



Research Article

Received: September 7, 2025

Accepted: October 23, 2025

Published: December 4, 2025

ISSN 2304-6295

# Thermal irregularity of connection joints in modular enclosing structures

Kotov, Evgeny Vladimirovich<sup>1</sup> Mishchikhin, Sergei Antonovich<sup>1</sup>Sergeeva, Daria Viktorovna<sup>2</sup> Kotliarskaia, Irina Leonidovna<sup>1</sup> Iakovlev, Nikita Artemovich<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

[ekotov.cfd@gmail.com](mailto:ekotov.cfd@gmail.com) (K.E.V.); [mitshihin\\_sa@spbstu.ru](mailto:mitshihin_sa@spbstu.ru) (M.S.A.); [iravassilek@mail.ru](mailto:iravassilek@mail.ru) (K.I.L.); [nik\\_yakovlev@list.ru](mailto:nik_yakovlev@list.ru) (I.N.A.)

<sup>2</sup> Institute for regional economic studies RAS, St. Petersburg, Russian Federation; [darya0690@mail.ru](mailto:darya0690@mail.ru) (S.D.V.)

Correspondence: \* email [nik\\_yakovlev@list.ru](mailto:nik_yakovlev@list.ru); contact phone [+79811915449](tel:+79811915449)

## Keywords:

Modular enclosing structures; Modular buildings; Thermal irregularity; Thermal bridges; Heat flux; Modular joints; Finite element method; Heat loss

## Abstract:

**The object of research** is the thermal irregularity (non-uniformity) of connection joints in modular enclosing structures. The purpose of this work is a comprehensive study of the thermal properties of enclosing structures of modular buildings. **Method.** The study combines full-scale temperature measurements on a modular corner fragment with three-dimensional finite element thermal modeling. Numerical modeling of two typical configurations of corner joints was also carried out: with hollow square sections and with I-beams. **Results.** The analysis of heat losses at the junctions of structural elements was conducted. The validated model reproduces the experimentally observed temperature distribution, confirming its suitability for analyzing thermal irregularities. The strongest cooling and highest heat flux occur in the wall-floor corner zone due to geometric and material discontinuities. Comparative assessment of joint configurations shows that hollow square profiles exhibit lower specific heat losses ( $0.008 \text{ W/}^\circ\text{C}$ ) than I-beam joints ( $0.011 \text{ W/}^\circ\text{C}$ ), indicating their higher thermal efficiency.

## 1 Introduction

Общая мотивация: урбанизация, потребность в массовом доступном жилье и роль модульного строительства как быстрого и индустриального решения

Технические преимущества модульного строительства

Анализ открытых источников (пункт в НИОКР)

В разделе Введение/Introduction приводится обзор мировых научных публикаций, подтверждающий отсутствие в литературных источниках решения данной задачи и указывающий предшественников, на исследованиях которых базируется работа. Обзор литературы должен

Kotov, E.; Mishchikhin, S.; Sergeeva, D.; Kotliarskaia, I.; Iakovlev, N.

Thermal irregularity of connection joints in modular enclosing structures;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 119 Article No 11907. doi: 10.4123/CUBS.119.7

быть критическим анализом научных публикаций. Он должен обосновывать (мотивировать) необходимость исследований, произведенных автором статьи. Из обзора литературы следует формулировка актуальности исследования.

проблема: систематически расположенные межмодульные стыки, образующие регулярную решетку «мостиков холода», которые существенно увеличивают реальные теплопотери (до ~20–30% по оценкам).

проблема тепловых мостиков в модульных конструкциях

недостаток данных по модульным конструкциям

### Научный пробел и мотивация

необходимость анализа теплотехнической неоднородности именно для модульных конструкций

### Объект исследования

Теплотехническая неоднородность узлов сопряжения модульных ограждающих конструкций

### Цель

Целью данной работы является комплексное исследование теплотехнических свойств ограждающих конструкций модульных зданий.

### Задачи

Основная исследовательская задача состояла в определении пространственного распределения температур, тепловых потоков и локальных теплопотерь с последующим вычислением интегральных параметров - приведенного сопротивления теплопередаче и коэффициента теплотехнической однородности конкретного соединения.

