

УДК 536:21:699.86

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В НЕОДНОРОДНЫХ УЗЛАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

А.А. Абдулин, Р.У. Якпунова, А.В. Толстых

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск (Российская Федерация)

Аннотация. В статье проводится оценка теплозащитных свойств покрытия и наружных стен, выполненных из сэндвич панелей, входной группы административного здания с металлическим каркасом, а также прогнозирование температурных режимов в ограждающих конструкциях этого здания при эксплуатации в климатических условиях г. Томска, проверка ограждающих конструкций на соответствие требованиям нормативной документации, оценка дополнительной теплоизоляции металлической балки, являющейся мостиком холода. На основе численного моделирования стационарного теплопереноса в наружных ограждающих конструкциях входной группы административного здания с металлическим каркасом рассчитаны температурные поля в выбранных неоднородных фрагментах. Определены приведенные теплозащитные характеристики ограждающих конструкций. Выполнена проверка соответствия температурных режимов на внутренних поверхностях теплонапряженных элементов требованиям нормативной документации.

Ключевые слова: ограждающие конструкции, теплоперенос, температурный режим, температурное поле, термическое сопротивление, сопротивление теплопередаче, конденсация влаги, сэндвич панель.

Ссылка для цитирования: Абдулин А.А., Якпунова Р.У., Толстых А.В. Процессы теплопереноса в неоднородных узлах ограждающих конструкций // Инженерные исследования. 2023. №3 (13). С. 33-43. EDN: TCNCVP.

HEAT TRANSFER PROCESSES IN INHOMOGENEOUS NODES OF ENCLOSING STRUCTURES

A.A. Abdulin, R.U. Yakpunova, A.V. Tolstykh

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk (Russian Federation)

Abstract. The article evaluates the heat-protective properties of the coating and external walls made of sandwich panels, the entrance group of an administrative building with a metal frame, as well as predicts the temperature regimes in heterogeneous nodes of the enclosing structures of this building when operating in the climatic conditions of Tomsk, checks the enclosing structures for compliance with the requirements of regulatory documentation, assessment of additional thermal insulation of the metal beam, which is a cold bridge. On the basis of numerical simulation of stationary heat transfer in the external enclosing structures of the entrance group of an administrative building with a metal frame, the temperature fields in the selected heterogeneous fragments were calculated. The given heat-protective characteristics of the enclosing structures are determined. The compliance of temperature regimes on the internal surfaces of heat-stressed elements with the requirements of regulatory documentation was carried out. Assessments of possible condensation of moisture on the internal surfaces of the building envelope were carried out.

Keywords: building envelope, heat transfer, temperature regime, temperature field, thermal resistance, heat transfer resistance, moisture condensation, sandwich panel.

For citation: Abdulin A.A., Yakpunova R.U., Tolstykh A.V. Heat transfer processes in inhomogeneous nodes of enclosing structures // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.3 (13). Pp. 33-43. EDN: TCNCVP.

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент, соблюдение требований к сопротивлению теплопередаче наружных стен зданий при применении однослойных и однородных конструкций становится практически невозможным [1], поэтому возникает необходимость в разработке новых технических решений неоднородных наружных ограждений, обладающих повышенными теплозащитными свойствами и содержащих воздушные прослойки различной конфигурации, утепляющие вставки и прочие неоднородные элементы. В таких конструкциях широко применяются и различные металлические теплопроводные включения (гибкие связи, коннекторы, ребра, профили различной конфигурации и др.), что оказывает значительное влияние на величину и характер тепловых потерь [2].

Поэтому актуальными являются исследования, проводимые в процессе проектирования реальных зданий с многослойными и неоднородными ограждающими конструкциями [3-8], связанные с разработкой программ и проведением расчетов тепловых режимов многослойных ограждений зданий, позволяющих наметить пути к созданию конструкций, имеющих хорошие теплозащитные свойства [9].

В данной работе для определения теплозащитных характеристик наружных ограждающих конструкций проектируемой входной группы административного здания и проверки допустимости температурных режимов, прогнозируемых в ходе эксплуатации, были проведены расчеты двумерных стационарных температурных полей в неоднородных узлах наружных стен [10], примыкающих к покрытию здания.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОМЕЩЕНИЯ

Теплофизические расчеты проведены для климатических условий г. Томска. Расчетная температура - 39 °С, температура внутреннего воздуха в помещениях пристройки 20 °С, относительная влажность внутреннего воздуха 55%.

Рассматривается прямоугольное одноэтажное в плане строение с размерами в осях 11,1x24,0 м. Высота помещения составляет 4,5 м.

Конструктивная схема здания представляет собой металлический каркас и фундамент (рис. 1, рис. 2). В основе быстровозводимого здания с металлическим каркасом находится прочный металлический каркас, который базируется на ленточном фундаменте. Стены монтируются из сэндвич панелей МП ТСП-Z-200-1000-Г-Г-МВ.



Рис. 1. Расположение главных балок покрытия

Fig. 1. Location of the main roof beams

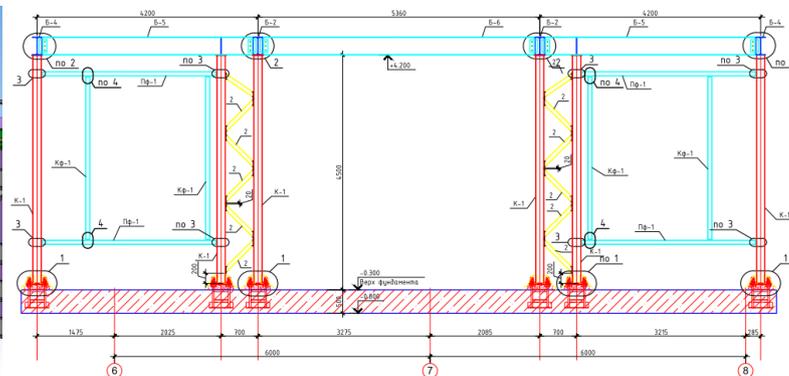


Рис. 2. Схема расположения колонн

Fig. 2. Column layout

Каркас здания выполнен из стали марки 350 по ГОСТ Р52246-2004, базы колонн, а также все сварные элементы – из стали марки С255.

