

УДК 536:21:674.038:699.86

*КОЗЛОБРОДОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук,
профессор,
akozlobrodov@mail.ru
ИВАНОВА ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА, ст. преподаватель,
ivanova_e@sibmail.com
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

АНАЛИЗ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье рассмотрены теплонапряженные элементы, которые оказывают влияние на теплотехнические свойства ограждающих конструкций. Проведен анализ, и разработана численная модель для обнаружения потоков тепла через тепловые мосты. Дана количественная оценка теплопереноса через ограждающие конструкции в зоне теплонапряженных элементов, таких как угловой фрагмент наружной стены и фрагмент сопряжения угловой части наружной стены с балконной плитой. Приведены мероприятия, с помощью которых можно увеличить температуру в области теплонапряженных элементов.

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

*ALEKSANDR N. KOZLOBRODOV, DSc, Professor,
akozlobrodov@mail.ru
ELENA A. IVANOVA, Senior Lecturer,
ivanova_e@sibmail.com
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

THE JOINT EFFECT FROM HIGH-HEAT ELEMENTS ON THERMAL CONDITIONS OF BUILDING STRUCTURES

The paper presents the analysis of high-heat elements that have an effect on thermal properties of wall structures. The numerical model is designed to detect the heat flows passing through heat bridges. The quantification is given to heat transfer through the wall structures within the area of high-heat elements, such as an angular fragment of the external wall and a fragment of connection between the angular part of external wall and balcony plate. It is shown that the temperature can be increased in the area of high-heat elements.

Keywords: energy efficiency; heat loss; high-heat elements; heat transfer.

Увеличение энергоэффективности ограждающих конструкций зданий в период постоянного возрастания стоимости энергоресурсов является немаловажной задачей. Поэтому в настоящее время большое внимание уделяется повышению теплотехнических свойств наружных ограждений и, как следствие, уменьшению тепловых потерь через них.

В современном домостроении применяются различные варианты энергоэффективных наружных ограждающих конструкций, которые позволяют более экономно использовать энергетические ресурсы. Но так как практически все конструкции неоднородны по своей структуре, то происходят утечки тепла через так называемые теплонапряженные элементы (ТНЭ).

Известно, что ТНЭ оказывают большое влияние на теплотехнические характеристики ограждающих конструкций и способствуют увеличению тепловых потерь здания. ТНЭ – это участки сопряжения конструктивных элементов с пониженным термическим сопротивлением. Существуют геометрические ТНЭ, которые возникают вследствие архитектурно-конструктивных особенностей здания, и материальные, обусловленные различной теплопроводностью используемых строительных материалов. Основным следствием наличия таких элементов является понижение температуры на внутренней поверхности ограждений, примыкающих к проблемной области. Кроме увеличения теплопотерь здания, ТНЭ повышают вероятность образования конденсата на внутренней поверхности ограждений, что приводит к возникновению плесени. Причем слои воздуха в помещении, которые непосредственно контактируют с холодными поверхностями наружных ограждений, охлаждаются быстрее других до температуры поверхности [1]. Такая разница в температурных режимах может явиться причиной возникновения термических напряжений и привести к разрушению конструкций.

В современном доме существует около 20 основных теплонапряженных элементов [2]. Например, такие как наружные углы, сопряжение наружных стен и чердачных перекрытий, оконные и дверные проемы, стяжки и др. Очень часто в одной конструкции могут одновременно присутствовать несколько ТНЭ. Из этого ряда можно выделить такой элемент, как сопряжение наружной стены, плиты перекрытия и балконной плиты.

Балконы значительно увеличивают площадь и комфортность квартир. Одним из популярных решений устройства балкона является применение железобетонной плиты, но кроме требований прочности необходимо обеспечивать теплоизоляцию, т. к. сопряжение балконной плиты с наружной стеной создает теплонапряженный элемент большой протяженности, который можно сравнить с несколькими квадратными метрами наружной стены без теплоизоляции.

