

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 536:21:674.038:699.86

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-155-169

*А.Н. КОЗЛОБРОДОВ, Е.А. ИВАНОВА, А.В. ГОЛОВКО,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОВКЛАДЫШЕЙ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье рассмотрены пространственные теплонапряженные элементы, которые оказывают влияние на теплотехнические свойства многослойных ограждающих конструкций. С использованием программного комплекса ANSYS проведено исследование влияния местоположения термовкладышей на процессы теплопереноса в зоне теплонапряженных элементов. Дана количественная оценка теплового состояния типичных фрагментов ограждающих конструкций в экстремальных условиях теплообмена. Приведены мероприятия, с помощью которых можно повысить температуру в области теплонапряженных элементов и понизить их негативное воздействие.

Ключевые слова: теплонапряженные элементы, теплоперенос, тепловые потери, энергоэффективность.

Для цитирования: Козлобродов А.Н., Иванова Е.А., Головки А.В. Исследование влияния термовкладышей на тепловое состояние теплонапряженных элементов многослойных ограждающих конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 155–169.

*A.N. KOZLOBRODOV, E.A. IVANOVA, A.V. GOLOVKO,
Tomsk State University of Architecture and Building*

THERMOFILLER EFFECT ON HEAT-STRESSED MULTILAYERED ENCLOSING STRUCTURES

The article deals with spatial heat-stressed elements that influence the thermal properties of multilayered enclosing structures. Using the ANSYS finite element program, the effect of thermofiller location on heat transfer processes is studied nearby the heat-stressed elements. A quantitative assessment is given to thermal conditions of heat-stressed elements of enclosing structure under extreme heat exchange conditions. Specific conditions are created to raise the temperature nearby the heat-stressed elements and reduce their negative effect.

Keywords: heat-stressed elements; heat transfer; thermal loss; energy efficiency.

For citation: Kozlobrodov A.N., Ivanova E.A., Golovko A.V. Issledovanie vliyaniya termovkladyshei na teplovoe sostoyanie teponapryazhennykh elementov mnogosloinykh ograzhdayushchikh konstruktssii [Thermofiller effect on heat-stressed multilayered enclosing structures]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 155–169. (rus)

В настоящее время эффективное использование произведенной тепловой энергии является мировой концепцией. Большинство стран, обладающих большими запасами природных ресурсов, осознали важность их рационального использования. Экономия энергопотребления является приоритетной проблемой, т. к. в жилищно-коммунальном секторе России потребление тепловой энергии составляет более 50 % от общего теплопотребления в стране. Причем одной из основных составляющих является отопление [1]. Поэтому большое внимание необходимо уделять энергоэффективным технологиям и энергосберегающим мероприятиям.

Дополнительные потери теплоты через наружные ограждающие конструкции возникают из-за так называемых теплонапряженных элементов (ТНЭ) и обусловлены недостаточно высоким термическим сопротивлением составляющих их конструктивных элементов. ТНЭ – это области сопряжения конструктивных элементов ограждающей конструкции с пониженным термическим сопротивлением, которые возникают вследствие наличия теплотехнической неоднородности.

ТНЭ присутствуют во всех домах, так, например, каждое здание может иметь в конструкции порядка 20 ТНЭ [2]. Наличие ТНЭ приводит к увеличению тепловых потерь, т. к. способствует ухудшению теплотехнических характеристик ограждающей конструкции. Кроме увеличения тепловых потерь ТНЭ повышают вероятность образования конденсата на внутренней поверхности ограждений, что приводит к возникновению плесени. Уменьшение влияния ТНЭ на теплотехническое состояние ограждающей конструкции является основным и эффективным решением для достижения значительного сокращения потребностей в тепловой энергии зданий.

В работе [3] изучается эффективность добавления локальных слоев тепловой изоляции (термовкладышей) для уменьшения влияния эффекта ТНЭ, образованных сопряжением двух наружных стен и сопряжением наружной и внутренней стены. Авторами показано, что включение частичной изоляции в конструкцию наружной стены позволяет ослабить или даже устранить влияние ТНЭ. Чем больше толщина изоляции, тем выше температура в области, подверженной воздействию ТНЭ.

Авторами работы [4] с помощью эксперимента показано динамическое тепловое поведение линейного ТНЭ в деревянном углу здания. Тепловой поток через деревянный угол измерялся датчиками теплового потока. Экспериментальные результаты были сопоставлены с численными значениями, полученными с помощью модели расчета теплообмена, разработанной авторами. Это сравнение показало удовлетворительное совпадение результатов. Расчеты показали, что тепловая амплитуда вблизи угла выше, даже когда используется теплоизоляция.

В работах [5–7] для оценки тепловых характеристик конструкций проводится количественное определение действия ТНЭ, которое показывает их значительное влияние на общую тепловую нагрузку здания.

Пониженная температура в зоне ТНЭ приводит к ухудшению теплоэнергетических характеристик и может сопровождаться возникновением конденсации и плесени, что негативно влияет на здоровье людей [8–10]. Для предотвращения поверхностной конденсации в области ТНЭ применяется теплоизолирующее облицовочное покрытие [11].

В настоящей работе моделирование теплового состояния элементов многослойных неоднородных конструкций проводится с помощью программного комплекса ANSYS Workbench для фрагментов домов, построенных по технологии монолитного домостроения с несъемной опалубкой «Велокс» (рис. 1). В качестве элементов конструкции были выбраны: угловой фрагмент, стык стены с перекрытием между первым и вторым этажами и стык балконной плиты и межэтажного перекрытия с наружной стеной. Для этих фрагментов расчет теплового состояния проводился в двух- и трехмерной постановке как для стационарного, так и для нестационарного случаев.

