

Елена Александровна ИВАНОВА¹
Александр Николаевич КОЗЛОБРОДОВ²

УДК 536:21:674.038:699.86

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА РАЗВОРОТА НА ТЕПЛОПЕРЕНОС В МНОГОСЛОЙНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ*

¹ старший преподаватель
кафедры теплогазоснабжения и инженерных систем в строительстве,
Томский государственный архитектурно-строительный университет
energobser_e@mail.ru

² доктор физико-математических наук, профессор
кафедры теплогазоснабжения и инженерных систем в строительстве,
Томский государственный архитектурно-строительный университет
akozlobrodov@mail.ru

Аннотация

При строительстве малоэтажных зданий, имеющих разнообразные конструктивные элементы, важно иметь представление о их тепловом состоянии в экстремальных условиях теплообмена. Поэтому исследование процессов теплопереноса в теплонапряженных элементах наружных ограждений является актуальным и представляет значительный практический интерес.

Целью настоящей работы является проведение параметрических исследований в типичных угловых фрагментах неоднородных ограждающих конструкций с углами разворота от 60 до 150°. При этом анализ теплового состояния осуществляется как для наружных, так и для внутренних углов.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-48-700367).

Цитирование: Иванова Е. А. Численное исследование влияния угла разворота на теплоперенос в многослойных элементах наружных ограждающих конструкций / Е. А. Иванова, А. Н. Козлобродов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 4 (24). С. 69-87.
DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-69-87

Математическое моделирование пространственного теплопереноса в исследуемых конструкциях основывается на решении нелинейной системы дифференциальных уравнений теплопроводности с соответствующими краевыми условиями методом конечных элементов с помощью модуля Thermal, входящего в программный комплекс ANSYS.

Анализ численных результатов, приведенных для трех типов различных наружных ограждений, позволил выявить влияние их геометрических и теплофизических характеристик на распределение температуры и теплового потока по толщине рассматриваемых фрагментов, а также определить изменение этих параметров как на внутренней, так и на внешней поверхностях конструкции. Установить, что для всех типов ограждающих конструкций с увеличением угла разворота температура во внутреннем углу конструкции уменьшается, а в наружном — увеличивается, а плотность теплового потока ведет себя наоборот; расстояние от угла до зоны стабилизации с увеличением угла разворота уменьшается для всех типов конструкций как для температуры, так и для теплового потока; увеличение термического сопротивления приводит к повышению температуры и понижению плотности теплового потока в углу рассматриваемых фрагментов; выдать рекомендации по созданию энергоэффективных конструкций, удовлетворяющим современным требованиям.

Ключевые слова

Теплонапряженные элементы, теплоперенос, теплофизические характеристики, численное моделирование, тепловые потери, энергосбережение.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-69-87

Введение

Экономия энергетических ресурсов в настоящее время является одной из важнейших государственных задач [10]. Повышение энергоэффективности зданий и сооружений различного назначения должно решаться не только на стадии проектирования, но и также в процессе реконструкции и эксплуатации [2, 6]. Сокращать количество потребляемых энергоресурсов можно путем уменьшения потерь теплоты через ограждающие конструкции. Этим методом можно достичь как обеспечение энергетической эффективности зданий, так и создание комфортного теплового режима помещений.

Вопросы теплопереноса в наружных ограждениях весьма актуальны, особенно в тех случаях, когда в конструкции здания присутствуют различные теплонапряженные элементы (углы, эркеры, колонны и т. д.). В таких случаях меняется характер теплопередачи, который приводит к нарушению распределения температуры на поверхности ограждения, к возникновению областей с повышенными теплопотерями и как следствие к образованию конденсата и плесени.

В России сейчас отмечается увеличение строительства малоэтажных домов [1, 12]. Это обосновывается повышенным вниманием, увеличением государственной поддержки и экономической эффективностью комплексной малоэтажной застройки.

В работе рассмотрено три варианта конструкции стены с разным углом разворота широко использующиеся в малоэтажном строительстве.

Актуальность проблемы

В малоэтажном строительстве возводятся стены, выполненные по разным технологиям, поэтому выбор конструкции наружных стен является немаловажным фактором для определения стоимости строительства индивидуального дома и связанных с дальнейшей эксплуатацией затрат на отопление [7]. Причем очень важно разработать и научно аргументировать новые энергоэффективные ограждающие конструкции, которые давали бы возможность экономить топливно-энергетические ресурсы. Но очень часто появляется проблема с возникновением дополнительных тепловых потерь, которые происходят при наличии в ограждающей конструкции каких-либо теплотехнических неоднородностей или другими словами теплонапряженных элементов (ТНЭ) [13-15]. ТНЭ ухудшают теплофизические свойства наружных ограждений, что приводит к повышению теплопотерь.

Существенную роль в создании тепловых потерь играют наружные углы зданий [9]. В своей работе [8] О. Д. Самарин показывает, что в области наружного угла, со стороны внутренней поверхности, температура понижается относительно глади стены.

В то же время можно отметить: чем шире стена, тем дальше зона стабилизации температуры [3].

В работе Ю. И. Толстой [11] приведен порядок расчета тепловых потерь для зданий сложной формы. Результаты расчета показывают, что при уменьшении угла разворота наружной стены тепловые потери увеличиваются.

Следовательно, актуальность выбранного направления исследования объясняется важностью увеличения теплоэффективности ограждающих конструкций, применяющихся в индивидуальном домостроении холодных климатических регионов России.

Объекты исследования

В данной работе проводится анализ влияния угла разворота между наружными стенами на теплоперенос на примере фрагмента углового ограждения при изменении угла от 60 до 150°. Исследование проводится как для наружных, так и внутренних углов фрагментов конструкций.

Рассматриваются три варианта фрагментов многослойной конструкции: стена из керамзитобетона с утепляющими вставками, стена, построенная по технологии «VELOX» и стена из кирпича.

На рис. 1 изображен фрагмент наружного ограждения монолитной наружной стены, в которой расположены теплоизоляционные вставки. В данном варианте конструкции наружного и внутреннего углов совпадают.

На рис. 2 показан фрагмент наружного ограждения, построенного по системе «VELOX» и состоящей из щепоцементной плиты, пенополистирола (ППС) и бетона [5].

На рис. 3 показан фрагмент наружного ограждения из кирпича. Наружная стена состоит из керамического кирпича на цементно-песчаном растворе толщиной 0,77 м и штукатурки из ЦПР толщиной 0,03 м.