Происхождение этого ТНЭ можно объяснить проникновением холода на значительное расстояние вглубь балконной плиты, т. к. часть плиты непосредственно контактирует с наружным воздухом, а другая часть расположена внутри стены и контактирует с воздухом внутри помещения [3]. Следовательно, охлажденный железобетонный элемент конструкции способствует понижению температуры некоторых ее фрагментов, что значительно увеличивает теплопотери наружных стен, в которых впоследствии возникает риск образования конденсата.

Также в работе [4] авторы рассматривают влияние объемного теплопроводного включения на область распределения температурных полей и значения приведенного сопротивления теплопередаче.

В настоящей работе количественная оценка теплопереноса через ограждающие конструкции в зоне ТНЭ рассматривается на примере монолитной

наружной стены с несъемной опалубкой, выполненной по технологии VELOX и представляющей собой фрагмент сопряжения угловой части наружной стены с межэтажной плитой перекрытия и балконной плитой.

Этот фрагмент включает такие теплонапряженные элементы, как:

- наружный угол;
- сопряжение плиты перекрытия с наружной стеной;
- сопряжение балконной плиты с наружной стеной;
- стяжки, скрепляющие щепоцементные плиты.

Плиты VELOX состоят из древесной щепы – 90 %, цемента, жидкого стекла. Две щепоцементные плиты VELOX, наружная с приклеенным к ней утеплителем и внутренняя без утеплителя, устанавливаются параллельно на готовый фундамент с помощью специальных металлических стяжек, обеспечивающих надежное крепление несъемной опалубки и вертикальную устойчивость. Выставленную и закрепленную соответствующим образом несъемную опалубку заполняют бетоном. Многослойная конструкция стены по технологии VELOX включает в себя щепоцементную плиту, с внутренней и внешней стороны, толщиной 0,035 м, пенополистирольный утеплитель толщиной 0,15 м и тяжелый бетон – 0,15 м.

Геометрические размеры фрагментов ограждающей конструкции приведены на рис. 1. При математической постановке стационарных задач теплопроводности учитываются теплофизические характеристики применяемых материалов – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности. Также задаются температуры наружного t_{ext} и внутреннего t_{int} воздуха, коэффициенты теплоотдачи на наружной α_{ext} и внутренней α_{int} поверхностях ограждения.

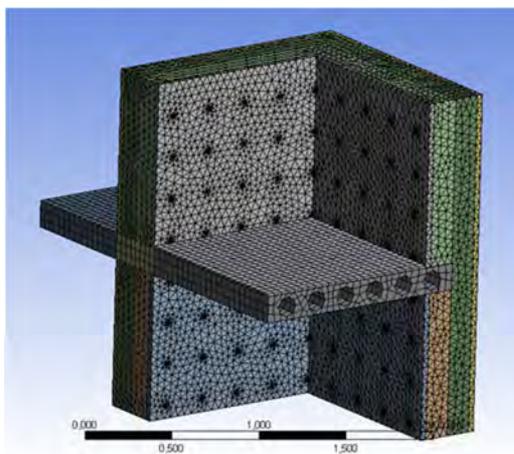


Рис. 1. Геометрия элементов конструкции

В соответствии с СП 131.13330.2012 принимаются температуры внутреннего и наружного воздуха $+22$ и -39 °С, а коэффициенты теплоотдачи наружных и внутренних сторон конструкции в соответствии с СП 50.13330.2012 $\alpha_{ext} = 23$ Вт/(м²·°С) и $\alpha_{int} = 8,7$ Вт/(м²·°С). Коэффициенты теплопроводности

принимается для железобетона $\lambda = 2,04$ Вт/(м·°С), для пенополистирола $\lambda = 0,041$ Вт/(м·°С), для щепоцементной плиты $\lambda = 0,11$ Вт/(м·°С), для стальных стяжек $\lambda = 50$ Вт/(м·°С), стеклопластиковых – $\lambda = 0,18$ Вт/(м·°С).

В работе [5] представлен расчет тепловых потерь в таких теплонапряженных элементах, как балконные плиты, в двухмерной плоскости. В работе [6] проведен анализ и разработана численная модель для исследования потоков тепла через тепловые мосты.

В исследуемом фрагменте конструкции рассматривается стационарный пространственный теплоперенос в декартовой системе координат. Процесс теплопереноса описывается системой нелинейных стационарных трехмерных уравнений теплопроводности. Количество уравнений равно числу всех элементов (n), в нее входящих, с соответствующими граничными условиями [7, 8].