## 2 Materials and Methods

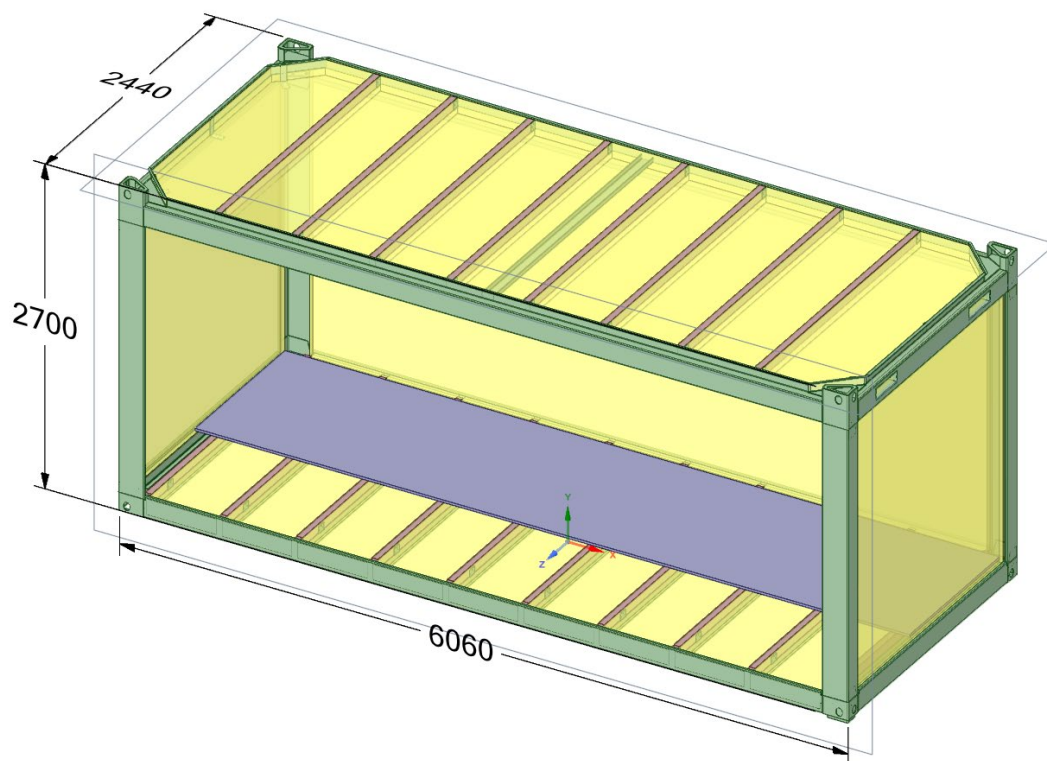
### 2.1 General approach

Исследование теплотехнической неоднородности модульной конструкции выполнялось с использованием трехмерного конечно-элементного моделирования, результаты которого проходили обязательную экспериментальную верификацию. Такой подход обеспечивает необходимую точность при анализе сложных узлов, содержащих материалы с резко различающимися теплопроводностями и формирующих пространственные пути теплопередачи.

Общий алгоритм исследования включал экспериментальные измерения температурного режима на фрагменте реального модуля, построение и калибровку численной модели, а также проведение расчета узлов соединений. На заключительном этапе выполнялась обработка и анализ результатов.

### 2.2 Experimental verification

Изучаемая модульная конструкция представляет собой типовой жилой модуль размером 6060x2440x2700 мм. Схема модуля представлен на рисунке 1.



**Рис. 1 - Внешний вид типового жилого модуля**  
**Fig. 1 - View of a typical residential module**

Каркас модуля выполнен из профиля, гнутого из листа 3 мм, половые и потолочные балки выполнены из Z-образного профиля толщиной 3 мм. В качестве утеплителя используются трехслойные сэндвич-панели с металлическими облицовками и сердечником из минеральной ваты, изготовленные по ГОСТ 32603-2021. Основанием пола является фанера влагостойкая толщиной 18 мм. В конструкции также использован деревянный брус 75х50.

Величины коэффициентов теплопроводности материалов модульного жилого блока, указанные по данным изготовителя, представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Коэффициенты теплопроводности материалов**  
**Table 1. Thermal conductivity coefficients of materials**

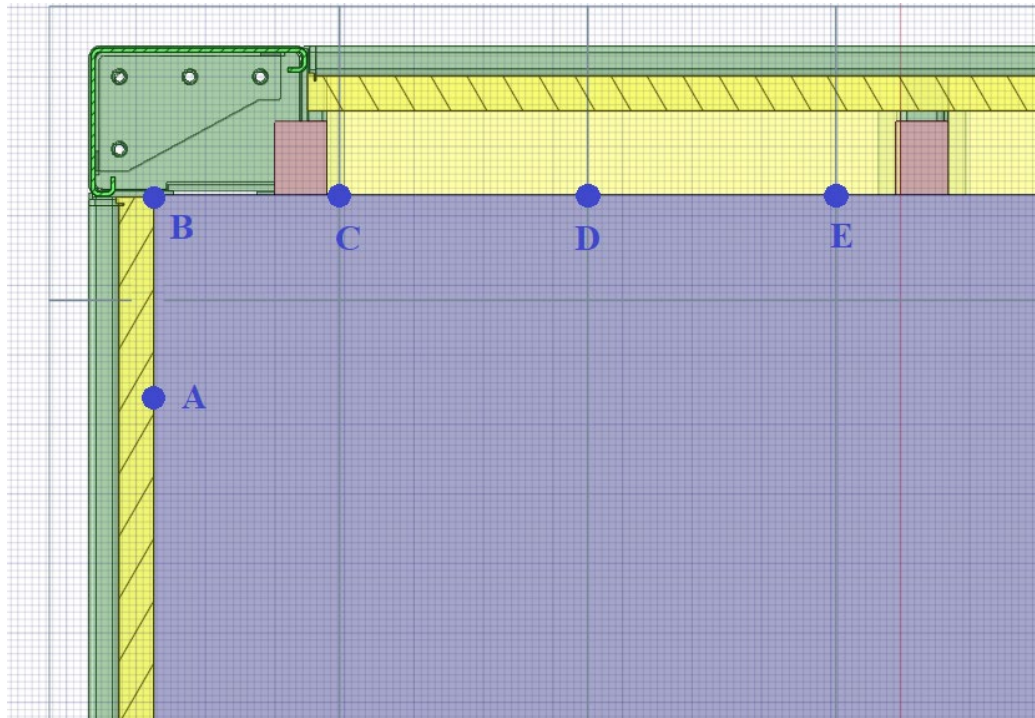
	Минеральная вата	Сталь	Брус (сосна)	Фанера влагостойкая
$\lambda$ , Вт/(м °С)	0,035	60	0,18	0,2