Колонны – стальные 160x5 выполненные по ГОСТ 30245-2012, балки – двутавры, соответствующие требованиям СТО АСЧМ 20-93.

Покрытие многослойное: ПВХ мембрана; изоспан А; 2 слоя утеплителя XPS Carbon толщиной 50 мм со слоем XPS КЛИН (1,7 %); слой утеплителя ТЕХНОРУФ Н 30 толщиной 50 мм; паробарьер С; профлист Н60-845-0.8.

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДВУМЕРНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ФРАГМЕНТОВ

Для определения теплозащитных характеристик покрытия вне зоны влияния неоднородностей, расположенных в местах прохода металлических балок (двутавров) через наружные ограждающие

конструкции, и наружных стен входной части административного здания, достаточно провести расчет двумерных температурных полей в 2-х расчетных фрагментах:

1) Фрагмент покрытия (2 слоя утеплителя XPS Carbon толщиной 50 мм и слой утеплителя ТЕХНОРУФ Н 30 толщиной 50 мм) с примыкающей балкой (двухавром);

2) Фрагмент наружной стены с примыкающими металлическими колоннами (160x5 ГОСТ 30245-2012), выполненный из сэндвич панели¹ толщиной 200 мм.

Схемы этих расчетных фрагментов представлены на рис. 3, рис. 4.

Расчеты выполнялись в двумерной системе координат, для проведения расчетов были созданы скрипты, реализованные в пакете FlexPDE. Программная среда FlexPDE, позволяет получать решение дифференциальных уравнений, описывающих не только процессы распространения тепла, но и связанные с другими физическими задачами. В результате проведенных расчетов были получены двумерные поля температур в сечениях выбранных расчетных фрагментов.

В результате моделирования теплопереноса в неоднородных ограждающих конструкциях были определены общие термические сопротивления и сопротивления теплопередаче характерных фрагментов, выполнена проверка на возможность образования конденсата как на глади наружной стены и покрытия, так и в углах, где возможно локальное снижение температуры.

Наружная стена фасада

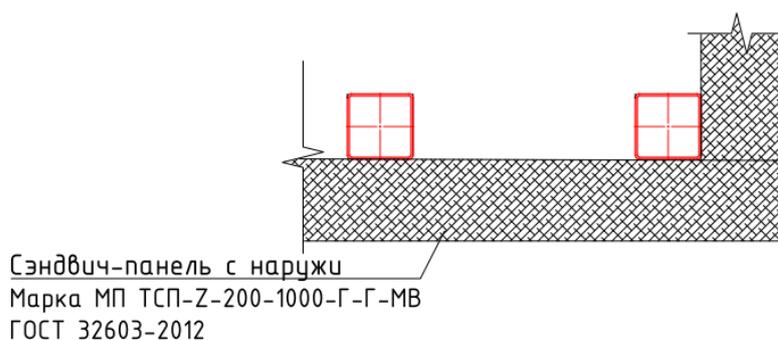


Рис. 3. Схема угла стены из сэндвич панелей с примыкающими колоннами
Fig. 3. Diagram of the corner of a wall made of sandwich panels with adjacent columns

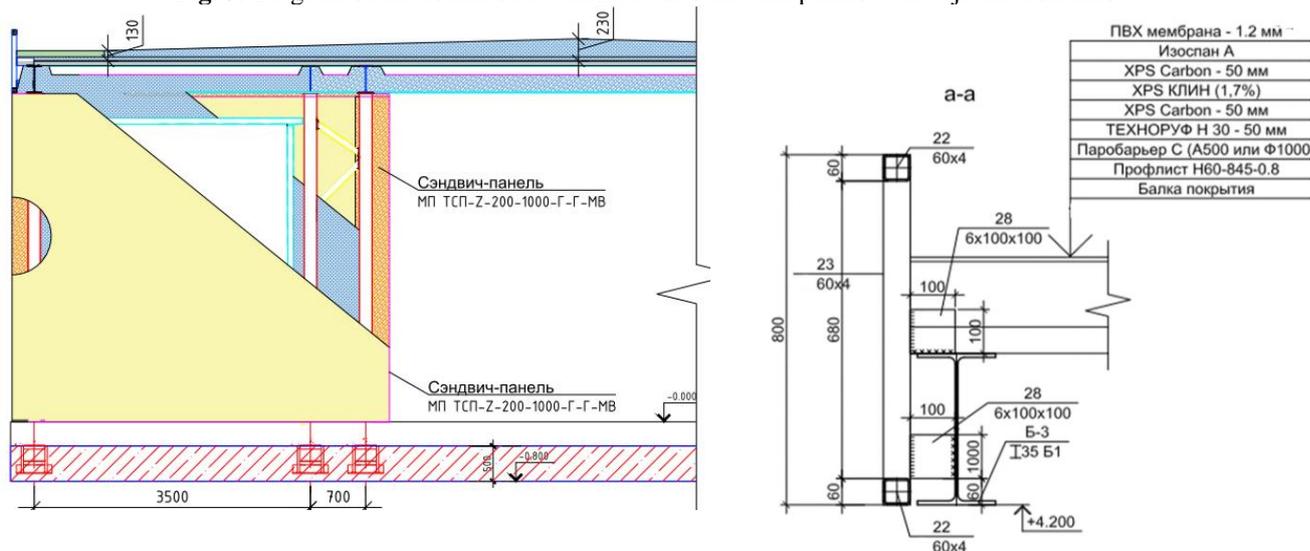


Рис. 4. Схема утепления кровли здания
Fig. 4. Roof insulation scheme of the building

¹ ТПК Профиль. Стеновые сэндвич панели [Электронный ресурс]. – URL: <https://profilvtomske.ru/sendvich-paneli/>. (дата обращения: 20.10.2023)

Все расчеты проводились в соответствии с нормативной документацией СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий». ГОСТ 32494-2013. «Межгосударственный стандарт здания и сооружения. Метод математического моделирования температурно-влажностного режима ограждающих конструкций», и рекомендациями технического руководства.

