ISSN 2071-4726

Инженерно-строительный журнал

научно-прикладное издание

№8(52) декабрь 2014

СОБЫТИЯ

МАТЕРИАЛЫ

КОНСТРУКЦИИ

РАСЧЕТЫ

ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Инженерно-строительный институт
Центр дополнительных профессиональных программ

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
тел/факс: 552-94-60, www.stroikursi.spbstu.ru,
stroikursi@mail.ru

Приглашает специалистов организаций, вступающих в СРО, на курсы повышения квалификации (72 часа)

Код	Наименование программы	Виды работ*
Курсы по строительству		
БС-01-04	«Безопасность и качество выполнения общестроительных работ»	**п.1,2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14**
БС-01	«Безопасность и качество выполнения геодезических, подготовительных и земляных работ, устройства оснований и фундаментов»	**1,2,3,5**
БС-02	«Безопасность и качество возведения бетонных и железобетонных конструкций»	**6,7**
БС-03	«Безопасность и качество возведения металлических, каменных и деревянных конструкций»	**9,10,11**
БС-04	«Безопасность и качество выполнения фасадных работ, устройства кровель, защиты строительных конструкций, трубопроводов и оборудования»	**12,13,14**
БС-05	«Безопасность и качество устройства инженерных сетей и систем»	**15,16,17,18,19**
БС-06	«Безопасность и качество устройства электрических сетей и линий связи»	**20,21**
БС-08	«Безопасность и качество выполнения монтажных и пусконаладочных работ»	**23,24**
БС-12	«Безопасность и качество устройства мостов, эстакад и путепроводов»	**29**
БС-13	«Безопасность и качество выполнения гидротехнических, водолазных работ»	**30**
БС-14	«Безопасность и качество устройства промышленных печей и дымовых труб»	**31**
БС-15	«Осуществление строительного контроля»	**32**
БС-16	«Организация строительства, реконструкции и капитального ремонта. Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика»	**33**
Курсы по проектированию		
БП-01	«Разработка схемы планировочной организации земельного участка, архитектурных решений, мероприятий по обеспечению доступа маломобильных групп населения»	**1,2,11**
БП-02	«Разработка конструктивных и объемно-планировочных решений зданий и сооружений»	**3**
БП-03	«Проектирование внутренних сетей инженерно-технического обеспечения»	**4**
БП-04	«Проектирование наружных сетей инженерно-технического обеспечения»	**5**
БП-05	«Разработка технологических решений при проектировании зданий и сооружений»	**6**
БП-06	«Разработка специальных разделов проектной документации»	**7**
БП-07	«Разработка проектов организации строительства»	**8**
БП-08	«Проектные решения по охране окружающей среды»	**9**
БП-09	«Проектные решения по обеспечению пожарной безопасности»	**10**
БП-10	«Обследование строительных конструкций и грунтов основания зданий и сооружений»	**12**
БП-11	«Организация проектных работ. Выполнение функций генерального проектировщика»	**13**
Э-01	«Проведение энергетических обследований с целью повышения энергетической эффективности и энергосбережения»	
Курсы по инженерным изысканиям		
И-01	«Инженерно-геодезические изыскания в строительстве»	**1**
И-02	«Инженерно-геологические изыскания в строительстве»	**2,5**
И-03	«Инженерно-гидрометеорологические изыскания в строительстве»	**3**
И-04	«Инженерно-экологические изыскания в строительстве»	**4**
И-05	«Организация работ по инженерным изысканиям»	**7**

***(согласно приказам Минрегионразвития РФ N 624 от 30 декабря 2009 г.)**

По окончании курса слушателю выдается удостоверение о краткосрочном повышении квалификации установленного образца (72 ак. часа)

Для регистрации на курс необходимо выслать заявку на участие, и копию диплома об образовании по телефону/факсу: 8(812) 552-94-60, 535-79-92, , e-mail: stroikursi@mail.ru.

Http://www.engstroy.spb.ru – полнотекстовая версия журнала в сети Интернет. Бесплатный доступ, обновление с каждым новым выпуском

Инженерно-строительный журнал
научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

Свидетельство о государственной регистрации: ПИ №ФС77-38070, выдано Роскомнадзором

Специализированный научный журнал. Выходит с 09.2008.

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Адрес редакции:

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 227А

Главный редактор:
Вера Михайловна Якубсон

Научный редактор:
Николай Иванович Ватин

Литературный редактор:
Елена Викторовна Соболева

Редакционная коллегия:
д.т.н., проф. Н.В. Арефьев;
д.т.н., проф. В.В. Бабков;
д.т.н., проф. М.И. Бальзанников;
к.т.н., проф. А.И. Боровков;
д.т.н., проф. Н.И. Ватин;
PhD, professor М. Вельжкович;
д.т.н., проф. А.Д. Гиргидов;
д.т.н., проф. Э.К. Завадскас;
д.т.н., проф. В.В. Лалин;
д.т.н., проф. Б.Е. Мельников;
д.т.н., проф. Р.Б. Орлович;
Dr. Sc. Ing., professor
Л. Пакрастиньш;
Dr.-Ing. Habil., professor
Х. Пастернак;
д.т.н., проф. А.В. Перельмутер;
к.т.н. А.Н. Пономарев;
д.ф.-м.н., проф. М.Х. Стрелец;
д.т.н., проф. О.В. Тараканов;
Dr.-Ing., professor Д. Унгерман.

Установочный тираж 1000 экз.

Подписано в печать 19.12.14.
Формат 60x84/8, усл. печ. л. 7.
Заказ №2695.

Отпечатано в типографии СПбПУ.
СПб, ул. Политехническая, д. 29

Содержание

СОБЫТИЯ

Энергоэффективность ограждающих конструкций зданий 5

Резолюция секции «Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций». XII Международный конгресс «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий» 7

КОНСТРУКЦИИ

Голова Т.А., Денисова А.П. Энергоэффективность многослойной конструкции «Сельская стена» при проектировании малоэтажных зданий 9

МАТЕРИАЛЫ

Осипов И.А., Зыбина О.А. Повышение предела огнестойкости деформационных швов строительных конструкций с помощью интумесцентной герметизирующей композиции 20

Корниенко С.В. Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания 25

РАСЧЕТЫ

Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков 38

Убайдуллоев М.Н. Расчет усиливаемых ограждающих конструкций из тонкостенных элементов открытого профиля 49

© ФГАОУ ВО СПбПУ, 2014

На обложке: строительная площадка, г. Нетания, Израиль

Контакты:
Тел. +7(812)535-52-47 E-mail: engstroy@inbox.ru Web: Http://www.engstroy.spb.ru

14-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ
Получите электронный билет!
www.ndt-russia.ru
0+
NDT RUSSIA
ufi
17–19 ФЕВРАЛЯ 2015 МОСКВА
ТЕПЕРЬ В КРОКУС ЭКСПО!
Организаторы:
primexpo
ITE GROUP PLC
Тел. +7 (812) 380 6002/00
ndt@primexpo.ru

eXPO Coating MOSCOW
17–19 ФЕВРАЛЯ 2015 МОСКВА
ТЕПЕРЬ В КРОКУС ЭКСПО!
ПАВИЛЬОН 1, ЗАЛ 1
12-я Международная выставка технологий, оборудования и материалов для обработки поверхности и нанесения покрытий
на металлы • сплавы • пластические массы • дерево • керамические материалы • бетон
В рамках выставки:
Международная научно-практическая конференция
«Покрытия и обработка поверхности. Последние достижения в технологиях, экологии и оборудовании»
0+
NDT RUSSIA
Одновременно пройдет 14-я Международная выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» — NDT Russia
Получите электронный билет
www.expocoating.ru
Организаторы:
primexpo
ITE
тел.: +7 (812) 380 6002/00,
e-mail: coating@primexpo.ru
При участии:
РХТУ им. Д. И. Менделеева
Российское химическое общество им. Д. И. Менделеева
Московское химическое общество им. Д. И. Менделеева
Российское общество гальванотехников

DESIGN DECOR ST. PETERSBURG

Санкт-Петербург
КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

3-я Международная интерьерная выставка
9 – 11 сентября 2015
www.designdecor-expo.ru

SibBuild

Новосибирск
МВК «Новосибирск Экспоцентр»

26-я Международная строительная и интерьерная выставка

Неделя Архитектуры и Строительства
2 – 5 февраля 2016

Неделя Отделочных материалов и Интерьерных решений
16 – 19 февраля 2016

www.sibbuild.com

InterStroy Expo

Санкт-Петербург
КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

21-я Международная строительная выставка
18 – 21 марта 2015
www.interstroyexpo.com

MosBuild

Москва
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

21-я Международная строительная и интерьерная выставка

Неделя Дизайна и Декора
31 марта – 3 апреля 2015

Неделя Строительства и Архитектуры
14 – 17 апреля 2015

www.mosbuild.com

Новые возможности для вашего бизнеса!

www.buildingshows.com

Строительные и интерьерные выставки в **5** городах России!

Москва
Санкт-Петербург
Новосибирск
Краснодар
Екатеринбург

YugBuild

Краснодар
ВЦ «Кубань ЭКСПОЦЕНТР»

26-я Международная архитектурно-строительная выставка
1 – 4 марта 2016
www.yugbuild.com

Build Ural

Екатеринбург
МВЦ «Екатеринбург-Экспо»

Международная строительная и интерьерная выставка
15 – 18 марта 2016
www.build-ural.ru

doi: 10.5862/MCE.52.1

Энергоэффективность ограждающих конструкций зданий

С 12 по 13 ноября в Санкт-Петербурге проходили мероприятия VII Международного конгресса «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий». Выступления докладчиков были разделены на секции в соответствии с различными аспектами проблемы энергосбережения: вентиляция и кондиционирование, водоснабжение и водоотведение, теплогазоснабжение, коммерческий учет энергоносителей. Одна из секций была посвящена строительной теплофизике и энергоэффективному проектированию ограждающих конструкций зданий.

На этой секции, проходившей 12 ноября в гостинице «Прибалтийская», традиционно большое внимание было уделено нормативной базе в области теплозащиты зданий. Григорий Петрович Васильев, руководитель Центра энергосбережения и эффективного использования энергии, начал свой доклад с анализа существующих нормативных документов в этой области. Основными документами по-прежнему являются Федеральный закон №261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и Постановление Правительства №18 от 25.01.2011 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов». В этих документах, в частности, прописаны цели программы повышения энергоэффективности в части строительства: снижение энергопотребления зданий в период 2011–2015 гг. минимум на 15%, 2016–2020 – минимум на 30%, после 2021 г. – минимум на 40%. Тем не менее, до сих пор не приняты подзаконные акты, которые позволили бы воплощать эти документы в жизнь: в частности, нет базовых показателей, по отношению к которым можно было бы оценивать снижение энергопотребления.

Помимо нормативной проблемы, Г.П. Васильев отметил несоответствие фактических показателей энергопотребления проектным в построенных зданиях. В Москве был проведен анализ фактического энергопотребления в зданиях постройки 2000–2010 гг., т.е. после введения повышенных требований к сопротивлению теплопередаче конструкций. Было обнаружено превышение заявленных показателей на 60% и более. Причины такого несоответствия могут быть разнообразными – их еще предстоит выяснить. По мнению Г.П. Васильева, для адекватной оценки энергопотребления зданий необходим прямой инструментальный контроль при сдаче объекта в эксплуатацию.

Помимо этого, докладчик предложил использовать методологию комплексной оценки эффективности энергосберегающих мероприятий. При всей важности для окружающей среды основная цель повышения энергоэффективности – сокращение затрат. Таким образом, критерием эффективности энергосберегающих мероприятий должен быть чистый дисконтированный доход, который делится на потребительскую и муниципальную части. Данная методика уже разработана и апробирована при оценке эффективности мероприятий капитального ремонта зданий. Г.П. Васильев отметил, что требования к зданиям после капитального ремонта должны быть такими же, как при новом строительстве.

Другой важный аспект нормативной базы – СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», введенный в действие в 2013 г. – рассматривал в своем докладе Александр Сергеевич Горшков, доцент ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет». Снижение требований к сопротивлению теплопередаче в этом документе неоднократно критиковалось специалистами как не соответствующее целям энергоэффективности и развития строительной отрасли. Так, приводя пример Финляндии, где данные требования повышаются год от года, докладчик отметил, что это способствует развитию новых материалов и технологий. Без экономических стимулов такого развития не будет. Другой аспект документа, который отметил А.С. Горшков, – значительное усложнение по сравнению с предыдущей редакцией методик расчета и увеличение количества требований к ограждающей конструкции. Помимо удельного сопротивления теплопередаче, необходимо также рассчитывать удельную теплозащитную

характеристику, температуру внутренней поверхности ограждающей конструкции. Последняя рассчитывается по температурным полям в области теплопроводных включений – довольно сложная методика, проверять которую при экспертизе проектной документации на данный момент никто не готов.

В связи со всеми перечисленными сложностями, А.С. Горшков предлагает при расчете теплозащитных характеристик оболочки здания использовать стандарты ISO 13789 “Thermal performance of buildings”. По его оценке, данные стандарты являются более простыми и соответствуют целям энергосбережения. На данный момент ведется разработка регионального стандарта на базе этой группы документов.

А.С. Горшков выделил также другие препятствия развитию энергоэффективного строительства, помимо нормативных:

- экономические – отсутствие дотаций или рыночных механизмов (например, льготных условий кредитования) для строительства энергоэффективных зданий;
- информационно-образовательные – нет широкой просветительской работы, которая сформировала бы социальный заказ;
- технические – мало продуманных решений и реализованных проектов, на которые можно было бы ориентироваться.

Действительно, в России на данный момент мало примеров удачных проектов энергоэффективных зданий. При этом страны ближнего зарубежья, раньше начавшие работу в этой области, уже могут продемонстрировать и проанализировать такие примеры. Так, определенные успехи в энергоэффективном строительстве уже имеют Республика Беларусь и Казахстан. Роман Валентинович Твердохлебов, технический директор ГК «МОНОРАКУРС», Беларусь, рассказал об этом опыте. Первый энегоэффективный дом был построен в Минске в 2007 г. На этапе строительства в здание были заложены датчики для постоянного мониторинга. В проекты этого и других энергоэффективных домов были включены такие решения, как утепление кровли и северных фасадов, система рекуперации тепла. Анализ вариантов использования рекуперации показал, что центральная система дешевле и удобнее в эксплуатации; при этом поквартирная система позволяет жильцам индивидуально регулировать условия энергопотребления. Р.В. Твердохлебов, как и А.С. Горшков, отметил информационные проблемы при реализации энергосберегающих мероприятий: у жильцов отсутствует мотивация, так как они оплачивают лишь 10–20% коммунальных услуг, а значит, для них экономия невелика.

Особая часть ограждающей конструкции, оказывающая значительное влияние на энергопотребление, – это оконный блок. Доклад Тамары Александровны Дацюк, декана факультета инженерно-экологических систем ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет», был посвящен особенностям проектирования и расчета этих конструкций. Большинство проектов многоквартирных домов по-прежнему проектируется исходя из естественной вентиляции. При этом в ограждающих конструкциях используются герметичные оконные блоки, которые препятствуют естественной вентиляции. Это приводит как к повышению содержания CO_2 в помещениях, так и к развитию грибкового поражения ограждающей конструкции. При условии использования герметичных стеклопакетов приток осуществляется только за счет воздухопроницаемости самой ограждающей конструкции и проветривания. Оконные блоки необходимо проектировать исходя из следующих ограничений:

- должен быть обеспечен требуемый воздухообмен 110 м^3/час;
- оконный блок не должен ухудшать теплотехнические свойства ограждающей конструкции;
- не должен образовываться конденсат;
- должна быть обеспечена звукоизоляция.

При невозможности или нецелесообразности использования полноценной системы механической вентиляции обеспечить соблюдение этих требований можно при использовании вентиляционных клапанов, стеновых и оконных. Они обеспечивают необходимый приток и проветривание, при этом сохраняя теплозащитные и звукоизоляционные свойства конструкции.

Тем не менее, Т.А. Дацюк отметила, что неконтролируемая установка клапанов жильцами может привести к нестабильной работе вентиляции, т.к. они влияют на распределение воздушных потоков. Рекомендуется изначально закладывать использование клапанов в проект и учитывать их коэффициент сопротивления в расчете.

Дмитрий Александрович Ващенко, директор ООО «Интеллект-Сервис», также обратил внимание на опасность неконтролируемого использования приточных клапанов – это может значительно снизить энергоэффективность ограждающей конструкции. По его словам, внесение изменений в систему вентиляции, не заложенных в проекте, может быть одной из причин, по которым свойства реальных конструкций не соответствуют проектным. В ходе лабораторных исследований различных типов ограждающих конструкций, проведенных в Белгороде, такое несоответствие было обнаружено в большинстве случаев. Причины, помимо указанной, могут быть разными: от изменения свойств материала в конструкции до некорректного начального расчета.

Важности правильного измерения теплофизических свойств материалов был посвящен доклад Николая Александровича Соколова, руководителя сектора эталонов и научных исследований в области теплофизических измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». По его словам, в многочисленных лабораториях и испытательных центрах, проводящих оценку теплотехнических параметров, зачастую используется несертифицированное оборудование, которое может давать значительную погрешность. В связи с этим более 80% выпускаемых материалов в реальности не соответствуют собственным техническим условиям и стандартам. При этом Россия на сегодня обладает самым точным в мире оборудованием для измерения теплопроводности. Необходимо лишь проверить, сертифицировано ли оборудование, на котором проводятся измерения, и какова его погрешность в соответствии с сертификатом.

Помимо перечисленного, на секции обсуждались вопросы, связанные с влажностным режимом ограждающих конструкций, методиками испытаний конструкций и материалов, а также проблемы текущих проектов энергоэффективных зданий.

В.М. Якубсон

Резолюция секции «Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций»

VII Международный конгресс «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий»

1. Фактические значения удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию жилых и общественных зданий, вводимых в эксплуатацию на территории Российской Федерации, не соответствуют нормативным требованиям. С целью устранения несоответствия фактических и нормируемых значений удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление требуется повысить нормативный уровень теплоизоляции (тепловой защиты) ограждающих конструкций зданий. Повышение нормативного уровня теплоизоляции ограждающих конструкций позволит более широко и эффективно внедрять в практику строительства энергосберегающие инновации в части строительных материалов и конструктивных решений.

2. В настоящее время на территории Российской Федерации отсутствует утвержденная методика оценки вводимых в эксплуатацию зданий требованиям энергетической эффективности. Предлагаем поддержать Проект национального стандарта «Здания и сооружения. Методика проведения натурных теплотехнических испытаний по определению энергопотребления вводимых в эксплуатацию зданий и оценка их соответствия требованиям энергетической эффективности», разработанного ОАО «НИИМосстрой».

3. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» не соответствует требованиям Указа Президента РФ от 04 июня 2008 г. N 889, Федерального Закона Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ, Постановления Правительства Российской Федерации от 25 января 2011 г. N 18 и других нормативных документов. Предлагаем отменить действие приказа Министерства регионального развития РФ от 30 июня 2012 г. № 265 об утверждении и введении в действие с 1 января 2013 г. данного Свода Правил.

4. Одной из целей СП 50.13330.2012, обозначенной во введении к нему, является повышение уровня гармонизации с европейскими и международными нормативными документами. Фактически СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» не гармонизирован с европейскими и международными нормативными документами ни в части терминологии, ни в части методологии проектирования тепловой защиты. Предлагаем поддержать инициативу Санкт-Петербургского государственного политехнического университета о необходимости разработки свода правил по тепловой защите, гармонизированного с международными стандартами.

5. Требуется разработка альтернативной редакции свода правил по тепловой защите, гармонизированного с международными стандартами (ISO 13789, ISO 7345, ISO 10456, ISO 6946, ISO 10077 и др.) и устанавливающего нормативные требования по теплоизоляции до уровня, принятого в европейских странах с сопоставимыми климатическими условиями. Предлагаем поддержать вторую редакцию СП «Тепловые характеристики зданий – Трансмиссионный и вентиляционный коэффициенты теплопередачи – Методика расчета и нормативные требования», разработанного в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.

6. С целью получения достоверных данных о теплофизических характеристиках теплоизоляционных материалов, входящих в состав ограждающих конструкций зданий, предлагаем создать национальную базу данных по теплофизическим свойствам строительных материалов и изделий на базе ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева», а также национальную базу данных по теплотехническим свойствам ограждающих конструкций (в том числе – светопрозрачных) на базе Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

7. Актуальной проблемой энергосбережения является защита от переувлажнения ограждающих конструкций. Методики расчета защиты строительных ограждающих конструкций от переувлажнения, изложенные в СНиП 23–02–2003 и СП 50.13330.2012, не применимы для оценки влагозащитных свойств ограждающих конструкций с мультизональной конденсацией влаги. Неоднозначность выбора плоскости максимального увлажнения согласно СП 50.13330.2012 приводит к противоречивым результатам в оценке влагозащитных свойств конструкций и затрудняет работу проектировщика. Требуется разработка альтернативной редакции раздела «Защита от переувлажнения ограждающих конструкций» (п. 8 СП 50.13330.2012) для определения влагозащитных свойств ограждающих строительных конструкций с повышенным уровнем теплозащиты в широком диапазоне увлажнения материалов.

Председатель секции,
кандидат технических наук,
директор научно-учебного центра
«Мониторинг и реабилитация природных систем»
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» ***А.С. Горшков***

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Строительство уникальных зданий и сооружений»,
директор Инженерно-строительного института
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» ***Н.И. Ватин***

doi: 10.5862/MCE.52.2

Энергоэффективность многослойной конструкции «Сельская стена» при проектировании малоэтажных зданий

К.т.н., младший научный сотрудник Т.А. Голова,
д.т.н., профессор А.П. Денисова,
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Аннотация. В статье представлены исследования энергоэффективности различных конструктивных решений стен и новой конструкции многослойной стены для малоэтажного строительства. Приведены результаты тепловизионных исследований многослойных и однослойных ограждающих конструкций, определены параметры микроклимата в помещении для различных конструктивных решений стен.

На основе проведенного исследования выявлены оптимальные конструктивные решения стен и проведена теоретическая оценка их энергоэффективности по СНиП 23–02–2003. Рассчитаны теплопотери здания через наружные ограждающие конструкции, приведенное сопротивление теплопередаче стен, общие теплопотери здания с выбранной конструкцией наружной стены за отопительный период.

Разработаны рекомендации по применению новой конструкции многослойной стены с использованием местных материалов при строительстве энергоэффективных малоэтажных зданий. Рекомендации содержат требования к материалам стен, теплотехническому расчету, указания по производству работ, физико-механические характеристики слоев стены.

Ключевые слова: энергосбережение; конструктивные решения стен малоэтажных зданий; температурно-влажностный режим ограждающих конструкций

Проектирование зданий в современных условиях необходимо проводить, учитывая класс энергоэффективности здания. Одним из способов повышения энергоэффективности здания является применение эффективных конструкций стен, которые отвечают требованиям к теплозащите зданий и микроклимату в помещениях.

В последние годы активно развивается сектор малоэтажного строительства, в основном в сельской местности. Важным фактором при проектировании жилых домов в таких районах является выбор материалов, не только отвечающих экономическим и экологическим требованиям, но и способствующих созданию комфортных условий проживания. Поэтому при внедрении новых конструктивных решений стен остается актуальным вопрос исследования температурно-влажностного режима здания, уровня теплозащиты его ограждающих конструкций и обеспечения нормативных параметров микроклимата в помещениях, а также энергоэффективности здания в целом.

Проведенные исследования в области разработки энергоэффективных зданий [1, 2, 3, 4] направлены, прежде всего, на определение температурно-влажностного режима здания и параметров микроклимата в помещении. Данные характеристики зависят от природно-климатических условий района строительства и имеют существенное значение для принятия конструктивных решений. Одним из аспектов государственной программы энергосбережения является задача комплексного использования энергетических ресурсов региона, включающая эффективное использование материалов, производимых на основе возобновляемых местных ресурсов. Этот вопрос сейчас актуален для развития строительного сектора в средней полосе Поволжья.