Внутреннее пространство модуля прогревалось в течение двух часов с помощью тепловентилятора для установления разницы температур между внутренней и наружной средой, достаточной для формирования устойчивого теплового поля.

Температура воздуха в помещении и на улице регистрировались в течение всего времени прогрева с интервалом 10 минут. Целью данных измерений являлось определение момента достижения стационарного теплового режима. После стабилизации перепада температур выполнялась регистрация температур на внутренней поверхности ограждения в течение 10 минут с интервалом в 1 минуту. Одновременно с такой же периодичностью происходило измерение температуры окружающей среды.

Измерение температуры проводилось при помощи датчиков теплографа «Терем».

Расположение датчиков включает точки на расстоянии 25 сантиметров от угла на обеих стенах, а также дополнительные точки на расстоянии 50 и 75 сантиметров на одной стене, все на высоте 1,5 метра. Зонды работают в диапазоне температур от -50°C до +150 °С, обеспечивая разрешение 0,01°C и точность 0,15°C. План ограждающей конструкции с указанием мест установки датчиков представлены на рисунке 2. Значения экспериментальных точек усреднялись по всему времени наблюдений.



**Рис. 2 - Внешний вид типового жилого модуля**  
**Fig. 2 - Layout of thermograph sensors**

Температура воздуха внутреннего помещения и воздуха окружающей среды составляет  $28.1 \pm 1.5$  °C и  $7.5 \pm 0.5$  °C соответственно. Данные значения фиксировались в течение периода сбора статистики после прогрева помещения для достижения стационарного теплового поля.

Стоит отметить, что исследуемый случай иллюстрирует перепад температур порядка десятка градусов, что соответствует условиям эксплуатации ограждающих конструкций.

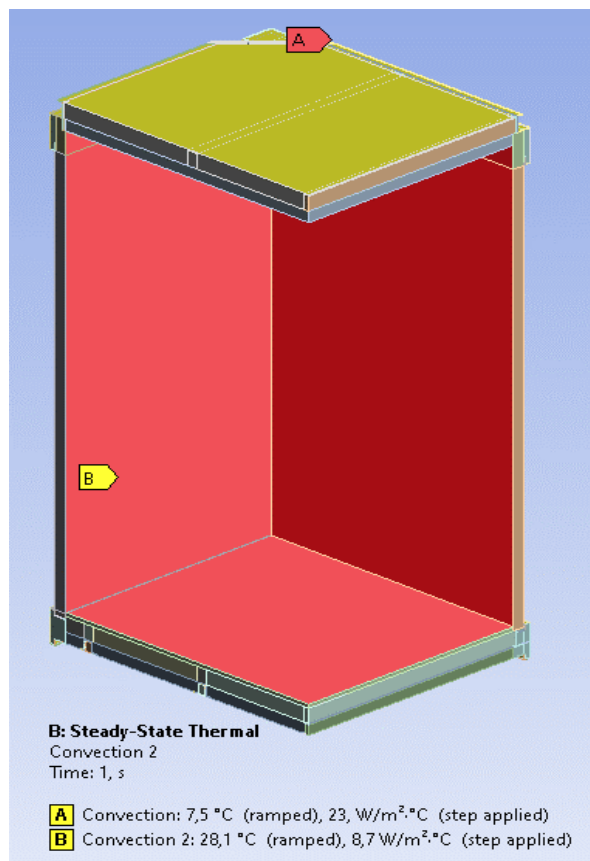
Результатами измерений являются профили температуры на внутренней поверхности ограждающей конструкции, значений температуры окружающей среды и среды внутри помещения. Полученные данные использовались для верификации численной модели.

### 2.3 Numerical modeling

Численное моделирование проводилось методом конечных элементов (МКЭ) при помощи программного комплекса Ansys Steady-State Thermal.

Численная модель включает одну четвертую части жилого модуля.

