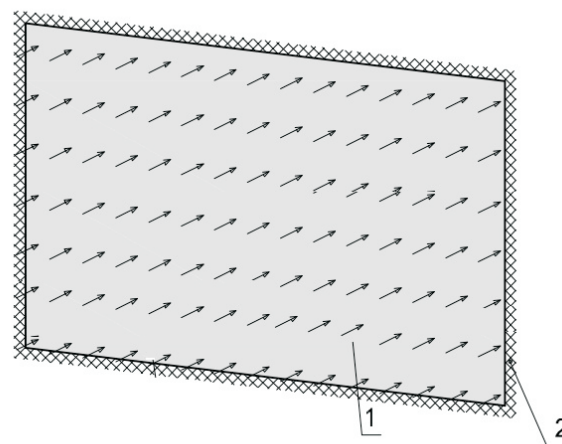
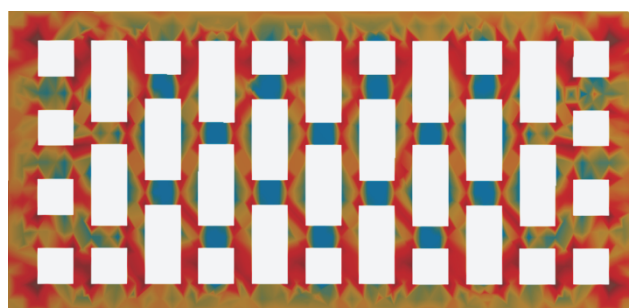
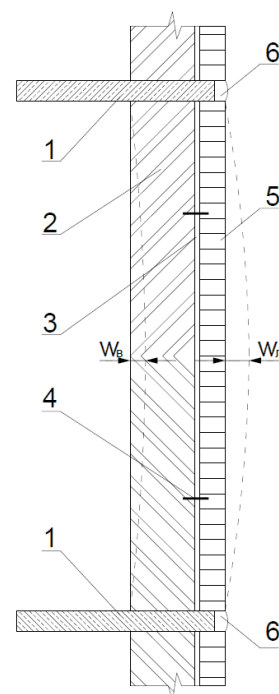
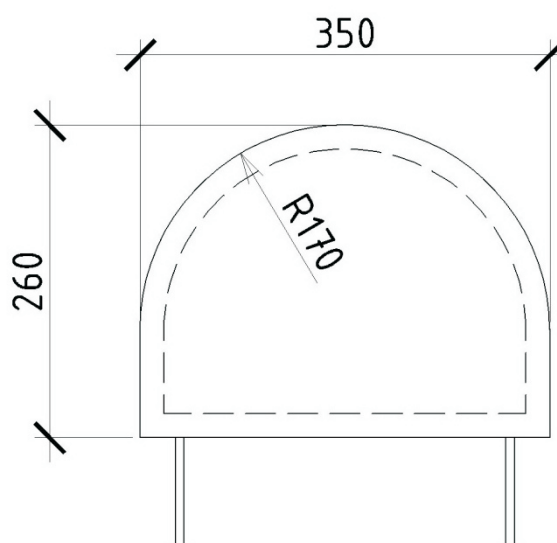




№8(60) декабрь 2015



**ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ.
СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**



**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](http://www.engstroy.spb.ru) – полнотекстовая версия журнала в сети Интернет. Бесплатный доступ, обновление с каждым новым выпуском

Инженерно-строительный журнал

НАУЧНОЕ 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 политехнический университет Петра Великого

Адрес редакции:

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

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Научный редактор:

Николай Иванович Ватин

Литературный редактор:

Екатерина Игоревна Архипова

Редакционная коллегия:

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.ф.-м.н., проф. М.Н. Кирсанов;
D.Sc., professor М. Кнежевич;
д.т.н., проф. В.В. Лалин;
д.т.н., проф. Б.Е. Мельников;
д.т.н., проф. Ф. Неправишта;
д.т.н., проф. Р.Б. Орлович;
Dr. Sc. Ing., professor Л. Пакрастиньш;
Dr.-Ing. Habil., professor X. 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.

Установочный тираж 1000 экз.

Подписано в печать 24.12.15.
Формат 60x84/8, усл. печ. л. 10,5.
Заказ №3203.

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

Содержание**СОБЫТИЯ**

- IX международный конгресс «Энергоэффективность. XXI век» 3

МЕТОДЫ

- Никольский С.Г., Перцева О.Н., Иванова В.И.
Обоснование экспресс-метода определения морозостойкости пористых материалов 7
- Зубков С.В., Улыбин А.В., Федотов С.Д. Исследование механических свойств кирпичной кладки методом плоских домкратов 20

КОНСТРУКЦИИ

- Орлович Р.Б., Деркач В.Н., Зимин С.С. Повреждение каменного лицевого слоя в зоне сопряжения с железобетонными перекрытиями 30
- Деркач В.Н. Сопротивление ветровым воздействиям поэтажно опертых многослойных стен с облицовочным слоем 38
- Лещенко М.В., Семко В.А. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона 44

АНАЛИЗ

- Портнягин Д.Г. Повышение теплозащиты узлов ограждающих конструкций зданий с применением пеностеклокристаллического материала 56
- Горшков А.С., Рымкевич П.П. Диаграммный метод описания процесса нестационарной теплопередачи 68

© ФГАОУ ВО СПбПУ, 2015

На обложке: иллюстрации авторов к статьям номера

Контакты:

Тел. +7(812)535-52-47 E-mail: mce@ice.spbstu.ru

Web: <http://www.engstroy.spb.ru>

[Http://www.engstroy.spb.ru](http://www.engstroy.spb.ru) – full-text open-access version in Internet. It is updated immediately with each new issue.

Magazine of Civil Engineering

SCHOLAR JOURNAL

ISSN 2071-4726

Peer-reviewed scientific journal

Start date: 2008/09

8 issues per year

Publisher:

Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University

Corresponding address:

227a Hydro Building, 29
Polytechnicheskaya st., Saint-
Petersburg, 195251, Russia

Editor-in-chief:

Vera M. Yakubson

Science editor:

Nikolay I. Vatin

Copy editor:

Ekaterina I. Arkhipova

Editorial board:

V.V. Babkov, D.Sc., professor
M.I. Balzannikov, D.Sc., professor
A.I. Borovkov, PhD, professor
M. Veljkovic, PhD, professor
E.K. Zavadskas, D.Sc., professor
M.N. Kirsanov, D.Sc., professor
M. Knezevic, D.Sc., professor
V.V. Lalin, D.Sc., professor
B.E. Melnikov, D.Sc., professor
F. Nepravishta, D.Sc., assoc.
professor
R.B. Orlovich, D.Sc., professor
L. Pakrastinsh, Dr.Sc.Ing., professor
H. Pasternak, Dr.-Ing.habil.,
professor
A.V. Perelmuter, D.Sc., professor
A.N. Ponomarev, PhD, professor
M.Kh. Strelets, D.Sc., professor
O.V. Tarakanov, D.Sc., professor

Contents

EVENTS

- IX International congress “Energy efficiency. XXI
century” (rus) 3

METHODS

- Nikolskiy S.G., Pertseva O.N., Ivanova V.I.
Substantiation of an express-method for determining the
freeze-thaw resistance of cellular materials (rus) 7
Zubkov S.V., Ulybin A.V., Fedotov S.D. Assessment of
the mechanical properties of brick masonry by a flat-jack
method (rus) 20

STRUCTURES

- Orlovich R.B., Derkach V.N., Zimin S.S. The damage of a
stone facing layer at the junction with reinforced concrete
floors (rus) 30
Derkach V.N. Wind load resistance of multilayer walls
supported floor-by-floor with a facing layer (rus) 38
Leshchenko M.V., Semko V. Thermal characteristics of
the external walling made of cold-formed steel studs and
polystyrene concrete (rus) 44

ANALYSIS

- Portnyagin D.G. Improving the thermal performance of
the building envelopes with the use of foam glass-
ceramics (rus) 56
Gorshkov A.S., Rymkevich P.P. A diagram method of
describing the process of non-stationary heat transfer (rus) 68

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. All rights reserved.

On the cover: authors' illustrations

+7(812) 535-52-47

E-mail: mce@ice.spbstu.ru

Web: [Http://www.engstroy.spb.ru](http://www.engstroy.spb.ru)

doi: 10.5862/MCE.60.1

IX международный конгресс «Энергоэффективность. XXI век»

IX International congress "Energy efficiency. XXI century"

Ключевые слова: энергоэффективность зданий; энергосбережение; конференция; российское законодательство; ограждающие конструкции; строительная теплофизика; капитальный ремонт

Key words: energy efficiency; buildings; construction; energy saving; conference; Russian laws; building envelope; thermophysics; major repairs

Аннотация. Статья посвящена проходившему 11 ноября 2015 г. в Санкт-Петербурге конгрессу «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий». Кратко освещена тематика основных докладов пленарного заседания, преимущественно посвященных законодательству в области энергосбережения. Также приведено краткое содержание докладов секции «Строительная теплофизика: повышение энергетической эффективности жилых и общественных зданий при капитальном ремонте и реконструкции».

Abstract. The congress "Energy efficiency. XXI century. Engineering methods for reducing the energy consumption in buildings" took place in St. Petersburg on 11 November 2015. The article describes the main reports of the plenary meeting, primarily devoted to the Russian laws in the energy saving field. Furthermore, the summary of reports of the section "Building thermophysics: increasing the energy efficiency of residential and public buildings during the major repairs and reconstruction" is given.



11 ноября 2015 г., в Международный день энергосбережения, в Санкт-Петербурге проходил конгресс «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий». Традиционно конгресс является главным событием в области энергосбережения в городе и объединяет специалистов в различных областях, связанных с энергоэффективностью зданий.

Открыл пленарное заседание конгресса Леонид Юрьевич Питерский, вице-президент Национального объединения организаций в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Он сообщил собравшимся о постановлении Правительства РФ ДМ/П–16 7296 «О разработке до 22 марта 2016 года дорожной карты по повышению энергоэффективности зданий, направленную на снятие различных барьеров на пути реализации мероприятий по повышению энергоэффективности» от 26.10.2015. По его словам, это очень важный шаг, которого ждали все участники процесса в последние годы. Ответственный исполнитель постановления – Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. В процессе подготовки дорожной карты будут активно задействованы Национальные объединения и другие профессиональные сообщества. С 1 декабря по 15 января пройдет общественное обсуждение проекта.

Разработку дорожной карты по повышению энергоэффективности зданий активно одобряли все докладчики, поскольку текущая нормативная ситуация в этой области, по их мнению, плачевная. Основным законодательным актом в этой области является ФЗ–261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», принятый в 2009 г. Большая часть показателей, прописанных в этом законе, до сих пор не выполнена, но ответственность за это в законе не прописана. Например, такова ситуация с установкой приборов учета воды и электроэнергии, которые должны были быть установлены до конца 2012 г. По словам Валерия Вячеславовича Полупанова, председателя Государственного комитета Псковской области по строительному и жилищному надзору, данное требование зачастую не выполняется, а ответственность собственников за это не предусмотрена. По мнению докладчика, для эффективного выполнения закона, в частности, требуется очередная реформа ЖКХ, включающая:

- установление ответственности собственников жилых помещений за выполнение требований ФЗ–261;
- ужесточение санкций неплательщикам;
- реформа системы оплаты коммунальных услуг.

Еще одну подобную проблему отметил главный государственный инспектор отдела по надзору за тепловыми энергоустановками и энергосбережения Северо-Западного управления Ростехнадзора Михаил Валерьевич Литвин. Ростехнадзор осуществляет проверки организаций, которые в соответствии с законом должны были провести энергообследование и разработать программы энергосбережения (это государственные и муниципальные организации, а также поставщики ресурсов). Применить какие-либо карательные меры к тем, кто эти требования не выполняет, также невозможно, так как срок давности этих нарушений истек в 2014 году.



Другим принципиальным фактором, влияющим на развитие энергоэффективности в области строительства, является экономический кризис. С одной стороны, как отметил в своем выступлении Игорь Степанович Кожуховский, заместитель генерального директора ФГБУ «Российское энергетическое агентство», с 2015 г. прекращено финансирование программы энергоэффективности из федерального бюджета, а также сокращается объем финансирования из региональных бюджетов. С другой стороны, бизнес также меньше расположен к затратам на энергоэффективность. Вице-

президент Санкт-Петербургской торгово-промышленной палаты Антон Михайлович Мороз заметил, что в условиях кризиса заказчики стремятся сэкономить на всем и одними из первых сокращают в проектах меры энергосбережения. В связи с этим, по мнению докладчика, необходимо внедрение дополнительных стимулирующих мер для бизнеса: льготные условия кредитования, модернизация нормативной документации, налоговые льготы для производителей строительных материалов и строителей, внедряющих энергоэффективные решения.

Отдельно А.М. Мороз отметил проблему импортозамещения: до сих пор практически все инновационные материалы, необходимые для повышения энергоэффективности зданий, были импортными. Мгновенно без ущерба для отрасли импортозамещение здесь провести невозможно. Этой же проблемы коснулся в своем выступлении Георгий Геннадьевич Литвинчук, генеральный директор маркетингового агентства «Литвинчук Маркетинг»: по его словам, в области вентиляции, кондиционирования и отопления на данный момент есть только три сегмента рынка, в которых доля российской продукции значительна. Это вентиляционное оборудование, воздушное отопление и промышленные котлы. В остальных сегментах эта доля составляет от 0 до 30 %. В данной ситуации говорить о срочном импортозамещении также сложно, хотя отопление, по сути, является стратегической отраслью экономики.

Несмотря на множество проблем в отрасли, отмеченных выступающими, также были приведены и положительные примеры. Так, А.М. Мороз отметил, что, несмотря на общее падение рынка энергоаудита, спрос на данные услуги со стороны владельцев частных малоэтажных домов, наоборот, вырос. Соответственно, этот сегмент рынка является перспективным для внедрения энергоэффективных материалов и технологий.

Генеральный директор консорциума «ЛОГИКА-ТЕПЛОЭНЕРГОМОНТАЖ» Павел Борисович Никитин рассказал о некоторых результатах совместного проекта РФ и МБРР «Реформа ЖКХ в России». Этот проект подразумевает реконструкцию инфраструктуры и внедрение информационной системы в многоквартирных жилых домах. Именно такие проекты, по мнению докладчика, способны показать бизнесу, что жилищно-коммунальный комплекс может работать эффективно и, соответственно, в него стоит вкладывать деньги. П.Б. Никитин рассказал об опыте внедрения автоматизированной системы регулирования теплообеспечения в г. Чебоксары. По его словам, при наличии автоматики и прямой связи между затратами тепла и оплатой услуг ЖКХ эффективность энергосберегающих мероприятий для собственников становится очевидной.



Лариса Степановна Барина, первый заместитель председателя Комитета ТПП РФ по предпринимательству в сфере строительства, рассказала о перспективах технического

регулирования в области энергоэффективности зданий. По ее мнению, будущее за параметрическим методом нормирования, на который, в частности с 2015 года переходит Китай. В отличие от используемого в отечественных нормативных документах предписывающего метода, параметрический метод лишь задает определенные итоговые параметры для каждого класса здания. Например, в области энергоэффективности это могут быть тепловые потери или затраты энергии на отопление. Вопрос о том, какими мерами достигать этих показателей, решается самостоятельно заказчиком или проектировщиком.

Традиционно, помимо пленарного заседания, на конгрессе работало несколько секций по всем основным направлениям, задействованным в энергосбережении: отоплению, вентиляции и кондиционированию, водоснабжению и канализации, приборам учета и т.п. На секции «Строительная теплофизика: повышение энергетической эффективности жилых и общественных зданий при капитальном ремонте и реконструкции» обсуждались важнейшие вопросы энергосбережения в ограждающих конструкциях зданий.



Основной тематикой секции также стала нормативная база, но в более узком контексте. Доклад Зои Лягард, руководителя проекта G20 при Международном партнерстве по сотрудничеству в области энергетической эффективности, включал рекомендации для разработчиков локальных норм в области энергоэффективности зданий. Она отметила такие общие проблемы, как разрозненность заинтересованных лиц, недостаток информации, несоответствия между законодательством на региональном и государственном уровнях, недостаток экспертов и возможностей обучения. Среди основных проблем, характерных именно для России, она также отметила непроработанное законодательство, нерыночные цены на энергию и сложности при сборе данных. При планировании нормотворческой деятельности З. Лягард рекомендовала в первую очередь обозначить цель работы и ее охват; определить методологию; найти поддерживающие организации или ведомства. Что касается методологии, то она, так же как и Л.С. Барина, выделила предписывающий и параметрический подходы к нормотворчеству. По ее мнению, второй подход дает большую свободу проектировщикам и позволяет более гибко регулировать затраты заказчикам.

Одним из замечательных примеров новой российской нормативной документации в области энергосбережения является практическое пособие по повышению энергетической эффективности многоквартирных домов при капитальном ремонте, разработанное ОАО «НИИМострой» и ОАО «Инсолар-Инвест». Об этом документе говорилось в трех докладах на секции.

Григорий Петрович Васильев, заместитель генерального директора ОАО «НИИМострой», осветил в своем докладе методологические основы документа. Прежде всего он отметил актуальность данного проекта: в условиях кризиса капитальный ремонт – одно из немногих стабильных направлений развития строительной отрасли. Кроме того, стоит учитывать очередное повышение требований к энергоэффективности зданий с 1 января 2016 г. По мнению Г.П. Васильева, требования к домам после капитального ремонта должны быть такими же, как к новым зданиям. Несоответствие требованиям по энергосбережению не может являться основанием для постановки дома на капитальный ремонт. Но если капитальный ремонт уже



проводится, необходимо включить в него мероприятия по энергосбережению. Помимо других причин, внедрение энергосберегающих технологий обойдется в данном случае сравнительно дешевле: например, стоимость утепления стен, если фасад в любом случае подвергается ремонту, будет значительно ниже, чем если это делать отдельно. Решение о выборе каких-либо конкретных мероприятий должно осуществляться исходя из жизненного цикла здания после ремонта не менее 30 лет с учетом повышения тарифов на энергоресурсы.

Виктор Федорович Горнов, руководитель Центра энергосбережения и эффективного использования энергии в строительном комплексе ОАО «НИИМострой», более подробно рассказал об экономической составляющей пособия. Для каждого мероприятия был рассчитан срок окупаемости с учетом двух составляющих затрат: потребительских и муниципальных. Получен чистый дисконтированный доход, приведенный к 1 м² и к 1 кВт·час, для жителей домов и для муниципалитета. Расчет базировался на сроке окупаемости мероприятий не более 30 лет,

текущей ставке рефинансирования, а также региональных данных по тарифам, их росту, затратам на инфраструктуру и т.п.

Помимо отдельных мероприятий, в пособии предложены их «пакеты» для достижения определенных параметров энергоэффективности. Для них проведены те же экономические расчеты. Все расчеты были произведены для неких стандартных зданий. Поэтому дополнительно приведены формулы для самостоятельного расчета экономической эффективности мероприятий для конкретных зданий по их параметрам.

О другом документе – проекте РМД «Обеспечение энергетической эффективности в существующих зданиях» – рассказала заведующая кафедрой строительной физики и химии Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Тамара Александровна Дацюк. Данные рекомендации ориентированы на существующие здания, построенные по старым нормам, но пока не подлежащие капитальному ремонту. Адресат – инженерные кадры ТСЖ, готовящие текущий ремонт зданий. Таким образом, документ пытались сделать максимально простым и доступным. Во-первых, он включает методику экспресс-аудита здания, то есть получения минимальной необходимой информации по энергопотреблению здания собственными силами. В методику включено инструментальное обследование в следующих основных направлениях:

- микроклимат;
- тепловая защита зданий;
- расходы тепла на отопление и вентиляцию;
- определение освещенности;
- расход электроэнергии.

Кроме того, приведены методики обследования систем здания на предмет определения энергопотребления как по приборам учета, так и при их отсутствии.

По стандартным сериям домов приведены конкретные рекомендации: толщина утепления стен; рекомендуемые энергосберегающие мероприятия; отдельно рекомендации по кровлям.



Для обоих документов одним из важнейших параметров является определение срока окупаемости энергосберегающих мероприятий. Отдельно этому вопросу был посвящен доклад Александра Сергеевича Горшкова, директора учебно-научного центра «Мониторинг и реабилитация природных систем» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Он рассказал о современных принципах определения окупаемости: в отличие от простой окупаемости, которая использовалась при расчетах в советское время, современные условия требуют учитывать дисконтирование, то есть инфляцию и рост тарифов, а также то, что затраченные средства в абсолютном большинстве случаев являются кредитными. На примере фасадов зданий А.С. Горшков показал, как рассчитывается экономическая эффективность энергосберегающих решений. Основным условием является срок окупаемости меньше прогнозируемого срока эксплуатации. Например, получен срок окупаемости штукатурного фасада 18 лет при использовании кредитных средств и 15 лет без них (например, при использовании средств Фонда капитального ремонта). Прогнозируемый срок службы таких фасадов – 30 лет. Таким образом, мероприятие считается эффективным. Для вентфасадов получена окупаемость 30 и 27 лет соответственно. Срок службы таких фасадов анонсируется 50 лет, хотя такие данные пока на практике не подтверждены.

Таким образом, если судить по секции «Строительная теплофизика», нормотворчество в области энергоэффективности зданий активно развивается как в методическом, так и в практическом аспектах.



Текст: В.М. Якубсон
Фотографии предоставлены организаторами

doi: 10.5862/MCE.60.2

Обоснование экспресс-метода определения морозостойкости пористых материалов

Substantiation of an express-method for determining the freeze-thaw resistance of cellular materials

*Д-р техн. наук, профессор С.Г. Никольский,
студент О.Н. Перцева,
студент В.И. Иванова,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия*

*S.G. Nikolskiy,
O.N. Pertseva,
V.I. Ivanova,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic
University, St. Petersburg, Russia*

Ключевые слова: морозостойкость; пористые материалы; бетон; термоциклирование; остаточная деформация; предел прочности; неразрушающий метод

Key words: freeze-thaw resistance; cellular material; concrete; thermal cycling; permanent set; compression resistance; nondestructive method

Аннотация. Известно, что существующие методы определения морозостойкости бетона и других пористых материалов обладают высокой трудоемкостью и малой оперативностью. Следовательно, необходимо создание нового ускоренного метода. В статье предложен и обоснован экспрессный метод определения морозостойкости бетона. Предложенная технология измерения морозостойкости пористых материалов основана на вычислении величины z – отношения относительного снижения предела прочности R к относительной остаточной деформации ε в направлении, перпендикулярном сжатию. Выявлено, что это отношение является постоянным для конкретного состава бетона и не зависит от значений R и ε . Также доказано, что значения не чувствительны к замене части термоциклов механическими. Указанные аспекты позволили сократить время определения морозостойкости бетонов и снизить трудоемкость проводимых испытаний. Предложенный метод был реализован на 10 бетонных образцах следующего состава: портландцемент марки 400 – 1 весовая часть, песок – 2 весовые части, гранитный щебень 5...20 мм – 4.5 весовые части, вода – 0.6 весовой части. Образцы-кубы, согласно предложенному методу, насыщали водой, обмеряли, подвергали попеременному замораживанию и оттаиванию, а также осевому сжатию до достижения экстремальных нагрузок. Затем рассчитывали морозостойкость для каждого образца и вычисляли среднее значение F выборки. Полученное значение сравнили с известным ранее значением морозостойкости для данной смеси, полученным по базовому методу. Таким образом, был обоснован новый метод ускоренного определения морозостойкости пористых материалов, который отличается повышенной оперативностью, малой трудоемкостью и экономичностью.

Abstract. An express method for determining the freeze-thaw resistance of cellular materials was offered and substantiated in this article. The proposed measurement technology of concrete frost resistance is based on the computation of the value z which is the ratio of the relative decrease of compression resistance R to the relative permanent set ε in the direction which is perpendicular to the pressure. It was found that this ratio is constant for a given composition of the concrete and does not depend on the values of R and ε . It was also proved that the values are not sensitive to the replacement of mechanical thermal cycles. These aspects will decrease the time for determining the freeze-thaw resistance of concrete and reduce the labor intensity of the tests conducted. The proposed method has been implemented on 10 samples of concrete with the following composition: Portland cement 400 (12.3 %), sand (24.7 %), granite macadam of dimensions 5...20 mm (55.6 %), water (7.4 %). Specimen cubes, according to the proposed method, were saturated with water, measured, subjected to alternate freezing and thawing and axial compression to achieve extreme loads. Then the frost resistance for each sample and the mean sample value F were calculated. The resulting value was compared with the freeze-thaw resistance, which was received for the mixture by the basic method. Thus, a new accelerated method for the determination of the freeze-thaw resistance of cellular materials was substantiated. It is highly efficient, simple, and has a low cost.

Nikolskiy S.G., Pertseva O.N., Ivanova V.I. Substantiation of an express-method for determining the freeze-thaw resistance of cellular materials

Введение

Бетон – один из самых распространенных строительных материалов, его применяют для строительства гражданских и промышленных зданий, гидротехнических сооружений и дорог. На территории РФ объем реализованной бетонной смеси за период с января по август 2014 года составил 19.6 миллионов м³ – по данным Федеральной службы государственной статистики РФ, это на 7 % процентов больше по сравнению с аналогичным периодом предыдущего года. Широкая область применения и динамика объемов производства бетона обуславливают повышенный интерес к его основным характеристикам в сфере научных исследований.

В настоящее время при производстве цементных бетонов все чаще используются различные химические добавки, а значит, свойства бетона и бетонной смеси теперь зависят не только от таких базовых параметров, как вид цемента [1] и заполнителя, водоцементного отношения и т.д., но и от наличия и вида добавок [2]. В зависимости от назначения химические добавки делятся на группы согласно ГОСТ 24211–2008. Их использование позволяет улучшить необходимые свойства бетонов и бетонных смесей [3], будь то удобоукладываемость, прочность, водонепроницаемость или морозостойкость [4]. Однако применение новых добавок, как и использование любых новых технологий, требует предварительного проведения испытаний. Таким образом, для облегчения внедрения новых технологий в сферу производства бетонов необходимо максимально упростить процесс лабораторных испытаний его свойств [5]. Так, например, доказано, что прямые и косвенные способы определения прочности бетона дают схожие результаты [6], а использование косвенных методов во многом упрощает нахождение его основных параметров. Однако для определения морозостойкости бетона оказывается недостаточной замена прямого способа определения прочности косвенным, поскольку, согласно базовому методу, до этого образцы необходимо подвергать многократному попеременному замораживанию и оттаиванию. Следовательно, необходимо создание нового ускоренного метода проведения лабораторных испытаний для оценки морозостойкости различных естественных и искусственных камней, а также других пористых материалов.

Обзор литературы

Под показателем F морозостойкости бетона подразумевают [7] число циклов замораживания до $-(18 \pm 2)^\circ\text{C}$ насыщенных образцов камня и оттаивания при $18 \pm 2^\circ\text{C}$ (стандартных термоциклов), необходимых для снижения исходного предела прочности камня $R_{\text{н}}$ на величину δR . Например, для тяжелых бетонов допустимое стандартное снижение $R_{\text{н}}/R_{\text{н}}$ составляет 0.1, а для легких бетонов – 0.15 [8]. Значительный разброс значений предела прочности образцов бетона (коэффициент вариации $\rho \approx 17\%$ [8]) при неизменных условиях их изготовления и испытаний обуславливает случайный разброс выбора средних значений R в пределах $\Delta R/R = \pm \rho \sqrt{n}$, где n – объем выборки образцов. При этом для доказательства значимости относительного снижения R на 0.1...0.15 приходится испытывать до 50 образцов, обеспечивая $\Delta R = 0.068R$ при доверительной вероятности 0.95. Таким образом, основные недостатки базового способа – трудоемкость и малая оперативность, так как продолжительность стандартного термоцикла не менее 4.5 часов [9], а $F \gg 50$. Европейские стандарты [10] определения морозостойкости бетонов несколько отличаются от российских [11], однако они также являются недостаточно оперативными и трудоемкими [12, 13].

Помимо базовых способов существуют экспресс-методы, которые значительно упрощают определение морозостойкости, но при этом обладают другими существенными недостатками [14]. Так, например, дилатометрический экспресс-метод определения морозостойкости [15], который является прототипом описываемого метода, приемлем только для портландцементного и шлакопортландцементного бетона без добавления поверхностно-активных веществ (ПАВ). Ограничен в области применения и метод с использованием планшетного сканера [16].

Постановка задачи

Задачей проекта является обоснование универсального экспресс-метода определения марки морозостойкости F естественных и искусственных камней (кирпича, бетона) с помощью оценки длительной прочности неразрушающим методом.

Описание метода

Целесообразно получать информацию о накоплении поврежденности Π материала в процессе термоциклирования при $c \ll F$, учитывая, например, тот факт, что экспериментальные данные связи Π и c хорошо аппроксимируются (рис. 1 и 2) зависимостями $\Pi = A c^q$, где Π – мера поврежденности, в частности δR ; $A = \Pi$ при $c = 1$; $q \geq 1$ – постоянная материала.

В этом случае, термоциклируя представительную выборку образцов, можно для каждого i -го образца определить неразрушающим методом значение исходного предела прочности R и R_c после числа термоциклов $c \ll F$ с точностью $\pm 3\%$ [17], рассчитать морозостойкости F_i , а выборочные средние $\bar{F} = \sum F_i / n$ использовать как оценку морозостойкости F камня.

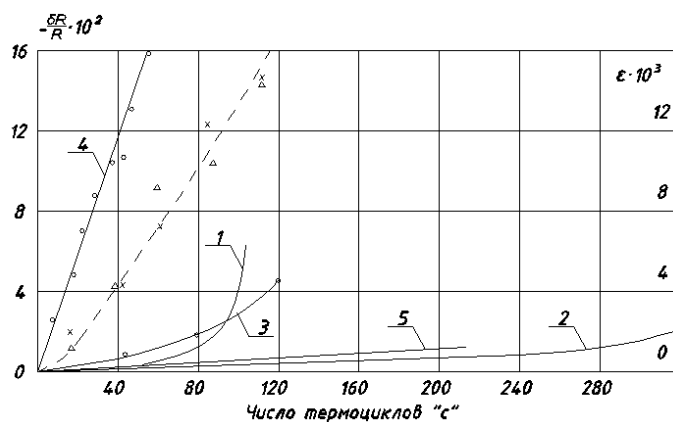


Рисунок 1. Зависимости относительного снижения предела прочности $\delta R/R$ и остаточной деформации ϵ бетона от числа термоциклов.

По данным [18]: $\times$ – $\delta R/R$; Δ – ϵ . По данным [19, рис. 24]: 1 – ϵ бетона без добавок; 2 – ϵ для бетона с добавкой ГКЖ-94; 3 и 4 – ϵ и $\delta R/R$ для бетона с известняковым щебнем [19, рис. 14]; 5 – ϵ для раствора [19, рис. 13]

Оценим максимальные погрешности (абсолютную ΔF и относительную $\Delta F/F$) при определении F с помощью зависимости

$$\delta R = A \cdot c^q, \quad (1)$$

где $A = \delta R_1$ – снижение предела прочности в результате первого термоцикла ($c = 1$);

$$q = \{\ln(\delta R_c / \delta R_1)\} / (\ln c); \quad (2)$$

δR_c – снижение R в результате c циклов.

Подставив в левую часть (1) $[\delta R/R]R$, а в правую – F вместо c , получаем $[\delta R/R]R = A F^q$. Разделив такой результат на (1), находим $(F/c)^q = [R/R] \bar{R} / \delta R_c$. Логарифмирование этого равенства дает выражение $q \ln (F/c) = \ln [R/R] + \ln \bar{R} - \ln \delta R_c$, а после дифференцирования имеем:

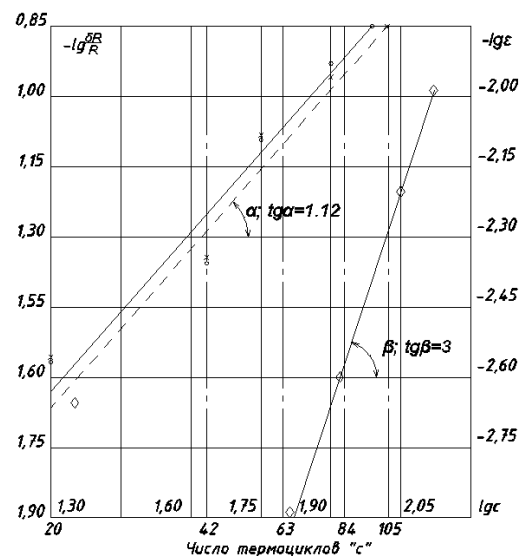


Рисунок 2. Отражение в логарифмических координатах зависимостей относительного снижения предела прочности $\delta R/R$ и остаточной деформации ϵ от числа термоциклов: по данным [12] $\bullet$ – для $\delta R/R$, $\times$ – для ϵ ; по данным [9] $\blacklozenge$ – для ϵ

$$q \frac{\Delta F}{F} + \ln \left(\frac{c}{c_0} \right) \Delta q = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \Rightarrow$$

$$\pm \frac{\Delta F}{F} - \frac{1}{q} \left| \frac{\Delta R}{R} \right| + \left| \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \right| + \ln \left(\frac{c}{c_0} \right) \left| \frac{\Delta q}{q} \right| = 0, \quad (3)$$

где $\Delta R/R$, $\Delta \delta R_c/\delta R_c \gg \Delta R/R$ и $\Delta R/R$ – максимальные относительные погрешности определения, соответственно, начального значения R , снижения R после c циклов или значения q ; $\Delta R/R = 0.03$ при использовании неразрушающего метода, или 0.068 – при испытании выборок объемом 25 образцов; $\Delta \delta R = 2\Delta R$.

Таким образом, $\Delta F/F$ обусловлена погрешностями определения прочности $\Delta R/R + \Delta \delta R_c/\delta R_c$ с множителем $1/q$ и погрешностью $\Delta q/q$ с множителем $\ln(c/c_0)$. Если q действительно равно 1 ($\Delta q = 0$), то из (3) получаем погрешность расчета F по зависимости $\delta R = \delta R_1 c$ в виде:

$$\pm \frac{\Delta F}{F} = \left| \frac{\Delta R}{R} \right| + \left| \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \right|, \quad (4)$$

где $\Delta R/R \approx 0.03$; $\Delta \delta R_c = 2\Delta R \approx 0.06R$; $\delta R_c \leq [\delta R/R] = (0.05...0.15)R$. Следовательно, при контроле F по δR и справедливости линейной аппроксимации, даже при достижении значения $[\delta R/R]$, погрешность $\Delta F/F$ может превышать 120 % и, чтобы снизить ее хотя бы до 15 %, необходимо довести δR_c до $0.5\delta R = 10[\delta R/R]$ или испытать более 64 образцов до $[\delta R/R]$ при использовании неразрушающего контроля δR .

Дифференцирование (2) дает:

$$\Delta q = \frac{1}{\ln c} \left\{ \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} + \frac{\Delta \delta R_1}{\delta R_1} \right\}$$

$$\frac{\Delta q}{q} = \frac{1}{\ln(\delta R_c / \delta R_1)} \left\{ \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} + \frac{\Delta \delta R_1}{\delta R_1} \right\}, \quad (5)$$

где $\Delta \delta R_c = \Delta \delta R_1 = 2\Delta R$; $\delta R_c = \delta R_1 c^q$; $\Delta \delta R_1/\delta R_1 \gg \Delta R/R$.

Подставив (5) в (3), получаем:

$$\pm \frac{\Delta F}{F} = \frac{1}{q} \left\{ \left| \frac{\Delta R}{R} \right| + \left| \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \right| + \left(\ln \frac{F}{c} \right) \left(\frac{1+c^q}{\ln c} \right) \left(\frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \right) \right\}$$

$$\frac{\Delta F}{F} \approx \frac{1}{q} \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c} \left\{ 1 + \left(\ln \frac{F}{c} \right) \left(\frac{1+c^q}{\ln c} \right) \right\}. \quad (6)$$

Множитель $\frac{1+c^q}{\ln c}$ при $q=1$ имеет минимум, когда $c=4$, и численно равен 3.6.

При $F=40$ и $c=4$ $\ln(F/c) \approx 2.3$; $\left(\ln \frac{F}{c} \right) \left(\frac{1+c^q}{\ln c} \right) \approx 8.3$, а $\frac{\Delta F}{F} \approx \frac{9.3}{q} \frac{\Delta \delta R_c}{\delta R_c}$. Так как

$\Delta \delta R_c = \delta R_c$ (при малых c), то $\Delta F/F \approx 9.3/q$. Этот результат доказывает, что при

использовании δR в качестве Π вклад погрешности определения q в $\Delta F/F$ минимум в 8 раз больше вклада погрешностей определения R . Следовательно, уменьшения $\Delta F/F$ целесообразно добиваться уменьшением Δq – см. (3).

Решить эту задачу можно, в частности, измеряя в процессе термоциклирования параллельно с δR другую характеристику поврежденности материала со значительно меньшей относительной погрешностью – например, относительную остаточную деформацию $\varepsilon = \delta l / l$, где $l \approx 100$ мм – длина базы, на которой измеряют эту деформацию; $\delta l = l_c - l$ – абсолютная деформация на заданной базе; l_c – длина базы после c термоциклов.