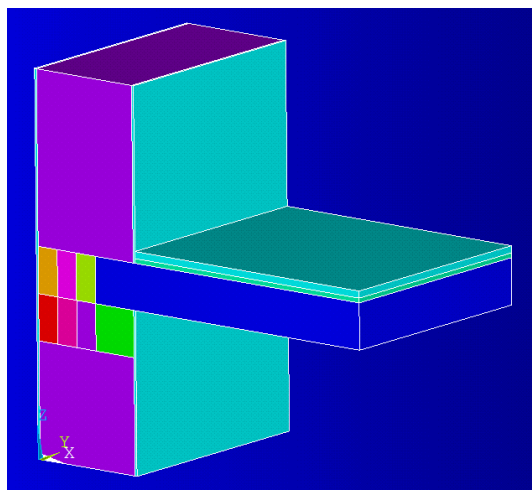


Рис. 1. Геометрия элемента конструкции

При математической постановке задачи предполагается, что известны геометрические размеры элементов ограждающей конструкции и их теплофизические характеристики (ТФХ): плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности, которые в общем случае могут зависеть от температуры. Также задаются температуры наружного t_{ext} (τ) и внутреннего t_{int} воздуха, коэффициенты теплоотдачи соответственно на наружной и внутренней поверхностях ограждения (α_{ext} , α_{int}), а также коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности перекрытия (α_{per}).

Задача решается в прямоугольной декартовой системе координат x , y , z .

Нестационарный пространственный теплоперенос в рассматриваемом фрагменте конструкции в декартовой системе координат описывается систе-

мой нелинейных нестационарных трехмерных уравнений теплопроводности, количество которых равно числу всех элементов (n), в нее входящих:

$$(\rho c)_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{x,i} \frac{\partial t_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{y,i} \frac{\partial t_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{z,i} \frac{\partial t_i}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, n$ с соответствующими начальными и граничными условиями.

В качестве начальных условий в расчетной области можно задавать температурное поле, соответствующее решению стационарной задачи, одно-родное температурное поле или температуру для каждого элемента (слоя) конструкции:

$$t_i|_{\tau=0} = t_0(x, y, z), \quad i = 1, \dots, N, \quad x, y, z \in \Omega. \quad (2)$$

Граничными условия на всех внутренних и внешних поверхностях рассматриваемого фрагмента конструкции являются граничные условия III рода, которые учитывают теплообмен этих поверхностей с окружающей средой и, например, для внутренних поверхностей могут быть записаны в виде

$$-\lambda_{n,m} \frac{\partial t_m}{\partial n} \Big|_{n=0} = \alpha_{\text{int}} (t_{\text{int}} - t_{\text{surf},m}), \quad (3)$$

где n – направление нормали к соответствующей поверхности; m – номер, соответствующий элементу конструкции, контактирующему с внутренним воздухом; $\lambda_{n,m}$ – коэффициент теплопроводности материала этого элемента; $t_{\text{surf},m}$ – температура граничащей поверхности.

На границах контакта двух соседних элементов задаются граничные условия IV рода, в соответствии с которыми на этой границе должно выполняться равенство температур и тепловых потоков:

$$t_{\text{гр},m} \Big|_{\text{гр}} = t_{\text{гр},m+1} \Big|_{\text{гр}}; \quad -\lambda_{n,m} \frac{\partial t_m}{\partial n} \Big|_{\text{гр}} = -\lambda_{n,m+1} \frac{\partial t_{m+1}}{\partial n} \Big|_{\text{гр}}. \quad (4)$$

На всех торцах рассматриваемого фрагмента конструкции задаются условия симметрии, соответствующие граничным условиям II рода с нулевым значением плотности теплового потока:

$$q|_{\text{гр}} = 0. \quad (5)$$

Здесь $\Omega = \{0 \leq x \leq X_k, 0 \leq y \leq Y_k, 0 \leq z \leq Z_k\}$ – замкнутая область изменения независимых пространственных переменных.

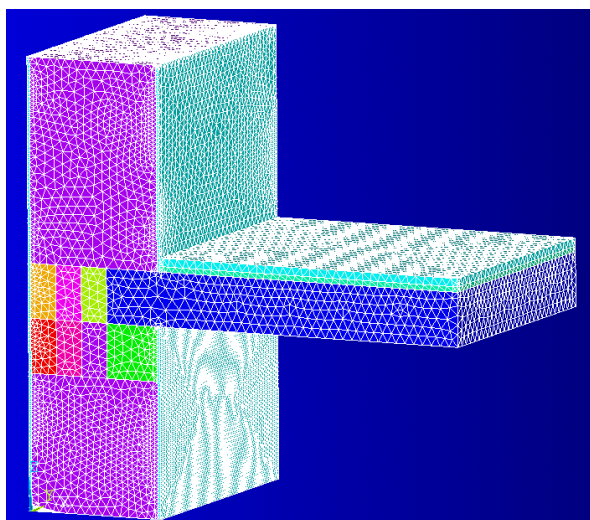
Для численной реализации математической модели (1) – (5) использовался метод конечных элементов, являющийся основой программного комплекса ANSYS.

Для решения используется математическая модель:

– геометрическая модель CAD представляет собой формализованную физическую модель;

– конечно-элементная сетка является математическим представлением геометрической модели CAD – это расчетная модель;

– точность расчетов определяется допущениями физической модели и плотностью сетки (рис. 2).



