

Влияние металлического каркаса на теплозащитные характеристики полистиролбетонной стены

Николай Цветков^{1,}, Андрей Хуторной¹, Александр Козлобродов¹, Сергей Романенко², Юрий Шефер², и Артем Головки¹*

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003 Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

Abstract. Использование новых теплоэффективных строительных материалов и технологий, позволяющих повысить уровень теплозащиты возводимых наружных ограждающих конструкций и сократить время строительства, представляет практический интерес и является актуальной задачей в условиях постоянно возрастающих требований к энергоэффективности зданий. Целью настоящей работы является моделирование процесса пространственного теплопереноса в многослойной неоднородной конструкции наружной стены, выполненной по технологии каркасного монолитного домостроения с несъемной опалубкой из полистиролбетона. На основе построенной физико-математической модели с помощью современных программных комплексов ANSYS и COMSOL проведен параметрический анализ влияния различных факторов на тепловые режимы наружной стены с учетом теплонапряженных элементов каркаса. Установлен характер распределения полей температуры в полистиролбетонной конструкции и исследованы ее теплозащитные свойства. Показано незначительное влияние металлического каркаса на теплозащитные свойства стены.

Введение

Решение проблемы повышения энергоэффективности вновь возводимых зданий с точки зрения цена–качество при одновременном снижении негативного влияния энергетических технологий на экологию является приоритетной задачей во всем мире. Значительный потенциал энергосбережения в России заложен в малоэтажном домостроении, так как доля малоэтажного строительства в стране составляет более 50% от общего объема вновь возводимых зданий [1]. Поскольку тепловые потери зданий через наружные стены могут достигать 45% [2], то поиск новых теплоэффективных строительных материалов и технологий, обеспечивающих высокий уровень теплозащиты наружных ограждающих конструкций, является актуальной задачей.

* Ответственный автор: nac.tsuab@yandex.ru

Одним из набирающих популярность вариантов возведения основной коробки здания является устройство монолитных стен из полистиролбетона. Это композиционный материал, состоящий из цемента, минерального и пористого наполнителей, воды и ряда добавок, обеспечивающих ему такие свойства, как прочность, устойчивость к гниению, гидрофобность и множество других положительных характеристик [1].

Низкая теплопроводность полистиролбетона позволяет предположить, что уровень тепловой защиты стен такого здания будет достаточно высоким и позволит возводить здания в Сибири без дополнительного утепления. Однако, наличие в толще конструкции стены металлического каркаса [3] может оказывать негативное влияние на теплозащитные свойства наружных стен [4-8].

В этой связи, целью данной работы является оценка влияния металлических элементов каркаса рассматриваемого здания на теплозащитные свойства наружных стен, выполненных по технологии монолитного домостроения, что является актуальной задачей и имеет большое практическое значение.

Численный эксперимент

Одним из перспективных строительных материалов является полистиролбетон, [9, 10] и технология монолитного домостроения с несъемной опалубкой [11, 12]. В [3] предложен способ строительства быстровозводимых энергоэффективных каркасных зданий из полистиролбетона, схема которого представлена на Fig. 1. Наружная стена такого здания содержит внутренний несущий каркас, состоящий из колонн 2 связанных между собой ригелями 3, с закреплённым на нём гнутым профилем 5 и, который в нижней своей части опирается на фундамент 1 здания (Fig. 1). Для зданий малой этажности (1-3 этажа) несущие конструкции здания, колонны, ригеля и балки перекрытия могут выполняться, например, из стальных труб сечением 50×100 мм со стенкой – 4 мм, скреплённых между собой с помощью сварки. При необходимости, для увеличения несущей способности, пожаростойкости и сейсмостойкости, стальные трубы могут заполняться тяжелым и/или лёгким бетоном. Полная технология возведения здания представлена в [3].

В настоящей работе объектом исследования является монолитная стена, выполненная из полистиролбетона D200 толщиной δ_1 (Fig. 2), находящаяся в экстремальных условиях. В конструкции стены используется несъемная опалубка из стекломagneзитовых плит толщиной $\delta_2 = 10$ мм, прикрепленных к П – образным профильным стойкам размером 50×50 мм и толщиной $\delta_3 = 0,4$ мм. Несущий металлический каркас выполнен из стальных труб прямоугольного сечения 50×100 мм толщиной $\delta_4 = 4$ мм.