При измерении базы образца с помощью инструментального микроскопа или измерительной скобы с индикатором часового типа (точность 1 мкм) погрешность $\Delta l / l$ можно свести к 10^{-5} . У бетонов ε после первых термоциклов превышает $2 \cdot 10^{-3}$. Так как $\ln \varepsilon = \ln \delta l - \ln l_c$, то соответствующая погрешность $\Delta \varepsilon / \varepsilon = \frac{\Delta \delta l}{\delta l} + \frac{\Delta l}{l} \approx 2 \cdot 10^{-2}$ в пять раз меньше, чем при использовании в качестве меры поврежденности предела прочности R . Если отношение $z = (\delta R / R) / \varepsilon$ постоянно для конкретного бетона, то в соответствии с (3) $(F/c)^q = [\delta R / R] / z \cdot \varepsilon_c$, где $\varepsilon_c = \delta l_c / l$, а δl_c – изменение начального значения l (базы) после c термоциклов. По аналогии с выводом (6) находим:

$$q(\ln F/c) = \ln[\delta R/R] - \ln z - \ln \delta l_c + \ln l, \quad (\ln F/c)\Delta q + q \frac{\Delta F}{F} = -\frac{\Delta z}{z} - \frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} + \frac{\Delta l}{l}, \quad \text{или} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{1}{q} \left\{ \frac{\Delta z}{z} + \frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} + \frac{\Delta l}{l} \right\} + \frac{\Delta q}{q} (\ln F/c).$$

Если $z = \text{const}$, то в соответствии с (1) $\varepsilon_c = \varepsilon_1 c^q$, а $q \ln c = \ln \varepsilon_c - \ln \varepsilon_1$. Тогда

$$|\Delta q| = \frac{1}{\ln c} \left\{ \left| \frac{\Delta \delta l_c}{l_c} \right| + \left| \frac{\Delta \delta l_1}{\delta l_1} \right| + 2 \left| \frac{\Delta l}{l} \right| \right\}. \quad \text{Следовательно:}$$

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{1}{q} \left\{ \left| \frac{\Delta z}{z} \right| + \left| \frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} \right| + \left| \frac{\Delta l}{l} \right| + \left(\frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} + \frac{\Delta \delta l_1}{\delta l_1} + \frac{2\Delta l}{l} \right) \frac{\ln F/c}{\ln c} \right\} \approx$$

$$\approx \frac{1}{q} \left\{ \left| \frac{\Delta \delta R}{\delta R} \right|_z + \left| \frac{\Delta R}{R} \right|_z + \left| \frac{\Delta \delta l}{\delta l} \right|_z + \left| \frac{\Delta l}{l} \right|_z + \frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} + \frac{\Delta l}{l} + \left(\frac{1+c^q}{\ln c} \ln F/c \right) \frac{\Delta \delta l_c}{\delta l_c} \right\}, \quad (8)$$

где $\left| \frac{\Delta R}{R} \right|_z$, $\left| \frac{\Delta \delta R}{\delta R} \right|_z$, $\left| \frac{\Delta \delta l}{\delta l} \right|_z$, $\left| \frac{\Delta l}{l} \right|_z$ – относительные погрешности при экспериментальном определении значения z .

Для уменьшения этих погрешностей целесообразно каждый образец, прошедший термоциклирование, нагрузить в условиях одноосного сжатия с заданным темпом до экстремальной нагрузки L_1 , отвечающей пределу кратковременной прочности (рис. 3), разгрузить, определить посередине высоты образца относительную остаточную деформацию ε в направлении, перпендикулярном сжатию, повторно нагрузить в условиях сжатия до экстремальной нагрузки L_2 (рис. 3), а отношение z относительного снижения предела прочности $\delta R/R$ к ε определить с учетом значений экстремальных нагрузок первого и второго нагружения по формуле $z = (L_1 - L_2) / L_1 \varepsilon_1$.

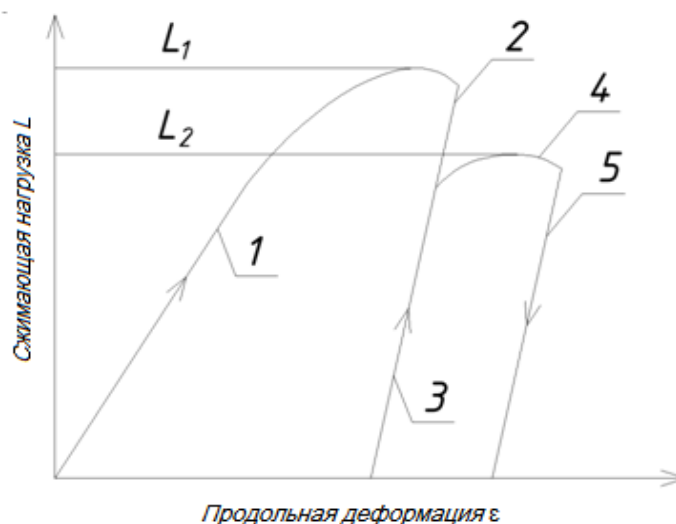


Рисунок 3. Режим нагружения образца в условиях одноосного сжатия после термоциклирования: 1 – кривая первого нагружения; 2 – прямая первого разгрузки; 3 – прямая второго нагружения; 4 – кривая второго нагружения; 5 – прямая второго разгрузки; ε_n – относительная продольная остаточная деформация;

L_1 – экстремальная нагрузка первого нагружения;

L_2 – экстремальная нагрузка второго нагружения

Для тяжелого бетона относительное снижение $(L_1 - L_2)/L_1$ составляет в зависимости от степени гидратации цемента (срока твердения) от 60 до 6 %, в среднем 33 % ($\Delta R \approx 0.33R$; $|\Delta R/R|_z = 0.025$; $|\Delta \delta R / \delta R|_z = 0.15$). При этом в среднем $\varepsilon \approx 0.015$; $\delta l \approx 1.5$ мм; $|\Delta l/l|_z \approx 0.0005$; $|\Delta \delta l / \delta l|_z \approx 0.07$ – при использовании штангельциркуля с погрешностью 0.05 мм, а при использовании дифференциального дилатометра $\Delta l/l \approx 1 \cdot 10^{-5}$, $|\Delta \delta l / \delta l|_c \approx 0.02$.

Подставив эти осредненные значения в (8), получаем погрешность $\Delta F/F \approx 0.265/q$, среднее квадратическое отклонение морозостойкости образцов $S_F = 0.09F/q$ и коэффициент вариации $\rho = \Delta F/3F = 0.09/q$ для ошибок определения F на одном образце.

Для выяснения взаимосвязи $\delta R/R$ и ε использовали результаты испытаний по проверке способа [20]. Перед началом этих испытаний из одного замеса, содержащего портландцемент (1 весовую часть) марки 400, песок (2 в.ч.), гранитный щебень 5...20 мм (4.5 в.ч.) и воду (0.6 в.ч.), изготовили 108 образцов-кубов с ребром 150 мм, у которых точки пересечения диагоналей противоположных граней (реперные точки) отстояли друг от друга дальше (до 1.5 мм), чем остальные точки этих граней, соответствующие друг другу. Образцы твердели 28 дней в воде при комнатной температуре, а затем 60 дней – во влажном песке при 18...26 °С. Из этих 108 образцов 8 циклировали попеременно термически и механически, а 100 образцов использовали для оценки морозостойкости базовым методом [9]. При реализации базового метода расстояние l между реперными точками каждого образца измеряли с помощью инструментального микроскопа до и после испытаний на морозостойкость или на прочность. Остаточную деформацию ε рассчитывали как $\delta l/l$. Изменение расстояния δl между реперными точками при реализации метода [20] проводили на 20 ± 2 °С до и после циклирования с помощью скобы с переменной базой и измерительной головкой часового типа (цена деления 1 мкм). Пороговую нагрузку L_0 водонасыщенного образца определяли по способу [21], регистрируя акустическую эмиссию (АЭ) с помощью прибора АФ–15 при циклическом нагружении и разгрузении образца до нуля. В первом опыте нагрузку L доводили до 11 т; при отсутствии акустической эмиссии в процессе окончания разгрузки значение L увеличивали на 5 % до тех пор, пока при окончании разгрузки не возникала

АЭ. За L_0 принимали среднее L двух последних циклов. Предел длительной прочности R_0 находили как отношение L_0 к средней площади двух нагружаемых граней.

Термоциклирование упомянутых 8 образцов от $+20^\circ\text{C}$ до -20°C проводили по 10 раз подряд (декадами), после чего измеряли остаточную деформацию δl_T . Затем образец нагружали механически до нагрузки $1.33L_0$ за 1...2 минуты и разгружали. Циклы повторяли до тех пор, пока остаточная деформация δl между реперными точками не превышала δl_T (от 12 до 19 циклов). После чего проводили очередную декаду термоциклов и т.д. до получения $\delta R/R = 0.12...0.18$. Затем рассчитывали коэффициент эквивалентности механического и циклического нагружения для конкретной i -й декады $K_i = \delta \varepsilon_i / \delta \varepsilon_{Ti}$, где $\delta \varepsilon_i$ и $\delta \varepsilon_{Ti}$ – соответственно приращения $\delta \varepsilon$ и $\delta \varepsilon_T$ после i -й декады. Значения K_i колебались от 1 до 1.10, а в среднем составляли 1.04. Умножив K_i на 10, получили число термоциклов, эквивалентных механическим нагружениям (каждое от 12 до 19 механических циклов).

Основные испытания результатов по методу [20] и их обработки даны в таблице 1, где приведены отношения $z = (\delta R / R_0) / \varepsilon$ для 8 образцов после 20, 42, 63, 84 и 105 эквивалентных термоциклов, большая половина которых реализована механическим напряжением. Там же представлены средние z_{cp} по образцам после 20, 42, 63, 84 и 105 циклов, среднее $\bar{z}$ для каждого из образцов и среднее средних $\bar{\bar{z}}$, равное 10.73. По этим значениям z рассчитаны выборочные

дисперсии S^2 для $\bar{z}$ по формуле $S^2 = \sum_{i=1}^8 (\bar{z}_i - \bar{\bar{z}})^2 / 7$, где i – номер образца, и для $z = z_k$

после 105 циклов по аналогичной формуле, а также средние квадратические отклонения S и коэффициенты вариации ρ , равные отношению S к соответствующему выборочному среднему.

Разброс значений z , обусловленный ошибками измерений $\delta R/R$ и ε , нетрудно рассчитать. Например, если $z = (\delta R/R_0) / \varepsilon$ рассчитывать по конечным значениям $(\delta R/R)_k$ и ε_k в опыте, как наиболее точными по сравнению с предшествующими, то $(\Delta z / z) = (\Delta \delta R_K) / \delta R_K + (\Delta R_K) / R_K + (\Delta \delta l_K) / \delta l_K + \Delta l / l$. Отсюда с учетом средних по 8 образцам $\delta R_K, \varepsilon_K$, полученных после 105 циклов (табл. 1), находим: $(\Delta z / z)_K = 6/14.2 + 0.03 + 2 \cdot 10^{-3} / (150 \cdot 0.149) + 0.002 / 150 = 0.46$. Приняв вероятность появления максимальной ошибки, например $\Delta z / z$ меньше 0.003, и руководствуясь нормальным законом распределения ошибок измерения, можно записать $\Delta z = 3\sqrt{D}$, где D – истинная дисперсия ошибок определения значений z . Оценкой этой D является выборочная дисперсия S^2 , в таком случае $\sqrt{D} = (\Delta z / z) \bar{z} / 3 = 0.153 \cdot 10.40 = 1.6$, а $D = 2.54$.

Руководствуясь критерием Фишера, отличие $D = 2.54$ от выборочной дисперсии $S_{zk}^2 = 1.94$ можно считать случайным. Следовательно, разброс значений z_k , приведенных в таблице, обусловлен только ошибками измерений R_0, ε , а не колебаниями z от образца к образцу. А это, в свою очередь, позволяет полагать, что z – величина постоянная, по крайней мере, для конкретного состава бетона. Тогда, выяснив z , можно рассчитывать F по остаточным деформациям ε после термоциклирования.

При отсутствии неразрушающего контроля можно рассчитывать z по результатам прочностных испытаний выборок образцов до и после их термоциклирования. При реализации базового метода по [7] на двух выборках по 50 образцов из того же состава бетона, что и ранее упомянутых 8, получили без термоциклирования $\bar{R} = 34.8$ МПа, $S = 5.92$ МПа, а после 105 циклов – $R = 29.2$ МПа, $S = 4.1$ МПа, $\delta R = 5.6$ МПа, $\delta R/R = 0.161$, $\varepsilon_{cp} = 1448 \cdot 10^{-5}$,

$S_{\varepsilon} = 77 \cdot 10^{-5}$, $z = 11.1$. Такие значения $\delta R/R$, ε_{cp} и z случайно отличаются от соответствующих значений в таблице 1, $\delta R/R = 0.1488$, $\varepsilon_{cp} = 1439 \cdot 10^{-5}$, $z_{cp} = 10.40$.

Таблица 1. Результаты экспериментального определения и остаточной обработки значений пределов прочности R и относительной остаточной деформации ε образцов бетона после различного числа циклов нагружения (термически и механически)

№ образца		1	2	3	4	5	6	7	8	Ср.
Исходное значение R_0 МПа		9.45	16.8	22.7	23.4	24.3	24.3	25.0	30.1	22.0
После 20 циклов	R_0 , МПа	9.18	16.2	22.2	22.7	23.5	23.9	24.1	29.4	
	$\delta R/R \cdot 10^{-5}$	2857	3571	2203	2991	3292	1646	3600	2326	2811
	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	216	210	204	206	204	200	202	190	204
	z	13.23	17.00	10.80	14.92	16.14	8.23	17.82	12.24	13.8
После 42 циклов	R_0 , МПа	9.03	16.15	21.9	22.3	23.4	22.9	23.9	20.4	
	$\delta R/R \cdot 10^{-5}$	4482	3869	3524	4701	3704	561	4440	3222	4213
	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	406	452	404	408	394	396	410	394	408
	z	11.04	8.56	8.72	11.52	9.40	14.55	10.73	8.18	10.32
После 84 циклов	R_0 , МПа	8.10	14.7	19.1	21.2	21.0	23.0	22.6	26.7	
	$\delta R/R \cdot 10^{-5}$	1429	893	1586	940	1244	1230	1253	1130	1213
	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	1206	1217	1188	1196	1201	1207	1196	991	1175
	z	11.85	5.31	13.35	7.86	10.36	9.31	7.36	11.04	9.55
После 105 циклов	R_0 , МПа	7.75	14.2	18.6	20.1	21.1	20.9	21.4	26.4	18.8
	$\delta R/R \cdot 10^{-5}$	1799	1547	1806	1410	1317	1399	1440	1229	1488
	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	1582	1440	1435	1534	1561	1459	1297	1196	1439
	z	11.37	10.74	12.59	9.19	8.43	9.59	11.10	10.28	10.40
$\bar{z}$ для образца		11.40	10.76	11.04	10.73	10.21	10.30	11.05	10.34	$\bar{z} = 10.73$
R – среднее значение предела длительной прочности в условиях сжатия; δR – снижение R в результате циклирования образца; ε – относительная остаточная деформация образца в направлении, перпендикулярном сжатию; $z = (\delta R/R)/\varepsilon$; z_k – значение z после 105 циклов; $\bar{z}$ – среднее значение z для образца; $\bar{\bar{z}}$ – среднее для $\bar{z}$; S^2 – выборочная дисперсия; S – среднее квадратическое отклонение; ρ – коэффициент вариации								S^2	S	ρ
								1.94	1.394	0.134
								0.183	0.428	0.04

Это обстоятельство доказывает, что:

- использование неразрушающего способа оценки снижения прочности [21] дает практически те же значения z и F , что и при использовании разрушающего выборочного контроля, но с более высокой точностью;
- значения z не чувствительны к замене части термоциклов механическими, а также к исходным и текущим значениям R_0 .

Предложенный способ реализуют следующим образом. Из одного замеса бетонной смеси по одинаковой технологии готовят несколько образцов, например 5, согласно [18]. Образцы по п. 4 [9] насыщают водой, обмеряют и помещают в измерительную камеру дифференциального объемного dilatометра типа ДОД-100-К, а во вторую его камеру помещают стандартный алюминиевый образец. Обе камеры заполняют керосином и герметизируют. Dilатометр с образцами устанавливают в морозильную камеру и после 30 минут выдержки начинают замораживание со скоростью около $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до достижения температуры $(20\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разморозив образец с той же скоростью, по графику показателя разностей объемных деформаций бетонного и алюминиевого образца находят значение остаточной относительной объемной деформации ε_{Tij} бетонного образца после каждого i -го термоцикла. Каждый образец замораживают и размораживают таким образом по крайней мере 4 раза. После термоциклирования каждый образец нагружают в условиях одноосного сжатия с заданным темпом до экстремального значения нагрузки первого нагружения $L_{\text{макс}} = L_1$ (рис. 3). Значение $L_{\text{макс}}$ регистрируют по ведомой стрелке динамометра прессы. Момент размыкания электроконтактов на ведомой и ведущей стрелке фиксируют по световому сигналу, который одновременно указывает на необходимость начать плавную разгрузку образца. После полного разгружения без перестановки образца замеряют остаточную деформацию i -го в направлении, перпендикулярном сжатию. Относительную остаточную деформацию ε_i в направлении, перпендикулярном сжатию, для i -го образца рассчитывают по формуле $\varepsilon_i = \Delta a_i / a_0$, где a_0 – размер i -го образца до сжатия в направлении, перпендикулярном сжатию; Δa_i – остаточное изменение этого размера.

Повторяют осевое сжатие образца с прежним темпом до значения экстремальной нагрузки второго нагружения L_2 . Для i -го образца рассчитывают отношение z_i относительного снижения предела прочности к относительной остаточной деформации в направлении, перпендикулярном сжатию $z_i = (L_{1i} - L_{2i}) / (L_{1i} \varepsilon_{0i})$, где L_{1i} и L_{2i} – экстремальная нагрузка на i -й образец при первом и втором нагружении соответственно.

Затем рассчитывают среднее $z = \sum z_i / n$, где n – число образцов; значение относительной остаточной деформации ε_M , соответствующей допускаемому стандартом относительному снижению предела прочности, по формуле $\varepsilon_M = [\delta R / R] / z$, где $[\delta R / R]$ – допускаемое стандартом относительное снижение предела прочности.

По значениям ε_{Tij} строят график, аналогичный рисунку 4, и с его помощью определяют значения λ как осредненный $\text{tg} \alpha$. По значениям ε_{Ti} при последних j -х циклах рассчитывают среднее $\bar{\varepsilon}_{Tj} = \sum \varepsilon_{Ti} / j$. В соответствии с (1) при $z = \text{const}$ $\varepsilon_c = \varepsilon_1 c^q$, следовательно, $\varepsilon_M / \bar{\varepsilon}_{Tj} = \bar{F}_i / j^q$. По этой формуле можно рассчитать значения F_i , а затем и оценку морозостойкости испытанного камня $\bar{F} = \sum F_i / n$, где n – количество испытанных образцов.

В частности, метод был реализован на 10 образцах-кубах с ребром 10 см в возрасте 88 дней, изготовленных из бетонной смеси такого состава: портландцемент марки 400 – 1 весовая часть, песок – 2 весовые части, гранитный щебень 5...20 мм – 4.5 весовые части, вода – 0.6 весовой части. Для этого бетона ранее было экспериментально установлено значение морозостойкости по первому базовому методу [7] при допускаемом стандартом относительном снижении предела прочности, равном 0.15, которое составило $F_{0,15} = 105$, где $F_{0,15}$ – известное значение морозостойкости при $[\delta R / R] = 0.15$.

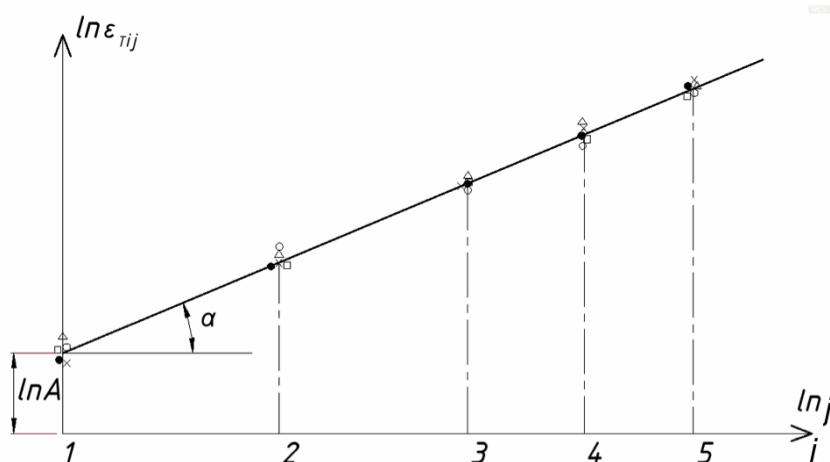


Рисунок 4. График для определения параметров A и λ зависимости остаточной деформации $\varepsilon_T = Aj^\lambda$ по данным об относительных остаточных деформациях ε_{Tij} для i -го образца после j -го термоцикла: j – количество термоциклов;

A – температурная относительная остаточная деформация после первого термоцикла;
 α – угол наклона прямой к горизонтالي; $O, \square, \Delta, \bullet, \times$ – точки, полученные по результатам испытаний, соответственно, I, II, III, IV и V образцов

Образцы насыщали водой по [7], обмеряли и помещали в измерительную камеру дифференциального объемного dilatометра ДОД–100–К, а во вторую его камеру помещали стандартный алюминиевый образец. Обе камеры заполняли керосином и герметизировали. Дилатометр с образцами устанавливали в морозильную камеру и после 30 минут выдержки начинали замораживание со скоростью $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до достижения температуры $(20 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$. После размораживания с той же скоростью по графику показателя разностей объемных деформаций бетонного и алюминиевого образца находили значение остаточной относительной объемной деформации бетонного образца после последнего, пятого, термоцикла ($j = 5$).

Осевое сжатие образцов со скоростью 400 кг/с осуществляли на гидравлическом прессе. Значения экстремальных нагрузок L_1 и L_2 определяли по положению контрольной (ведомой) стрелки. Плавное разгружение образца начинали по сигналу контрольной лампочки, выключаемой электроконтактом между ведущей и ведомой стрелкой динамометра.

В таблице 2 приведены результаты этих опытов для каждого образца, включающие относительные снижения пределов прочности и относительные остаточные деформации в направлении, перпендикулярном сжатию.

Таблица 2. Результаты реализации предложенного метода

Номер образца	$\frac{\Delta R}{R}$	$\varepsilon_{0i} \cdot 10^3$	z_i	$\varepsilon_{Ti5} \cdot 10^5$	$\frac{\varepsilon_{Mi}}{\varepsilon_{Ti5}}$	F_i
1	0.093	8.86	10.50	56	24.78	76
2	0.077	6.99	11.02	42	33.04	97
3	0.105	9.91	10.60	40	34.69	102
4	0.081	7.49	10.82	38	36.5	106
5	0.092	7.95	11.57	38	36.5	106
6	0.063	5.83	10.80	37	37.5	109
7	0.114	10.16	11.22	36	38.54	111
8	0.080	7.66	10.40	34	40.81	117
9	0.106	9.53	11.12	33	42.05	120
10	0.096	9.55	10.05	31	44.76	127
Среднее	0.92	8.40	10.81			107

Для каждого образца рассчитывали показатели морозостойкости по формуле:

$$F_i = 5 \left(\frac{\varepsilon_{Mi}}{\varepsilon_{Ti5}} \right)^{\frac{1}{\lambda}}, \quad (9)$$

где F_i – показатель морозостойкости для i -го образца; ε_{Mi} – относительная остаточная деформация, соответствующая допускаемому стандартом относительному снижению предела прочности, для i -го образца; ε_{Ti5} – относительная остаточная деформация i -го образца после пятого термоцикла; λ – постоянная материала; i – номер образца.

Среднее для показателей морозостойкостей F_i составило $\bar{F} = 107$. Среднее квадратичное отклонение для значений F_i составило $S = 17$. Следовательно, при вероятности 0.95 доверительный интервал для $\bar{F}$ составляет

$$2S_{\bar{F}} = \frac{2 \cdot 17}{\sqrt{10}} = 10,8, \quad (10)$$

где $S_{\bar{F}}$ – среднее квадратичное отклонение для значений морозостойкости образцов.

Таким образом, можно считать отличие $\bar{F} = 107$ от известного значения $F_{0.15} = 105$ случайным, а предложенный способ корректным.

Таким образом, показано, что предложенный способ позволяет повысить экономичность, эффективность и скорость определения морозостойкости пористых тел. Также следует отметить, что этот способ может быть использован для определения морозостойкости пористых материалов, насыщенных водными растворами солей. Для этого достаточно насыщать образцы соответствующими растворами как при термоциклировании, так и при определении z повторным одноосным сжатием.

Область применения

Область применения предлагаемого ускоренного метода распространяется на тяжелые мелкозернистые, легкие и плотные силикатные бетоны. На данном этапе вопрос о применении метода для определения морозостойкости бетонов дорожных и аэродромных покрытий, а также в солях не прорабатывался. Теоретически, для этих случаев использование метода допустимо. Например, для определения морозостойкости в солях возможно использование образцов, насыщенных соответствующими растворами солей, но данная теория не проверялась практически. После проведения необходимых экспериментов область применения предлагаемого ускоренного метода определения морозостойкости пористых материалов может быть расширена.

Заключение

1. Показано, что использование неразрушающего контроля R позволяет определять марку F испытанием одного образца, что резко снижает трудоемкость. Однако такой контроль должен обладать высокой точностью (1...3 %) и не увеличивать повреждаемость материала, что обуславливает выбор в качестве R предела длительной прочности.

2. Предложена замена термоциклов более оперативными циклами механического нагружения, эквивалентными по вносимой поврежденности, за меру которой принята величина остаточной деформации. Подобная замена значительно снижает время проведения испытаний.

3. Выявлена необходимость в проведении испытаний над другими пористыми материалами с целью расширения области применения предложенного метода.

4. Обоснован новый метод ускоренного определения морозостойкости бетона, который отличается повышенной оперативностью, малой трудоемкостью и экономичностью. Была оформлена и подана заявка на изобретение [23].

Литература

1. Skripkiunas G., Nagrockiene D., Girskas G., Vaičiene M., Barauskaite E. The cement type effect on freeze-thaw and deicing salt resistance of concrete // *Procedia Engineering*. 2013. No. 57. Pp. 1045–1051.
2. Akimov L., Ilenko N., Mizharev R., Cherkashin A., Vatin N., Chumadova L. Influence of Plasticizing and Siliceous Additives on the Strength Characteristics of Concrete // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 461–468.
3. Barabanshchikov Y., Komarinskiy M. Effect of Air-Entraining Agent LHD on the Technological Properties of Concrete Mix Containing Superplasticizer S-3 // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 419–424.
4. Nagrockien D., Girskas G., Skripkiunas G. Cement freezing-thawing resistance of hardened cement paste with synthetic zeolite // *Construction and Building Materials*. 2014. No. 66. Pp. 45–52.
5. Kewalramani M.A., Gupta R. Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks // *Automation in Construction*. 2006. Vol. 15. No. 3. Pp. 374–379.
6. Köliö A., Rantala T., Lahdensivu J., Nurmikolu A. Freeze-thaw resistance testing of concrete railway sleepers // 5th International Conference on Concrete Repair: Concrete Solutions. Proceedings of Concrete Solutions. 2014. Pp. 533–539.
7. ГОСТ 10060–2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости.
8. ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
9. Судаков В.Б. Пути совершенствования технологии бетона гидротехнических сооружений // Гидротехнический бетон и его работа в сооружении: материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Л.: Энергоатомиздат, 1984. С. 4–16.
10. BS EN 206:2013. Concrete. Specification, performance, production and conformity.
11. Антонова М.В., Глушко Д.В., Беляева С.В., Пакрастинш Л. Сравнительный анализ Европейской и Российской технической документации строительных материалов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №4 (19). С. 34–50.
12. RILEM Technical Committee. TDC, CDF Test, Test Method for the Freeze-Thaw-Resistance of concrete with sodium chloride solution, RILEM TC 117–FDC Recommendation. Germany, 2001. 27 p.
13. Swedish Standard. Concrete testing – Hardened Concrete-Frost Resistance, SS 137244. Sweden, 2005.
14. Liisma E., Raado L.M. Internal and external damages of concrete with poor quality of coarse limestone aggregate // Europe towards Sustainable Building 2013: Sustainable Building and Refurbishment for Next Generations. Prague, 2013. Pp. 1–4.
15. Алексеев А.В., Дикун А.Д., Фишман В.Я., Дикун В.Н. Опыт экспрессного определения морозостойкости бетона транспортных сооружений // Строительные материалы. 2005. №8. С. 55–57.
16. Radlinski M., Oleic J., Zhang Q., Peterson K. Evaluation of the critical air-void system parameters for freeze-thaw resistant ternary concrete using the manual point-count and the flatbed scanner methods // *ASTM International*. 2010. Vol. 7. No. 4. Pp. 64–85.
17. Никольский С.Г., Никольская Т.С. Влияние температуры на пороговые параметры прочности керамики // Петербургский журнал электроники. 2011. №1. С. 25–28.

References

1. Skripkiunas G., Nagrockiene D., Girskas G., Vaičiene M., Barauskaite E. The cement type effect on freeze-thaw and deicing salt resistance of concrete. *Procedia Engineering*. 2013. No. 57. Pp. 1045–1051.
2. Akimov L., Ilenko N., Mizharev R., Cherkashin A., Vatin N., Chumadova L. Influence of Plasticizing and Siliceous Additives on the Strength Characteristics of Concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 461–468.
3. Barabanshchikov Y., Komarinskiy M. Effect of Air-Entraining Agent LHD on the Technological Properties of Concrete Mix Containing Superplasticizer S-3. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 419–424.
4. Nagrockien D., Girskas G., Skripkiunas G. Cement freezing-thawing resistance of hardened cement paste with synthetic zeolite. *Construction and Building Materials*. 2014. No. 66. Pp. 45–52.
5. Kewalramani M.A., Gupta R. Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks. *Automation in Construction*. 2006. Vol. 15. No. 3. Pp. 374–379.
6. Köliö A., Rantala T., Lahdensivu J., Nurmikolu A. Freeze-thaw resistance testing of concrete railway sleepers. *5th International Conference on Concrete Repair: Concrete Solutions. Proceedings of Concrete Solutions*. 2014. Pp. 533–539.
7. GOST 10060-2012. Concretes. Basic method for the determination of frost-resistance. 2012. (rus)
8. GOST 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. 2012. (rus)
9. Sudakov V.B. Puti sovershenstvovaniya tehnologii betona gidrotehnicheskikh sooruzhenij [Ways of improving the technology of concrete transport facilities]. *Gidrotehnicheskij beton i ego rabota v sooruzhenii: materialy konferencij i soveshhanij po gidrotehnike*. Leningrad. Energoatomisdat. 1984. Pp. 4–16. (rus)
10. BS EN 206:2013. Concrete. Specification, performance, production and conformity.
11. Antonova M.V., Glushko D.V., Belyaeva S.V., Pakrastinsh L. A comparative analysis of European and Russian technical documentation of building materials. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. No. 4(19). Pp. 34–50. (rus)
12. RILEM Technical Committee. TDC, CDF Test, Test Method for the Freeze-Thaw-Resistance of concrete with sodium chloride solution. RILEM TC 117–FDC Recommendation. Germany. 2001. 27 p.
13. Swedish Standard. Concrete testing – Hardened Concrete-Frost Resistance. SS 137244. Sweden. 2005.
14. Liisma E., Raado L.M. Internal and external damages of concrete with poor quality of coarse limestone aggregate. *Europe towards Sustainable Building 2013: Sustainable Building and Refurbishment for Next Generations*. Prague. 2013. Pp. 1–4.
15. Alekseev A.V., Dikun A.D., Fishman V.Ja., Dikun V.N. Opyt jekspressnogo opredelenija morozostojkosti betona transportnyh sooruzhenij [Experience the rapid determination of freeze-thaw resistance of concrete transport facilities]. *Stroitel'nye Materialy*. 2005. No. 8. Pp. 55–56. (rus)
16. Radlinski M., Oleic J., Zhang Q., Peterson K. Evaluation of the critical air-void system parameters for freeze-thaw resistant ternary concrete using the manual point-count and the flatbed scanner methods. *ASTM International*. 2010. Vol. 7. No. 4. Pp. 64–85.

18. Никольский С.Г., Никольская Т.С. Экспресс-методы оценки длительной стойкости бетона // Материалы III МК «Популярное бетоноведение». СПб, 2009. С. 35–44.
19. Кунцевич О.В. Бетон высокой морозостойкости для сооружений крайнего севера. Л.: Стройиздат, 1983. 132 с.
20. Никольский С.Г., Никольская Т.С., Акимов С.В. Образец для сжатия камня при оценке его морозостойкости. Патент России № 2370767. 2009.
21. Воронцова Е.А., Никольский С.Г. Рекомендации по выбору водоцементного отношения при проектировании бетона из условия его морозостойкости // XL Неделя науки СПбГПУ: Материалы НПК. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2011. С. 344–345.
22. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с.
23. Никольский С.Г., Перцева О.Н. Способ определения морозостойкости пористых материалов. Заявка на патент № 2014116713/20 от 5.06.2014.
17. Nikolskij S.G., Nikolskaja T.S. Vlijanie temperatury na porogovye parametry prochnosti keramiki [Effect of temperature on the threshold strength properties of ceramics]. *Peterburgskiy zhurnal elektroniki*. 2011. No.1. Pp. 25–28. (rus)
18. Nikolskij S.G., Nikolskaja T.S. Jekspress-metody ocenki dlitelnoj stojkosti betona.[Express-method of assessing long-term durability of concrete]. *Materialy III MK «Populjarnoe betonovedenie»*. Saint Petersburg. 2009. Pp. 35–44. (rus)
19. Kuncovich O.V. *Beton vysokoj morozostojkosti dlja sooruzhenij krajnego severa*. [Concrete with high freeze-thaw resistance for construction of the Far North]. Leningrad. Strojizdat. 1983. 132 p. (rus)
20. Nikolskij S.G., Nikolskaja T.S., Akimov S.V. Obrazec dlja szhatija kamnja pri ocenke ego morozostojkosti. [The sample is for compression stone in determining its freeze-thaw resistance]. *Patent RU 2370767*. 2009. (rus)
21. Voroncova E.A., Nikolskij S.G. Rekomendacii po vyboru vodocementnogo otnoshenija pri proektirovanii betona iz uslovija ego morozostojkosti [Recommendations on choosing the water-cement ratio in concrete design based on its freeze-thaw resistance condition]. *XL Nedelja nauki SPbPU: Materialy NPK*. [XL science week SPbPU: Materials of Scientific Conference]. St. Petersburg: publ. SPbPU, 2011. Pp. 344–345. (rus)
22. Mitropolskij A.K. *Tehnika statisticheskijh vychislenij* [Technique of statistical calculations]. Moscow. Nauka. 1971. 576 p.(rus)
23. Nikolskij S.G., Perceva O.N. Sposob opredelenija morozostojkosti poristyh materialov [A method of determining the freeze-thaw resistance of cellular material]. *Application for a patent No. 2014116713/20 from 5.06.2014*. (rus)

Сергей Григорьевич Никольский,
+79214235776; эл. почта: big_panda16@mail.ru

Ольга Николаевна Перцева,
+79531711053; эл. почта: olya_perceva@mail.ru

Виктория Игоревна Иванова,
+7(981)7348483; эл. почта:
Viktoriaaviktoriaaaa@mail.ru

Sergey Nikolskiy,
+79214235776; big_panda16@mail.ru

Olga Pertseva,
+79531711053; olya_perceva@mail.ru

Viktoriaa Ivanova,
+7(981)7348483; Viktoriaaviktoriaaaa@mail.ru

© Никольский С.Г., Перцева О.Н., Иванова В.И., 2015

doi: 10.5862/MCE.60.3

Исследование механических свойств кирпичной кладки методом плоских домкратов

Assessment of the mechanical properties of brick masonry by a flat-jack method

Инженер С.В. Зубков,
канд. техн. наук, доцент А.В. Улыбин,
инженер С.Д. Федотов,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, г. Санкт-
Петербург, Россия

S.V. Zubkov,
A.V. Ulybin,
S.D. Fedotov,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic
University, St. Petersburg, Russia

Ключевые слова: испытание кладки; плоский домкрат; кирпичная кладка; датчик фиксации деформации; жесткость домкрата; модуль упругости; прочность кладки

Key words: masonry testing; flat jack; brick masonry; deformation sensor; stiffness of the jack; elastic modulus; strength of masonry

Аннотация. Применяемые в настоящее время в России методы определения механических характеристик кирпичной кладки основаны на определении прочности компонентов, составляющих кладку, с последующими расчетами по эмпирическим зависимостям, которые не позволяют полноценно учесть качество возведения кладки, наличие повреждений и другие факторы. Актуальность определения деформационных свойств кирпичной кладки обусловлена все большим применением вычислительных комплексов для расчета каменных конструкций, в частности, 3D моделирование сводов, куполов, а также тонких облицовочных слоев, при расчете, в том числе, на температурные деформации. Наиболее перспективным методом определения является непосредственное испытание фрагмента кладки в конструкции при помощи плоских домкратов. В статье освещены результаты практического применения данного метода при исследовании деформационных свойств кирпичной кладки. Определены факторы, влияющие на результаты испытаний, в том числе экспериментально установлены коэффициенты жесткости домкратов.

Abstract. The modern Russian methods for defining the mechanical characteristics of brick masonry are based on finding the strength of masonry components (brick and mortar). After getting the results of laboratory tests of components, mechanical characteristics of masonry are calculated using empirical formulae. Those formulae, however, cannot take into consideration the presence of damages and other factors. Obtaining the characteristics (strength and deformation) by a direct flat-jack test of masonry fragments on-site looks promising. A widespread use of FEM requires setting accurate deformation features for modeling domes, arches and thin brick outside layer in multilayer walls. Also accurate deformation characteristics are used for calculating temperature loads. The paper gives the results of practical use for the masonry deformation research by the flat-jack test method. The correlation factors are defined and rigidity coefficients of flat-jacks are obtained in the study.

Введение

При обследовании зданий и сооружений, вне зависимости от целей работ, будь то определение возможности надстройки, переоборудование производства или осуществление капитального ремонта, одной из наиболее важных задач является сбор данных для поверочного расчета конструкций [1, 2]. В случае каменных зданий основным является определение прочностных и деформационных характеристик кирпичной кладки.