стекломагнезит $\delta = 0,01$ м
блоки ППС $\delta = 0,10$ м
керамзитобетон $\delta = 0,6$ м
ж/балка $0,2 \times 0,2$ м
ж/плита $\delta = 0,2$ м
утеплитель $\delta = 0,02$ м
паркетная доска $\delta = 0,02$ м

Рис. 2. Разбиение расчетной области на элементы

При решении задачи считаются заданными геометрические размеры элементов ограждающей конструкции и их теплофизические характеристики, которые в общем случае могут зависеть от температуры. Задаются толщина стекломагнезитовых плит $\delta = 0,01$ м и толщина керамзитобетона $\delta = 0,6$ м. В соответствии с СП температуры наружного и внутреннего воздуха принимаются соответственно равными -39 и $+20$ °С, а коэффициенты теплоотдачи наружных и внутренних сторон конструкции соответственно $\alpha_{ext} = 23$ Вт/(м²·°С) и $\alpha_{int} = 8,7$ Вт/(м²·°С). Коэффициенты теплопроводности задаются для стекломагнезитовых плит $\lambda = 0,14$ Вт/(м·°С), для керамзитобетона $\lambda = 0,5$ Вт/(м·°С) и $\lambda = 0,92$ Вт/(м·°С), для термовкладышей из пеноплекса $\lambda = 0,04$ Вт/(м·°С), для железобетонной плиты перекрытия и укрепляющей балки $\lambda = 1,68$ Вт/(м·°С), для утеплителя пола $\lambda = 0,05$ Вт/(м·°С) и для щитового деревянного паркета $\lambda = 0,17$ Вт/(м·°С).

Целью численного исследования, которое проводится с использованием программного комплекса ANSYS [12, 13], является количественная оценка влияния размеров и расположения термовкладышей на тепловое состояние рассматриваемого фрагмента конструкции, определение характера поведения температурного поля и поля плотности теплового потока, выдача рекомендаций по созданию энергоэффективных ограждающих конструкций, удовлетворяющих современным требованиям.

Геометрия расчетной области рассматриваемой конструкции представлена на рис. 3.

На рис. 4 изображены термограммы, полученные для фрагмента ограждающей конструкции, для двух случаев: (а) без термовкладышей и (б) с термовкладышами. В качестве термовкладышей использовались два бруска из экструдированного пенополистирола с поперечным сечением 50×220 мм в области плиты перекрытия и 100×220 мм в области железобетонной укрепляющей балки (рис. 3).

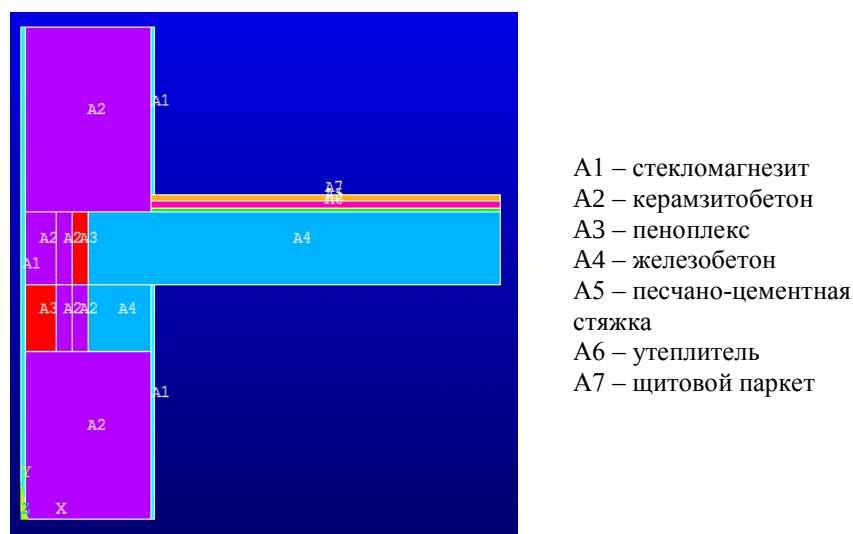
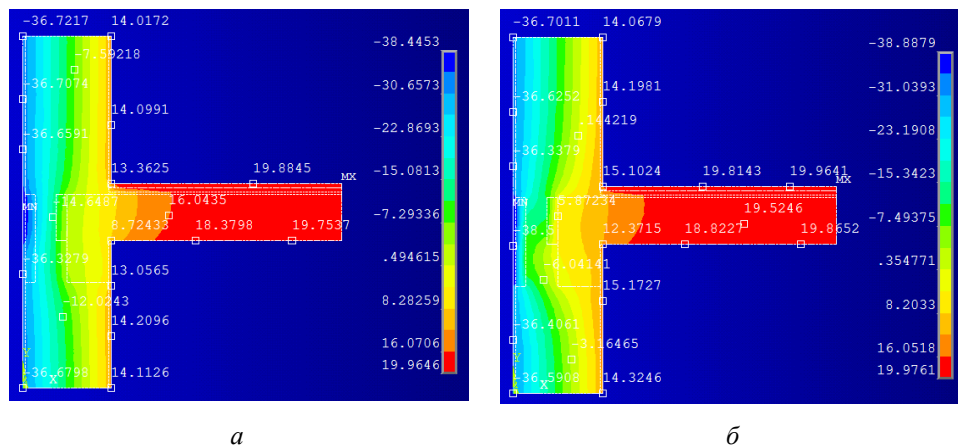


Рис. 3. Геометрия расчетной области

Рис. 4. Температурные поля фрагмента конструкции:
а – без термовкладышей; б – с термовкладышами

Анализ представленных результатов расчета теплового состояния рассматриваемого фрагмента конструкции показывает, что применение термовкладышей приводит к повышению температуры в области ТНЭ сопряжения стены с плитой перекрытия и области, примыкающей к укрепляющей балке. Из сравнения температурных полей в области расположения теплонапряженных элементов сопряжения плиты перекрытия и стены, а также встроенной в стену железобетонной балки видно, что использование термовкладышей увеличивает температуру угла как со стороны первого этажа, так и со стороны второго.

