i}, \quad (3)$$

где q_i – дополнительный тепловой поток через мелкогабаритные теплопроводные элементы определяют по формуле:

$$q_i = x_m \cdot (t_g - t_n) \cdot n_i, \quad (4)$$

где n_i – количество мелкогабаритных теплопроводных элементов, приходящихся на расчетный участок, шт.

x_m – удельные потери теплоты через точечную ТН m -го вида, Вт/(шт.°C).

$$q_i = 1.83 \cdot (20 + 24) \cdot 3 = 241.32 \text{Вт}.$$

$$R_{np} = \frac{(20+24) \cdot 2.21}{103.82 \cdot 241.32} = 0.0039 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

Удельные потери теплоты через точечную теплотехническую неоднородность определяется по формуле:

$$x_m = \frac{\Delta Q_m}{t_g - t_n}, \quad (5)$$

где ΔQ_m – дополнительные потери теплоты через точечную теплотехническую неоднородность m -го вида определяют по формуле:

$$\Delta Q_m = Q_m - Q_{oi}, \quad (6)$$

где Q_m – потери теплоты через точечную теплотехническую неоднородность m -го вида, определяют по результатам расчета температурного поля;

Q_{oi} – потери теплоты через i -й плоский теплотехнически однородный элемент точечной теплотехнической неоднородности, вошедшей в модель теплотехнической неоднородности при расчете температурного поля, определяется по формуле:

$$Q_{oi} = \frac{(t_g - t_n) \cdot A_i}{R_{oi}}. \quad (7)$$

$$Q_{oi} = \frac{(20 + 24) \cdot 2.21}{4.159} = 23.38 \text{ Вт.} \quad (8)$$

$$\Delta Q_m = Q_m - Q_{oi} = 103.82 - 23.38 = 80.44 \text{ Вт.} \quad (9)$$

$$x_m = \frac{80.44}{20 + 24} = 1.83 \frac{\text{Вт}}{^\circ\text{C}}. \quad (10)$$

3 Results and Discussion

Анализируя представленные на моделях наружных ограждающих конструкций температурные поля, мы можем получить величины температур на внутренней поверхности конструкции и в областях расположения теплотехнических неоднородностей. Указанные температуры необходимо использовать при проведении детального теплотехнического расчета для расчета потери теплоты через точечную теплотехническую неоднородность. В программном комплексе ELCUT были рассчитаны значения теплового потока. Распределение температурных полей в массиве конструкции, направление вектора теплового потока и изменения температур, однако важны при конструировании теплозащиты здания, т.к. позволяют получить не только зоны промерзания, но и определить причины возникновения этих зон и конструктивно увеличивать тепловую защиту для их предупреждения.

В таблице 2 представлены величины температур на наружной и внутренней поверхностях конструкций и величина теплового потока, проходящего через конструкции.

Таблица 2. Величины теплового потока
Table 2. Heat flow values

№ рисунка	Температура наружного воздуха, t_b °С;	Температура внутреннего воздуха, t_b °С;	Значение теплового потока наружной поверхности, Вт/м ²	Значение теплового потока внутренней поверхности, Вт/м ²	Разница значений теплового потока, Вт/м ²
1	-15	18.5	11.42	9.95	-1.47
2	-15	18.7	8.76	6.56	-2.2
3	-15	14.6	19.94	22.76	2.82
4	-15	17.7	24.2	27.13	2.93
5	-15	18.4	8.03	8.37	0.34

Температура наружного воздуха при моделировании была задана в целом для всей наружной поверхности ограждающей конструкции. Температура внутренней поверхности – это значение температуры в самой неблагоприятной точке, взятой при анализе модели узла на рисунках 1–5.