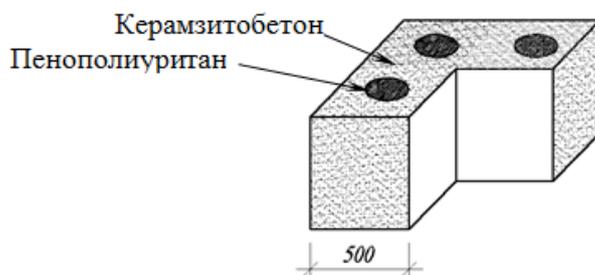


Рис. 1. Конструкция стены из керамзитобетона

Fig. 1. The expanded clay wall structure

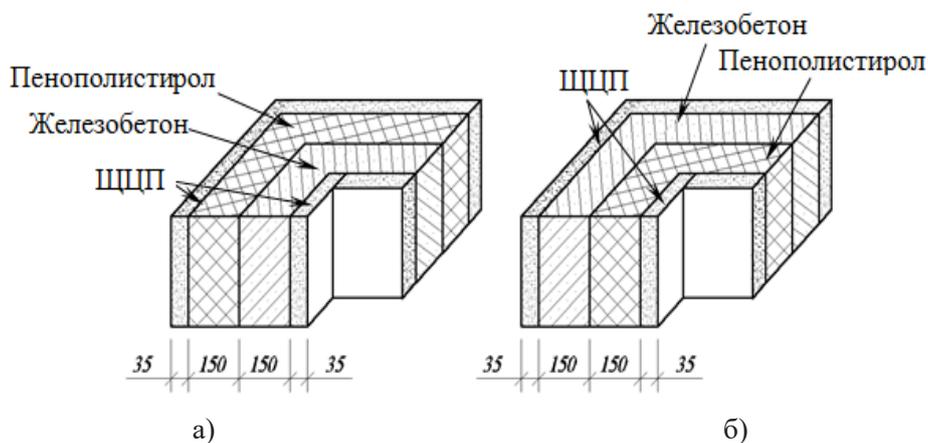


Рис. 2. Конструкция стены «VELOX»: а — наружный угол, б — внутренний угол

Fig. 2. The VELOX wall structure: а — outer corner, б — inside corner

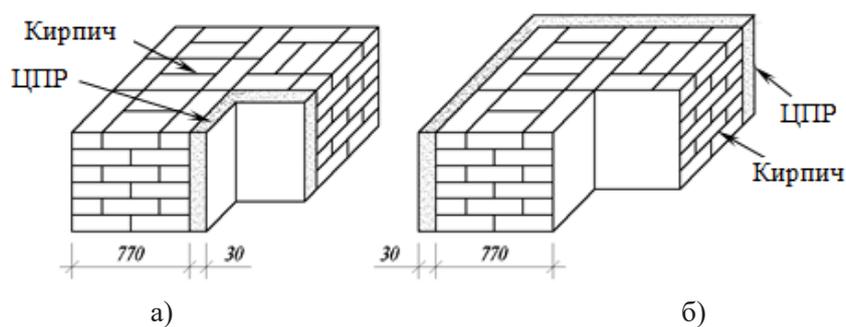


Рис. 3. Конструкция кирпичной стены: а — наружный угол, б — внутренний угол

Fig. 3. Brick wall structure: а — outer corner, б — inside corner

Методика исследования

При математической постановке задачи задаются геометрические размеры исследуемого наружного ограждения и теплофизические характеристики, представленные в таблице 1.

В соответствии с действующими нормативными документами задаются температуры наружного $t_n = -39$ °С и внутреннего воздуха $t_b = 23$ °С, коэффициенты теплоотдачи на наружной $\alpha_n = 23$ Вт/(м²·°С) и внутренней поверхностях $\alpha_b = 8,7$ Вт/(м²·°С).

Для варианта № 1 приведенное термическое сопротивление теплопередаче вычисляется по итогам значений температурных полей, используя формулу

$$R = \frac{t_b - t_n}{q_{\text{расч}}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{расч}}$ — расчетная плотность теплового потока через рассматриваемую конструкцию, Вт/м², определяется по формуле

$$q_{\text{расч}} = \alpha_b (t_b - \tau_b), \quad (2)$$

где τ_b — средняя температура внутренней поверхности стены, °С.

Таблица 1

Характеристики материалов

Table 1

Materials' properties

Наименование материала	Толщина, d, м	λ , (Вт/(м·°С))	c, кДж/(кг·°С)	ρ , (кг/м ³)
Вариант № 1				
Керамзитобетон	0,5	0,41	840	1 000
Пенополиуретан	0,3	0,04	1 470	40
Вариант № 2				
Щепоцементная плита (ЩЦП)	0,035	0,11	2 300	740
ППС	0,15	0,033	1 340	25
Железобетон	0,15	2,04	840	2 500
Вариант № 3				
Кирпич	0,77	0,64	0,88	1 600
Цементно-песчаный раствор (ЦПР)	0,03	0,93	0,84	1 800

Расчет приведенного термического сопротивления, для вариантов конструкции № 2 и 3 производится по формуле

$$R = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_{\text{к}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}, \quad (3)$$

где $R_{\text{к}}$ — Термическое сопротивление конструкции стены, $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

По результатам расчета получены следующие значения термических сопротивлений: для варианта № 1 $R = 1,85 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, для варианта № 2 $R = 5,41 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, для варианта № 3 $R = 1,39 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

Для изучения теплотерь через теплонапряженные элементы создана численная модель [4].

Численное моделирование проводится на основе метода конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS.

Сравнение результатов численного решения пространственного теплопереноса с теплопереносом в двумерной постановке показало, что изменение ключевых параметров — температуры и плотности теплового потока, в поперечном направлении конструкции практически не меняется. Поэтому, для дальнейших исследований, было принято решение о проведении расчета в двумерной постановке.

Результаты расчета

На рис. 4-6 приведены результаты расчета температурных полей в растровом изображении для исследуемых ограждений.