Из рисунка видно, что температура в углу сопряжения пола второго этажа и стены возросла с 13,36 до 15,1 °С, а в углу первого этажа увеличилась с 8,7 до 12,37 °С. Такой рост температуры подтверждает эффективность ис-

пользования термовкладышей в рассматриваемых экстремальных условиях теплообмена и говорит о том, что применение термовкладышей предотвращает образование конденсата на стенах как второго, так и первого этажа, т. к. температура точки росы при температуре 20 °С и относительной влажности $\phi = 60\%$ равна 12 °С.

На рис. 5 показано распределение температуры на стыке стены и перекрытия первого этажа (кривые 1, 2) и второго этажа (кривые 3, 4).

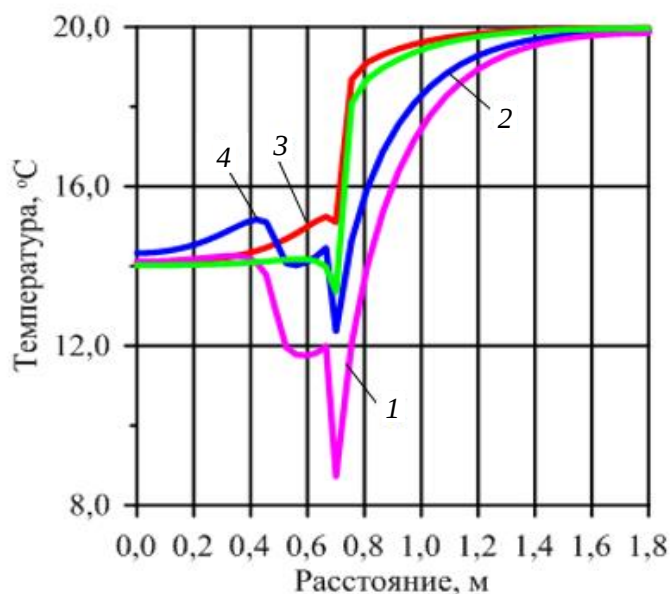


Рис. 5. Распределение температуры на стыке стены и перекрытия:

1, 2 – стык 1-го этажа без термовкладышей и с термовкладышами соответственно; 3, 4 – стык 2-го этажа без термовкладышей и с термовкладышами соответственно

Анализируя характер распределения температуры, следует отметить, что в области стыка стены и перекрытия наблюдается существенная деформация температурного профиля, а по мере удаления от стыка температуры выравниваются. Кроме того, этот рисунок еще раз подтверждает выводы, сделанные при анализе термограмм (рис. 4).

Рис. 6 иллюстрирует поведение полей плотности теплового потока для анализируемого фрагмента конструкции.

Визуальная картина поведения полей теплового потока показывает, что без термовкладышей характер распределения поля плотности теплового потока является более равномерным. Установка термовкладышей, их количество, размеры и месторасположение оказывают существенное влияние как на картину поведения температурного поля и поля плотности теплового потока, так и на числовые значения температур и тепловых потоков.

Численные эксперименты, проведенные для этого же фрагмента конструкции, но с использованием полимербетона, имеющего коэффициент теп-

лопроводности $\lambda = 0,08$ (Вт/(м·°C)), вместо керамзитобетона, показали, что в этом случае влияние термовкладышей становится незначительным, и, следовательно, их использование становится неэффективным.

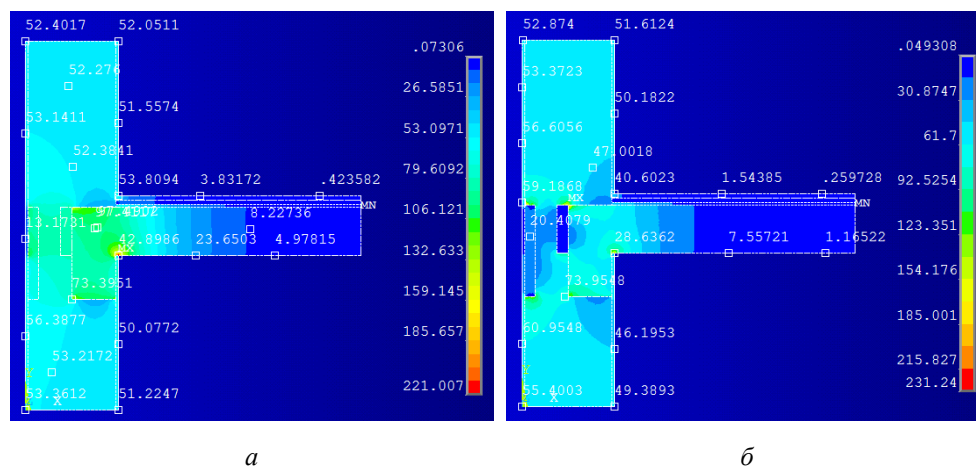


Рис. 6. Температурные поля фрагмента конструкции:
а – без термовкладышей; б – с термовкладашами

Рис. 7, 8 иллюстрируют соответственно пространственное распределение температурных полей и полей плотности теплового потока для двух вариантов, отличающихся тем, что в первом варианте для рассматриваемой конструкции использовался керамзитобетон с $\lambda = 0,5$ Вт/(м·°C), а во втором – тяжелый бетон с $\lambda = 0,92$ Вт/(м·°C).