Для численного решения математической модели применяется метод конечных элементов, являющийся основой программного комплекса ANSYS [9, 10].

На рис. 2 показано тепловое поле рассматриваемого фрагмента конструкции при условии, что плита перекрытия и балконная плита составляют единое целое и выполнены из монолитного бетона с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 2,04$ Вт/(м·°С).

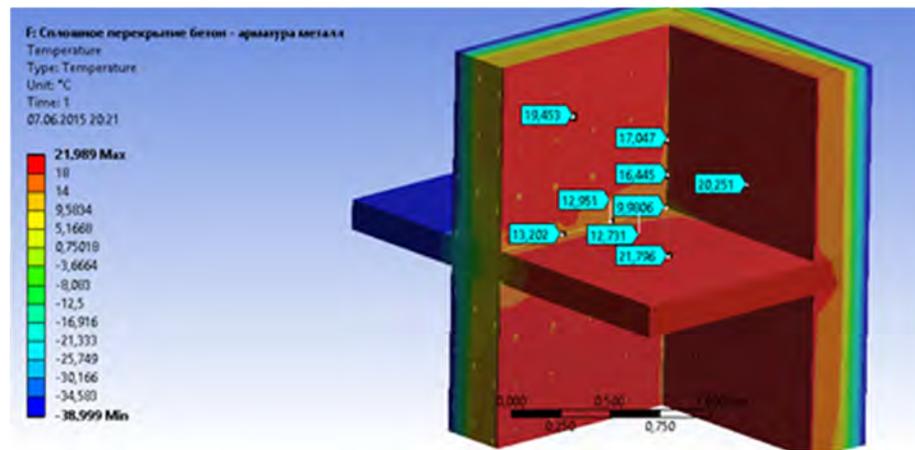


Рис. 2. Температурное поле фрагмента конструкции (плита перекрытия – бетон)

Распределение температуры на стыке стены и перекрытия иллюстрирует рис. 3. Из него видно, что стык неутепленной балконной плиты с наружной стеной является ярко выраженным ТНЭ. Анализ распределения температуры показывает, что температура в углу, образованном наружной стеной и перекрытием, составляет 9,6 °С, что не соответствует требуемым нормам. Такое значение ниже температуры точки росы, что может привести к образованию конденсата в области угла. Для жилых помещений при $t_{int} = +22$ °С и $\phi = 50$ % температура точки росы составляет $t_p = +10,5$ °С.

Для того чтобы уменьшить влияние балконной плиты на температуру угла, было смоделировано несколько вариантов для устранения негативного влияния этого теплонапряженного элемента.

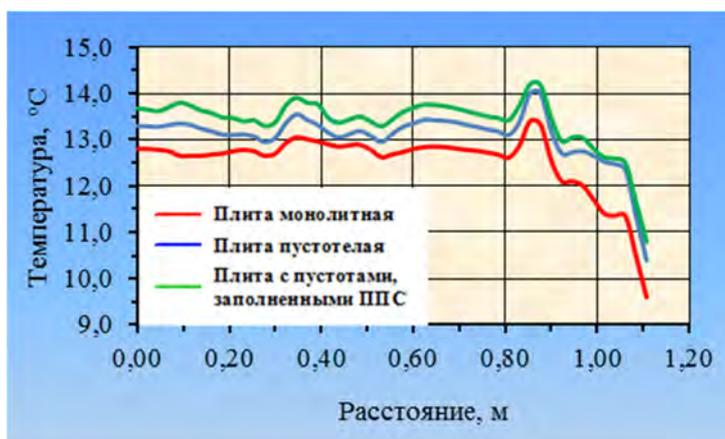


Рис. 3. Распределение температуры на стыке стены и перекрытия

В качестве первого варианта было решено заменить монолитную плиту перекрытия на стандартную, пустотелую. На рис. 3 показано, что замена плиты перекрытия на пустотелую привела к повышению температуры угла до $10,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что по-прежнему не удовлетворяет нормам.