В данной работе рассматривается исследование новой конструкции «Сельская стена» жилых малоэтажных зданий на основе использования местных ежегодно возобновляемых материалов средней климатической зоны РФ. Также решается задача экспериментального обоснования предлагаемой конструкции стены с учетом современных требований энергоэффективного проектирования.

Особое внимание уделяется сравнительному анализу температурно-влажностного режима различных конструкций многослойных стен малоэтажных зданий в условиях средней климатической зоны РФ и новой многослойной конструкции «Сельская стена» с органическим утеплителем при одинаковых климатических условиях.

Результаты исследований теплоэффективности, температурно-влажностного режима при эксплуатации зданий, а также разработки объемно-планировочных и конструктивных решений энергоэффективных зданий приведены в работах следующих отечественных авторов: Ю.А. Табунщиков, В.Г. Гагарин, М.М. Бродач, А.С. Горшков, Н.И. Ватин, Н.В. Шилкин, Т.А. Белаш, А.В. Кузнецов, А.М. Береговой, Г.Н. Годунова, Д.В. Немова, [1–7, 9, 10]. Исследования энергоэффективных строительных конструкций и параметров микроклимата для различных конструктивных решений стен отражены в работах следующих зарубежных авторов: F. Aldawi, F. Alam, A. Date, M. Alghamdi, F. Aldhawi, M. Praznik, V. Butala, W. Thomas, J. Duffy, R. Albatici, F. Passerini, A.M. Tonelli, S. Gialanella, A. Lewandowska, A. Noskowiak, G. Pajchrowski, D. González-Aguilera, S. Lagüela, P. Rodríguez-Gonzálvez, D. Hernández-López , C.M. Stoppel, Leite F., B. Risholt, B. Time, G. Anne Hestnes [11–18].

Обзор литературных данных показал, что основными критериями энергоэффективного проектирования зданий является создание комфортных параметров микроклимата в помещении с обеспечением требуемой тепловой защиты зданий и соответствующего температурно-влажностного режима стен. Однако в данной литературе отсутствуют сведения о подобных исследованиях для многослойных конструкций стен с органическим утеплителем из прессованных соломенных блоков.

В ранее опубликованных работах авторов [19, 20] были проведены исследования по определению несущей способности, пожаробезопасности, долговечности новой конструкции многослойной стены «Сельская стена», однако экспериментальных данных по исследованию энергоэффективности таких конструкций нет.

Учитывая отсутствие подобных исследований, а также увеличение объема использования органического материала в практике строительства сельских домов на территории РФ и стран СНГ, необходимо определить возможность использования данной конструкции при проектировании энергоэффективных малоэтажных зданий.

Постановка задачи

В настоящее время в России действует ряд нормативно-технических документов (основной документ – постановление Минстроя РФ №18-81 от 11.08.95 г. «О принятии изменений №3 СНиП П-03-79 «Строительная теплотехника» [21]), направленных на решение задач энергосбережения и снижения эксплуатационных затрат в строительстве. В соответствии с требованиями, установленными в этих документах, традиционные строительные однослойные конструкции (железобетон, кирпич, дерево) не способны обеспечить требуемое значение термического сопротивления [22]. Оно может быть достигнуто лишь с применением конструкций стен с многослойной структурой [23]. Многослойные стены современных малоэтажных зданий выполняются со средним слоем из эффективных волокнистых и плитных утеплителей (жесткой базальтовой ваты и пенополистирола), которые не соответствуют требованиям долговечности (не более 15–25 лет [22)]. Кроме того, для изготовления таких утеплителей необходимо наличие индустриальных баз со специальными технологическими процессами, формирование которых для сельской местности является нецелесообразным. Поэтому одним из приоритетных направлений является применение местных материалов, которое способствует не только уменьшению транспортных расходов и возможности строительства с использованием низкой квалификации рабочих, но и снижению стоимости здания в целом.

При выборе конструктивного решения стен малоэтажных зданий важным является определение таких показателей энергоэффективности, как температурно-влажностный режим ограждающих конструкций и параметры микроклимата в помещении. Температурно-влажностный режим влияет на параметры микроклимата в помещении. Чем меньше теплопотери, тем энергоэффективнее здание.

Целями данной работы являются:

- определение температурно-влажностного режима жилых малоэтажных зданий в климатических условиях средней полосы Поволжья с применением различных утеплителей (неорганических заводского изготовления и местных органических ежегодно возобновляемых соломенных блоков) в многослойных стенах;
- выбор рациональной конструкции многослойной стены для таких зданий с учетом требований энергоэффективности, экологичности и экономичности.

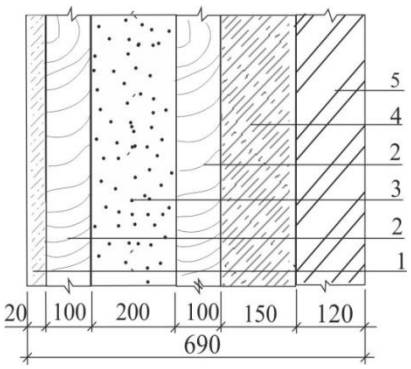
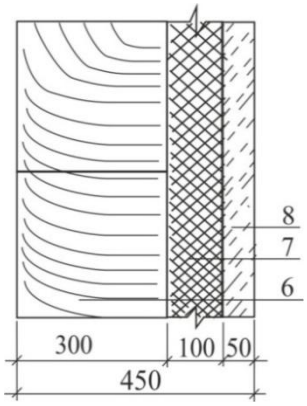
Исследование температурно-влажностного режима жилых малоэтажных зданий при различных конструктивных решениях многослойных стен

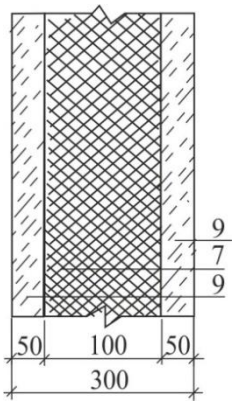
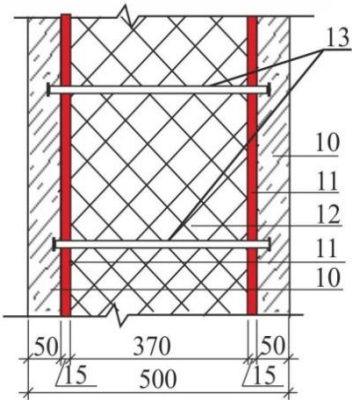
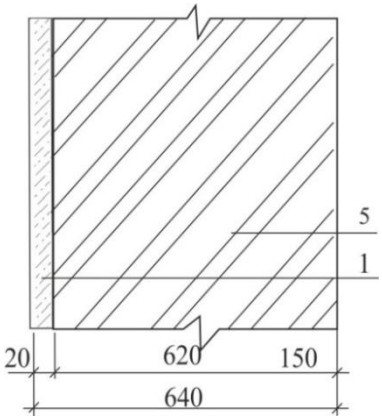
Анализ существующих конструктивных решений стен средней полосы Поволжья показал, что перспективными для строительства энергоэффективных малоэтажных жилых домов являются многослойные конструкции стен [20]. Для определения рациональной конструкции многослойной стены с точки зрения энергоэффективности были проведены натурные обследования различных типов стен и новой конструкции «Сельская стена».

Объектами натурного обследования являются многослойные конструкции стен одноэтажных жилых домов, расположенных в г. Балаково Саратовской области, и новая конструкция многослойной стены «Сельская стена» [24], установленная в лаборатории «Эксплуатационная надежность строительных материалов и конструкций. Секция Бетоны и растворы» Балаковского института техники, технологии и управления (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Стены жилого дома №1 представляют собой многослойную конструкцию каркасного типа из дощатых щитов с засыпкой из опилок. В 2008 г. стены были утеплены засыпкой из керамзита и облицованы кирпичом (табл. 1). Стены основной части жилого дома №2 представляют собой цельный сруб, облицованный в 2009 г. плитным утеплителем и обшитый брусом (табл. 1), стены пристройки – каркасные деревянные с утеплителем из стекловаты (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики конструктивных решений стен

Объект исследования и место расположения	**Конструктивное решение стены**	**Характеристики слоев**
1	**2**	**3**
Одноэтажный жилой дом №1, ул. Красная звезда, г. Балаково	Многослойная конструкция стены 	1 – штукатурный слой Р = 1800 кг/м^3, Λ = 0,93 Вт/м·°С 2 – сосна обыкновенная ρ = 450 кг/м^3, λ = 0,15 Вт/м·°С 3 – опилки древесные сухие ρ = 60 кг/м^3, λ = 0,065 Вт/м·°С 4 – засыпка гравия керамзитового ρ = 800 кг/м^3, λ = 0,23 Вт/м·°С 5 – кирпич силикатный ρ = 1500 кг/м^3, λ = 0,64 Вт/м·°С
Одноэтажный жилой дом №2, ул. Красная звезда, г. Балаково	Техслойная конструкция стены 	6 – брус из дуба ρ = 700 кг/м^3, λ = 0,18 Вт/м·°С 7 – утеплитель стекловата ρ = 20 кг/м^3, λ = 0,04 Вт/м·°С 8 – древесина – доски ρ = 450 кг/м^3, λ = 0,15 Вт/м·°С

Объект исследования и место расположения	Конструктивное решение стены	Характеристики слоев
1	2	3
Одноэтажный жилой дом №2, пристройка, ул. Красная звезда, г. Балаково	Трехслойная конструкция стены 	7 – утеплитель стекловата ρ = 20 кг/м^3, λ = 0,04 Вт/м·°С 9 – ДСП ρ = 650 кг/м^3, λ = 0,14 Вт/м·°С
Лаборатория «Эксплуатационная надежность строительных материалов и конструкций. Секция Бетоны и растворы» БИТТиУ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., ул. Чапаева, г. Балаково	Экспериментальная конструкция стены «Сельская стена» 	10 – армированный мелкозернистый торкрет-бетон ρ = 2200 кг/м^3, λ = 0,438 Вт/м·°С 11 – контактные слои из соломобетона ρ = 500 кг/м^3, λ = 0,13 Вт/м·°С 12 – прессованные соломенные блоки ρ = 50 кг/м^3, λ = 0,059 Вт/м·°С 13 – связи из стеклопластиковой арматуры
	Однослойная конструкция стены 	1 – штукатурный слой ρ = 1800 кг/м^3, λ = 0,93 Вт/м·°С 5 – кирпич силикатный ρ = 1500 кг/м^3, λ = 0,64 Вт/м·°С

Для получения достоверных данных по температурно-влажностному режиму и параметрам микроклимата в помещении с новой конструкцией «Сельская стена» [19] был отобран экспериментальный образец размерами 600x400x500 мм из натурного фрагмента стены. Он был установлен в оконном проеме (деревянные переплеты с двойным остеклением) лаборатории «Эксплуатационная надежность строительных материалов и конструкций. Секция Бетоны и растворы» БИТТиУ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А. (рис. 1, а, в), что соответствовало климатическим условиям, наиболее приближенным к реальным. При этом открытые части утеплителя из прессованных соломенных блоков были изолированы с помощью пенопласта

(рис. 1, б). Крепление образца выполнено с помощью монтажной пены. Основной материал здания лаборатории института – кирпичная стена из силикатного кирпича толщиной 625 мм, оштукатуренная изнутри цементно-песчаной штукатуркой (табл. 1). Таким образом, исследования температурно-влажностного режима и параметров микроклимата в помещениях были проведены для пяти типов наружных стен. Натурные измерения проводились в период с 21.02.2013 г. по 11.03.2013 г. в дневное время суток. Параметры определялись с интервалом в одну неделю, что соответствует требованиям ГОСТ 26254-84 «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций» [25]. Температура наружного воздуха варьировались в пределах от +1 до –13 °С, влажность – от 84 до 90 %.

Все измерения проводились с участием экспертов «Научно-исследовательской лаборатории судебных экспертиз» г. Балаково методом неразрушающего контроля с применением цифровых измерительных приборов. Температура и относительная влажность воздуха в помещении измерены цифровым термогигрометром «Testo605-H1» с погрешностью: по температуре ±0,5 °С, по относительной влажности ±2,5 %. Температура внутренней поверхности ограждающих конструкций измерена тепловизором «Testo 875-1» с погрешностью ±1,0 °С. Все измерения выполнены при закрытых окнах приборами, прошедшими регистрацию и имеющими сертификат.

а) б) в)

Рисунок 1. Экспериментальный образец многослойной стены:
а – общий вид экспериментально образца; б – изоляция утеплителя;
в – установка образца в проектное положение

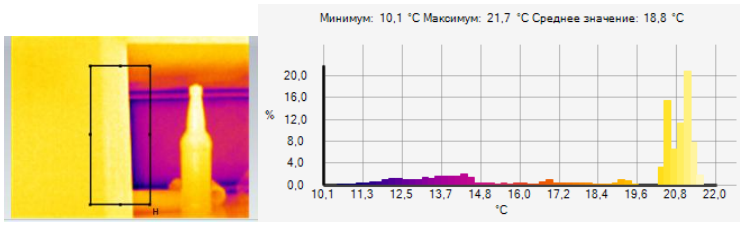
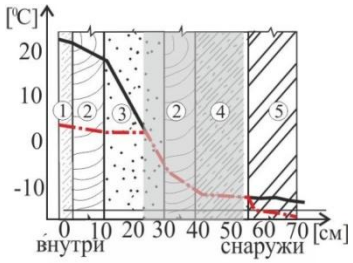
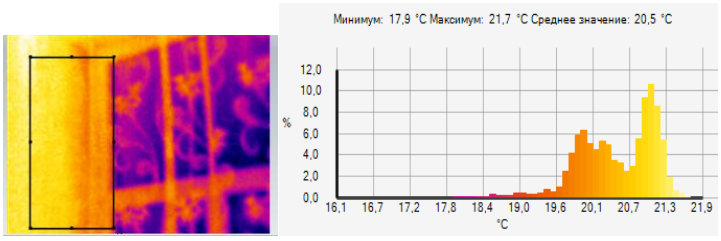
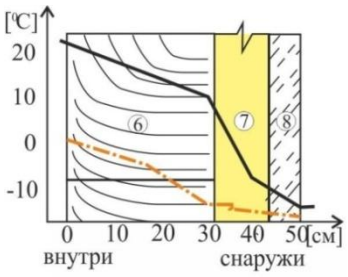
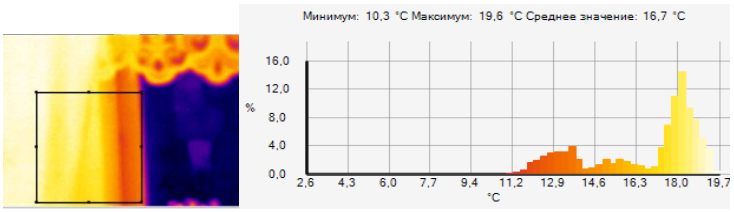
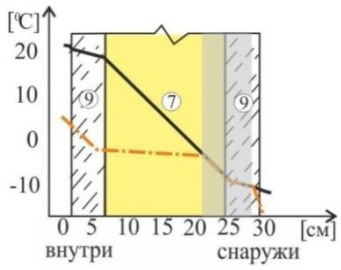
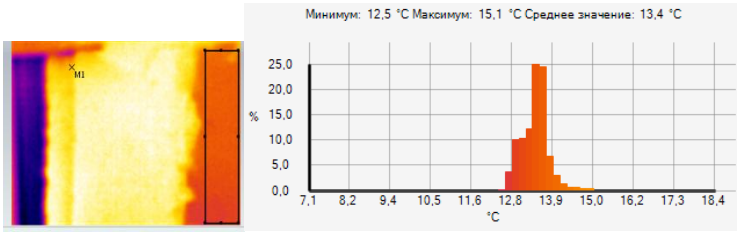
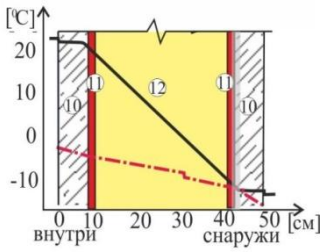
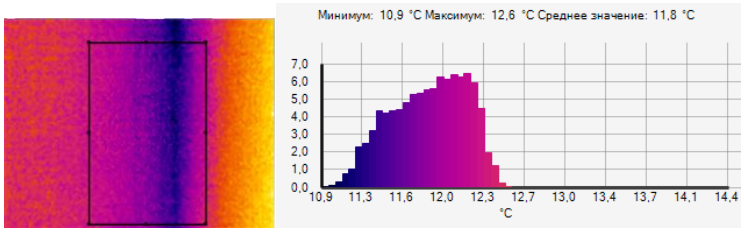
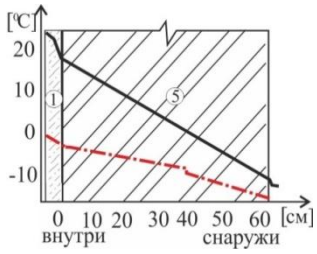
Измерения температур и относительной влажности выполнены в центре помещений на высоте 1,1…1,5 м от пола. Температура внутренней поверхности наружной стены измерялась в центре участков, образованных линиями, продолжающими грани откосов светопроема.

Результаты натурных измерений температурно-влажного режима стен и параметров микроклимата, полученные на основе экспериментально-теоретических данных с использованием нормативной литературы [26, 27], приведены в таблицах 2, 3.

Условия комфорта формируются температурной обстановкой в помещении, характеризуемой как температурой внутреннего воздуха, так и средней температурой поверхности стены. В общем случае согласно ГОСТ 30494-96 [26] и СНиП 23-02-2003 [27] комфортными условиями в помещении считаются температура воздуха от +20 до +22 °С и относительная влажность воздуха от 30 до 50 %. При температуре поверхности стены более 18 °С необходимый уровень комфорта достигается при более низких температурах воздуха в помещении. Таким образом, наиболее соответствуют комфортным условиям помещения с конструкциями стены жилого дома №1, стены жилого дома №2 (основное здание) и новой конструкции «Сельская стена».

На схемах стационарного тепловлажностного режима (табл. 2) определена зона образования конденсата. Как видно из схем стационарного потока, образование конденсата происходит в слое утеплителя в стенах жилых домов № 1 и 2 (пристройка), что приводит к насыщению их влагой и к промерзанию стены. Это значительно сокращает срок службы конструкций. Кроме этого, образование конденсата между утеплителем и несущим слоем стен в осенне-весеннее время в период накопления влаги при положительных температурах и отсутствии вентиляции воздушной прослойки между стеной приводит к набуханию утеплителя и образованию плесени (биологической коррозии стен) и, как следствие, к потере теплотехнических свойств стены.

Таблица 2. Результаты экспериментально-теоретических исследований температурно-влажностного режима

Объект	Изображение и гистограмма стен	Схема стационарного тепловлажностного режима**
1	2	3
Стены жилого дома № 1		
Стены жилого дома № 2 (основная часть)		
Стены жилого дома № 2 (пристройка)		
«Сельская стена»		
Стены кирпичные		

** ——— – температура; - - - – точка росы; ▒ – зона конденсата

Таблица 3. Результаты экспериментальных исследований параметров микроклимата в помещениях

Наименование параметра	Объект исследования					Норми-руемые значения по СНиП
	Стена жилого дома №1	Стена жилого дома №2 (осн.)	Стена жилого дома №2 (пристр.)	Сельская стена	Кирпич-ная стена	
1	2	3	4	5	6	7
Температура точки росы, °С	4,5	0,7	1,3	2,1	2,1	0,2…3,4
Внутренняя температура воздуха, °С	22,4	21,5	20,9	23,4	23,4	20…22
Относительная влажность воздуха внутри помещения, %	31,1	25,1	26,8	24	24	30….50
Среднее значение температуры внутренней поверхности стены, °С	18,8	20,5	16,7	13,4	11,8	-
Температура наружного воздуха, °С	–13	−13	–13	–13	–13	-
Относительная влажность воздуха %	90	90	90	90	90	-
Теплопотери, Вт/м^2·К	0,14	0,2	0,17	0,16	1,2	-
Конденсат, г/м^2·час	43,41	-	11,75	2,24	-	-

В новой конструкции «Сельская стена» с конструкционным слоем из торкрет-бетона конденсация пара возможна на внутренней поверхности этого слоя и частично на поверхности соломобетона. Причем конденсация пара возможна и при положительных температурах на этой границе со стороны помещения. Это обусловлено в 2,1 раза большим сопротивлением паропроницанию торкрет-бетона по сравнению с соломобетоном. В то же время исключается конденсация пара между слоем утеплителя прессованных соломенных блоков и соломобетоном, так как упрочняющие элементы трубчатого сечения, хаотично ориентированные в пространстве, содержат воздушную прослойку между волокнами и внутри трубчатого сечения. Поэтому конденсация пара на границе соломобетона и торкрет-бетона не требует устройства дополнительной пароизоляции. За счет такой конструкции стена «дышит» и не накапливает конденсат. В условиях протекания неравновесных процессов вынужденного или собственного деформирования, причинами которых являются различного рода внешние воздействия и теплообмен с окружающей средой вследствие интенсификации твердения цемента, происходит деформационное упрочнение. Оно приводит к получению несущих наружных слоев из торкрет-бетона с повышенными физико-механическими свойствами и менее дефектной структурой. При этом в реакцию вовлекается та часть цемента, которая в случае отсутствия неравновесных процессов деформирования на данной стадии осталась бы неиспользованной. Данное обстоятельство, а также факт приобретения несущими наружными слоями 2 из мелкозернистого торкрет-бетона дополнительной прочности за счет деформационного упрочнения дают возможность снизить расход цемента на 10–15 %.

В однослойных кирпичных стенах конденсат зимой образуется часто, но этот факт нередко остается незамеченным в связи с малым количеством конденсата. Кроме того, в теплые сезоны кирпичные стены, как правило, полностью высыхают. Однако такие стены, согласно таблице 3, имеют наибольшие теплопотери и не соответствуют параметрам энергоэффективности.

Таким образом, по результатам натурного обследования рациональными конструктивными решениями стен с учетом определенного температурно-влажного режима, а также соответствующих ему параметров микроклимата жилых помещений являются конструкции стен жилого дома №2 (основная часть) и новая многослойная конструкция «Сельская стена»

Оценка энергоэффективности рациональных конструкций стен малоэтажных зданий

Энергоэффективность в жилищном строительстве рассматривается как комплекс мероприятий, направленных на снижение потребляемой тепловой энергии, поэтому необходимо провести расчет теплопотерь здания через наружные стены.

Теплопотери здания через наружные ограждающие конструкции за отопительный период, кВт·ч, определяют по формуле [27]:

$$Q_{tr}^{y} = 0{,}024 D_d \Sigma \frac{1}{R_i} A_i n \ . \qquad (1)$$

Здесь D_d – градусо-сутки отопительного периода, °С·сут, определяемые по формуле [27]:

$$D_d = (t_{int} - t_{ht}) z_{ht}, \qquad (2)$$

где t_{int} – средняя за отопительный период температура внутреннего воздуха в здании, °С; t_{ht}, z_{ht} – средняя за отопительный период температура наружного воздуха, °С, и продолжительность, сут, отопительного периода со среднесуточной температурой наружного воздуха ниже 8 °С (по СНиП 23–01–99* [28]).

В формуле (1) R_i – приведенное сопротивление теплопередаче стен, м^2°С/Вт, принимают по проектным данным или расчетам по СНиП 23–02–2003[27] согласно фактической конструкции (табл. 1); A_i – площадь стены, м^2; n – поправочный коэффициент, учитывающий зависимость положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху. Для наружных стен n = 1.

Сравнительная оценка теплопотерь проводилась на 1 м^2 стен с различными конструктивными решениями (рис. 2). В качестве примера приведены данные природных условий Саратовской области [29]. Результаты сравнения представлены в таблице 4.

Исходя из полученных данных, прессованные соломенные блоки можно использовать в качестве альтернативы современным теплоизоляционным материалам. При этом применение органического утеплителя (рис. 2) приведет к повышению энергоэффективности здания в течение года на 30 %, в течение жизненного цикла здания – на 60 % [30].

