

УДК 721.011:691.175.746.222

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА  
НА ТЕПЛОЕ СОСТОЯНИЕ СТЕН МАЛОЭТАЖНЫХ  
ЖИЛЫХ ДОМОВ ИЗ ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА\***

*Цветков Николай Александрович, д.т.н., профессор,  
Козлобродов Александр Николаевич, д.ф.-м.н., профессор,  
Хуторной Андрей Николаевич, к.т.н., доцент*

*Россия, Томск, Томский государственный  
архитектурно-строительный университет (ТГАСУ)*

*Романенко Сергей Владимирович, д.т.н., профессор,  
Шефер Юрий Владимирович, аспирант*

*Россия, Томск, Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет (НИ ТПУ)*

Полистиролбетон – технологичный, дешевый и энергоэффективный материал для монолитного строительства [1]. Накапливается опыт возведения монолитных домов (рис. 1) с использованием металлического каркаса и несъемной опалубки из листов стекломгнезита.



Рис. 1. Внешний вид построенного дома в пригороде г. Томска [1]

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-48-700367)

Сопrotивление теплопередачи наружных стен жилых помещений при толщине полистиролбетона 0,6 м близко к 8 ( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ) [2]. Внутри наружных стен, вблизи их внутренней и наружной поверхностей располагается металлический каркас в виде прямоугольных труб.

Инфракрасное обследование фасадов таких домов в зимнее время показывает, что на термограммах можно наблюдать усиленный отвод тепловой энергии в местах металлического каркаса (рис. 2).



Рис. 2. Характерный вид тепловизионной оценки тепловых потерь [1]

Одним из основных требований к новому малоэтажному домостроению является применение экономичных конструкторских решений, новых строительных материалов и технологий, направленных на повышение качества жилья и снижение затрат на использование топливно-энергетических ресурсов.

Монолитное строительство – одна из самых перспективных технологий возведения зданий. Дома с несущим каркасом из монолитного полимербетона обретают всё большую популярность.

Сегодня именно монолитное строительство с применением несъемной опалубки является стремительно растущей и развивающейся отраслью строительства быстровозводимых зданий. Особенностью монолитных домов с несъемной опалубкой является то, что они всегда делаются по уникальному индивидуальному проекту, а конструкция способствует различным методам украшения фасада. Благодаря своим неоспоримым и уникальным преимуществам, квартиры в

таких домах очень быстро завоевали первые позиции на рынке и доверие потребителей.

Кроме того, монолитные дома, построенные с применением технологии несъемной опалубки, намного превосходят другие жилища по долговечности. Например, если по проекту панельный дом рассчитан, максимум, на полвека службы, то монолит в состоянии прослужить в 3 раза дольше.

Кроме того, методика не ограничивает архитекторов стандартными габаритами и геометрией строительных модулей. Квартиры в домах из несъемной опалубки могут иметь потолки разной высоты, различную планировку и площадь. В монолитных домах полностью отсутствуют швы, потому сквозняков, как в панельных строениях, в них не наблюдается.

Новые строительные технологии экономически выгодны и поэтому строительство монолитных домов с применением технологии несъемной опалубки пользуется огромной популярностью. Сейчас многие строительные организации возводят монолитные дома, которые вполне доступны, и даже не совсем богатые люди могут позволить себе приобрести отличное жильё. Ведь благодаря талантливым дизайнерским решениям можно возводить необходимое количество этажей, а скорость их возведения и вполне доступная цена привлекает всё больше покупателей.

Оценка влияния металлического каркаса на тепловое состояние монолитной стены, изготовленной из полимербетона с использованием несъемной опалубки, выполненной из стекломгнезитовых листов, проводится на основе математического моделирования с помощью программного комплекса ANSYS.

Исследованию теплового состояния многослойных строительных конструкций, включающих различные теплонапряженные элементы и использующихся в малоэтажном домостроении посвящено достаточно много публикаций [3-7].

В настоящей работе стационарный теплоперенос через элементы ограждающей конструкции рассматривается на примере фрагмента наружной стены, представляющей собой в двумерной постановке прямоугольную область, состоящую из двух слоев стекломгнези-

товой опалубки (внешнего и внутреннего), прикрепленной к стенкам металлического пустотелого каркаса, заполненного утеплителем, и слоя полимербетона (рис. 3)

При математической постановке задачи задаются геометрические размеры элементов ограждающей конструкции и их теплофизические характеристики, которые в общем случае могут зависеть от температуры.