В нашей стране, согласно действующим нормативным документам, в частности СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции», прочность каменной кладки определяется по формуле профессора Л.И. Онищика [3] исходя из известных данных о прочности компонентов кладки:

$$R_u = A \cdot R_1 \cdot \left(1 - \frac{a}{b + \frac{R_2}{2} \cdot R_1}\right) \cdot \gamma,$$

где R_u – предел прочности кладки;

R_1, R_2 – прочность на сжатие камня и раствора соответственно;

A – конструктивный коэффициент, характеризующий максимально возможную, так называемую «конструктивную», прочность кладки;

a, b, m, n – коэффициенты, зависящие от применяемого материала;

γ – коэффициент, применяемый при низких растворах.

Деформационные свойства кладки, в частности модуль упругости, определяются из предела прочности путем умножения его значения на упругую характеристику, зависящую от вида примененных материалов.

При обследовании зданий производится отбор образцов кирпича и раствора с последующими лабораторными испытаниями по ГОСТ 8462–85 «Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе» с дополнениями по ГОСТ «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» и ГОСТ 5802–86 «Растворы строительные. Методы испытаний».

Методы определения прочностных параметров кладки

Рассмотренный выше метод отбора проб достаточно трудоемок и имеет ряд недостатков при практическом применении в рамках обследования [4], поэтому многие инженеры и ученые, как в России, так и за рубежом, ищут иные способы определения прочности кладки.

Одни стараются применять методы неразрушающего контроля [5–9], такие как метод пластической деформации, ультразвуковой метод и прочие, что, по мнению авторов, приведет к получению неоднозначных результатов в случае керамического кирпича. Другие исследуют возможность испытания фрагментов кладки в виде кернов диаметром 150...200 мм, выбуренных из кладки [10–11], в специальных обоймах. При этом по результатам исследований описаны сложности, возникающие с кладкой на низкопрочных растворах.

Авторами статьи исследуется альтернативный способ определения прочности кладки [12] путем выбуривания кернов диаметром 58 мм из кирпича с последующим испытанием на сжатие и расчетом по той же формуле профессора Л.И. Онищика. Однако исследования возможности применения данного метода до сих пор продолжаются.

При этом вышеописанные методы сводятся лишь к определению прочностных характеристик компонентов кладки без учета качества ее возведения и наличия повреждений [13]. В ряде источников наличие дефектов возведения кладки и повреждений, возникших при эксплуатации, учитывают применением понижающих коэффициентов, что в практике обследования осуществляется крайне редко.

В 2012 г. вступил в действие ГОСТ 32047–2012 «Кладка каменная. Метод испытания на сжатие», регламентирующий испытание образцов-призм каменной кладки нагрузкой, приложенной перпендикулярно горизонтальным швам, до ее разрушения, и тем самым определение ее прочности на сжатие. Данный норматив подготовлен с учетом требований Еврокода EN 1052–1–2009 «Methods of test for masonry. Part 1. Determination of compressive strength» (Методы испытаний кладки. Часть 1. Определение предела прочности при сжатии), а также EN 772–1 «Methods of test for masonry units. Part 1. Determination of compression strength» (Методы испытания элементов кладки. Часть 1. Определение предела прочности при сжатии) и EN 1015–1 «Methods of test for mortar for masonry. Part 1: Determination of particle size distribution» (Методы испытания кладочного раствора. Часть 1. Определение предела прочности отвердевшего раствора при изгибе и сжатии). Согласно ГОСТ 32047–2012, необходимо изготовить фрагмент кладки из материалов, аналогичных применяемым при строительстве, и испытать на сжатие (рис.1) в лабораторных условиях.

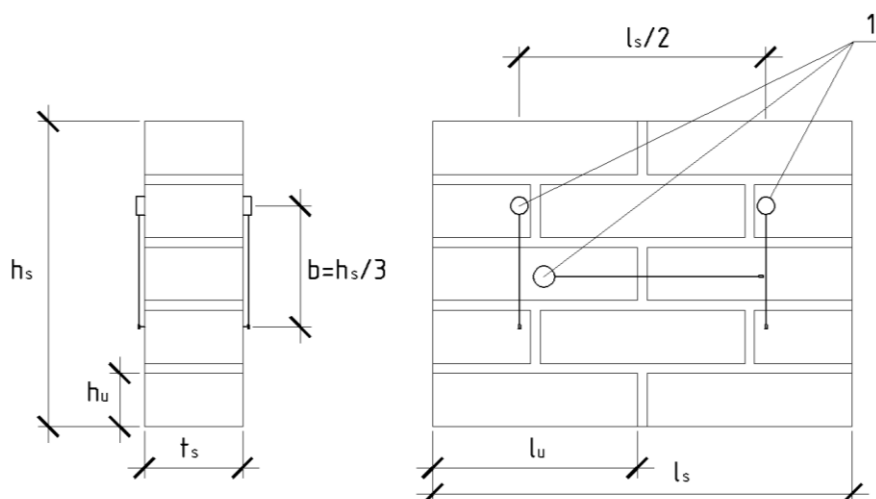


Рисунок 1. Испытание фрагмента кладки по ГОСТ 32047–2012: 1 – приборы для измерения деформаций; b – база измерений деформаций; h_s – высота образца; h_u – высота элемента кладки; t_s – толщина образца; l_s – длина образца; l_u – длина элемента кладки

Таким образом, данный метод скорее предназначен для контроля прочности кладки при возведении здания. Очевидно, что его применение при обследовании зданий и сооружений весьма затруднительно. Во-первых, зачастую отсутствует техническая и юридическая возможность отобрать участок кладки непосредственно из здания. Во-вторых, лабораторий, имеющих техническую возможность провести испытание целого фрагмента кладки, немного. В частности, согласно нормативу требуется, чтобы подушки пресса были больше образца кладки.

В европейских странах, в особенности в Италии, для испытания кладки активно используется метод плоских плит-домкратов (Flat-Jack Testing) [14–22], который наиболее приближен к методу, регламентированному в ГОСТ 32047–2012, однако адаптированному непосредственно для обследования в полевых условиях. Метод плоских домкратов пришел из области механики горных пород. В начале 80–х гг. группой итальянских исследователей данный метод был приспособлен к каменной кладке [23–25], а в начале 90–х в США появились стандарты ASTM C1196 «Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements» и ASTM C1197 «Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the Flatjack Method».

Однако в России на настоящий момент данный метод не был апробирован, и, соответственно, отсутствуют какие-либо нормативные указания по его применению. Подробная методика испытания методом плоских домкратов представлена в прочих публикациях авторов. Актуальность его применения обусловлена, в частности, повсеместным применением программного 3D-моделирования конструкций из каменной кладки (своды, купола, облицовочные слои и прочие конструкции [26–28]), где одними из важнейших параметров являются прочность кладки и ее модуль упругости.

Постановка задачи

К задачам данного исследования относятся определение возможности применения метода плоских домкратов в условиях Российской Федерации, а также выявление связи или ее отсутствия между характеристиками кладки, полученными прямыми испытаниями фрагмента кладки непосредственно на конструкции методом Flat Jack Testing и определенными испытанием ее отдельных компонентов по стандартной методике.

Приборная база

Для достижения указанных задач авторами сконструирована установка для испытания кирпичной кладки методом плоских домкратов в соответствии с ASTM и по аналогии с зарубежными образцами. Изготовлены плоские домкраты по индивидуальному заказу (рис. 2), собрана гидравлическая система, при активной помощи компании ООО «НПП Интерприбор» разработаны датчики фиксации деформаций на основе регистратора для мониторинга трещин с программным обеспечением (рис. 3). База датчиков составляет 290 мм, диапазон измерения – 20 мм, измерения производятся с точностью 1 мкм.

Зубков С.В., Улыбин А.В., Федотов С.Д. Исследование механических свойств кирпичной кладки методом плоских домкратов

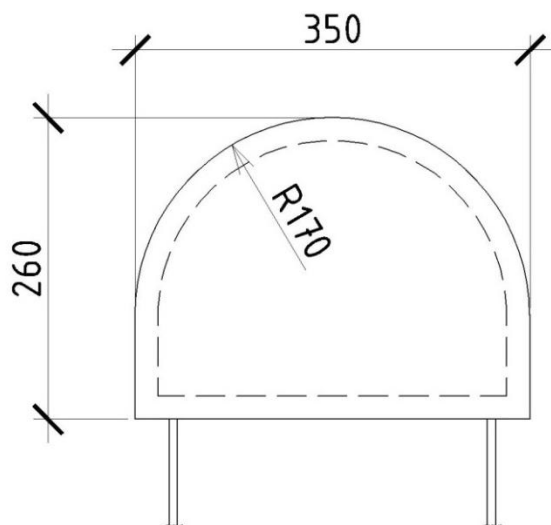


Рисунок 2. Плоский домкрат



Рисунок 3. Датчики фиксации деформаций

Участки расположения крепления датчиков фиксации деформаций приняты в соответствии с требованиями ASTM 1197, руководством по эксплуатации зарубежного аналога и примерами зарубежного использования. В действительности же расположение точек крепления датчиков фиксации деформаций, а именно их база, шаг и пр., может влиять на конечный результат измерений, например, всплеск деформаций на крайних рядах кладки (принцип Сен-Венана), что будет исследовано в дальнейших работах авторов.

Исследование жесткости домкратов

В процессе испытания кладки плоскими домкратами давление, передаваемое на кладку, в действительности будет отличаться от показателей в гидравлической системе. Одной из причин этого явления является жесткость самого домкрата.

При этом необходимо отметить, что несмотря на тот факт, что полная площадь домкрата, исходя из его габаритов, составляет 760 см^2 , его максимальная активная площадь, то есть та, которой возможна передача давления на кладку, составляет $\sim 600 \text{ см}^2$ (на рисунке 2 зона выделена пунктиром), что было доказано в процессе калибровки домкрата.

Для оценки жесткости домкратов и ее влияния на результаты испытания был проведен эксперимент. Плоский домкрат зажимался между неподвижной плитой прессы и эталонным динамометром (рис. 4). При помощи насоса в систему подавалось давление, которое фиксировалось электронным манометром. Одновременно с этим фиксировалась нагрузка, передаваемая на динамометр.



Рисунок 4. Определение жесткости домкрата

Калибровка была выполнена для двух домкратов по два раза на каждом. Ее результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний домкрата в калибровочном прессе

Домкрат №1						Домкрат №2					
Испытание №1			Испытание №2			Испытание №1			Испытание №2		
P, бар	F, кН	S, см ²	P, бар	F, кН	S, см ²	P, бар	F, кН	S, см ²	P, бар	F, кН	S, см ²
4.0	12.4	310.0	4.0	15.2	380.0	4.0	13.9	347.5	4.0	13.1	327.5
8.1	33.8	419.9	8.2	38.2	468.7	8.1	36.1	448.4	8.2	33.4	409.8
12.0	57.0	475.0	12.2	61.0	500.0	12.1	60.0	495.9	12.2	57.1	468.0
16.0	82.4	515.0	16.0	83.8	523.8	16.0	82.7	516.9	16.0	81.7	510.6
20.0	104.8	524.0	20.0	107.0	535.0	20.0	107.2	536.0	20.0	105.6	528.0
24.0	131.9	549.6	24.0	132.8	553.3	24.0	131.2	546.7	24.0	129.6	540.0
28.0	157.1	561.1	28.0	156.8	560.0	28.0	158.1	564.6	28.0	155.8	556.4
32.0	183.2	572.5	32.0	181.7	567.8	32.0	182.2	569.4	32.0	180.5	564.1
36.0	209.0	580.6	36.0	205.9	571.9	36.0	207.0	575.0	36.0	206.1	572.5
40.0	234.8	587.0	40.0	234.5	586.3	40.0	234.7	586.8	40.0	231.8	579.5

P – давление в системе, бар;

F – нагрузка в динамометре, кН;

S – площадь передачи нагрузки, см²

В результате эксперимента установлено, что с увеличением давления площадь домкрата, передающая нагрузку, увеличивается по логарифмической зависимости. В качестве примера представлен график зависимости площади от давления при испытании домкрата №1 (рис. 5). Это связано с наличием у домкрата собственной жесткости.

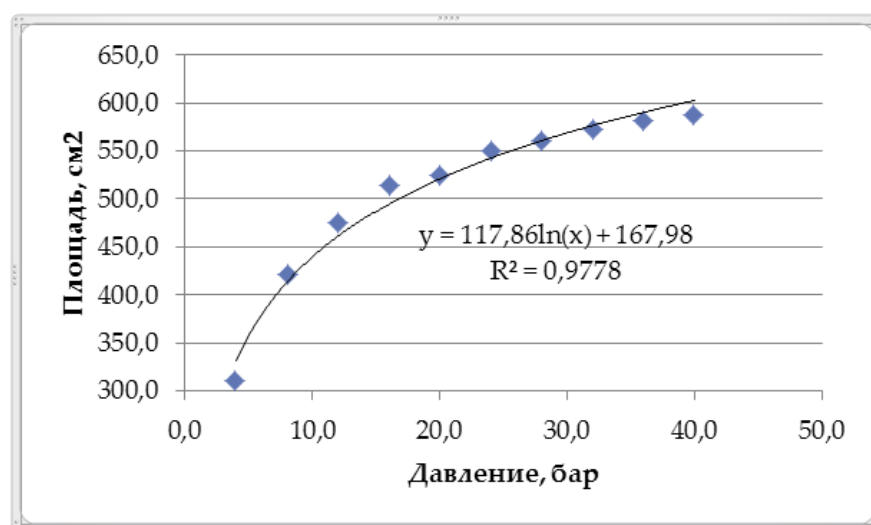


Рисунок 5. График зависимости площади передачи нагрузки от давления в системе

Учитывая вышеописанное, были выведены коэффициенты жесткости домкратов исходя из того, что активная площадь передачи нагрузки должна быть 600 см². Результаты анализа представлены в таблице 2. График влияния жесткости домкрата на результаты представлен на рисунке 6.

Таблица 2. Результаты определения коэффициентов жесткости домкратов

Домкрат №1						Домкрат №2					
Испытание №1			Испытание №2			Испытание №1			Испытание №2		
P, бар	S, см ²	K	P, бар	S, см ²	K	P, бар	S, см ²	K	P, бар	S, см ²	K
4.0	310.0	0.52	4.0	380.0	0.63	4.0	347.5	0.58	4.0	327.5	0.55
8.1	419.9	0.70	8.2	468.7	0.78	8.1	448.4	0.75	8.2	409.8	0.68
12.0	475.0	0.79	12.2	500.0	0.83	12.1	495.9	0.83	12.2	468.0	0.78
16.0	515.0	0.86	16.0	523.8	0.87	16.0	516.9	0.86	16.0	510.6	0.85
20.0	524.0	0.87	20.0	535.0	0.89	20.0	536.0	0.89	20.0	528.0	0.88
24.0	549.6	0.92	24.0	553.3	0.92	24.0	546.7	0.91	24.0	540.0	0.90
28.0	561.1	0.94	28.0	560.0	0.93	28.0	564.6	0.94	28.0	556.4	0.93
32.0	572.5	0.95	32.0	567.8	0.95	32.0	569.4	0.95	32.0	564.1	0.94
36.0	580.6	0.97	36.0	571.9	0.95	36.0	575.0	0.96	36.0	572.5	0.95
40.0	587.0	0.98	40.0	586.3	0.98	40.0	586.8	0.98	40.0	579.5	0.97

P – давление в системе, бар;

S – площадь передачи нагрузки, см²;

K – коэффициент жесткости домкрата

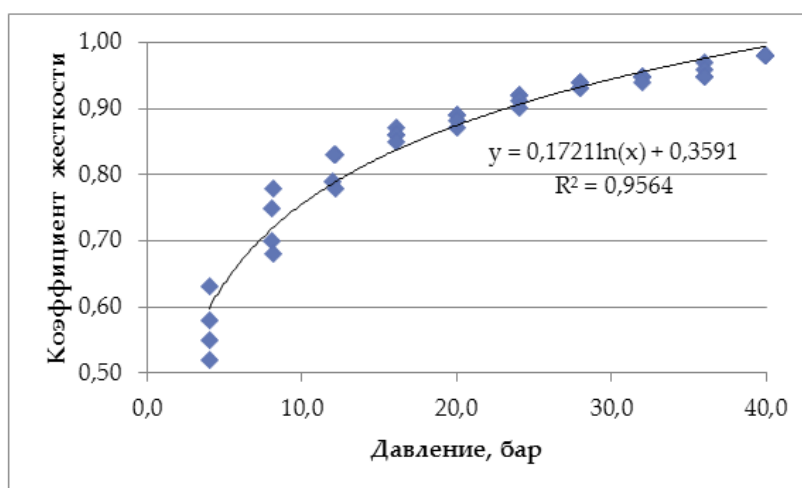


Рисунок 6. График зависимости коэффициента жесткости домкрата от давления в системе

Таким образом, в ходе калибровки установлено, что жесткость домкратов оказывает значительное влияние только при низких давлениях. Получены переходные коэффициенты жесткости домкратов, оценено их влияние на результат испытаний.

Практическое применение и результаты испытаний

Разработанная установка была апробирована на четырех реальных объектах. При этом перед проведением испытаний из конструкций были отобраны образцы кирпича и раствора для определения прочностных и деформационных характеристик кирпичной кладки по стандартной методике.

Испытание методом плоских домкратов проводилось следующим образом. В кладке друг над другом осуществлялись два пропила, в которые впоследствии устанавливались плоские домкраты. На участке между домкратами монтировались датчики для фиксации деформаций кладки. После этого увеличивалось давление в системе с параллельной фиксацией деформаций кладки.

Фотографии проведения испытания представлены на рисунках 7–8, результаты испытаний сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Результаты испытания кладки

Объект	R камня, кгс/см ²	R р-ра, кгс/см ²	Е, МПа (СП 15.13330.2012)	Е, МПа (Flat-jack)
№1	71	119	2910	5810
№2	188	46	4130	3200
№3	76	115	3070	3040
№4	296	81	6270	7600



Рисунок 7. Испытание кирпичной кладки

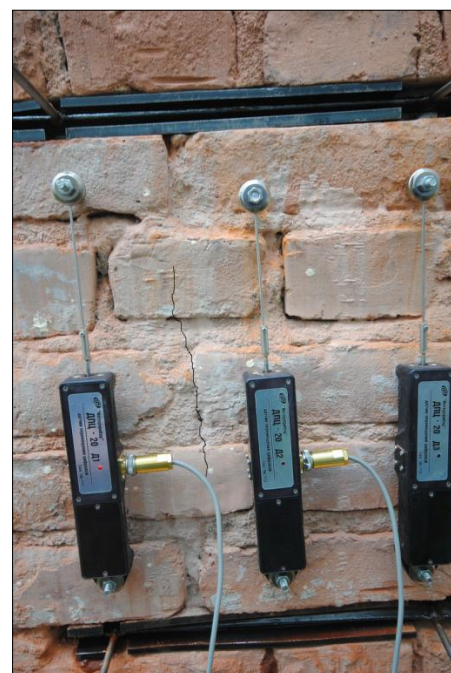


Рисунок 8. Процесс трещинообразования

В результате испытаний получены значения деформационных характеристик кирпичных кладок, а именно модули упругости, определенные как расчетом по стандартной методике, так и прямым испытанием методом плоских домкратов.

Полученные модули упругости по стандартной методике и непосредственным испытанием в полевых условиях во многом не совпадают. Разница между результатами, определенными путем испытания методом плоских домкратов, и результатами, полученными по стандартной методике, составляет: объект №1 – 99 %, объект №2 – 22.5 %, объект №3 – 0.9 %, объект №4 – 21 % (указаны проценты от значения модуля упругости, определенного в соответствии с нормами). Это может быть связано с несколькими причинами. Во-первых, при стандартной методике не учитывается качество и состояние швов кладки, что может привести к завышению значения модуля упругости. Во-вторых, при испытаниях методом плоских домкратов не было учтено влияние соседних участков кладки, что, в свою очередь, могло привести к завышению модуля упругости при данном виде испытаний.

Необходимо отметить, что в процессе испытания не удалось довести кладку до потери несущей способности, то есть до состояния, когда деформации увеличиваются при постоянной нагрузке. Это произошло, в частности, по причине достижения предельного значения максимального давления для конструкции домкрата данного типа. Поэтому для определения предела прочности и, следовательно, расчетного сопротивления кладки необходимо определение иных граничных критериев, например, связанных с образованием трещин.

Решение данных проблем и будет являться целью дальнейших исследований авторов.

Заключение

1. Применяемые в настоящее время в России методы определения механических характеристик кирпичной кладки основаны на определении прочности компонентов, составляющих кладку, с последующими расчетами по эмпирическим зависимостям, что не позволяет учесть качество возведения кладки и другие факторы. Действующий ГОСТ 32047–2012 на испытание фрагментов кладки практически не применим при обследовании зданий.

2. При обследовании зданий и сооружений наиболее перспективным методом определения механических характеристик каменной кладки в полевых условиях представляется непосредственное испытание кладки методом плоских домкратов.

3. Экспериментальным путем установлены жесткостные характеристики конструкций домкратов. Установлено, что влияние жесткости домкратов на передаваемую нагрузку описывается логарифмической зависимостью.

Литература

1. Улыбин А.В., Зубков С.В., Федотов С.Д., Кукушкина Г.А., Черненко Е.В. Техническое обследование строительных конструкций комплекса производственных зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №7(22). С. 194–217.
2. Улыбин А.В., Зубков С.В., Федотов С.Д., Закревский А.Ю. Обследование свайных фундаментов при надстройке зданий // Инженерно-строительный журнал. 2014. №4(48). С. 17–27.
3. Онищик Л.И. Прочность и устойчивость каменных конструкций. Москва–Ленинград: Главредстройлит, 1937. 292 с.
4. Улыбин А.В., Зубков С.В. О методах контроля прочности керамического кирпича при обследовании зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2012. №3(29). С. 29–34.
5. Гучкин И.С., Артюшин Д.В. Определение прочности (марки) керамического кирпича в конструкциях неразрушающим методом // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2006. №1. С. 103–104.
6. Житушкин В.Г., Кучеров В.Н. Определение прочности кладки из кирпича в натурных условиях // Жилищное строительство. 2001. №9. С. 11–12.
7. Руководство по определению прочности кирпичной кладки неразрушающим методом пластических деформаций. Краснодар, 1999. 15 с.
8. Тележкин В.Ф., Угаров П.А. Ультразвуковая система для экспресс-анализа технических характеристик кирпича // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. 2000. №1. С. 171–180.
9. Brozovsky J., Zach J. Non-destructive Testing of Solid Brick Compression Strength in Structures // IV Conferencia Panamericana de END. Buenos Aires. 2007 [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/1.pdf> (дата обращения: 15.04.2012).
10. Деркач В.Н., Жерносек Н.М. Методы оценки прочности каменной кладки в отечественной и зарубежной практике обследования зданий и сооружений // Вестник Белорусско-Российского университета. 2010. №3(28). С. 135–143.
11. Орлович Р.Б., Деркач В.Н. Оценка прочности кладочных растворов при обследовании каменных зданий // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 3–10.
12. Улыбин А.В., Зубков С.В., Сударь О.Ю., Лаптев Е.А. Стандартная и альтернативная методики определения прочности кирпича при обследовании зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №3(18). С. 9–24.

References

1. Ulybin A.V., Zubkov S.V., Fedotov S.D., Kukushkina G.A., Chernenko Ye.V. Tekhnicheskoye obsledovaniye stroitelnykh konstruksiy kompleksa proizvodstvennykh zdaniy [Technical inspection of building structures of the complex of industrial buildings]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. No. 7(22). Pp. 194–217. (rus).
2. Ulybin A.V., Zubkov S.V., Fedotov S.D., Zakrevskiy A.Yu. Obsledovaniye svaynykh fundamentov pri nadstroyke zdaniy [A survey of pile foundations in the superstructure of buildings]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 4. Pp. 17–27. (rus).
3. Onishchik L.I. *Prochnost i ustoychivost kamennykh konstruksiy* [The strength and stability of masonry structures]. Moscow-Leningrad. Glavredstroylit. 1937. 292 p. (rus).
4. Ulybin A.V., Zubkov S.V. O metodakh kontrolya prochnosti keramicheskogo kirpicha pri obsledovanii zdaniy i sooruzheniy [On the methods of monitoring the strength of ceramic bricks in the survey of buildings and structures]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 3. Pp. 29–34. (rus).
5. Guchkin I.S., Artyushin D.V. Opredeleniye prochnosti (marki) keramicheskogo kirpicha v konstruksiyakh nerazrushayushchim metodom [Determination of (brand) of ceramic bricks in the construction of non-destructive method]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2006. No. 1. Pp. 103–104. (rus).
6. Zhitushkin V.G., Kucherov V.N. Opredeleniye prochnosti kladki iz kirpicha v naturnykh usloviyakh [Determining the strength of brick masonry in natural conditions]. *Zhilyshchnoe Stroitel' stvo*. 2001. No. 9. Pp. 11–12. (rus).
7. *Rukovodstvo po opredeleniyu prochnosti kirpichnoy kladki nerazrushayushchim metodom plasticheskikh deformatsiy* [Guidelines for determining the strength of masonry non-destructive method of plastic deformation]. Krasnodar. 1999. 15 p. (rus).
8. Telezhkin V.F., Ugarov P.A. Ultrazvukovaya sistema dlya ekspress-analiza tekhnicheskikh kharakteristik kirpicha [Ultrasonic system for rapid analysis of the technical characteristics of brick]. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2000. No. 1. Pp. 171–180. (rus).
9. Brozovsky J., Zach J. Non-destructive Testing of Solid Brick Compression Strength in Structures. *IV Conferencia Panamericana de END*. Buenos Aires. 2007 [Electronic resource]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/1.pdf> (accessed: 15.04.2012).
10. Derkach V.N., Zhernosek N.M. Metody otsenki prochnosti kamennoy kladki v otechestvennoy i zarubezhnoy praktike obsledovaniya zdaniy i sooruzheniy [Methods for evaluating

Zubkov S.V., Ulybin A.V., Fedotov S.D. Assessment of mechanical properties of brick masonry by flat-jack method

13. Улыбин А.В., Старцев С.А., Зубков С.В. Контроль влажности при обследовании каменных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2013. №7(42). С. 32–39.
14. Nobile L., Gentilini C., Bartolomeo V., Bonagura M. Micro-destructive flat-jack test for the diagnosis of historic masonry // *Key Engineering Materials*. 2010. Vols. 417–418. Pp. 741–744.
15. Bartoli G., Betti M., Giordano S. In situ static and dynamic investigations on the "Torre Grossa" masonry tower // *Engineering Structures*. 2013 Vol. 52. Pp. 718–733.
16. Andreini M., De Falco A., Giresini L., Sassu M. Mechanical characterization of masonry walls with chaotic texture: Procedures and results of in-situ tests // *International Journal of Architectural Heritage*. 2014. Vol. 8. Pp. 376–407.
17. Binda L., Saisi A., Zanzi L. Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolò l'Arena (Italy) // *NDT and E International*. 2003. Vol. 36. №4. Pp. 215–227.
18. Carpinteri A., Invernizzi S., Lacidogna G. Numerical simulation of brick-masonry subjected to the double flat-jack test // *Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*. 2007. Pp. 1623–1630.
19. Gregorczyk P., Lourenco P.B. A review on Flat-jack testing // *Engenharia Civil*. 2000. №9. Pp. 39–50.
20. Boscatto G., Dal Cin A., Russo S., Sciarretta F. SHM of historic damaged churches // *2nd Global Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering, GCCSEE 2013*. Shenzhen China. Vols. 838–841. Pp. 2071–2078.
21. Bartoli G., Betti M. Cappella dei Principi in Firenze, Italy: Experimental analyses and numerical modeling for the investigation of a local failure // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2013. Vol. 27. №1. Pp. 4–26.
22. Lombillo I., Villegas L., Fodde E., Thomas C. In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 51. Pp. 451–460.
23. Rossi P.P., Binda L.M., Landriani G.S. Diagnostic analysis of masonry building [Электронный ресурс] // *IASBE Symposium*. Venice. September. 1983. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.rteknos.it/area_clienti/pdf_file/ismes/189.pdf (дата обращения: 02.12.2015).
24. Faiella D., Manfredini G., Rossi P.P. In situ flat jack tests: analysis of results and critical assessment // *Symposium International - Reconnaissance des Sols et des Roches par Essais en Place*. Paris. 1983. Pp. 507–512.
25. Rossi P.P. Analysis of Mechanical Characteristics of Brick Masonry Tested by Means of Nondestructive In-situ Tests. ISMES Publication. Bergamo, Italy. 1982. Pp. 77–85.
26. Зимин С.С., Беспалов В.В., Казимирова А.С. Расчетная модель каменной арочной конструкции // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2015. №3(113). С. 33–37.
27. 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.
28. Пангаев В.В. Развитие расчетно-экспериментальных методов исследования прочности кладки каменных конструкций, Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.т.н. Спец. 05.23.01. 2009.
- the strength of masonry in domestic and foreign practice survey of buildings and structures]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*. 2010 No. 3(28). Pp. 135–143. (rus).
11. Orlovich R.B., Derkach V.N. Otsenka prochnosti kladochnykh rastvorov pri obsledovanii kamennykh zdaniy [Evaluation of the strength mortars when examining stone buildings]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 7. Pp. 3–10. (rus).
12. Ulybin A.V., Zubkov S.V., Sudar O.Yu., Laptev Ye.A. Standartnaya i alternativnaya metodiki opredeleniya prochnosti kirpicha pri obsledovanii zdaniy i sooruzheniy [Standard and alternative methods for determining the strength of the bricks in the survey of buildings and structures]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. No 3(18). Pp. 9–24. (rus).
13. Ulybin A.V., Startsev S.A., Zubkov S.V. Kontrol vlazhnosti pri obsledovanii kamennykh konstruksiy [Humidity control during the examination of masonry structures]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 7. Pp. 32–39. (rus).
14. Nobile L., Gentilini C., Bartolomeo V., Bonagura M. Micro-destructive flat-jack test for the diagnosis of historic masonry. *Key Engineering Materials*. 2010. Vol. 417–418. Pp. 741–744.
15. Bartoli G., Betti M., Giordano S. In situ static and dynamic investigations on the "Torre Grossa" masonry tower. *Engineering Structures*. 2013. Vol. 52. Pp. 718–733.
16. Andreini M., De Falco A., Giresini L., Sassu M. Mechanical characterization of masonry walls with chaotic texture: Procedures and results of in-situ tests. *International Journal of Architectural Heritage*. 2014. Vol. 8. Pp. 376–407.
17. Binda L., Saisi A., Zanzi L. Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolò l'Arena (Italy). *NDT and E International*. 2003. Vol. 36. No. 4. Pp. 215–227.
18. Carpinteri A., Invernizzi S., Lacidogna G. Numerical simulation of brick-masonry subjected to the double flat-jack test. *Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*. 2007. Pp. 1623–1630.
19. Gregorczyk P., Lourenco P.B. A review on Flat-jack testing. *Engenharia Civil*. 2000. No. 9. Pp. 39–50.
20. Boscatto G., Dal Cin A., Russo S., Sciarretta F. SHM of historic damaged churches. *2nd Global Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering, GCCSEE 2013*. Shenzhen. China. Vol. 838–841. Pp. 2071–2078.
21. Bartoli G., Betti M. Cappella dei Principi in Firenze, Italy: Experimental analyses and numerical modeling for the investigation of a local failure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2013. Vol. 27. No. 1. Pp. 4–26.
22. Lombillo I., Villegas L., Fodde E., Thomas C. In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 51. Pp. 451–460.
23. Rossi P.P., Binda L.M., Landriani G.S. Diagnostic analysis of masonry building [online]. *IASBE Symposium*. Venice. September. 1983. URL: http://www.rteknos.it/area_clienti/pdf_file/ismes/189.pdf (assessed: 02 December 2015).
24. Faiella D., Manfredini G., Rossi P.P. In situ flat jack tests: analysis of results and critical assessment. *Symposium International – Reconnaissance des Sols et des Roches par Essais en Place*. Paris. 1983. Pp. 507–512.
25. Rossi P.P. Analysis of Mechanical Characteristics of Brick Masonry Tested by Means of Nondestructive In-situ Tests. ISMES Publication. Bergamo Italy. 1982. Pp. 77–85.
26. Zimin S.S., Беспалов В.В., Казимирова А.С. Raschetnaya model kamennoy arochnoy konstruksii [The computational model stone arch]. *Proceeding of the DonNACEA*. 2015. No. 3(113). Pp. 33–37. (rus).

27. Orlovich R.B., Gorshkov A.S., Zimin S.S. *Primeneniye kamney s vysokoy pustotnostyu v oblitsovochnom sloye mnogosloynnykh sten* [The use of stones with high emptiness in a facing layer of multi-layer walls]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 8. Pp. 14–23. (rus).
28. Pangayev V.V. *Razvitiye raschetno-eksperimentalnykh metodov issledovaniya prochnosti kladki kamennykh konstruksiy* [The development of computational and experimental methods to study the strength of masonry stone structures: doctoral theses]. 2009. (rus).

Сергей Владимирович Зубков,
+7(921)3877034; эл. почта: svzubkov@mail.ru

Sergey Zubkov,
+7(921)3877034; svzubkov@mail.ru

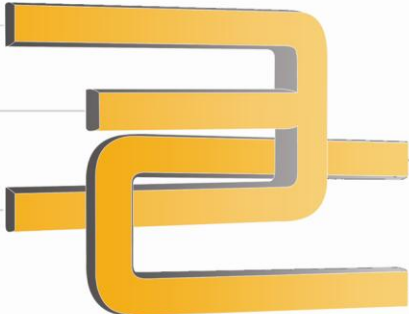
Алексей Владимирович Улыбин,
+7-921-777-45-16; эл. почта: ulybin@mail.ru

Aleksey Ulybin,
+7-921-777-45-16; ulybin@mail.ru

Сергей Дмитриевич Федотов,
+7(911)9167802; эл. почта:
sergey.d.fedotov@gmail.com

Sergey Fedotov,
+7(911)9167802; sergey.d.fedotov@gmail.com

© Зубков С.В., Улыбин А.В., Федотов С.Д., 2015



WWW.ENERGOSOVET.RU

ЭНЕРГОСОВЕТ

ПОРТАЛ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ

открытый «Каталог энергосберегающих технологий»
статьи по энергосбережению и энергоэффективности
нормативно-правовые документы в области энергосбережения
новости, интервью, обзоры и много другой полезной информации

Бесплатная подписка на ежемесячный электронный журнал
по энергосбережению «ЭНЕРГОСОВЕТ».

Журнал направляется
в администрации регионов и муниципальных образований РФ,
центры энергосбережения,
коммерческие предприятия и организации.

<http://www.energosovet.ru>

doi: 10.5862/MCE.60.4

Повреждение каменного лицевого слоя в зоне сопряжения с железобетонными перекрытиями

The damage of a stone facing layer at the junction with reinforced concrete floors

Д-р техн. наук, заведующий кафедрой Р.Б. Орлович,
Западно-Померанский технологический университет Щецина, г. Щецин, Польша
канд. техн. наук, заместитель директора В.Н. Деркач,
Филиал РУП "Институт БелНИИС" – Научно-технический центр, г. Брест, Беларусь
старший преподаватель С.С. Зимин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

R.B. Orlovich,
West Pomeranian University of Technology
Szczecin, Szczecin, Poland
V.N. Derkach,
Branch of RUE Institute BelNIIS – Scientific-technical Centre, Brest, Belarus
S.S. Zimin,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Ключевые слова: каркасные здания; многослойная стена; облицовочный слой; марка раствора; температурные воздействия.

Key words: frame buildings, multi-layer wall, facing layer, mortar type, temperature effects

Аннотация. В статье приводится анализ технического состояния лицевого каменного слоя двухслойных фасадных стен каркасно-монолитных зданий в зоне сопряжения с железобетонными дисками перекрытий. Приведены результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния поэтажно опертых многослойных стен с облицовочным слоем при температурных воздействиях. Выполнен анализ сопротивления облицовочного слоя стены температурным воздействиям с учетом деформационных характеристик растворных швов. Показано, что применение для лицевого слоя высокомарочных растворов приводит к увеличению сжимающих напряжений на его контакте с дисками перекрытий. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния пустотелого кирпича высокой пустотности при заполнении пустот раствором и температурном воздействии. Показано, что перепад температуры всего в 10 градусов вызывает в кирпиче растягивающие напряжения, превышающие допустимые.

Abstract. The article provides an analysis of the technical state of a stone facing layer of two-layer facade walls of monolithic buildings at the junction with reinforced concrete floors. The results of the numerical investigations of the stress-strain state of floor-by-floor supported multilayered walls with a facing layer at temperature influences are given. The analysis of the resistance of the facing layer of the wall to temperature effects, taking into account the deformation characteristics of mortar joints, was carried out. It was shown that the use of high-quality mortars in the facing layer increases the compressive stress on its contact with the slab.

В каркасно-монолитном домостроении в качестве фасадных ограждающих конструкций широкое применение получили двухслойные каменные стены, состоящие из внутреннего теплоизоляционного слоя из легких пено- либо газобетонных блоков и лицевого слоя из пустотных керамических камней. Оба слоя соединены между собой горизонтальными металлическими связями и опираются на железобетонные диски перекрытий. В ряде случаев уже в первые годы эксплуатации лицевой слой подвергается деструкции наружных поверхностей [1–12]. Практика показывает, что в большинстве случаев такой характер разрушения имеет место в зоне сопряжения лицевого слоя с железобетонными дисками перекрытий и обусловлен сложным напряженно-деформируемым состоянием кладки лицевого слоя (рис. 1).