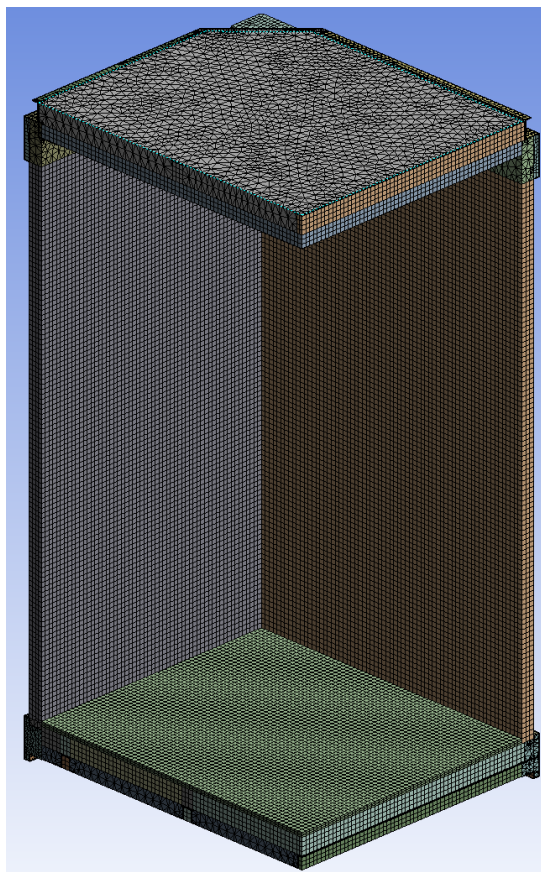
На внешней и внутренней границах расчетной области задавались граничные условия третьего рода, соответствующие экспериментальным температурам и представленные на рисунке 3. Значения температур задавались в соответствии с условиями эксперимента. Коэффициенты теплоотдачи задавались в соответствии с рекомендациями СП 230.1325800.2015 [1].



**Рис. 3 - Численное моделирование эксперимента. Граничные условия**  
**Fig. 3 - Numerical modeling of the experiment. Boundary conditions**

Узлы модульных ограждающих конструкций содержат такие элементы, как: тонкостенный профиль, металлические листы, терморазрывы, прокладки. Толщины этих элементов малы по сравнению с габаритными размерами анализируемых узлов ограждающих конструкций. При построении расчетных сеток важно было добиться достаточного разрешения тонкостенных элементов в направлении перпендикулярном направлению теплового потока. Для этого использовалась комбинированная схема построения расчетной сетки. Для плоских элементов применена призматическая сетка (sweeper-блоки) с минимум четырьмя ячейками по толщине. Области, заполненные теплоизоляцией, дискретизировались тетраэдральной сеткой с постепенным увеличением размера элементов по мере удаления от теплопроводящих включений.





**Рис. 4 - Численное моделирование эксперимента. Расчетная сетка**

**Fig. 4 - Numerical modeling of the experiment. Mesh**

Основным контролируемым параметром, определяемым по результатам моделирования теплового состояния фрагмента конструкции, являлась величина среднего теплового потока.

В дополнение к основной модели были построены две отдельные модели узла углового соединения модуля, различающиеся типом стального каркаса.

Первая модель представляет собой угловое сварное соединение профилей квадратного сечения. Ширина профиля 60 мм, толщина 2 мм.

Вторая модель представляет собой угловое соединение балок двутаврового сечения с колонной квадратного сечения. Двутавровые балки соответствуют типоразмеру 10Б1 из сортамента ГОСТР 57837-2017 из соображений соответствия ширины полки сечению квадратного профиля.

Для обеих конструкций геометрия расчетной области включает: угловой элемент и участки балок, имеющих длину 0,15 м от угла. Такое расстояние выбрано из соображений выравнивания температурных полей.

Сэндвич-панели без металлического каркаса моделировались однородными конструкциями с изотропной теплопроводностью. В обоих вариантах использовались те же теплотехнические параметры материалов и подход к построению расчетной сетки, что и в основной модели. Модели узлов представлены на рисунке 5.

Для каждого узла определялись: распределение температур и удельные потери теплоты.