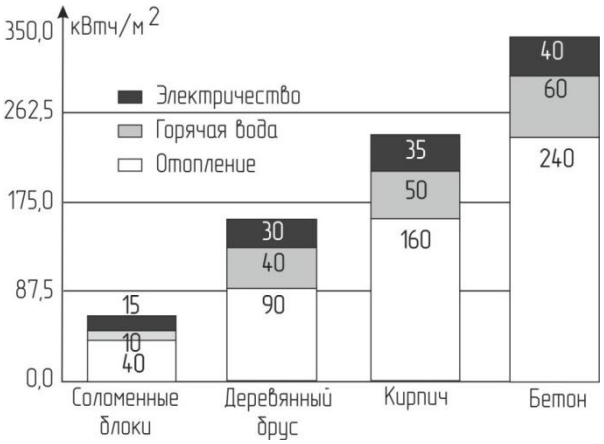


Рисунок 2. Годовое энергопотребление на м^2 жилья, кВт·ч/м^2

Таблица 4. Результаты расчета теплопотерь на 1 м^2 стены за отопительный период

№ п/п	Наименование конструкции стены	D_d, °С·сут	R_i, м^2°С/Вт	Q_{tr}^{y}, кВт·ч
1	«Сельская стена»	5034,7	7,12	11,91
2	Деревянные с утеплителем из стекловаты (стена жилого дома №2, основная часть)		3,904	30,9

Для сравнительной оценки энергетической эффективности предложенного конструктивного решения многослойной стены был разработан эскизный проект мансардного жилого дома для г. Балаково (рис. 3). На основе объемно-планировочного решения и теплотехнических характеристик рассчитаны энергетические паспорта жилого мансардного дома с рациональными конструктивными решениями стен.

Общие теплопотери здания за отопительный период, МДж [27]:

$$Q_h = 0{,}0864 K_m D_d A_e^{sum}, \qquad (3)$$

где K_m – общий приведенный коэффициент теплопередачи здания, Вт/(м^2°С); A_e^{sum} – общая площадь внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций, включая покрытие (перекрытие) верхнего этажа и пола нижнего отапливаемого помещения, м^2.

Расчетный удельный расход за отопительный период, МДж/м² [27]:

$$q_h^{des} = Q_h^y / A_h , \quad (4)$$

где Q_h^y – расход тепловой энергии на отопление здания в течение отопительного периода, МДж; A_h – отапливаемая площадь здания, м^2.

Результаты сравнения приведены на рисунке 4, а, б.

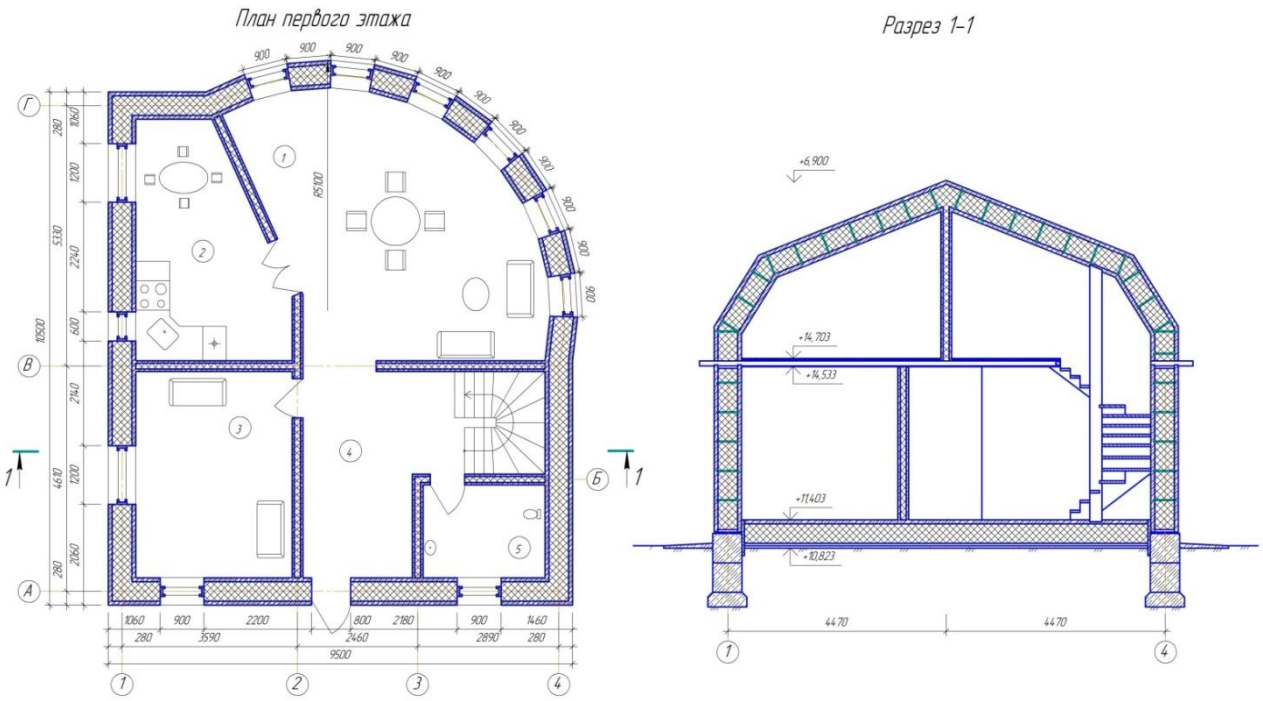


Рисунок 3. План первого этажа и разрез мансардного жилой дома

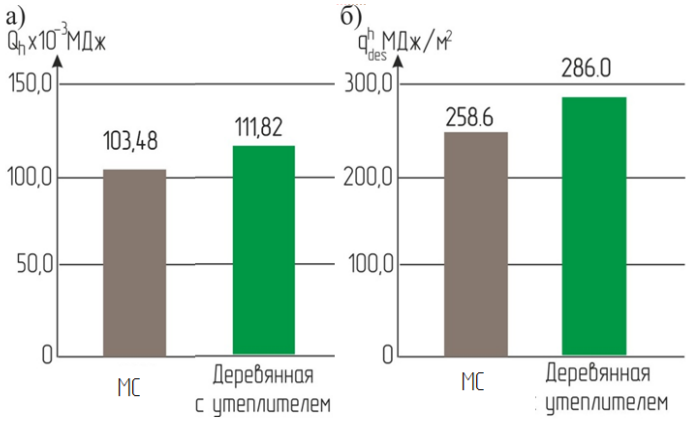


Рисунок 4. Оценка энергоэффективности конструктивных решений стен малоэтажных зданий: а – общие теплопотери здания за отопительный период, МДж; б – расчетный удельный расход за отопительный период, МДж/м²

Таким образом, использование в малоэтажных зданиях конструкции «Сельская стена» по сравнению с применением трехслойной конструкции стены жилого дома №2 (основная часть) приведет к сокращению теплопотерь через стены до 50 %, общих теплопотерь здания за отопительный период до 9 % и снижению удельного расхода тепловой энергии за отопительный период до 12 %.

Заключение

Проведенные экспериментально-теоретические исследования энергоэффективности многослойных стен с применением неорганических и органических утеплителей показали преимущество новой многослойной конструкции «Сельская стена».

1. Проведена сравнительная оценка температурно-влажностного режима многослойной конструкции «Сельская стена» с органическим утеплителем и каркасно-обшивных стен с утеплителем из опилок и стекловаты. Выявлено наличие конденсата в стенах каркасного типа, что приводит к необходимости восстановления теплоизоляции и устранению биологической коррозии стен после 15–20 лет эксплуатации таких зданий.

Тогда как многослойная конструкция «Сельская стена» имеет ряд преимуществ: снижение затрат на обогрев и охлаждение, поскольку стены дома обладают более высокой теплоизоляцией; применение ежегодно возобновляемого экологически чистого продукта, выдерживание высоких перепадов температур без нарушения влажностного режима.

2. Проведена сравнительная оценка температурно-влажностного режима трехслойной стены из цельного сруба, облицованного плитным утеплителем и обшитого брусом, и многослойной конструкции с применением местных экологически чистых материалов «Сельская стена». Выявлено, что данные конструктивные решения стен малоэтажных зданий отвечают необходимым требованиям комфортности параметров микроклимата по СНиП 23-02-2003 и ГОСТ 30494-96 в климатических условиях средней полосы Поволжья.

3. Экспериментально-теоретическая оценка энергоэффективности рациональных конструкций стен показала, что наиболее эффективной для строительства малоэтажных зданий в средней полосе Поволжья является новая конструкция «Сельская стена». Ее применение приведет к сокращению теплопотерь через стены до 50 %, общих теплопотерь здания за отопительный период до 9 % и удельного расхода тепловой энергии за отопительный период до 12 %. Таким образом, проведенные исследования выявили, что многослойная конструкция «Сельская стена» удовлетворяет требованиям СНиП 23-02-2003 и может быть рекомендована для проектирования энергоэффективных зданий в средней полосе Поволжья.

Работа выполнена в рамках Стипендии Президента РФ в области «Энергосбережение и энергоэффективность, в том числе том числе вопросы разработки новых видов топлива» 2012-2014.

Литература

1. Ватин Н.И., Горшков А.С., Немова Д.В. Энергоэффективность ограждающих конструкций при капитальном ремонте // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №3(8). С. 1–11.
2. Гагарин В.Г., Козлов В.В. «Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий» // Жилищное строительство. 2011. №8. С. 2–6.
3. Горшков А.С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий // Инженерно-строительный журнал. 2010. №1. С. 9–12.
4. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания. Изд-во: АВОК-ПРЕСС, 2003. 100 с.
5. Белаш Т.А., Кузнецов А.В. Исследование теплофизических свойств ограждающих конструкций в монолитно–кирпичных домах Санкт–Петербурга // Жилищное строительство. 2007. №10. С. 28–29.
6. Береговой А.М., Викторова О.Л. Энергосбережение в жилых зданиях с альтернативными источниками энергии // Жилищное строительство. 2008. №5. С. 36–37.
7. Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании // Инженерно-строительный журнал. 2012. №8(34). С. 4–14.
8. Гагарин В. Г., Козлов В. В. О комплексном показателе тепловой защиты оболочки здания // АВОК. 2010. №4. С. 52–66.
9. Годунова Г.Н. Выбор экономичных теплоэффективных ограждающих конструкции коттеджей // Жилищное строительство. 2009. №4. С. 30–31.

10. Кобулиев З.В. Теплофизические свойства материалов на основе растительно-вяжущей композиции // Жилищное строительство. 2006. №1. С. 24–25.

11. Aldawi F., Alam F., Date A., Alghamdi M., Aldhawi F. A new house wall system for residential buildings // Energy and Buildings. 2013. No 67. Pp. 403–418.

12. Praznik M., V.Butala, Zbašnik M. Senegačnik Simplified evaluation method for energy efficiency in single-family houses using key quality parameters // Energy and Buildings. 2013. No. 67. Pp. 489–499.

13. Walter D. Thomas, John J. Duffy Energy performance of net-zero and near net-zero energy homes in New England // Energy and Buildings. 213. No. 67. Pp. 551–558.

14. Albatici, R., Passerini F., Tonelli A. M., Gialanella S.Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer // Energy and Buildings. 2013. No. 66. Pp. 33–40.

15. Lewandowska A., Noskowiak A., Pajchrowski G. Comparative life cycle assessment of passive and traditional residential buildings' use with a special focus on energy-related aspects // Energy and Buildings. 2013. No. 67. Pp. 635–646.

16. González-Aguilera D., Lagüela S., Rodríguez-Gonzálvez P., Hernández-López D. Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades // Energy and Buildings. 2013. No. 65. Pp. 29–36.

17. Stoppel C.M., Leite F. Evaluating building energy model performance of LEED buildings: Identifying potential sources of error through aggregate analysis // Energy and Buildings. 2013. No. 65. Pp. 185–196.

18. Risholt B., Time B., Anne Hestnes G. Sustainability assessment of nearly zero energy renovation of dwellings based on energy, economy and home quality indicators // Energy and Buildings. 2013. No. 60. Pp. 217–224.

19. Емельянова Т.А. Оценка энергоэффективности новой многослойной конструкции стены для мало-этажных сельских зданий //Альманах современной науки и образования. 2012. № 12-2 (67). С. 31–33.

20. Емельянова Т.А., Денисова А.П. Алгоритм расчета конструкции многослойной стены малоэтажных зданий // Научно-технический вестник Поволжья. Казань. 2011. №6. С. 156–160.

21. Постановление Минстроя РФ №18-81 от 11.08.95 г "О принятии изменений №3 СНиП П-03-79 «Строительная теплотехника» [Электронный ресурс]. URL: http://pravo.levonevsky.org/bazaru09/postanovi/sbor36/text36911.htm. (дата обращения: 04.12.2014)

22. Семченков А.С. Наукоемкие конструкции и конструктивные решения многоэтажных железобетонных зданий. М.: НИИЖБ, 2007. 237 с.

23. НАМИКС - Национальное агентство малоэтажного и коттеджного строительства [Электронный ресурс]. URL: http://www.namiks.ru (дата обращения 10.05.2014).

24. Пат. № 98441. РФ. Многослойный строительный элемент / Т.А. Емельянова, А.П. Денисова // БИ. 2010. №29.

25. ГОСТ 26254-84 «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций» (действующая редакция).

26. ГОСТ 30494-96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» (действующая редакция).

27. СНиП 23–02–2003 Тепловая защита зданий (действующая редакция).

28. СНиП 23–01–99* Строительная климатология (действующая редакция).

29. Емельянова Т.А., Денисова А.П. Конструкции несущего остова малоэтажных и многоэтажных жилых зданий: учеб.-метод. пособие. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2013. 80 с.

30. Широков Е.И. Экодом нулевого энергопотребления. Реальный шаг к устойчивому развитию // Архитектура и строительство России. 2009. №2. С. 35–39.

Татьяна Александровна Голова, г. Саратов, Россия
Тел. раб.: +79372530525; эл. почта: emelyanova-tanya@mail.ru

Алла Павловна Денисова, г. Саратов, Россия

© Голова Т.А., Денисова А.П., 2014

doi: 10.5862/MCE.52.3

Повышение предела огнестойкости деформационных швов строительных конструкций с помощью интумесцентной герметизирующей композиции

Магистрант И.А. Осипов;
к.т.н., доцент О.А. Зыбина,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Аннотация. В работе рассмотрена возможность повышения огнезащитной эффективности интумесцентной герметизирующей композиции для устройства теплоизолирующего узла при заделке деформационных швов между бетонными элементами.

Огнезащита строительных конструкций является составной частью общей системы мероприятия по обеспечению пожарной безопасности и огнестойкости зданий и сооружений. Она направлена на снижение пожарной опасности конструкций, обеспечение их требуемой огнестойкости. В число основных задач огнезащиты входят: предотвращение возгорания, прекращение развития начальной стадии пожара, снижение опасных факторов пожара и его локализация.

Разработанный материал может быть использован для герметизации различных соединений и швов в конструкциях, а также для локального уплотнения различных полостей и областей примыкания элементов.

Ключевые слова: интумесцентные материалы; огнезащитный герметик; огнезащита строительных конструкций

По статистике МЧС, в России при пожарах ежегодно гибнет около 15 тысяч человек, пострадавших насчитывается сотни тысяч человек [1]. Количество погибших при пожарах в России в 3–5 раз больше, чем в странах Европы, США, Канаде, Японии. Одна из основных опасностей при возникновении пожара в здании – снижение прочности и обрушение несущих конструкций под воздействием открытого пламени и высоких температур [2]. Огнезащита строительных конструкций является составной частью общей системы мероприятий по обеспечению пожарной безопасности и огнестойкости зданий и сооружений. Она направлена на снижение пожарной опасности конструкций, обеспечение требуемой огнестойкости. В число основных задач огнезащиты входят: предотвращение возгорания, прекращение развития начальной стадии пожара, снижение опасных факторов пожара и его локализация [3].

Здания большой протяженности подвержены деформациям под влиянием колебаний температуры наружного воздуха в течение года, неравномерных осадок грунта основания, сейсмических явлений и других причин. Для предупреждения появления трещин в несущих и ограждающих конструкциях предусматривают деформационные швы, разрезающие здание на отсеки [4]. Правильное проектирование, устройство и оформление деформационных швов имеют большое значение при строительстве, поскольку дают возможность обеспечить длительный срок службы основных несущих и ограждающих конструкций зданий, а также элементов внутренней и внешней отделки.

Деформационные швы являются элементами противопожарных преград, таких как стены, перегородки и перекрытия, и для них существуют требования по огнестойкости. Степень огнестойкости швов должна соответствовать нормативной огнестойкости строительной конструкции в целом [5]. Однако отдельных требований по устройству деформационных швов на сегодняшний момент не существует, что является серьезным, но, по всей видимости, временным упущением. Кроме того, очень скудным является ассортимент материалов, предназначенных для огнезащиты швов. При анализе ранка огнезащитных герметиков нам удалось встретить только продукты европейского производства, поэтому целесообразно создать отечественный материал. Таким образом, целью нашей работы стало создание и внедрение в производство герметизирующей огнезащитной композиции вспучивающегося типа для заделки деформационных швов с огнезащитной эффективностью не менее 180 минут.

Проблеме изучения механизма огнезащитного действия вспучивающихся материалов различного функционального назначения посвящено значительное количество работ [6–22]. Основным отличием такого рода составов является то, что при возникновении предельно высоких температур они увеличиваются в десятки раз в своем объеме, приводя к равномерному распределению температур и предоставляя дополнительное, необходимое для эвакуации людей и пожаротушения, время [7]. В зависимости от конкретного вида состава при воздействии огня в структуре краски начинаются физико-химические преобразования, в результате которых происходит существенное поглощение тепла. При этом выделяется множество негорючих соединений и газов, формируется объемная углеродистая пена, которая предохраняет находящиеся под ней конструкции и материалы от разрушения и деформации [8].

Суть огнезащитного действия герметика заключается в формировании субстратизолирующего слоя благодаря комбинации процессов структурирования, синтеза полимерноолигомерных продуктов в процессе горения – коксообразования, карбонизации и терморасширения поверхности горящего материала. Образовавшийся пенококсовый слой выступает в качестве физического барьера, который снижает тепло- и массопереносы от газовой фазы к конденсированной. В результате затрудняется попадание газообразного топлива в пламенную зону и ограничивается поступление кислорода воздуха к защищаемому слою. За счет различных физико-химических превращений, претерпеваемых покрытием в процессе термодеструкции, осуществляется поглощение значительной части тепловой энергии. Выделяющиеся при пиролизе покрытия газообразные продукты, диффундируя в окружающую среду, охлаждают нагретые слои материала, дополнительно поглощая еще некоторое количество тепловой энергии. Немаловажное влияние на величины поглощения тепла оказывает состав и количество газообразных продуктов деструкции. Наибольшей теплопоглощающей способностью отличаются летучие продукты, содержащие в составе молекул значительное количество водорода – пары воды, аммиак. Следующий возможный фактор, в результате которого отводится еще некоторая часть тепловой энергии, – переизлучение тепла поверхностью интумесцентного слоя [23]. Некоторые авторы [24] указывают, что в случае образования пенистого огнезащитного слоя теплопередача в сторону подложки уменьшается до 100 раз.

Нанесение огнезащитных составов проводится исключительно в условиях завершенного строительства.

Задача огнезащитного герметика в составе теплоизолирующей заделки шва – локализация распространения открытого пламени в случае возникновения пожара и воспрепятствование продымлению помещения за счет образования «пенококсового барьера».

Очевидно, что чем выше огнезащитные свойства герметика, тем дольше защищаемые конструкции и элементы зданий будут способны сопротивляться неблагоприятным факторам пожара.

Предел огнестойкости строительных конструкций устанавливается по времени (в минутах) наступления одного или последовательно нескольких, нормируемых для данной конструкции, признаков предельных состояний:

- потери несущей способности (R);
- потери целостности (E);
- потери теплоизолирующей способности (I) [5].

Стандартный температурный режим пожара используется для экспериментального определения предела огнестойкости строительных конструкций по ГОСТ 30247.0 и ГОСТ 30247.1 [25, 26]. Следует отметить, что отечественные методы количественной оценки предела огнестойкости строительных конструкций в печных устройствах и реализации температурно-временного режима пожара подобны стандартам ISO 834 и ASTM E-119 [27, 28].

На основании анализа литературы и патентных описаний рецептур [7–19] была разработана базовая рецептура огнезащитного герметика вспучивающегося типа (табл. 1). В его состав вошли обязательные [8–10] ингредиенты интумесцентных композиций, такие как меламин, пентаэритрит, полифосфат аммония, а также фторированный углерод (степень фторирования – 50 %), содержащий до 2 % фторированных фуллеренов производства ООО «Фактория ЛС». Фуллеренсодержащие сажи, как стало относительно недавно известно [23, 29–33], способны повышать огнезащитную эффективность интумесцентных материалов. Фторированный углерод повышает гидрофобность пленки герметика, а также препятствует образованию плесени.

Таблица 1. Базовая рецептура огнезащитного герметика

Компоненты	Содержание, % (масс.)
Пентаэритрит	11,0
Меламин	10,0
Микротальк	7,5
Вода	21,6
Полифосфат аммония	26,5
Акриловое связующее	20,6
Пластификатор	2,0
Фторированный углерод	0,8
Итого:	100

В соответствии с базовой рецептурой были изготовлены образцы огнезащитных вспучивающихся материалов, отличающиеся связующим полимером. Предварительную сравнительную оценку композиций осуществляли полуколичественными лабораторными методами. Так, например, интумесцентные свойства исследовали с помощью коэффициента вспучивания – показателя, который определяют путем термодеструкции покрытия, нанесенного толщиной в 1 мм на металлическую пластину [13]. Вспучивание покрытия проводят в муфельной печи с выдержкой образца при температуре 600 °С в течение 5 мин. Коэффициент вспучивания $К_{вс}$ определяют как отношение толщины интумесцентного слоя $h_{вс}$ к исходному слою покрытия h_0:

$$K_{вс} = h_{вс} / h_0 .$$

По совокупности огнезащитных и технологических характеристик из испытанных образцов нами был отобран интумесцентный состав, где в качестве связующего использовалась водная дисперсия сополимера винилацетата с винилверсататом.

Образец полученного герметика был подвергнут стандартизированным теплофизическим испытаниям на соответствие требованиям «Технического регламента о требованиях пожарной безопасности» (ФЗ №123 от 22.07.2008 г.) в составе гидротермоизолирующего узла для заделки деформационных швов между бетонными элементами, подверженных деформации до 10 % [5]. Конструкция образца испытуемого гидротермоизолирующего узла представляла собой систему, выполненную в бетонном фрагменте размером 400x100 мм и глубиной 180 мм. Пространство в проеме на глубину 15 мм было заполнено огнезащитным герметиком, затем плитой минераловатной на глубину 150 мм и вновь огнезащитным герметиком на глубину 15 мм (рис. 1).

Данная конструкция при испытаниях продемонстрировала удовлетворительную, но недостаточную огнезащитную эффективность – 164 минуты до наступления предельного состояния образца, кроме того, было рекомендовано уменьшить дымообразующую способность герметика.

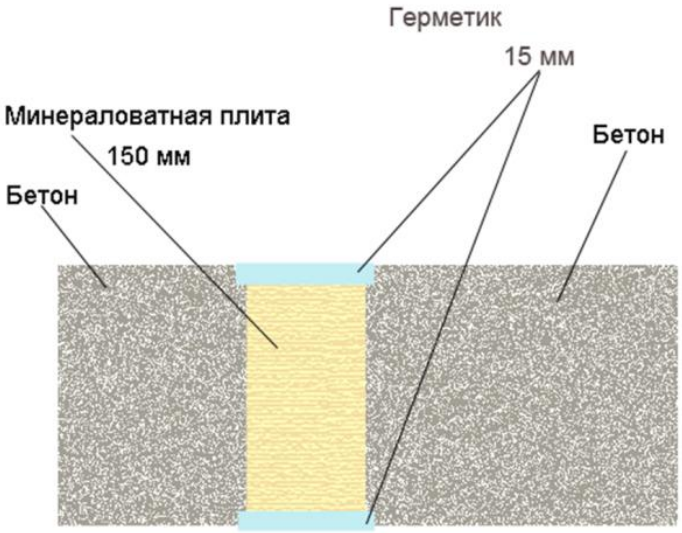


Рисунок 1. Конструкция испытуемого образца

Для улучшения огнезащитных показателей в состав композиции ввели 14 % (масс.) гидроксида алюминия.