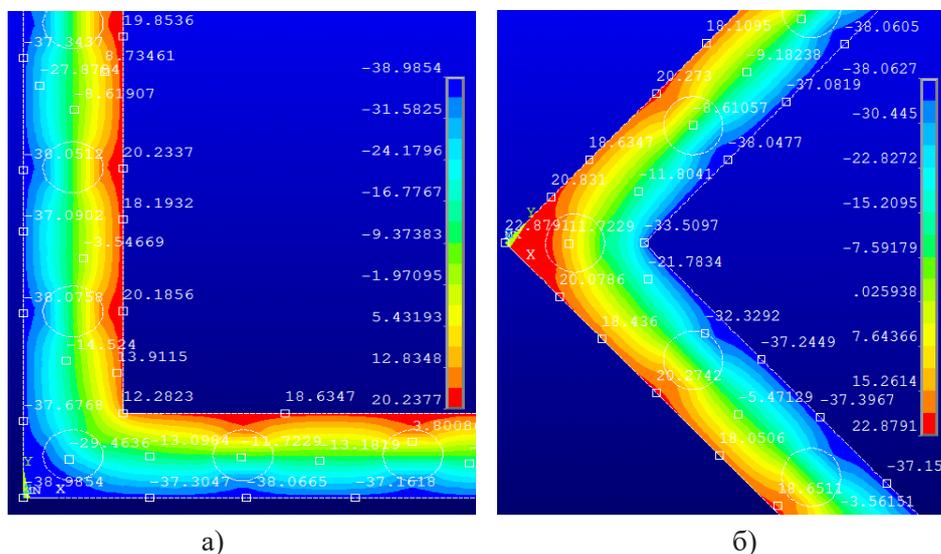
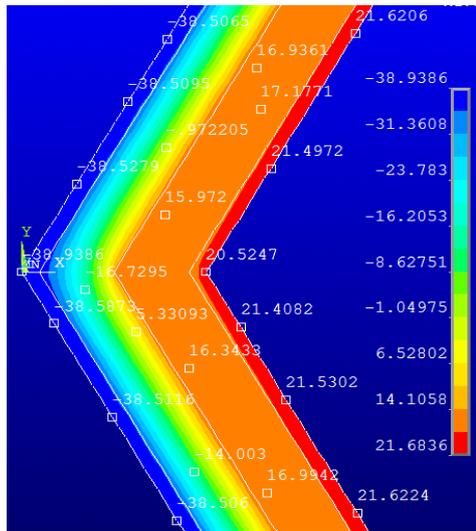


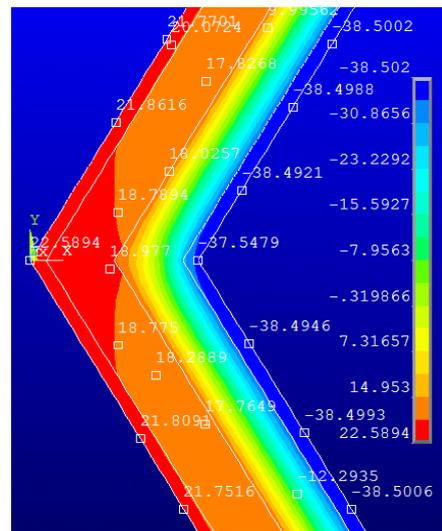
Рис. 4. Распределение температурных полей в конструкции стены варианта 1 ($\varphi = 90^\circ$): а — наружный угол, б — внутренний угол

Fig. 4. The distribution of the temperature fields in the structure of the wall, option no. 1 ($\varphi = 90^\circ$): а — outer corner, б — inside corner



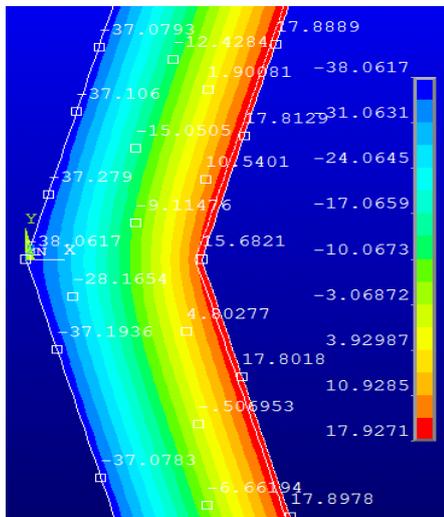
в)

Рис. 5. Распределение температурных полей в конструкции стены варианта № 2 ($\varphi = 120^\circ$): в — наружный угол, г — внутренний угол



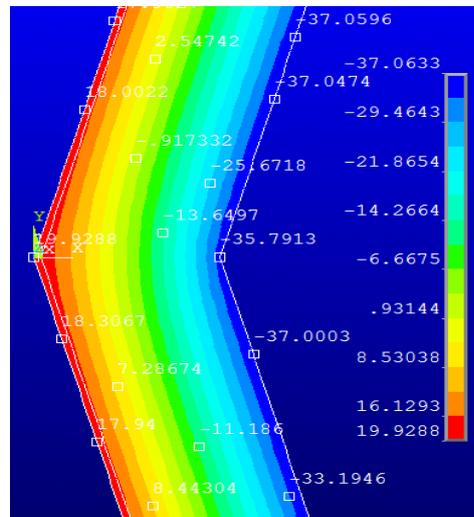
г)

Fig. 5. The distribution of the temperature fields in the structure of the wall, option 2 ($\varphi = 120^\circ$): в — outer corner, г — inside corner



д)

Рис. 6. Распределение температурных полей в конструкции стены варианта № 3 ($\varphi = 150^\circ$): д — наружный угол, е — внутренний угол



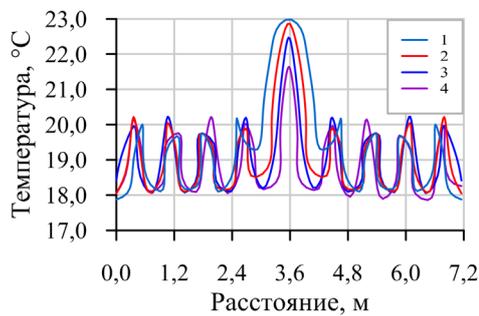
е)

Fig. 6. The distribution of the temperature fields in the structure of the wall, option 3 ($\varphi = 150^\circ$): д — outer corner, е — inside corner

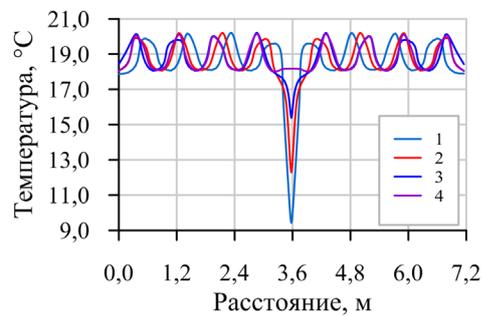
Из рис. 4-6 очень характерно видно как изменяется температура в конструкции с наличием различных теплонапряженных элементов. Особенно заметно то, что в области наружного угла наблюдается понижение температуры.