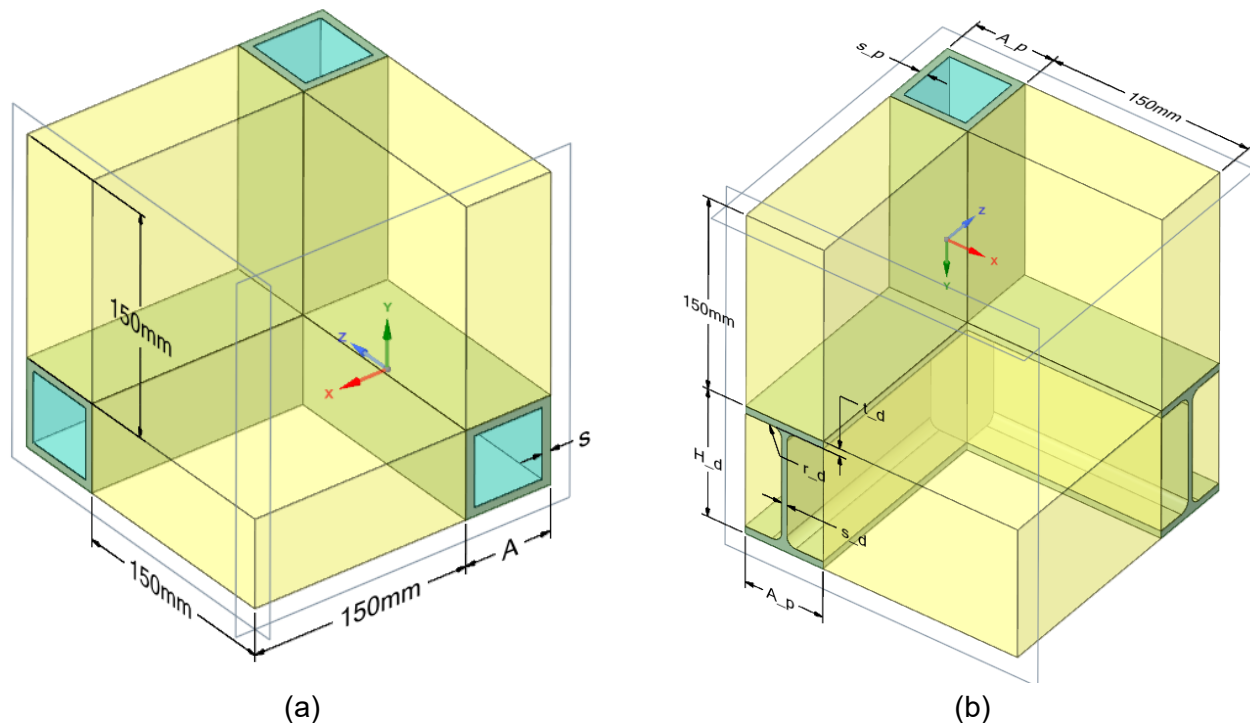


Рис. 5 - Модель узла углового соединения (а) профилей квадратного сечения (b) балок двутаврового сечения с колонной из профиля квадратного сечения (убрать с картинок величины)

Fig. 5 - Corner joint model: (a) with square hollow sections; (b) with I-beam sections beams and a square hollow section column

### 3 Results and Discussion

В результате численного моделирования получены поля температур и теплового потока в расчетной области. На рисунке 6 представлено поле температур и показаны численные значения температур в точках установки датчиков. На рисунке 6 показано поле теплового потока.