Геометрические размеры фрагмента: длина  $l = 0,5$  м, толщина слоев  $\delta_1 = \delta_3 = 0,012$  м; трубы каркаса прямоугольной формы имеют размеры  $(50 \times 100$  мм.) с толщиной стенки  $\delta_{ст} = 3$  мм. Толщина слоя пенобетона задавалась  $\delta_2 = 400$  и  $\delta_2 = 600$  мм (рис. 3).

Коэффициенты теплопроводности  $\lambda$  Вт/(м·°С) для всех материалов конструкции соответственно равны 0,14 для стекломгнезита, 0,058 для полимербетона и 30 Вт/(м·°С) для конструкционной стали.

Коэффициенты теплоотдачи наружных и внутренних сторон согласно СНиП полагались равными  $\alpha_{ext} = 23$  Вт/(м²·°С) и  $\alpha_{int} = 8,7$  Вт/(м²·°С) соответственно. Кроме того, задаются температуры наружного  $t_{ext}$  и внутреннего  $t_{int}$  воздуха, соответствующие экстремальным условиям теплообмена:  $t_{ext} = -39$  и  $t_{int} = +20$  °С.

Стационарный пространственный теплоперенос в рассматриваемых фрагментах конструкции в декартовой системе координат описывается системой нелинейных стационарных трехмерных уравнений теплопроводности, количество которых равно числу всех элементов ( $n$ ), в нее входящих

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{xi} \frac{\partial t_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{yi} \frac{\partial t_i}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $i = 1 \div n$  с соответствующими граничными условиями.

На внешней и внутренней границах рассматриваемого фрагмента, ставятся граничные условия III рода, учитывающие теплообмен

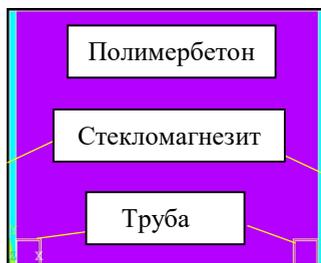


Рис. 3. Геометрия расчетной области

этих границ с окружающей средой, которые могут быть записаны в виде:

для внешней поверхности

$$-\lambda_{x,l} \left. \frac{\partial t_l}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha_n (t_1|_{x=0} - t_n), \quad (2)$$

$$-\lambda_{x,4} \left. \frac{\partial t_4}{\partial x} \right|_{x=x_k} = \alpha_n (t_\theta - t_4|_{x=x_k}), \quad (3)$$

для внутренней поверхности,

где  $x_k$  – координата, соответствующая толщине стены.

На поверхностях контакта двух соседних элементов задаются граничные условия IV рода – условия идеального теплового контакта (равенство температур и тепловых потоков):

$$t_k|_{\text{Гр.}} = t_p|_{\text{Гр.}}; \quad -\lambda_{n,k} \left. \frac{\partial t_k}{\partial n} \right|_{\text{Гр.}} = -\lambda_{n,p} \left. \frac{\partial t_p}{\partial n} \right|_{\text{Гр.}}. \quad (4)$$

Здесь  $n$  – направление нормали к соответствующей поверхности;

$k, p$  – номера двух соседних элементов конструкции;

$\lambda_{n,k}, \lambda_{n,p}$  – коэффициенты теплопроводности материалов.

На верхней и нижней поверхностях рассматриваемого фрагмента конструкции стены задаются условия симметрии, соответствующие граничным условиям II рода, с нулевым значением плотности теплового потока:

$$q|_{\text{Гр.}} = 0. \quad (5)$$

Для численной реализации математической модели (1) – (5) использовался метод конечных элементов, являющийся основой программного комплекса ANSYS [8, 9].

Ниже представлены результаты математического моделирования теплового состояния фрагмента наружной стены, включающего наружную и внутреннюю прямоугольные трубы каркаса.

Расчеты температурных полей и тепловых потоков выполнены с использованием программного комплекса ANSYS, верификация ко-

того применительно к задачам стационарного и нестационарного теплопереноса подтверждена многими нашими исследованиями [4–7].