Стоит отметить, что отечественная нормативная документация [13] дает общие рекомендации при проектировании лицевых слоев многослойных стен; при этом учета сложного сопротивления при расчете или методов его минимизации конструктивными мероприятиями в отмеченных документах не содержится. Что же касается зарубежной нормативной документации [14], то она не предусматривает проектирования лицевых слоев с поэтажным опиранием на плиты перекрытий. Отсюда и отсутствие литературы, в которой бы отражалась данная проблематика. При этом результаты исследований, направленных на анализ поведения кладки при определенном сложном напряженно-деформируемом состоянии [15–24], некорректно переносить на анализ поведения кладки, находящейся в обозначенном выше состоянии.

В настоящей статье анализируется ряд факторов, которые приводят к деструкции кладки в зоне сопряжения лицевого слоя с плитами перекрытий.

Концептуальной причиной появления большинства выявляемых при обследовании повреждений (в том числе отмеченного выше) является непроработка решений по наружным стенам и, в частности, лицевым слоям на стадии проектирования. Дело в том, что традиционно решения по наружным стенам прорабатываются архитекторами. При этом проводится ряд расчетов, основной из которых – теплотехнический. Что же касается прочностных расчетов, то в большинстве случаев они не выполняются. Это обосновывается тем, что наружные стены не являются несущими, а при их устройстве с опиранием на плиты перекрытий они несут только нагрузку от собственного веса в пределах одного этажа. В любом случае все ограничивается элементарными расчетами на сжатие от собственного веса. Однако результаты численного моделирования, проводимого авторами статьи в рамках работ по обследованию, показывают, что в кладке лицевого слоя складывается сложное напряженно-деформируемое состояние: кладка сопротивляется всем видам деформирования – сжатию, растяжению, изгибу, срезу; также в ней возникают эффекты кручения. Причем происходит сопротивление усилиям, направленным под разными углами по отношению к горизонтальным растворным швам – известно, что для кладки характерна анизотропия прочностных свойств в зависимости от отмеченного угла. Ситуацию усугубляет применение в лицевом слое кирпича высокой пустотности, что усиливает анизотропию и уменьшает сопротивление кладки практически всем видам деформирования, за исключением центрального сжатия. Сложное напряженно-деформированное состояние складывается по причине совместной работы лицевого слоя с внутренними несущими конструкциями на фоне восприятия им природно-климатических воздействий. То есть, с одной стороны, кладка реагирует на деформации железобетонных конструкций, которые носят неравномерный характер, с другой, в ней возникают деформации от температурно-влажностных и ветровых воздействий. Немаловажным при этом оказывается ее внутренняя структура: применяемые в кладке раствор и кирпич, пустотность кирпича и пр.

О влажностном воздействии

В зоне сопряжения лицевого слоя с плитами перекрытий кладка работает в наиболее неблагоприятных температурно-влажностных условиях, поскольку она непосредственно сопрягается с железобетонным перекрытием, являющимся мостиком холода [25]. Особенно это касается защитного слоя кладки, маскирующего торцы железобетонных перекрытий. Именно в указанной зоне наблюдается наибольшее скопление влаги, которая проникает в виде водяного пара как изнутри помещений, так и от косых дождей, особенно в осенний период [26]. Вода, попадающая в кладку, стекает через пустоты кирпичей и накапливается в зоне их опирания на диски перекрытий. При замерзании накопившаяся влага между торцами перекрытий и защитным слоем выдавливает его наружу фасада (рис. 1а). При этом характер разрушения может иметь прогрессирующий характер, охватывающий большую зону лицевого слоя сверху и снизу дисков перекрытий. При выступающих заподлицо с каменным лицевым слоем торцах дисков перекрытий, в том числе и при их оштукатуривании жестким цементным раствором, разрушение каменной кладки обычно происходит в ее верстах, смежных с перекрытиями (рис. 1б). Таким образом, рационально предусматривать в исследуемых зонах влагоотводящие элементы (например, шнуры).



Рисунок 1. Характерные дефекты лицевого каменного слоя в зоне сопряжения с железобетонными дисками перекрытий

О пустотелых камнях

При применении пустотных керамических камней строительный раствор, попадая в пустоты, оказывает негативное влияние не только на их морозостойкость, но и на трещиностойкость в летнее время. Это связано с тем, что влагопоглощение и коэффициент температурного расширения раствора почти в 2 раза выше аналогичных характеристик керамических камней. В зимнее время увлажненный строительный раствор, заполняющий пустоты, увеличивается в объеме и разрушает камни. В летнее время повышенные температурные деформации раствора стеснены стенками щелевого кирпича, в результате чего в них возникают растягивающие напряжения. Как показывает численный анализ (рис. 2), наибольшие растягивающие напряжения возникают в поперечных внутренних и продольных лицевых стенках камней, что предопределяет их растрескивание в период высоких температур, учитывая относительно нулевое сопротивление керамического черепка на растяжение (1.2 ... 1.8 МПа). Следует при этом также иметь в виду, что стенки щелевых камней часто имеют большие усадочные напряжения в результате сушки и обжига, а также трещины технологического характера. В этом смысле более правильным конструктивным решением было бы выполнение кладки в зоне сопряжения с перекрытиями из полнотелого кирпича, как это предлагалось в работах [2, 3].

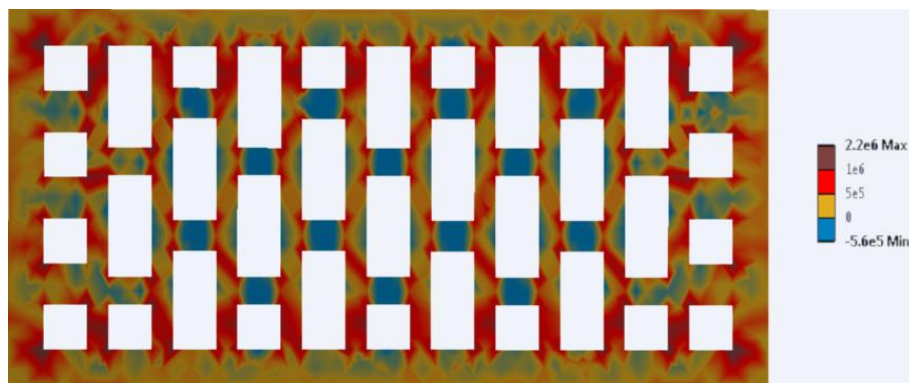


Рисунок 2. Изополя главных растягивающих напряжений в стенках щелевых камней при заполненных строительным раствором пустотах от действия положительных температур ($\Delta = 10^\circ\text{C}$), Па

О температурном воздействии и горизонтальных деформационных швах

Неблагоприятное влияние на эксплуатационное состояние кладки в зоне дисков перекрытий оказывают также силовые факторы, связанные с отсутствием горизонтальных деформационных швов в пределах этажа между низом диска перекрытий и верхней верстой лицевого слоя. На необходимость устройства деформационных (осадочных) швов между каменным заполнением и перекрытиями железобетонных каркасов указывалось еще при разработке таких стен [1]. Однако на практике во многих случаях деформационные швы либо отсутствуют, либо выполняются Орлович Р.Б., Деркач В.Н., Зимин С.С. Повреждение каменного лицевого слоя в зоне сопряжения с железобетонными перекрытиями

некачественно. В связи с этим лицевой слой в пределах этажа оказывается «зажатым» между перекрытиями, воспринимая сжимающие усилия от температурных деформаций, а также от осадки железобетонного каркаса здания и прогибов дисков перекрытий вследствие реологических процессов [27].

Как показывает практика, разрушение фасада обычно происходит в весенне-летний период при значительных положительных температурах наружного воздуха. На основании экспериментальных исследований авторами установлено, что в весенний период (май) температура наружной поверхности лицевого слоя толщиной 12 см из керамических камней может превышать 40 °С, а внутренней – 30 °С. В летний, наиболее жаркий, период температура наружной поверхности вследствие солнечной радиации может достигать 50 °С, а внутренней – 25 °С (при наличии вентилируемого зазора между лицевым и внутренним слоем стены). Примерно такие же данные приводятся в работах [28, 29]. Стоит отметить, что на величину температуры наружной поверхности оказывает влияние цвет кирпича. Таким образом, перепад температур между внутренней и наружной поверхностями лицевого слоя в весенне-летний период может колебаться в пределах 10...25 °С, вызывая его коробление наружу фасада. На рисунке 2 показано деформированное состояние лицевого слоя при разности положительных температур на его внешней и внутренней поверхностях $\Delta T = 10$ °С. Данные получены расчетным путем для лицевого кирпичного слоя и внутреннего слоя из газосиликатных блоков толщиной 12 см и 30 см соответственно. Рассмотрены два варианта: когда оба слоя объединены между собой горизонтальными связями (рис. 2б) и в предположении отсутствия их совместной работы на изгиб из плоскости стены (рис. 2в).

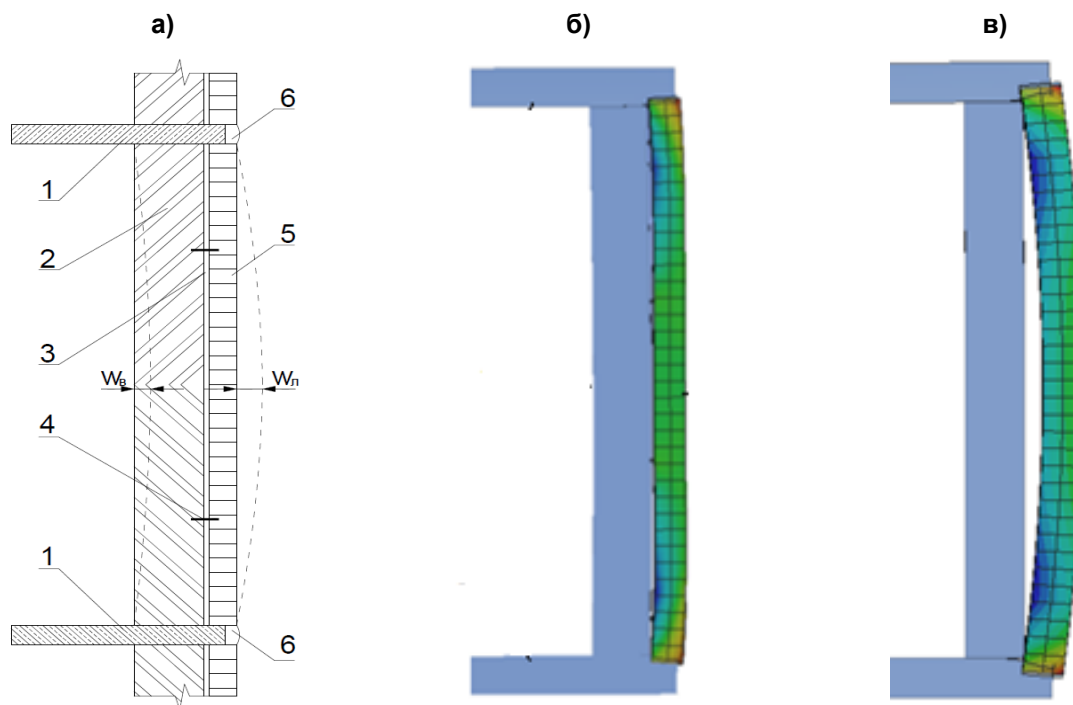


Рисунок 3. Характер деформирования лицевого каменного слоя при разности положительных температур на его внешней и внутренней поверхности:
а) конструктивное решение стены; б) деформированное состояние при учете совместной работы с внутренним каменным слоем из пенобетонных блоков;
в) деформированное состояние без учета совместной работы;
1 – диски перекрытий; 2 – внутренний каменный слой; 3 – воздушный зазор;
4 – гибкие анкера; 5 – каменный лицевой слой; 6 – каменный лицевой слой, закрывающий торец перекрытия

Стесненная депланация горизонтальных сечений лицевого слоя на участках примыкания к диску перекрытия вызывает неравномерное распределение контактных сжимающих напряжений. Наибольшее сжатие испытывают внешние участки лицевой кладки. Причем при отсутствии горизонтальных связей между внутренним и лицевым слоями стены, что нередко наблюдается в практике, максимальные сжимающие напряжения возрастают в полтора–два раза. На рисунке 4 приведены эпюры нормальных напряжений σ в горизонтальных сечениях лицевого слоя, расположенных вблизи дисков перекрытия и в середине его высоты. Данные получены путем расчета лицевого слоя толщиной $t = 12$ см при изменении температуры на его внутренней поверхности на 20°C , а на наружной поверхности – на 40°C . Рассмотрен облицовочный слой, выполненный из керамических камней марки М150 на растворе М100, при отсутствии горизонтальных связей с внутренним слоем.

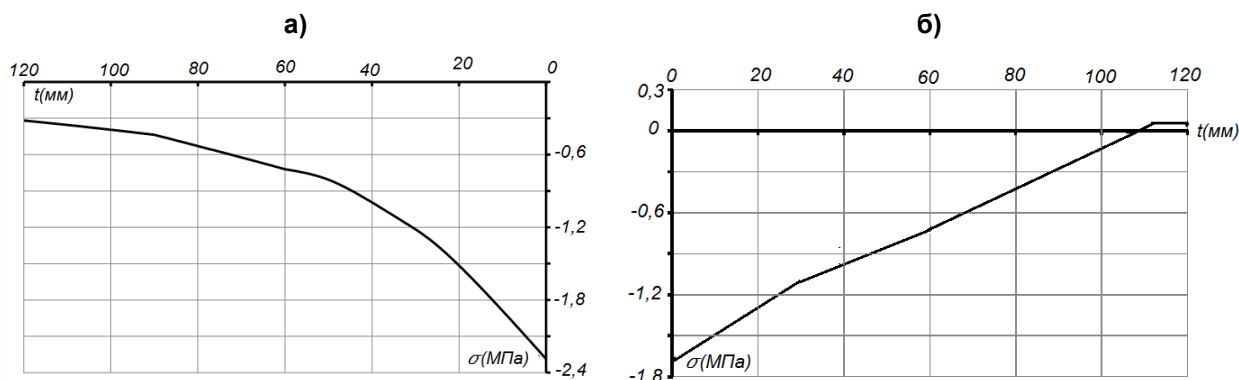


Рисунок 4. Эпюры нормальных напряжений в горизонтальных сечениях лицевого слоя от температурных деформаций: а) в зоне сопряжения с дисками перекрытий; б) в середине высоты стены

Полученные максимальные сжимающие напряжения в опорных участках лицевого слоя меньше сопротивления кладки сжатию и не могут вызвать ее разрушение. Однако их величина может превысить сопротивление сжатию кладки при дополнительном действии ветровой нагрузки (отсоса), а также при осадке каркаса здания и прогибах дисков перекрытий. Особенно это касается участков кладки, заполняющих нишу между торцами дисков перекрытий и внешней поверхностью лицевого слоя (позиция 6 на рис. 3а). Наиболее неблагоприятным является встречаемый в практике случай, когда лицевой слой толщиной 25 см опирается на версту тычковых кирпичей, уложенную на дисках перекрытий со свесом в полкирпича.

Из эпюры нормальных напряжений в сечении, расположенном в середине высоты лицевого слоя (рис. 4б), следует, что с его внешней стороны перпендикулярно горизонтальным растворным швам действуют растягивающие напряжения. Их величина при одновременном действии ветровой нагрузки и осадки каркаса здания будет превышать сопротивление кладки растяжению по неперевазанным сечениям. Это приведет к образованию горизонтальных трещин в зоне растворных швов, в которые может попадать дождевая вода, вызывающая ускоренное размораживание кладки.

О деформативности кладки

На величину сжимающих напряжений в облицовочном слое существенное влияние оказывают деформационные характеристики кладки, зависящие от марки не только кирпича, но и раствора. Поскольку лицевой каменный слой является самонесущим, нет необходимости в применении растворов повышенной марки, что нередко имеет место на практике. Кладочный раствор облицовочного слоя должен быть достаточно прочным при сжатии и при этом в достаточной мере пластичным. Следует отметить, что, согласно требованиям немецких норм DIN 1053–1, для кладки облицовочного слоя многослойных стен допускается применение стандартных кладочных растворов MGII – MGIIa, прочность которых на сжатие соответствует отечественным кладочным растворам М25–М50. Кладочные растворы MGIII, аналогичные по прочности на сжатие отечественным растворам М100, применять в облицовочном слое многослойных стен не допускается, за исключением расшивки швов и армированной кладки [30].

Поскольку облицовочный слой не несет вертикальной нагрузки, за исключением собственного веса, то его деформации в результате колебания температур проявляются сильнее, чем в нагруженной кладке. Иллюстрацией этому является полученная путем численного моделирования зависимость величины максимальных сжимающих напряжений в лицевом слое на контакте с диском перекрытий от марки раствора при постоянной марке пустотных кирпичей М150 (рис. 5). В расчетах приняты следующие деформационные характеристики для кирпича: коэффициент температурного расширения $5.5 \cdot 10^{-6} (^{\circ}\text{C}^{-1})$, модуль упругости $E = 11850$ МПа. Для раствора коэффициент температурного расширения принимался равным $14.5 \cdot 10^{-6} (^{\circ}\text{C}^{-1})$, а модуль упругости в зависимости от его марки принимался согласно экспериментальным данным работы [31] и варьировался в пределах $E = 0 \dots 25000$ МПа. Из анализа приведенной на рисунке 5 зависимости следует, что с уменьшением марки раствора сжимающие напряжения в лицевом слое, вызванные температурными деформациями, снижаются. Подобные закономерности получены авторами при действии сжимающих напряжений, вызванных осадкой каркаса здания.

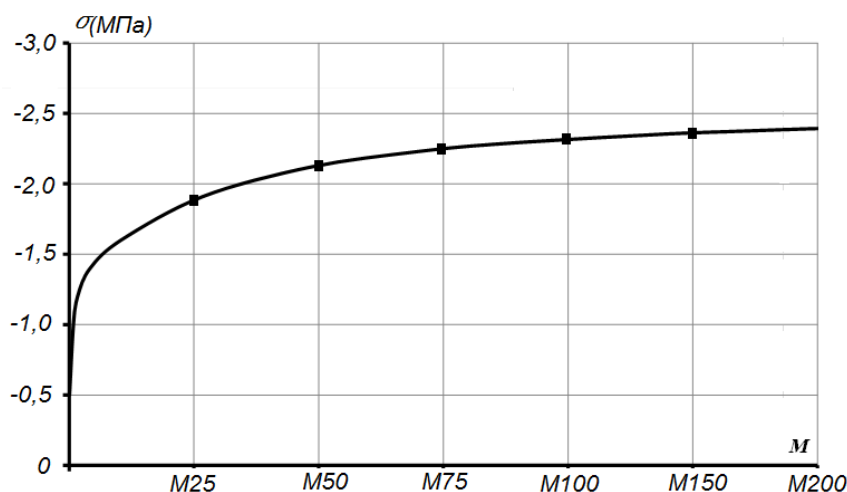


Рисунок 5. Зависимость величины максимальных сжимающих напряжений σ на контакте с дисками перекрытий от марки раствора кладки лицевого слоя М

Применение высокомарочных цементных растворов для кладок лицевого слоя может иметь и другие негативные последствия. Из-за высокой усадки раствора в процессе его твердения в кладках из полнотелых камней нарушается его сцепление с камнями [32]. В кладках из пустотелых камней усадка горизонтальных растворных швов может привести к их растрескиванию либо повреждению лицевых и внутренних стенок камней.

Закключение

Таким образом, приведенный анализ наглядно демонстрирует сложность напряженно-деформированного состояния в зоне сопряжения лицевого слоя с плитами перекрытий, обусловленного как природно-климатическими условиями, так и совместной работой лицевого слоя с внутренними несущими конструкциями, а также внутренней структурой кладки. Неучет данного обстоятельства на стадии проектирования на фоне отсутствия детальных рекомендаций, касающихся проектирования наружных многослойных стен, в нормативной литературе и приводит к описанным выше (и многим другим) повреждениям. В частности, в настоящей статье наглядно показана рациональность выполнения кладки в зоне сопряжения лицевого слоя с перекрытиями из полнотелого кирпича и устройства влагоотводящих элементов, а также нерациональность применения в кладке лицевого слоя раствора высоких марок.

При этом, по мнению авторов статьи, проектирование наружных стен и, в частности, лицевого слоя должно вестись индивидуально для каждого здания, что возможно только при проведении пофрагментного пространственного расчета наружных стен с учетом особенностей конструктивных решений. Последнее обстоятельство требует включения в проектирование наружных стен, кроме архитектора, инженера-расчетчика, чего на сегодняшний день не происходит.

Литература

References

1. Гроздов В.Т. О недостатках существующих проектных решений наружных навесных стен в многоэтажных монолитных железобетонных зданиях // Труды ВИТУ «Дефекты зданий и сооружений». 2006. С. 15–21.
2. Ишук М.К. Причины дефектов наружных стен с лицевым слоем из кирпичной кладки // Жилищное строительство. 2008. №3. С. 28–31.
3. Ишук М.К. Отечественный опыт возведения зданий с наружными стенами из облегченной кладки. М.: РИФ «Стройматериалы», 2009. 360 с.
4. Лобов О. И., Ананьев А.И. Долговечность наружных стен современных многоэтажных зданий // Жилищное строительство. 2008. №8. С. 48–52.
5. Altaha N. Zweischalige Außenwände: Kommentar zur DIN 18195 Beiblatt 1// DasMauerwerk (16). 2012. №6. Pp. 293–296.
6. Drobiec L. Przyczyny uszkodzen murów // XXII Ogólnopolska konferencja warsztatowa projektanta konstrukcji. Szczecin. 2007. Pp. 105–146.
7. Beasley K.J. Masonry Facade Stress Failures // The Construction Specifier. 1998. Vol. 51. №2. Pp. 25–28.
8. Jager W., Thime M. Bemessung von horizontal beanspruchten Mauerwerk nach EN 1996-1-1 mit Hilfe modifizierten Momentenverteilungen zahlen // Das Mauerwerk. 2005. №1. Pp. 8–13.
9. Schubert P. Beitragsreihe: Schaden freies bauen mit Mauerwerk. Thema 2: Innen/Außenwände – Risse durch zu große Verformungsunterschiede in vertikaler Richtung // Das Mauerwerk. 2001. №4. Pp. 142–144.
10. Schubert P. Beitragsreihe: Schaden freies bauen mit Mauerwerk. Thema 1: Zweischalige Außenwände – Risse durch zu große Verformungsunterschiede in horizontaler Richtung // Das Mauerwerk. 2001. №1. Pp. 35–38.
11. Schubert P. Zweischalige Außenwändenach DIN 1053-1. Konstruktion. Baustoffe // Das Mauerwerk. 2003. №6. Pp. 190–196.
12. Schubert P. Zweischalige Außenwändenach DIN 1053-1-Dehnungsfugen in der Außenschale (Vorblendschale) // Das Mauerwerk. 2003. №6. Pp. 202–204.
13. СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции». М., 2012.
14. EN 1996-2.2006 Eurocode 6. Design of masonry structures. Design considerations, selection of materials and execution of masonry.
15. Murauer T. Edelstahl im zweischaligen Mauerwerk-Sicherheit im Hintergrund // Mauerwerk. 2006. №6. Pp. 230–234.
16. Roumani N.A. The shear strength of prestressed brickwork sections. PhD thesis. University of Manchester. 1985.
17. Simudic G., Page A.W. Australian developments in the use of walls of geometric section // 7th North American Masonry Conference, University of Notre Dame – South Bend, Indiana, USA. 1996. Vol. 2. Pp. 1007–1018.
18. Phipps M.E., Montague T.I. The behaviour and design of steel shear connectors in plain and prestressed masonry // 7th North American Masonry Conference, University of Notre Dame – South Bend, Indiana, USA. 1996. Vol. 2. Pp. 789–798.
19. Jager W., Pfeifer G. Konstruktionsregeln für Mauerwerk. Mauerwerk Kalender. Berlin. 2005. Pp. 233–264.
20. Lin K., Totoev Y.Z., Liu H.J., Page A.W. Modeling of dry-stacked masonry panel confined by reinforced concrete frame // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014. Vol. 14. Issue 3. Pp. 497–509.
21. Zhou X., Chen P., Wang Y. Finite element calculation and Orlovich P.B., Derkach V.N., Zimin S.C. Повреждение каменного лицевого слоя в зоне сопряжения с железобетонными перекрытиями
1. Grozdov V.T. O nedostatkakh sushchestvuyushchikh proyektnykh resheniy naruzhnykh navesnykh sten v mnogoetazhnykh monolitnykh zhelezobetonnykh zdaniyakh [About defects of legacy outdoor curtain walls design decisions in multistory monolithic concrete-steel building]. Trudy VITU «Defekty zdaniy i sooruzheniy». St. Petersburg. 2006. Pp. 15–21.
2. Ishchuk M.K. Prichiny defektov naruzhnykh sten s litsevyim sloym iz kirpichnoy kladki [Reasons of defect of enceinte walls with brick masonry exterior layer appearance]. Zhilishchnoe Stroitel'stvo. 2008. No. 3. Pp. 28–31.
3. Ishchuk M.K. Otechestvennyy opyt vozvedeniya zdaniy s naruzhnyimi stenami iz oblegchennoy kladki [Domestic experience of building construction with light-load laying enceinte walls]. Moscow. RIF «Stroymaterialy». 2009. 360 p.
4. Lobov O.I., Ananyev A.I. Dolgovechnost naruzhnykh sten sovremennykh mnogoetazhnykh zdaniy [Durability of enceinte walls of modern multistorey buildings]. Zhilishchnoe Stroitel'stvo. 2008. No. 8. Pp. 48–52.
5. Altaha N. Zweischalige Außenwände: Kommentar zur DIN 18195 Beiblatt 1. Das Mauerwerk. 2012. No. 6. Pp. 293–296.
6. Drobiec L. Przyczyny uszkodzen murów. XXII Ogólnopolska konferencja warsztatowa projektanta konstrukcji. Szczecin. 2007. Pp. 105–146.
7. Beasley K.J. Masonry Facade Stress Failures. The Construction Specifier. 1998. Vol. 51. No. 2. Pp. 25–28.
8. Jager W., Thime M. Bemessung von horizontal beanspruchten Mauerwerk nach EN 1996-1-1 mit Hilfe modifizierten Momentenverteilungen zahlen. Das Mauerwerk. 2005. No. 1. Pp. 8–13.
9. Schubert P. Beitragsreihe: Schaden freies bauen mit Mauerwerk. Thema 2: Innen/Außenwände – Risse durch zu große Verformungsunterschiede in vertikaler Richtung. Das Mauerwerk. 2001. No. 4. Pp. 142–144.
10. Schubert P. Beitragsreihe: Schaden freies bauen mit Mauerwerk. Thema 1: Zweischalige Außenwände – Risse durch zu große Verformungsunterschiede in horizontaler Richtung. Das Mauerwerk. 2001. No. 1. Pp. 35–38.
11. Schubert R. Zweischalige Außenwändenach DIN 1053-1. Konstruktion. Baustoffe. Das Mauerwerk. 2003. No. 6. Pp. 190–196.
12. Schubert R. Zweischalige Außenwändenach DIN 1053-1 Dehnungsfugen in der Außenschale (Vorblendschale). Das Mauerwerk. 2003. No. 6. Pp. 202–204.
13. SP 15.13330.2012 «Kamennyye i armokamennyye konstruksii» [SP 15.13330.2012 «Stone and reinforced masonry constructions»]. Moscow. 2012.
14. EN 1996-2.2006 Eurocode 6. Design of masonry structures. Design considerations, selection of materials and execution of masonry.
15. Murauer T. Edelstahl im zweischaligen Mauerwerk-Sicherheit im Hintergrund. Das Mauerwerk. 2006. No. 6. Pp. 230–234.
16. Roumani N.A. The shear strength of prestressed brickwork sections. PhD thesis. University of Manchester. 1985.
17. Simudic G., Page A.W. Australian developments in the use of walls of geometric section. 7th North American Masonry Conference. University of Notre Dame. South Bend, Indiana, USA. 1996. Vol. 2. Pp. 1007–1018.
18. Phipps M.E., Montague T.I. The behaviour and design of steel shear connectors in plain and prestressed masonry. 7th North American Masonry Conference. University of Notre Dame. South Bend, Indiana, USA. 1996. Vol. 2. Pp. 789–798.
19. Jager W., Pfeifer G. Konstruktionsregeln für Mauerwerk. Mauerwerk Kalender. Berlin. 2005. Pp. 233–264.
20. Lin K., Totoev Y.Z., Liu H.J., Page A.W. Modeling of dry-stacked masonry panel confined by reinforced concrete frame. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014. Vol. 14. Issue 3. Pp. 497–509.
21. Zhou X., Chen P., Wang Y. Finite element calculation and

- and experiment comparison about masonry-infilled frame structure considering connection ways between infill wall and frame // *World Information on Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 31. Issue 2. Pp. 188–195.
22. Luso E., Lourenço P.B. Experimental characterization of commercial lime based grouts for stone masonry consolidation // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 102. Pp. 216–225.
 23. Milani G., Lourenço P.B. Simple homogenized model for the nonlinear analysis of FRP-strengthened masonry structures. II: Structural applications // *Journal of Engineering Mechanics*. 2013. Vol. 139. Issue 1. Pp. 77–93.
 24. Page A.W., Brooks D.S. Design of masonry walls for vertical loading - a review of the provisions of the SAA Masonry Code // *Transactions of the Institution of Engineers, Australia. Civil engineering*. 1988. Vol. CE30. Issue 5. Pp. 265–277.
 25. Орлович Р.Б., Деркач В.Н. Сопряжение лицевого слоя слоистых каменных стен с плитами перекрытий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. №11. С. 62–65.
 26. Орлович Р.Б., Горшков А.С., Зимин С.С. Применение камней с высокой пустотностью в облицовочном слое многослойных стен // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №8. С. 14–23.
 27. Орлович Р.Б., Зимин С.С., Рубцов Н.М., О работе облицовочного каменного слоя наружных стен каркасно-монолитных зданий при силовых воздействиях // *Строительство и реконструкция*. 2014. №4(54). С. 26–30.
 28. Семенов С.А. Деформации и напряжения в керамической облицовке зданий с железобетонным каркасом // *Исследования по каменным конструкциям*. М.: Госстройиздат, 1957. С. 52–79.
 29. Орлович Р.Б., Деркач В.Н. О вентилируемой воздушной прослойке слоистых каменных стен // *Архитектура и строительство*. 2010. №6. С. 72–74.
 30. Kalksandstein-Planung, Konstruktion, Ausführung. Düsseldorf: VerlagBau+Technik GmbH. 2014. 363 p.
 31. Пангаев В.В. Развитие расчетно-экспериментальных методов исследований прочности кладки каменных конструкций: дисс. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2009. 34 с.
 32. Поляков С.В. К вопросу сцепления в кирпичной кладке // *Исследования по каменным конструкциям*. М.: Госстройиздат, 1957. С. 298–301.
 - experiment comparison about masonry-infilled frame structure considering connection ways between infill wall and frame. *World Information on Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 31. Issue 2. Pp. 188–195.
 22. Luso E., Lourenço P.B. Experimental characterization of commercial lime based grouts for stone masonry consolidation. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 102. Pp. 216–225.
 23. Milani G., Lourenço P.B. Simple homogenized model for the nonlinear analysis of FRP-strengthened masonry structures. II: Structural applications. *Journal of Engineering Mechanics*. 2013. Vol. 139. Issue 1. Pp. 77–93.
 24. Page A.W., Brooks D.S. Design of masonry walls for vertical loading - a review of the provisions of the SAA Masonry Code. *Transactions of the Institution of Engineers, Australia. Civil engineering*, 1988. Vol. CE30. Issue 5. Pp. 265–277.
 25. Orlovich R.B., Derkach V.N. Sopryazheniye litseвого sloya sloistyykh kamennykh sten s plitami perekrytiy [Conjunction of a Face Layer of Laminated Stone Walls with Floor Slabs]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2011. No. 11. Pp. 62–65.
 26. Orlovich R.B., Gorshkov A.S., Zimin S.S. Primeneniye kamney s vysokoy pustotnostyu v oblitsovochnom sloye mnogosloynnykh sten [Application of stones of high voidage in the facing layer of the multilayer walls]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 8. Pp. 14–23.
 27. Orlovich R.B., Zimin S.S., Rubtsov N.M., O rabote oblitsovochnogo kamennogo sloya naruzhnykh sten karkasno-monolitnykh zdaniy pri silovykh vozdeystviyakh [Work stone facing layer of external multi-layer walls of frame-monolithic multi-story building at force effects]. *Building and reconstruction*. 2014. No. 4 (54). Pp. 26–30.
 28. Sementsov S.A. Deformatsii i napryazheniya v keramicheskoy oblitsovke zdaniy s zhelezobetonnyim karkasom. [Deformations and efforts in ceramic facing of buildings with reinforced concrete skeleton frame]. *Issledovaniya po kamennym konstruksiyam*. Moscow. Gosstroyizdat. 1957. Pp. 52–79.
 29. Orlovich R.B., Derkach V.N. O ventiliruyemoy vozduшной прослойке слоистых каменных стен [About lamellated stone walls aerated air space]. *Architecture and construction of Russia*. 2010. No. 6. Pp. 72–74.
 30. Kalksandstein-Planung, Konstruktion, Ausführung. Düsseldorf: VerlagBau+Technik GmbH. 2014. 363 p.
 31. Pangayev V.V. Razvitiye raschetno-eksperimentalnykh metodov issledovaniy prochnosti kladki kamennykh konstruksiy [Development of experiment-calculated method of testing of masonry structure durability]. Doctoral thesis. Novosibirsk. 2009. 34 p.
 32. Polyakov S.V. K voprosu stsepleniya v kirpichnoy kladke [About question of cohesion in brick masonry]. *Issledovaniya po kamennym konstruksiyam*. Moscow. Gosstroyizdat. 1957. Pp. 298–301.

Ромуальд Болеславович Орлович,
+48661868850; эл. почта: orlowicz@mail.ru

Валерий Николаевич Деркач,
+375-296-411962; эл. почта:
v-derkach@yandex.ru

Сергей Сергеевич Зимин,
+7(921)3477701; эл. почта:
zimin_sergei@mail.ru

Romuald Orlovich,
+48661868850; orlowicz@mail.ru

Valery Derkach,
+375-296-411962; v-derkach@yandex.ru

Sergej Zimin,
+7(921)3477701; zimin_sergei@mail.ru

© Орлович Р.Б., Деркач В.Н., Зимин С.С., 2015

doi: 10.5862/MCE.60.5

Соппротивление ветровым воздействиям поэтажно опертых многослойных стен с облицовочным слоем

Wind load resistance of multilayer walls supported floor-by-floor with a facing layer

**Канд. техн. наук, заместитель директора
В.Н. Деркач,**
Филиал РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, г. Брест, Беларусь

V.N. Derkach,
Branch of RUE Institute BelNIIS – Scientific-technical Centre, Brest, Belarus

Ключевые слова: каркасные здания; многослойная стена; облицовочный слой; основной слой; расчетные модели; предельное состояние несущей способности

Key words: frame buildings; multilayer wall; cladding layer; core layer; calculation models; ultimate limit state

Аннотация. В статье приведена методика проверки предельного состояния несущей способности поэтажно опертых многослойных стен с облицовочным слоем при ветровых воздействиях. Выполнен анализ сопротивления конструкции многослойной стены ветровым воздействиям с учетом прочностных и деформационных характеристик облицовочного и основного слоев кладки, условий крепления стены к конструкциям каркаса. Показано, что использование каменных кладок с низким модулем деформаций для основного слоя многослойных стен с кирпичной облицовкой, а также отсутствие крепления основного слоя к опорному перекрытию приводят к увеличению изгибающих моментов в облицовочном слое. Установлено, что наступление предельного состояния несущей способности многослойной стены, основной слой которой выполнен из ячеистобетонных блоков толщиной 300 мм, определяется сопротивлением облицовочного слоя кладки ветровым воздействиям. Сформулированы предложения по проектированию поэтажно опертых многослойных стен с облицовочным слоем из кирпича.

Abstract. The article describes a method for checking the ultimate limit state of multilayer walls supported floor-by-floor with a facing layer under wind loads. We have conducted an analysis of the resistance of the multilayer wall structure to wind effects, taking into account the strength and deformation characteristics of the cladding and core layers, and the conditions for securing the masonry wall to the frame structure. It was shown that the use of a base layer for multilayer walls with brick veneer masonry with a low modulus of deformation, and the lack of consolidation of the base layer to the support increase the overlap of bending moments in the facing layer. It was found that the onset of the ultimate limit state of multilayer walls which base layer is made of 300 mm-thick porous concrete blocks is determined by the resistance of the masonry cladding layer to wind loads. Proposals for the design of multilayer walls with supported floor-by-floor with a facing layer of brick were formulated.

Введение

В практике современного домостроения широкое распространение получили многоэтажные здания с монолитным железобетонным каркасом, в которых наружные и внутренние стены возводят из мелкоштучных кладочных изделий с опиранием на диски перекрытий в пределах каждого этажа. Наружные стены таких зданий часто возводят по технологии многослойной кладки с облицовочным слоем из керамического или силикатного кирпича. Последний крепится к основному слою стены с помощью гибких анкерных связей. Между основным и облицовочным слоями кладки располагается воздушный зазор и слой эффективной теплоизоляции. Указанные стены выгодно отличаются от однослойных по теплостойкости, акустическим свойствам, пожарной безопасности и долговечности.

В СССР конструктивное решение многослойных стен с наружной облицовкой кирпичом было разработано ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко и представлено в рабочих чертежах серии 2.130–8 от 1988 г. (выпуски 0 и 1). В этой серии не было предусмотрено поэтажное опирание наружных стен, Деркач В.Н. Соппротивление ветровым воздействиям поэтажно опертых многослойных стен с облицовочным слоем

а высота зданий со стенами из облегченной кладки ограничивалась пятью этажами. Массовое строительство зданий с монолитным каркасом, начавшееся в середине 90-х годов прошлого столетия, потребовало новых, более эффективных с точки зрения теплопередачи и адаптированных к требованиям высотного строительства конструктивных решений стенового ограждения. При этом действующие нормы СНиП II-22-81 «Каменные и армокаменные конструкции» не содержали указаний по проектированию таких стен. По этой причине принимаемые проектные решения не были обоснованы не только экспериментальными исследованиями, но даже расчетами стенового ограждения. Последующая эксплуатация многоэтажных каркасных зданий с многослойными стенами в Москве, Санкт-Петербурге и ряде других городов показала, что во многих домах уже в первые 3–5 лет в облицовочном слое возникают повреждения, которые приводят к аварийному состоянию стенового ограждения [1–10].