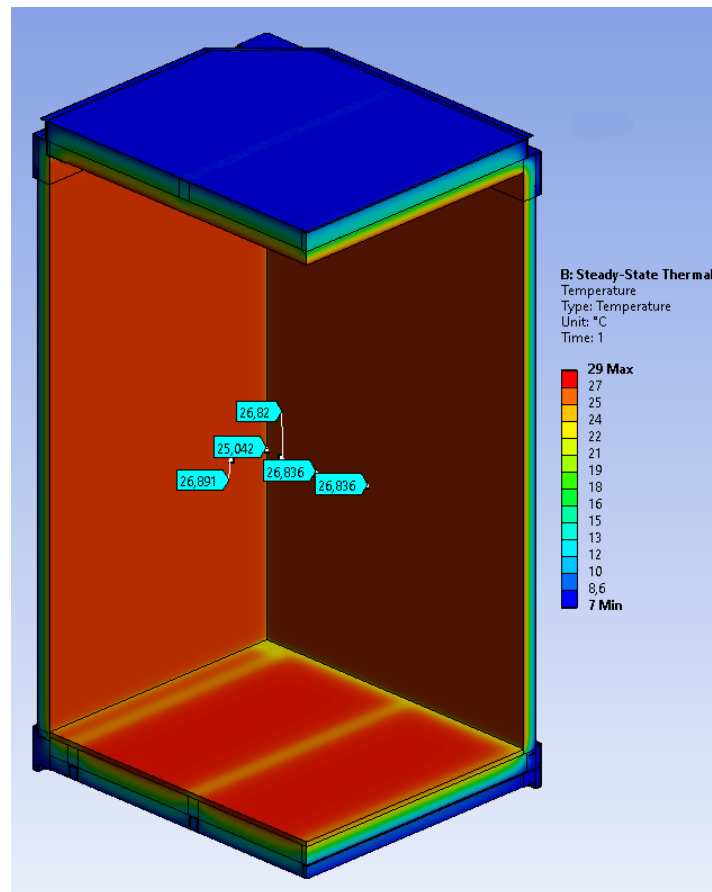


Рис. 6 - Поле температур  
 Fig. 6 - Temperature field

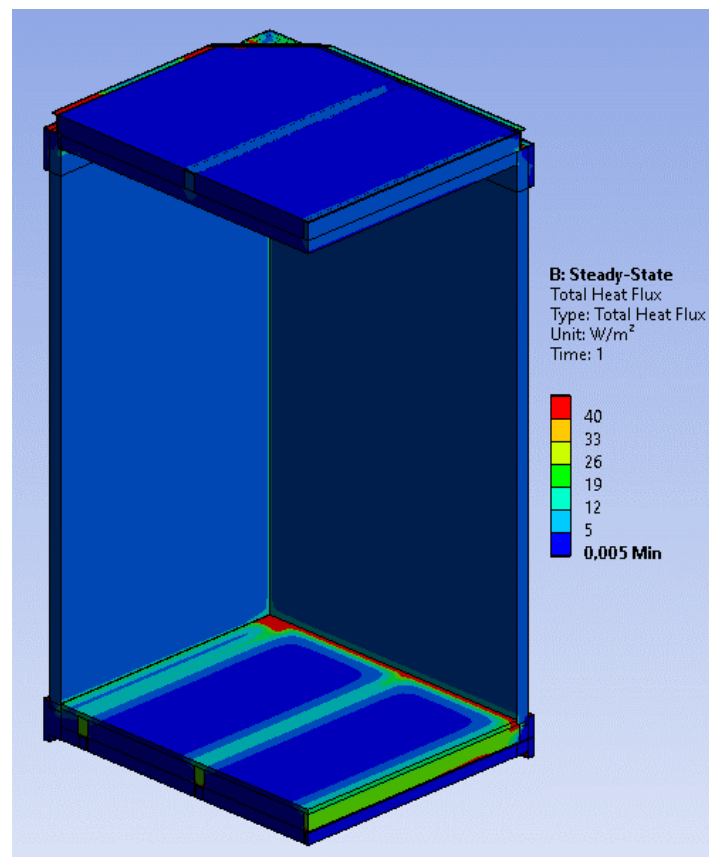
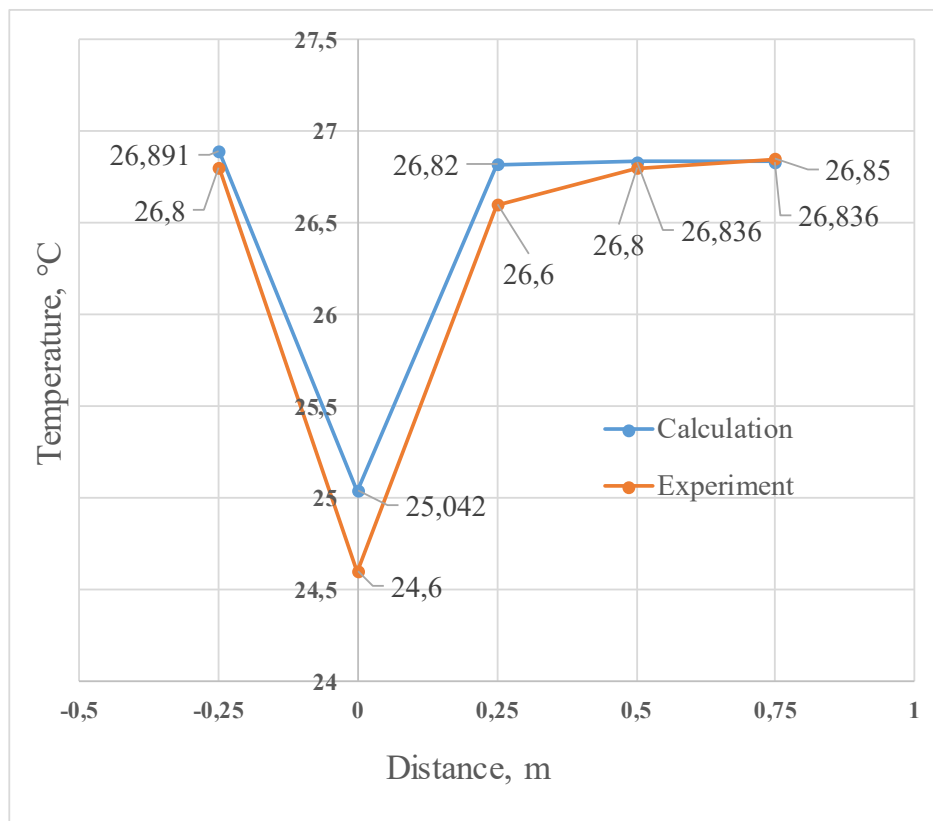


Рис. 7 - Поле теплового потока  
 Fig. 7 - Heat flux field



На рисунке 8 представлен сравнительный график экспериментальных данных и расчетных значений температур в точках измерения ограждающей конструкции модульного блока. В соответствии с данным графиком расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 2%. При этом характер распределения температур полностью совпадает. Наиболее низкая температура зафиксирована в углу модульного блока. Таким образом, численная модель подтверждена экспериментом и может использоваться для дальнейшего анализа.



**Рис. 8 - Сравнение результатов расчета и эксперимента**  
**Fig. 8 - Comparison of calculated and experimental results**

Распределение температур на рисунке 6 демонстрирует выраженную неоднородность, возникающую из-за различий в теплопроводности материалов и сложной геометрии узлов. В угловой зоне внутренней поверхности фиксируется снижение температуры на 6-7 °С по сравнению с центральной частью панели. Такое понижение связано с трехмерным характером теплопередачи и наличием стальных профилей, которые формируют локальный мостик холода.