Полученное при расчете значение теплового потока внутренней поверхности конструкции – это расчетное значение в этой же неблагоприятной точке. Соответствующее ему значение теплового потока наружной поверхности было определено по ближайшему расстоянию от внутренней неблагоприятной точки. Полученная разница значений теплового потока обусловлена тем, что мы проводим анализ не участка стены, а сложного узла, включающего участки стены, подвальное и чердачное перекрытие, примыкание системы утепления к конструкциям и стальные связи.

Можно увидеть, что разница значений теплового потока внутренней и наружной поверхности имеет как положительное, так и отрицательное значение. На рисунках 1, 2 знак «минус» показывает, что наблюдается промерзание ограждающей конструкции. Это вовсе не означает, что промерзает вся поверхность стены, промерзают участки стены в неблагоприятных точках. Эти зоны соответствуют расположению в стене теплотехнических неоднородностей в виде стальных стержней. Соответственно требуется конструктивное изменение системы утепления в указанных зонах.

Практическая значимость полученных исследований. Для оценки важности проводимых исследований была проведена тепловизионная съемка различных участков наружных ограждающих конструкций. Были выявлены конструкции, в которых присутствуют зоны

промерзания вследствие размещения закладных деталей и различных стальных элементов. На рисунках 7 и 8 показаны простенки наружных стен из мелкогабаритных элементов, а также тепловизионная съемка указанных ограждающих конструкций.

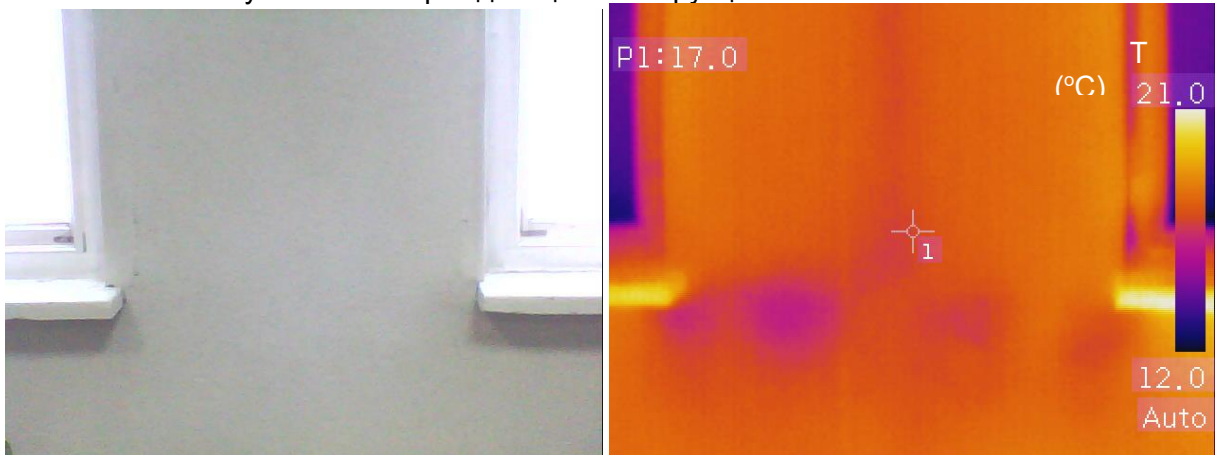


Рис. 7 – Простенок стены 1 из мелкогабаритных элементов с тепловизионной съемкой.
Fig. 7 – Wall wall 1 of small-sized elements with thermal imaging.



Рис. 8 – Простенок стены 2 из мелкогабаритных элементов с тепловизионной съемкой.
Fig. 8 – Wall wall 2 of small-sized elements with thermal imaging.

На фотографиях характерно наличие зон, выделяющихся пониженной температурой. В соответствии с проектной документацией на объект строительства в зоне подоконников установлены стальные арматурные стержни для связи облицовочной части конструкции с массивом стены. Вдоль всей зоны простенка по всей высоте оконного проема установлен стальной арматурный стержень для обеспечения прочности простенка стены.