В 2013 г. в Российской Федерации вышла актуализированная редакция СНиП II-22-81* – СП 15.13330.2012, в которой установлены правила проектирования многослойных стен с облицовочным слоем. В соответствии с данным документом при проектировании поэтажно опертых многослойных стен облицовочный слой кладки должен приниматься толщиной 250 мм, что приводит к существенному удорожанию стенового ограждения и увеличению нагрузок на конструкции каркаса. Данный норматив можно расценивать как запретительный для возведения поэтажно опертых многослойных стен с облицовочным слоем из кирпича.

В то же время в странах Центральной и Северной Европы многолетняя эксплуатация зданий с многослойными стенами с облицовочным слоем толщиной в полкирпича доказала их надежность, долговечность и, если принимать во внимание эксплуатационные затраты на здание, высокую экономическую эффективность. Правильно и качественно выполненные многослойные стены с облицовочным кирпичным слоем, в отличие от стен с отделкой штукатуркой или вентилируемых фасадных систем, практически не требуют ремонта в течение проектного срока эксплуатации здания. При этом в европейских нормах по проектированию каменных конструкций Еврокоде 6, в отличие от отечественных норм, содержатся конкретные указания по проектированию многослойных стен с воздушным вентилируемым зазором, разработана система стандартов, устанавливающих требования к применяемым материалам, вспомогательным изделиям и методам их испытаний [11–17].

Методика расчета многослойных стен на ветровые воздействия согласно Еврокоду 6

Облицовочный слой многослойных поэтажно опертых стен подвергается ветровым и температурно-влажностным воздействиям, а также влиянию собственного веса. Ветровые воздействия посредством анкерных связей передаются на основной слой кладки, который воспринимает дополнительно вертикальные воздействия от собственного веса и веса утеплителя.

Согласно Еврокоду 6, при ветровых горизонтальных воздействиях расчетные значения изгибающих моментов в многослойной стене допускается определять упрощенным методом, рассматривая стену как пластину, опертую по трем или четырем сторонам, изгибающие моменты в которой определяются с помощью таблиц. Эффективную толщину стены с воздушным зазором t_{ef} рассчитывают по формуле:

$$t_{ef} = \sqrt[3]{k_{tef} t_1^3 + t_2^3},$$

где t_1 , t_2 – фактическая толщина слоев или их эффективная толщина, если она определяющая, при этом t_1 – толщина облицовочного слоя, t_2 – толщина основного слоя;
 k_{tef} – коэффициент, равный частному при делении различных модулей упругости слоев t_1 и t_2 , но не более 2.

Если t_{ef} превышает 250 мм, в стене имеются проемы и ее форма отличается от прямоугольной, расчет стены рекомендуется выполнять методом конечных элементов (МКЭ) или методом предельного равновесия с учетом анизотропии механических характеристик каменной кладки. Следует отметить, что исследования, выполненные в филиале РУП «Институт БелНИИС» и СПбПУ Петра Великого [17], показали, что каменная кладка относится к материалам со слабо выраженной анизотропией деформационных характеристик, которую при расчете усилий и напряжений в кладке допускается не учитывать.

В расчетной модели многослойной стены, основанной на МКЭ, каменная кладка моделируется пластинчатыми конечными элементами (КЭ) с приведенной изгибной жесткостью (рисунок 1а).

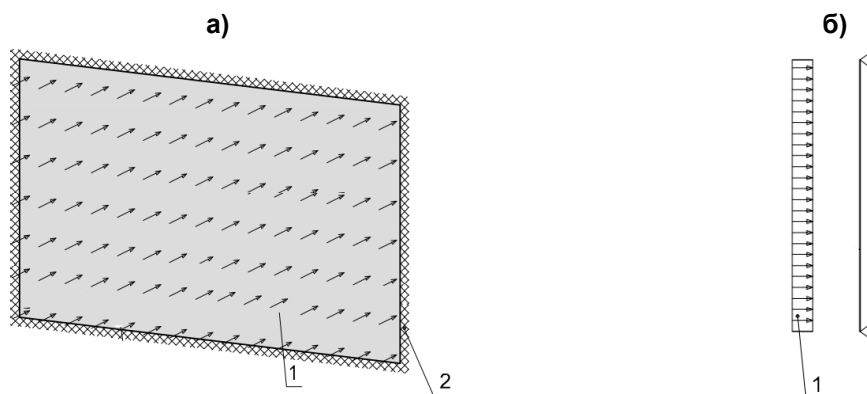


Рисунок 1. Расчетные модели стены: а) стена, опертая по трем или четырем сторонам; б) стена, опертая по верхней и нижней граням; 1 – ветровая нагрузка; 2 – закрепление грани стены из плоскости (свободная грань, жесткая заделка или точечное шарнирное опирание)

Опорные закрепления располагаются в местах установки связевых элементов. Когда основной слой многослойной стены соединен со стенами, нагруженными вертикальной нагрузкой, то опору допускается рассматривать как сплошную. Если опирание основного слоя осуществляется только по верхней и нижней граням или его длина в два раза превышает высоту, то при статическом расчете основной слой можно рассматривать как однопролетную шарнирно опертую балку (рис. 1б).

На основании статических расчетов многослойной стены устанавливаются расчетные значения изгибающих моментов и опорных реакций. Полученные значения изгибающих моментов распределяются на два слоя стены пропорционально их изгибной жесткости.

Проверка предельного состояния несущей способности многослойной стены при действии ветровой нагрузки проводится отдельно для облицовочного и основного слоев из условия, по которому расчетные значения изгибающих моментов в слоях стены M_{Ed} не должны превышать расчетных значений сопротивления изгибу M_{Rd} .

Анализ сопротивления ветровым воздействиям многослойных стен с облицовочным слоем

Облицовочный слой многослойной стены обычно возводится из высокомарочного кирпича на прочном кладочном растворе. Секущий модуль упругости таких кладок $E_1 = 10000...12000$ МПа. Для кладки основного слоя в отечественной строительной практике, как правило, применяются кладочные изделия, обладающие низкой теплопроводностью. В странах СНГ чаще всего для этих целей используются ячеистобетонные блоки плотностью не выше 500 кг/м^3 , прочностью при сжатии $B1.5...2.0$ на стандартном или тонкослойном растворе. В этом случае кратковременный модуль упругости кладки основного слоя E_2 примерно в 10 раз ниже модуля упругости кладки облицовочного слоя E_1 [18]. По этой причине при толщине основного слоя $t_2 = 0.3$ м его изгибная жесткость всего в 1.5...1.6 раза превышает показатели облицовочного слоя толщиной $t_1 = 0.12$ м. В соответствии с правилами проектирования Еврокода 6, изгибающие моменты, возникающие в многослойной стене от ветровых воздействий, распределяются по слоям кладки пропорционально их жесткости. Следовательно, расчетные значения изгибающих моментов, возникающих в облицовочном слое кладки $M_{Ed,1}$, будут в 1.5...1.6 раза ниже, чем в основном слое $M_{Ed,2}$. Учитывая, что момент сопротивления основного слоя в 6.3 раза выше, чем облицовочного, расчетные значения растягивающих напряжений, действующих в облицовочном слое, примерно в 4 раза превысят напряжения в основном слое стены. При этом, согласно Еврокоду 6, отношение расчетных значений прочности на растяжение при изгибе по неперевязанному сечению кладок облицовочного и основного слоев стены $f_{dk1,1} / f_{dk1,2} = 0.67$, а отношение расчетных значений прочности на растяжение при изгибе по перевязанному сечению $f_{dk2,1} / f_{dk2,2} = 1.3$. Отсюда следует, что наступление предельного состояния несущей способности многослойной стены определяется сопротивлением облицовочного слоя кладки ветровым воздействиям.

Величина изгибающих моментов, возникающих в облицовочном и основном слоях многослойной стены, зависит от способа ее сопряжения с конструкциями каркаса. Стена может соединяться с каркасом здания по двум сторонам (нижней и верхней или нижней и боковой), по

трем (с исключением опирания по верхней, нижней или боковой граням) или по четырем. Примеры конструктивных решений сопряжения каменного заполнения с каркасом приведены в работе [19].

Следует отметить, что в отечественной практике строительства сопряжение стен с каркасом с помощью анкерных связей чаще всего осуществляется по двум или трем сторонам (боковым и верхней). На нижнее перекрытие кладка опирается через слой прочного кладочного раствора, при этом предполагается, что силы трения, возникающие между стеной и плитой перекрытия, играют роль анкерных связей. Однако, как показывают исследования [20], даже незначительный прогиб перекрытия приводит к раскрытию шва между ним и кладкой стены, а контакт сохраняется на участках, равных примерно 1/100 длины стены. По этой причине нижнюю грань стены в расчетной модели следует принимать как свободную.

На рисунке 2 показаны палитры изгибающих моментов в стене высотой 2.8 м и длиной 6 м при расчетном значении ветрового воздействия 0.45 кН/м^2 . Такая величина ветрового воздействия согласно ТКП EN 1991-1-4-2009 соответствует климатическому району г. Минска на уровне 30 м от поверхности земли.

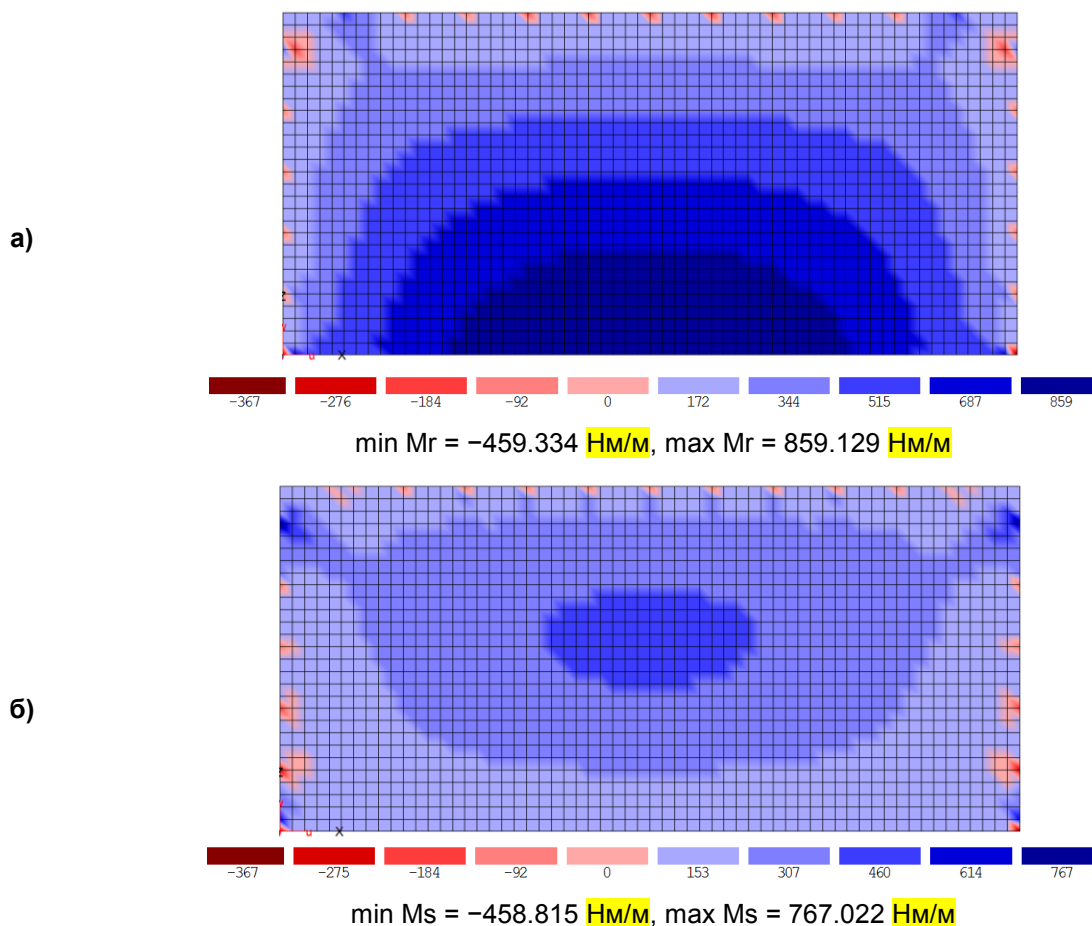


Рисунок 2 Расчетные значения изгибающих моментов в стене: а) по перевязанному сечению, б) по неперевязанному сечению

Пераспределив полученные значения изгибающих моментов по слоям кладки в соответствии с их изгибной жесткостью, получим следующие расчетные значения изгибающих моментов в облицовочном слое:

- по перевязанному сечению $M_{1Ed,1} = 0.36 \text{ кНм/м}$;
- по неперевязанному сечению $M_{1Ed,2} = 0.30 \text{ кНм/м}$.

Расчетные значения сопротивления облицовочного слоя ветровым воздействиям:

- по перевязанному сечению $M_{1Rd,1} = 0.55 \text{ кНм/м} > M_{1Ed,1} = 0.36 \text{ кНм/м}$;
- по неперевязанному сечению $M_{1Rd,2} = 0.144 \text{ кНм/м} < M_{1Ed,2} = 0.30 \text{ кНм/м}$.

Условие предельного состояния несущей способности облицовочного слоя по неперевязанному сечению – плоскость излома параллельна горизонтальным швам кладки – не выполняется. При этом, с позиции Еврокода 6, имеет место более чем двукратная перегрузка Derkach V.N. Wind load resistance of multilayer walls supported floor-by-floor with a facing layer

облицовочного слоя. Очевидно, что при двухстороннем сопряжении стены степень перегрузки будет еще выше.

Если расчетные значения ветрового воздействия принять согласно СНиП 2.03.01–84, а расчетные значения прочности на растяжение при изгибе кладки облицовочного слоя – согласно СНиП II–22–81, то условие предельного состояния несущей способности облицовочного слоя выполняется при расположении стены не выше 40 м от уровня земли. Следует отметить, что СНиП II–22–81 для самонесущих стен, связанных с каркасом и работающих на поперечный изгиб, устанавливает необходимость проверки только предельного состояния эксплуатационной пригодности по образованию и раскрытию трещин и по деформациям на воздействия нормативных нагрузок. Это свидетельствует о том, что европейские нормы, по сравнению с отечественными, более жестко регламентируют требования к проектированию многослойных стен с облицовочным слоем. По мнению автора, такой подход является оправданным, что подтверждается отрицательным отечественным опытом эксплуатации каркасных зданий с многослойными стенами с облицовочным слоем.

Необходимо отметить, что в Еврокоде 6 приводятся рекомендуемые значения прочностных характеристик каменных кладок. Так как подобные кладки возводятся из местных материалов, в каждой конкретной стране должна быть сформирована база прочностных и деформационных характеристик применяемых кладок, которые устанавливаются экспериментально в соответствии со стандартами серии EN 1052 и приводятся в национальном приложении к Еврокоду 6. Приведенные в национальном приложении данные могут заметно, в большую или меньшую сторону, отличаться от прочностных характеристик, рекомендуемых Еврокодом 6, что соответствующим образом отразится на расчетных значениях сопротивлений ветровым воздействиям многослойных стен с облицовкой.

Выводы

1. При проектировании поэтажно опертых многослойных стен с облицовочным слоем из кирпича следует стремиться к снижению соотношения модулей деформаций кладок облицовочного и основного слоев каменной кладки. Для кладки облицовочного слоя рекомендуется применять заводские сухие растворные смеси, позволяющие получать прочные растворные швы с низким модулем деформаций. Для основного слоя предпочтение следует отдавать кладкам из керамических кладочных изделий, включая поризованные, а также кладкам из силикатных или керамзитобетонных кладочных изделий. При проектировании основного слоя из ячеистобетонных блоков следует избегать технических решений с протяженными стенами $l/h > 1.5$ (l и h – длина и высота стены соответственно).

2. Раскрепление основного слоя кладки с конструкциями каркаса здания в обязательном порядке следует выполнять по всему периметру многослойной стены. К контролю качества выполнения сопряжений многослойной стены с конструкциями каркаса должны предъявляться повышенные требования.

3. Для разработки научно-обоснованного регламента на проектирование многослойных стен с кирпичной облицовкой необходимо проведение комплексных экспериментальных исследований прочностных и деформационных характеристик каменных кладок, а также вспомогательных изделий (анкерных связей, опорных кронштейнов, арматурных изделий), применяемых в отечественной строительной практике.

Литература

1. Ищук М.К. Отечественный опыт возведения зданий с наружными стенами из облегченной кладки. М.: РИФ «Стройматериалы», 2009. 360 с.
2. Лобов О.И., Ананьев А.И. Долговечность наружных стен современных многоэтажных зданий // Жилищное строительство. 2008. №8. С. 48–52.
3. Орлович Р.Б., Зимин С.С., Сазонов А.С. О работе облицовочного каменного слоя при силовых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2014. №1(51). С. 29–34.
4. Орлович Р.Б., Горшков А.С., Зимин С.С. Применение камней с высокой пустотностью для облицовки многослойных стен // Инженерно-

References

1. Ishchuk M.K. *Otechestvennyy opyt vozvedeniya zdaniy s naruzhnyimi stenami iz oblegchennoy kladki* [Domestic experience of erecting of buildings with outside walls made of lightweight masonry]. Moscow. RIF «Stroymaterialy». 2009. 360 p.(rus)
2. Lobov O. I., Ananyev A.I. *Dolgovechnost' naruzhnykh sten sovremennykh mnogoetazhnykh zdaniy* [Durability of modern multistorey building's exterior walls] *Housing Construction*. 2008. No. 8. Pp. 48–52. (rus)
3. Orlovich R.B., Zimin S.S., Sazonov A.S. *Primenenie kamney s vysokoy pustotnost'yu dlya oblitsovki mnogosloynnykh sten* [Application of stones with high voidage for multilayer wall covering] *Construction and Reconstruction*. 2014. No. 1(51). Pp. 29–34. (rus)

Деркач В.Н. Сопротивление ветровым воздействиям поэтажно опертых многослойных стен с облицовочным слоем

- строительный журнал. 2013. №8. С. 14–23.
5. Гроздов В.Т. О недостатках существующих проектных решений наружных навесных стен в многоэтажных монолитных железобетонных зданиях // Труды ВИТУ «Дефекты зданий и сооружений». Санкт-Петербург. 2006. С. 15–21.
 6. Огородник В.М., Огородник Ю.В. Некоторые проблемы обследования зданий с отделкой лицевым кирпичом в Санкт-Петербурге // Инженерно-строительный журнал. 2010. №7. С. 10–13.
 7. Drobiec L. Przyczyny uszkodzen murow // XXII Ogólnopolska konferencja warsztat pracy projektanta konstrukcji. Szczyrk. 2007. Pp. 105–146.
 8. Schubert P. Beitragsserie: Schadenfreies bauen mit Mauerwerk. Thema 2: Innen // Das Mauerwerk. 2001. №4. Pp. 142–144.
 9. Schubert P. Beitragsserie: Schadenfreies bauen mit Mauerwerk. Thema 1: Zweischalige Außen-wende – Risse durch zu große Verformungsunterschiede in horizontaler Richtung // Das Mauerwerk. 2001. №1. Pp. 35–38.
 10. Beasley K.J. Masonry Facade Stress Failures // The Construction specifier. 1998. Vol.51. №2. Pp. 25–28.
 11. Jordahl® Sistem zamocowania murow licowych. 2011. 49 p.
 12. Schubert P. Zweischalige Außenwände nach DIN 1053-1. Konstruktion. Baustoffe // Das Mauerwerk. 2003. №6. Pp. 190–196.
 13. Schubert P. Zweischalige Außenwände nach DIN 1053-1-Dehnungsfugen in der Außenschale (Vorblendschale) // Das Mauerwerk-2003. №6. Pp. 202–204.
 14. Altaha N. Zweischalige Außenwände:Kommentar zur DIN 18195 Beiblatt 1 // Das Mauerwerk (16). 2012. №6. Pp. 293–296.
 15. Kawalek W. Projektowanie fasady z cegly klinkerowej // Przegląd budowlany. 2009. №9. Pp. 20–21.
 16. Jager W., Thime M. Bemessung von horizontal beanspruchten Mauerwerk nach EN 1996–1–1 mit Hilfe modifizierten Momentenverteilungszahlen // Das Mauerwerk. 2005. №1. Pp. 8–13.
 17. Ткачик П.П. Каменные конструкции из силикатных изделий. Проектирование, конструктивные решения, производство работ. Минск: Стринко, 2012. 378 с.
 18. Деркач В.Н. Деформационные характеристики каменной кладки в условиях плоского напряженного состояния // Строительство и реконструкция. 2012. №2(40). С. 3–11.
 19. Деркач В.Н. Сопряжение каменного заполнения каркасных зданий с конструкциями каркаса // Архитектура и строительство. 2015. №1. С. 14–16.
 20. Деркач В.Н. Исследования напряженно-деформированного состояния каменных перегородок при прогибе перекрытия // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №6. С. 62–66.
 4. Orlovich R.B., Gorshkov A.S., Zimin S.S. Primeneniye kamney s vysokoy pustotnostyu v oblitsovochnom sloye mnogosloynnykh sten [Application of stones of high voidage in the facing layer of the multilayer walls]. Magazine of Civil Engineering. 2013. No. 8. Pp. 14–23.
 5. Grozdov V.T. O nedostatkakh sushchestvuyushchikh proyektnykh resheniy naruzhnykh navesnykh sten v mnogoetazhnykh monolitnykh zhelezobetonnykh zdaniyakh [About defects of legacy design decisions for exterior hinged walls in multistorey monolithic reinforced concrete building]. Trudy VITU «Defekty zdaniy i sooruzheniy». St. Petersburg. 2006. Pp. 15–21.(rus)
 6. Ogorodnik V.M., Ogorodnik Yu.V. Nekotorye problemy obsledovaniya zdaniy s otdelkoy litsevim kirpichom v Sankt-Peterburge [Several problems in survey of buildings finished with face brick in Saint Petersburg]. Magazine of Civil Engineering. 2010. No. 7. Pp. 10–13. (rus)
 7. Drobiec L. Przyczyny uszkodzen murow. XXII Ogólnopolska konferencja warsztat pracy projektanta konstrukcji. Szczyrk. 2007. Pp. 105–146.
 8. Schubert P. Beitragsserie: Schadenfreies bauen mit Mauerwerk. Thema 2: Innen. Das Mauerwerk. 2001. No. 4. Pp. 142–144.
 9. Schubert P. Beitragsserie: Schadenfreies bauen mit Mauerwerk. Thema 1: Zweischalige Außen-wende – Risse durch zu große Verformungsunterschiede in horizontaler Richtung. Das Mauerwerk. 2001. No. 1. Pp. 35–38.
 10. Beasley K.J. Masonry Facade Stress Failures. The Construction specifier. 1998. Vol.51. No. 2. Pp. 25–28.
 11. Jordahl® Sistem zamocowania murow licowych. 2011. 49 p.
 12. Schubert R. Zweischalige Außenwände nach DIN 1053-1. Konstruktion. Baustoffe. Das Mauerwerk. 2003. No. 6. Pp. 190–196.
 13. Schubert R. Zweischalige Außenwände nach DIN 1053-1-Dehnungsfugen in der Außenschale (Vorblendschale). Das Mauerwerk. 2003. No. 6. Pp. 202–204.
 14. Altaha N. Zweischalige Außenwände:Kommentar zur DIN 18195 Beiblatt 1. Das Mauerwerk. 2012. No. 6. Pp. 293–296.
 15. Kawalek W. Projektowanie fasady z cegly klinkerowej. Przegląd budowlany. 2009. No. 9. Pp. 20–21.
 16. Jager W., Thime M. Bemessung von horizontal beanspruchten Mauerwerk nach EN 1996–1–1 mit Hilfe modifizierten Momentenverteilungszahlen. Das Mauerwerk. 2005. No. 1. Pp. 8–13.
 17. Tkachik P.P. Kamennyye konstruksii iz silikatnykh izdeliy. Proyektirovaniye, konstruktivnyye resheniya, proizvodstvo rabot.[The stone structure of silicate products. Design, designs, manufacturing operations]. Minsk. Strinko. 2012. 378 p.(rus)
 18. Derkach V.N. Deformatsionnye kharakteristiki kamennoy kladki v usloviyakh ploskogo napryazhennoy sostoyaniya [Deformative characteristics of stone masonry in plane stress conditions]. Construction and Reconstruction. Orel. Orel State Technical University. 2012. No. 2(40). Pp. 3–11.(rus)
 19. Derkach V.N. Sopryazheniye kamennogo zapolneniya karkasnykh zdaniy s konstruktivnyimi karkasa [Connection of skeleton-type building stone filling with construction of framework]. Architecture and Construction. 2015. No. 1. Pp. 14–16. (rus)
 20. Derkach V.N. Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kamennykh peregorodok pri progibe perekrytiya [Study of stone partition's deflected mode in the moment of floor deflection]. Industrial and Civil Construction. 2013. No. 6. Pp. 62–66.(rus)

Валерий Николаевич Деркач,
+375-296-411962; эл. почта: v-
derkach@yandex.ru

Valery Derkach,
+375-296-411962; v-derkach@yandex.ru

© Деркач В.Н., 2015

doi: 10.5862/MCE.60.6

Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона

Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete

Аспирант М.В. Лещенко,
канд. техн. наук, докторант В.А. Семко,
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,
г. Полтава, Украина

M.V. Leshchenko,
V. Semko,
Poltava National Technical Yuri Kondratiuk
University, Poltava, Ukraine

Ключевые слова: энергоэффективность; строительство; здания; конструкция; тонкостенный профиль; ЛСТК; полистиролбетон; теплопроводность; прочность.

Key words: buildings; construction; energy efficiency; light-gauge steel stud, cold-formed steel; polystyrene concrete; thermal conductivity; strength.

Аннотация. В статье рассматриваются стеновые панели на основе легких стальных тонкостенных конструкций с использованием в качестве утеплителя полистиролбетона. Использование данного материала позволит решить проблему «мостиков холода» в панели, максимально изолировать несущий профиль, минимизировать теплопотери конструкции и повысить энергоэффективность здания в целом. Были определены прочность и коэффициент теплопроводности для полистиролбетонов плотностью 300...1300 кг/м³. Результаты показали, что при увеличении плотности полистиролбетона в 4.1 раза коэффициент теплопроводности повышается в 3.7 раза, что составляет практически линейную зависимость. Для образцов разной плотности был зафиксирован разброс значений деформаций при сжатии; показано, что для полистиролбетонов низких плотностей характерна большая деформативность. Были изготовлены экспериментальные образцы стеновых панелей и в лабораторных условиях определено их сопротивление теплопередаче. Установлено, что наличие в стеновой конструкции теплопроводного включения приводит к снижению сопротивления теплопередаче до 50 %. Предложено использовать в качестве внешней облицовки стеновой профилированный настил. При этом необходимо конструировать стену таким образом, чтобы волна профнастила была расположена напротив теплопроводного включения. Промежуток, который образуется между профилем и настилом, заполняется полистиролбетоном и служит в роли термопрокладки. Такой метод повышения энергоэффективности стеновых конструкций из ЛСТК и полистиролбетона не требует дополнительных затрат и является исключительно конструктивным. При увеличении высоты волны профилированного настила влияние теплопроводного включения уменьшается прямо пропорционально. Экспериментально и теоретически доказана эффективность предложенного метода.

Abstract. The paper proposes to use polystyrene concrete as an insulating material in wall panels made of light gauge studs. It should solve the problem of thermal bridges in such panels. The strength and the heat conductivity factor for polystyrene concrete with the density of 300-1300 kg/m³ were determined. Results showed that by increasing the density of polystyrene concrete by 4.1 times the thermal conductivity is increased by 3.7 times, which is an almost linear relationship. For instance, the strength at a density of 300 kg/m³ is 0.25 MPa, while at a density of 1300 kg/m³ it is already 8.2 MPa, which is 30 times more. For samples of different density, a scattering of deformations under compression was recorded. A full deformability of PSC cubes of 1292 kg/m³ density was on average 1 mm, while for 309 kg/m³ cubes it was 10 mm, indicating a larger deformability of low-density polystyrene concrete. The experimental samples of wall panels were assembled and their heat-transfer resistance was measured in the laboratory. It was found that the presence of thermally conductive inclusions in the wall structure reduces heat resistance up to 50 %. It was proposed to use profiled sheeting as an external wall

Лещенко М.В., Семко В.А. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона

covering. Besides, it is necessary to design the wall so that the external flange of the sheeting is placed across the heat-conducting inclusions. The gap between the profile and the sheeting is filled with polystyrene concrete and serves as thermal pad. This method of increasing energy efficiency of cold-formed steel and polystyrene concrete wall structures is purely structural and does not require additional costs. By increasing the web height of the profiled sheeting, the effect of heat conducting inclusions is reduced in direct proportion – by 40% at 20 mm, by 20% at 40 mm and by 10% at 50 mm. The proposed method is theoretically and experimentally proven.

Введение

Ограждающие конструкции на основе стальных тонкостенных профилей приобретают все большую популярность в строительной отрасли на территории Украины, России, Беларуси, Казахстана. Зарубежный опыт позволяет говорить о значительной экономической целесообразности использования таких элементов в качестве несущих и ограждающих конструкций [1, 2]. Областью применения легких стальных тонкостенных конструкций является возведение несущих стен малоэтажных зданий, каркасы зданий средней этажности, панели многоэтажных зданий, модульные конструкции, бескрановые конструкции павильонного типа, надстройки и другие элементы реконструкции зданий, системы прогонов и т.п. Данная каркасная технология предполагает использование в качестве несущих конструкций стальных тонкостенных холодноформованных профилей толщиной до 4 мм, а в качестве утеплителя – минераловатных плит. Наличие в стеновых панелях теплопроводных включений в виде несущих профилей – так называемых «мостиков холода» – ставит под сомнение их теплоизоляционные характеристики. Решением данной проблемы может быть использование в качестве утеплителя полистиролбетона (ПСБ), который позволит максимально изолировать несущий профиль, при этом минимизировать теплопотери данной конструкции и повысить энергоэффективность здания в целом. Стеновая панель может изготавливаться как на месте строительства, так и в заводских условиях (рис. 1).

В данной работе изучается влияние одного типа теплопроводного включения, а именно несущего профиля. Полистиролбетон рассматривается как теплоизоляционно-конструкционный материал. Он обладает как теплоизоляционными свойствами, так и несущей способностью, которые исследуются в данной работе.

В российском стандарте ГОСТ Р 51263–2012 [3] нормируются следующие термины с соответствующими определениями для полистиролбетона.

1. Полистиролбетон теплоизоляционный – бетон марок по средней плотности D150...D225 и прочности на сжатие не ниже M2, применяемый для утепления несущих конструкций зданий. Теплоизоляционный полистиролбетон используется для теплоизоляции теплопроводных систем, тепловых агрегатов, а также наружных стен и покрытий, конструкция и условия эксплуатации которых исключает возможность увлажнения и частичного промерзания теплоизоляционных слоев в процессе длительной эксплуатации.

2. Теплоизоляционно-конструкционный полистиролбетон – бетон марок по средней плотности D250...D350 и класса по прочности на сжатие не ниже B0.5, применяется для теплоизоляции несущих и самонесущих стен, рассчитанных на длительную эксплуатацию (не менее 50 лет) с учетом возможного увлажнения и замораживания – оттаивания при изменении температуры и влажности окружающей среды. Используется также в надпроемных перемычках.

3. Конструкционно-теплоизоляционный полистиролбетон – бетон марок по средней плотности D400...D600 (и выше) и класса прочности на сжатие не ниже B1.5, который применяют для кладки из мелких блоков или заливки в опалубку, в том числе несъемных внешних самонесущих и несущих стен малоэтажных (до 3 этажей) зданий и несущих внешних стен среднеэтажных (5–7 этажей) и многоэтажных зданий, в том числе в армированных и длинномерных надпроемных перемычках. Используется для изготовления армированных плит перекрытий и других сборных изделий.

Обзор иностранной и отечественной литературы

С 2009 г. в Полтавском национальном техническом университете под руководством д.т.н. А.В. Семко проводятся исследования совместной работы комплексных конструкций из легких стальных тонкостенных (ЛСТ) профилей и полистиролбетона [4, 5]. В этих работах внимание сконцентрировано в большей мере на прочностных характеристиках и совместной работе полистиролбетона с каркасом из ЛСТ профилей, при этом тепловые характеристики полистиролбетона и конструкции в целом остались не исследованы [6]. Вопросом исследования прочностных и тепловых характеристик полистиролбетона в совместной работе с Leshchenko M.V., Semko V. Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete

железобетонными панелями занимались такие ученые, как Н.В. Савицкий, В.И. Большаков, А.М. Сопильняк [7, 8]. В работах [9–11] рассматривались физико-механические свойства полистиролбетона, а в [12–15] – численное моделирование теплообмена и хранение тепловой энергии в легких бетонах, поскольку полистиролбетон имеет высокую теплосберегающую способность.

Тепловая защита ограждающих конструкций и зданий была рассмотрена в работах [16–18]. Исследования энергоэффективных стеновых конструкций из ЛСТ профилей и параметров микроклимата для различных конструктивных параметров отражены в работах авторов как стран СНГ [19–23], так и других [24–27]. Стоит отметить, что в конструкциях данного типа самым уязвимым местом с точки зрения теплопотерь является сам профиль. Он представляет собой теплопроводное включение, так называемый «мостик холода», исследованию влияния которого посвящены работы [28–30]. Также исследования термической однородности ограждающих конструкций представлены в работах ученых А.С. Горшкова, Н.И. Ватина и других [31, 32].

Обзор литературных данных показал, что одним из основных критериев энергоэффективного проектирования стен из легких стальных конструкций является выбор эффективного утеплителя и ликвидация теплопроводных включений. Поэтому эти вопросы рассматриваются в данной работе.

В ранее опубликованных работах авторов [33–36] были проведены исследования теплотехнических свойств ограждающих конструкций на основе ЛСТ профилей с утеплителем минеральная вата и получены их характеристики в зависимости от их конструктивных параметров.

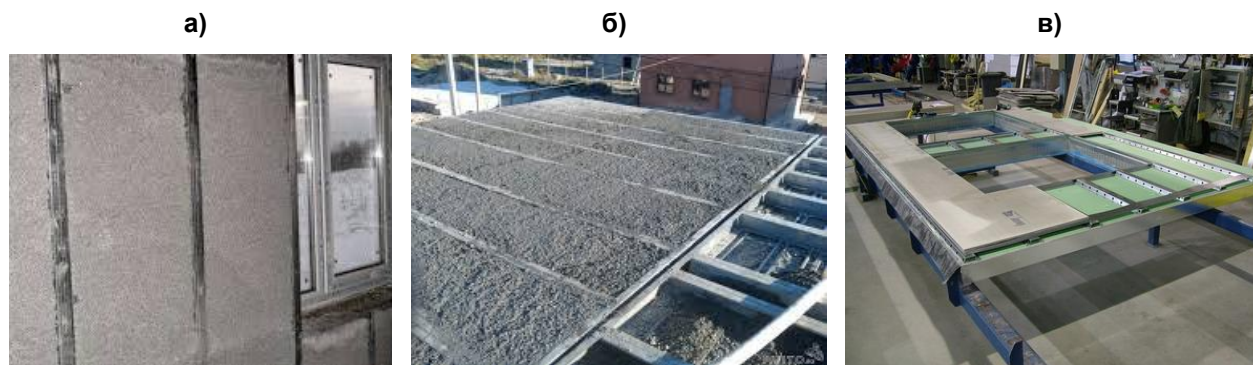


Рисунок 1. Каркасы ограждающих конструкций:
а) стена; б) перекрытие; в) изготовление в заводских условиях

Постановка задачи

Исходя из представленной проблемы и выше перечисленных научных трудов можно говорить, что теплотехнические свойства стеновых панелей из ЛСТК мало изучены, поэтому их исследование актуально. В работе были поставлены следующие задачи:

- исследовать физико-механические характеристики полистиролбетона;
- изготовить экспериментальные образцы панелей и в лабораторных условиях определить их теплопроводность;
- численно в программном комплексе выполнить тепловое моделирование экспериментальных образцов;
- предложить энергоэффективную стеновую конструкцию из ЛСТ профилей и полистиролбетона.

Физико-механические характеристики полистиролбетона

Для решения первой задачи по определению физико-механических свойств полистиролбетона были изготовлены образцы бетонных кубиков (100 x 100 x 100 мм) шести серий: 200 кг/м³, 400 кг/м³, 600 кг/м³, 800 кг/м³, 1000 кг/м³ и 1200 кг/м³. Из этих же серий бетона были сформированы пластины (150 x 150 x 25 мм) для определения коэффициента теплопроводности (рис. 2).

Изготовление бетона выполнялось в лаборатории на кафедре строительных материалов Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Полистиролбетон – разновидность легких бетонов, он представляет собой композиционный материал, в состав которого входит портландцемент, пористый заполнитель, а также модифицирующие добавки. Именно вспененные гранулы полистирола играют особую роль в формировании полистиролбетона. При их применении в полистиролбетонной смеси значительно улучшается прочность на растяжение и на изгиб. Вследствие этого полистиролбетон не имеет трещин, в отличие от пенобетона и газобетона.