На рис. 7-9 приводятся итоги исследования изменения температуры по внутренней поверхности стены для заданных элементов конструкций.

Рассмотрим как изменяется температура внутренней поверхности стены при варианте № 1 (рис. 7). Из представленных результатов видно, что значения температуры достигают своих максимальных значений напротив утепляющих вставок, а минимальных — в промежутках между утепляющими вставками. В данном случае температура в наружном углу конструкции соответствует $+9,42^\circ\text{C}$ при 60° , и $+12,28^\circ\text{C}$ при 90° .



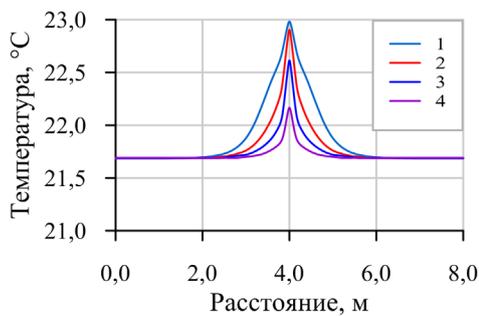
а)



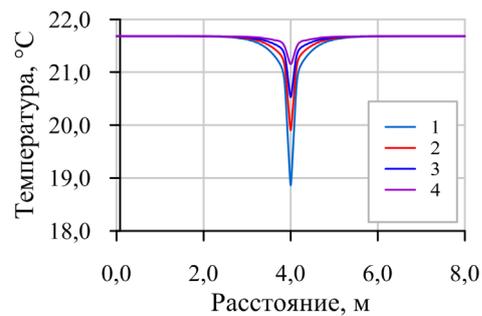
б)

Рис. 7. Распределение температуры по внутренней поверхности стены (вариант № 1): а — внутренний угол, б — наружный угол (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 120^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)

Fig. 7. The temperature distribution on the inner surface of the wall (option no. 1): а — inner corner, б — outer corner (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 120^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)



а)



б)

Рис. 8. Распределение температуры по внутренней поверхности стены (вариант № 2): а — наружный угол, б — внутренний угол (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 120^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)

Fig. 8. The temperature distribution on the inner surface of the wall (option no. 2): а — outer corner, б — inside corner (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 120^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)

Анализ рис. 8 показывает, что температура в углу конструкции для наружного угла 60° увеличивается и составляет $+18,86^\circ\text{C}$. В случае внутреннего угла значение температуры для всех углов разворота также повышается.

Из рис. 9 видно, что при изменении угла разворота меняется температурное поле, т. е. с увеличением угла разворота с 60 до 150° температура во внутреннем углу конструкции уменьшается, а в наружном углу — увеличивается. Причем в случае наружного угла температура изменяется и выходит на постоянное значение быстрее, чем в случае внутреннего угла.

Температура в углу конструкции, выполненной по варианту 3 достигает значений $+9,54^\circ\text{C}$ при конструкции под углом 60° и $+11,54^\circ\text{C}$ при 90° в случае наружного угла. В случае внутреннего угла значения температуры не достигают критических отметок, а наоборот приближаются к температуре воздуха в помещении.

При $t_{\text{в}} = +23^\circ\text{C}$ и $\varphi = 55\%$ значение температуры точки росы $t_{\text{р}} = +13,5^\circ\text{C}$. По результатам расчета на рис. 7-9, видно, что ограждения № 1 и 3 при углах разворота 60 и 90° не соответствуют созданию нормальных параметров микроклимата, т. е. существует опасность появления конденсата. Также есть вероятность появления плесени, которая может возникать при температурах больших, чем температура точки росы $t_{\text{р}}$ и влажности меньше 100% . В остальных случаях образование конденсата в углу стены исключается.

Изменение значений плотности теплового потока в исследуемых конструкциях приводятся на рис. 10-12.

В конструкции стены № 1 с утепляющими вставками видно, что тепловые потоки достигают своих максимальных значений в промежутках между утепляющими вставками. Результаты расчета, приведенные на рис. 11 показывают, что при увеличении термического сопротивления конструкции значение плотности теплового потока проходящего через угловой фрагмент ограждающей конструкции уменьшается.

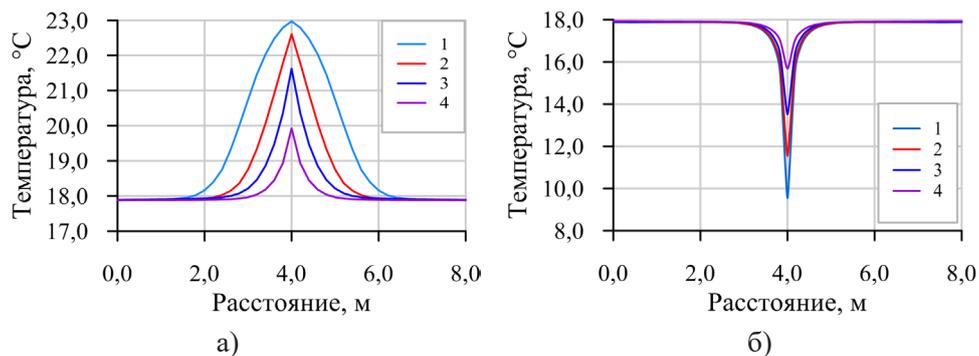


Рис. 9. Распределение температуры по внутренней поверхности стены (вариант № 3): а — наружный угол, б — внутренний угол (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 20^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)

Fig. 9. The temperature distribution on the inner surface of the wall (option no. 3): а — outer corner, б — inside corner (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 20^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)

Из графика на рис. 12б видно, что наибольшая величина плотности теплового потока наблюдается в случае наружного угла 60° и составляет $111,57 \text{ Вт/м}^2$. При увеличении угла разворота теплопотери через наружный угол уменьшаются.

Если сравнить полученные значения на рис. 10-12, то можно увидеть, что изменение значения угла происходит изменение значений плотности теплового потока на внутренней поверхности ограждения.