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФРАГМЕНТА ПОКРЫТИЯ С ПРИМЫКАЮЩЕЙ БАЛКОЙ (ДВУТАВРОМ)

Для выяснения теплового режима эксплуатации рассматриваемой входной группы административного здания важны результаты расчета теплопередачи в фрагменте покрытия с примыкающей балкой (двутавр - 35Б1 СТО АСЧМ 20-93), покрытой слоем теплоизоляции ППУ² толщиной 10 см. В этом варианте расчета предусматривалось использование металлического профлиста, как основы покрытия, при толщине слоя утеплителя ТЕХНОРУФ Н 50 мм и толщине 2-х слоев утеплителя XPS Carbon 50 мм в кровельном пироге.

Расчет выполнялся в двумерной декартовой системе координат, использовался программный пакет FlexPDE.

Было получено двумерное поле температур (рис. 6) в сечении выбранного расчетного фрагмента (рис. 5). По рассчитанному полю тепловых потоков было определено термическое сопротивление (Rk) и сопротивление теплопередаче (Ro) выбранного фрагмента (рис. 7):

Rk= 4.738221 (м²·°C)/Вт - приведенное термическое сопротивление всего расчетного фрагмента;

Ro= 4.896642 (м²·°C)/Вт - приведенное сопротивление теплопередаче всего расчетного фрагмента.

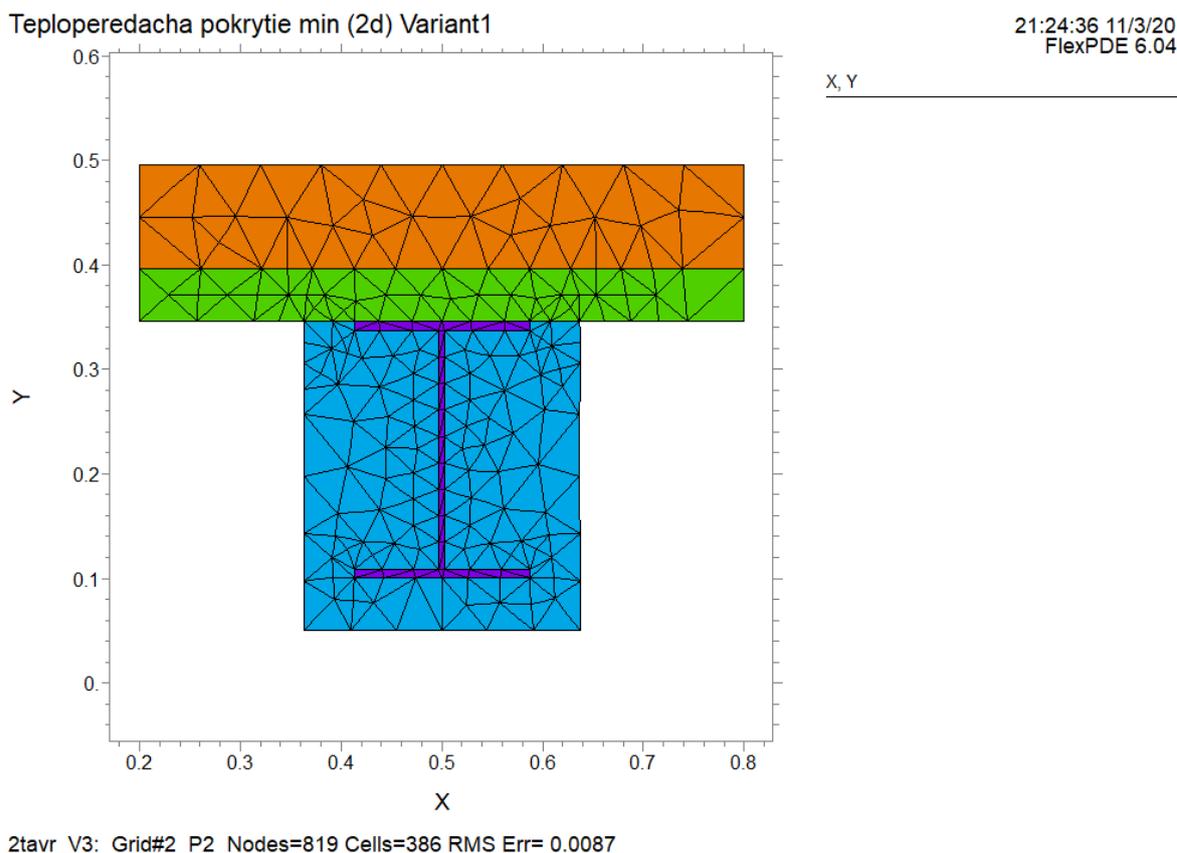


Рис. 5. Схема расчетного фрагмента, на которой показана конечно-элементная сетка
Fig. 5. Schematic of a computational fragment showing a finite element mesh

² Теплоизоляция и шумоизоляция пенополиуретаном [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.centrrpu.ru/?page=3&submenu=34>. (дата обращения: 18.10.2023)