Понижение температуры также наблюдается в перекрытии вдоль деревянных брусьев, где температура оказывается ниже примерно на 4 °С. Деревянные элементы прерывают слой минераловатной изоляции, создавая протяжённую линию охлаждения. Эти особенности показывают, что металлические и деревянные включения существенно изменяют температурный режим конструкции и снижают ее теплотехническую однородность.

Поле теплового потока (рисунок 7) подтверждает выявленные аномалии. Наибольшие значения (около 40 Вт/м<sup>2</sup>) сосредоточены в углу у сопряжения стены и перекрытия, где сходятся основные пути теплопередачи через металлический каркас. В зоне пересечения стен поток уменьшается до 12-19 Вт/м<sup>2</sup>, что отражает умеренную, но устойчивую неоднородность.

В перекрытии тепловой поток увеличивается вдоль деревянных брусьев, достигая около 19 Вт/м<sup>2</sup>. Эти линейные зоны свидетельствуют о снижении эффективности теплоизоляции в местах, где утеплитель прерывается. Однородные участки панелей имеют минимальные значения теплового потока, близкие к нулю, что подтверждает нормальную работу минераловатной изоляции.

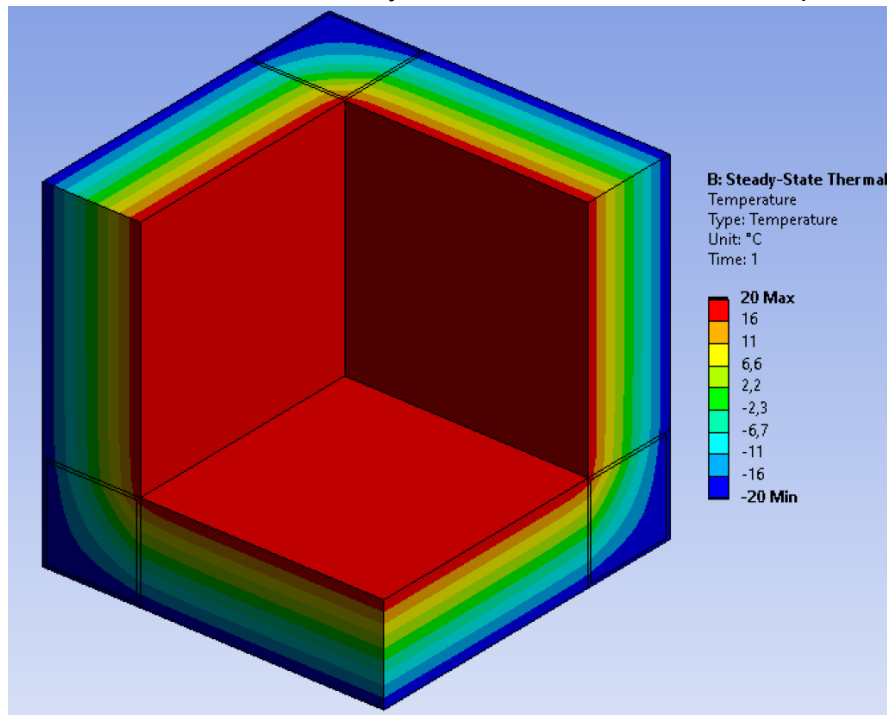
В совокупности распределение температур и теплового потока демонстрирует, что основные теплотери локализуются в областях, пересеченных высоко- и средне-теплопроводными элементами, тогда как теплоизолированные фрагменты сохраняют стабильный режим.

Kotov, E.; Mishchikhin, S.; Sergeeva, D.; Kotliarskaia, I.; Iakovlev, N.

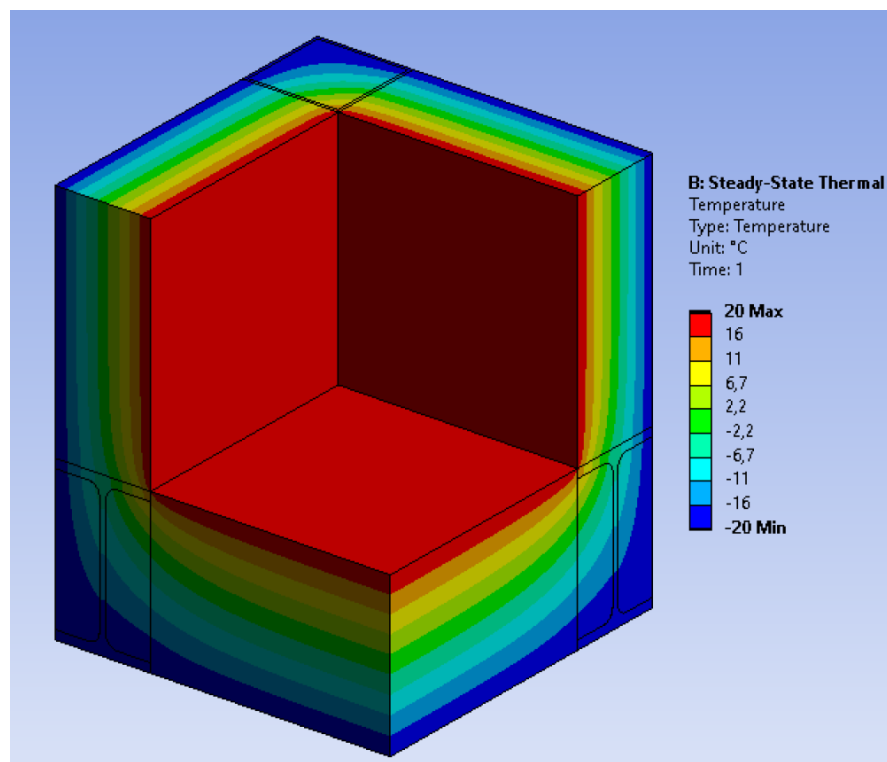
Thermal irregularity of connection joints in modular enclosing structures;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 119 Article No 11907. doi: 10.4123/CUBS.119.7