Результаты замеров показали, что температура в зоне промерзания составила 14,4°C. Сравнив величины температур в зонах промерзания, полученные по результатам тепловизионной съемки, с результатами упрощенного теплотехнического расчета можно отметить, что указанный расчет не позволяет учесть все особенности конструирования ограждающих конструкций, что, в свою очередь, приводит к значительному завышению объема требуемого по расчету утеплителя. При этом компьютерное моделирование позволило с точностью до 5% определить температуру, подтвержденную натурными замерами.

При детальном теплотехническом расчете анализ температурных полей и определение значения температур на внутренней поверхности ограждающих конструкций является обязательным и служит основанием для определения величины минимального приведенного сопротивления теплопередаче. Анализ температурных полей с использованием программного комплекса целесообразно проводить в зонах расположения теплотехнических неоднородностей (при их наличии), результаты анализа и расчета минимального приведенного сопротивления теплопередаче конструкций, представленных на рисунках 1–5, приведены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительный анализ расчета минимального приведенного сопротивления теплопередаче конструкций
Table 3. Comparative analysis of the calculation of the minimum reduced resistance to heat transfer of structures

№ рисунка	Температура внутренней поверхности, $t_{в.п}$ °С	Температура внутреннего воздуха, $t_{в}$ °С	Расчетный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхностью ограждающей конструкции и $\Delta t_{в}$ °С	Минимальное приведенное сопротивление теплопередаче $R_{t.min}$ м ² · °С /Вт	Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_{пр.}$ м ² · °С /Вт	Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции при детальном расчете $R_{пр.}$ м ² · °С /Вт	Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции при детальном расчете с учетом ТН $R_{пр.}$ м ² · °С /Вт
1	18.5	20	1.5	0.843	4.159	0.9	0.896
2	18.7	20	1.3	0.843	4.159	0.9	0.9
3	14.6	20	5.4	0.843	4.159	0.94	0.92
4	17.7	20	2.3	0.843	4.159	0.885	0.866
5	18.4	20	1.6	0.843	4.159	0.9	0.9

Результаты расчета показали, что детальный теплотехнический расчет указанного участка стены без учета теплотехнически неоднородных элементов практически точно удовлетворяет минимальным требованиям по сопротивлению теплопередаче конструкций. Однако детальный теплотехнический расчет указанного участка стены с учетом теплотехнически неоднородных элементов показывает, что конструкция не соответствует требованиям вследствие значительного промерзания в местах теплотехнических неоднородностей, геометрические параметры которых при этом нельзя детально указать в расчете несмотря на то, что детальный теплотехнический расчет частично использует результаты компьютерного моделирования. Результаты детального теплотехнического расчета коррелируются с результатами тепловизионных обследований, значения которых в зонах расположения арматурных изделий показали несоответствие требованиям величины температуры на поверхности строительной конструкции.

4 Conclusions

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Упрощенный теплотехнический расчет, в котором за расчетную единицу берется стена здания без учета теплотехнических неоднородностей, приводит к последующему упрощенному конструированию тепловой защиты. Это выражается в запасе закладываемого утеплителя в узлах сопряжения конструкций, нерациональному, а зачастую неверному его конструированию, и, соответственно, увеличению стоимости строительной продукции и наличии ошибок при проектировании. Указанные упрощения позволяют рекомендовать упрощенный теплотехнический расчет только при проектировании зданий в холодном исполнении.

2. В отличие от упрощенных методов расчетов подбор конструкции с учетом конструкции узла сопряжения и ее особенностей дает возможность обеспечивать микроклимат в здании и позволяет исключить ошибки и неточности на стадии проектирования, а также дает возможность оптимального по времени вариантного проектирования. Однако точный детализированный расчет не представляется возможным без использования специализированных программных комплексов, моделирующих геометрию и теплофизику конструкции. Моделирование конструкции позволяет, соответственно, точно определять при расчете и подборе ограждающих конструкций



стыки изделий, наличие закладных и стержневых элементов, толщины конкретных материалов и др.