Рисунок 2. Экспериментальные образцы каждой серии

Образцы кубиков испытывались при достижении проектной прочности бетона на приборе УИМ–5 и гидравлическом прессе ПММ–500. Загрузка происходила постепенно и приводила к разрушению каждого из образцов (рис. 3). Образцы пластин испытывались для определения коэффициента теплопроводности на приборе ИТС–1 (рис. 4). Принцип действия прибора основан на создании проходящего через исследуемый плоский образец стационарного теплового потока. По величине этого потока, температуре противоположных граней образца и его толщине вычисляется теплопроводность образца по формуле:

$$\lambda = \frac{d \cdot q}{\Delta T}, \quad (1)$$

где d – толщина образца;

q – плотность теплового потока, проходящего через образец;

ΔT – разность температур между противоположными гранями образца.

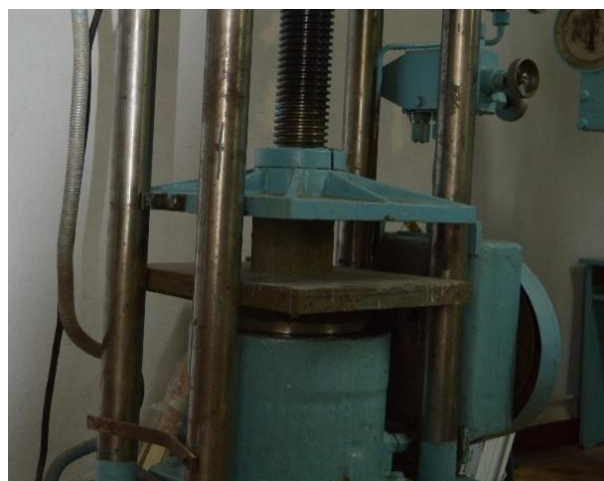


Рисунок 3. Испытание бетонных образцов на прочностные характеристики



Рисунок 4. Испытание бетонных образцов на теплотехнические характеристики

Плотность полученного полистиролбетона составляла 309...1292 кг/м³, что в полной мере отвечает конструктивно-изоляционному назначению выбранного материала.

Leshchenko M.V., Semko V. Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete

Для образцов разной плотности был зафиксирован разброс деформаций при сжатии. Так, для кубиков из ПСБ плотностью 1292 кг/м^3 полная деформативность составила в среднем 1 мм, а для ПСБ плотностью 309 кг/м^3 – 10 мм, что говорит о большой деформативности полистиролбетона низких плотностей. При этом предельная кубиковая прочность ПСБ отличается более чем в 30 раз (таблица 1).

Таблица 1. Физико-механические свойства образцов ПСБ по результатам испытаний

Состав бетона	Серия образцов	Плотность, кг/м^3	Среднее значение удельного веса, кг/м^3	Кубиковая прочность образца, МПа	Деформации, мм	Предельная кубиковая прочность ПСБ в партии, МПа	Прочность ПСБ при деформации и 1 мм, МПа
Б1	БК-1-1	312	309	0.22	11	0.25	0.025
	БК-1-2	312		0.27	10		
	БК-1-3	302		0.26	9		
Б2	БК-2-1	625	605	1.01	5	0.91	0.195
	БК-2-2	602		0.89	5		
	БК-2-3	587		0.84	4		
Б3	БК-3-1	798	808	1.60	7	1.96	0.453
	БК-3-2	806		2.07	2.5		
	БК-3-3	819		2.22	3.5		
Б4	БК-4-1	876	875	3.43	2.5	3.17	1.268
	БК-4-2	849		3.04	4.5		
	БК-4-3	899		3.03	0.5		
Б5	БК-5-1	1091	1107	3.19	3	3.61	2.161
	БК-5-2	1111		4.46	1		
	БК-5-3	1118		3.17	1		
Б6	БК-6-1	1311	1292	7.86	2	8.20	8.20
	БК-6-2	1298		8.71	0.5		
	БК-6-3	1280		8.04	0.5		

По результатам расчетов была установлена предельная прочность полистиролбетонных образцов, получены деформации, а также прочность ПСБ при деформации кубика 1 мм. Построен график зависимости прочности ПСБ от плотности (рис. 5), который показывает криволинейную зависимость: с повышением плотности полистиролбетона его прочность увеличивается.

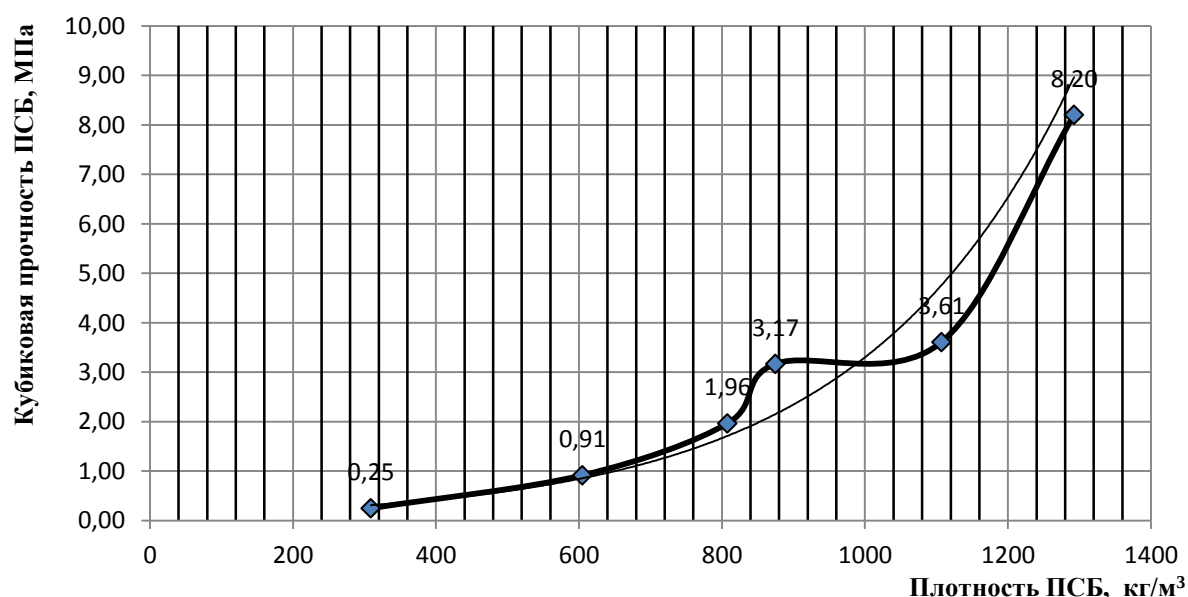


Рисунок 5. Зависимость прочности полистиролбетона от его плотности

Лещенко М.В., Семко В.А. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона

После испытаний ПСБ кубиков на прочность были испытаны ПСБ пластины на теплопроводность. Грани образцов, контактирующие с рабочими поверхностями плит прибора, должны быть плоскими и параллельными. Отклонение лицевых граней жесткого образца от параллельности составляло не более 0.5 мм. Жёсткие образцы, имеющие разнотолщинность и отклонения от плоскостности, шлифовались. Толщина образцов измерялась штангенциркулем с погрешностью не более 0.1 мм в четырёх углах на расстоянии (50.0 ± 5.0) мм от вершины угла и в середине каждой стороны. За толщину образца принимали среднеарифметическое значение результатов всех измерений. При проведении измерений образец вставлялся в измерительную ячейку прибора ИТС–1 между холодильником и нагревателем и прижимался с требуемым усилием фиксирующим винтом. Прибор делает три основных замера, после чего фиксируется результат. Основные полученные результаты теплотехнических характеристик ПСБ образцов сведены в таблицу 2. По этим результатам были получены зависимости коэффициента теплопроводности полистиролбетона от его плотности и прочности (рис. 6, рис 7).

Таблица 2. Теплотехнические характеристики ПСБ образцов по результатам испытаний

Состав бетона	Серия образцов	Среднее значение удельного веса, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Среднее значение коэффициента теплопроводности, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
Б1	ПБ1–2,5–1	309	0.0993	0.100
	ПБ1–2,5–2		0.1013	
	ПБ1–2,5–3		0.099	
	ПБ1–2,5–4		0.0984	
	ПБ1–2,5–5		0.1032	
Б2	ПБ2–2,5–1	605	0.1584	0.1563
	ПБ2–2,5–2		0.1587	
	ПБ2–2,5–3		0.1594	
	ПБ2–2,5–4		0.1594	
	ПБ2–2,5–5		0.1458	
Б3	ПБ3–2,5–1	808	0.1994	0.1980
	ПБ3–2,5–2		0.1898	
	ПБ3–2,5–3		0.1946	
	ПБ3–2,5–4		0.1955	
	ПБ3–2,5–5		0.2109	
Б4	ПБ4–2,5–1	875	0.2897	0.2701
	ПБ4–2,5–2		0.2797	
	ПБ4–2,5–3		0.2035	
	ПБ4–2,5–4		0.2952	
	ПБ4–2,5–5		0.2824	
Б5	ПБ5–2,5–1	1107	0.2704	0.3324
	ПБ5–2,5–2		0.3707	
	ПБ5–2,5–3		0.3433	
	ПБ5–2,5–4		0.3206	
	ПБ5–2,5–5		0.357	
Б6	ПБ6–2,5–1	1292	0.3659	0.3764
	ПБ6–2,5–2		0.3848	
	ПБ6–2,5–3		0.3735	
	ПБ6–2,5–4		0.3754	
	ПБ6–2,5–5		0.3824	

Анализируя полученные значения, можно сделать выводы о том, что при увеличении плотности полистиролбетона в 4.1 раза коэффициент теплопроводности повышается в 3.7 раза, что составляет практически линейную зависимость.

График на рисунке 6 показал билинейную зависимость коэффициента теплопроводности от кубиковой прочности ПСБ. Можно выделить два участка. Первый – от 0,25 МПа до 3,6 МПа. В этих границах коэффициент теплопроводности ПСБ изменяется наиболее значительно – от 0,1 до 0,333 Вт/(м·К). При дальнейшем увеличении прочности ПСБ коэффициент теплопроводности увеличивается в пределах 10...20 %.

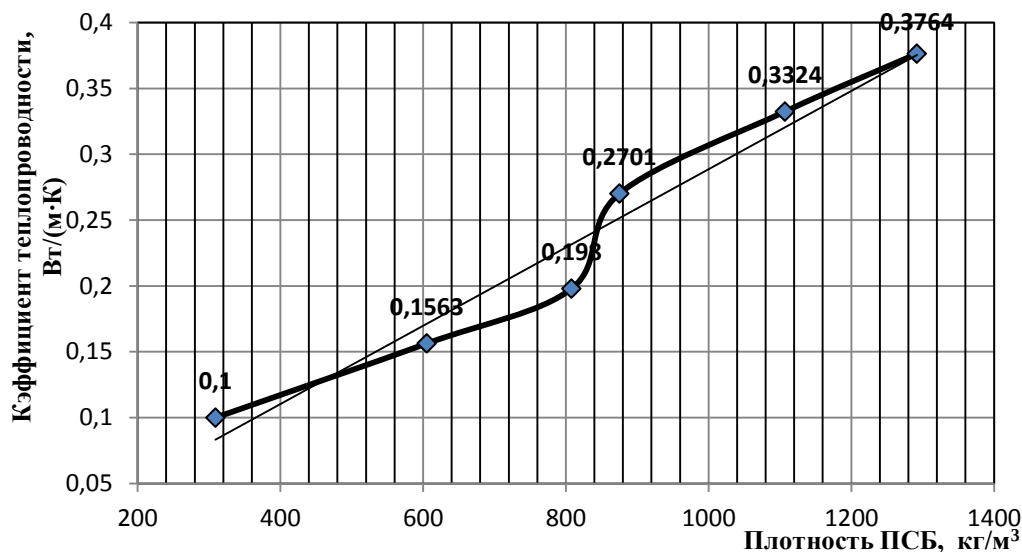


Рисунок 6. Зависимость коэффициента теплопроводности от плотности бетона

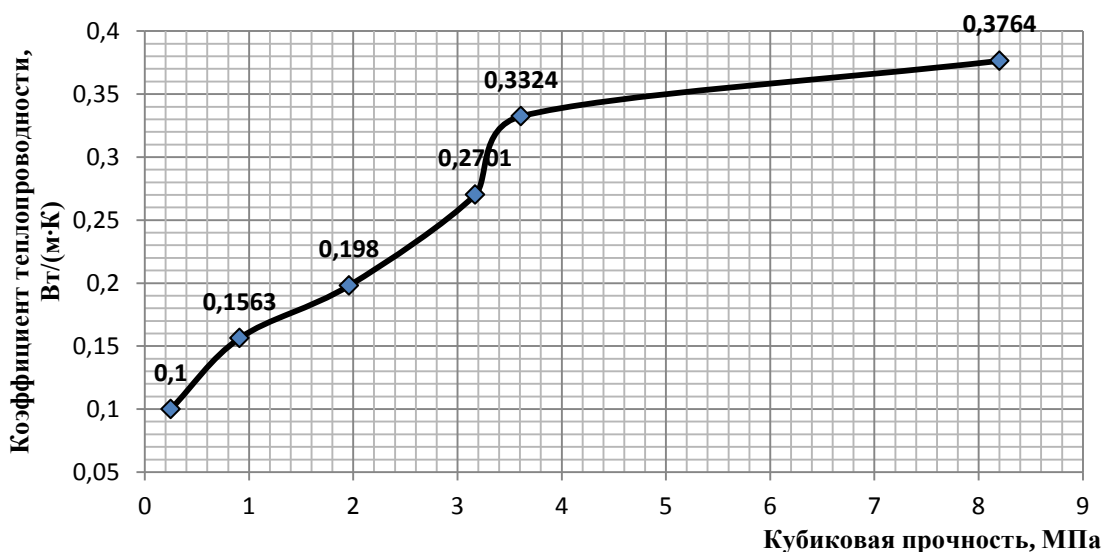


Рисунок 7. Зависимость коэффициента теплопроводности от прочности бетона

Теплопроводность стеновых панелей

Для лабораторных теплотехнических испытаний стеновых конструкций были изготовлены два образца толщиной 150 мм. Они сконструированы с использованием U-образных стальных профилей, соединенных между собой с помощью саморезов, в результате чего обеспечивается целостность конструкции. Каркасы данных стеновых панелей заполняются полистиролбетоном, который выполняет функцию утеплителя. В середине одной из конструкций устанавливается вертикальная стойка – это стальной тонкостенный профиль С-образного сечения, который является теплопроводным включением данной ограждающей конструкции (рис. 8). Вторая конструкция была изготовлена термически однородной (эталонной), для того чтобы оценить влияние «мостика холода» (рис. 9). Внутренняя облицовка представляет собой гипсокартонный лист толщиной 12,5 мм. Для уменьшения влияния температурного включения предложено использовать стеновой профилированный настил как внешнюю облицовку. При этом необходимо конструировать стену таким образом, чтобы волна профнастила была расположена напротив теплопроводного включения. Промежуток, который образуется между профилем и настилом, Лещенко М.В., Семко В.А. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона

заполняется полистиролбетоном и служит в роли термопрокладки. Такой метод повышения энергоэффективности стеновых конструкций из ЛСТК и полистиролбетона не требует дополнительных затрат и является исключительно конструктивным.

Экспериментальные образцы, представленные на рисунках 8 и 9, испытывались в климатической камере согласно ДСТУ Б В.2.6–101: 2010 [37] методом тепловых испытаний в лабораторных условиях. После того как установка выходила в стационарный режим, проводились замеры. По обе стороны образца создавался температурный перепад: в климатической камере температура составляла $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в помещении – $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Контактными средствами измерялась температура воздуха, поверхностей конструкций, температура в различных сечениях и теплопроводных включениях, а также определялась поверхностная плотность теплового потока через ограждающую конструкцию.

При расчете приведенного сопротивления теплопередаче стеновой ограждающей конструкции с теплопроводными включениями учитывается линейный коэффициент теплопередачи [38], который для данной конструкции определяется экспериментальным путем: чем меньше значение коэффициента, тем выше значение приведенного сопротивления теплопередаче. Уменьшение влияния теплопроводного включения путем его теплоизоляции приводит к снижению линейного коэффициента теплопередачи и, как результат, к более высокому значению приведенного сопротивления теплопередаче термически неоднородной непрозрачной ограждающей конструкции.

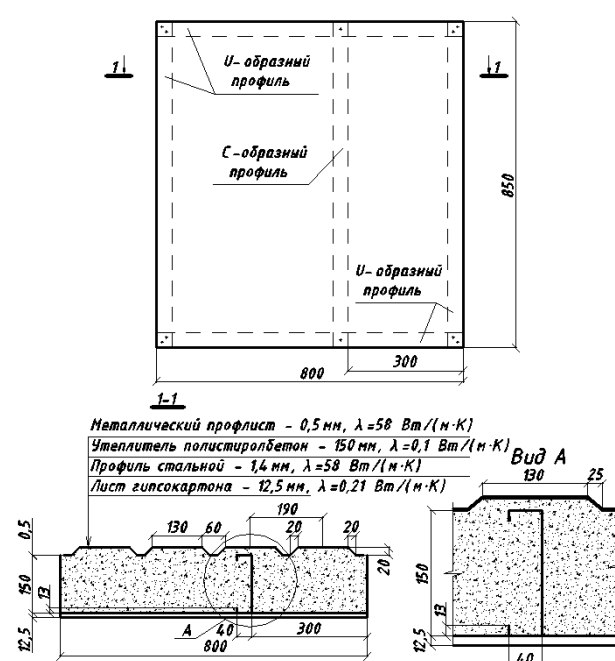


Рисунок 8. Конструктивная схема стеновой панели с теплопроводным включением

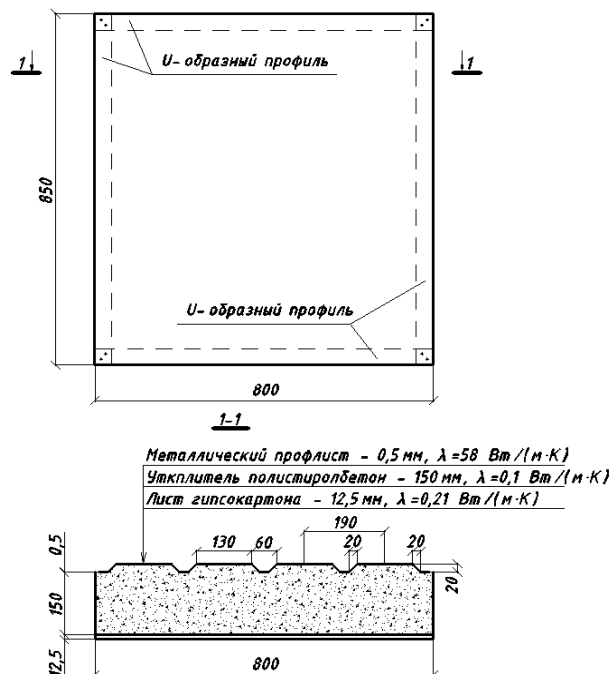


Рисунок 9. Конструктивная схема термически однородной стеновой панели

Также был проведен численный эксперимент в программном комплексе Femar, где были смоделированы данные конструкции стеновых панелей (рис. 10, рис. 11). Рассматривалась плоская задача при стационарном режиме теплопередачи. Условия эксплуатации задавались равными тем, что применялись при лабораторных исследованиях.

Результаты моделирования показали, что наличие теплопроводного включения в ограждающей конструкции снижает сопротивление теплопередаче до 50 %, а при теплоизоляции стального профиля полистиролбетоном – на 40 %.

Была численно исследована рассмотренная ранее стеновая панель (рис. 10), где варьировалась высота волны профилированного настила 20 мм, 40 мм и 50 мм. Результаты проведенных экспериментов показали, что изменением конструктивных параметров можно значительно влиять на сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций. При увеличении высоты волны профилированного настила влияние теплопроводного включения уменьшается прямо пропорционально: при 20 мм на 40 %, при 40 мм – на 20 % и при 50 мм – на 10%.

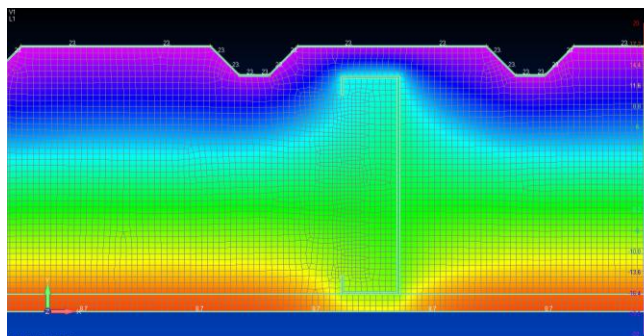


Рисунок 10. Температурное поле для образца с теплопроводным включением

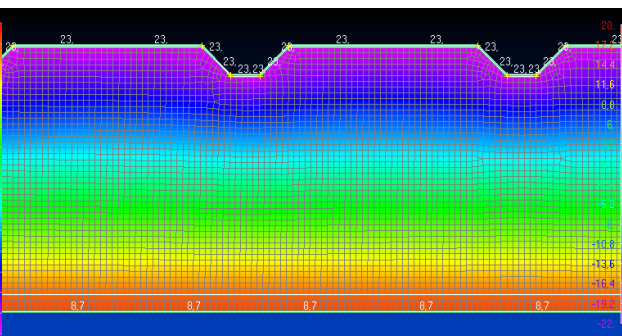


Рисунок 11. Температурное поле для эталонного образца

Внедрением данного конструктивного решения стало получение патента на полезную модель [33].

Заключение

В результате проведенных исследований были определены прочность и коэффициент теплопроводности для полистиролбетонов плотностью 300...1300 кг/м³. Увеличение плотности полистиролбетона в 4.1 раза приводит к повышению коэффициента теплопроводности в 3.7 раза, в то же время при увеличении плотности полистиролбетона наблюдается и увеличение прочности. Так прочность при плотности 300 кг/м³ составляет 0.25 МПа, а при плотности 1300 кг/м³ уже 8.2 МПа, что в 30 раз больше, чем при плотности 300 кг/м³.

Полученные результаты дают возможность говорить о целесообразности применения полистиролбетонов в качестве заполнителя для комплексных несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей.

Предложена стеновая панель, состоящая из холодноформованных профилей, профилированного настила и полистиролбетона. Для данной конструкции реализован авторский способ снижения влияния теплопроводного включения в виде несущего профиля. Экспериментально и теоретически доказана эффективность предложенного способа.

Литература

1. AISI-S100. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. American Iron and Steel Institute. Washington, 2001. 149 p.
2. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels: CEN, 2006. 134 p.
3. ГОСТ Р 51263-2012. Полистиролбетон. Технические условия. М.: Госстрой России, 2012. 27 с.
4. Авраменко Ю.О. Місцева стійкість сталевих елементів сталезалізобетонних конструкцій. Автореф. дис. канд. техн. наук. Полтава: ПолтНТУ, 2012. 22 с.
5. Семко О.В., Лазарев Д.М., Авраменко Ю.О. Легкий бетон для заполнения порожнин стальных тонкостенных конструкций // 36. наук. Праць. Київ: ДП НДІБК, 2011. №74. С. 659–666.
6. Semko V., Voskobiinyk O., Prokhorenko D., Skyba A., Shumeiko K. Complex experimental investigation into light steel and steel-concrete composite structures made of Z-shaped sections under compound stress // Metal constructions. 2014. № 20(1). Pp. 65–76.
7. Savitskiy N.V., Sopilnyak A.M. Strength and Crack Resistance of Three-Layer Concrete Beams // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Днепропетровск: ПГАСА, 2013. №68. С. 363–367.
8. Большаков В.И., Сопильняк А.М., Юрченко Е.Л., Панченко Н.В. Сопротивление теплопередаче трехслойных железобетонных панелей //

References

1. AISI-S100. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. American Iron and Steel Institute. Washington. 2001. 149 p.
2. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels. CEN. 2006. 134 p.
3. GOST R 51263-99. Polystyrolbeton. Tehnicheskie uslovia. [State standard specification. Concrete with polystyrene aggregates]. Moscow. Gosstroy of Russia Publ. 2012. 27 p. (rus)
4. Avramenko Yu.O. Mistseva stiykist stalevyh elementiv stalezalizobetonnyh konstruktsiy. Avtoreferat Diss. [Local Stability of Steel Elements of Composite Steel and Concrete Structures]. Poltava. 2012. 22 p. (ukr)
5. Semko O.V., Lazarev D.M., Avramenko Yu.O. Lehky beton dlia zapovnennia porozhnyn stalevyh tonkostinnyh konstruktsiy [Lightweight Concrete to Fill the Cavities of Steel Thin-Walled Structures]. Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. No. 74. Dnipropetrovsk. PSAES. 2011. Pp. 659–666. (ukr)
6. Semko V., Voskobiinyk O., Prokhorenko D., Skyba A., Shumeiko K. Complex experimental investigation into light steel and steel-concrete composite structures made of Z-shaped sections under compound stress. Metal constructions. 2014. No. 20(1). Pp. 65–76.
7. Savitskiy N.V., Sopilnyak A.M. Strength and Crack Resistance of Three-Layer Concrete Beams. Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Sb. nauchn. trudov.

Лещенко М.В., Семко В.А. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона

- Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Днепропетровск: ПГАСА, 2015. №82. С. 50–54.
9. Беляков В.А., Носков А.С. Перспективы развития исследований конструкционных и теплотехнических свойств полистиролбетона // Материалы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». Новосибирск, 2003. Ч. 2. С. 74–75.
 10. Vogdt F., Schlaich M., Hillemeir B. Conceptual and structural design of building made of lightweight and infra-lightweight concrete. Berlin, 2010. 105 p.
 11. Lecompte T., Le Bideau P., Glouannec P., Nortershauser D., Le Masson S. Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material // *Energy and buildings*, 2015. №94. Pp. 52–60.
 12. Kočí J., Maděra J., Jerman M., Černý R. Computational assessment of thermal performance of contemporary ceramic blocks with complex internal geometry in building envelopes // *Energy and buildings*, 2015. №99. Pp. 61–66.
 13. Hongzhi Cui, Shazim Ali Memon, Ran Liu Development, mechanical properties and numerical simulation of macro encapsulated thermal energy storage concrete // *Energy and buildings*, 2015. №96. Pp. 162–174.
 14. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. №8(52). С. 38–48.
 15. Gorshkov A., Vatin N., Nemova D., Tarasova D. The brickwork joints effect on the thermotechnical uniformity of the Exterior Walls From Gas-concrete Blocks // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 3–8.
 16. Кривошеин А.Д., Федоров С.В. К вопросу о расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // *Инженерно-строительный журнал*. 2010. №8(18). С. 21–27.
 17. 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.
 18. Gorshkov A., Ivanova E. Reduced thermal resistance of two-layer walls construction // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 49–56.
 19. Савицкий Н.В., Никифорова Т.Д., Несин А.А., Сопильняк А.М., Береза И.В. Рациональное проектирование ограждающих панелей для жилых зданий с применением каркаса из гнутых оцинкованных профилей // *Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Днепропетровск: ПГАСА*, 2013. №69. С. 418–422.
 20. Шалагин И.Ю. Аспекты теплотехнического расчета легких ограждающих конструкций [Электронный ресурс]. *Инженерный вестник Дона*. 2015. №2. Ч. 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y20элект15/2994 (дата обращения 10.11.2015).
 21. Ватин Н.И., Попова Е.Н. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях. [Электронный ресурс]. СПб.: СПбГПУ, 2006. 63 с. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/1307.pdf/view> (дата обращения 10.11.2015).
 22. Журина Н., Кузьмичев Р. Энергоэффективные легкие ограждающие конструкции // *Архитектура и строительство*. 2008. №2. С. 93–97.
 23. Петросова Д.В., Кузьменко Н.М., Петросов Д.В. Экспериментальное исследование теплового режима легкой ограждающей конструкции в натуральных условиях // *Инженерно-строительный журнал*, 2013. №8(43). С. 31–37.
 - No. 68. Dnipropetrovsk: PSAES, 2013. Pp. 363–367.
 8. Bolshakov V.Y., Sopilniak A.M., Yurchenko E.L., Panchenko N.V. Soprotivleniye teploperedache trekhslonnykh zhelezobetonnykh paneley [Thermal Resistance of Three-Layer Concrete Panels]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Sb. nauchn. trudov*. No. 82. Dnipropetrovsk: PSAES, 2015. Pp. 50–54. (rus)
 9. Belyakov V.A., Noskov A.S. Perspektivy razvitiya issledovaniy konstruktivnykh i teplotekhnicheskikh svoystv polistirolbetona [Prospects for the development of studies of structural and thermal properties of polystyrene]. *Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya molodykh uchenykh «Nauka. Tekhnologii. Innovatsii»: materialy dokladov*. Novosibirsk. 2003. Part 2. Pp. 74–75. (rus)
 10. Vogdt F., Schlaich M., Hillemeir B. Conceptual and structural design of building made of lightweight and infra-lightweight concrete. Berlin. 2010. 105 p.
 11. Lecompte T., Le Bideau P., Glouannec P., Nortershauser D., Le Masson S. Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material. *Energy and buildings*. 2015. No. 94. Pp. 52–60.
 12. Kočí J., Maděra J., Jerman M., Černý R. Computational assessment of thermal performance of contemporary ceramic blocks with complex internal geometry in building envelopes. *Energy and buildings*. 2015. No. 99. Pp. 61–66.
 13. Cui H., Ali Memon S., Liu R. Development, mechanical properties and numerical simulation of macro encapsulated thermal energy storage concrete. *Energy and buildings*. 2015. No. 96. Pp. 162–174.
 14. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Vatin N.I. Modelirovaniye protsessov nestatsionarnogo perenosa tepla v stenovykh konstruktsiyakh iz gazobetonnykh blokov [Modelling of non-stationary processes of heat transfer in the wall structures of concrete blocks]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 8. Pp. 38–48. (rus)
 15. Gorshkov A., Vatin N., Nemova D., Tarasova D. The brickwork joints effect on the thermotechnical uniformity of the Exterior Walls From Gas-concrete Blocks. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 3–8.
 16. Krivoshein A.D., Fedorov S.V. K voprosu o raschete privedennogo soprotivleniya teploperedache ograzhdayushchikh konstruktсий [On the question of the calculation of the reduced R-value]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 8. Pp. 21–27. (rus)
 17. Vatin N.I., Nemova D.P., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Influence of level of thermal protection of protecting designs on the value of the loss of thermal energy in the building [Influence of building envelope thermal protection on heat loss value in the building]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 8. Pp. 4–14. (rus)
 18. Gorshkov A., Ivanova E. Reduced thermal resistance of two-layer walls construction. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. Pp. 49–56.
 19. Savitskiy N.V., Nikiforova T.D., Nesen A.A., Sopilnyak A.M., Bereza I.V. Ratsionalnoye proyektirovaniye ograzhdayushchikh paneley dlya zhilykh zdaniy s primeneniym karkasa iz gnutyykh otsinkovannykh profiley [Rational Design of Enclosing Panels for Residential Buildings with a Frame Made of Bent Galvanized Profiles]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Sb. nauchn. trudov*. No. 69. Dnipropetrovsk: PSAES, 2013. Pp. 418–422. (rus)
 20. Shalagin I.Yu. Aspekty teplotekhnicheskogo rascheta legkikh ograzhdayushchikh konstruktсий [Aspects of Heat Engineering Calculation of Light Frame Structures] [online]. *Engineering journal of Don*. No. 2. Part 2. Rostov-on-Don. 2015. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y20элект15/2994. (accessed: November 10, 2015) (rus)
 21. Vatin N.I., Popova Ye.N. *Termoprofil v legkikh stalnykh*

Leshchenko M.V., Semko V. Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete

24. Soares N., Gaspar A.R., Santos P., Costa J.J. Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates // *Energy and buildings*, 2014. №70. Pp. 411–421.
25. Santos P., Martins C., Simo es da Silva L. Thermal performance of lightweight steel framed wall: the importance of flanking thermal losses // *Journal of Building Physics*. 2014. №38(1). Pp. 81–98.
26. Naji S., Çelik O.C., Alengaram U. J., Jumaat M.Z., Shamshirband S. Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings // *Energy and buildings*, 2014. №84. Pp. 727–739.
27. Sprengard C., Holm A.H. Numerical examination of thermal bridging effects at the edges of vacuum-insulation-panels (VIP) in various constructions // *Energy and buildings*. 2014. №86. Pp. 638–643.
28. Протасевич А. М., Крутилин А. Б. Классификация вентилируемых фасадных систем. Влияние теплопроводных включений на их теплозащитные характеристики // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. №8(26). С. 57–62.
29. Tenpierik M.J., Van der Spoel W.H., Cauber J.M. Analytical Model for Computing Thermal Bridge Effects in High Performance Building Panels [Электронный ресурс]. URL: http://www.researchgate.net/publication/242269808_Analytical_Model_for_Computing_Thermal_Bridge_Effects_in_High_Performance_Building_Panels (дата обращения 10.11.2015).
30. Garay R., Uriarte A., Apraiz I. Performance assessment of thermal bridge elements into a full scale experimental study of a building façade // *Energy and buildings*, 2014. №85. Pp. 579–591.
31. 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.
32. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. О теплотехнической однородности двухслойной стеновой конструкции // *Энергосбережение*. 2014. №7. С. 58–63.
33. Чернявський В.В., Семко В.О., Юрін О.І., Прохоренко Д.А. Вплив перфорації легких сталевих тонкостінних профілів на теплофізичні характеристики огорожувальних конструкцій // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. Полтава: ПолтНТУ, 2011. №1(29). С.194–199. URL: http://lib.pntu.edu.ua/?module=ellib*nid*7879
34. Семко В.О., Лещенко М.В., Котько Н.О. Дослідження впливу конструктивних параметрів на теплопровідність легких сталевих огорожувальних конструкцій // *Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов*. Днепропетровск: ПГАСА, 2012. №65. С. 567–571.
35. Семко В.О., Лещенко М.В., Філіпович Л.М., Резніков А.А. Експериментальні дослідження теплопровідності огорожувальних конструкцій із сталевих тонкостінних профілів // *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць*. Рівне, 2013. №25. С. 606–611.
36. Семко В.О., Лещенко М.В., Криворотко І.С. Дослідження теплових показників огорожувальних конструкцій зі сталевих тонкостінних профілів багатопверхових цивільних будівель // *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць*. Рівне, 2014. №29. С. 491–498.
- stroitelnykh konstruksiyakh [Thermoprofile in Light Steel Building Structures] [Online]. Saint Petersburg. 2006. 63 p. Available at: <http://elib.spbstu.ru/dl/1307.pdf/view> (accessed: November 10, 2015). (rus)
22. Zhurina N., Kuzmichev R. Energoeffektivnyye legkiye ograzhdayushchiye konstruksii [Energy-Efficient Light Building Envelope]. *Arkhitectura i stroitel'stvo*. No. 2. Minsk, 2008. Pp. 93–97. (rus)
23. Petrosova D.V., Kuzmenko N.M., Petrosov D.V. Eksperimentalnoye issledovaniye teplovogo rezhima legkoy ograzhdayushchey konstruksii v naturnykh usloviyakh [A Field Experimental Investigation of the Thermal Regime of Lightweight Building Envelope Construction]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 8. Pp. 31–37. (rus)
24. N. Soares, A.R. Gaspar, P. Santos, J.J. Costa Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates. *Energy and buildings*. 2014. No. 70. Pp. 411–421.
25. Santos P., Martins C., Simo es da Silva L. Thermal performance of lightweight steel framed wall: the importance of flanking thermal losses. *Journal of Building Physics*. 2014. No. 38 (1). Pp. 81–98.
26. Naji S., Çelik O.C., Alengaram U. J., Jumaat M.Z., Shamshirband S. Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings. *Energy and buildings*. 2014. No. 84. Pp. 727–739.
27. Sprengard C., Holm A.H. Numerical examination of thermal bridging effects at the edges of vacuum-insulation-panels (VIP) in various constructions. *Energy and buildings*. 2014. No. 86. Pp. 638–643.
28. Protasevich A.M., Krutinin A.B. Klassifikatsiya ventiliruyemykh fasadnykh sistem. Vliyaniye teploprovodnykh vklyucheni na ikh teplozashchitnyye kharakteristiki [Ventilated façade systems classification. Influence of “Thermal bridges” on their heat-resistant characteristics]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 8. Pp. 57–62. (rus)
29. Tenpierik M.J., Van der Spoel W.H., Cauber J.M. Analytical Model for Computing Thermal Bridge Effects in High Performance Building Panels [Online]. Available at: http://www.researchgate.net/publication/242269808_Analytical_Model_for_Computing_Thermal_Bridge_Effects_in_High_Performance_Building_Panels (accessed: November 10, 2015)
30. Garay R., Uriarte A., Apraiz I. Performance assessment of thermal bridge elements into a full scale experimental study of a building façade. *Energy and buildings*. 2014. No. 85. Pp. 579–591.
31. Gorshkov A.S., Gladkikh A.A. Vliyaniye rastvornykh shvov kladki na parametry teplotekhnicheskoy odnorodnosti sten iz gazobetona [Influence of mortar joints in the masonry wall uniformity of heat engineering parameters of aerated concrete]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 3. Pp. 39–42. (rus)
32. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Vatin N.I. O teplotekhnicheskoy odnorodnosti dvukhsloynoy stenovoy konstruksii [About thermotechnical homogeneity of two-layer wall construction]. *Energoberezeniye*. 2014. No. 7. Pp. 58–63. (rus)
33. Cherniavsky V.V., Semko V.O., Yurin O.I., Prokhorenko D.A. Vplyv perforatsii legkykh stalevykh tonkostinnykh profiliv na teplofizychni harakterystyky ogorodzhuvalnykh konstruksiy [The Influence of Light Gauge Steel Constructions Perforation Type on Its Thermal Characteristics]. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. No. 1(29). Poltava, PNTU, 2011. Pp. 194–199. (ukr)

37. Державний стандарт України ДСТУ Б В.2.6-101:2010 Методи визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій. К.: Мінбуд. України, 2010. 84 с.
38. ДБН В.2.6-31:2006 Теплова ізоляція будівель. (Зі зміною №1, 2013 р.). К.: Мінбуд. України, 2006. 73 с.
39. Семко В.О., Лещенко М.В. Пат. 102289 Україна, МПК (2015.01) Е04В1/76. Енергоефективна стінова огорожувальна конструкція із сталевих холодноформованих елементів. Власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. № у 2015, 03613; заявл. 17.04.15; опубл. 26.10.15, Бюл. № 20/2015.
40. Бронзова М.К., Ватин Н.И., Гарифуллин М.Р. Конструкция каркасных зданий с применением монолитного пенобетона // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 1(28). С. 74–90.
34. Semko V.O., Leshchenko M.V., Kotko N.O. Doslidzhennya vplyvu konstruktyvnykh parametriv na teploprovodnist lehkyykh stalevykh ohorodzhuvalnykh konstruktсий [The influence of design parameters on thermal conductivity of lightweight steel enclosing structures]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Sb. nauchn. trudov.* No. 65. Dnipropetrovsk: PSAES, 2012. Pp. 567–571. (ukr)
35. Semko V.O., Leshchenko M.V., Filipovych L.M., Reznikov A.A. Eksperymental' ni doslidzhennya teploprovodnosti ohorodzhuvalnykh konstruktсий iz stalevykh tonkostinnykh profiliv [Experimental investigation of thermal conductivity of enclosure from thin-walled sections]. *Resursoekonomni materialy, konstruktсий, budivli ta sporudi. Zbirnik naukovikh prats'.* No. 25. Rivne, 2013. Pp. 606–611. (ukr)
36. Semko V.O., Leshchenko M.V., Kryvorotko I.S. Doslidzhennya teplovykh pokaznykiv ohorodzhuvalnykh konstruktсий zi stalevykh tonkostinnykh profiliv bahatopoverkhovykh tsyvilnykh budivel [Investigation of thermal performance of enclosure to steel thin-walled profiles rize civil buildings]. *Resursoekonomni materialy, konstruktсий, budivli ta sporudi. Zbirnik naukovikh prats'.* No. 29. Rivne, 2014. Pp. 491–498. (ukr)
37. DSTU B V.2.6–101:2010 Metody vyznachennia oporu teploperedachi ohorodzhuvalnykh konstruktсий [State standard specification. Methods for determining the resistance to heat transfer of building envelopes]. Kiev. Ministry of Construction of Ukraine Publ. 2010. 84 p. (ukr)
38. DBN V. 2.6–31:2006 Teplova izoliatsia budivel: Zmina 1 [Thermal insulation of buildings: State Building Codes]. Kyev, Ministry of Construction of Ukraine Publ. 2006. 73 p. (ukr)
39. Semko V.O., Leshchenko M.V. Enerhoefektyvna stinova ohorodzhuvalna konstruktсийa iz stalevykh kholodnodeformovanykh elementiv [Energy efficient wall enclosing design of cold-steel items]. Patent UA, no. u 2015 03613, 2015. (ukr)
40. Bronzova M.K., Vatin N.I., Garifullin M.R. Konstruktсийa karkasnykh zdaniy s primeneniym monolitnogo penobetona [Frame buildings construction using monolithic foamed concrete]. *Construction of unique buildings and structures.* 2015. No. 1(28). Pp. 74–90. (rus)

Марина Валентиновна Лещенко,
+3(8066)9321782; эл. почта:
leshchen_m@mail.ru

Владимир Александрович Семко,
+3(8050)3043051; эл. почта: syom@mail.ru

Maryna Leshchenko,
+3(8066)9321782; leshchen_m@mail.ru

Volodymyr Semko,
+3(8050)3043051; syom@mail.ru

© Лещенко М.В., Семко В.А., 2015

doi: 10.5862/MCE.60.7

Повышение теплозащиты узлов
ограждающих конструкций зданий
с применением пеностеклокристаллического материала
Improving the thermal performance of the building envelopes
with the use of foam glass-ceramics

*Канд. техн. наук, доцент Д.Г. Портнягин,
Хакасский технический институт – филиал
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный
университет», г. Абакан, Россия*

*D.G. Portnyagin,
Khakass Technical Institute – branch of Siberian
Federal University, Abakan, Russia*

Ключевые слова: энергоэффективность;
тепловые потери; ограждающая конструкция;
пеностеклокристаллический материал

Key words: energy performance; heat loss;
building envelope; foam glass; foam glass-
ceramics

Аннотация. В статье предложены рекомендации по устранению дефектов теплозащиты на основе ранее проведенного тепловизионного обследования. Предложены конструктивные решения ограждающих конструкций с учетом расчета тепловых полей в программе Elcut. Типовым решением теплоизоляции цокольного узла является устройство наружной теплоизоляции стены подвала до уровня низа облицовочной версты. Для данного решения характерен значительный мостик холода в направлении к облицовочной версте, проходящий через забутовку и поперечное сечение плиты перекрытия под теплоизоляцией стены. Исследуется способ устранения мостика холода заменой керамического или силикатного кирпича теплоизоляционным кирпичом из пеностеклокристаллического материала. Рассматривается узел примыкания кровли к парапету. Приводятся результаты расчета тепловых потерь при замене верхнего ряда забутовки выше уровня покрытия на теплоизоляционный кирпич из пеностеклокристаллического материала.