К сравнению, через участок стены, примыкающий к наружному углу, будут наблюдаться более значительные теплопотери, особенно в случаях представ-

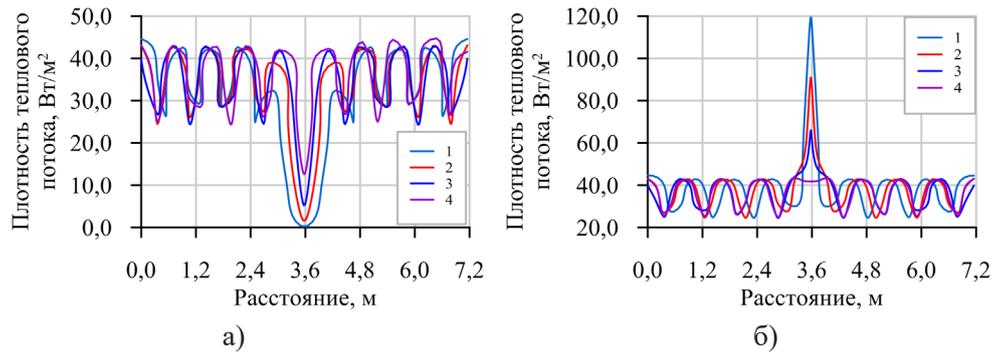


Рис. 10. Распределение плотностей теплового потока по внутренней поверхности стены (вариант № 1): а — внутренний угол, б — наружный угол (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 120^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)

Fig. 10. The distribution of heat flux densities on the inner surface of the wall (option no. 1): а — inner corner, б — outer corner (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 120^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)

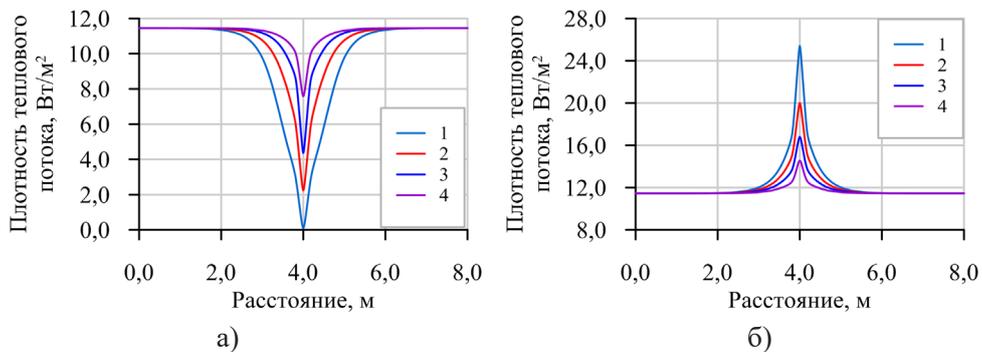


Рис. 11. Распределение плотностей теплового потока по внутренней поверхности стены (вариант № 2): а — внутренний угол, б — наружный угол (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 120^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)

Fig. 11. The distribution of heat flux densities on the inner surface of the wall (option no. 2): а — inner corner, б — outer corner (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 120^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)

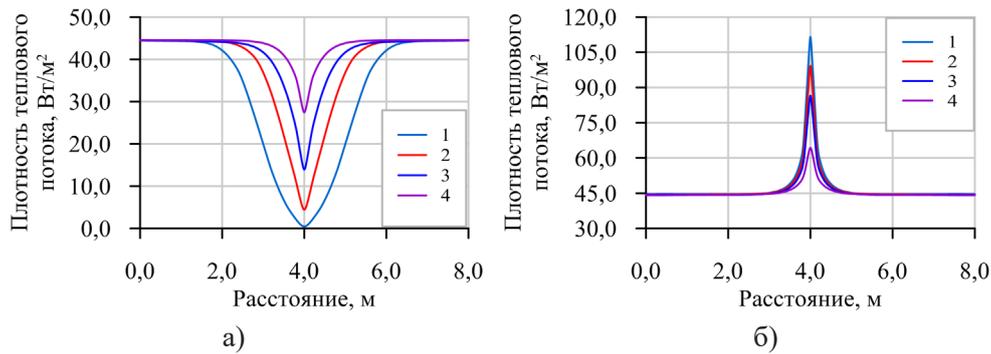


Рис. 12. Распределение плотностей теплового потока по внутренней поверхности стены (вариант № 3): а — внутренний угол, б — наружный угол (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 120^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)

Fig. 12. The distribution of heat flux densities on the inner surface of the wall (option no. 3): а — inner corner, б — outer corner (1 — $\varphi = 60^\circ$, 2 — $\varphi = 90^\circ$, 3 — $\varphi = 120^\circ$, 4 — $\varphi = 150^\circ$)

ленных на рис. 10б, 12б. Наибольшее значение плотности теплового потока в этих случаях достигает значений 119,5 Вт/м² при варианте № 1 и 111,57 Вт/м² при варианте № 3 и угле разворота 60°.

В рамках данного исследования также оценивалось изменение температуры внутри массива углового фрагмента стены. На рис. 13-15 показаны графики изменения значений температуры и плотности теплового потока по диагонали угла в зависимости от безразмерного расстояния S/S_{\max} для рассматриваемых ограждающих конструкций.

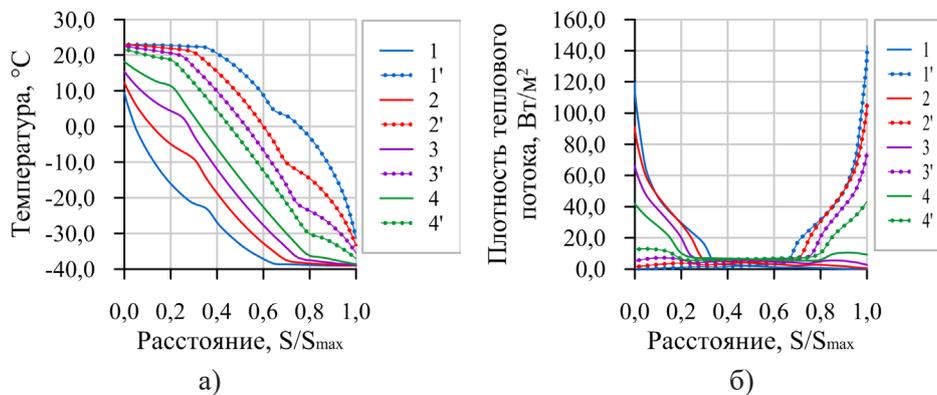


Рис. 13. Распределение температуры (а) и плотности теплового потока (б) (вариант № 1): 1, 2, 3, 4 — наружный угол; 1', 2', 3', 4' — внутренний угол (1, 1' — $\varphi = 60^\circ$; 2, 2' — $\varphi = 90^\circ$; 3, 3' — $\varphi = 120^\circ$; 4, 4' — $\varphi = 150^\circ$)

Fig. 13. The temperature (а) and heat flux density (б) distribution (option no. 1): 1, 2, 3, 4 — outer corner; 1', 2', 3', 4' — inner corner (1, 1' — $\varphi = 60^\circ$; 2, 2' — $\varphi = 90^\circ$; 3, 3' — $\varphi = 120^\circ$; 4, 4' — $\varphi = 150^\circ$)

За нулевую отметку принята внутренняя поверхность угла.