В работе представлены результаты расчета для двух случаев – толщина слоя полимербетона 400 мм и 600 мм. Для генерации конечно-элементной сетки использовались элементы Plane 55 с шагом разбиения  $h = 0,0075$  м для всех подобластей. Сгущение сетки в области металлических труб каркаса проводилось автоматически.

На рис. 4, 5 представлены температурные поля в стене ( $a - \delta_2 = 0,4$  м) и ( $b - \delta_2 = 0,6$  м).

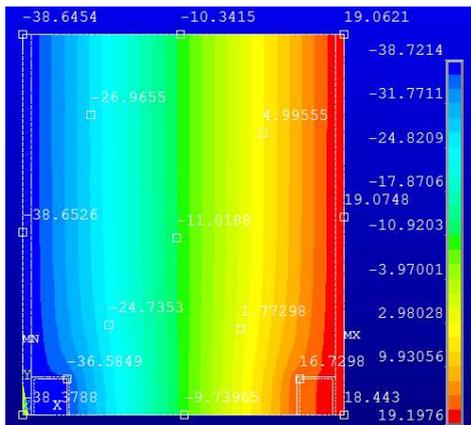


Рис. 4 (а). Температурное поле стены

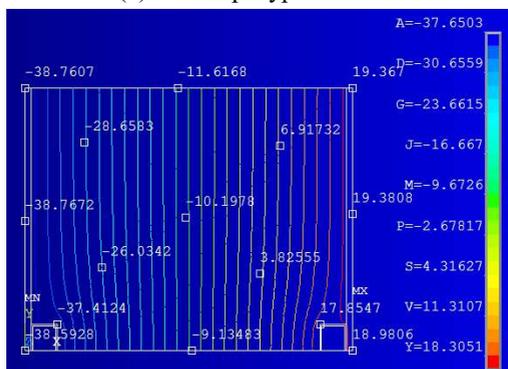


Рис. 4 (б). Температурное поле стены

Характер поведения изотерм на рис. 4 говорит о том, что наличие металлического каркаса приводит к искривлению изотермических линий в окрестности трубы как в случае (а), так и в случае (б). При этом по мере удаления от трубы значение температуры на теплой и холодной границах приближается к аналитически рассчитанным значениям для такой 3-х слойной стенки с погрешностью менее 1 %.

Рис. 5 иллюстрирует поведение векторного поля плотности теплового потока также для двух рассматриваемых случаев (а) и (б).

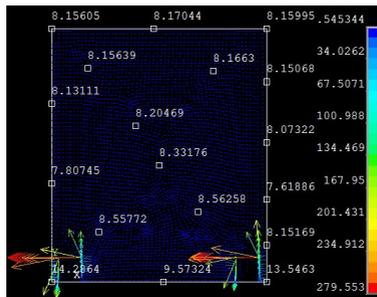


Рис. 5 (а). Поле тепловых потоков в стене, Вт/м<sup>2</sup>

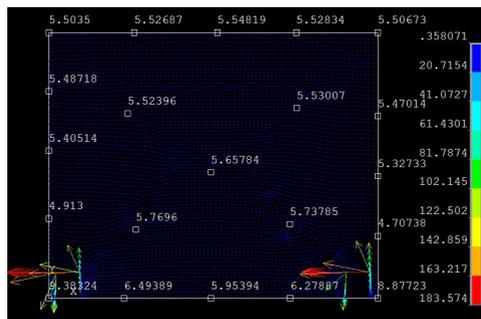


Рис. 5 (б). Поле тепловых потоков в стене, Вт/м<sup>2</sup>

Из анализа представленных результатов следует, что интенсивное изменение теплового потока имеет место только в областях, прилегающих к трубам каркаса. Сравнение с аналитическим решением показывает, что погрешность также чрезвычайно мала. Например,

аналитически рассчитанное значение плотности теплового потока в случае (а) равно  $8,164 \text{ Вт/м}^2$ , а расчетное  $8,160 \text{ Вт/м}^2$ .

Влияние элементов каркаса хорошо иллюстрирует рис. 6 на котором приводятся графики изменения температуры по длине анализируемого фрагмента для варианта (б).