Целью численных экспериментов, которые проводились с помощью программных комплексов ANSYS Mechanical APDL 17.0. и COMSOL Multiphysics 5.2, являлось определение влияния профильных стоек и расположения внутреннего металлического каркаса внутри стены на общее тепловое состояние конструкции.

Исследование теплового состояния конструкции проводится для трех вариантов толщины стены: вариант №1 – $\delta_1 = 0,6$ м; вариант №2 – $\delta_2 = 0,45$ м; вариант №3 – $\delta_1 = 0,3$ м. В каждом варианте стены варьируется месторасположение металлического каркаса: вариант А – 100 мм от внутренней поверхности стены; вариант В – по центру стены; вариант С – 100 мм от наружной поверхности стены.

Физико-математическая постановка задачи

При математической постановке задачи считаются заданными геометрические размеры элементов ограждающей конструкции и их теплофизические характеристики, которые приведены в Таблице 1 и в общем случае могут зависеть от температуры.

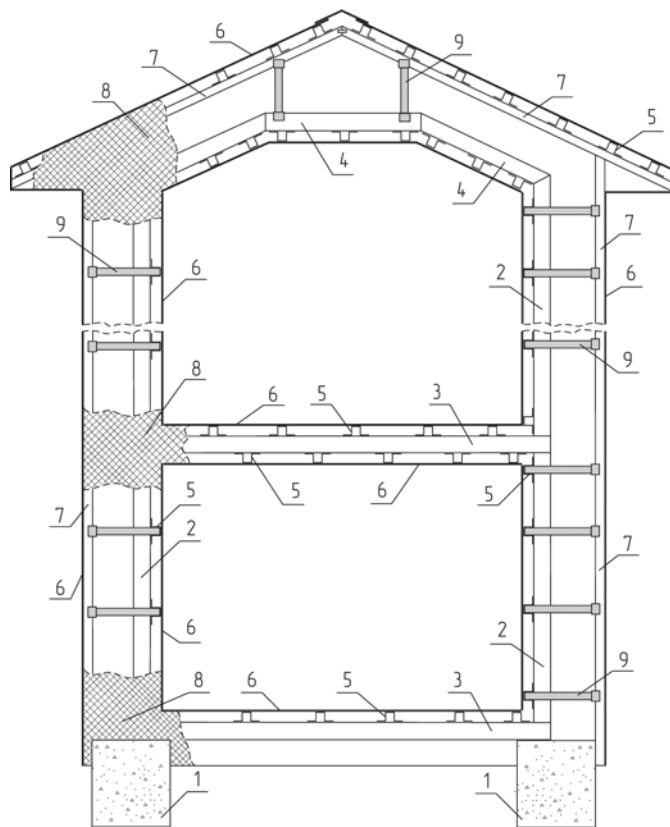


Fig. 1. Поперечный разрез здания: 1 – фундамент; 2 – колонна внутреннего каркаса; 3 – ригель внутреннего каркаса; 4 – балка перекрытия; 5 – гнутый профиль; 6 – лист опалубки; 7 – внешний каркас; 8 – лёгкий бетон; 9 – временный фиксатор.

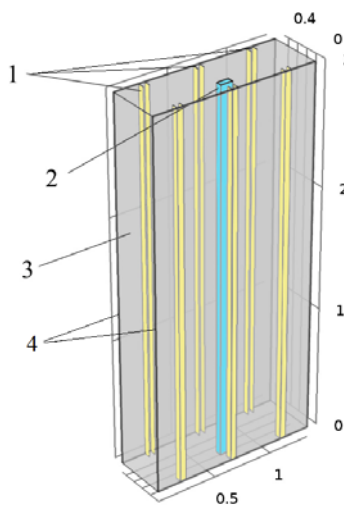


Fig. 2. Геометрия конструкции: 1 – П – образная профильная стойка; 2 – стальная труба прямоугольного сечения; 3 – полистиролбетон; 4 – стекломгнезитовая опалубка