Заполнение пустот пенополистиролом (кривая на рис. 3) привело к повышению температуры угла до $10,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это говорит о том, что данный вариант конструкции обеспечивает создание оптимальных параметров микроклимата в помещении (вероятность образования конденсата на внутренней поверхности ограждений исключена).

Также было рассмотрено влияние материала коннекторов на тепловое состояние конструкции. Для анализа были выбраны два типа коннекторов – стальные и стеклопластиковые. Коннекторы проникают главным образом в крупное сечение сквозных или ограждающих конструкций либо пересекают их. Традиционно большое внимание уделяется виду и толщине слоя утеплителя, а связующие элементы рассматриваются как несущественные составляющие теплоизоляционной системы. Между тем эти небольшие элементы проходят сквозь весь утепляющий слой и передают тепло от внутренней стены на улицу. Коннекторы в стене относятся к незначительным ТНЭ, но если они присутствуют в больших количествах, то могут образовывать большие утечки тепла.

На рис. 4 показано распределение температуры по поверхности стены вдоль коннекторов, расположенных в центральной части рассматриваемого фрагмента конструкции.

Сравнение двух вариантов, представленных на этом рисунке, показывает, что при использовании стальных коннекторов в распределении температуры наблюдаются пикообразные отклонения, достигающие $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, обусловленные значительным отличием коэффициента теплопроводности материалов, входящих в конструкцию, а замена стальных коннекторов на стеклопластиковые приводит к выравниванию температуры поверхности и устраняет мостики холода, в целом повышая температуру внутренней поверхности конструкции.

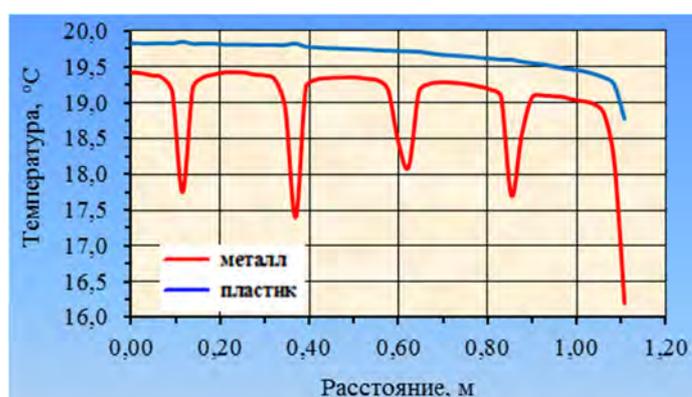


Рис. 4. Распределение температуры вдоль связей

Так как в современных хорошо утепленных зданиях проблема минимизации влияния ТНЭ и обеспечения теплотехнической однородности ограждающих конструкций встает особенно остро, то из вышеперечисленного можно сделать вывод, что заполнение пустот пенополистиролом приводит к улучшению параметров микроклимата в помещении, а применение стеклопластиковых коннекторов способствует уменьшению оттока тепла в этом теплонапряженном элементе.

Таким образом, численное исследование ТНЭ, проведенное с помощью программного комплекса ANSYS, позволяет выяснить влияние как геометрических, так и теплофизических характеристик конструкции и сделать рекомендации по созданию энергоэффективных ограждающих конструкций, удовлетворяющих современным требованиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егорова, Т.С. Повышение энергоэффективности зданий благодаря устранению критических мостиков холода и непрерывной изоляции выступающих строительных конструкций / Т.С. Егорова, В.Е. Черкас // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3. – С. 421–428.
2. Bernard, C. Thermal Bridging: An Investigation of the Heat Loss Effects of Thermal Bridges common in Irish Construction Practice / C. Bernard // Dublin Institute of Technology. – 1997.
3. Энергосберегающие конструктивные элементы наружных ограждений / Н.С. Кобелев, А.М. Крыгина, Е.И. Ершова, В.Н. Кобелев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5. – Ч. 2. – С. 170–174.
4. Вязова, Т.О. Влияние объемных теплопроводных включений на расчет приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции / Т.О. Вязова, С.Н. Овсянников // Вестник ТГАСУ. – 2015. – № 2. – С. 130–134.
5. Stijn Van, N. Numerical analysis of thermal bridges under dynamic boundary conditions / N. Stijn Van // Dissertation. Department of Architecture and Urban planning. Faculty of Engineering and Architecture. – 2014. – P. 88.
6. Transient heat transfer through walls and thermal bridges. Numerical modelling: methodology and validation / F. Ascione, N. Bianco, F. de' Rossi, G.P. Vanoli // Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, Italy. – 2012. – P. 567–581.
7. Козлобродов, А.Н. Нестационарный теплоперенос в пространственных элементах наружных ограждений на примере технологии «Велокс» / А.Н. Козлобродов, Р.А. Жаркой, О.И. Недавний // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 3. – С. 164–175.