Огнезащитная эффективность узла увеличилась до 174 минут, а дымообразующая способность герметика существенно снизилась. Для достижения требуемых 180 минут было решено ввести в состав огнезащитной композиции полые стеклянные микросферы (рис. 2) в количестве 1 % (масс.) (табл. 2). В результате последующих испытаний предельное состояние испытуемой конструкции было достигнуто через 182 минуты.

Таблица 2. Окончательная рецептура огнезащитного герметика

Компоненты	Содержание, % (масс.)
Пентаэритрит	8,0
Меламин	7,0
Микротальк	4,0
Вода	20,6
Полифосфат аммония	21,0
Гидроксид алюминия	14,0
Стеклянные микросферы	1,0
Связующее	20,6
Пластификатор	2,0
Фторированный углерод	0,8
Итого:	100

На разработанный огнезащитный герметик получен сертификат пожарной безопасности НСОПБ.RU.ПР.059.Н.00123. Подана заявка на получение патента. Разработанный материал также может быть использован:

- для герметизации закрытых и дренированных стыков наружных стен или противопожарных элементов, соединений между усиленными элементами из бетона и кирпича;
- локального уплотнения различного типа полостей, имеющих заданный предел огнестойкости;
- уплотнения швов при прокладке металлических труб;
- огне-, дымозащитных уплотнений кабелей в трубах небольшого диаметра и входов кабелей в распределительные коробки;
- уплотнения мест примыкания оконных и дверных блоков к элементам стен.

Налажен промышленный выпуск герметика в соответствии с ТУ 5772-004-52158071-2014.

Литература

1. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациями ликвидации последствий стихийных бедствий [Электронный ресурс] // Статистика пожаров за 2013 г. URL: http://www.mchs.gov.ru/stats/Pozhari/2013_god
2. Загоруйко Т.В., Перцев В.Т., Власов В.В. Разработка композиционных термостойких материалов для повышения огнестойкости железобетонных конструкций // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2012. №2. С. 62.
3. Собурь С.В. Пожарная безопасность общественных и жилых зданий: Справочник. 4-е изд., перераб. М.: ПожКнига, 2012. 160 с.
4. СНиП 21-21-97*. «Пожарная безопасность зданий и сооружений». СПб., 2007. 47 с.
5. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федеральный закон №123-ФЗ. М.: Проспект, 2009. 144 с.
6. Собурь С.В. Огнезащита материалов и конструкций: Справочник – 3-е изд., доп. (с изм.). М.: Пожнаука, 2004. С. 74.
7. Антонов А.В., Решетников И.С., Халтуринский Н.А. Горение коксообразующих полимерных систем // Успехи химии. 1999. Т. 68(7). С. 668.
8. Машляковский Л.Н., Лыков А.Д., Репкин В.Ю. Органические покрытия пониженной горючести. Л.: Химия, 1989. 182 с.

9. Ненахов С.А., Пименова В.П. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т.19. №8. С. 12.
10. Бабкин О.Э., Зыбина О.А., Танклевский Л.Т., Мнацаканов С.С. О механизме формирования пенококса при термолизе огнезащитных интумесцентных покрытий // Промышленные покогнезащитнырытия. 2014. №5–6. С.70–72.
11. Зыбина О.А., Варламов А.В., Чернова Н.С., Мнацаканов С.С. О роли и превращениях компонентов огнезащитных вспучивающихся лакокрасочных композиций в процессе термолиза // Журнал прикладной химии. 2009. Т.82. №4. С. 1445–1449.
12. Ненахов С.А., Пименова В.П. Экспериментальное изучение влияния толщины вспенивающихся покрытий на огнезащитную эффективность // Пожаровзрывобезопасность.2011.Т.20. №5. С. 2–9.
13. Ненахов С.А., Пименова В.П. Динамика вспенивания огнезащитных покрытий на основе органо-неорганических составов // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т.20. №8. С. 17–24.
14. Халтуринский Н.А., Крупкин В.Г. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Вып. 20. №10. С. 33–36.
15. Zybina O.A., Varlamov A.V., Chernova N.S., Mnatsakanov S.S. On the role and transformations of components of intumescent fire-retardant paint-and-varnish formulations in the course of thermolysis // Russian Journal of Applied Chemistry. 2009. Vol. 82. №9. Pp. 1542–1546.
16. Zav'yalov D.E., Zybina O.A., Chernova N.S., Varlamov A.V., Mnatsakanov S.S. Fire Intumescent compositions Based on the In-tercalated Graphite // Russian Journal of Applied Chemistry. 2010. Vol. 83. No.9. Pp. 1679-1682.
17. Le Bras M., Camino G., Bourbigot S., Delobel R. Fire Retardancy of Polymers. The Use of Intumescence. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1998. 466 p.
18. Lyons J.W. The Chemistry and Uses of Fire Retardants. NewYork: J. Wiley Intersci., 1970. 462 p.
19. Proceedings of the 3rd Meeting on Fire Retardant Polymers. (Abstracts of Reports). Torino, 1989. 178 p.
20. Sellman R. Fire protection - The passive ingredient // Building Engineer. 2005. Vol. 80(6). Pp. 20–21.
21. Steffen S., Bauer M., Decker D., Richter F. Fire-retardant hybrid thermosetting resins from unsaturated polyesters and polysilazanes // Journal of Applied Polymer Science. 2014. Vol. 131(12). 40375.
22. Xiao Y., Zheng Y., Wang X., Chen Z., Xu Z. Preparation of a chitosan-based flame-retardant synergist and its application in flame-retardant polypropylene // Journal of Applied Polymer Science. 2014. Vol. 131(19). 40845.
23. Зыбина О.А., Варламов А.В., Мнацаканов С.С. Проблемы технологии коксообразующих огнезащитных покрытий: монография. Новосибирск: Издательство «СИБПРИНТ», 2010. 49 с.
24. Собурь С.В. Огнезащита материалов и конструкций: Справочник – 3-е изд., доп. (с изм.). М.: Пожнаука, 2004. С. 74.
25. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1996.
26. ГОСТ 30247.1-94. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции. М.: Изд-во стандартов, 1996.
27. ISO 834-75. Elements of building constructions. Fire-resistance test methods. General requirements.
28. ASTM E-119. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials.
29. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физмалит, 2005. 410 с.
30. Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки: Строение, свойства, применения. М.: Бином, 2006. 293 с.
31. Meyyappan M. Carbon nanotubes: science and application. CRC Press, 2005.
32. Gogotsi Y. Carbon nanomaterials. Taylor and Francis Group, 2006.
33. Jorio A., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S. Carbon nanotubes. Advanced topics in the synthesis, structure, properties and applications. Springer, 2008.

Илья Александрович Осипов, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +79112477069; эл. почта: osipov.mr@gmail.com

Ольга Александровна Зыбина, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +79052072479; эл. почта: ozakata@mail.ru

© Осипов И.А., Зыбина О.А., 2014

doi: 10.5862/MCE.52.4

Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания

К.т.н., доцент С.В. Корниенко,
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация. Тепловой режим ограждающих конструкций зданий формируется под действием многих факторов. Сложность этого процесса делает актуальной проблему многофакторной оценки теплового режима.

В данной статье на основе разработанного автором метода многофакторной оценки теплового режима в элементах оболочки здания выполнена оценка теплоизолирующего эффекта от применения композиционного покрытия «керамические микросферы – связующее» в качестве дополнительной тепловой защиты совмещенного невентилируемого покрытия здания.

Показано, что применение композиционного покрытия имеет практически нулевой теплоизолирующий эффект и не обеспечивает нормируемый уровень тепловой защиты ограждающей конструкции в холодный период года. В то же время применение традиционного варианта утепления базовой конструкции минераловатными плитами позволяет повысить теплозащитные свойства конструкции до уровня норм. Такой вариант утепления дает наилучший показатель и по теплоустойчивости, обеспечивая минимальные теплопоступления в теплый период года.

Ключевые слова: тепловая защита зданий; элемент оболочки здания; метод расчета; компьютерная программа; математическое моделирование; композиционное покрытие «керамические микросферы – связующее»

Введение

Тепловая защита зданий является ключевым аспектом проблем энергосбережения и повышения энергоэффективности. При этом оценка теплового режима здания является сложной задачей, так как на него оказывает влияние множество факторов. Так, теплозащитная оболочка здания состоит из элементов, неоднородных по теплофизическим и геометрическим свойствам. Перенос тепла через нее происходит, как правило, по двух- и трехмерной схемам. Теплофизические свойства материалов, составляющих оболочку, зависят от температуры, которая изменяется во времени, подвергаясь значительному воздействию микроклимата помещений и наружного климата. Между окружающей средой и поверхностями оболочки здания происходит сложный теплообмен в виде конвекции и излучения. Например, в теплый период года наружная поверхность здания подвержена действию интенсивного солнечного излучения. Кроме того, в помещениях здания находятся различные источники бытовых теплопоступлений, которые также оказывают существенное влияние на температурный режим здания. Тепловые процессы в оболочке здания могут иметь различную интенсивность.

Сложность процесса переноса тепла через ограждающие конструкции делает актуальной проблему многофакторной оценки теплового режима в элементах оболочки здания. Решению этой проблемы посвящены работы [1–35].

Обзор литературы

В 1960–70 гг. большое развитие получили операционные методы решения уравнения теплопроводности для одно-, двух- и трехмерных температурных полей в неоднородных средах с применением интегральных преобразований [1]. Многочисленные аналитические решения задач данного типа приведены в монографии [2].

Конвективный и лучистый теплообмен в помещении подробно исследован в монографиях [3, 4]. В монографии [5] приведены уравнения для расчета коэффициентов конвективного теплообмена для внутренних поверхностей ограждающих конструкций в случае свободной, вынужденной и смешанной конвекции. Там же дана методика расчета коэффициентов конвективного и лучистого теплообмена для наружных поверхностей ограждающих конструкций.

В 1970–80 гг. получили широкое распространение численные методы расчета температурных полей в неоднородных ограждающих конструкциях с переменными теплофизическими характеристиками – так называемые интегро-интерполяционные методы.

Теоретические основы этих методов для расчета температурных полей изложены в книге [6]. Подробные алгоритмы расчета приведены в книгах [7–9]. В настоящее время расчеты температурных полей осуществляются с помощью специализированных компьютерных программ и программно-вычислительных комплексов [10–19].

Повышению теплозащиты элементов оболочки здания при решении проблемы энергосбережения посвящены статьи [20–35].

Несмотря на большое количество работ, посвященных вопросам энергосбережения в зданиях, актуальность проблемы многофакторной оценки теплового режима в элементах оболочки здания сохраняется. Повышение требований к качеству проектирования тепловой защиты зданий приводит к необходимости дальнейшего уточнения математических моделей теплопереноса на основе более полного учета различных факторов, действующих на оболочку здания, и разработки эффективных компьютерных программ.

Метод исследования

В основу метода многофакторной оценки теплового режима положена математическая модель нестационарного переноса теплоты в трехмерных элементах оболочки здания.

Под элементом оболочки здания понимается совокупность соединенных между собой ограждающих конструкций, представляющая собой часть теплозащитной оболочки здания. В частном случае элемент оболочки может состоять из одной ограждающей конструкции.

Температурное поле в данный момент времени τ определяется распределением температуры t в элементе, т. е. функцией $t = t(x, y, z, \tau)$, где (x, y, z) – декартовы координаты. Тепловой поток направлен из области с более высокой температурой в область с более низкой температурой.

Основное положение теории теплопроводности, известное как закон теплопроводности Фурье, состоит в предположении пропорциональности теплового потока градиенту температуры в однородной неподвижной среде: $q = -\lambda \mathrm{grad} t$, где λ – коэффициент теплопроводности (теплопроводность). Уравнение переноса теплоты может быть получено на основании закона сохранения энергии в виде:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\mathrm{div}\, q + f\ , \tag{1}$$

где c и ρ — соответственно удельная теплоемкость и плотность материала среды; f — удельная мощность внутренних источников теплоты.

Подстановка выражения для потока теплоты в формулу (1) позволяет записать следующее основное дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \mathrm{div}\left(\lambda \mathrm{grad} t\right) + f\ . \tag{2}$$

Коэффициенты и правая часть уравнения теплопроводности могут зависеть от точки пространства (неоднородная среда). В этом случае $c = c(x, y, z)$, $\rho = \rho(x, y, z)$, $\lambda = \lambda(x, y, z)$, $f = f(x, y, z)$, а само уравнение теплопроводности является линейным параболическим уравнением второго порядка.

Если теплофизические свойства среды зависят от температуры ($c = c(t)$, $\rho = \rho(t)$, $\lambda = \lambda(t)$, $f = f(t)$), то уравнение (2) является квазилинейным уравнением теплопроводности.

Уравнение теплопроводности в прямоугольной декартовой системе координат (x, y, z) получается на основе приведенной инвариантной записи (уравнение (2) с учетом того, что

$$\mathrm{grad} = \left\{\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right\}, \quad \mathrm{div}\,\mathbf{q} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\ .$$

Отсюда следует, что уравнение (2) можно записать следующим образом:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\right) + f\ . \tag{3}$$

Для однозначного определения температурного поля $t(x, y, z, \tau)$ необходимо сформулировать дополнительные соотношения (краевые условия).

Обычно считается, что температурное поле задано в начальный момент времени, т. е.

$$t(x, y, z, 0) = t_0(x, y, z). \quad (4)$$

Теплообмен между поверхностью тела и окружающей средой, имеющей температуру t_a, описывается граничными условиями третьего рода:

$$\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right) + \alpha(-t_a) + q_{sur} = 0, \quad (5)$$

где через $\partial/\partial n$ обозначена внешняя по отношению к рассматриваемой области нормаль; α – коэффициент теплообмена; q_{sur} – тепловой поток на поверхности рассматриваемого тела.

На границах материалов с различными теплофизическими характеристиками необходимо задать условия сопряжения, отражающие непрерывность температуры и теплового потока в виде:

$$[t] = 0, \quad (6)$$

$$\left[\lambda\frac{\partial t}{\partial n}\right] = 0, \quad (7)$$

где в квадратных скобках обозначен скачок при переходе границы контакта.

Математическая модель (3)–(7) описывает нестационарный процесс переноса теплоты в трехмерных элементах оболочки здания.

На основе указанной математической модели разработан метод многофакторной оценки теплового режима в элементах оболочки здания [35]. При этом учитываются следующие факторы:

- трехмерность температурного поля в ограждающих конструкциях разнообразной геометрической структуры;
- нестационарность теплового режима;
- нелинейность тепловых характеристик строительных материалов, их зависимость от координат и температуры;
- нелинейность тепловых источников в элементах оболочки здания, зависимость их удельной мощности от координат и температуры;
- динамика облучения наружной поверхности оболочки солнечной радиацией;
- динамика облучения внутренней поверхности оболочки тепловыми источниками;
- теплообмен поверхностей оболочки с окружающей средой посредством конвекции и излучения;
- возможность исследования тепловых процессов различной интенсивности;
- возможность расчета температурного поля с заданной точностью.

Математическая модель теплопереноса реализована в компьютерной программе «Нестационарное температурное поле (НТП)» [27]. Программа позволяет производить расчет нестационарного температурного поля в трехмерных элементах оболочки здания. Результаты расчета по программе «НТП» обеспечивают возможность всестороннего анализа теплового режима ограждающих конструкций.

Достоинствами компьютерной программы являются:

- расчет температурного поля ограждающих конструкций разнообразной геометрической структуры;
- возможность задания неравномерной пространственно-временной сетки для оптимизации вычислительного процесса;
- автоматический выбор временного шага, обеспечивающий заданную точность вычислений;
- удобный пользовательский интерфейс;
- применимость программы для исследования нестационарных тепловых процессов различной интенсивности.

Принципиальная блок-схема компьютерной программы «НТП» представлена на рисунке 1.

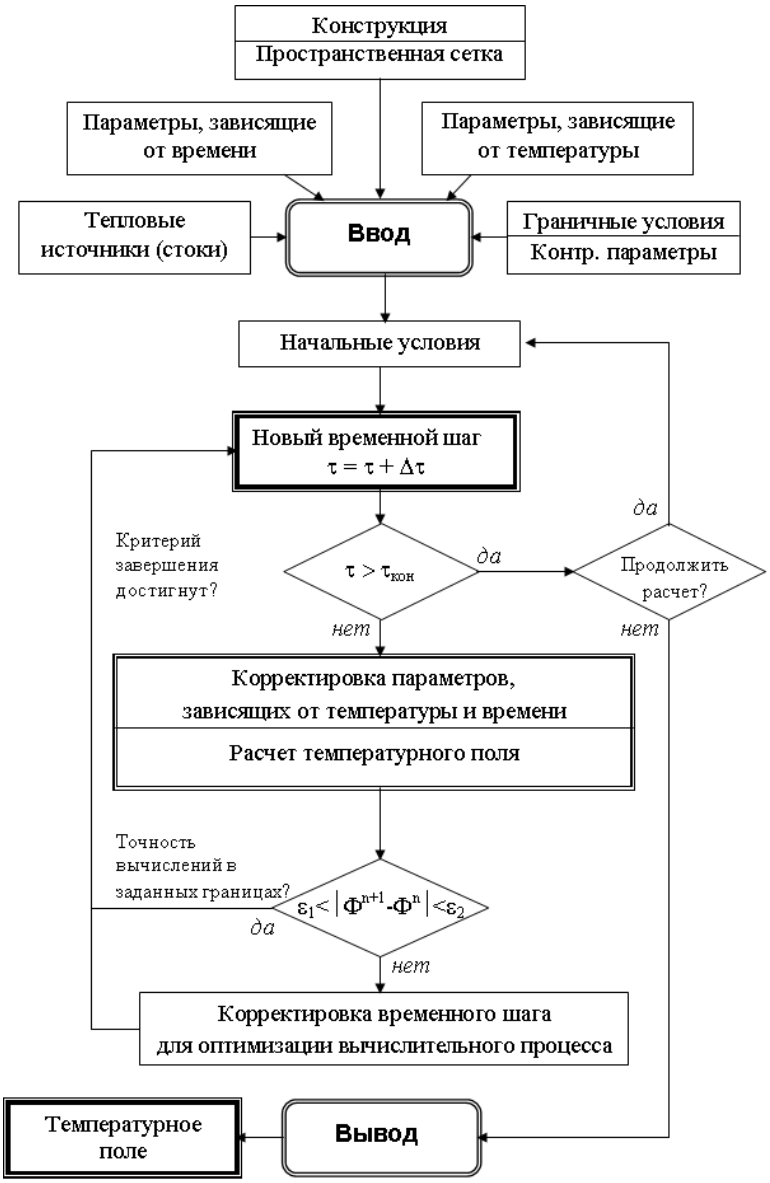


Рисунок 1. Блок-схема компьютерной программы «НТП»

Результатом расчета по программе «НТП» является температурное поле элемента оболочки здания в заданный момент времени.

Компьютерная программа «НТП» включена в программно-вычислительный комплекс «Энергоэффективность и тепловая защита зданий» [13], имеет государственную регистрацию в Российской Федерации и была использована при проектировании ряда объектов жилищно-гражданского назначения.

Постановка задачи

Разработанный метод использован для многофакторной оценки элемента оболочки в виде совмещенного невентилируемого покрытия эксплуатируемого общественного здания в г. Волгограде. Указанная конструкция состоит из железобетонных многопустотных плит толщиной 220 мм и оштукатурена с внутренней стороны цементно-песчаным раствором толщиной 20 мм. В качестве утеплителя использован слой керамзитового гравия толщиной 160–180 мм. Между утеплителем и плитами покрытия расположен пароизоляционный слой из пергамина толщиной 2 мм. По теплоизоляционному слою предусмотрена стяжка из цементно-песчаного раствора толщиной 50 мм. По стяжке располагается слой гидроизоляции из рубероида толщиной 3 мм. Схема ограждающей конструкции по базовому варианту, согласно проектному решению, приведена на рисунке 2, слева (вариант 1).

Для дополнительной теплозащиты конструкции рассмотрен вариант (рис. 2, в центре) с применением композиционного покрытия «керамические микросферы – связующее» по гидроизоляционному слою (вариант 2). Применение композиционного покрытия широко рекламируется производителем для повышения теплозащиты ограждающих конструкций. Композиционное покрытие, по данным производителя, состоит из полых либо сплошных керамических (или стеклянных) микросфер с характерным размером порядка 10…50 мкм, перемешанных с акриловой краской. После высыхания оно состоит из нескольких рядов микросфер, связанных тонкой акриловой пленкой.

Для оценки теплоизолирующего эффекта композиционного покрытия рассмотрен также широко применяемый на практике вариант конструкции (рис. 2, справа) с дополнительным утеплением базовой конструкции жесткими минераловатными плитами толщиной 80 мм (2×40 мм) и с гидроизоляционным слоем по утеплителю (вариант 3).

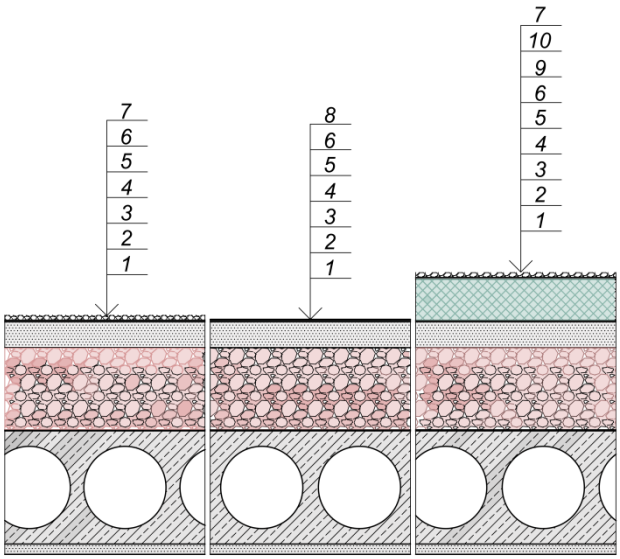


Рисунок 2. Схема ограждающей конструкции: 1 – штукатурка; 2 – железобетонная плита; 3 – пароизоляция; 4 – теплоизоляция; 5 – стяжка; 6 – гидроизоляция; 7 – защитный слой; 8 – композиционное покрытие «керамические микросферы – связующее»; 9 – теплоизоляция (дополнительный слой); 10 – гидроизоляция (дополнительный слой)

В расчете использованы теплофизические характеристики строительных материалов, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные теплофизические характеристики строительных материалов ограждающей конструкции

Материал слоя конструкции	Плотность материала ρ, кг/м^3	Удельная теплоемкость c, кДж/(кг·°С)	Теплопроводность λ, Вт/(м·°С)
Цементно-песчаный раствор	1800	0,84	0,76
Железобетон	2500	0,84	1,92
Пергамин	600	1,68	0,17
Гравий керамзитовый	500	0,84	0,15
Рубероид	1400	1,68	0,27
Минераловатные плиты	180	0,84	0,045
Композиционное покрытие TC Ceramic (при 23 °С)		1,112	0,097

Указанные в таблице 1 расчетные теплофизические характеристики строительных материалов взяты из справочного приложения Т СП 50.13330.2012 и из сертифицированных данных производителя композиционного покрытия.

Оценка теплового режима ограждающей конструкции выполнена на основании результатов математического моделирования теплового режима по компьютерной программе «НТП» с учетом действующих нормативных документов.