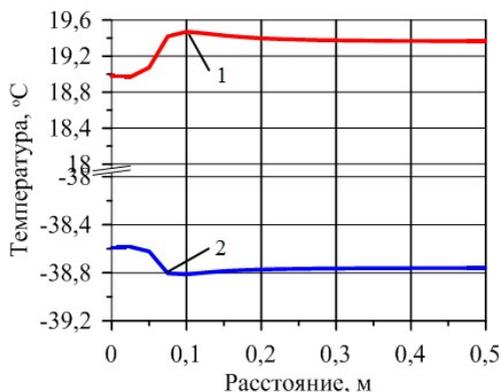


Рис. 6. Изменение температуры по длине стены (1 – внутренняя граница, 2 – внешняя граница)

Из представленного рисунка видно, что как на теплой, так и на холодной сторонах стены небольшое (около,  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) изменение температуры наблюдается только в окрестности трубы каркаса (на расстоянии примерно 15 см), а дальше значение температуры сохраняется практически постоянным и близким к температуре, полученной в результате аналитического расчета для такой конструкции стены. Такой результат позволяет сделать вывод о том, что расстояние между элементами каркаса должно определяться только прочностными характеристиками конструкции.

На рис. 7 для варианта (б) показано изменение температуры по толщине стены для нижней (соответствующей оси симметрии) и верхней границе фрагмента стены. Анализ результатов показывает, что полученные распределения температуры находятся в хорошем соответствии с имеющимися данными.

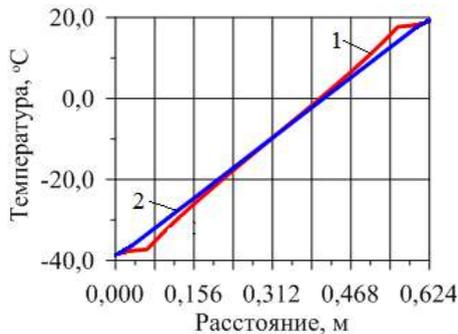


Рис. 7. Изменение температуры по толщине стены  
(1 – нижняя граница, 2 – верхняя граница)

Таким образом, рассматриваемая конструкция полимербетонной стены, применяемая в монолитном домостроении с несъемной опалубкой является приемлемой для использования.

### **Библиографический список**

1. Сураегин, Н.В., Дегтярева, В.П., Апазова, А.Р., Цветков, Н.А. Перспективы использования полистиролбетона в малоэтажных жилых зданиях / Избранные доклады 62-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых [Электрон. текстовые дан.]. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 1500 с. – С. 1321-1324.
2. Shefer, Y.V., Antonevich, O.A., Ordobaev, B.S., Romanenko, S.V. Conception of low-rise earthquake-resistant energy-efficient buildings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 81 (2015) 012086; doi:10.1088/1757-899X/81/1/012086.
3. Цветков, Н.А. Повышение эксплуатационных свойств клееного профилированного бруса с утеплителем // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2012. – № 2. – С. 163-169.

4. *Козлобродов, А.Н.* Численное исследование теплопереноса в тепловых мостах ограждающих конструкций каркасно-панельного типа / А.Н. Козлобродов, О.И. Недавний, С.А.Фудобин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 12 (2). – С. 166-171.

5. *Козлобродов, А.Н.* Пространственный теплоперенос в стене малоэтажного здания из профилированного утепленного бруса с коннекторами / А.Н. Козлобродов, Д.Н. Цветков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013, № 3. – С. 298-307.

6. *Жаркой, Р.А.* Нестационарный теплоперенос в пространственных элементах наружных ограждений на примере технологии «ВЕЛОКС» / Жаркой Р.А., Козлобродов А.Н., Недавний О.И. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011, № 3. – С. 164-175.

7. *Козлобродов, А.Н.* Анализ совместного влияния нескольких теплонапряженных элементов на тепловое состояние строительных конструкций / А.Н. Козлобродов, Е.А. Иванова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016, № 1 – С. 133-139.

8. *Каплун, А.Б., Морозов, Е.М., Олферьева, М.А.* ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М. : Едиториал УРСС. 2003. – 272 с.

9. *Басов, К.А.* ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.