8. Козлобродов, А.Н. Численное исследование влияния теплонапряженных элементов на тепловое состояние ограждающих конструкций в малоэтажном домостроении / А.Н. Козлобродов, Е.А. Иванова, В.А. Козлобродов // Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий : материалы II Всероссийской научной конференции с международным участием. – Новосибирск : Институт теплофизики СО РАН, 2015. – С. 90–97.
9. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
10. Басов, К.А. ANSYS в примерах и задачах / К.А. Басов. – М. : Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.

REFERENCES

1. Egorova T.S., Cherkas V.E. Povyshenie energoeffektivnosti zdaniy blagodarya ustraneniyu kriticheskikh mostikov kholoda i nepreryvnoi izolyatsii vystupayushchikh stroitel'nykh konstruktssii [Energy efficiency improvement of buildings by eliminating cold bridges critical and continuous insulation of projecting elements]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2011. No. 3. Pp. 421–428. (rus)
2. Bernard C. Thermal bridging: an investigation of the heat loss effects of thermal bridges common in Irish construction practice. Dublin Institute of Technology, 1997.
3. Kobelev N.S., Krygina A.M., Ershova E.I., Kobelev V.N. Energoberegayushchie konstruktivnye elementy naruzhnykh ograzhdenii [Energy-efficient structural elements of wall structures]. *Proceedings of the South-West State University*. 2011. No. 5-2. Pp. 170–174. (rus)
4. Vjazova T.O., Ovsjannikov S.N. Vlijanie obemnykh teploprovodnykh vkljuchenij na raschet privedennogo soprotivlenija teploperedache ograzhdajushhej konstrukcii [Thermally conductive inclusions affecting the analysis of reduced thermal wall resistance]. *Vestnik TSUAB*. 2015. No. 2. Pp. 130–134. (rus)
5. Stijn Van N. Numerical analysis of thermal bridges under dynamic boundary conditions. PhD Thesis. 2014. P. 88.
6. Ascione F., Bianco N., de' Rossi F., Vanoli G.P. Transient heat transfer through walls and thermal bridges. Numerical modelling: methodology and validation. *Proc. 2012 Winter Simulation Conf.*, Italy. 2012. Pp. 567–581.
7. Kozlobrodov A.N., Zharkoi R.A., Nedavnii O.I. Nestatsionarnyi teploperenos v prostranstvennykh elementakh naruzhnykh ograzhdenii na primere tekhnologii 'Veloks' ['Veloks' technology used for unsteady heat transfer in spatial elements of wall structures]. *Vestnik TSUAB*. 2011. No. 3. Pp. 164–175. (rus)
8. Kozlobrodov A.N., Ivanova E.A., Kozlobrodov V.A. Chislennoe issledovanie vliyaniya teplonapryazhennykh elementov na teplovoe sostoyanie ograzhdayushchikh konstruktssii v maloetazhnom domostroenii [Numerical analysis of high-heat elements affecting thermal conditions of walls in low-rise building construction]. *Proc. 2nd All-Rus. Sci. Conf. 'Energy- and Resource-Efficiency of Low-Rise Buildings'*. Novosibirsk: Kutateladze Institute of Thermal Physics SB RAS, 2015. Pp. 90–97. (rus)
9. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. ANSYS v rukakh inzhenera [ANSYS for engineers]. Moscow : Editorial URSS Publ., 2003. 272 p. (rus)
10. Basov K.A. ANSYS v primerakh i zadachakh [ANSYS in examples and problems]. Moscow : Komp'yuter Press, 2002. 224 p. (rus)