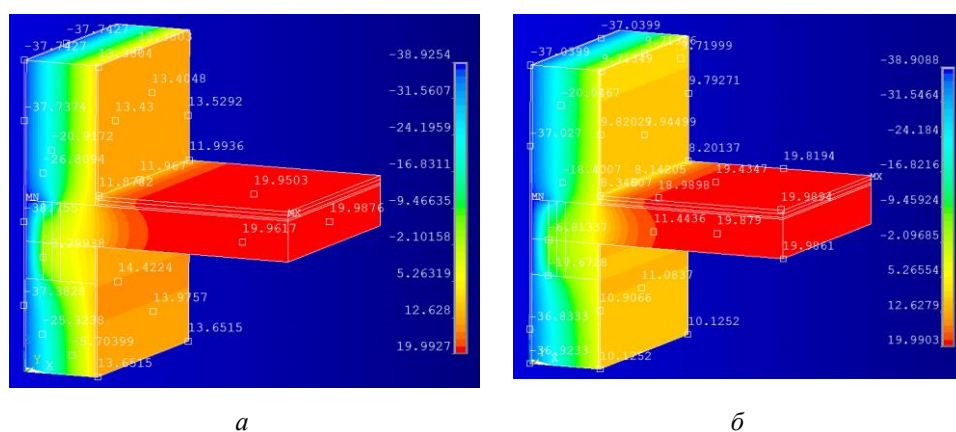


Рис. 7. Температурное поле фрагмента конструкции:
а – керамзитобетон с $\lambda = 0,5$ Вт/(м·°C); б – тяжелый бетон с $\lambda = 0,92$ Вт/(м·°C)

Сравнительный анализ представленных результатов показывает, что увеличение коэффициента теплопроводности бетона ухудшает ситуацию, т. к. приводит к снижению термического сопротивления и, следовательно, к росту

тепловых потерь и значительному падению температуры не только на стыке стены и плиты перекрытия, но и на глади стены. Для повышения температуры стыка выше температуры точки росы необходимо при этих условиях либо увеличить толщину стены, либо провести дополнительную теплоизоляцию наружной части конструкции.

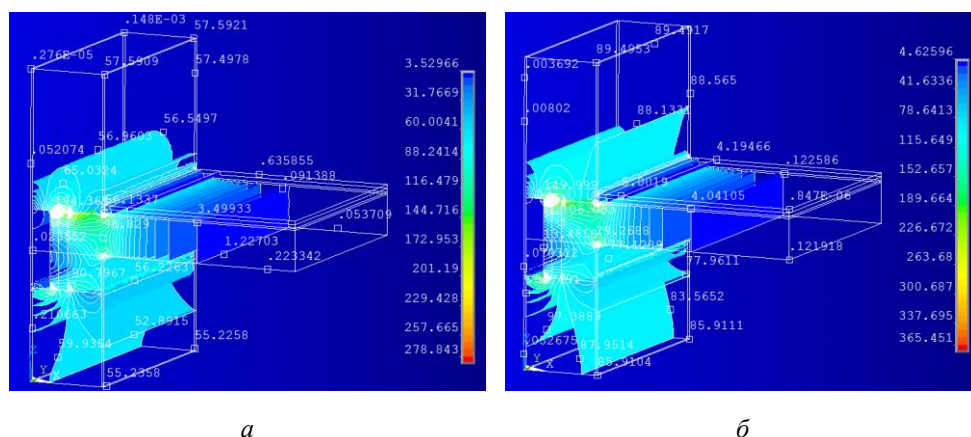


Рис. 8. Поле плотности теплового потока фрагмента конструкции:

а – керамзитобетон с $\lambda = 0,5$ Вт/(м·°С); б – тяжелый бетон с $\lambda = 0,92$ Вт/(м·°С)

На рис. 9 показана термограмма фрагмента конструкции, аналогичного рассмотренной ранее для керамзитобетонной стены с $\lambda = 0,5$ Вт/(м·°С), но с толщиной, увеличенной до 0,5 м. Из представленного рисунка видно, что увеличение толщины стены на 10 см привело к общему повышению температуры конструкции, а температура на стыке стены и перекрытия возросла более чем на 2 °С.

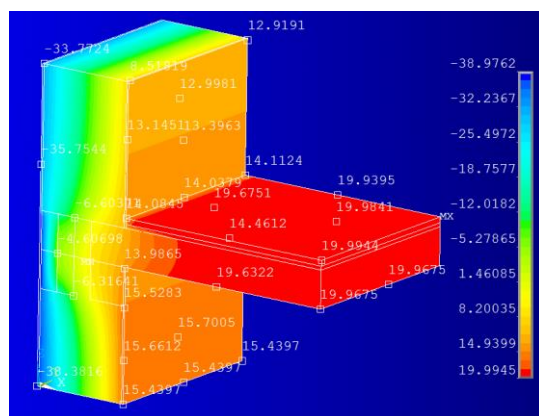


Рис. 9. Температурное поле фрагмента конструкции

В качестве примера другого ТНЭ был выбран угловой фрагмент наружной стены, выполненной по технологии монолитного домостроения с перекрытием между первым этажом и неотапливаемым вентилируемым подвалом.

Подобная конструкция разрывает тепловой контур здания и вызывает значительные потери тепла. Для этих фрагментов расчет теплового состояния проводился в стационарной постановке для двух- и трехмерного случая.

Рассматриваемые фрагменты представляют собой узел сопряжения монолитной наружной стены толщиной 424 мм, изготовленной из монолитного полимербетона с несъемной опалубкой, с железобетонной плитой перекрытия первого этажа толщиной 220 мм. В качестве теплоизолирующего элемента используется термовкладыш из экструдированного пенополистирола.

Фрагменты рассматриваемой конструкции представлены на рис. 10.