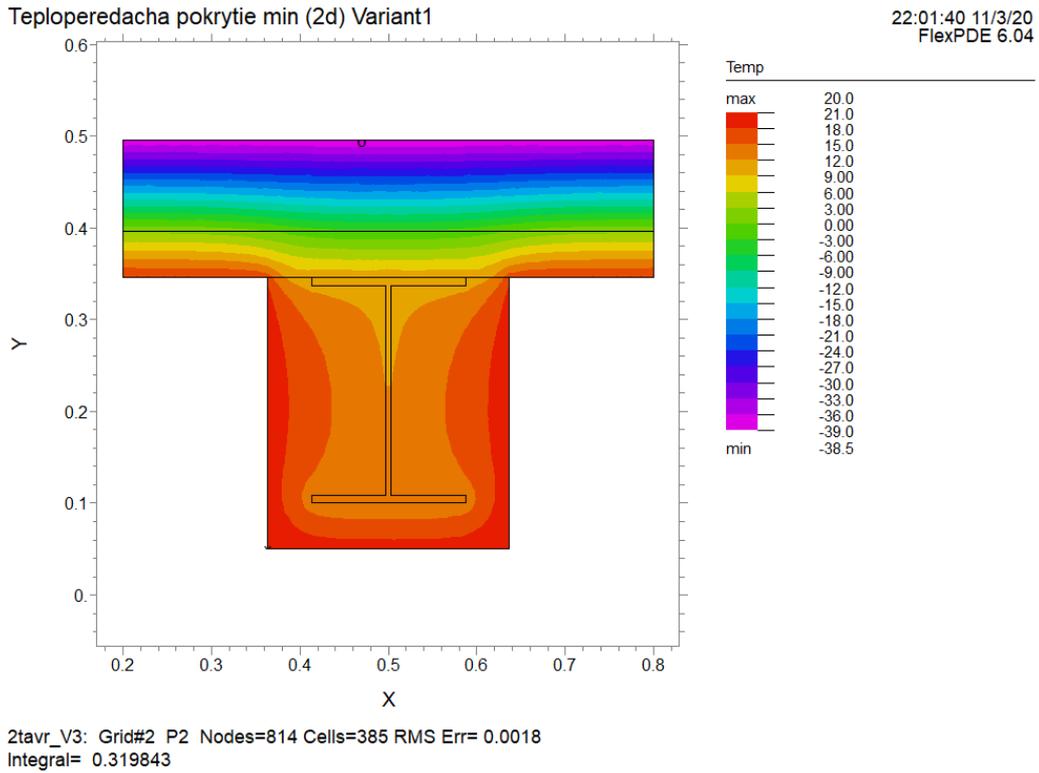


Рис. 6. Распределение температур в расчетном фрагменте
Fig. 6. Temperature Distribution in the Computational Fragment

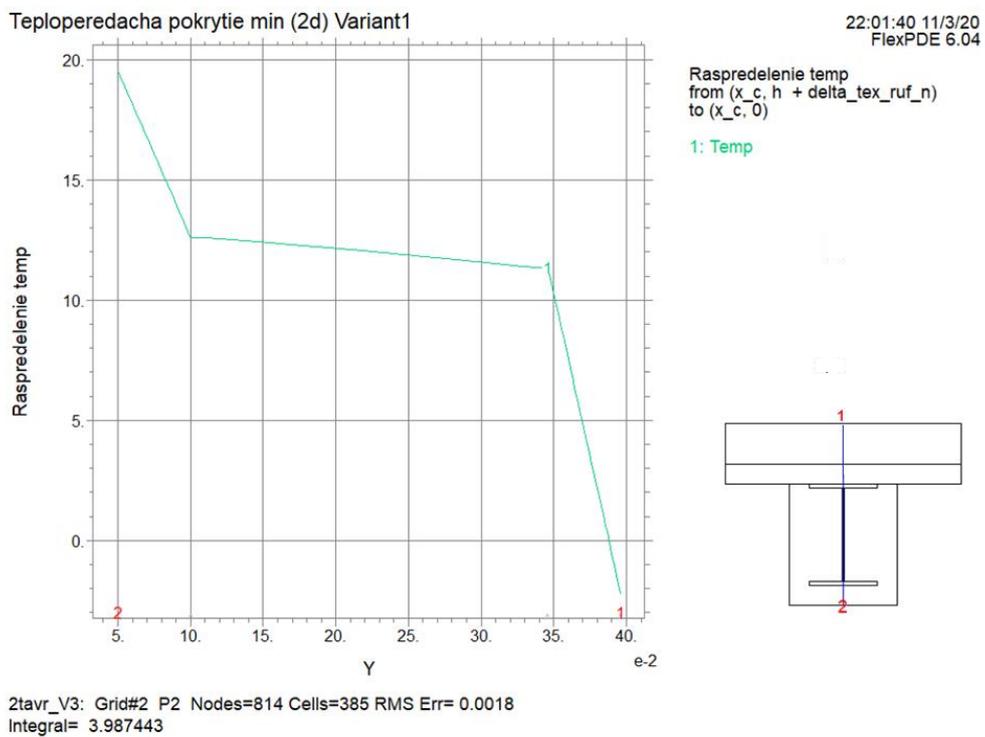


Рис. 7. Распределение температуры по толщине покрытия и в балке (по центру расчетного фрагмента)
Fig. 7. Temperature distribution over the coating thickness and in the beam (at the center of the design fragment)

Требуемое (нормируемое) сопротивление теплопередаче покрытий для административных зданий в климатических условиях г. Томска составляет $4,2 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$. Так как полученное расчетом сопротивление теплопередаче расчетного фрагмента больше требуемого, можно сделать вывод о том, что теплозащитные свойства покрытия соответствуют требованиям СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий».

Расчетом установлено, что температура на внутренней поверхности покрытия составляет 19°C (рис. 1, рис. 7), а перепад относительно температуры внутреннего воздуха 20°C , соответственно, 1°C .

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФРАГМЕНТА НАРУЖНОЙ СТЕНЫ, ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ СЭНДВИЧ ПАНЕЛИ ТОЛЩИНОЙ 200 ММ

Участок наружной стены, выполненной из сэндвич панели толщиной 200 мм – это еще один неоднородный фрагмент ограждений, температурное поле в котором может быть смоделировано в рамках двумерной задачи.

Далее представлены результаты расчета теплопередачи, в указанном выше, фрагменте стены с примыкающими колоннами для входной группы административного здания.