Поля температур для узловых моделей представлены на рисунках 9 и 10. Распределение температур имеет похожий вид, однако для узла с двутавровыми балками зона пониженной температуры распространяется глубже в тело конструкции вследствие большей площади поперечного сечения стального элемента и увеличенной толщины теплопроводящего пути.



**Рис. 9 - Поле температур узла углового соединения профилей квадратного сечения**  
**Fig. 9 - Temperature field of the corner joint model with square hollow sections**



**Рис. 10 - Поле температур узла углового соединения балок двутаврового сечения с колонной из профиля квадратного сечения**  
**Fig. 10 - Temperature field of the corner joint model with I-beam sections beams and a square hollow section column**

Для каждого узла была определена величина удельных потерь теплоты:

- 0.008 Вт/°С для узла с углового соединения профилей квадратного сечения;
- 0.011 Вт/°С для узла с двутавровыми балками.

В результате разница составляет 37.5% при одинаковой толщине ограждающих стеновых конструкций и даже большей толщине конструкции пола у варианта с двутавровыми балками. Выбор типа металлического профиля оказывает заметное влияние на интегральные тепловые потери углового соединения модуля.

В совокупности полученные результаты демонстрируют, что теплотехническая неоднородность формируется преимущественно в областях сопряжения стальных элементов каркаса и нарушения сплошности теплоизоляционного слоя.

## 4 Conclusions

В ходе исследования теплотехнической неоднородности были проведены численное моделирование и натурные испытания ограждающих конструкций жилого модуля, а также выполнен сравнительный анализ теплотехнических характеристик двух конструктивных узлов. На основании совокупности полученных данных сформулированы следующие выводы.

1. Установлено, что теплотехническая неоднородность модульных ограждающих конструкций формируется в зонах сопряжения стальных элементов каркаса, где геометрический перелом конструкции и различие теплопроводности материалов приводят к локальному снижению температуры внутренней поверхности и концентрации теплового потока.

2. Численная модель теплопередачи, построенная методом конечных элементов, продемонстрировала согласованность с экспериментальными данными по распределению температур в характерных точках углового фрагмента модуля, что подтверждает корректность выбранной методики моделирования.

3. Наибольшая теплотехническая неоднородность была выявлена в зоне углового сопряжения стены и пола, где фиксировались минимальные значения температуры внутренней поверхности и максимальный тепловой поток, достигающий около 40 Вт/м<sup>2</sup>. Такая концентрация теплопередачи обусловлена наложением двух факторов: трехмерным искривлением теплового потока в геометрическом угле и наличием стальных элементов каркаса, формирующих непрерывный путь повышенной теплопроводности. Совместное действие этих механизмов приводит к наиболее интенсивному охлаждению ограждающей конструкции именно в данной области.

4. Сравнительный анализ двух конструктивных решений показал, что узел на основе полых квадратных профилей характеризуется меньшими удельными потерями теплоты (0.008 Вт/°С) по сравнению с узлом, содержащим двутавровые балки (0.011 Вт/°С), что обусловлено уменьшенной площадью теплопроводящего пути и более равномерным распределением температур.

5. Результаты исследования подтверждают необходимость специального учета теплотехнической неоднородности при проектировании модульных зданий, поскольку именно они формируют основные тепловые потери. В таких зонах целесообразно предусматривать локальное увеличение толщины теплоизоляции либо применение конструктивных решений, уменьшающих непрерывность теплопроводящих металлических путей.

## 5 Acknowledgements

Авторы выражают благодарность Федеральному автономному учреждению "Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве" (г. Москва, Российская Федерация) за инициативу научно-исследовательской работы и опытно-конструкторской работы по совершенствованию методов учета теплотехнических неоднородностей и расчету узлов сопряжения модульных и блочно-модульных ограждающих конструкций.



## 6 Fundings

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No 075-03-2025-256 dated 16 January 2025, Additional agreement No 075-03-2025-256/1 dated March 25, 2025, FSEG-2025-0008I.

## 7 Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## References

- 1 SP 230.1325800.2015. Construction Enclosing of Buildings Characteristics of Thermal Conductive of Inclusions. <https://docs.cntd.ru/document/1200123088>.