Таблица 1. Значения коэффициентов теплопроводности материалов стены

№	Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С),
1	Металлопрофиль	57
2	Стальная труба	50
3	Полистиролбетон	0,07
4	Стекломагнезит	0,24

Задаются температуры наружного t_{ext} и внутреннего t_{int} воздуха, а также коэффициенты теплоотдачи на наружной и внутренней поверхностях. Температуры внутреннего и наружного воздуха принимаются соответственно $+20$ и -39 °С, а коэффициенты теплоотдачи на наружной и внутренней поверхности конструкции равны $\alpha_{ext} = 23$ Вт/(м²·°С) и $\alpha_{int} = 8,7$ Вт/(м²·°С).

Стационарный пространственный теплоперенос в рассматриваемом фрагменте стены описывается в декартовой системе координат системой нелинейных трехмерных уравнений теплопроводности с соответствующими граничными условиями на всех поверхностях элементов конструкции [8].

Результаты расчета

Численное исследование, позволило выяснить влияние профильных стоек и расположения металлического каркаса внутри стены на общее тепловое состояние рассматриваемой конструкции.

Figure 3 иллюстрирует температурные поля в сечении стены для варианта 1А в разрезном изображении без учета профильных стоек (а) и с их учетом (б).

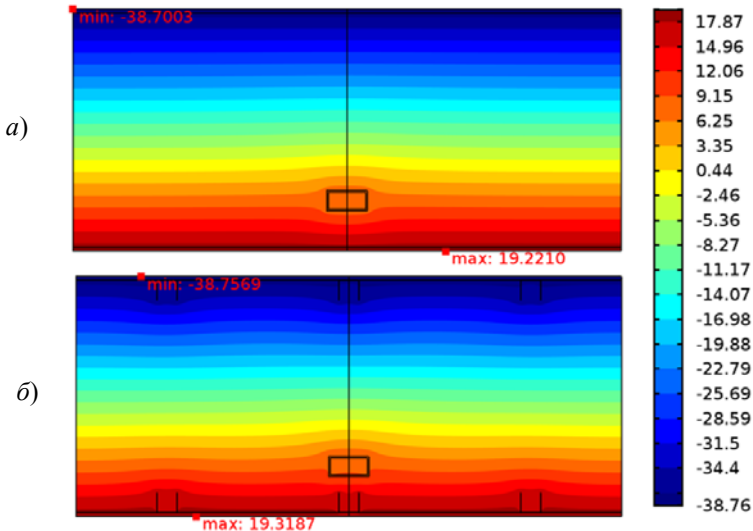


Fig. 3. Температурное поле в расчетном фрагменте стены: *a* – без профильных стоек; *b* – со стойками

Сравнительный анализ температурных полей для рассматриваемых вариантов конструкции стены показывает, что наличие профильных стоек не приводит к существенному изменению температурного поля и их влияние можно считать незначительным.

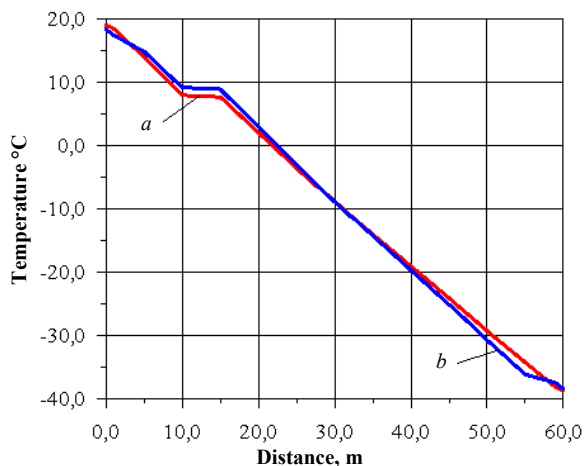


Fig. 4. Распределение температуры в поперечном сечении стены: *a* – без профильных стоек; *b* – со стойками

Это подтверждается и результатами расчета, представленными на Fig. 4. Из рисунка видно, что отклонение температуры порядка $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет место в областях, расположенных на расстоянии порядка 10-15 см от внутренней и внешней поверхностей стены.