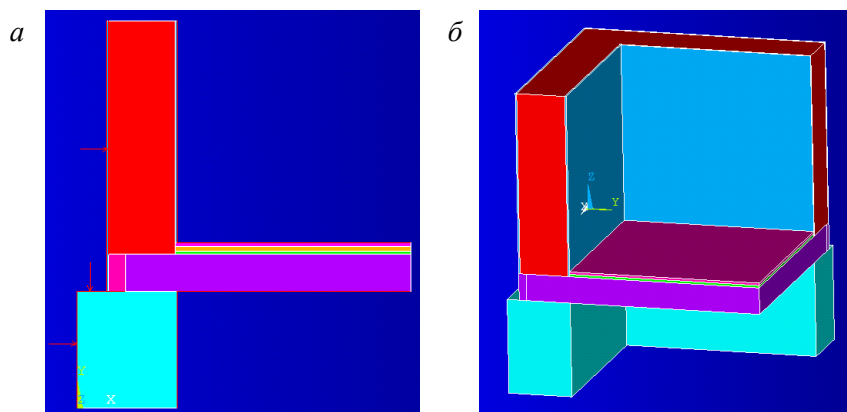


Рис. 10. Геометрия расчетной области

При математической постановке задачи считаются заданными геометрические размеры элементов ограждающей конструкции и их теплофизические характеристики. В соответствии с действующими нормативными требованиями заданы температуры наружного воздуха $t_{ext} = -39^\circ\text{C}$, внутреннего воздуха первого этажа $t_{int} = 22^\circ\text{C}$ и температуры вентилируемого подвального помещения $t_{bas} = 4^\circ\text{C}$, а соответствующие коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{ext} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, $\alpha_{int} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ и $\alpha_{bas} = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$. Коэффициенты теплопроводности материалов λ ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$), использующихся в рассматриваемом фрагменте конструкции, считаются постоянными и принимаются равными: бетон фундамента $\lambda = 1,63$, железобетонная плита перекрытия $\lambda = 2,04$, полимербетон $\lambda = 0,058$, стекломгнезит несъемной опалубки $\lambda = 0,14$, термовкладыш из экструдированного пенополистирола $\lambda = 0,04$, песчано-цементная стяжка $\lambda = 1,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, утеплитель пола $\lambda = 0,05$, щитовой паркет $\lambda = 0,17$.

Целью численных экспериментов является количественная оценка теплопереноса через наружное ограждение в областях, содержащих теплонапряженные элементы, с учетом влияния термовкладыша, укладываемого в местах сопряжения теплонапряженных элементов.

Ниже представлены некоторые результаты расчета.

На рис. 11 изображены термограммы, полученные для фрагмента ограждающей конструкции, представленного на рис. 10 для двух случаев. В качестве термовкладыша использовался брусок из пенополистирола с поперечным сечением $100 \times 220 \text{ мм}$.

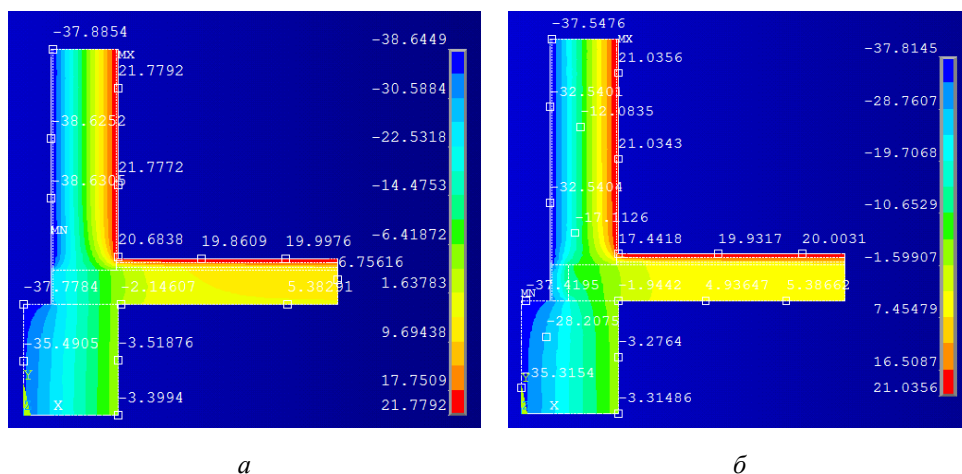


Рис. 11. Температурное поле фрагмента

Анализ представленных результатов расчета теплового состояния рассматриваемого фрагмента конструкции показывает, что применение термовкладыша приводит к заметному повышению температуры в области ТНЭ – сопряжения стены с плитой перекрытия, лежащей на бетонном фундаменте. Из сравнения температур в области угла видно, что использование термовкладыша увеличивает температуру угла как со стороны первого этажа, так и со стороны подвала.

Так температура угла со стороны первого этажа возросла с 17,44 до 18,3 °С, а со стороны подвала увеличилась с 4,16 до 0,72 °С. За пределами угла температура внутренней поверхности стены увеличилась с 21,06 до 21,72 °С, а температура пола сохраняется практически неизменной. Это подтверждается результатами, представленными на рис. 12.

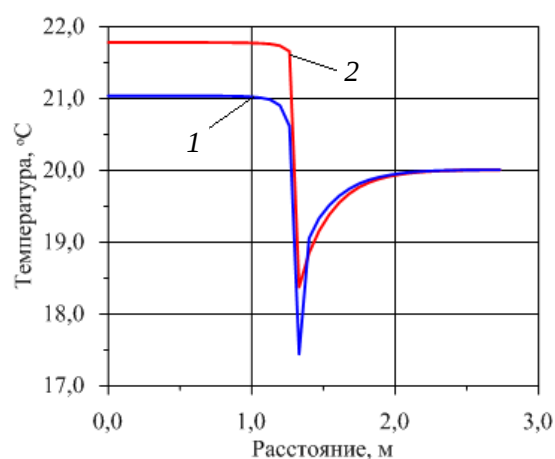


Рис. 12. Распределение температуры угла:
1 – ТНЭ без термовкладыша; 2 – ТНЭ с термовкладышем

Представляется интересным исследовать влияние свойств материала на тепловое состояние конструкции в одинаковых условиях.