Из рис. 13а видно, что линии излома температурного графика наблюдаются в местах установки утепляющей вставки. Также наименьшая величина плотности теплового потока происходит как раз в области вставки (рис. 13б), т. к. коэффициент теплопроводности пенополиуретана примерно в 10 раз меньше, чем у керамзитобетона.

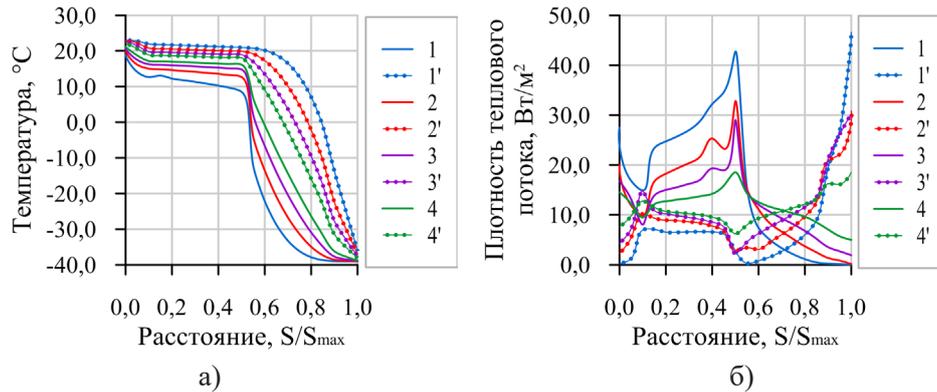


Рис. 14. Распределение температуры (а) и плотности теплового потока (б) (вариант № 2): 1, 2, 3, 4 — наружный угол; 1', 2', 3', 4' — внутренний угол (1, 1' — $\varphi = 60^\circ$; 2, 2' — $\varphi = 90^\circ$; 3, 3' — $\varphi = 120^\circ$; 4, 4' — $\varphi = 150^\circ$)

Fig. 14. The temperature (a) and heat flux density (б) distribution (option no. 2): 1, 2, 3, 4 — outer corner; 1', 2', 3', 4' — inner corner (1, 1' — $\varphi = 60^\circ$; 2, 2' — $\varphi = 90^\circ$; 3, 3' — $\varphi = 120^\circ$; 4, 4' — $\varphi = 150^\circ$)

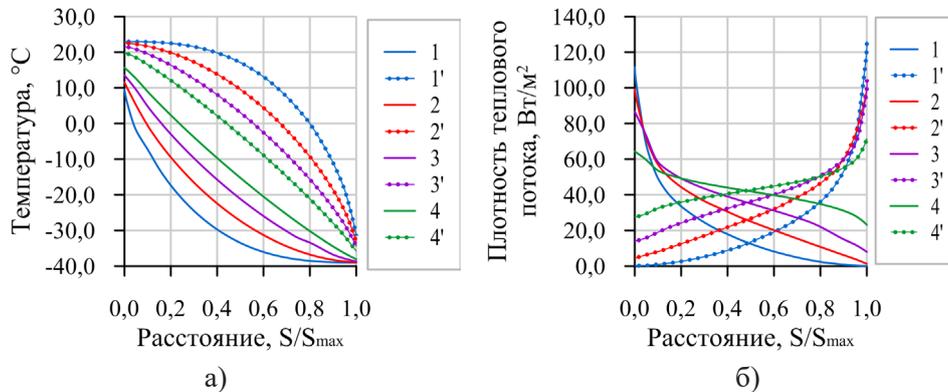


Рис. 15. Распределение температуры (а) и плотности теплового потока (б) (вариант № 3): 1, 2, 3, 4 — наружный угол; 1', 2', 3', 4' — внутренний угол (1, 1' — $\varphi = 60^\circ$; 2, 2' — $\varphi = 90^\circ$; 3, 3' — $\varphi = 120^\circ$; 4, 4' — $\varphi = 150^\circ$)

Fig. 15. The temperature (a) and heat flux density (б) distribution (option no. 3): 1, 2, 3, 4 — outer corner; 1', 2', 3', 4' — inner corner (1, 1' — $\varphi = 60^\circ$; 2, 2' — $\varphi = 90^\circ$; 3, 3' — $\varphi = 120^\circ$; 4, 4' — $\varphi = 150^\circ$)

Рис. 14а показывает, что распределение температуры в конструкции также происходит по нелинейному закону с различным углом наклона. Причем в части конструкции, где значение термического сопротивления больше, линии идут с большим углом наклона.

Из рис. 15а видно, что отрицательные значения температур наблюдаются уже на расстоянии 0,2 м вглубь от внутренней поверхности стены, что гораздо ближе по сравнению с плоской стеной. Поскольку в случае наружного угла теплоотдающая поверхность ограждения больше тепловоспринимающей, то это и объясняет большое значение плотности теплового потока на стене с внутренней стороны по отношению к внутреннему углу (рис. 15б).

Также важным отличием углового фрагмента от плоской стены является нелинейное распределение температуры в толще конструкции (рис. 15а).

По результатам расчета были построены и другие графики (рис. 16).

Сравнивая графики на рис. 16а можно сказать, что изменение температуры наружного угла в зависимости от угла разворота происходит в большем диапазоне, чем у внутреннего угла. К примеру, температура в наружном углу для конструкции стены № 3 для 60° составляет $+9,54^\circ\text{C}$, а при 150° уже $+15,68^\circ\text{C}$. При внутреннем углу для той же конструкции температура составляет $+22,97$ и $+19,9^\circ\text{C}$ соответственно.

Такая же зависимость прослеживается и у графиков на рис. 16б. В случае внутреннего угла тепловые потери и диапазон их изменения значительно меньше, чем в случае наружного угла.

Несомненный интерес представляет исследование длины зоны стабилизации температуры, т.е. достижение температурой значений, равных температуре на глади стены.