Abstract. Recommendations on eliminating the defects of thermal insulation on the basis of the previously carried out thermal imaging surveys were given. Constructive solutions of building envelopes were proposed with regard to modeling thermal fields in ELCUT. A typical solution of thermal insulation of the basement joint is the unit exterior insulation of the basement wall to the level of the facing course bottom. This constructive solution is characterized by a significant thermal bridge, in the direction through the cross-section of the floor slab under the insulation of the wall. The article presents the results of eliminating the thermal bridge by substituting of ceramic or silica bricks for thermal insulation bricks of foamglass. We discussed the roof and parapet joint. The paper also presents the results of heat loss calculation when replacing of the top line of backfills above the level of the coating by the brick thermal insulation made of foamglass.

Введение

Необходимость решения задач энергетической эффективности и ресурсосбережения регламентируется Законом РФ «О техническом регулировании». Техническим регламентом о безопасности зданий и сооружений, также имеющим статус закона РФ, предусмотрены требования к проектным решениям и к качеству строительства зданий и сооружений, обеспечивающие безопасные условия проживания и пребывания людей в части экологических, санитарно-гигиенических и других норм. К ним относятся качество воздуха и микроклимат помещений, обеспечиваемый, в первую очередь, качеством теплозащитных свойств ограждающих конструкций [1–5], решением их воздухо- и паропроницаемости, рациональным подбором слоев ограждающих конструкций (стен, перекрытий) [6].

Энергоэффективное строительство с каждым годом приобретает все большую актуальность и стремительно развивается [7]. Появляются новые здания и сооружения, построенные по современным технологиям, с повышенными требованиями к теплозащите и улучшенными характеристиками энергопотребления [8, 9]. Реализация этих условий невозможна без использования эффективных теплоизоляционных материалов [10–13] и анализа процессов переноса тепла через ограждающие конструкции [14, 15]. Изучены факторы, оказывающие влияние на изменение коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала [16].

Отечественными и зарубежными специалистами проведены исследования по влиянию градиентов температуры на перенос влаги через материалы [17, 18], что позволяет делать прогнозы появления мостиков холода в связи с изменением влажностного режима наружных ограждающих конструкций [19, 20].

При этом для достижения высокой энергоэффективности строительной продукции необходимо учитывать факторы на всех стадиях жизненного цикла строительного объекта. Так, на стадии проектирования необходимо рационально выбрать тип теплоизоляционного материала с учетом его теплотехнических и физико-механических характеристик (в том числе с учетом долговечности); конструктивную схему здания; способы устройства эффективной теплоизоляции ограждающих конструкций с исключением мостиков холода и возможности накопления влаги внутри утеплителя. На стадии строительства от качества выполнения работ напрямую зависят теплозащитные свойства ограждающих конструкций, их надежность и долговечность. При эксплуатации здания или сооружения необходимо обеспечивать те условия работы, на которые были рассчитаны ограждающие конструкции, в частности, микроклимат помещения.

Только при комплексном решении вопросов энергоэффективности на всех стадиях жизненного цикла объекта, начиная от производства теплоизоляционного материала и включая период эксплуатации здания, можно значительно снизить затраты на тепло- и энергоресурсы.

С введением повышенных норм теплозащиты наружных ограждающих конструкций появилась необходимость увеличения сопротивления теплопередаче в средней полосе России в 3.5 раза. При этом для каменных стен начиная с 90-х годов прошлого века стали применять наружные слоистые конструкции теплозащиты, в которых используются минераловатные плиты, пластмассы, а в наружных слоях – полимерный и металлический сайдинг, асбестоцементные листы и другие материалы. Недостатком этих решений является несоответствие долговечности каменных стен (100 и более лет) и конструкций дополнительной теплозащиты (25–30 лет).

Известно, что на энергопотребление зданий используется 44 % тепловой энергии, из них 90 % – при эксплуатации, 8 % – на производство стройматериалов, 2 % – в процессе строительства [21]. При эксплуатации традиционного многоэтажного жилого здания через стены теряется до 40 % тепла. Формальным утеплением ограждающих конструкций нельзя добиться значительного уменьшения теплопотерь, поскольку их существенная доля приходится на мостики холода, то есть участки интенсивного теплообмена с окружающей средой. Такие участки чаще всего образуются в области межэтажного перекрытия, цокольной части здания при отсутствии теплоизоляции фундамента или стены подвала, а также в карнизной части здания через массив стены.

В исследованиях [22, 23] были изучены вопросы утепления узлов сопряжения стен с железобетонным монолитным перекрытием, в связи с этим предложены варианты конструктивных решений по утеплению наружной стены здания. В работе [24] предложено конструктивное решение узла опирания облицовки из кирпича в многослойных наружных стенах монолитных зданий с учетом требований безопасной и длительной эксплуатации. Особенностью конструктивного решения является устройство термовкладышей и температурных компенсационных швов в области межэтажных перекрытий, что повышает теплоэффективность и надежность узла.

При анализе повреждений в кирпичной облицовке наружных многослойных стен жилых зданий в работах [25, 26] выделяются механические дефекты и повреждения. Однако при этом не уделяется должного внимания потенциальным мостикам холода в цокольной и карнизной частях здания.

В качестве потенциальных мостиков холода отмечают лишь растворные швы каменной кладки. Так, в работе [21] в качестве варианта повышения тепловой эффективности ограждающей конструкции предлагается замена наполнителя в строительных растворах на гранулированное пеностекло, что в некоторой степени повышает теплозащитные свойства ограждающей конструкции.

Постановка задачи

Относительно небольшой срок эксплуатации (15–20 лет) уже показывает, что слоистые ограждающие конструкции имеют нарушения полимерного сайдинга, асбестоцементных листов, ветрозащитной пленки и самих минераловатных плит и пенопласта. Совершенно очевидной является необходимость применения в каменных стенах теплоизоляционных материалов с надежностью и долговечностью, соответствующими основному материалу стен – кирпичной кладке или бетону. К числу таких материалов относится пеностекло и пеностеклокристаллические материалы (ПСКМ) [10–13]. Кроме того, если учесть, что за период эксплуатации существующую систему теплозащиты с применением волокнистых или полимерных теплоизоляционных материалов необходимо будет заменить три–четыре раза, то с учетом надежности и долговечности ПСКМ является одним из самых недорогих материалов. Кроме того, ПСКМ в гранулированном виде может применяться в ненагруженных слоях теплоизоляции с минимально низкой насыпной плотностью ($100\ldots150\text{ кг/м}^3$) и низким коэффициентом теплопроводности ($0.05\ldots0.06\text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$) в качестве насыпной теплоизоляции, что позволяет ему конкурировать с такими материалами как минераловатные плиты и пенопласты. При этом он может применяться не только в слоистых наружных конструкциях, но и в качестве внутренних теплоизоляционных прослоек в каменных стенах аналогично системе «Besser» (США, Канада).

В целях снижения теплопотерь здания и удовлетворения требований нормативных документов широко применяются многослойные ограждающие конструкции, в том числе с размещением внутри конструкции слоя тепловой изоляции. Одним из основных типов ограждающих конструкций зданий является каменная кладка, облицованная кирпичом, с устройством теплоизоляции между слоями (табл. 1).

Важной задачей в этом направлении является определение теплозащитных качеств ограждающих конструкций [27, 28]. Ее решение позволяет оценить соответствие строительных конструкций нормативным требованиям, установить реальные потери тепла, разработать меры по повышению тепловой защиты зданий. В работах [29–31] проведены подобные исследования, однако для обеспечения энергоэффективности ограждающей конструкции требуется проанализировать возможность образования мостиков холода и разработать рекомендации по их устранению.

Целью исследования является разработка рекомендаций по повышению теплозащиты и долговечности узлов ограждающих конструкций зданий стеновой конструктивной схемы с применением пеностеклокристаллического материала. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- расчет и анализ тепловых полей узлов ограждающих конструкций на примерах цокольного узла с теплоизоляцией стены подвала и узла примыкания кровли к парапету;
- выявление потенциальных мостиков холода в рассматриваемых узлах и разработка рекомендаций по их устранению/минимизации с позиции повышения долговечности слоистой ограждающей конструкции.

Определение тепловых потерь ограждающих конструкций

Для проверки энергоэффективности ограждающей конструкции выбран цокольный узел с устройством наружной теплоизоляции стены подвала. Рассмотрено четыре варианта его исполнения (табл. 1):

- 1) устройство теплоизоляции стены подвала до уровня низа облицовочной версты;
- 2) устройство теплоизоляции стены подвала до уровня низа облицовочной версты, при этом нижний ряд массива стены заменен на теплоизоляционный кирпич ПСКМ;
- 3) устройство теплоизоляции стены подвала на высоте 65 мм выше уровня низа облицовочной версты, при этом нижний ряд массива стены заменен на теплоизоляционный кирпич ПСКМ;
- 4) устройство теплоизоляции стены подвала на высоте 130 мм выше уровня низа облицовочной версты, при этом нижний ряд массива стены заменен на теплоизоляционный кирпич ПСКМ.

Мощности потоков теплоты через каждое теплопроводное включение определяются с помощью расчета температурных полей в программе Elcut.

Расчетные характеристики материалов стеновой конструкции приведены в таблице 2.

Портнягин Д.В. Повышение теплозащиты узлов ограждающих конструкций зданий с применением пеностеклокристаллического материала

Заданы граничные условия:

- 1) температуры внутреннего и окружающего воздуха: $T_B = 20\text{ °C}$ и $T_H = -35\text{ °C}$;
- 2) коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхности ограждающих конструкций соответственно: 8.7 и 23 Вт/м²·°C.

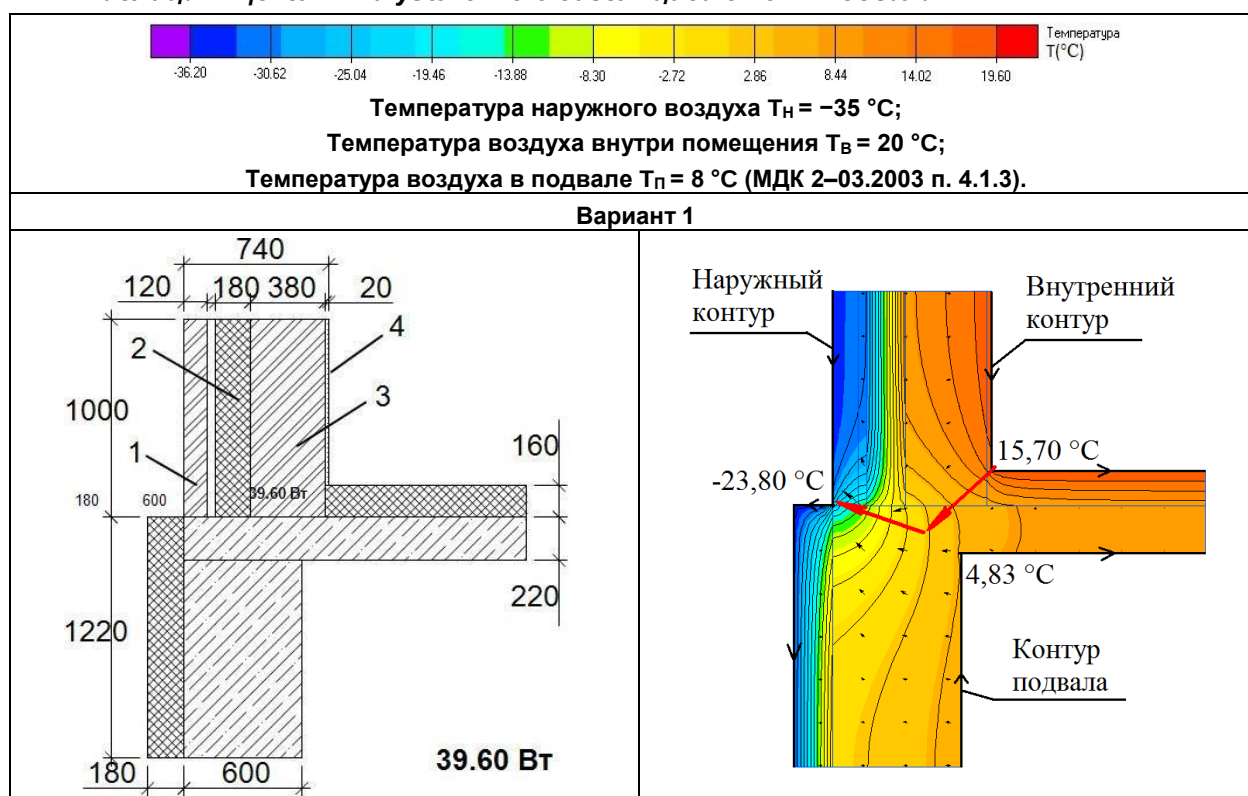
В таблице 1 представлены температурные поля цокольного узла с теплоизоляцией стены подвала, выполненного по вариантам 1–4. Теплотехнические характеристики по внутреннему, наружному контурам и контуру подвала приведены в таблицах 3–5.

Типовым решением теплоизоляции цокольного узла является устройство наружной теплоизоляции стены подвала до уровня низа облицовочной версты (табл. 1, вариант 1). При температуре наружного воздуха -35 °C температура в стыке теплоизоляции стены подвала с облицовочным кирпичом составляет -23.80 °C . Разница между значениями температур наружного воздуха и наружной поверхности облицовочного кирпича – 11.20 °C . Это объясняется тем, что тепловой поток проходит в направлении из помещения к облицовочной версте через поперечное сечение плиты перекрытия под теплоизоляцией стены и тем самым «прогревает» наружную поверхность облицовочного кирпича. В результате формируется мостик холода.

Тем самым, судя по направлению векторов тепловых потоков, основные теплотери происходят в направлении от внутреннего контура в область плиты перекрытия (табл. 1). Этим объясняется понижение температуры поверхности угла помещения (15.70 °C), а также поверхности угла контура подвала (4.83 °C) при температуре внутреннего воздуха 20 °C и 8 °C соответственно (табл. 1, вариант 1).

Анализ значений тепловых потоков, полученных по внутреннему и наружному контурам здания (табл. 3–4), показывает их расхождение. Объясняется это тем, что при их расчете учитываются площади внутреннего и наружного контуров здания, которые отличаются между собой (табл. 1, вариант 1). Так, при расчете теплового потока по наружному контуру учитываются тепловые потери из подвала здания. Для сравнения степени энергоэффективности вариантов конструктивного исполнения цокольного узла выбран тепловой поток по наружному контуру, характеризующий тепловые потери как из помещения, так и из подвала здания в рамках исследуемого цокольного узла. Численное значение теплового потока по наружному контуру данного конструктивного решения составляет 39.60 Вт (табл. 4). Тем не менее, несмотря на значительную величину тепловых потерь, отсутствуют условия для образования точки росы (рис. 1–6).

Таблица 1. Цокольный узел с теплоизоляцией стены подвала



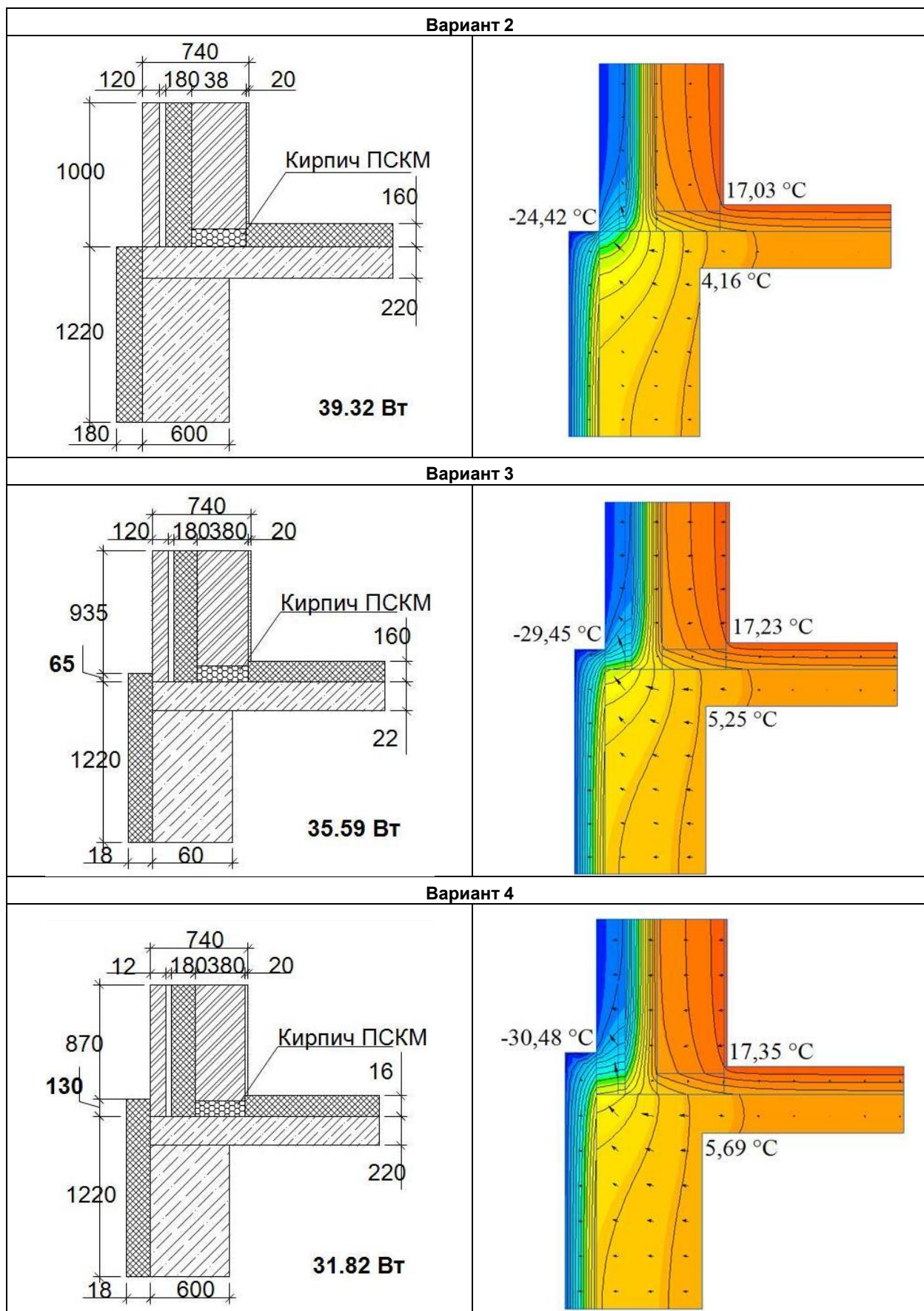


Таблица 2. Расчетные характеристики материалов ограждающей конструкции

№ поз.*	Слой, материал	Толщина слоя, м	Плотность материала, кг/м ³	Расчётный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
1	Кладка из керамического кирпича	120	1800	0.67
2	ПСКМ	180	300	0.06
3	Кладка из керамического кирпича	380	1800	0.67
4	Штукатурка (цементно-песчаный раствор)	20	1800	0.90

* № поз. смотреть совместно с табл. 1 (вариант 1)

Таблица 3. Теплотехнические характеристики по внутреннему контуру ($T_B = 20\text{ °C}$)

Модель (узел)	Тепловой поток, Вт	Соотношение, %	Экономия тепла, %	Средняя температура поверхности T_{s1} , °C
Вариант 1	22.43	100	—	18.59
Вариант 2	18.83	83.95	16.05	18.82
Вариант 3	18.22	81.23	18.77	18.86
Вариант 4	17.76	79.17	20.83	18.89

Таблица 4. Теплотехнические характеристики по наружному контуру ($T_H = -35\text{ °C}$)

Модель (узел)	Тепловой поток, Вт	Соотношение, %	Экономия тепла, %	Средняя температура поверхности T_{s2} , °C
Вариант 1	39.60	100	—	-34.20
Вариант 2	39.32	99.29	0.71	-34.18
Вариант 3	35.59	89.87	10.13	-34.30
Вариант 4	31.82	80.35	19.65	-34.37

Таблица 5. Теплотехнические характеристики по контуру подвала ($T_P = 8\text{ °C}$)

Модель (узел)	Тепловой поток, Вт	Соотношение, %	Экономия тепла, %	Средняя температура поверхности T_{s3} , °C
Вариант 1	24.43	100	—	6.66
Вариант 2	27.47	124	-24.00	6.49
Вариант 3	20.84	85.30	14.7	6.86
Вариант 4	17.76	72.69	27.31	7.03

При использовании кирпича ПСКМ (вариант 2) тепловой поток по наружному контуру снижается по сравнению с базовым вариантом 1 только на 0.71 % (табл. 4). Однако сокращение теплопотерь из помещения составляет 16.05 % (табл. 3). Таким образом, можно сделать вывод, что применение термовкладыша (кирпича ПСКМ) практически не сокращает теплопотери в окружающую среду, однако его применение позволяет значительно снизить их в направлении помещение–подвал. При этом отмечается повышение температуры поверхности примыкания пола к стене до 17.03 °C (против 15.70 °C). Тем не менее температура поверхности угла подвала снижается на 0.67 °C (табл. 1, вариант 2). Это также является подтверждением того, что теплоизоляционный кирпич ПСКМ в нижнем ряду массива стены устраняет мостик холода в направлении помещение–подвал, в результате поверхность угла подвала не нагревается тепловыми потоками из помещения. При этом наблюдаются значительные тепловые потоки из подвала в направлении к облицовочной версте, из-за чего при температуре внутреннего воздуха подвала 8 °C температура поверхности угла составляет 4.16 °C.

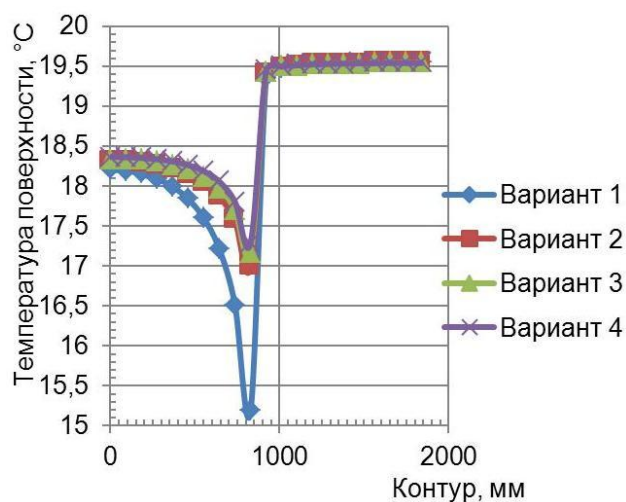


Рисунок 1. График температуры поверхности по внутреннему контуру

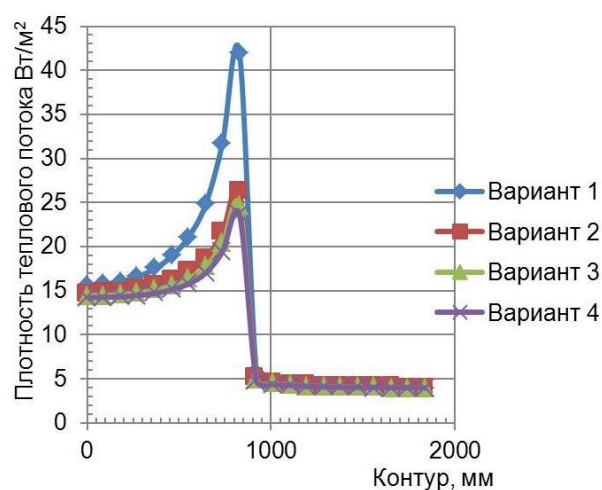


Рисунок 2. График плотности теплового потока по внутреннему контуру

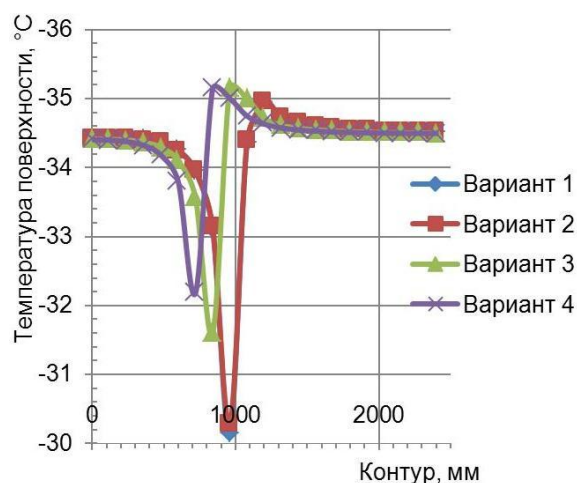


Рисунок 3. График температуры поверхности по наружному контуру

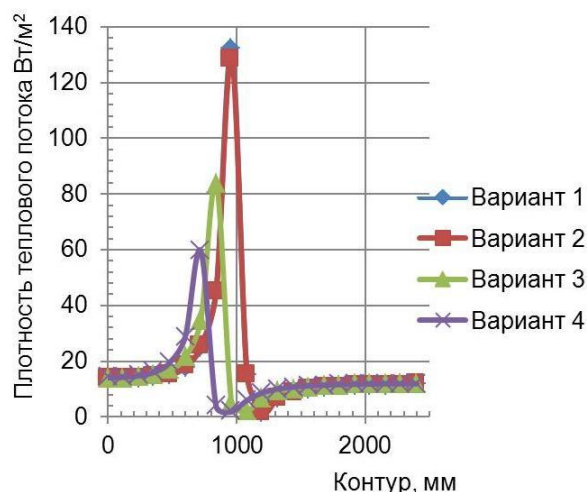


Рисунок 4. График плотности теплового потока по наружному контуру

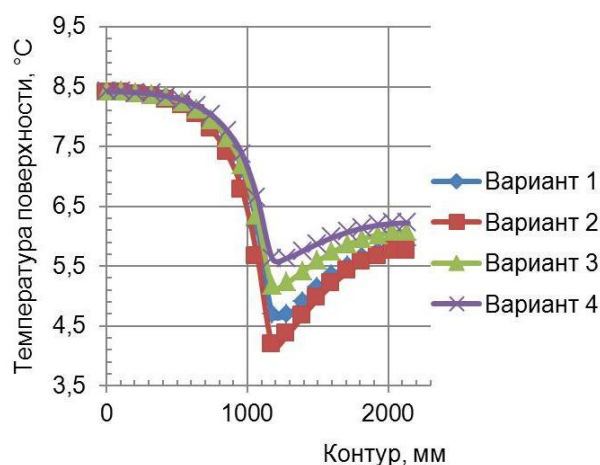


Рисунок 5. График температуры поверхности по контуру подвала

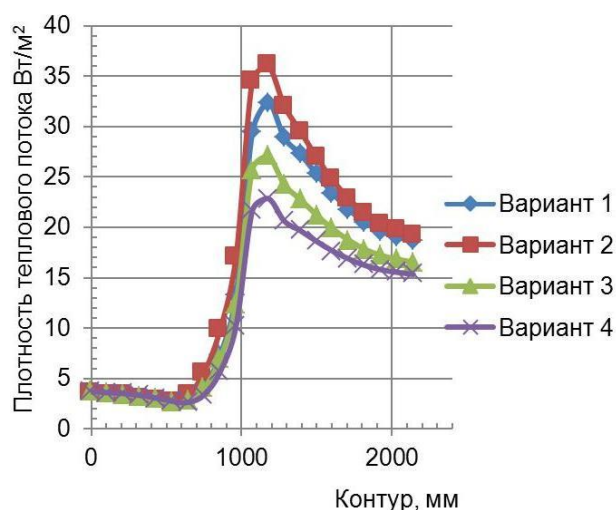


Рисунок 6. График плотности теплового потока по контуру подвала

Для устранения мостика холода через стык наружной теплоизоляции стены подвала и облицовочной версты предложены варианты 3 и 4 конструктивного исполнения узла (табл. 1, вариант 3 и 4). Устройство наружной теплоизоляции стены подвала на высоту 65 мм и 130 мм выше уровня низа облицовочной версты повышают энергоэффективность узла на 10.13 и 19.65 % соответственно (табл. 4). Благодаря этому повышается тепловой комфорт помещения, заключающийся в отклонении значений температуры на поверхности стены не более чем на 2 °C и минимальных перепадах теплового потока по исследуемым контурам (рис. 1–6) в сравнении с вариантом 1.

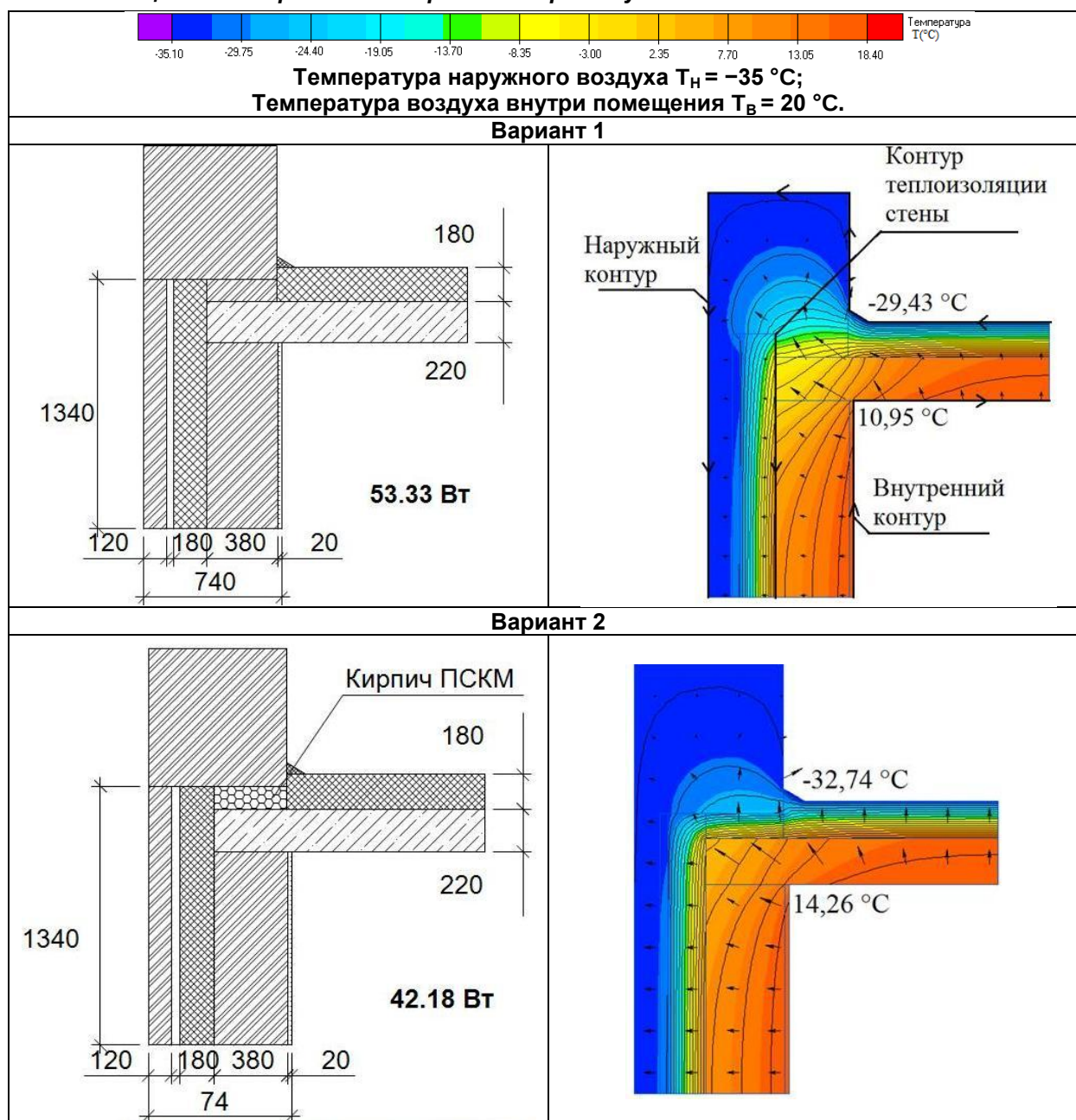
Portnyagin D.V. Improving the thermal performance of the building envelopes with the use of foam glass-ceramics

Таким образом, с точки зрения энергоэффективности наиболее рациональным вариантом является вариант 4: устройство теплоизоляции стены подвала на высоту 130 мм выше уровня низа облицовочной версты, при этом нижний ряд забутовки заменен на теплоизоляционный кирпич ПСКМ, что позволяет снизить теплопотери помещения через узел на 19.65 %.

С точки зрения значительных теплопотерь «уязвимым» является узел примыкания кровли к парапету (табл. 6) или узел карниза скатной крыши. Парапет крыши – стандартный атрибут плоских кровель, в том числе инверсионных, но может устанавливаться и на скатных конструкциях. Рассмотрено два варианта его исполнения (табл. 6):

- 1) типовое решение каменной кладки, облицованной кирпичом, с устройством теплоизоляции между слоями; наружная теплоизоляция покрытия;
- 2) конструктивное решение аналогично варианту 1, но верхний ряд массива стены выше уровня покрытия заменен на теплоизоляционный кирпич ПСКМ.