3. В соответствии с национальными нормативными документами может быть рекомендовано проведение детализированных теплотехнических расчетов ограждающих конструкций, однако, как правило, методика проведения указанных расчетов не позволяет учитывать все особенности проектируемых ограждающих конструкций. При этом детализированный теплотехнический расчет ограждающих конструкций с использованием специализированных программных комплексов позволяет учитывать все особенности строительных конструкций проектируемого здания только в случае дополнительной аналитики теплового поля. Проведение машинного моделирования реального здания позволяет наиболее точно учитывать особенности конструирования малых деталей и элементов, особенности их теплофизических и теплотехнических свойств, точные геометрические характеристики применительно к конкретной марке изделия, но не позволяют передать особенности конструирования даже в детализированных расчетах, что требует их уточнения в нормативных документах.

4. Использование специализированных программных комплексов позволяет проводить моделирование тепловой защиты характерных узлов утепления ограждающих конструкций с целью исключения ошибок на этапе проектирования при подборе конструкции системы утепления. Проведение машинного моделирования реального здания позволяет наиболее точно учитывать особенности конструирования малых деталей и элементов, особенности их теплофизических и теплотехнических свойств, точные геометрические характеристики применительно к конкретной марке изделия, но не позволяют передать особенности конструирования даже в детализированных расчетах, что требует их уточнения в нормативных документах. Указанное моделирование особенностей конструирования подлежит дальнейшему исследованию.

5. Интересным видится применение специализированных программ по расчету теплотехнических характеристик строительных конструкций, как составляющую информационной модели проектируемого здания. Данный подход позволит декомпозировать объект строительства на отдельные части, что интересно для технически сложных объектов. Повышение уровня цифровизации цепочки проектно-строительных работ без сомнения окажет позитивное влияние на строительную отрасль вследствие автоматизации процессов, минимизации ошибок, удобству и качеству выполняемых работ. Соответственно дальнейшим направлением исследований является привязка теплотехнической модели к общей информационной модели здания в рамках проекта строительства для формирования массива электронных документов на всех стадиях и этапах жизненного цикла объекта строительства и обеспечения качественного проектирования, строительства и эксплуатации здания, а также ведущейся цифровой трансформации строительной отрасли. Это позволит перейти на риск-ориентированные подходы к эксплуатации строительных объектов.

References

- 1 Hamdy, M., Hasan, A. and Siren, K. (2013) A Multi-Stage Optimization Method for Cost-Optimal and Nearly-Zero-Energy Building Solutions in Line with the EPBD-Recast 2010. *Energy and Buildings*, **56**, 189–203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.023>.
- 2 Poel, B., van Cruchten, G. and Balaras, C.A. (2007) Energy Performance Assessment of Existing Dwellings. *Energy and Buildings*, **39**, 393–403. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.08.008>.
- 3 Alhaj Hasan, O., Defer, D. and Shahrour, I. (2014) A Simplified Building Thermal Model for the Optimization of Energy Consumption: Use of a Random Number Generator. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **82**, 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.023>.
- 4 Li, H.X., Li, Y., Jiang, B., Zhang, L., Wu, X. and Lin, J. (2020) Energy Performance Optimisation of Building Envelope Retrofit through Integrated Orthogonal Arrays with Data Envelopment Analysis. *Renewable Energy*, Elsevier Ltd, **149**, 1414–1423. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.143>.
- 5 Cristino, T.M., Neto, A.F., Wurtz, F. and Delinchant, B. (2022) The Evolution of Knowledge and Trends within the Building Energy Efficiency Field of Knowledge. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en15030691>.
- 6 Chong, A., Gu, Y. and Jia, H. (2021) Calibrating Building Energy Simulation Models: A Review of the Basics to Guide Future Work. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111533>.