Математическое моделирование теплового режима покрытия

Тепловой режим конструкции в холодный период года

Оценка теплозащитных свойств указанной конструкции наиболее точно может быть выполнена на основе приведенного сопротивления теплопередаче по результатам расчета температурных полей.

Математическое моделирование теплового режима конструкции в холодный период года выполнено при следующих граничных условиях:

- расчетная температура внутреннего воздуха t_{int} = 19 °С (табл. 3 ГОСТ 30494–2011);
- расчетная температура наружного воздуха t_{ext} = −22 °С (п. 3.1 СП 131.13330.2012);
- расчетный коэффициент теплообмена у внутренней поверхности α_{si} = 8,7 Вт/(м^2·°С) (СП 50.13330.2012, табл. 4);
- расчетный коэффициент теплообмена у наружной поверхности α_{se} = 23 Вт/(м^2·°С) (СП 50.13330.2012, табл. 6).

Тепловые источники в конструкции отсутствуют. Расчет выполнен при автоматическом выборе временного шага, обеспечивающем заданную точность вычислений, до установления стационарного теплового режима конструкции. Результатом расчета является температурное поле конструкции.

По температурному полю определяется средняя температура на внутренней поверхности конструкции t_{si}^{av} и вычисляется средняя плотность теплового потока через конструкцию q_{av} по формуле:

$$q_{av} = \alpha_{si}\left(t_{int} - t_{si}^{av}\right).$$

Расчетное приведенное сопротивление теплопередаче конструкции R_{tot} определяется по формуле:

$$R_{tot} = \frac{t_{int} - t_{ext}}{q_{av}}.$$

Результаты расчета теплового режима конструкции в холодный период года, полученные на основании температурного поля, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета теплового режима конструкции в холодный период года

Наименование показателя	Обозначение, ед. изм.	Значения показателя для вариантов конструкции		
		1	2	3
Температура на внутренней поверхности:				
минимальная (в зоне ребер плиты)	t_{si}^{min}, °С	15,28	15,3	17,16
максимальная (в зоне пустот плиты)	t_{si}^{max}, °С	16,09	16,12	17,64
средняя	t_{si}^{av}, °С	15,9	15,9	17,5
Средняя плотность теплового потока	q_{av}, Вт/м^2	27,1	26,9	12,9
Расчетное приведенное сопротивление теплопередаче	R_{tot}, м^2·°С/Вт	1,51	1,52	3,17

Анализ данных таблицы 2 показывает, что применение композиционного покрытия «керамические микросферы – связующее» в холодный период года имеет нулевой теплоизолирующий эффект, практически не меняя температурное поле, потери теплоты и теплозащитные свойства конструкции. Как и в базовом варианте, уровень теплозащиты конструкции ниже нормируемого (R_{req} = 3,1 м^2·°С/Вт). Применение варианта утепления базовой конструкции минераловатными плитами позволяет повысить теплозащитные свойства конструкции в холодный период года до уровня норм.

Результаты численного моделирования подтверждаются данными теоретических исследований на основе математической модели для расчета теплозащитных свойств композиционного покрытия, результатами экспериментальных исследований, полученных в климатической камере, и результатами натурных наблюдений [34]. При определенных условиях теплоизоляционный эффект от применения композиционного покрытия может отсутствовать или даже инвертироваться, т. е. наличие покрытия способно приводить к возрастанию теплового потока с поверхности [34].

Тепловой режим конструкции в теплый период года

Математическое моделирование нестационарного теплового режима конструкции в теплый период года выполнено при следующих граничных условиях:

- расчетная температура внутреннего воздуха t_{int} = 24 °С (таблица 3 ГОСТ 30494–2011);
- температура наружного воздуха $t_{ext}(\tau)$ принята по данным измерений (табл. 3);
- плотность теплового потока от солнечного излучения $q_r(\tau)$ на горизонтальную поверхность принята по обобщенным данным многолетних натурных измерений (табл. 4);
- расчетный коэффициент теплообмена у внутренней поверхности α_{si} = 8,7 Вт/(м^2·°С) (СП 50.13330.2012, табл. 4);
- расчетный коэффициент теплообмена у наружной поверхности α_{se} = 32,2 Вт/(м^2·°С) вычислен по формуле (6.9) СП 50.13330.2012 при средней скорости ветра в июле 5,2 м/с (согласно п. 4.1 СП 131.13330.2012).

Таблица 3. Температура наружного воздуха $t_{ext}(\tau)$ в июле

Часы суток до полудня	Температура, °С	Часы суток после полудня	Температура, °С
1	22,9	13	33
2	24	14	32,8
3	25,2	15	32,5
4	26,4	16	30,2
5	27,5	17	27,9
6	28,7	18	25,6
7	29,9	19	24,1
8	31,1	20	22,7
9	32,3	21	21,2
10	32,6	22	21,4
11	33	23	21,5
12	33,3	24	21,7

Таблица 4. Плотность теплового потока $q_r(\tau)$ на горизонтальную поверхность от солнечного излучения в июле

Часы суток до полудня	Плотность теплового потока, Вт/м^2	Часы суток после полудня	Плотность теплового потока, Вт/м^2
0–1	—	12–13	865
1–2	—	13–14	814
2–3	—	14–15	719
3–4	—	15–16	607
4–5	29	16–17	455
5–6	146	17–18	293
6–7	293	18–19	146
7–8	455	19–20	29
8–9	607	20–21	—
9–10	719	21–22	—
10–11	814	22–23	—
11–12	865	23–24	—

Начальная температура конструкции 24 °С. Коэффициенты поглощения солнечной радиации материалами конструкции приняты по вариантам расчета: 1 – 0,9; 2 – 0,17 (по данным производителя); 3 – 0,65. Тепловые источники в конструкции отсутствуют. Расчет выполнен при автоматическом выборе временного шага с заданной точностью вычислений.

Статистическая обработка климатических данных (табл. 3 и 4) выполнена методом наименьших квадратов конечными рядами Фурье. Установлено, что зависимость температуры наружного воздуха от времени $U_t(\tau)$ имеет следующий вид:

$$U_t(\tau) = \frac{a_0}{2} + \sum_{l=1}^{2} \left[a_l \cos(\omega_l \tau) + b_l \sin(\omega_l \tau) \right], \quad (8)$$

где a_0 = 55,116; a_l, b_l — коэффициенты Фурье (a_1 = −5,884, b_1 = 1,379; a_2 = 0,138, b_2 = 0,871); ω_l – круговая частота l-й гармоники ($\omega_1 = \pi/12$, $\omega_2 = \pi/6$).

Максимальная относительная ошибка на узлах равна 1,7 %.

График $U_t(\tau)$, построенный на основании формулы (8), приведен на рисунке 3. Маркерами показаны результаты измерений (см. табл. 3).

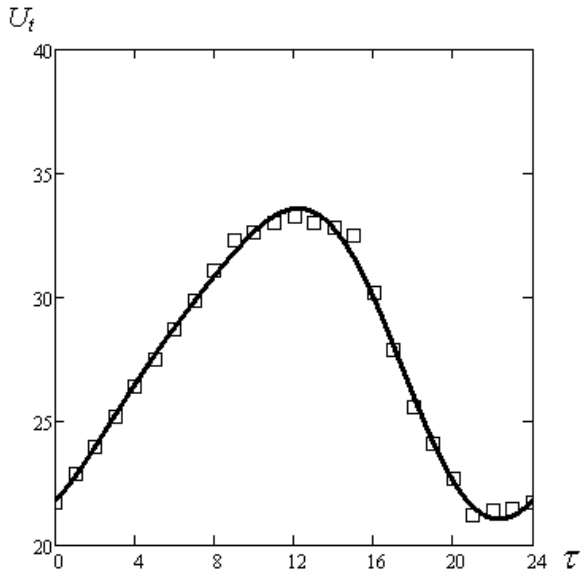


Рисунок 3. График зависимости температуры наружного воздуха от времени (U_t, °С; τ, ч)

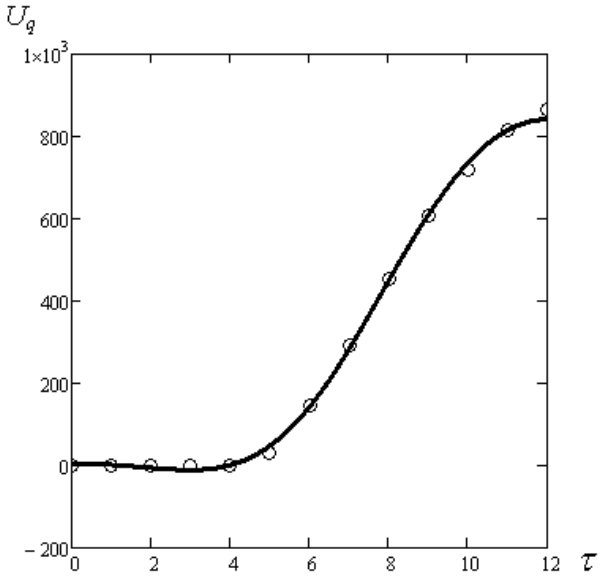


Рисунок 4. График зависимости плотности теплового потока от времени (U_q, Вт/м²; τ, ч (до полудня))

Аналогично определяется зависимость плотности теплового потока от времени $U_q(\tau)$:

$$U_q(\tau) = \frac{a_0}{2} + \sum_{l=1}^{4} \left[a_l \cos(\omega_l \tau) + b_l \sin(\omega_l \tau) \right], \quad (9)$$

где a_0 = 582,168; a_1 = −428,162, $b_1 = 2{,}989 \cdot 10^{-7}$; a_2 = 140,348, $b_2 = -6{,}982 \cdot 10^{-8}$; a_3 = 10,052, $b_3 = -1{,}559 \cdot 10^{-7}$; a_4 = −8,332, $b_4 = 1{,}024 \cdot 10^{-7}$; $\omega_1 = \pi/12$, $\omega_2 = \pi/6$, $\omega_3 = \pi/4$, $\omega_4 = \pi/3$.

Максимальная относительная ошибка на узлах равна 2,4 %.

График $U_q(\tau)$, построенный на основании формулы (9), приведен на рисунке 4. Маркерами показаны результаты измерений (см. табл. 4).

Полученные данные использованы в расчете температурного поля конструкции.

Результаты расчета показывают, что для всех вариантов конструкции периодический тепловой режим, соответствующий указанным выше граничным условиям, отмечается примерно спустя 5 суток от начала расчета.

Графики зависимости температуры от времени в различных сечениях конструкции, построенные на основании обработки расчетных данных кубическими сплайн-функциями, приведены на рисунках 5–7.

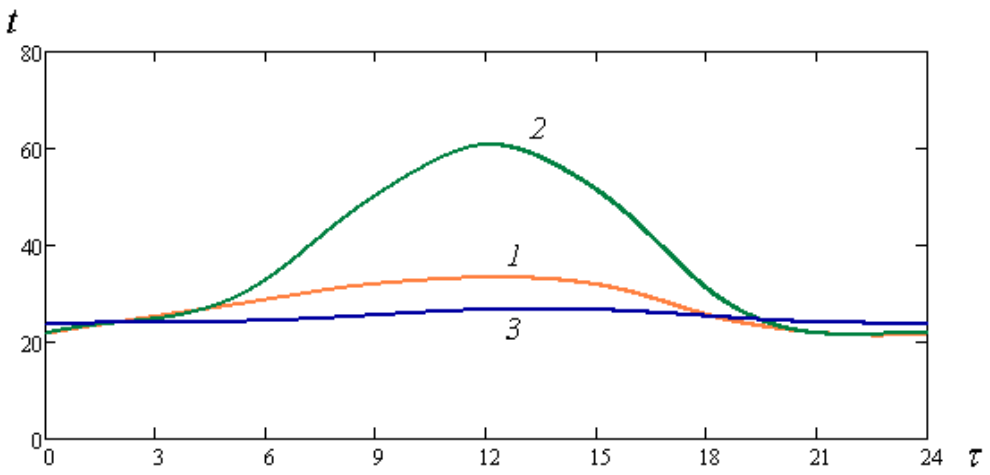


Рисунок 5. График зависимости температуры от времени по первому варианту (*t*, °С; *τ*, ч): 1 – наружный воздух; 2 – наружная поверхность; 3 – внутренняя поверхность

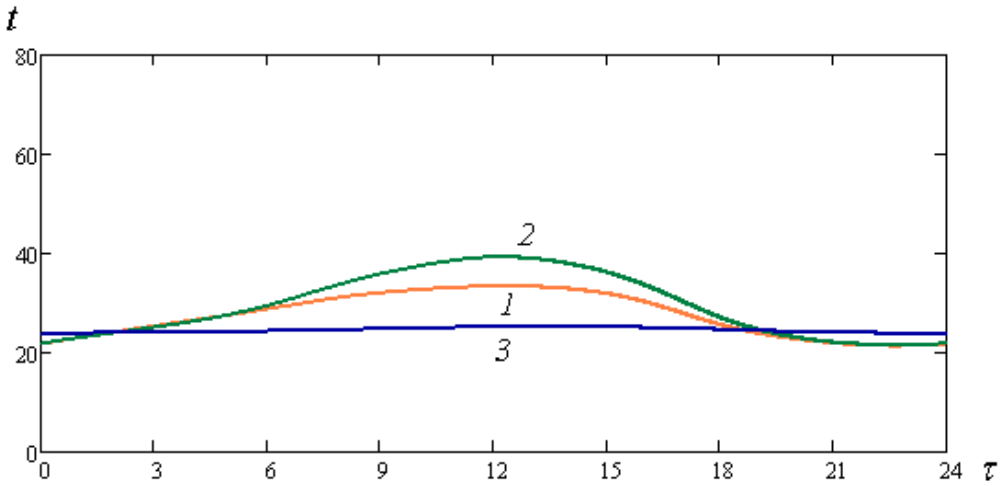


Рисунок 6. График зависимости температуры от времени по второму варианту (*t*, °С; *τ*, ч): 1 – наружный воздух; 2 – наружная поверхность; 3 – внутренняя поверхность

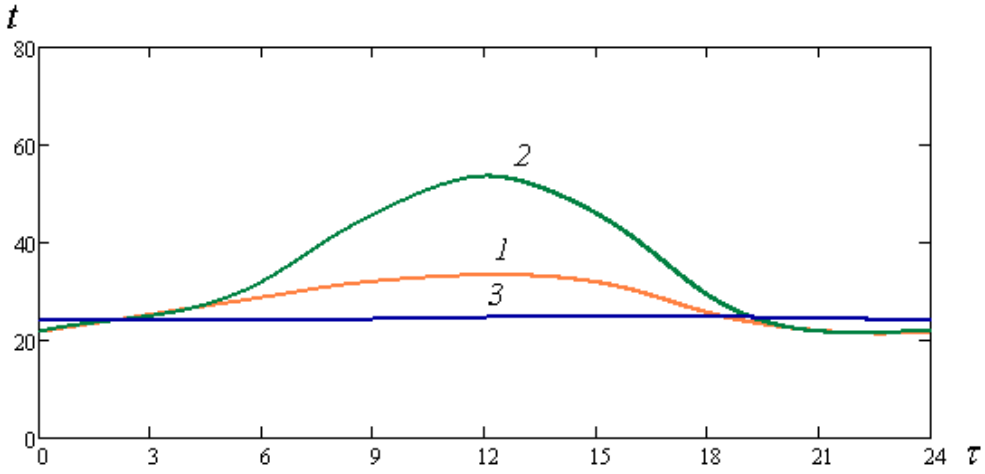


Рисунок 7. График зависимости температуры от времени по третьему варианту (*t*, °С; *τ*, ч): 1 – наружный воздух; 2 – наружная поверхность; 3 – внутренняя поверхность

Расчетом установлено, что максимум температуры на наружной поверхности конструкции практически совпадает по времени с максимумом температуры наружного воздуха (рис. 5–7).

Для базового варианта конструкции (рис. 5) максимальная температура на наружной поверхности равна 60,8 °С, на внутренней поверхности – 26,8 °С, запаздывание температурного колебания составляет 2 ч.

Для варианта с применением композиционного покрытия «керамические микросферы – связующее» максимальная температура на наружной поверхности равна 39,18 °С, на внутренней поверхности – 25,16 °С, запаздывание температурного колебания составляет 2 ч (рис. 6). Резкое снижение температуры на наружной поверхности конструкции объясняется низкой поглощательной способностью солнечного излучения композиционного покрытия.

При использовании дополнительного утепления базовой конструкции жесткими минераловатными плитами максимальная температура на наружной поверхности равна 53,5 °С, на внутренней поверхности – 24,9 °С, запаздывание температурного колебания составляет 4 ч (рис. 7). Таким образом, применение дополнительного утепления базовой конструкции минераловатными плитами приводит к большему снижению температуры на внутренней поверхности конструкции и запаздыванию температурного колебания, что повышает тепловой комфорт в помещении.

Среднесуточная температура на наружной поверхности конструкции t_{se}^{av} определяется по формуле:

$$t_{se}^{av} = \frac{1}{24}\int_0^{24} t_{se}(\zeta)\,d\zeta .$$

Среднесуточная температура на внутренней поверхности конструкции t_{si}^{av} определяется по формуле:

$$t_{si}^{av} = \frac{1}{24}\int_0^{24} t_{si}(\zeta)\,d\zeta .$$

Амплитуда колебаний температуры на наружной поверхности конструкции A_{se} определяется по формуле:

$$A_{se} = t_{se}^{\max} - t_{se}^{av},$$

где t_{se}^{max} – максимальная температура на наружной поверхности конструкции.

Амплитуда колебаний температуры на внутренней поверхности конструкции A_{si} определяется по формуле:

$$A_{si} = t_{si}^{\max} - t_{si}^{av},$$

где t_{si}^{max} – максимальная температура на внутренней поверхности конструкции.

Показатель затухания колебаний температуры в конструкции ν определяется по формуле:

$$\nu = \frac{A_{se}}{A_{si}} .$$

Плотность теплового потока $q_{si}(\tau)$, поступающего в помещение, определяется по формуле:

$$q_{si}(\tau) = \alpha_{si}(t_{int} - t_{si}(\tau)).$$

Суммарное количество теплоты, поступающее в помещение за сутки, определяется по формуле:

$$q_{sum} = \int_0^{24} q_{si}(\zeta)\,d\zeta .$$

Результаты расчета теплового режима конструкции в теплый период года, полученные на основании температурного поля, приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты расчета теплового режима конструкции в теплый период года

Наименование показателя	Обозначение, ед. изм.	Значения показателя для вариантов конструкции		
		1	2	3
Температура на наружной поверхности:				
максимальная	t_{se}^{max}, °C	60,8	39,18	53,5
средняя	t_{se}^{av}, °C	37	29,6	34,4
Температура на внутренней поверхности:				
максимальная	t_{si}^{max}, °C	26,8	25,16	24,9
средняя	t_{si}^{av}, °C	25,1	24,4	24,4
Запаздывание температурных колебаний	ε, ч	2	2	4
Амплитуда колебаний температуры:				
на наружной поверхности	A_{se}, °C	23,8	9,6	19,1
на внутренней поверхности	A_{si}, °C	1,75	0,71	0,51
Показатель затухания колебаний температуры в конструкции	ν	13,7	13,5	37,6
Суммарное количество теплоты, поступающее в помещение за сутки	q_{sum}, Вт·ч/(м^2·сут)	225	99,6	82,1

Согласно СП 50.13330.2012 оценка ограждающих конструкций на теплоустойчивость производится по амплитуде колебаний температуры на внутренней поверхности. Критерием теплоустойчивости конструкции является выполнение следующего условия:

$$A_{si}^{des} \le A_{si}^{req},$$

где A_{si}^{des}, A_{si}^{req} – соответственно расчетная и нормируемая амплитуда колебаний температуры на внутренней поверхности конструкции.

Согласно п. 6.1 СП 50.13330.2012 нормируемая амплитуда колебаний температуры на внутренней поверхности ограждающих конструкций равна 2,21 °C при расчетной температуре наружного воздуха в теплый период года, равной 23,9 °C (СП 131.13330.2012). Сравнивая расчетные значения амплитуды колебаний температуры на внутренней поверхности (табл. 5) с нормируемым значением, можно отметить, что все рассмотренные варианты конструкции отвечают нормативному требованию по теплоустойчивости. Наилучший показатель по теплоустойчивости имеет конструкция с дополнительным утеплением минераловатными плитами. Сравнивая указанные варианты конструкций по суммарному количеству теплоты, поступающему в помещение за сутки, можно отметить, что вариант 3 (при прочих равных условиях) обеспечивает минимальные теплопоступления в теплый период года.

Заключение

На основе разработанного автором метода многофакторной оценки теплового режима в элементах оболочки здания выполнена оценка теплоизолирующего эффекта от применения композиционного покрытия «керамические микросферы – связующее» в качестве дополнительной тепловой защиты совмещенного невентилируемого покрытия здания. Показано, что применение композиционного покрытия имеет практически нулевой теплоизолирующий эффект и не обеспечивает нормируемый уровень тепловой защиты ограждающей конструкции в холодный период года. В то же время применение традиционного варианта утепления базовой конструкции минераловатными плитами позволяет повысить теплозащитные свойства конструкции до уровня норм. Такой вариант утепления дает наилучший показатель и по теплоустойчивости, обеспечивая минимальные теплопоступления в теплый период года.

Литература

1. Luikov A.V., Shashkov A.G., Vasiliev L.L., Fraiman Yu.E. Thermal conductivity of porous systems // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1968. Vol. 11. Issue 2. Pp. 117–140.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
3. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. М.–Л.: Государственное энергетическое издательство, 1961. 681 с.
4. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 296 с.
5. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. 248 с.
6. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Либроком, 2009. 784 с.
7. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.
8. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 312 с.
9. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983. 512 с.
10. Matrosov Yu.A., Butovsky I.N., Childs K.V. Results of comparing solutions of calculation problems of enclosing structures with thermal bridges by Soviet and American methods // Energy and Buildings. 1990. Vol. 14. Issue 4. Pp. 303–311.
11. Opitz M.W., Norford L.K., Matrosov Yu.A., Butovsky I.N. Energy consumption and conservation in the Russian apartment building stock // Energy and Buildings. 1997. Vol. 25. Issue 1. Pp. 75–92.
12. Соловьев А.К., Туснина О.А. Сравнительный теплотехнический расчет систем верхнего естественного освещения (зенитные фонари и полые трубчатые световоды) // Инженерно-строительный журнал. 2014. №2(46). С. 24–35.
13. Корниенко С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет снижения теплопотерь через краевые зоны ограждающих конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2010. №3. С. 348–351.
14. Туснина О.А., Емельянов А.А., Туснина В.М. Теплотехнические свойства различных конструктивных систем навесных вентилируемых фасадов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №8(43). С. 54–63.
15. Blocken B., Defraeye T., Derome D., Carmeliet J. High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building // Building and Environment. 2009. Vol. 44. Issue 12. Pp. 2396–2412.
16. Luo C., Moghtaderi B., Page A. Modelling of wall heat transfer using modified conduction transfer function, finite volume and complex Fourier analysis methods // Energy and Buildings. 2010. Vol. 42. Issue 5. Pp. 605–617.
17. Chen D. Dynamic three-dimensional heat transfer calculation for uninsulated slab-on-ground constructions // Energy and Buildings. 2013. Vol. 60. Pp. 420–428.
18. Корниенко С.В. Тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натурных измерений параметров микроклимата помещений // Инженерно-строительный журнал. 2012. №2(28). С. 18–23.
19. Martinho N., Lopes A., Gameiro da Silva M. Evaluation of errors on the CFD computation of air flow and heat transfer around the human body // Building and Environment. 2012. Vol. 58. Pp. 58–69.
20. Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании // Инженерно-строительный журнал. 2012. №8(34). С. 4–14.
21. Горшков А.С., Ватин Н.И. Свойства стеновых конструкций из ячеистобетонных изделий автоклавного твердения на полиуретановом клею // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5(40). С. 5–19.
22. Орлович Р.Б., Горшков А.С., Зимин С.С. Применение камней с высокой пустотностью в облицовочном слое многослойных стен // Инженерно-строительный журнал. 2013. №8(43). С. 14–23.
23. Корниенко С.В. Расчетно-экспериментальный контроль энергосбережения зданий // Инженерно-строительный журнал. 2013. №8(43). С. 24–30.