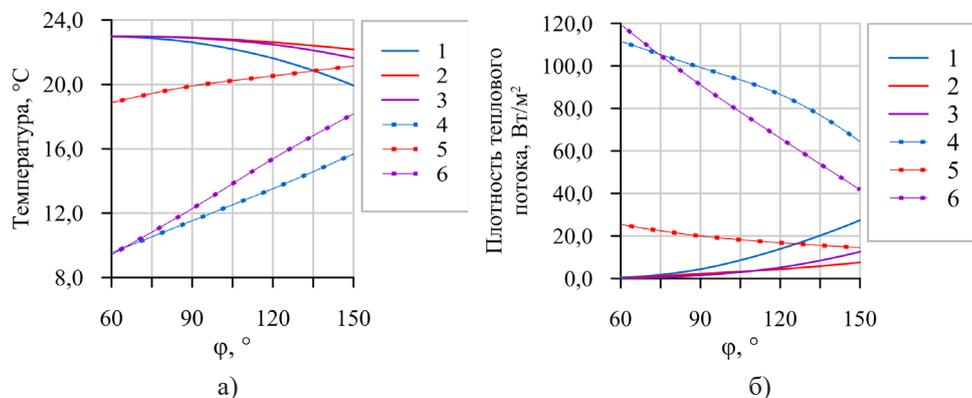


Рис. 16. Температура (а) и плотность теплового потока (б) в углу конструкции. Внутренний угол: 1 — вариант № 3; 2 — вариант № 2; 3 — вариант № 1. Наружный угол: 4 — вариант № 3; 5 — вариант № 2; 6 — вариант № 1

Fig. 16. The temperature (а) and heat flux density (б) in the corner of the structure. Inner corner: 1 — option no. 3; 2 — option no. 2; 3 — option no. 1. Outer corner: 4 — option no. 3; 5 — option no. 2; 6 — option no. 1

На рис. 17 приведены графики зависимости длины зоны стабилизации температуры для разных углов разворота конструкции для вариантов № 2 и 3, т. к. для варианта № 1 определение такой зоны в силу колебательного изменения температуры является затруднительным.

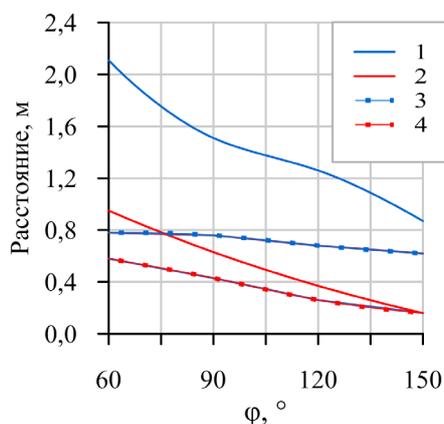


Рис. 17. Зависимость длины зоны стабилизации температуры от угла разворота. Внутренний угол: 1 — вариант № 3; 2 — вариант № 2. Наружный угол: 3 — вариант № 3; 4 — вариант № 2

Fig. 17. Dependence of the length of the temperature stabilization zone on the turning angle. Inner corner: 1 — option no. 3; 2 — option no. 2. Outer corner: 3 — option no. 3; 4 — option no. 2

По результатам расчета можно сказать, что в случае наружного угла стабилизация температуры в области угла происходит значительно быстрее и меньше зависит от величины угла разворота.

Заключение

В результате проведенных численных исследований фрагментов конструкций наружного и внутреннего угла при различных углах разворота получены следующие результаты:

- установить, что для всех типов ограждающих конструкций с увеличением угла разворота температура во внутреннем углу конструкции уменьшается, а в наружном — увеличивается, а плотность теплового потока ведет себя наоборот;
- выяснить, что расстояние от угла до зоны стабилизации с увеличением угла разворота уменьшается для всех типов конструкций как для температуры, так и для теплового потока;
- определить, что понижение приведенного термического сопротивления и величины угла разворота ограждения приводит к повышению теплопотерь в ограждающей конструкции;

- показать, что повышение термического сопротивления влечет за собой увеличение температуры и понижение плотности теплового потока в углу рассматриваемых фрагментов.

Следовательно, математическое моделирование в области теплонапряженных элементов позволяет выявить влияние теплотехнических и геометрических характеристик строительной конструкции на процесс теплопереноса в толще наружных ограждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамян С. Г. Малоэтажное строительство: Особенности и проблемы развития / С. Г. Абрамян, О. В. Бурлаченко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. № 38. С. 217-227.
2. Андрейцева К. С. Особенности расчета температурных полей при проектировании ограждающих конструкций / К. С. Андрейцева // Жилищное строительство. 2018. № 6. С. 19-23.
3. Данилов Н. Д. Анализ влияния угловых стыков на теплопотери наружных стен / Н. Д. Данилов, П. А. Федотов // Жилищное строительство. 2015. № 8. С. 14-17.
4. Козлобродов А. Н. Исследование влияния термовкладышей на тепловое состояние теплонапряженных элементов многослойных ограждающих конструкций / А. Н. Козлобродов, Е. А. Иванова, А. В. Головкин // Вестник ТГАСУ. 2018. № 4. С. 155-169.
5. 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 // II Всероссийская научная конференция с международным участием «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий». Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН. 2015. С. 90-97.
6. Леонова А. Н. Методы повышения энергоэффективности зданий при реконструкции / А. Н. Леонова, М. В. Курочка // Вестник МГСУ. 2018. Том 13. № 7 (118). С. 805-813.
7. Никонова Е. В. Техно-экономические показатели ограждающих конструкций для малоэтажного строительства / Е. В. Никонова // Жилищное строительство. 2018. № 7. С. 47-50.
8. Самарин О. Д. Оценка минимального значения температуры в наружном углу здания при его скруглении / О. Д. Самарин // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 8. С. 34-36.
9. Самарин О. Д. Температура в линейных элементах ограждающих конструкций / О. Д. Самарин // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 2. С. 3-10.
10. Терентьев Д. М. Повышение энергоэффективности зданий, строений и сооружений. Задачи Минстроя России / Д. М. Терентьев // Энергосбережение. 2015. № 3. С. 18-21.
11. Толстова Ю. И. Теплопотери острых углов зданий / Ю. И. Толстова // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2011. № 8. С. 52-53.