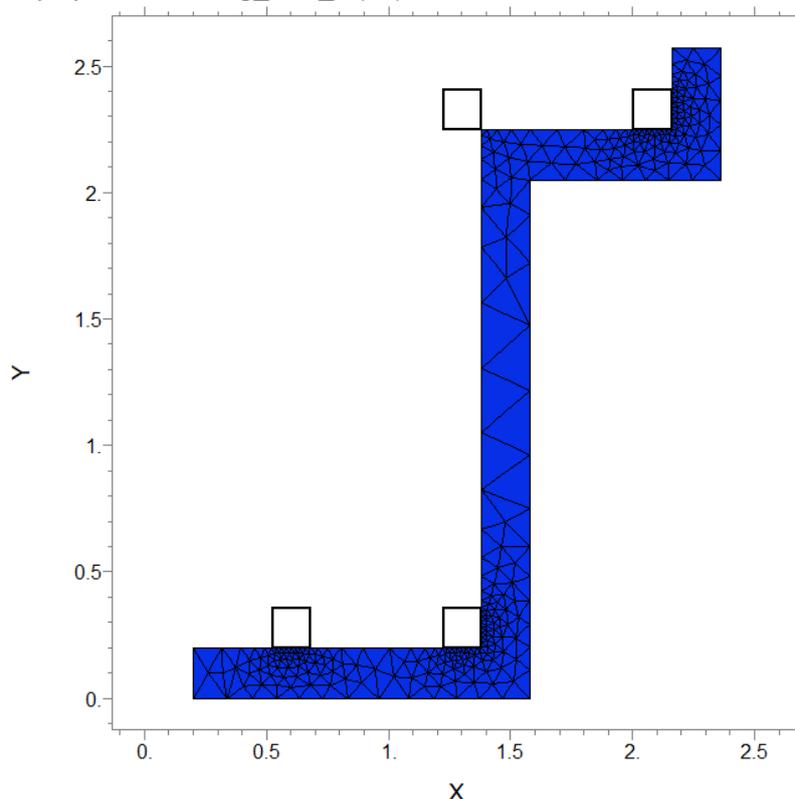
В результате выполненных численных расчетов в пакете FlexPDE было получено двумерное поле температур (рис. 9) в сечении выбранного расчетного фрагмента (рис. 8). По рассчитанному полю тепловых потоков было определено термическое сопротивление и сопротивление теплопередаче выбранного фрагмента:

$R_k = 4.719317 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ - приведенное термическое сопротивление всего расчетного фрагмента;

$R_o = 4.877738 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ - приведенное сопротивление теплопередаче всего расчетного фрагмента.

Требуемое (нормируемое) сопротивление теплопередаче стен для административных зданий в климатических условиях г. Томска составляет $3,15 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$.

Теплоperedacha frag_sten_1 (2d) Variant1



frag_sten_1_V1: Grid#1 P2 Nodes=1852 Cells=785 RMS Err= 0.0167

Рис. 8. Схема расчетного фрагмента, на которой показана конечно-элементная сетка
Fig. 8. Schematic of a computational fragment showing a finite element mesh

Расчетом установлено, что температура на внутренней поверхности глади стены (в том числе и при контакте с колоннами) составляет $17 \div 19^\circ\text{C}$ (рис. 9, рис. 10–12), а перепад относительно температуры внутреннего воздуха 20°C , соответственно, $3 \div 1^\circ\text{C}$.

Расчетный температурный перепад Δt_0 , °С, между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции не должен превышать нормируемой величины для стен $\Delta t_n = 4$ °С, согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Температура во внутренних углах (рис. 13, рис. 14) составляет 17 °С. Это выше температуры точки росы при влажности внутреннего воздуха в помещении 55% – 10,7 °С.

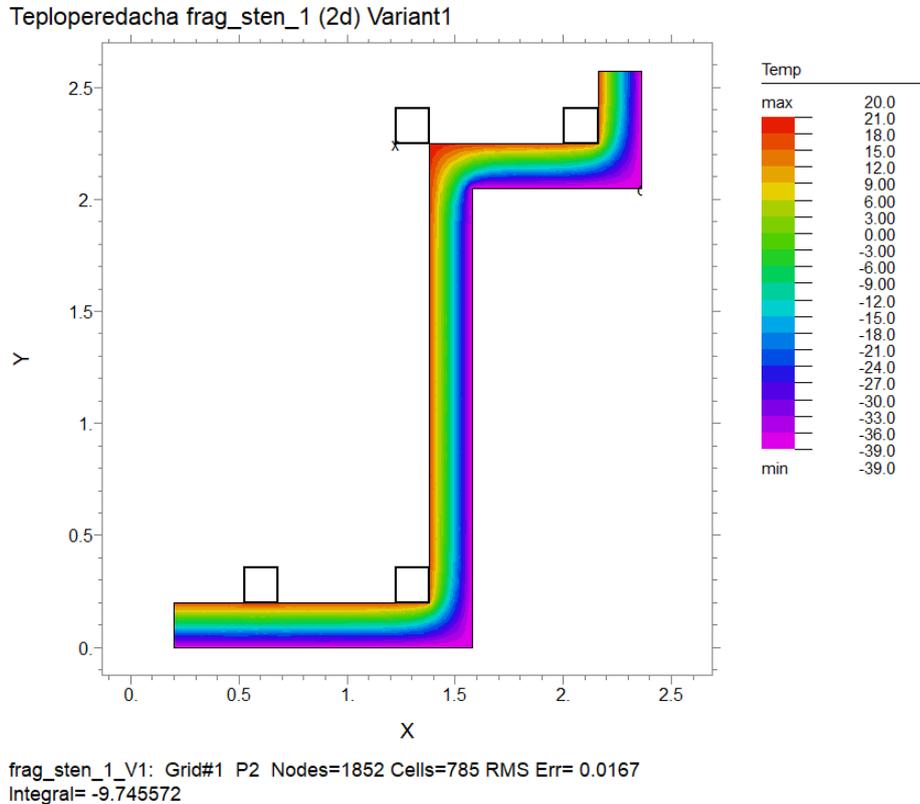


Рис. 9. Распределение температур в расчетном фрагменте
Fig. 9. Temperature Distribution in the Computational Fragment