Badenko, V.; Mikhlikov, D.; Shkilniuk, M.; Olshevskiy V.

Detailed modeling of temperature fields and thermophysical processes in enclosing structures; 2023; *AlfaBuild*; **29** Article No 2904. doi: 10.57728/ALF.29.4



- 7 Yuan, J. (2018) Impact of Insulation Type and Thickness on the Dynamic Thermal Characteristics of an External Wall Structure. *Sustainability (Switzerland)*, **10**. <https://doi.org/10.3390/su10082835>.
- 8 Boodi, A., Beddiar, K., Amirat, Y. and Benbouzid, M. (2022) Building Thermal-Network Models: A Comparative Analysis, Recommendations, and Perspectives. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en15041328>.
- 9 Yüksek, I. and Karadayi, T.T. (2017) Energy-Efficient Building Design in the Context of Building Life Cycle. *Energy Efficient Buildings*. <https://doi.org/10.5772/66670>.
- 10 Kumar Sharma, N. (2020) Sustainable Building Material for Green Building Construction, Conservation and Refurbishing. *International Journal of Advance Science and Technology*, **29**. <https://www.researchgate.net/publication/342946652h>
- 11 Salem, D., Bakr, A. and El Sayad, Z. (2018) Post-Construction Stages Cost Management: Sustainable Design Approach. *Alexandria Engineering Journal*, **57**. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.07.014>.
- 12 Ma, Y., Yu, J.Q., Yang, C.Y. and Wang, L. (2010) Study on Power Energy Consumption Model for Large-Scale Public Building. Proceedings - 2010 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications, ISA 2010. <https://doi.org/10.1109/IWISA.2010.5473608>.
- 13 Alam, J., Islam, M.A. and Biswas, B.K. (2014) Energy Simulation to Estimate Building Energy Consumption Using EnergyPlus. International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering 2014. <https://www2.kuet.ac.bd/icmiee2014/wp-content/uploads/2015/02/ICMIEE-PI-140354.pdf>
- 14 Knowles, T.R. (1983) Proportioning Composites for Efficient Thermal Storage Walls. *Solar Energy*, **31**. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(83\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(83)90020-8).
- 15 Asan, H. (2000) Investigation of Wall's Optimum Insulation Position from Maximum Time Lag and Minimum Decrement Factor Point of View. *Energy and Buildings*, **32**. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00044-X).
- 16 Yuan, J., Emura, K. and Farnham, C. (2016) Highly Reflective Roofing Sheets Installed on a School Building to Mitigate the Urban Heat Island Effect in Osaka. *Sustainability (Switzerland)*, **8**. <https://doi.org/10.3390/su8060514>.
- 17 Gan, V.J.L., Deng, M., Tan, Y., Chen, W. and Cheng, J.C.P. (2019) BIM-Based Framework to Analyze the Effect of Natural Ventilation on Thermal Comfort and Energy Performance in Buildings. *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.971>.
- 18 Yuan, J., Farnham, C., Emura, K. and Alam, M.A. (2016) Proposal for Optimum Combination of Reflectivity and Insulation Thickness of Building Exterior Walls for Annual Thermal Load in Japan. *Building and Environment*, **103**. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.019>.
- 19 Zaki, S.A., Damiaty, S.A., Rijal, H.B., Hagishima, A. and Abd Razak, A. (2017) Adaptive Thermal Comfort in University Classrooms in Malaysia and Japan. *Building and Environment*, **122**. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.016>.
- 20 Yang, L., Yan, H. and Lam, J.C. (2014) Thermal Comfort and Building Energy Consumption Implications - A Review. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062>.
- 21 Dudin, M.O., Vatin, N.I. and Barabanshchikov, Y.G. (2015) Modeling a Set of Concrete Strength in the Program ELCUT at Warming of Monolithic Structures by Wire. *Magazine of Civil Engineering*, **54**. <https://doi.org/10.5862/MCE.54.4>.