24. Петросова Д.В., Кузьменко Н.М., Петросов Д.В. Экспериментальное исследование теплового режима легкой ограждающей конструкции в натурных условиях // Инженерно-строительный журнал. 2013. №8(43). С. 31–37.

25. Liu Y., Wang D., Liu J. Study on heat transfer process for in-slab heating floor // Building and Environment. 2012. Vol. 54. Pp. 77–85.

26. Simões N., Tadeu A. Transient conduction and convection heat transfer across a multi-layer floor subjected to multiple heat sources // Building and Environment. 2006. Vol. 41. Issue 10. Pp. 1299–1310.

27. Корниенко С.В. Комплексная оценка теплозащиты ограждающих конструкций оболочки здания // Инженерно-строительный журнал. 2012. №7(33). С. 43-49.

28. Brás A., Gonçalves F., Faustino P. Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation // Energy and Buildings. 2014. Vol. 72. Pp. 296–308.

29. Berggren B., Wall M. Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes – Risk of performance failure due to inconsistent use of methodology // Energy and Buildings. 2013. Vol. 65. Pp. 331–339.

30. Ge H., McClung V.R., Zhang S. Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study // Energy and Buildings. 2013. Vol. 60. Pp. 163–173.

31. Mao G., Johannesson G. Dynamic calculation of thermal bridges // Energy and Buildings. 1997. Vol. 26. Issue 3. Pp. 233–240.

32. Martin K., Erkoreka A., Flores I., Odriozola M., Sala J.M. Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Issues 2–3. Pp. 529–535.

33. Tadeu A., Simões I., Simões N., Prata J. Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Issue 12. Pp. 3685–3695.

34. Герман М.Л., Гринчук П.С. Математическая модель для расчета теплозащитных свойств композиционного покрытия «керамические микросферы–связующее» // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75. №6. С. 43–53.

35. Корниенко С.В. Метод решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для ограждающих конструкций зданий // Известия вузов. Строительство. 2006. №2. С. 108–110.

Сергей Валерьевич Корниенко, г. Волгоград, Россия

Тел. моб.: +7(988)4912459; эл. почта: svkorn2009@yandex.ru

© Корниенко С.В., 2014

doi: 10.5862/MCE.52.5

Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков

К.т.н., доцент А.С. Горшков,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
к.ф.-м.н., профессор П.П. Рымкевич,
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского
д.т.н., директор Инженерно-строительного института Н.И. Ватин,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Аннотация. В работе показано влияние растворных швов кладки на сопротивление теплопередаче стен из газобетонных блоков. В связи с тем, что теплопроводность цементных растворов и клеев значительно выше теплопроводности изделий из газобетона, их влияние следует учитывать при проектировании ограждающих конструкций.

В статье представлена таблица коэффициентов теплотехнической однородности кладки стен из газобетонных блоков в зависимости от толщины и теплопроводности растворных швов. Рассмотрено моделирование процессов теплопередачи в стационарных и нестационарных условиях. В случае нестационарного теплообмена рассмотрено влияние швов кладки на теплоустойчивость ограждающей конструкции. Теплоустойчивость характеризуется нормируемой амплитудой колебаний температуры наружного воздуха и величиной затухания расчетной амплитуды колебаний температуры. Рассчитана величина поправки влияния растворных швов на комплексный коэффициент затухания расчетной амплитуды колебаний температуры.

Ключевые слова: автоклавный газобетон; неармированные газобетонные изделия; клей для газобетона; стена мелкоблочная; кладочный раствор; растворные швы кладки; теплопроводность; теплопередача в стационарных условиях

Введение

В настоящее время свойства ячеистого бетона автоклавного твердения достаточно хорошо изучены [1–8], также подробно описаны свойства выпускаемых из автоклавного газобетона стеновых изделий и области их применения [9–13].

Значительное влияние на теплотехнические свойства ограждающих конструкций, выполненных кладкой из газобетонных блоков (рис. 1), оказывают швы кладки [14]. В практике современного строительства встречаются два основных варианта кладки стен из газобетонных блоков: на клею и на растворе. Для категории I блоков (допуск по высоте изделий не превышает ± 1 мм) кладка может выполняться на специальном цементном клею со средней толщиной швов 2 мм, для категории II блоков (допуск по высоте изделий не превышает ± 4 мм) кладка обычно выполняется на цементно-песчаном растворе с толщиной швов 8÷10 мм. Таким образом, во всех случаях кладка выполняется на цементных составах, теплопроводность которых значительно превышает теплопроводность ячеистого бетона. Следовательно, термическое сопротивление ограждающих конструкций из газобетонных блоков должно определяться с учетом влияния швов кладки на теплотехническую однородность стен.

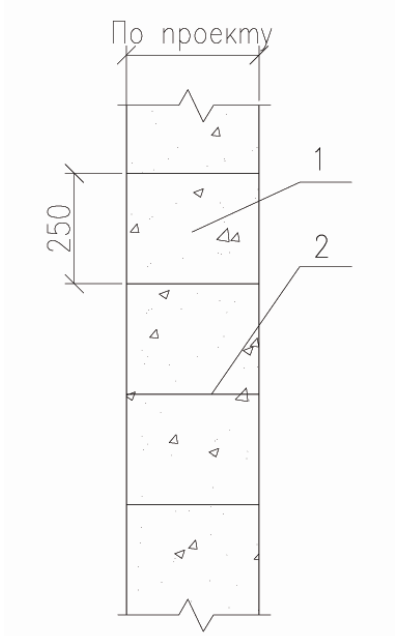


Рисунок 1. Схема кладки из газобетонных блоков толщиной в один блок: 1 – газобетонный блок; 2 – горизонтальный шов кладки

Наличие теплопроводных включений, или так называемых «мостиков холода», в ограждающих конструкциях приводит к дополнительным потерям тепловой энергии при эксплуатации зданий в отопительный период и, как следствие, к дополнительным эксплуатационным расходам [15]. Кроме того, неучет этих факторов может привести к необоснованному занижению проектных значений мощности отопительных приборов. Влияние швов кладки на теплотехническую однородность стеновых конструкций из газобетонных блоков может быть оценено при моделировании процессов теплопередачи в стационарных условиях. Однако реальные условия эксплуатации, нестационарные в силу постоянного изменения параметров наружной среды, накладывают для данной модели определенные ограничения. Эти ограничения могут быть оценены только при моделировании процессов теплопередачи в нестационарных условиях.

Моделирование процессов теплопередачи в стационарных условиях

В стационарном случае для многослойной ограждающей конструкции с однородными слоями или ограждающей конструкции в удалении от теплотехнических неоднородностей сопротивление теплопередаче рассчитывается по формуле:

$$R_o = R_{si} + R_k + R_{se} = R_{si} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{se}, \quad (1)$$

где $R_{si} = 1/\alpha_{int}$, α_{int} – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций [Вт/(м^2·°С)], принимаемый по таблице 7 СНиП 23–02 [16];

$R_{se} = 1/\alpha_{ext}$, α_{ext} – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции для условий холодного периода, Вт/(м^2·°С), принимаемый по таблице 8 СП 23–101 [17];

R_k – термическое сопротивление ограждающей конструкции с последовательно расположенными однородными слоями, (м^2·°С)/Вт;

δ_i – толщина i-го слоя многослойной ограждающей конструкции, м;

λ_i – теплопроводность материала i-го слоя многослойной ограждающей конструкции, Вт/(м·°С), принимаемая для условий эксплуатации «А» или «Б» в зависимости от зоны влажности района проектирования и влажностного режима помещения.

В большинстве случаев при расчете сопротивления теплопередаче по формуле (1) для слоя кладки из газобетонных блоков в качестве λ_i принимаются значения теплопроводности газобетона без учета влияния швов кладки на ее теплотехническую однородность. Это приводит к необоснованному занижению потерь тепловой энергии через ограждающие конструкции.

С целью учета влияния швов кладки на теплотехническую однородность ограждающих конструкций с применением стеновых изделий из автоклавного газобетона рассмотрим регулярный (повторяющийся) фрагмент кладки (рис. 2) и рассчитаем термическое сопротивление рассматриваемых на рисунке 2 фрагментов. Вдали от других теплопроводных включений площадь рассматриваемого регулярного фрагмента не оказывает влияния на результаты расчета.

На рисунке 2 показаны два фрагмента кладки из блоков на клею и на растворе со швами толщиной 2 (рис. 2, а) и 10 мм (рис. 2, б) соответственно. В качестве газобетонных блоков на рисунке 2 приняты стандартные, выпускаемые по ГОСТ 31360 [18] изделия стеновые неармированные из автоклавного газобетона, которые применяются для кладки наружных стен зданий и имеют следующие размеры: высота – ℓ_X = 250 мм, длина – ℓ_y = 625 мм, ширина – ℓ_Z = 375 мм.

В стационарном случае в силу линейности закона изменения температуры в параллельных горизонтальных сечениях кладки (газобетонных блоках и растворных швах) поперечные тепловые потоки между ними отсутствуют. Следовательно, перетоков тепла из одного параллельного сечения кладки в другое не происходит в силу равенства температур в точках, удаленных на одинаковое расстояние от поверхности стеновой конструкции. Тогда, с учетом электротепловой аналогии, общее термическое сопротивление кладки из газобетонных блоков на цементном растворе (клею) может быть рассчитано по формуле:

$$R_k = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{F_i}{R_i}} = \frac{(F_{aac} + F_m)}{\frac{F_{aac}}{R_{aac}} + \frac{F_m}{R_m}} = \frac{R_{aac} \cdot R_m \cdot (F_{aac} + F_m)}{(R_m \cdot F_{aac} + R_{aac} \cdot F_m)}. \quad (2)$$

В формуле (2) приняты следующие обозначения:

R_{aac} – термическое сопротивление газобетонной части фрагмента кладки сечением $L_x \times L_y$ и толщиной ℓ_z (рис. 2);

$F_{aac} = (L_x - 2 \cdot b) \cdot (L_y - 2 \cdot b) = (\ell_x + 2 \cdot b) - 2 \cdot b] \cdot [(\ell_y + 2 \cdot b) - 2 \cdot b] = 4 \cdot \ell_x \cdot \ell_y$ – площадь поперечного сечения газобетонной составляющей рассматриваемого на рисунке 2 фрагмента;

R_m – термическое сопротивление растворных швов кладки в рассматриваемом фрагменте;

$F_m = L_x \cdot L_y - F_{aac} = (\ell_x + 2 \cdot b) \cdot (\ell_y + 2 \cdot b) - 4 \cdot \ell_x \cdot \ell_y = 4 \cdot b \cdot (\ell_x + \ell_y)$ – площадь поперечного сечения швов регулярного фрагмента кладки, изображенного на рисунке 2.

Здесь и далее по тексту обозначение “аас” относится к газобетону (по первым буквам термина ”autoclaved aerated concrete”), “m” – к строительному раствору кладки (англ.”mortar”).

Уравнение (2) позволяет в общем случае рассчитать термическое сопротивление слоя кладки из газобетонных блоков с учетом теплофизических и геометрических характеристик растворных швов.

Все геометрические размеры, принятые в формуле (2), относятся к фрагментам кладки, изображенным на рисунке 2. Большинство современных предприятий выпускают изделия с высотой блоков ℓ_x 250 мм и длиной ℓ_y 625 мм.

С учетом того, что теплопроводность изделий из автоклавного газобетона марки по плотности D400 λ_{aac} для условий эксплуатации «Б» составляет по ГОСТ 31359 [19] 0,117 Вт/(м·°С), а теплопроводность растворных швов плотностью 1800 кг/м^3 λ_m в соответствии с Приложением Д СП 23-101 [17] составляет 0,93 Вт/(м·°С), получим следующие значения термических сопротивлений для соответствующих параллельных сечений рассматриваемого фрагмента кладки:

- по толще газобетонных изделий:

$$R_{aac} = \frac{\delta_{aac}}{\lambda_{aac}} = \frac{0{,}375}{0{,}117} = 3{,}21\ (м^2 \cdot {}^oC)/Вт;$$

- по толще швов кладки:

$$R_m = \frac{\delta_m}{\lambda_m} = \frac{0{,}375}{0{,}93} = 0{,}40\ (м^2 \cdot {}^oC)/Вт.$$

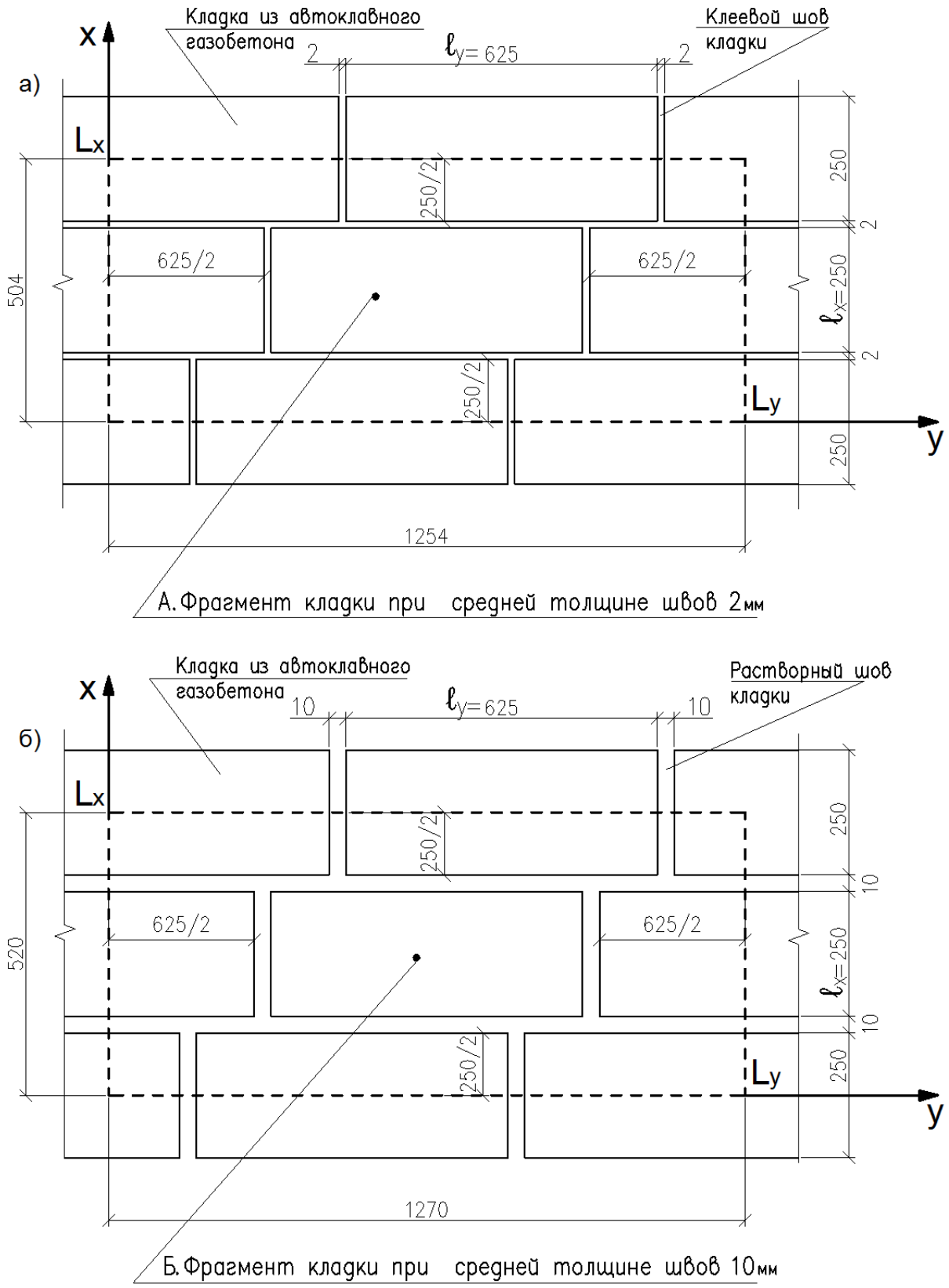


Рисунок 2. Схема рассматриваемого фрагмента кладки:
а – фрагмент кладки со средней толщиной швов 2 мм;
б – фрагмент кладки со средней толщиной швов 10 мм

Расчет по формуле (2) для кладки стен с учетом швов кладки толщиной 2 мм дает $R_{k(2mm)}$ = 2,98 (м^2·°С)/Вт.

Таким образом, поправка на учет влияния швов составляет примерно 7 %.

Если толщина швов в кладке составит 10 мм, то $R_{k(10mm)}$ = 2,34 (м^2·°С)/Вт, т. е. величина поправки составит уже 27 %.

В терминах строительной теплотехники применительно к представленным моделям это означает, что коэффициент теплотехнической однородности r рассматриваемых фрагментов кладки, рассчитанный без учета иных типов теплопроводных включений, составляет:

- для кладки на клею с толщиной швов 2 мм:

$$r = \frac{R_{k(2mm)}}{R_{aac}} = \frac{2,98}{3,21} = 0,93;$$

- для кладки на растворе с толщиной швов 10 мм:

$$r = \frac{R_{k(10mm)}}{R_{aac}} = \frac{2,34}{3,21} = 0,73.$$

Результаты расчета коэффициента теплотехнической однородности кладки стен для различных марок по плотности (D) выпускаемых стеновых изделий из автоклавного газобетона в зависимости от теплопроводности применяемых в кладке растворных (клеевых) составов при различных толщинах швов кладки (2 и 10 мм) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициента теплотехнической однородности r

Марка блоков по плотности	Толщина швов кладки	Коэффициент теплотехнической однородности кладки r при расчетном коэффициенте теплопроводности раствора λ_m [Вт/м·ºС]								
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
D300	2 мм	0,99	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
	10 мм	0,94	0,88	0,84	0,80	0,76	0,73	0,70	0,67	0,64
D400	2 мм	0,99	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92
	10 мм	0,96	0,92	0,88	0,85	0,82	0,79	0,76	0,73	0,71
D500	2 мм	0,99	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94
	10 мм	0,98	0,95	0,91	0,88	0,86	0,83	0,80	0,78	0,76
D600	2 мм	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95
	10 мм	0,99	0,97	0,94	0,91	0,89	0,87	0,84	0,82	0,80
D700	2 мм	1,00	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96
	10 мм	1,00	0,98	0,95	0,93	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83

Примечание: значения коэффициента теплотехнической однородности r при промежуточных значениях толщины швов и коэффициента теплопроводности кладочного раствора допускается принимать по интерполяции.

Представленные выше расчеты справедливы для стационарных условий теплопередачи. В этом случае фрагменты кладки, представленные на рисунке 2, можно рассматривать как систему с параллельными сопротивлениями и применять зависимости, полученные выше. Более точные зависимости в стационарных условиях теплопередачи могут быть получены при использовании специализированных программно-вычислительных комплексов [20–22]. Однако в реальных условиях эксплуатации стационарные процессы наблюдаются крайне редко и устанавливаются в течение очень непродолжительного времени.

Моделирование процессов теплопередачи в нестационарных условиях

В случае нестационарного теплообмена следует учитывать влияние швов кладки на теплоустойчивость ограждающей конструкции, которая характеризуется нормируемой амплитудой колебаний и величиной затухания расчетной амплитуды колебаний температуры ν.

Решение задачи о затухании температурных колебаний в ограждениях (одномерная задача) широко известно и описано в монографиях [23, 24]. Данное решение также отражено в нормативной документации [16] для расчета теплоустойчивости ограждающих конструкций.

Учет влияния швов в этом случае требует решения трехмерного уравнения теплопроводности. Рассмотрим общую постановку задачи. Уравнение теплопроводности в общем случае имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_T(x, y, z) \cdot \Delta T, \tag{3}$$

где $a_T(x, y, z)$ – коэффициент температуропроводности материала или изделия стенового ограждения.

Сечение регулярного участка фрагмента газобетонной кладки изображено на рисунке 2. Ось z направлена внутрь ограждения параллельно направлению теплового потока.

Примем следующие допущения:

1) температура наружного воздуха (T^e) при z = 0 меняется по закону

$$T^e = T_o + \delta T \cdot \cos w t;$$

2) внутри стеновой конструкции (при z = ℓ_Z) тепловой поток

$q_i = const$ (фиксированные источники тепла).

Решение задачи представим в виде:

$$T(x, y, z, t) = T_o(z) + T_н(x, t) + T_1(x, y, z, t), \tag{4}$$

где $T_o(z)$ – стационарное решение, определяемое по формуле (2) с учетом швов кладки;

$T_н(x, t)$ – решение задачи (3), если бы вся конструкция состояла исключительно из сплошного слоя газобетона, при условии, что внутри действует некий дополнительный тепловой поток q_{add};

$T_1(x, y, z, t)$ – поправка к полю температур, обусловленная наличием растворных швов в составе газобетонной кладки.

Определим $T_н(x, t)$ при установившемся режиме. Рассмотрим частное решение уравнения (4):

$$\frac{\partial T_н}{\partial t} = a_{T(aac)}(x, y) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \tag{5}$$

где $a_{T(aac)}$ – коэффициент температуропроводности однородной стеновой конструкции из газобетона.

Пусть $\psi^2 = \frac{i w}{a_{T(aac)}}$, тогда уравнение (5) примет вид:

$$\frac{d^2 \Theta_{(aac)}}{d z^2} - \psi^2 \cdot \Theta_{(aac)} = 0, \tag{6}$$

решение которого есть функция вида:

$$\Theta_{(aac)}(z) = C_1 \cdot ch\psi z + C_2 \cdot sh\psi z \ . \qquad (7)$$

Комплексное решение уравнения (3) есть функция вида:

$$\tilde{\Theta}_{aac}(z,t) = \Theta_{(aac)}(z) \cdot e^{iwt}.$$

Граничные условия положим:

- при z = 0: $\tilde{q} = \alpha_H (\delta t - \Theta_o)$ $\tilde{q} = -\lambda \cdot \Theta'(z)|_{z=o}$;
- при z = ℓ_z: $\tilde{q}_\Phi = -\lambda \cdot \Theta'(z)|_{z=o}$.

С учетом данных граничных условий, коэффициенты C_1 и C_2 имеют вид:

$$C_1 = \frac{\alpha_H \cdot \delta t \cdot ch\psi \ell_z - q_{add}}{\alpha_H \cdot ch\psi \ell_z + \lambda\psi\, sh\psi \ell_z};$$

$$C_2 = \frac{\alpha_H \cdot \left[\frac{q_{add}}{\psi} + \delta t \cdot sh\psi \ell_z\right]}{\alpha_H \cdot ch\psi \ell_z + \lambda\psi\, sh\psi \ell_z}. \qquad (8)$$

Рассмотрим частное решение уравнения (3) с поправкой Θ_1 на наличие растворных швов в кладке, т. е. $\Theta = \Theta_{(aac)} + \Theta_1$:

$$iw\Theta_1 = a_{T(aac)} \cdot \Delta\Theta_1 + \delta a_T(x,y) \cdot \Delta\Theta_1 + \delta a_T(x,y) \cdot \Delta\Theta_{aac}\ , \qquad (9)$$

где $\delta a_T(x,y) = a_{T(m)} - a_{T(aac)}$.

Интерес представляет интегральный показатель влияния растворных швов кладки на теплоустойчивость. Поэтому определим:

$$\overline{\Theta}_1(z) = \frac{1}{F_o}\int_o^{L_x}\int_o^{L_y}\Theta_1(x,y,z)\,dx \cdot dy\ , \qquad (10)$$

где F_o – площадь регулярного фрагмента кладки, выделенного на рисунке 2.