Такой результат позволяет сделать вывод о том, что при расчете более геометрически сложных пространственных конструкций влиянием профильных стоек можно пренебречь, что позволит при разбиении расчетной области на конечные элементы строить более равномерную сетку и упростить решение задачи без заметного увеличения погрешности.

На Fig. 5 и 6 показано распределение температуры по толщине стены при различных вариантах расположения несущего каркаса для вариантов 1 и 2. Анализ представленных результатов показывает, что заметная перестройка температуры наблюдается только в окрестности труб каркаса. При этом максимальное отклонение по температуре в рассматриваемых случаях составляет примерно $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такой характер распределения температуры по толщине стены говорит о том, что расположение несущего каркаса также не оказывает существенного влияния на тепловое состояние рассматриваемого фрагмента конструкции. Однако, если рассматривать полученные распределения температур с точки зрения создания более благоприятного микроклимата в помещении, то расположение несущего каркаса вблизи внутренней стенки является предпочтительным, так как половина стены находится при более высокой температуре.

На Fig. 7 и 8 представлены соответственно температурное поле в растровом изображении и векторное поле плотности теплового потока для стены толщиной 0,6 м с несущим каркасом, расположенным по центру.

Значения температур и плотностей теплового потока, показанные на этих рисунках позволяют наглядно представлять картину теплового состояния ограждающей конструкции в различных точках рассматриваемого фрагмента стены и оценить влияние размеров и расположения элементов несущего каркаса.

Температура внутренней поверхности стены для анализируемого случая больше $19\text{ }^{\circ}\text{C}$, что значительно превышает температуру точки росы, которая даже при достаточно высокой относительной влажности $\varphi = 75\%$ составляет $15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

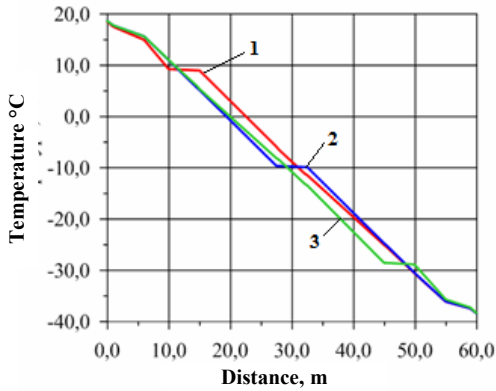


Fig. 5. Распределение температуры в поперечном сечении стены при различном расположении каркаса для варианта 1: 1 – внутренняя часть стены; 2 – центр; 3 – наружная часть стены

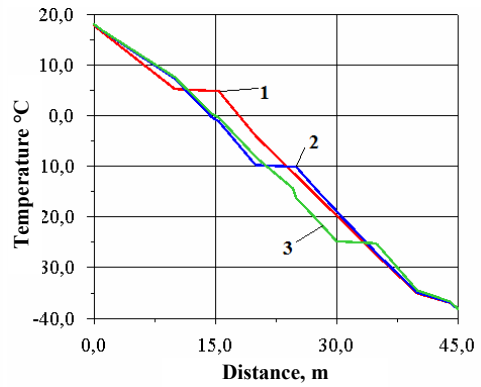


Fig. 6. Распределение температуры в поперечном сечении стены при различном расположении каркаса для варианта 2: 1 – внутренняя часть стены; 2 – центр; 3 – наружная часть стены