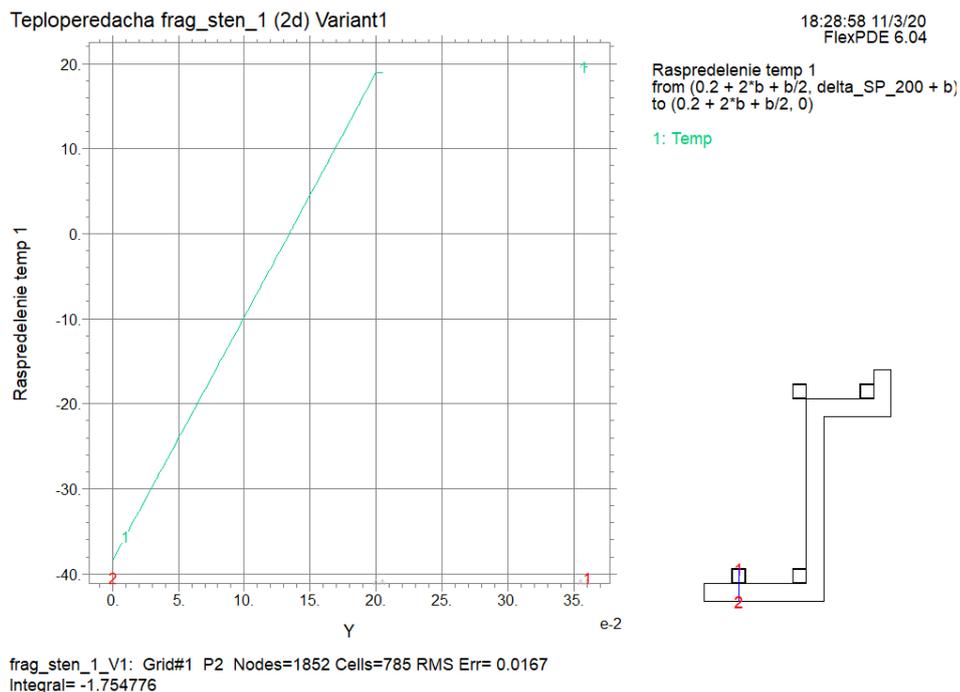


Рис. 10. Распределение температуры по толщине сэндвич панели и колонны 1
Fig. 10. Temperature Distribution by Thickness of Sandwich Panel and Column 1

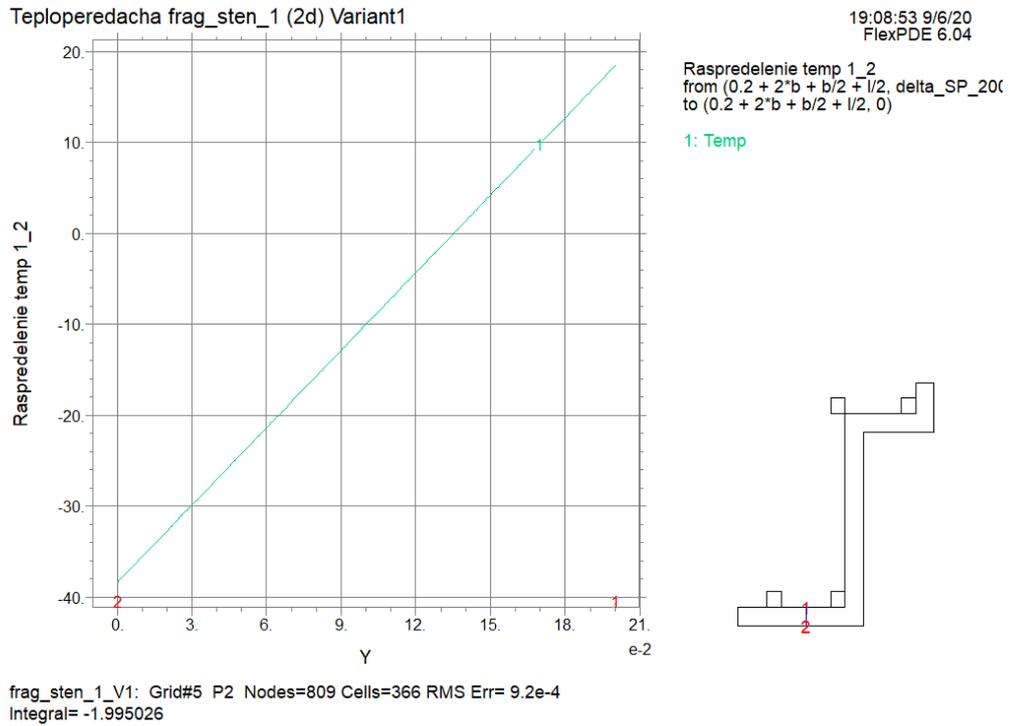


Рис. 11. Распределение температуры по толщине сэндвич панели в поперечном сечении между колонной 1 и колонной 2

Fig. 11. Temperature Distribution by Thickness of Sandwich Panel in Cross-Section between Column 1 and Column 2