Учитывая соотношение (6) и то, что поправка Θ_1 мала по сравнению с Θ_{aac}, уравнение (9) можно переписать следующим образом:

$$iw\overline{\Theta}_1(z) = a_{T(aac)} \cdot \overline{\Theta}_1''(z) + \frac{\delta a_T(w) \cdot F_m}{a_{T(aac)} \cdot F_o} \cdot \Theta_{aac}(z). \qquad (11)$$

В уравнении (11) учтено, что поперечные потоки вдоль контура на рисунке 2 ничтожно малы (первое слагаемое правой части уравнения (9)), вторым слагаемым можно пренебречь из-за наличия малого параметра F_m / F_o. Неоднородное уравнение (11) удобно переписать в виде:

$$\overline{\Theta}_1'' - \psi^2 \cdot \overline{\Theta}_1 = -k\psi^2 \cdot \Theta_{aac}(z), \qquad (12)$$

где $k = \dfrac{\delta a_T \cdot F_m}{a_{T(aac)} \cdot F_o}$.

Частное решение уравнения (12) имеет вид:

$$\overline{\Theta}_{1_{ч}}(z) = -\frac{k\psi}{2}\left[e^{\psi z}\int_{o}^{z} e^{-\psi x}\cdot\Theta_{aac}(x)\cdot dx - e^{-\psi z}\int_{o}^{z} e^{\psi x}\cdot\Theta_{aac}(x)\cdot dx \right]. \quad (13)$$

Общее решение уравнения (12) можно записать следующим образом:

$$\overline{\Theta}_1(z) = A\,\mathrm{sh}\,\psi z - \overline{\Theta}_{1_{ч}}. \quad (14)$$

Очевидно, что при z = 0: $\overline{\Theta}_1(0) = 0$.

Потребуем, чтобы тепловой поток на границе z = ℓ_z равнялся нулю, т. е.

$$q = -\lambda A\psi\,\mathrm{ch}\,\psi\ell_z + \frac{k\psi^2\lambda}{2}\left[e^{\psi\ell_z}\int_{o}^{\ell_z} e^{-\psi z}\Theta_{aac}(z)dz + e^{-\psi\ell_z}\int_{o}^{\ell_z} e^{\psi z}\Theta_{aac}(z)dz \right] = 0. \quad (15)$$

Отсюда константа A равна:

$$A = \frac{k\psi}{2}\left(C_1\cdot\left[\ell_z + \frac{1}{\psi}\cdot\mathrm{th}(\psi\ell_z)\right] + C_2\cdot\ell_z\cdot\mathrm{th}(\psi\ell_z)\right) = 0. \quad (16)$$

Таким образом, дополнительная комплексная температура на внутренней поверхности равна:

$$\overline{\Theta}_1^{i} = A\,\mathrm{sh}\,\psi\ell_z - \frac{k\psi}{2}\left[C_1\cdot\ell_z\cdot\mathrm{sh}\,\psi\ell_z + C_2\cdot\left(\ell_z\cdot\mathrm{ch}\,\psi\ell_z - \frac{1}{\psi}\cdot\mathrm{sh}\,\psi\ell_z\right)\right] = 0. \quad (17)$$

С учетом формулы (17) выражение для дополнительной комплексной температуры можно переписать следующим образом:

$$\overline{\Theta}_1^{i} = \frac{k}{2}\left[C_1\cdot\frac{\mathrm{sh}^2\,\psi\ell_z}{\mathrm{ch}\,\psi\ell_z} + C_2\cdot\left(\mathrm{sh}\,\psi\ell_z - \frac{\psi\cdot\ell_z}{\mathrm{ch}\,\psi\ell_z}\right)\right] = 0. \quad (18)$$

В отсутствие дополнительных потоков изнутри (q_{add}≡0):

$$\Theta_{add}(z) = \frac{\delta T}{\mathrm{ch}\,\psi\ell_z + \frac{\lambda\psi}{\alpha_H}\mathrm{sh}\,\psi\ell_z}. \quad (19)$$

Комплексный коэффициент затухания для кладки:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\mathrm{ch}\,\psi\ell_z + \frac{\lambda\psi}{\alpha_H}\mathrm{sh}\,\psi\ell_z}. \quad (20)$$

Тогда коэффициент затухания, соответствующий градиентному условию $T^e = T_o + \delta\cdot T\cdot\cos\omega t$, определяется как:

$$\nu = \frac{\tilde{\nu} + \tilde{\nu}^*}{2}. \quad (21)$$

Величина $\overline{\Theta}_1^{\,i}$ согласно (18) после упрощений примет вид:

$$\overline{\Theta}_1^{\,i} = \frac{k}{2} \cdot \frac{\delta T(\psi \ell_z)}{\mathrm{ch}\,\psi \ell_z + \frac{\lambda \psi}{\alpha_H} \mathrm{sh}\,\psi \ell_z} = \frac{k}{2} \cdot (\psi \ell_z) \cdot \Theta_{aac}. \qquad (22)$$

Поэтому поправка на швы приводит к дополнительному значению $\delta\tilde{\nu}$:

$$\delta\tilde{\nu} = \frac{k}{2} \cdot (\psi \ell_z) \cdot \tilde{\nu} = \frac{k}{2} \cdot F \cdot R_{aac} \cdot \tilde{\nu} \cdot \sqrt{i} = \frac{k}{2} \cdot D_{aac} \cdot \tilde{\nu} \cdot \sqrt{i} \quad , \qquad (23)$$

где D_{aac} – показатель тепловой инерции стеновой конструкции из газобетона.

Для показательной формы записи поправка на учет швов имеет вид:

$$\delta = \frac{\delta\tilde{\nu}}{\tilde{\nu}\sqrt{i}} = \frac{k}{2} \cdot D_{aac} = \frac{\delta a_T}{a_{T(aac)}} \cdot \frac{F_m}{2F_o} \cdot D_{aac}. \qquad (24)$$

Для рассматриваемого на рисунке 2а фрагмента кладки: $\frac{F_m}{2F_o} = 0{,}0055$.

Коэффициент теплоусвоения (при периоде 24 ч): $S = 0{,}27 \cdot \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_V} = 1{,}89$.

Термическое сопротивление однородного слоя кладки (с учетом влияния растворных швов на теплотехническую однородность): R_{aac} =2,98 (м^2·°С)/Вт.

Тепловая инерция: $D_{aac} = R_{aac} \cdot S = 5{,}63$.

Удельная теплоемкость: c_V =1,05 кДж/(кг·К).

Плотности материалов (газобетонных блоков и кладочных составов): ρ_{aac} = 400 кг/м^3; ρ_m = 1600 кг/м^3.

Тогда при толщине швов кладки b = 2 мм:

$$\frac{\delta a_T}{a_{T(aac)}} = \frac{a_{T(m)}}{a_{T(aac)}} - 1 = \frac{\lambda_m}{\lambda_{aac}} \cdot \frac{\rho_{aac}}{\rho_m} - 1 = 1{,}06.$$

Отсюда величина относительной поправки δ составит (см. уравнение (24)):

δ = 1,06·5,63·0,0055 = 3,3 %.

Таким образом, вклад швов толщиной 2 мм в комплексный коэффициент затухания составляет 3,3 %. При таком численном значении величиной поправки можно пренебречь и считать сопротивления газобетонных блоков и швов в кладке как параллельные.

При толщине швов кладки b = 10 мм:

$$\frac{F_m}{2F_o} = 0{,}027.$$

Величина относительной поправки δ в этом случае составит:

δ = 1,06·4,42·0,027 = 12,7 %.

Таким образом, при толщине швов кладки 10 мм их вклад в комплексный коэффициент затухания составляет 12,7 %. Данное обстоятельство накладывает определенные ограничения на оценку термического сопротивления кладки стен из газобетонных блоков по формуле (2).

Заключение

Из представленного в статье анализа можно сделать вывод о том, что при проектировании наружных стен из газобетонных блоков следует учитывать влияние швов кладки как при расчете термического сопротивления фрагментов кладки, так и при учете теплоустойчивости проектируемых из газобетонных блоков наружных ограждающих конструкций.

В работе получено общее уравнение, позволяющее оценить в стационарных условиях теплопередачи термическое сопротивление кладки, состоящей из двух параллельных сечений: газобетонных блоков и растворных швов кладки. В уравнении учтены геометрические и теплотехнические параметры материалов, используемых в кладке. Показано, что влияние относительной поправки учета швов кладки толщиной 2 мм на комплексный коэффициент затухания расчетной амплитуды колебаний температуры составляет 3,3 %. Следовательно, при расчете термического сопротивления кладки стен из газобетонных блоков на цементном клею с толщиной швов 2 мм сечения из разнородных материалов (газобетона и растворных швов), параллельные тепловому потоку, можно рассматривать как параллельные сопротивления и применять для расчета формулу (2). При толщине швов кладки 10 мм влияние относительной поправки учета швов кладки толщиной 2 мм на комплексный коэффициент затухания расчетной амплитуды колебаний температуры составляет 12,7 %, поэтому формулу (2) и данные, представленные в таблице 1, допускается использовать только как оценочные.

Следует отметить, что в настоящей работе исследовано влияние только одного вида теплопроводных включений (горизонтальных и вертикальных швов кладки) на теплотехнические свойства наружных стен из газобетонных блоков. Наличие других видов теплопроводных включений (дисков плит перекрытий, армированных поясов, гибких и жестких связей, «краевых зон», оконных и дверных проемов и пр.) в составе ограждающих конструкций приводит к еще большему росту дополнительных потерь тепловой энергии за отопительный период [15, 25, 26].

Для уменьшения влияния роли кладочных составов на теплотехническую однородность стеновых конструкций из газобетонных блоков следует использовать кладочные составы с низкой теплопроводностью. В ряде работ [27–29] для ненесущих стеновых конструкций из газобетонных блоков с целью повышения коэффициента теплотехнической однородности предлагается использовать клеи из пенополиуретана.

Литература

1. Keriene J., Kligys M., Laukaitis A., Špokauskas A., Aleknevičius M., Yakovlev G. The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes // Construction and Building Materials. 2013. No. 49. Pp. 527–535.
2. Kus H., Carlsson T. Microstructural investigations of naturally and artificially weathered autoclaved aerated concrete // Cement and Concrete Research. 2003. No. 9. Pp. 1423–1432.
3. Matsushita F., Aono Y., Shibata S. Carbonation degree of autoclaved aerated concrete // Cement and Concrete Research. 2000. No. 11. Pp. 1741–1745.
4. Kadashevich I., Stoyan D. A beam-network model for autoclaved aerated concrete and its use for the investigation of relationships between Young's modulus and microstructure // Computational Materials Science. 2008. No. 2. Pp. 293–300.
5. Laukaitis A., Fiks B. Acoustical properties of aerated autoclaved concrete // Applied Acoustics. 2006. No. 3. Pp. 284–296.
6. Narayanan N., Ramamurthy K. Microstructural investigations on aerated concrete // Cement and Concrete Research. 2000. No. 3. Pp. 457–464.
7. Kurama H., Topçu I.B., Karakurt C. Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash // Journal of Materials Processing Technology. 2009. No. 2. Pp. 767–773.
8. Jerman M., Keppert M., Výborný J., Černý R. Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete // Construction and Building Materials. 2013. No. 41. Pp. 352–359.
9. Chen G., Liu X., Chen Y., Guo X., Tan Y. Coupled heat and moisture transfer in two common walls // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2014. Vol. 3. Pp. 335–342.
10. Ropelewski L., Neufeld R.D. Thermal inertia properties of autoclaved aerated concrete // Journal of Energy Engineering. 1999. No. 125(2). Pp. 59–75.

11. Levchenko V. Production of AAC in Russia: History, present stage, perspectives // Cement, Wapno, Beton. 2011. Spec. issue. Pp. 125–127.

12. Немова Д.В., Спиридонова Т.И., Куражова В.Г. Неизвестные свойства известного материала // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №1. С. 36–46.

13. Miao J.K., Bing Q.D. Study on energy efficiency design of self-insulation system with autoclaved aerated concrete block in cold regions // Applied Mechanics and Materials. 2014. No. 507. Pp. 515–520.

14. Горшков А.С., Гладких А.А. Влияние растворных швов кладки на параметры теплотехнической однородности стен из газобетона // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 3(13). С. 39–42.

15. Гагарин В.Г. Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий // Academia. Архитектура и строительство. 2009. №5. С. 297–305.

16. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий.

17. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий.

18. ГОСТ 31360-2007. Изделия стеновые неармированные из автоклавного газобетона. Технические условия.

19. ГОСТ 31359-2007 Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия.

20. Корниенко С.В. Тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натурных измерений параметров микроклимата помещений // Инженерно-строительный журнал. 2012. №2(28). С. 18–23.

21. Корниенко С.В. Комплексная оценка теплозащиты ограждающих конструкций оболочки здания // Инженерно-строительный журнал. 2012. №7(33). С. 43–49.

22. Корниенко С.В. Расчетно-экспериментальный контроль энергосбережения здания // Инженерно-строительный журнал. 2013. №8(43). С. 24–30.

23. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1982. 415 с.

24. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1973. 432 с.

25. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. О теплотехнической однородности двухслойной стеновой конструкции // Энергосбережение. 2014. №7. С. 58–63.

26. Корниенко С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет снижения теплопотерь через краевые зоны ограждающих конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2010. №3. С. 348–351.

27. Горшков А.С., Ватин Н.И. Свойства стеновых конструкций из ячеистобетонных изделий автоклавного твердения на полиуретановом клею // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5(40). С. 5–19.

28. Горшков А.С., Гринфельд Г.И., Мишин В.Е., Никифоров Е.С., Ватин Н.И. Повышение теплотехнической однородности стен из ячеисто-бетонных за счет использования в кладке полиуретанового клея // Строительные материалы. 2014. №5. С. 57–64.

29. Grinfeld G., Gorshkov A., Vatin N. Tests results strength and thermophysical properties of aerated concrete block wall samples with the use of polyurethane adhesive // Advanced Materials Research. 2014. No. 941–944. Pp. 786–799.

Александр Сергеевич Горшков, г. Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.:+7(921)3884315; эл. почта: alsgor@yandex.ru

Павел Павлович Рымкевич, г. Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.:+79112245913; эл. почта: rymkewitch@yandex.ru

Николай Иванович Ватин, г. Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)9643762; эл. почта: vatin@mail.ru

© Горшков А. С.,Рымкевич П. П.,Ватин Н. И., 2014

doi: 10.5862/MCE.52.6

Расчет усиливаемых ограждающих конструкций из тонкостенных элементов открытого профиля

К.т.н., доцент М.Н. Убайдуллоев,
Казанский национальный исследовательский технологический университет

Аннотация. Излагается вариационный метод расчета усиливаемых под нагрузкой тонкостенных стержневых систем открытого профиля. Приведены основные соотношения используемой теории. Расчет напряженно-деформированного состояния усиливаемой конструкции состоит из следующих этапов: 1) определение ремонтных напряжений и деформаций в элементах конструкции от нагрузок, действующих в период ремонта или усиления (ремонтные нагрузки); 2) расчет напряженно-деформированного состояния конструкции после усиления с учетом действия эксплуатационных нагрузок и наличия ремонтных напряжений.

На основе изложенной методики создана компьютерная программа для расчета напряженно-деформированного состояния усиливаемых под нагрузкой тонкостенных пространственных стержневых конструкций. Данная программа позволяет моделировать работу усиливаемой конструкции и определять ее напряженно-деформированное состояние на различных этапах усиления. Представлены результаты расчетов усиливаемой тонкостенной конструкции с учетом напряжений и деформаций, возникающих в ней на различных этапах усиления.

Ключевые слова: тонкостенные стержневые системы; усиление; напряженно-деформированное состояние; ремонтные напряжения; вариационный метод

Как известно, при строительстве быстровозводимых зданий и сооружений широко применяются наружные стеновые панели с каркасом из тонкостенных термопрофилей [1, 2, 3]. Для расчета таких конструкций неприменимы теории расчета обычных конструкций.

Анализу напряженно-деформированного состояния тонкостенных стержневых систем открытого и замкнутого профиля посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых [2–14]. Численный метод расчета тонкостенных конструкций рассмотрен в диссертации А.Р. Туснина [4]. В данной работе предлагается метод тонкостенных конечных элементов оболочки. Разработанные в исследовании [4] конечные элементы не позволяют решить задачу учета касательных напряжений при кручении тонкостенных стержней.

В работах [2, 3, 5, 6] рассмотрены новые тонкостенные конечные элементы, отличающиеся количеством степеней свободы, которое зависит от степени аппроксимации функций деформаций. В статье [5] методом конечных элементов реализован алгоритм расчета тонкостенных стержневых систем по полусдвиговой и бессдвиговой теориям. В исследовании [3] используется полусдвиговая теория В.И. Сливкера [7], где учитывается лишь часть деформации сдвига, возникающая только от кручения.

Необходимо отметить, что изложенные в работах [2–14] методы определения напряженно-деформированного состояния тонкостенных стержневых систем не учитывают особенности расчета усиливаемых нагруженных конструкций.

Аналитическому и численному методам расчета тонкостенных стержневых элементов металлических конструкций по пространственно-деформированной схеме за пределом упругости посвящены исследования [15, 16], где на основе общего подхода рассмотрен, а действительная работа элементов в составе эксплуатируемых конструкций.

Как известно, повреждения и изменения расчетных схем эксплуатируемых конструкций в период их ремонта и усиления приводят к возникновению стесненного кручения элементов из тонкостенного профиля [4, 15–17]. Таким образом, для расчета усиления тонкостенных стержневых систем нужно использовать методы определения напряженно-деформированного состояния, учитывающие особенности деформирования тонкостенного стержня.

Теоретические и экспериментальные исследования усиленных тонкостенных стержневых элементов конструкций изложены в работах [17–19]. Разработке практических методов расчета на прочность и пространственную устойчивость усиленных под нагрузкой стержневых элементов

открытого профиля посвящена диссертационная работа [17]. Приведенный в ней метод оценки прочности и устойчивости усиленных тонкостенных стержней не учитывает влияние касательных напряжений. В работах [18, 19] излагается способ усиления сжатых стержней за счет уменьшения их расчетной длины.

В данной статье изложен вариационный метод расчета усиливаемых нагруженных тонкостенных стержневых систем открытого профиля с учетом ремонтных и монтажных напряжений.

Используется методика расчета стержней, описанная в работе [20], применяемая для стержней, продольная ось которых может быть прямолинейной или криволинейной. Приняты основные допущения и соотношения теории стержней, а также допущения, принятые в теории тонкостенных стержней с учетом сдвигов [7].

Для тонкостенных стержней деформации и напряжения вычисляются в фиксированной точке M в системе координат My_tz_t (рис. 1) с использованием следующих соотношений [21]:

$$\varepsilon_x = \frac{du_1(x)}{dx} + z\frac{d\varphi_2(x)}{dx} - y\frac{d\varphi_3(x)}{dx} - \frac{d\beta(x)}{dx}\,\omega(s),$$

$$\gamma = \frac{du_2(x)}{dx}t_y + \frac{du_3(x)}{dx}t_z + \frac{d\varphi_1(x)}{dx}\rho(y_м, z_м) + \varphi_2(x)t_z - \varphi_3(x)t_y - \beta(x)\rho(y_м, z_м) \qquad (1)$$

$$\gamma^k_{xy_t} = \frac{d\varphi_1(x)}{dx}z_t, \quad \gamma_{x_tz_t} = 0.$$

Здесь γ – постоянный по толщине стенки усредненный сдвиг; $\gamma^k_{xy_t}$ – сдвиг при чистом кручении, распределенный по толщине стенки по линейному закону; $u_1(x), u_2(x), u_3(x)$, $\varphi_1(x), \varphi_2(x), \varphi_3(x)$ – перемещения и углы поворота поперечных сечений стержня; $\beta(x)$ – функция меры депланации; $\rho(y_м, z_м) = y_м t_z - z_м t_y$ – длина перпендикуляра, проведенного из начала координат *Oxyz* к касательной к линии O_1M в точке M; $\omega(y,z) = \omega(s) = \int_o^s \rho\, ds$; $\omega(y,z)$ – секториальная площадь профиля; t_y, t_z – направляющие косинусы осей My_t, Mz_t; y, z – координаты точек, лежащих на оси Mz_t и вычисляемые по формулам $y = y_м + y_t t_y + z_t t_z$, $z = z_м + y_t t_z - z_t t_y$, $t_y = dy/ds$, $t_z = dz/ds$.

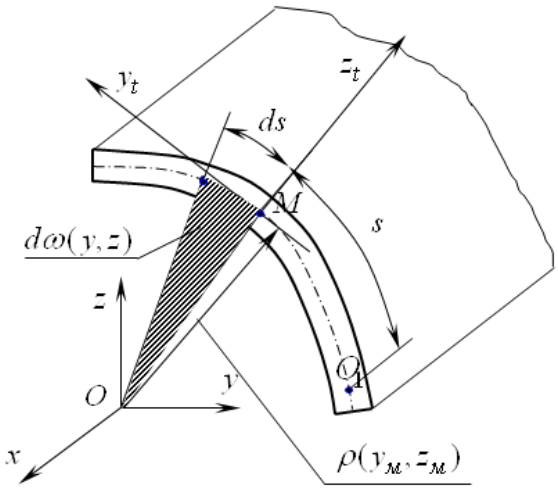


Рисунок 1. Деформации и напряжения в сечении тонкостенного стержня

При определении напряженно-деформированного состояния усиленной стержневой системы с учетом упругих деформаций зависимость между напряжениями и деформациями описывается законом Гука:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x, \quad \tau = G\gamma, \quad \tau^*_{x_t y_t} = G\gamma^*_{x_t y_t}, \tag{2}$$

где

$$\gamma^*_{xy_t} = \gamma + k^* \gamma^k_{xy_t}. \tag{3}$$

В выражении (3) k^* – поправочный коэффициент.

Введение поправочного коэффициента k^* в выражение (3) объясняется тем, что при чистом кручении узкой полосы касательные напряжения $\tau_{x_t y_t}$ и $\tau_{x_t z_t}$ вносят одинаковый вклад в величину момента чистого кручения H.

Так как в теории тонкостенных стержней принята гипотеза о безмоментности, полагается, что $\tau_{x_t z_t} = 0$. Для компенсации отсутствия напряжения $\tau_{x_t z_t}$ в выражение для деформации $\gamma^*_{x_t y_t}$ (3) вводится коэффициент $k^* = 2$.

Расчет напряженно-деформированного состояния усиливаемой конструкции состоит из следующих этапов:

1) определяются ремонтные напряжения $\sigma^{\text{р}}_x, \tau^{\text{р}}_{xy}, \tau^{\text{р}}_{xz}$ и деформации $\varepsilon^{\text{р}}_x, \gamma^{\text{р}}_{xy}, \gamma^{\text{р}}_{xz}$ в элементах конструкции от нагрузок, действующих в период ремонта или усиления (ремонтные нагрузки);
2) рассчитывается напряженно-деформированное состояние конструкции после усиления с учетом действия эксплуатационных нагрузок и наличия ремонтных напряжений.

Перемещения элементов усиливаемой стержневой конструкции определяются из вариационного уравнения

$$\delta U - \delta W = 0, \tag{4}$$

где δU – вариация потенциальной энергии деформации стержневой системы в зоне упругих деформаций; δW – вариация работы внешних нагрузок.

При определении деформаций и напряжений стержневая система разбивается на N участков, на каждом из которых компоненты вектора перемещений $\tilde{u} = \{\tilde{u}_1(x), \tilde{u}_2(x), \tilde{u}_3(x)\}^{\text{T}}$, углов поворота $\tilde{\varphi} = \{\tilde{\varphi}_1(x), \tilde{\varphi}_2(x), \tilde{\varphi}_3(x)\}^{\text{T}}$ и меры депланации $\tilde{\beta} = \{\tilde{\beta}(x), \quad 0, \quad 0\}^{\text{T}}$ в глобальной системе координат представляются в виде рядов:

$$\tilde{u}_k = \tilde{u}^i_k = \sum_{m=1}^{M} C^i_{km} f_m(t), \quad \tilde{\varphi}_k = \tilde{\varphi}^i_k = \sum_{m=1}^{M} D^i_{km} f_m(t), \quad \tilde{\beta}_k = \tilde{\beta}^i_k = \sum_{m=1}^{M} B^i_{km} f_m(t). \tag{5}$$

Здесь C^i_{km}, D^i_{km}, B^i_{km} – неизвестные постоянные; $f_m(t)$ – функции формы; $f_1(t) = 1 - 3t^2 + 2t^3$, $f_2(t) = 3t^2 - 2t^3$, $f_3(t) = t(1 - t^2)$, $f_4(t) = (t^3 - t^2)$, $f_m(t) = (1 - t^2)t^{(m-3)}$ при $m = \overline{5, M}$.