Для анализа был выбран узел сопряжения монолитной наружной стены толщиной 600 мм, изготовленной из монолитного керамзитобетона с несъемной опалубкой, с железобетонной плитой перекрытия первого этажа толщиной 220 мм. В качестве теплоизолирующего элемента используется термовкладыш из экструдированного пенополистирола (рис. 13).

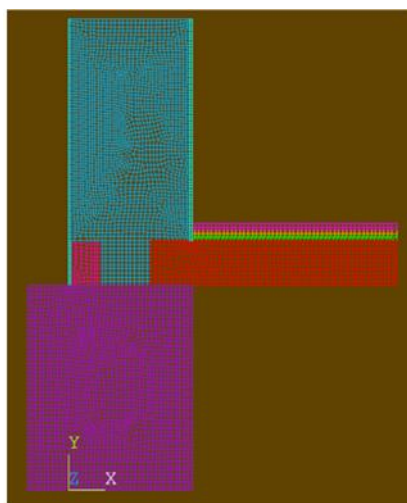


Рис. 13. Геометрия расчетной области

Рис. 14 иллюстрирует изменение температуры на стыке стены первого этажа и перекрытия. Из представленного рисунка видно, что повышение коэффициента теплопроводности λ (Вт/(м·°C)) с 0,5 до 0,92 приводит к понижению температуры стены более чем на 2 °C.

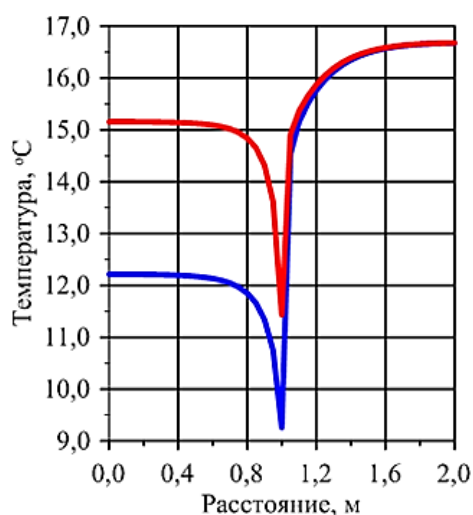


Рис. 14. Изменение температуры угла

Особенный интерес представляет исследование теплового состояния углового фрагмента конструкции (см. рис. 10, б). В этом случае, в силу отсутствия симметрии, необходимо решать пространственную задачу.

Рис. 15, 16 иллюстрируют температурные поля со стороны первого этажа и подвала соответственно.

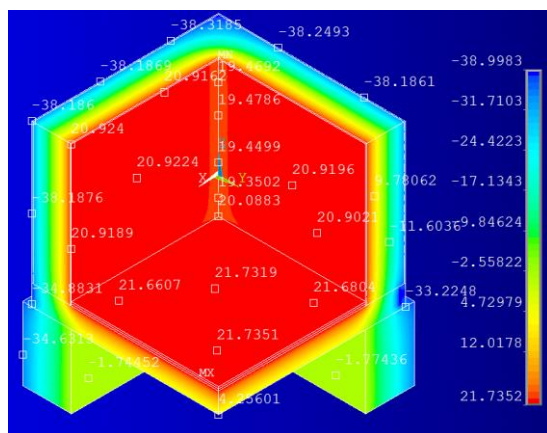


Рис. 15. Температурное поле углового фрагмента со стороны первого этажа

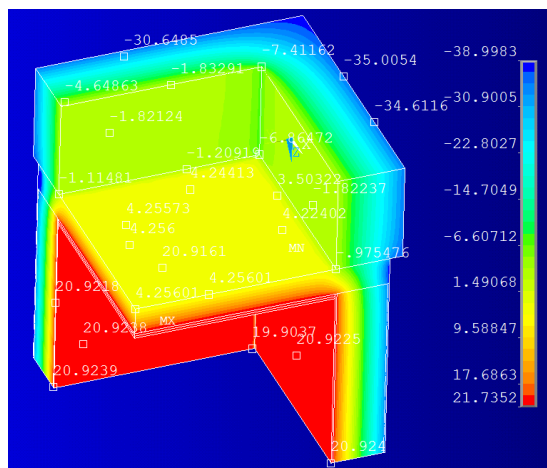


Рис. 16. Температурное поле углового фрагмента со стороны подвала

Из анализа представленных рисунков видно, что стены из полимербетона обеспечивают комфортные условия в помещении 1-го этажа, где температура в самом теплонапряженном месте (стыке плиты перекрытия) со стенами находится на уровне 20 °С.

Что касается подвала, то рис. 16 показывает, что температура поверхности потолка находится на уровне 4 °С, а на поверхностях стен она принимает даже отрицательные значения порядка –1 °С. Такие результаты говорят о том, что в рассматриваемом случае необходимо предпринимать меры для его утепления.

Анализ результатов проведенных расчетов показывает, что с помощью термовкладышей, регулируя их размеры и местоположение, можно активно влиять на перестройку температурных полей и полей плотности теплового потока, что является очень важным в процессе проектирования новых малоэтажных зданий.