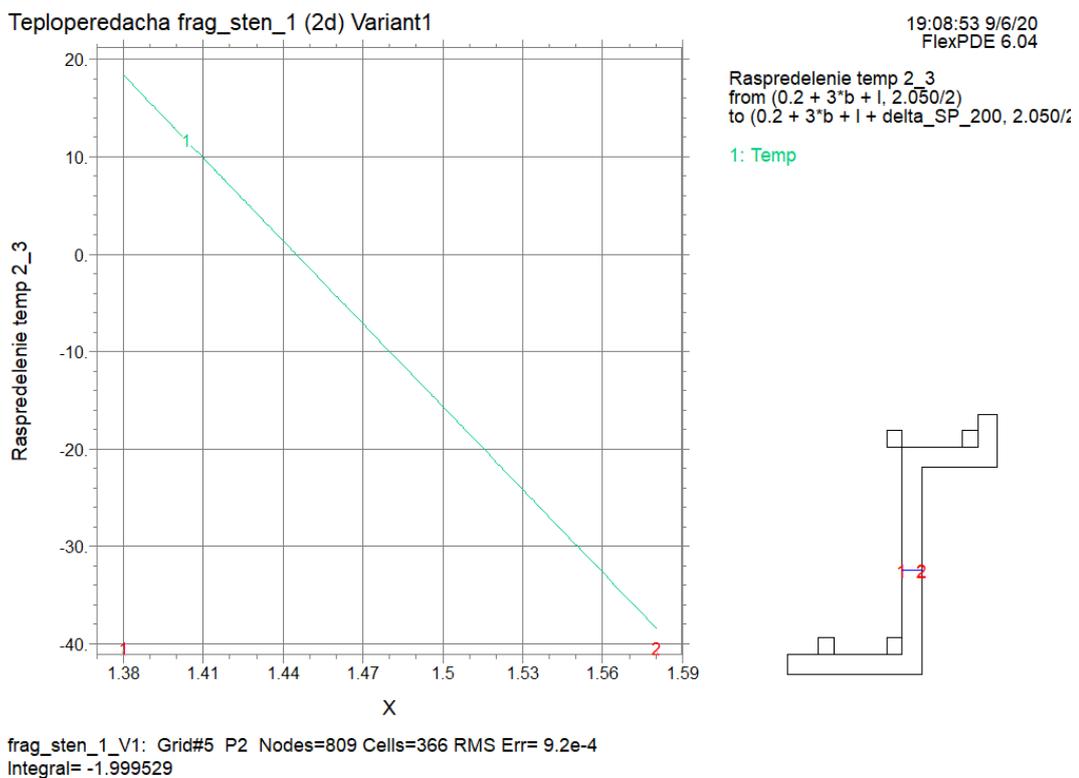


Рис. 12. Распределение температуры по толщине сэндвич панели в поперечном сечении между колонной 2 и колонной 3

Fig. 12. Temperature Distribution by Thickness of Sandwich Panel in Cross-Section between Column 2 and Column 3

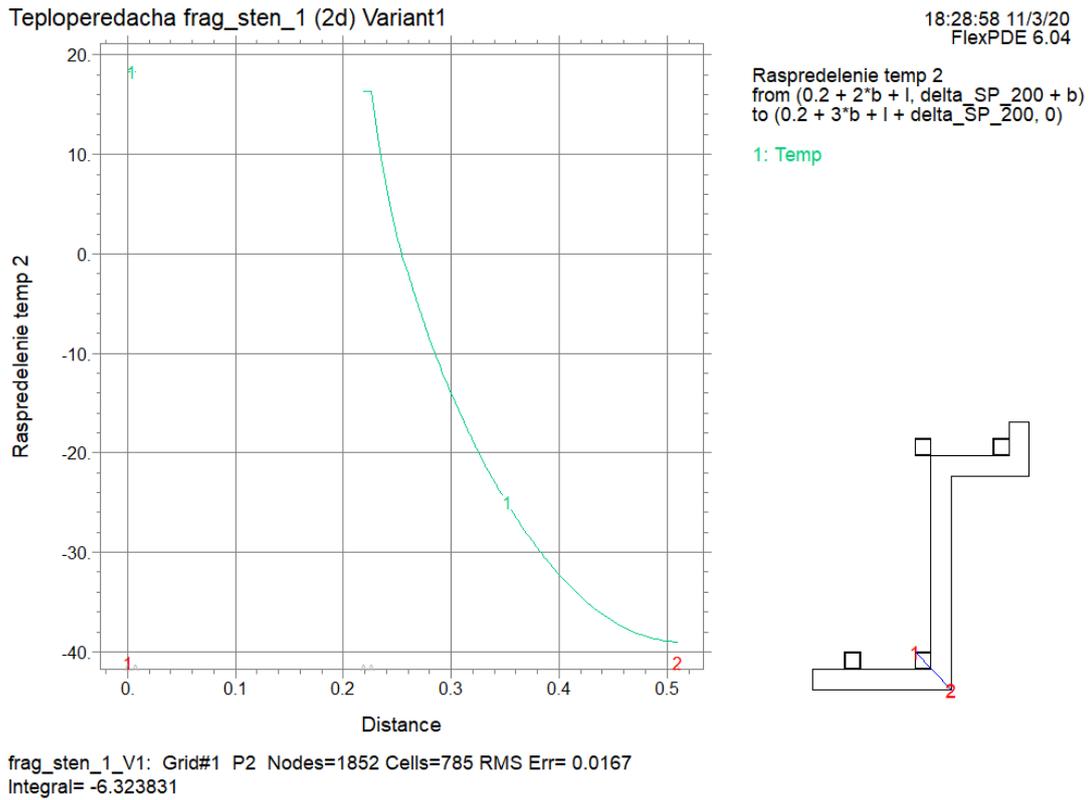


Рис. 13. Распределение температуры в углу 1 в сэндвич панели и в колонне 2
Fig. 13. Temperature Distribution in Corner 1 in Sandwich Panel and in Column 2