В уравнении (4) выражение δU определяется с учетом напряжений $\sigma^{\text{р}}_x$, $\tau^{\text{р}}_{x_t y_t}$, действующих в период усиления:

$$\delta U = \int_l \left[\iint_{A^y} (\sigma_x \delta\varepsilon_x + \tau^*_{x_t y_t} \delta\gamma^*_{x_t y_t}) dA + \iint_{A^{\text{п}}} (\sigma^{\text{р}}_x \delta\varepsilon_x + \tau^{\text{р}}_{x_t y_t} \delta\gamma^*_{x_t y_t}) dA \right] dl,$$

где l – длина основных элементов стержневой системы; $A^{\text{п}}$ – площадь поперечных сечений в зоне основного материала конструкции; $A^{\text{у}}$ – площадь поперечных сечений стержней после усиления.

Вариация работы внешних сил, действующих на стержневую систему после усиления, записывается в виде:

$$\delta W = \int_{l_C} \Big[\tilde{q}_1^{\text{у}}(x)\delta\tilde{u}_1(x) + \tilde{q}_2^{\text{у}}(x)\delta\tilde{u}_2(x) + \tilde{q}_3^{\text{у}}(x)\delta\tilde{u}_3(x) + \tilde{m}_1^{\text{у}}(x)\delta\tilde{\varphi}_1(x) + \tilde{m}_2^{\text{у}}(x)\delta\tilde{\varphi}_2(x) + \tilde{m}_3^{\text{у}}(x)\delta\tilde{\varphi}_3(x) - \tilde{m}_B^{\text{у}}(x)\delta\tilde{\beta}(x) \Big] dl + \sum_{k=1}^{K} \Big[\tilde{F}_{1k}^{\text{у}}\delta\tilde{u}_1(x_k) + \tilde{F}_{2k}^{\text{у}}\delta\tilde{u}_2(x_k) + \tilde{F}_{3k}^{\text{у}}\delta\tilde{u}_3(x_k) \Big] + \sum_{j=1}^{J} \Big[\tilde{M}_{1j}^{\text{у}}\delta\tilde{\varphi}_1(x_j) + \tilde{M}_{2j}^{\text{у}}\delta\tilde{\varphi}_2(x_j) + \tilde{M}_{3j}^{\text{у}}\delta\tilde{\varphi}_3(x_j) + \tilde{M}_{Bj}^{\text{у}}\delta\tilde{\beta}(x_j) \Big]. \quad (6)$$

В выражении (6) l_c – длина элементов стержневой системы; $\tilde{q}_1^{\text{у}}$, $\tilde{q}_2^{\text{у}}$, $\tilde{q}_3^{\text{у}}$, $\tilde{F}_{1i}^{\text{у}}$, $\tilde{F}_{2i}^{\text{у}}$, $\tilde{F}_{3i}^{\text{у}}$, $\tilde{M}_{1k}^{\text{у}}$, $\tilde{M}_{2k}^{\text{у}}$, $\tilde{M}_{3k}^{\text{у}}$ – нагрузки, определяемые согласно [18]. Также определяются нагрузки $\tilde{m}_B^{\text{у}}(x)$ и $\tilde{M}_{Bj}^{\text{у}}(x)$, т.е. $\tilde{m}_B^{\text{у}}(x) = \tilde{m}_B^{\text{р}}(x) + \Delta\tilde{m}_B(x)$, $\tilde{M}_{Bj}^{\text{у}} = \tilde{M}_{Bj}^{\text{р}} + \Delta\tilde{M}_{Bj}$.

При вычислении интегралов, входящих в вариационное уравнение (4), используется численное интегрирование на основе формулы Гаусса. Интегрирование проводится по длине стержней и по площади их поперечных сечений согласно методике, описанной в работе [22].

Решая систему алгебраических уравнений, которые получаются из вариационного уравнения (4), находим неизвестные коэффициенты C_{km}^i, B_{km}^i и D_{km}^i. Затем по формулам (5) определяются перемещения, и с использованием соотношений (1) и (2) вычисляются деформации и напряжения.

Внутренние усилия и моменты, возникающие в поперечных сечениях тонкостенного стержня, вычисляются по формулам:

$$N^{\text{у}} = \iint_{A^{\text{у}}} \sigma_x \, dA, \quad Q_y^{\text{у}} = \iint_{A^{\text{у}}} \tau_o t_y dA, \quad Q_z^{\text{у}} = \iint_{A^{\text{у}}} \tau_o t_z dA, \quad M_y^{\text{у}} = \iint_{A^{\text{у}}} \sigma_x \, z \, dA, \quad M_z^{\text{у}} = \iint_{A^{\text{у}}} \sigma_x \, y \, dA,$$
$$M_\omega^{\text{у}} = \iint_{A^{\text{у}}} (\tau_o t_z y - \tau_o t_y z) dA, \quad B^{\text{у}} = \iint_{A^{\text{у}}} \sigma_x \, \omega \, dA, \quad H^{\text{у}} = k^* \iint_{A^{\text{у}}} \tau_{x_t y_t} z_t dA. \quad (7)$$

В соотношениях (7) касательные напряжения τ_o определяются по формуле, полученной на основе уравнений равновесия отсеченной части стержня

$$\tau_o = \frac{E}{h}\left[\frac{d^2 u_1(x)}{dx^2} A_o + \frac{d\varphi_2(x)}{dx^2} S_{oy} - \frac{d^2\varphi_3(x)}{dx^2} S_{oz} - \frac{d^2\beta(x)}{dx^2} S_{o\omega} \right],$$

где $S_{oy} = \iint_{A_o} z \, dA$, $S_{oz} = \iint_{A_o} y \, dA$, $S_{o\omega} = \iint_{A_o} \omega \, dA$; A_o – площадь отсеченной части сечения; h – толщина стенки тонкостенного элемента.

На основе изложенной методики создана компьютерная программа для расчета напряженно-деформированного состояния усиливаемых под нагрузкой тонкостенных

пространственных стержневых конструкций. Данная программа позволяет моделировать работу усиливаемой конструкции и определять ее напряженно-деформированное состояние на различных этапах усиления.

Приведем результаты расчета усиления консольного стержня при схеме нагружения, показанной на рисунке 2, а. Сечение стержня показано на рисунке 2, б. При усилении сечение основного элемента I наращивается элементом усиления II. Материал основного и усиливающего элементов – сталь Ст3. После усиления в стержне будет действовать суммарный крутящий момент $M^{\text{у}} = 80\ кНм$, который складывается из момента, действующего в период усиления $M^{\text{р}} = 40\ кНм$, и добавочного момента $\Delta M = 40\ кНм$, прикладываемого к конструкции после выполненного усиления.

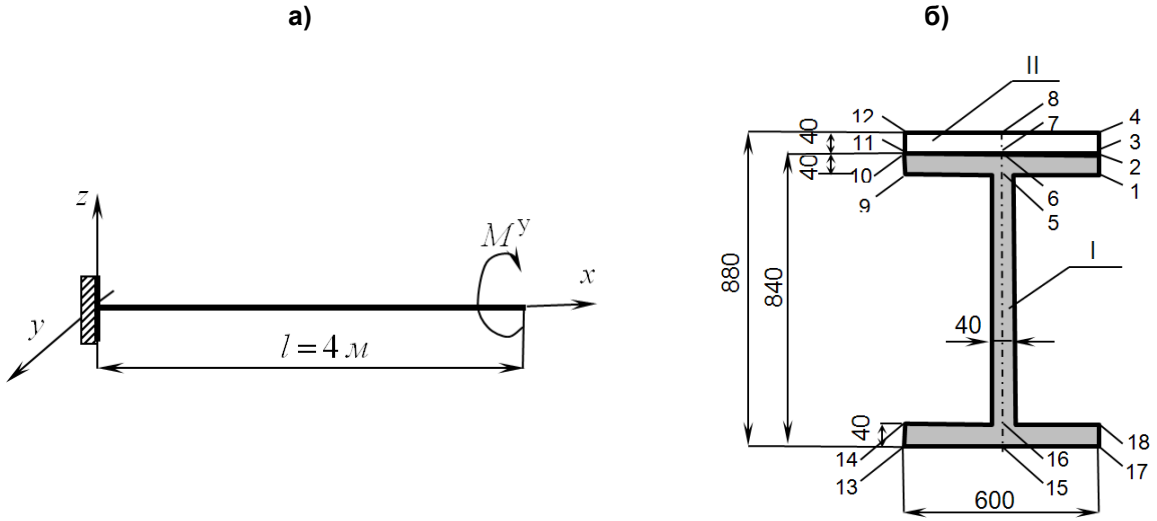


Рисунок 2. Расчетная схема (а) и поперечное сечение стержня (б)

На первом этапе был выполнен расчет заданного стержня от действия ремонтной нагрузки $M^{\text{р}} = 40\ кНм$. Результаты расчета в виде максимальных значений деформаций и усилий приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов стержня до и после усиления

В период усиления при действии ремонтной нагрузки $M^{\text{р}} = 40\ кНм$			
Определяемые параметры	$\varphi_x^{\text{р}}$, рад.	$\beta^{\text{р}}$, 1/м	$B^{\text{р}}$, кН м^2
По методике, изложенной в [23]	0,0122	0,00448	114,3
По предлагаемой методике	0,0128	0,00465	117,0
После усиления при действии суммарной нагрузки $M^{\text{у}} = 80\ кНм$			
Определяемые параметры	$\varphi_x^{\text{у}}$, рад.	$\beta^{\text{у}}$, 1/м	$B^{\text{у}}$, кН м^2
По предлагаемой методике	0,0177	0,00633	198,0

В таблице 1 также приведены результаты расчета по методике [23]. Сравнение полученных результатов по предлагаемому методу с результатами расчета, полученными в соответствии с [23], показывает, что расхождение по $\varphi_x^{\text{р}}$ составляет 3,3 %, по бимоменту – в пределах 2 %.

Значения напряжений, действующих в период ремонта и вычисленных в характерных точках сечения (рис. 2, точки 1–18), приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения напряжений в сечении элемента до и после усиления

Точки сечения	Напряжения			
	$\sigma_x^{р}$, мПа	$\tau_o^{р}$, мПа	$\sigma_x^{у}$, мПа	$\tau_o^{у}$, мПа
1	60,7	0	82,7	0
2	60,7	0	82,7	0
3	0	0	19,0	0
4	0	0	19,0	0
5	0	2,88	0	4,18
6	0	2,88	0	4,18
7	0	0	0	1,3
8	0	0	0	1,3
9	−60,7	0	−82,7	0
10	−60,7	0	−82,7	0
11	0	0	19,0	0
12	0	0	19,0	0
13	60,7	0	98,6	0
14	60,7	0	98,6	0
15	0	2,88	0	5,48
16	0	2,88	0	5,48
17	−60,7	0	−98,6	0
18	−60,7	0	−98,6	0

На следующем этапе производился расчет усиленного стержня под действием суммарного крутящего момента $M^{у} = 80\ кНм$. При этом учитывались напряжения и деформации, возникающие на первом этапе от действия ремонтной нагрузки $M^{р}$. Результаты расчета в виде действующих в опорном сечении усиленного элемента напряжений, а также в виде максимальных деформаций и бимомента приведены в таблицах 1 и 2.

Результаты расчета статически неопределимого стального стержня, нагруженного равномерно распределенными крутящими моментами (рис. 3), приведены в таблице 3. Данная стержневая конструкция до усиления имела двутавровое сечение I (рис. 3, б). В этот период на стержень действовала распределенная нагрузка с интенсивностью $m^{р} = 1\ кНм/м$. В период усиления сечение стержня наращивается элементом усиления II. После усиления к стержню прикладывается добавочная нагрузка $\Delta m = 4\ кНм/м$. При этом суммарная нагрузка после усиления становится равной $m^{у} = 5\ кНм/м$.

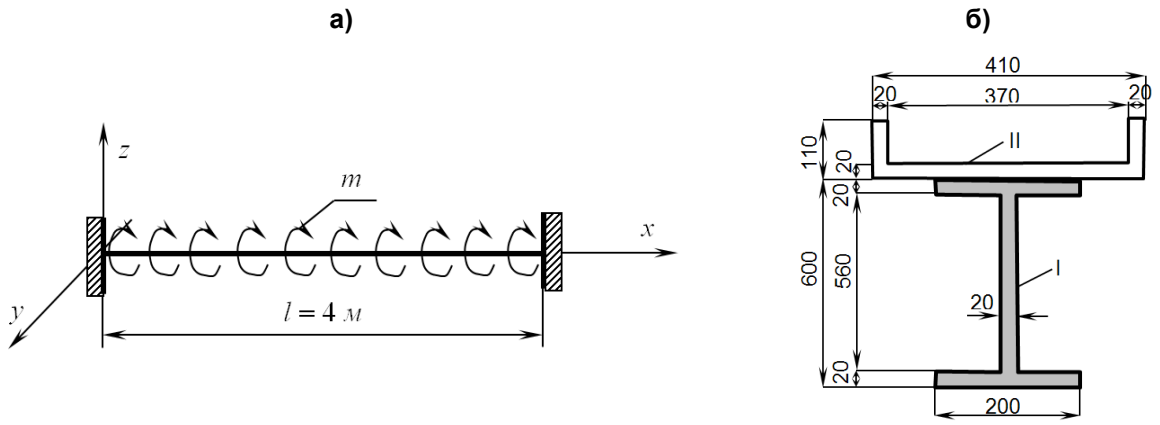


Рисунок 3. Расчетная схема статически неопределимого стержня (а); сечение стержня (б): I – основное сечение, II – элемент усиления

Таблица 3. Результаты расчета статически неопределимого стального стержня, нагруженного равномерно распределенными крутящими моментами

В период усиления при действии ремонтной нагрузки $m^{р} = 1\,кНм/м$			
Определяемые параметры	$\varphi_x^{р}$, *рад.*	$\beta^{р}$, *1/м*	$B^{р}$, *кН м²*
	при $x = 2\,м$	при $x = 1\,м$	при $x = 0$
По методике, изложенной в [23]	0,001235	0,000919	1,181
По предлагаемой методике	0,001285	0,000933	1,19
Расхождение результатов	4 %	1,5 %	0,75 %
После усиления при действии суммарной нагрузки $m^{у} = 5\,кНм/м$			
Определяемые параметры	$\varphi_x^{у}$, *рад.*	$\beta^{у}$, *1/м*	$B^{у}$, *кН м²*
	при $x = 2\,м$	при $x = 1\,м$	при $x = 0$
По предлагаемой методике	0,00371	0,00267	5,74

Выводы

1. Разработан вариационный метод определения напряженно-деформированного состояния усиливаемых под нагрузкой тонкостенных стержней открытого профиля с учетом стесненного кручения.

2. Создана компьютерная программа, которая позволяет определять напряженно-деформированное состояние усиливаемых тонкостенных стержневых конструкций, поперечное сечение которых составлено как из прямолинейных, так и из криволинейных участков.

Литература

1. Cheng Y., Schafer B. W. Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional bucking with applications to the direct strength method // Journal of Constructional Steel Research. 2007. Vol. 63. Issue 5. 2007. Pp. 581–590.
2. Лалин В.В., Рыбаков В.А. Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 8(26). С. 69–80.
3. Рыбаков В.А. Применение полусдвиговой теории В.И. Сливкера для анализа напряженно-деформированного состояния систем тонкостенных стержней: Дисс…. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 184 с.
4. Туснин А.Р. Численный расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. М.: Изд-во АСВ, 2009. 143 с.
5. Лалин В.В., Рыбаков В.А., Морозов С.А. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 1(27). С. 53–73.
6. Ватин Н.И., Рыбаков В.А. Расчет металлоконструкций: седьмая степень свободы // СтройПРОФИль. 2007. №3(57). С. 32–35.
7. Сливкер В.И. Строительная механика. Вариационные основы. Учебное пособие. М.: Изд-во АСВ, 2005. 736 с.
8. Musat S.D., Epureanu B.I. Study of warping torsion of thin-walled beams with open cross-section using macro-elements // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1999. Vol. 44. Issue 6. Pp. 853–868.
9. Emre Erkmen R., Mohareb M. Torsion analysis of thin-walled beams including shear deformation effects // Thin-Walled Structures. 2007. Vol. 44. Issue 10. Pp. 1096–1108.

10. Wang X.-F.a, Zhang Q.-L.b. A new nonlinear finite model for spatial thin-walled beams // Engineering Mechanics. 2011. Vol. 28. Issue 6. Pp. 1–5.

11. Mohri F., Damil N., Potier Ferry M. Large torsion finite element model for thin-walled beams // Computers and Sructures. 2008. Vol. 33. Issue 86. Pp. 671–683.

12. Saade K. Finite Element Modeling of Shear in Thin Walled Beams with a Single Warping Function. PhD thesis. Belgium: University of Brussells, 2005. 134 p.

13. Hancock G. J. Compression tests of high strength cold-formed steel channels with bucking interaction // Journal of Constructional Steel Research. 2009. Vol. 65. Issue 2. Pp. 278–289.

14. Zhang S., Xin K., He M. Bucking analysis of thin-walled box beams with distortion // Journal of Tsinghua University. 2010. Vol. 50. Issue 3. Pp. 359–362.

15. Белый Г.И. О расчёте упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформированной схеме с учетом касательных напряжений и деформации сдвига // Металлические конструкции и испытания сооружений: Межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1985. С. 10–23.

16. Белый Г.И. Методы расчета стержневых элементов конструкций из тонкостенных холодногнутых стержней // Вестник гражданских инженеров. 2014. №4(45). С. 32–37.

17. Пяткин П.А Прочность и пространственная устойчивость усиленных под нагрузкой стержневых элементов конструкций открытого профиля: Дисс…. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2000. 139 с.

18. Raboldt K., Ast M. Zum Tragverhalten des nachträglich seitlich abgestützen Druckstabes // Wissenschaftliche Zeitschrift der Ingenieurhochschule Gottbus. 1982. Vol. 4. Issue I. Pp. 18–28.

19. Raboldt K., Ast M., WolfH.-U. Parameterstudien zum Tragverhalten des nachträglich seitlich abgestützen Druckstabes // Wissenschaftliche Zeitschrift der Ingenieurhochschule Cottbus. 1982.Vol. 4. Issue I. Pp. 29–40.

20. Серазутдинов М.Н., Хайруллин Ф.С. Метод расчета криволинейных стержней // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1991. №5. С. 104–108.

21. Серазутдинов М.Н. Вариационные соотношения теории тонкостенных стержней открытого профиля // Вестник Казанского технологического университета. 2013. №5. С. 216–223.

22. Серазутдинов М.Н., Убайдуллоев М.Н., Абрагим Х.А. Повышение несущей способности усиливаемых нагруженных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. №3. С. 23–30.

23. Бычков Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. М.: Госстройиздат, 1962. 476 с.

Маджид Насриевич Убайдуллоев, г. Казань, Республика Татарстан, Россия

Тел. моб.: +7(927)4202307; эл. почта: madgidpwn@rambler.ru

© Убайдуллоев М.Н., 2014

Требования к материалам, представляемым к публикации

Материалы принимаются только через систему электронной редакции журналов СПбГПУ. Авторам необходимо зарегистрироваться в системе (http://journals.spbstu.ru/) и подать статью через нее, предварительно ознакомившись с нижеприведенными требованиями и условиями опубликования. Публикация в журнале бесплатна для авторов.

Этические нормы и авторские права

Подавая статью в журнал, автор соглашается на условия лицензионного договора, в частности, на то, что все статьи без исключения публикуются в открытом доступе на сайте журнала и в Научной электронной библиотеке России. Также автор подтверждает, что статья является оригинальной, ранее не опубликованной, содержит только проверенные и точные данные; любые данные, полученные не автором, имеют соответствующие ссылки на источник.

Тематика статей

В «Инженерно-строительном журнале» публикуются оригинальные, ранее не опубликованные статьи, содержащие полученные авторами новые научные результаты, по тематике «Строительство». Статьи принимаются в тот или иной номер в соответствии с тематикой на текущее полугодие.

№	Дата выхода	Срок подачи материалов	Тема номера
1(53)	13.02.2015	26.12.2015	Строительные конструкции. Строительная механика
2(54)	27.03.2015	16.02.2015	Технология и организация строительства. Строительные материалы и изделия
3(55)	30.04.2015	16.03.2015	Гидротехническое строительство. Основания и фундаменты
4(56)	26.06.2015	11.05.2015	Сопротивление материалов. Строительная механика

Структура и содержание статей

Обязательны следующие элементы статьи: введение, включающее обзор иностранной и отечественной литературы и постановку задачи; основная часть (описание исследования); заключение, включающее нумерованные выводы; список литературы; источник финансирования (если есть).

Технические требования к статьям

Статьи подаются в формате docx (MS Word 2007–2013). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Все эти поля заполняются отдельно при подаче через электронную редакцию.

Рекомендуемый объем статей: от 15000 до 30000 знаков с пробелами. Таблицы выполняются средствами Word (не рисунками) и располагаются внутри текста статьи. Иллюстрации должны быть представлены в отдельных графических файлах (один рисунок – один файл). Допустимые форматы: JPEG, TIFF, BMP. В текстовый файл иллюстрации можно вставить для обозначения рекомендуемого места их использования.

Список литературы на русском языке должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008. Цитируемая литература приводится общим списком в конце статьи в порядке упоминания. Порядковый номер в тексте заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. Также к статье прилагается список литературы на латинице, оформленный в соответствии с инструкцией по транслитерации списка литературы, размещенной на сайте издания.

Аннотация к статье

В журнал подается расширенная аннотация на двух языках: русском и английском. Особое внимание следует уделить аннотации на английском языке (если статья на русском). Аннотация должна повторять структуру статьи: актуальность, цель, методика, результаты, выводы. Аннотация должна содержать от 100 до 250 слов.

Подробные требования к статьям см. на сайте журнала:
http://www.engstroy.spb.ru/autors.html

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Инженерно-строительный институт
Центр дополнительных профессиональных программ

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
тел/факс: 552-94-60, www.stroikursi.spbstu.ru,
stroikursi@mail.ru

Приглашает специалистов проектных и строительных организаций,
не имеющих базового профильного высшего образования
на курсы профессиональной переподготовки (от 500 часов)
по направлению «Строительство» по программам:

П-01 «Промышленное и гражданское строительство»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Основы проектирования зданий и сооружений***
- ***Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD***
- ***Автоматизация сметного дела в строительстве***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций технического заказчика***

П-02 «Экономика и управление в строительстве»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Экономика и ценообразование в строительстве***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Организация, управление и планирование в строительстве***
- ***Автоматизация сметного дела в строительстве***

П-03 «Инженерные системы зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы механики жидкости и газа***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем вентиляции и кондиционирования***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем отопления и теплоснабжения***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения***
- ***Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD***
- ***Электроснабжение и электрооборудование объектов***

П-04 «Проектирование и конструирование зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы сопротивления материалов и механики стержневых систем***
- ***Проектирование и расчет оснований и фундаментов зданий и сооружений***
- ***Проектирование и расчет железобетонных конструкций***
- ***Проектирование и расчет металлических конструкций***
- ***Проектирование зданий и сооружений с использованием AutoCAD***
- ***Расчет строительных конструкций с использованием SCAD Office***

П-05 «Контроль качества строительства»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Проектирование и расчет железобетонных конструкций***
- ***Проектирование и расчет металлических конструкций***
- ***Обследование строительных конструкций зданий и сооружений***
- ***Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика***

По окончании курса слушателю выдается диплом о профессиональной переподготовке установленного образца, дающий право на ведение профессиональной деятельности