Таким образом, численное исследование влияния термовкладышей на тепловое состояние конструкций, содержащих ТНЭ, проведенное с помощью программного комплекса ANSYS, позволяет выяснить влияние как геометрических, так и теплофизических характеристик материалов конструкции и сделать рекомендации по проектированию энергоэффективных зданий, удовлетворяющих современным требованиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савин И.К. Опыт энергосбережения Петрозаводского государственного университета // Коммунальный комплекс России. 2008. № 10. С. 2–14.
2. Svitak M., Krontorad K., Tomek J. Defining of thermal bridges of wood building and their elimination // Wood research. 2016. № 61 (4). P. 607–614.
3. Baochang Li, Lirong Guo, Yubao Li, Tiantian Zhang, Yufei Tan. Partial insulation of aerated concrete wall in its thermal bridge regions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. № 108. P. 1–8.
4. Joana Prata, Nuno Simões, António Tadeu. Heat transfer measurements of a linear thermal bridge in a wooden building corner // In Energy and Buildings. 2018. September. P. 194–208.
5. Kotti S., Teli D., James P.A.B. Quantifying Thermal Bridge Effects and Assessing Retrofit Solutions in a Greek Residential Building // Procedia Environmental Sciences. 2017. № 38. P. 306–313.
6. Ben Larbi A., Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Rosa Fra. Statistical modeling of heat transfer for thermal bridges of buildings // Energy and Buildings. 2005. № 37 (9). P. 945–951.
7. Laura Dumitrescu, Irina Baran, Radu Aurel Pescaru. The influence of thermal bridges in the process of buildings thermal rehabilitation // Procedia Engineering. 181 (2017). P. 682–689.
8. Жаркой П.А., Козлобродов А.Н., Недавний О.И. Нестационарный теплоперенос в пространственных элементах наружных ограждений на примере технологии «Велокс» // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 3. С. 164–175.
9. Козлобродов А.Н., Недавний О.И., Фудобин С.А. Численное исследование теплопереноса в тепловых мостах ограждающих конструкций каркасно-панельного типа // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. Т. 53. № 12. С. 166–171.
10. Козлобродов А.Н., Иванова Е.А. Анализ совместного влияния нескольких теплонапряженных элементов на тепловое состояние строительных конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1. С. 133–139.
11. Stefano Fantucci, Valentina Serra, Marco Dutto. Insulating coat to prevent mold growth in thermal bridges // Energy Procedia. 2017. № 10. P. 414–422.
12. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
13. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. М.: Компьютер Пресс, 2002. 224 с.

REFERENCES

1. Savin I.K. Opyt energosberegeniya Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta [Energy saving experience of Petrozavodsk State University]. *Kommunal'nyi complex Rossii*. 2008. No. 10. Pp. 12–14. (rus)
2. Svitak M., Krontorad K., Tomek J. Defining of thermal bridges of wood building and their elimination. *Wood Research*. 2016. No. 1 (4). Pp. 607–614.

3. Baochang L., Lirong G., Yubao L., Tiantian Z., Yufei T. Partial insulation of aerated concrete wall in its thermal bridge regions. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2017. No. 108. Pp. 1–8.
4. Prata J., Simões N., Tadeu A. Heat transfer measurements of a linear thermal bridge in a wooden building corner. *Energy and Buildings*. 2018. Pp. 194–208.
5. Kotti S., Teli D., James P. Quantifying thermal bridge effects and assessing retrofit solutions in a Greek residential building. *Procedia Environmental Sciences*. 2017. No. 8. Pp. 306–313.
6. Larbi B., Ascione F., Bianco N., Fra R. Statistical modeling of heat transfer for thermal bridges of buildings. *Energy and Buildings*. 2005. No. 37 (9). Pp. 945–951.
7. Dumitrescu L., Baran I., Pescaru R. The influence of thermal bridges in the process of buildings thermal rehabilitation. *Procedia Engineering*. 2017. V. 181. Pp. 682–689.
8. Zharkoi R.A., Kozlobrodov A.N., Nedavnii O.I. Nestatsionarnyi teploperenos v prostanstvennykh elementakh naruzhnykh ograzhdenii na primere tekhnologii ‘Veloks’ [Unsteady heat transfer in spatial elements of exterior structures using Veloks technology]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2011. No. 3. Pp. 164–175. (rus)
9. Kozlobrodov A.N., Nedavnii O.I., Fudobin. S.A. Chisslennoe issledovanie teploperenosa v teplovykh mostakh ogragdaushix konstruykiy karkasno-panelnogo tipa [Numerical study of heat transfer in thermal bridges of enclosing constructions of frame-panel type]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*. 2010. V. 53. No. 12. Pp. 166–171. (rus)
10. Kozlobrodov A.N., Ivanova E.A. Analiz sovmestnogo vliyaniya neskol'kix teplonaprygennykh elementov na teplovoe sostoyaniye stroitel'nykh konstruykiy [The joint effect from high-heat elements on thermal conditions of building structures]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 1. Pp. 133–139. (rus)
11. Fantucci S., Isaia F., Serra V., Dutto M. Insulating coat to prevent mold growth in thermal bridges. *Energy Procedia*. 2017. No. 10. Pp. 414–422.
12. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. ANSYS v rukakh inzhenera: Prakticheskoe rukovodstvo [ANSYS in the hands of the engineer: practical guide]. Moscow: Editorial URSS, 2003. 272 p. (rus)
13. Basov K.A. ANSYS v primerakh i zadachakh [ANSYS examples and problems]. Moscow: Komp'yuter Press, 2002. 224 p. (rus)

Сведения об авторах

Козлобродов Александр Николаевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, akozlobrodov@mail.ru

Иванова Елена Александровна, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, energosber_e@mail.ru

Головко Артем Витальевич, студент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, golov7031@gmail.com

Authors Details

Aleksandr N. Kozlobrodov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, akozlobrodov@mail.ru

Elena A. Ivanova, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, energosber_e@mail.ru

Artem V. Golovko, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, golov7031@gmail.com