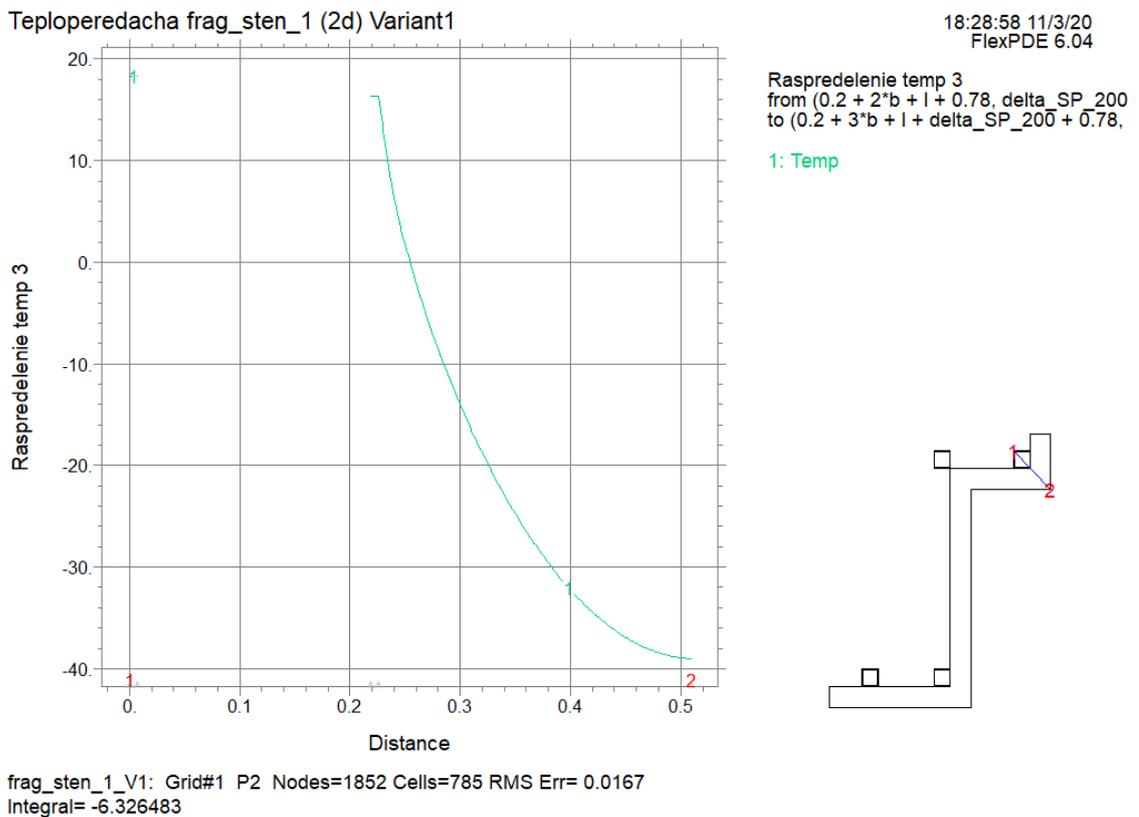


Рис. 14. Распределение температуры в углу 2 в сэндвич панели и в колонне 4
Fig. 14. Temperature Distribution in Corner 2 in Sandwich Panel and in Column 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных расчетов установлено: Конструкция покрытия в целом (без учета неоднородностей) при толщине слоя утеплителя ТЕХНОРУФ Н 50 мм и использовании 2 слоев утеплителя XPS Carbon толщиной 50 мм с ТЕХНОРУФ Н КЛИН (1,7%) соответствует требованиям к теплозащите административных зданий СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий».

Теплозащитные свойства наружной стены, выполненной из сэндвич панелей толщиной 200 мм соответствуют требованиям СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» как по сопротивлению теплопередаче, так и в части требуемого температурного перепада между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции. Конструкция стен соответствует требованиям, направленным на предотвращение конденсации влаги.

Для обеспечения нормативного температурного режима на внутренних поверхностях отапливаемого помещения входного блока административного здания, необходимо покрыть все металлические части балок (двутавров) (расположенные внутри помещения), проходящие вдоль наружной стены слоем тепло-изоляции - закрыто-ячеистым ППУ толщиной 10 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гражданкин А.А., Иванченко В.Т., Письменский А.В. Математическое моделирование теплопередачи через ограждающую конструкцию // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 6. С. 29-39. EDN: XHPBAW.
2. Manzan M., De Zorzi E.Z., Lorenzi W. Numerical simulation and sensitivity analysis of a steel framed internal insulation system // Energy and Buildings. 2018. Vol.158. Pp. 1703-1710. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.11.069
3. Горшков А.С., Рымкевич П.П. Диаграммный метод описания процесса нестационарной теплопередачи // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 8(60). С. 68-82. DOI 10.5862/MCE.60.8. EDN VBPWFZ.
4. Прусенков Н.А. Предпосылки использования влияния теплообмена на потерю тепловым потоком, пересекающим ограждение // Холодильная техника и технология. 2017. Т. 53, № 3. С. 29-33. EDN ZWNHYX.
5. Юрченко А.И., Щукина Т.В., Кузнецова Л.В. Влияние воздухопроницаемости наружных ограждений на энергосберегающую эксплуатацию зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 5. С. 79-83. EDN XQZTDF.
6. Statsenko E.A., Ostrovaia A.F., Musorina T.A., Kukolev M.I., Petritchenko M.R. The Elementary Mathematical Model of Sustainable Enclosing Structure // Magazine of Civil Engineering. 2016. No. 8(68). P. 86-91. DOI 10.5862/MCE.68.9. EDN YMDLBD.
7. Толстых А.В., Дорошенко Ю. Н. Экспериментальный способ определения фактической энергоэффективности жилого здания // Актуальные проблемы современности. 2016. № 2(12). С. 210-218. EDN YRWVLJ.
8. Дорошенко Ю.Н., Толстых А.В., Пенявский В. В. Оценка минимально возможной толщины стены каркасного здания для обеспечения эффективной теплозащиты // Евразийское Научное Объединение. 2017. Т. 1, № 6(28). С. 34-38. EDN YZBBWB.
9. Иванова Е. А., Козлобродов А. Н. Численное исследование влияния угла разворота на теплоперенос в многослойных элементах наружных ограждающих конструкций // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6, № 4(24). С. 69-87. EDN: SCDXXL.
10. Рубашкина Т. И. Нестационарный расчет тепловой защиты ограждающих конструкций зданий Рубашкина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 2(42). С. 188-195. EDN SKDVVV.

ОБ АВТОРАХ

Альвирт Альвиртович Абдулин – студент бакалавриата. Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). 634003, Россия, Сибирский федеральный округ, Томская область, г. Томск, пл. Соляная, д. 2. E-mail: alik.abduln.2000@mail.ru

Руслана Укеровна Якпунова – студент бакалавриата. Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). 634003, Россия, Сибирский федеральный округ, Томская область, г. Томск, пл. Соляная, д. 2. E-mail: ryakupnova@yandex.ru

Александр Витальевич Толстых – доцент кафедры «Теплогазоснабжения и инженерных систем в строительстве». Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). 634003, Россия, Сибирский федеральный округ, Томская область, г. Томск, пл. Соляная, д. 2. E-mail: sinvintie@rambler.ru

ABOUT THE AUTHORS

Alvirt A. Abdulin - Undergraduate student. Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB). 180161, Russia, Siberian Federal District, Tomsk Region, Tomsk, Solyanaya Square, 2. E-mail: alik.abdulin.2000@mail.ru

Ruslana U. Yakpunova - Undergraduate student. Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB). 180161, Russia, Siberian Federal District, Tomsk Region, Tomsk, Solyanaya Square, 2. E-mail: ryakpunova@yandex.ru

Alexandr V. Tolstykh – Associate Professor of the department “Heat and gas supply and engineering systems in construction”. Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB). 180161, Russia, Siberian Federal District, Tomsk Region, Tomsk, Solyanaya Square, 2. E-mail: sinvintie@rambler.ru