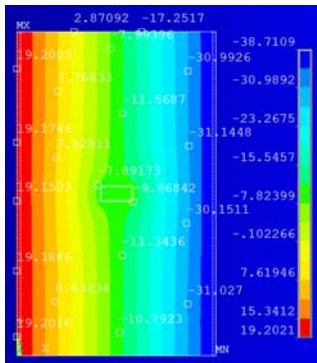


Fig. 7. Температурное поле в стене $\delta = 0,6$ м

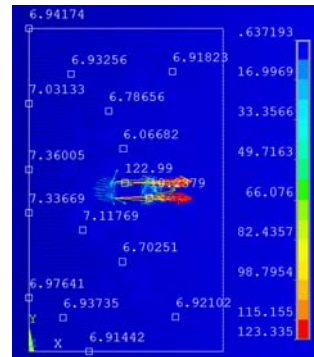


Fig. 8. Векторное поле плотности теплового потока в стене $\delta = 0,6$ м

Так как на практике относительная влажность воздуха в помещении обычно не превышает 60 %, то это подтверждает работоспособность анализируемых типов ограждающих конструкций с точки зрения образования конденсата на внутренней поверхности анализируемых типов стен в рассматриваемых климатических условиях. Аналогичная картина наблюдается и для других рассматриваемых конструкций стены с толщиной 0,45 и 0,3 м. Расчетами установлено, что для монолитной стены, изготовленной из полистиролбетона даже при толщине $\delta = 0,3$ м в самой теплонапряженной области конструкции температура на внутренней поверхности стены больше 16°C .

Для климатических условий г. Томска нормируемое значение сопротивления теплопередачи наружных стен в настоящее время составляет $3,75 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$, а для рассматриваемых конструкций из полистиролбетона сопротивление теплопередачи составляет 4,08, 6,23 и $8,37 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$ для стен толщиной $\delta = 0,3, 0,45$ и 0,6 м соответственно.

Таким образом, монолитная конструкция наружной стены, выполненная из полистиролбетона отвечает современным нормативным требованиям по уровню тепловой защиты.

Заключение

Полученные результаты показывают, что стойка металлического профиля 50×50 мм не оказывает существенного влияния на тепловое состояние конструкции для всех рассматриваемых вариантов стен, что позволяет упростить решение задачи без заметного увеличения погрешности и пренебречь их влиянием в дальнейших исследованиях.

Установлено, что расположение несущего каркаса внутри стены здания оказывает незначительное влияние на общее тепловое состояние конструкции. Однако, для создания более благоприятного микроклимата в помещении целесообразно устанавливать несущий каркас ближе к внутренней поверхности ограждающей конструкции.

Анализ полученных численных результатов позволяет сделать вывод о том, что при проведении дальнейших исследований, связанных с нестационарностью протекающих тепловых процессов и расчете более геометрически сложных пространственных конструкций, включающих различные теплонапряженные элементы, влиянием профильных стоек можно пренебречь. Это позволит при разбиении расчетной области на конечные элементы строить более равномерную сетку, сократить время счета и упростить решение задачи без существенного увеличения погрешности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–48–700367 р_а).

References

1. Т.А. Фадеева, Сборник статей Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие современной науки», 4, 286–288 (2014) (in Russian)
2. Е.Г. Малявина, Теплотери здания. Справочное пособие, 144 (2011) (in Russian)
3. Пат. 2503781 (РФ). Быстровозводимое энергоэффективное каркасное здание / Шефер Ю.В. Действует с 24.07.12, зарегистрирован 10.01.14. Бюл. № 1 (in Russian)
4. А.Н. Козлобродов, Д.Н. Цветков, Вестник ТГАСУ, 3, 298–307 (2013) (in Russian)
5. AISI–S100. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. American Iron and Steel Institute. Washington, 149 (2001)
6. EN 1993–1–3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for coldformed members and sheeting. Brussels: CEN (2006)
7. М.В. Лещенко, В.А. Семко, Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона. / Инженерно-строительный журнал, 8, 44–55 (2015) (in Russian)
8. Ю.М. Баженов, Е.А. Король, В.Т. Ерофеев, Е.А. Митина, Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности. Основы теории, методы расчета и технологическое проектирование, 320 (2008) (in Russian)
9. В.Н. Соколов, Конструирование комплексных паро-, тепло- и гидроизоляционных полистиролбетонов, 200 (2015) (in Russian)
10. А.Ц. Цыдыпова, Л.А. Урханова, Сборник трудов конференции «Наукоемкие технологии и инновации», 410–417 (2014) (in Russian)
11. В. Якубсон, Инженерно-строительный журнал, 2, 7–8 (2009) (in Russian)
12. А.С. Золотков, Инженерно-строительный журнал, 1, 14–21 (2012) (in Russian)