12. Усольцев И. Е. Малоэтажное строительство / И. Е. Усольцев // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2018. Вып. 22. С. 245-247.
13. Ben Larbi A. Statistical Modelling of Heat Transfer for Thermal Bridges of Buildings / A. Ben Larbi // Energy and Buildings. 2005. Vol. 37. No. 9. Pp. 945-951.
14. Psomas T. Overheating risk barriers to energy renovations of single family houses: Multicriteria analysis and assessment / T. Psomas, P. Heiselberg, K. Duer, E. Bjørn // Energy and Buildings. 2016. No. 117. Pp. 138-148.
15. Svitak M. Defining of thermal bridges of wood building and their elimination / M. Svitak, K. Krontorad, J. Tomek // Wood research. 2016. No. 61 (4). Pp. 607-614.

Elena A. IVANOVA¹

Alexander N. KOZLOBRODOV²

UDC 536:21:674.038:699.86

**NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF THE TURNING ANGLE
ON HEAT TRANSFER IN MULTILAYERED ELEMENTS
OF EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES***

¹ Senior Lecturer, Department of Heat and Gas Supply
and Engineering Systems in Construction,
Tomsk State University of Architecture and Building
energosber_e@mail.ru

² Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
Department of Heat and Gas Supply
and Engineering Systems in Construction,
Tomsk State University of Architecture and Building
akozlobrodov@mail.ru

Abstract

When building low-rise buildings with a variety of structural elements, it is important to have an idea of their thermal state in extreme heat exchange conditions. Therefore, the study of heat transfer processes in heat-stressed elements of external fences is relevant and of considerable practical interest.

The purpose of this work is to conduct parametric studies in typical angular fragments of inhomogeneous enclosing structures with u-turn angles from 60 to 150°. At the same time, the analysis of the thermal state is carried out for both external and internal angles.

* The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research
(grant no 16-48-700367).

Citation: Ivanova E. A., Kozlobrodov A. N. 2020. "Numerical study of the effect of the turning angle on heat transfer in multilayered elements of external enclosure structures". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 6, no. 4 (24), pp. 69-87.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-69-87

The mathematical modeling of spatial heat transfer in the fragments under consideration is based on the solution of a nonlinear system of differential equations of thermal conductivity with corresponding boundary conditions by the finite element method using the Thermal module included in the ANSYS software package.

The analysis of numerical results given for three types of enclosing structures made using various technologies allowed us to clarify the influence of their geometric and thermophysical characteristics on the distribution of temperature and heat flow over the thickness of the fragments under consideration, as well as to determine the change in these parameters on both the internal and external surfaces of the structure. To establish that for all types of walling with increasing rotation angle, the temperature in the inner corner of the structure decreases, and in the outer increases, and the density of the heat flow behaves vice versa; the distance from the corner to the area stabilization with increasing angle of rotation reduces, smiling for all types of structures for temperature and heat flow; an increase in the thermal resistance leads to a temperature increase and decrease of the heat flux in the corner tend to be developed fragments; issue recommendations for creating energy-efficient structures that meet modern requirements.

Keywords

Heat-Stressed elements, heat transfer, thermophysical characteristics, numerical modeling, heat losses, energy saving.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-69-87

REFERENCES

1. Abramyan S. G., Burlachenco O. V. 2014. "Low-rise construction: Features and problems of development". Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya "Stroitelstvo i arkhitektura", no. 38, pp. 217-227. [In Russian]
2. Andreyceva C. S. 2018. "Features of the calculation of temperature fields in the design of building envelopes". Zylishnoe stroitelstvo, no. 6, pp. 19-23. [In Russian]
3. Danilov N. D., Fedotov P. A. 2015. "Analysis of the influence of corner joints on the heat loss of external walls". Zylishnoe stroitelstvo, no. 8, pp. 14-17. [In Russian]
4. Kozlobrodov A. N., Ivanova E. A., Golovko A.V. 2018. "Investigation of the influence of thermal liners on the thermal state of heat-stressed elements of multilayer walling". Vestnik TGASU, no. 4, pp. 155-169. [In Russian]
5. Kozlobrodov A. N., Ivanova E. A., Kozlobrodov V.A. 2015. "Numerical study of the effect of heat-stressed elements on the thermal state of enclosing structures in low-rise housing construction". Proceedings of the 2nd All-Russian Research Conference with International Participation "Energo- i resursoeffectivnost maloetaznyx zilyx zdanii", pp. 90-97. Novosibirsk: Institut teplofiziki SO RAN. [In Russian]
6. Leonova A. N., Kurochka M. V. 2018. "Methods for improving the energy efficiency of buildings during reconstruction". Vestnik MGSU. vol. 13, no. 7 (118), pp. 805-813. [In Russian]

7. Nikonova E. V. 2018 “Technical and economic indicators of walling for low-rise construction”. *Zylishnoe stroitelstvo*, no. 7, pp. 47-50. [In Russian]
8. Samarin O. D. 2014. “Assessment of the minimum temperature in the outer corner of the building when it is rounded”. *Promyshlennoe i grazdanskoe stroitelstvo*, no. 8, pp. 34-36. [In Russian]
9. Samarin O. D. “Temperature in the linear elements of the building envelope”. 2017. *Inzenerno-stroitelnyy zurnal*, no. 2, pp. 3-10. [In Russian]
10. Terentyev D. M. 2015. “Improving the energy efficiency of buildings, structures and structures. Tasks of the Ministry of Construction of Russia”. *Energoberezenie*, no. 3, pp. 18-21. [In Russian]
11. Tolstova U. I. 2011. “Heat losses of sharp corners of buildings”. *Santekhnika. Otoplenie. Konditsionirovanie*, no. 8, pp. 52-53. [In Russian]
12. Usolcev I. E. 2018. “Low-rise construction”. Proceedings of the All-Russian Research Conference of Students, Postgraduates and Early Career Researchers “Nauka I molodez: problem, poiski, resheniya”. Vol. 22, pp. 245-247. [In Russian]
13. Ben Larbi A. 2005. “Statistical Modelling of Heat Transfer for Thermal Bridges of Buildings”. *Energy and Buildings*. vol. 37, no. 9, pp. 945-951.
14. Psomas T., Heiselberg P., Duer K., Bjørn E. 2016. “Overheating risk barriers to energy renovations of single family houses: multicriteria analysis and assessment”. *Energy and Buildings*. 2016, no. 117, pp. 138-148.
15. Svitak M., Krantorad K., Tomek J. 2016. “Defining of thermal bridges of wood building and their elimination”. *Wood Research*, no. 61 (4), pp. 607-614.