Таблица 6. Узел примыкания кровли к парапету



Расчетные характеристики материалов стеновой конструкции приведены в таблице 2. Теплотехнические характеристики по внутреннему, наружному контурам и контуру внутренней грани теплоизоляции приведены в таблицах 7–9.

Тепловой поток типового конструктивного решения узла примыкания кровли к парапету составляет 53.33 Вт. Векторы тепловых потоков указывают на значительные мостики холода через торец покрытия в направлении парапета (табл. 6, вариант 1). Из-за этого температура поверхности верха стены внутри помещения составляет 10.95 °С. Таким образом, возможно образование точки росы.

При замене верхнего ряда забутовки выше уровня покрытия на теплоизоляционный кирпич ПСКМ температура поверхности угла помещения увеличивается до 14.26 °С (табл. 6, вариант 2). При этом теплопотери по наружному контуру снижаются на 20.91 % (табл. 7).

Таблица 7. Теплотехнические характеристики по наружному контуру ($T_n = -35$ °С)

Модель (узел)	Тепловой поток, Вт	Соотношение, %	Экономия тепла, %	Средняя температура поверхности T_s , °С
Вариант 1	53.33	100	–	–34.46
Вариант 2	42.18	79.09	20.91	–34.59

Закключение

Таким образом, при разработке конструктивных решений ограждающих конструкций снижение теплопотерь может достигать 20 % и более только за счет устранения мостиков холода, что наглядно демонстрирует программа Elcut. Выяснено, что замена нижнего ряда массива стены кирпичом ПСКМ повышает энергоэффективность цокольного узла с точки зрения устранения мостика холода в направлении помещение–подвал на 16.05 %. Однако для повышения энергоэффективности по наружному контуру узла требуется заведение теплоизоляционного слоя стены подвала на высоту выше уровня торца плиты перекрытия, что позволяет сократить общие теплопотери на 19.65 %.

При замене верхнего ряда массива стены выше уровня покрытия на теплоизоляционный кирпич ПСКМ теплопотери по наружному контуру снижаются на 20.91 %, что также свидетельствует о высокой эффективности применения ПСКМ.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что предлагаемые конструктивные решения позволяют обеспечить условия комфортного проживания в гражданских зданиях. Рациональный выбор вида теплоизоляционного материала и способа его применения не только снижает теплопотери и повышает тепловой комфорт помещения, но и увеличивает срок службы ограждающей конструкции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15–48–04378 р_сибирь_а.

Литература

1. Карауш С.А., Лысак И.А., Анисимов М.В. Математическое моделирование теплового состояния подвального помещения // Вестник ТГАСУ. 2006. №2. С. 133–141.
2. Лысак И. А. Решение уравнения теплопроводности для некоторых задач стройиндустрии // Ползуновский альманах. 2011. №1. С. 41–46.
3. Малявина Е.Г. Строительная теплофизика и проблемы утепления современных зданий // АВОВ. 2009. №1. С. 4–10.
4. Корниенко С.В. Комплексная оценка теплозащиты ограждающих конструкций оболочки здания // Инженерно-строительный журнал. 2012. №7(33). С. 43–49.
5. Guo W., Qiao X., Huang Y., Fang M., Han X. Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone // Energy

References

1. Karaush S.A., Lysak I.A., Anisimov M.V. Matematicheskoye modelirovaniye teplovogo sostoyaniya podvalnogo pomeshcheniya [Mathematical modeling of the thermal state of the basement]. Vestnik TSUAB. Tomsk. 2006. No.2. Pp. 133–141. (rus)
2. Lysak I.A. Resheniye uravneniya teploprovodnosti dlya nekotorykh zadach stroyindusrii [The solution of the heat equation for some problems in the construction industry]. Polzunovsky almanac. 2011. No.1. Pp. 41–46. (rus)
3. Malyavina Ye.G. Stroitel'naya teplofizika i problemy utepleniya sovremennykh zdaniy [Building Thermophysics and problems of insulation of modern buildings]. AVOK. 2009. No.1. Pp. 4–10. (rus)
4. Korniyenko S.V. Kompleksnaya otsenka teplozashchity ograzhdayushchikh konstruktsey obolochki zdaniya [Comprehensive assessment of thermal protection of enclosing structures of the building envelop]. Magazine of Civil Engineering. 2012. No.7. Pp. 43–49. (rus)

Portnyagin D.V. Improving the thermal performance of the building envelopes with the use of foam glass-ceramics

- and Buildings. 2012. Vol. 50. Pp. 196–203.
6. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Смирнова Т.В. Энергетическая эффективность и методология создания теплоизоляционных материалов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 4(35). Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>.
 7. Горшков А.С., Ливчак В.И. История, эволюция и развитие нормативных требований к ограждающим конструкциям // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №3 (30). С. 7–37.
 8. Крайнов Д.В., Сафин И.Ш., Любимцев А.С. Расчет дополнительных тепловых потерь через теплопроводные включения ограждающих конструкций (на примере узла оконного откоса) // Инженерно-строительный журнал. 2010. №6(16). С. 17–22.
 9. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Крышов С.И., Пономарев О.И. Теплозащита наружных стен зданий с облицовкой из кирпичной кладки // АВОК. 2009. №5. С. 46–60.
 10. Селиванов Ю.В., Шильцина А.Д., Селиванов В.М., Логинова Е.В., Портнягин Д.Г. Применение поризованных материалов в конструкциях теплоизоляции // Строительные материалы. 2010. №2. С. 25–26.
 11. Портнягин Д.Г., Селиванов Ю.В., Селиванов В.М., Шильцина А.Д. Составы и свойства пеностеклокристаллических материалов из композиций стеклобоя и высококальциевого шлака // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8. С. 25–28.
 12. Блажнова О.В., Портнягин Д.Г., Селиванов Ю.В. Оценка возможности применения высококальциевого шлака ТЭЦ для получения пеностеклокристаллических материалов по энергоэффективной технологии низкотемпературного обжига // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. №6. С. 103–107.
 13. Портнягин Д.Г., Селиванов Ю.В., Селиванов В.М. Возможности получения закристаллизованного пеностекла // Материалы междунаро. науч. техн. конф. «Инновационные методы в архитектуре и градостроительстве». Саратов, 2009. С. 95–97.
 14. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков // Инженерно-строительный журнал. 2014. №8(52). С. 38–48.
 15. Корниенко С.В. Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания // Инженерно-строительный журнал. 2014. №8(52). С. 25–37.
 16. Hugo H. Applied Building Physics. Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2011. 308 p.
 17. Trabelsi A., Belarbi R., Abahri K., Qin M. Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient. Building Simulation. 2012. №3. Pp. 107–115.
 18. Ruut P. Moisture Dynamics in Building Envelopes. PhD Thesis Report R-071. 2003. 239 p.
 19. Janssen H. A comment to "Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient" // Building Simulation. 2013. №6. Pp. 103–108.
 20. Janssen H. Thermal Diffusion of Water Vapour in Porous Materials: a Critical Review. International Conference on Durability of Building Materials and Components [Online resource]. Porto, Portugal, April 12–15, 2011. URL: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22318.pdf>. (accessed: January 28, 2015).
 21. Балмасов Г.Ф., Скворцов А.Е., Мешков П.И. Теплоизоляционные штукатурки с пеностеклом // Строительные материалы. 2009. №1. С. 32–34.
 5. Guo W., Qiao X., Huang Y., Fang M., Han X. Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone // Energy and Buildings. 2012. Vol. 50. Pp. 196–203.
 6. Rumyantsev B.M., Zhukov A.D., Smirnova T.V. Energeticheskaya effektivnost i metodologiya sozdaniya teploizolyatsionnykh materialov [Energy efficiency and methodology for the creation of thermal insulation materials]. Internet-Vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya. 2014. No.4(35) (rus)
 7. Gorshkov A.S., Livchak V.I. Istoriya, evolyutsiya i razvitiye normativnykh trebovaniy k ograzhdayushchim konstrukttsiyam [History, evolution and development of regulatory requirements for protecting designs] Construction of Unique Buildings and Structures. 2015. No. 3(30). Pp. 7–37. (rus)
 8. Kraynov D.V., Safin I.Sh., Lyubimtsev A.S. Raschet dopolnitelnykh teplopoter cherez teploprovodnyye vkluyeniya ograzhdayushchikh konstrukttsiy [Calculation of additional heat loss through heat-conducting inclusions walling]. Magazine of Civil Engineering. 2010. No.6. Pp. 17–22. (rus)
 9. Gagarin V.G., Kozlov V.V., Kryshov S.I., Ponomarev O.I. Teplozashchita naruzhnykh sten zdaniy s oblitsovkoj iz kirpichnoy kladki [Thermal protection of external walls of buildings with brick lining]. AVOK. 2009. No.5. Pp. 46–60. (rus)
 10. Selivanov Yu.V., Shil'tsina A.D., Selivanov V.M., Loginova E.V., Portnyagin D.G. Primeneniye porizovannykh materialov v konstrukttsiyakh teploizolyatsii [The use of porous materials in structures insulation]. Stroitel'nye Materialy. 2010. No. 2. Pp. 25–26. (rus)
 11. Portnyagin D.G., Selivanov Yu.V., Selivanov V.M., Shil'tsina A.D. Sostavy i svoystva penosteklokristallicheskih materialov iz kompozitsiy stekloboya i vysokokal'tsiyevogo shlaка [The compositions and properties of foam glass-crystalline materials from compounds of broken glass and high calcium slag]. Magazine of Civil Engineering. 2011. No.8. Pp. 25–28. (rus)
 12. Blazhnova O.V., Portnyagin D.G., Selivanov Yu.V. Otsenka vozmozhnosti primeneniya vysokokal'tsiyevogo shlaка TETs dlya polucheniya penosteklokristallicheskih materialov po energoeffektivnoy tekhnologii nizkotemperaturnogo obzhiga [The assessment of the feasibility of a high calcium slag to obtain foam glass-crystalline materials by power efficient technology of low-temperature firing]. Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2011. No.6. Pp. 103–107. (rus)
 13. Portnyagin D.G., Selivanov Yu.V., Selivanov V.M. Vozmozhnosti polucheniya zakristallizovannogo penostekla [The possibility of obtaining crystallized foam glass]. Materialy mezhdunarod. nauch. tekhn. konf. «Innovatsionnyye metody v arkhitekture i gradostroitel'stve». Saratov. 2009. Pp. 95–97. (rus)
 14. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Vatin N.I. Modelirovaniye protsessov nestatsionarnogo perenosa tepla v stenovykh konstrukttsiyakh iz gazobetonnykh blokov [Simulation of unsteady processes of heat transfer in wall structures made of concrete blocks]. Magazine of Civil Engineering. 2014. No. 8. Pp. 38–48. (rus)
 15. Korniyenko S.V. Mnogofaktornaya otsenka teplovogo rezhima v elementakh obolochki zdaniya [Multifactorial evaluation of the thermal mode in shell elements of the building]. Magazine of Civil Engineering. 2014. No. 8. Pp. 25–37. (rus)
 16. Hugo H. Applied Building Physics. Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2011. 308 p.
 17. Trabelsi A., Belarbi R., Abahri K., Qin M. Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient. Building Simulation. 2012. No. 3. Pp. 107–115.

Портнягин Д.В. Повышение теплозащиты узлов ограждающих конструкций зданий с применением пеностеклокристаллического материала

22. Белаш Т.А., Кузнецов А.В. Теплотехнические качества монолитных жилых зданий // Жилищное строительство. 2009. №9. С. 22–24.
23. Кузнецов А.В. Исследования по повышению теплотехнических качеств железобетонных плит перекрытий в монолитно-каркасных домах // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. Вып. 4 (29). С. 120–127.
24. Блашко В.П. Наружные многослойные стены с облицовкой из кирпича в монолитных зданиях // Жилищное строительство. 2009. №8. С. 6–7.
25. Лившиц Д.В., Павлова М.О., Простяков А.В. Технология современного строительства последнего десятилетия. Проблемы и решения конструкций зданий с многослойными наружными стенами // Технологии строительства. 2009. №1. С. 24–27.
26. Давидюк А.А. Анализ результатов обследования многослойных наружных стен многоэтажных каркасных зданий // Жилищное строительство. 2010. №6. С. 21–26.
27. Motuziene V., Valancius K., Rynkun G. Complex Analysis of Energy Efficiency of public buildings: case study of VGTU // Инженерно-строительный журнал. 2012. №2(28). С. 9–17.
28. Thorsell T., Bomberg M. Integrated methodology for evaluation of energy performance of the building enclosures: part 3 – uncertainty of thermal measurements // Journal of Building Physics. 2011. Vol. 35. Pp. 83–96.
29. Miranville F., Fakra A. H., Gnichard S., Boyer H., Praene P., Bigot D. Evaluation of the thermal resistance of a roof-mounted multi-reflective radiant barrier for tropical and humid conditions: Experimental study from field measurements // Energy and Buildings. 2012. Vol. 48. Pp. 79–90.
30. Maref W., Bossche N. Van Den, Armstrong M., Lacasse M. A., Elmahdy H., Glazer R. Condensation risk assessment on box windows: the effect of the window-wall interface // Journal of Building Physics. 2012. Vol. 36. Pp. 35–56.
31. Barrios G., Huelsz G., Rechtman R., Rojas J. Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. №1. Pp. 219–223.
18. Ruut P. *Moisture Dynamics in Building Envelopes*. PhD Thesis Report R-071. 2003. 239 p.
19. Janssen H. A comment to "Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient". *Building Simulation*. 2013. No. 6. Pp. 103–108.
20. Janssen H. *Thermal Diffusion of Water Vapour in Porous Materials: a Critical Review. International Conference on Durability of Building Materials and Components* [Online resource]. Porto, Portugal, April 12-15, 2011. URL: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22318.pdf>. (accessed: January 28, 2015).
21. Balmasov G.F., Skvortsov A.E., Meshkov P.I. Teploizolyatsionnyye shtukaturki s penosteklom [Insulating plaster with foam glass]. *Stroitel' nye Materialy*. 2009. No. 1. Pp. 32–34. (rus)
22. Belash T.A., Kuznetsov A.V. Teplotekhnicheskiye kachestva monolitnykh zhilykh zdaniy [Thermal quality of monolithic residential buildings]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*. 2009. No. 9. Pp. 22–24. (rus)
23. Kuznetsov A.V. Issledovaniya po povysheniyu teplotekhnicheskikh kachestv zhelezobetonnykh plit perekrytiy v monolitno-karkasnykh domakh [Research on improving the thermal properties of concrete panels in frame-monolithic building]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2011. Vol. 4 (29). Pp. 120–127. (rus)
24. Blazhko V.P. Naruzhnyye mnogoslownyye steny s oblitsovkoj iz kirpicha v monolitnykh zdaniyakh [Exterior walls are clad with veneer brick in the monolithic buildings]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*. 2009. No. 8. Pp. 6–7. (rus)
25. Livshits D.V., Pavlova M.O., Prostyakov A.V. Tekhnologiya sovremennogo stroitelstva poslednego desyatletiya. Problemy i resheniya konstruksiy zdaniy s mnogoslownymi naruzhnymi stenami [The technology of modern construction of the last decade. Problems and solutions designs of buildings with multi-layered exterior walls]. *Tekhnologii stroitelstva*. 2009. No. 1. Pp. 24–27. (rus)
26. Davidyuk A.A. Analiz rezultatov obsledovaniya mnogoslownykh naruzhnykh sten mnogoetazhnykh karkasnykh zdaniy [The analysis of the survey multi-layer external walls of multi-storey frame buildings]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*. 2010. No. 6. Pp. 21–26. (rus)
27. Motuziene V., Valancius K., Rynkun G. Complex Analysis of Energy Efficiency of public buildings: case study of VGTU. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 2. Pp. 9–17.
28. Thorsell T., Bomberg M. Integrated methodology for evaluation of energy performance of the building enclosures: part 3 - uncertainty of thermal measurements. *Journal of Building Physics*. 2011. Vol. 35. Pp. 83–96.
29. Miranville F., Fakra A. H., Gnichard S., Boyer H., Praene P., Bigot D. Evaluation of the thermal resistance of a roof-mounted multi-reflective radiant barrier for tropical and humid conditions: Experimental study from field measurements. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 48. Pp. 79–90.
30. Maref W., Bossche N. Van Den, Armstrong M., Lacasse M.A., Elmahdy H., Glazer R. Condensation risk assessment on box windows: the effect of the window-wall interface. *Journal of Building Physics*. 2012. Vol. 36. Pp. 35–56.
31. Barrios G., Huelsz G., Rechtman R., Rojas J. Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. No 1. Pp. 219–223.

Денис Геннадьевич Портнягин,
+7(923)2181812; эл. почта: my4455@yandex.ru

Denis Portnyagin,
+7(923)2181812; my4455@yandex.ru

© Портнягин Д.Г., 2015

doi: 10.5862/MCE.60.8

Диаграммный метод описания процесса нестационарной теплопередачи A diagram method of describing the process of non-stationary heat transfer

Канд. техн. наук, доцент А.С. Горшков,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, г. Санкт-
Петербург, Россия
**канд. физ.-мат. наук, профессор П.П.
Рымкевич,**
Военно-космическая академия имени
А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

A.S. Gorshkov,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic
University, Saint Petersburg, Russia
P.P. Rymkevich,
Military Space Academy named after
A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, Russia

Ключевые слова: здания; строительство;
отопление; тепловой поток; теплопередача;
термическое сопротивление;
теплоустойчивость; энергосбережение;
энергетическая эффективность

Key words: buildings; construction; building
envelope; heat flow rate; heat transfer; thermal
resistance; heat resistance; thermal stability;
energy saving; energy efficiency

Аннотация. В реальных условиях эксплуатации режим теплопередачи через наружные ограждения всегда оказывается нестационарным. Однако на практике в большинстве случаев рассматривается стационарный режим теплопередачи, характеризующийся постоянством во времени величины теплового потока и температуры ограждения. При рассмотрении стационарного режима значительно упрощаются уравнения, что делает их практичными при разработке инженерных методик расчета. Задачи нестационарной теплопередачи также находят практическое применение. Однако для решения ряда задач нестационарной теплопроводности и тепловой устойчивости существующие методы и методики имеют ряд существенных неудобств. Авторами предложен метод решения задач нестационарной теплопередачи, основанный на вероятностных методах общей теории переноса. Рассмотрен перенос тепла через плоскую ограждающую конструкцию, состоящую из нескольких последовательно расположенных слоев. Показано, как влияет порядок расположения слоев в составе многослойной ограждающей конструкции на ее теплоустойчивость. Получено уравнение для определения разности средних времен прохождения теплового потока через ограждающую конструкцию при различной последовательности расположения слоев.

Abstract. Heat transfer through the exterior building envelope in real operating conditions is always unsteady. However, in practice, in most cases, steady-state heat transfer is discussed, characterized by the time-constant magnitude of the heat flow rate and temperatures. The steady-state heat transfer equations are greatly simplified. This makes it practical for developing engineering calculation methods. Modes of non-stationary heat transfer also find practical application. However, these methods have a number of problems. The authors proposed a method for solving the modes of unsteady heat transfer, based on probabilistic methods of the general theory of transference. The paper considers the heat flow rate through a flat building envelope consisting of several successive layers. We showed how the order of the layers in the composition of the multi-layer building envelope affects its thermal stability. We obtained an equation for determining the difference between the average times of passage of heat flow through the building envelope at various layers of disposition.

Введение

В реальных условиях эксплуатации наружные ограждающие конструкции неизменно подвергаются температурным, ветровым и влажностным воздействиям климатического, эксплуатационного и технологического происхождения. В результате режим теплопередачи через наружные ограждения всегда оказывается нестационарным [1]. Однако для подавляющего большинства практических задач строительной теплофизики рассматривается стационарный

режим теплопередачи, характеризующийся постоянством во времени величины теплового потока и температуры ограждения [2]. В естественных условиях квазистационарный режим теплопередачи может устанавливаться только в очень короткие временные интервалы. Удобство стационарного режима заключается в том, что при его рассмотрении значительно упрощаются все теплотехнические расчеты, которые находят применение в практике проектирования и расчета наружных ограждающих конструкций.

Задачи нестационарной теплопередачи также находят практическое применение. В частности, они рассматриваются в задачах о нагревании и охлаждении тел, затухании температурных колебаний в ограждениях, в методах расчета теплоустойчивости ограждений, теплоусвоении поверхности полов и некоторых других [1–8]. Но их использование в практических расчетах ограничено.

Методы описания процессов теплопередачи достаточно хорошо известны [1–4]. Тем не менее, для решения ряда задач нестационарной теплопроводности и тепловой устойчивости существующие методы и методики имеют ряд существенных неудобств.

Прежде всего, при наличии нескольких слоев в составе ограждающих конструкций, широко используемых при проектировании в настоящее время, для определения полей температур на каждой границе соответствующего слоя возникает необходимость сращивать решения, что приводит к излишнему усложнению расчетов. При этом непосредственный вклад каждого слоя далеко не очевиден. Имеют место также известные проблемы с заданием граничных условий. Кроме прочего, выводы некоторых формул при решении задач нестационарной теплопередачи настолько масштабны, что их использование для инженерных расчетов затруднительно.

В настоящем исследовании авторами предложен метод решения задач нестационарной теплопередачи, основанный на вероятностных методах общей теории переноса [9–11]. В работе рассмотрен перенос тепла через плоскую ограждающую конструкцию, состоящую из нескольких последовательно расположенных слоев. Таким образом, задача рассмотрена применительно к конструктивным решениям, наиболее распространенным в современных условиях строительства.

Поиск оптимальных решений при рассмотрении задач нестационарной теплопередачи является актуальным при создании инженерных методик расчета теплового режима зданий. Трансмиссионные потери тепла через наружные ограждения современных зданий остаются наиболее существенными в суммарном балансе потерь тепловой энергии на отопление. Таким образом, решение рассматриваемых в работе задач непосредственно связано с энергосбережением и повышением энергетической эффективности эксплуатируемых зданий. Вопросы энергосбережения наиболее полно рассмотрены в работах [12–47], в том числе с учетом нестационарных режимов эксплуатации ограждающих конструкций [48, 49]. Данная работа является продолжением этого ряда исследований.

Описание метода

Процесс передачи тепла с позиций современной физики можно рассматривать как диффузию аддитивного скалярного свойства – тепловой энергии. Пусть теплоперенос осуществляется вдоль некоторой оси Ox . Так как тепловая энергия распространяется как по направлению оси Ox , так и против нее, то в качестве локальной характеристики целесообразно ввести соответствующие плотности токов тепла $q_{\leftrightarrow} x, t$, которые можно рассматривать как векторы в двумерном пространстве $q_{\rightarrow}; q_{\leftarrow}$. В качестве одной из локальных характеристик среды можно ввести скорость распространения тепла c_x , которую в большинстве случаев можно принять за скорость звука.

Очевидно, что плотность тока тепла – $q(x, t) = q_{\rightarrow}(x, t) - q_{\leftarrow}(x, t)$. Переносимую часть внутренней энергии можно трактовать как неравновесный фоновый газ, диффундирующий в общем случае по разным механизмам. Плотность переносимой части энергии $U(x, t) = 1/c \cdot [q_{\rightarrow}(x, t) - q_{\leftarrow}(x, t)]$. При этом можно принять, что $U = c_v \rho T$, где c_v – удельная теплоемкость, ρ – локальная плотность среды, $T(x, t)$ – искомое поле температур ($dU = c_v \rho dT$).

С общих позиций теории переноса распространение данного аддитивного свойства определяется не только им самим, но и свойствами одномерного пространства, которое будем называть средой. Характеристики среды могут как определяться распределением других свойств, например, влагопереноса, механических нагрузок и т. д., так и зависеть от распределения самого изучаемого свойства (тепловой энергии) – в общем случае нелинейно.

Рассмотрим отрезок оси $Ox - [x_1; x_2]$, который будем называть слоем среды. Положим, что на слой $[x_1; x_2]$ «падает» ток $q_0(x_1 - 0, t)$. Сначала рассмотрим случай, когда $q_0 = \delta(t' - t)$, где t' – текущее время, t – фиксированный момент времени. Введем следующие характеристики слоя среды:

- коэффициент прохождения $\Lambda(t, x_1 | x_2, \tau) = q_{\rightarrow}(x_2 - 0, t + \tau)$ – плотность тока тепла, прошедшего слой $(x_1; x_2)$ за время τ ; при этом будем считать, что за границами слоя $[x_1; x_2]$ стоят полностью поглощающие тепло экраны;
- коэффициент отражения $P(t, x_1 | x_2, \tau) = q_{\leftarrow}(x_1 + 0, t + \tau)$ – плотность тока тепла, отразившегося от слоя $(x_1; x_2)$ за время τ ; то есть первое отражение без пересечения границ $x = x_1$ и $x = x_2$ ранее;
- коэффициент поглощения $R(t, x_1 | x_2, \tau)$ – ток тепла, поглощающийся (рождающийся) в слое $(x_1; x_2)$ в момент $(t + \tau)$.

Введенные коэффициенты и сами токи $q_{\leftrightarrow}$ будем считать комплексными числами (в многоканальной теории коэффициенты Λ, P, R будут представлять собой квадратные матрицы). Введенный выше коэффициент поглощения R не означает, что в среде имеются постоянно действующие источники (стоки) тепла – под этим понятием будем подразумевать образование тепловой энергии U в момент $t > t_0$, если до этого оно отсутствовало, а промежуток полностью ограничен экранами. Введение свойств поглощающего, отражающего, полупрозрачного экранов имеют простой смысл и служат лишь способом наглядного описания.

Все сказанное выше будем изображать диаграммой (рис. 1).

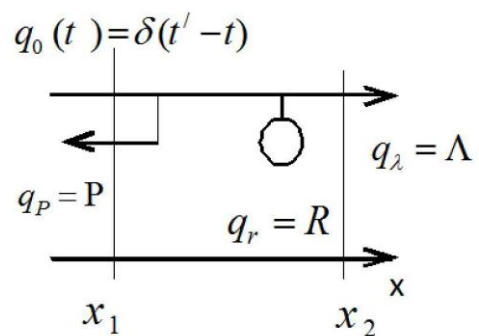


Рисунок 1. Характеристики слоя среды

Все коэффициенты (распределения) Λ, P, R полагаются равными нулю для $\tau < 0$ (принцип причинности). Для распределений Λ, P, R можно составить рекуррентные соотношения – аналог уравнений Колмогорова – Смолуховского – Чепмена.

В самом общем случае на языке кольца $R_{\otimes}$ [4] эти соотношения имеют вид:

$$\begin{aligned} \Lambda(x_1 | x_3) &= \Lambda(x_1 | x_2) \otimes [\delta - P(x_2 | x_3) \otimes P(x_2 | x_1)]^{\otimes -1} \otimes \Lambda(x_2 | x_3), \\ P(x_1 | x_3) &= P(x_1 | x_2) + \Lambda(x_1 | x_2) \otimes [\delta - P(x_2 | x_3) \otimes P(x_2 | x_1)]^{\otimes -1} \otimes P(x_2 | x_3) \otimes \Lambda(x_2 | x_1), \\ R(x_1 | x_3) &= R(x_1 | x_2) + \Lambda(x_1 | x_2) \otimes [\delta - P(x_2 | x_3) \otimes P(x_2 | x_1)]^{\otimes -1} \otimes \\ &\otimes [P(x_2 | x_3) \otimes R(x_2 | x_1) + R(x_2 | x_3)]. \end{aligned} \quad (1)$$

Далее везде, где это не будет вызывать недоразумений, переменные t и τ (S и t) будут опущены.

На диаграммах представленные выше соотношения показаны на рисунке 2.

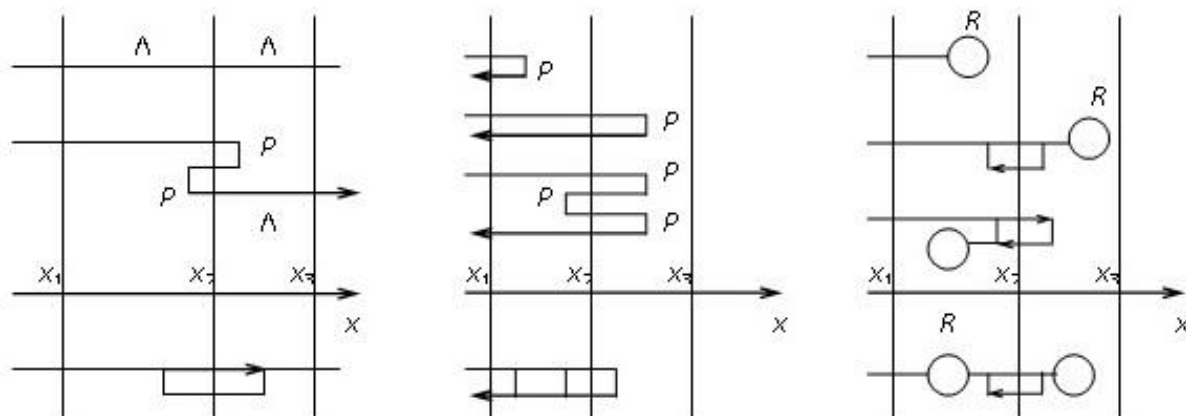


Рисунок 2. Диаграммное представление соотношения (1)

Символ  на рисунке 2 означает многократное пересечение мысленной границы $x = x_2$ и учитывается в уравнении (1) множителем $[\delta - P(x_2 | x_3) \bar{\otimes} P(x_2 | x_1)]^{\bar{\otimes}-1}$, определяемым соответствующим рядом.

Математический аппарат основан на некоммутативном умножении и более подробно представлен в [4]. Для пояснения введенных символов рассмотрим множество функций $C_{t,\tau}$ двух действительных переменных t и τ , определенных и кусочно-непрерывных для $\tau \geq 0$ и аналитических по переменной $t \in (-\infty; +\infty)$. Пусть $a(t, \tau), b(t, \tau), c(t, \tau) \in C_{t,\tau}$. Определим произведение функций так:

$$c(t, \tau) = a(t, \tau) \bar{\otimes} b(t, \tau) \stackrel{\text{Def}}{=} \int_0^\tau a(t, \tau_1) b(t + \tau_1, \tau - \tau_1) d\tau_1. \quad (2)$$

Обозначим $R_{\bar{\otimes}}$ кольцо функций $C_{t,\tau}$ с естественным определенным сложением и умножением в смысле (2).

Рассмотрим упорядоченную последовательность функций $a, b, c, \dots \in R_{\bar{\otimes}}$. В некоторых задачах $a(t, \tau)$ можно интерпретировать как функцию распределения некоего события A , начавшегося в момент времени t и распределенного по длительности события $\tau \geq 0$. В этом случае указанную выше последовательность функций будем называть процессом, состоящим из последовательного выполнения событий $A, B, C, \dots$. Необходимость использования кольца $R_{\bar{\otimes}}$ означает, что большинство окружающих нас явлений природы есть некоторые упорядоченные цепи тех или иных событий.

В простейшем случае, если $a, b, c, \dots$ не зависят явно от переменной t , – например, времени начала события – то интеграл (2) представляет собой обычную свертку функций (умножение в смысле Микусинского), то есть $c(\tau) = a(\tau) * b(\tau)$. Таким образом, $R_* \subset R_{\bar{\otimes}}$. Для описания конкретных процессов удобнее использовать не само кольцо $R_{\bar{\otimes}}$, а кольцо $R_{\otimes}$. Изоморфизм между кольцами $R_{\bar{\otimes}}$ и $R_{\otimes}$ устанавливается с помощью преобразования Лапласа:

$$A(t, S) = \int_0^\infty a(t, \tau) e^{-S\tau} d\tau,$$

где $A(t, S)$ – аналитическая функция по обоим переменным (действительной t и комплексной S).

Определим произведение функций $A(t, S) \otimes B(t, S) = C(t, S); A, B, C \in R_{\otimes}$, описывающих мультипликативную полугруппу кольца $R_{\otimes}$, так:

$$C(t, S) \stackrel{\text{Def}}{=} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \cdot \frac{\partial^n A(t, S)}{\partial S^n} \cdot \frac{\partial^n B(t, S)}{\partial t^n} = A(t, S) \otimes B(t, S). \quad (3)$$

Ассоциативность кольца $R_{\otimes}$ следует из ассоциативности кольца $R_{\otimes}$. Умножение в смысле (3) связано со сложением законами дистрибутивности. $R_{\otimes}$ – кольцо с единицей, причем его единицей является функция $E(t, s) \equiv 1$.

Физический смысл уравнений (1) рассмотрим на примере первого уравнения этой системы. Событие – прохождение носителя тепла (фонона) через слой $[x_1; x_3]$ – возможно только при пересечении мысленной границы $x = x_2$ нечетное число раз. Иными словами, согласно теоремам о сложении и умножении вероятностей для распределений, имеем:

$$\begin{aligned} \Lambda(t, x_1 | x_2, \tau) &= \int_0^{\tau} \Lambda(t, x_1 | x_2, \tau_1) \cdot \Lambda(t + \tau_1, x_2 | x_3, \tau - \tau_1) d\tau_1 + \\ &+ \Lambda \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_2 \right) \otimes P \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_3 \right) \otimes P \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_1 \right) \otimes \Lambda \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_3 \right) \otimes \dots = \\ &= \Lambda \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_2 \right) \otimes \left[1 - P \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_3 \right) \otimes P \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_1 \right) \right]^{-1} \otimes \Lambda \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_3 \right). \end{aligned}$$

Вместо распределений Λ, P, R целесообразно сразу использовать их Лаплас-образы (Фурье-образы), а именно $\bar{\Lambda}, \bar{P}, \bar{R}$. При этом вместо символа $\otimes$ необходимо использовать умножение $\otimes$ в смысле (3). Переход от одних колец к другим в теории переноса формулируется в виде «нестационарного принципа».

Суть его сводится к следующему. Пусть некоторая аддитивная величина M , не имеющая структуры, описывается коэффициентами $\bar{\Lambda}, \bar{P}, \bar{R}$, а со структурой – аналогичными элементами $\tilde{\Lambda}, \tilde{P}, \tilde{R}$, при этом $\tilde{\Lambda}, \tilde{P}, \tilde{R}$ принадлежат более сложному кольцу $R_{\circ}$. Тогда переход от описания распространения свойства M к описанию распространения свойства $\tilde{M}$ сводится к замене операции $\otimes$ на операцию умножения $\circ$ и замене 1 на единицу кольца $R_{\circ}$ без изменения вида уравнений. Иными словами, и для многоканального случая справедлива система (1) с соответствующей заменой символов. Соответственно, в общем случае система (1) примет вид:

$$\begin{aligned} \bar{\Lambda}(x_1, t | x_3, S) &= \bar{\Lambda}(x_1 | x_2) \otimes [I - \bar{P}(x_2 | x_3) \otimes \bar{P}(x_2 | x_1)]^{\otimes-1} \otimes \tilde{\Lambda} \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_3 \right) \\ \bar{P} \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_3, S \right) &= \bar{P} \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_2 \right) \otimes \bar{\Lambda}(x_1 | x_2) \otimes [I - \bar{P}(x_2 | x_3) \otimes \bar{P}(x_2 | x_1)]^{\otimes-1} \otimes \bar{P}(x_2 | x_3) \otimes \Lambda \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_1 \right) \\ \bar{R} \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_3, S \right) &= \bar{R} \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_2 \right) \otimes \bar{\Lambda}(x_1 | x_2) \otimes [I - \bar{P}(x_2 | x_3) \otimes \bar{P}(x_2 | x_1)]^{\otimes-1} \otimes \\ &\otimes [\bar{P}(x_2 | x_3) \otimes \bar{R}(x_2 | x_1) + \bar{R} \left(\begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \middle| x_3 \right)] \end{aligned} \quad (4)$$

Соотношения (4) позволяют последовательно определить свойства системы слоев, зная свойства каждого слоя, то есть дают конструктивный путь решения задач переноса тепла.

Некоммутативность колец $R_{\otimes}$ и $R_{\circ}$ существенна для сильно нестационарных процессов, когда за среднее время прохождения тепла меняются свойства среды, то есть «блуждающий» фонон каждый раз попадает в новую среду. Если же все коэффициенты не зависят от времени t явно или этой зависимостью можно пренебречь, то умножение « $\otimes$ » представляет собой обычное умножение, то есть

$$\begin{aligned}
\bar{\Lambda}(x_1|x_3, S) &= \frac{\bar{\Lambda}(x_1|x_2) \bar{\Lambda}(x_2|x_3)}{1 - \bar{P}(x_2|x_3) \bar{P}(x_2|x_1)} \\
\bar{P}(x_1|x_3, S) &= \bar{P}(x_1|x_2) + \frac{\bar{\Lambda}(x_1|x_2) \bar{\Lambda}(x_2|x_1) \bar{P}(x_2|x_3)}{1 - \bar{P}(x_2|x_3) \bar{P}(x_2|x_1)} \\
\bar{R}(x_1|x_3, S) &= \bar{R}(x_1|x_2) + \frac{\bar{\Lambda}(x_1|x_2) \bar{P}(x_2|x_3) \bar{R}(x_2|x_1) + \bar{R}(x_2|x_3)}{1 - \bar{P}(x_2|x_3) \bar{P}(x_2|x_1)}
\end{aligned} \quad (5)$$

Некоммутативность существенна и в тех случаях, когда среда неоднородна, или в ее слое имеются включения. В этом случае надо ввести понятие канала распространения, и все коэффициенты $\bar{\Lambda}, \bar{P}, \bar{R}$ представляют собой квадратные матрицы. В реальности закон Фурье является достаточно приближенным и хорошо выполняется только для стационарного случая. Это объясняется тем, что передача тепла даже в однородной среде идет не по одному механизму – существуют также внутренние каналы передачи тепла [4]. Для большинства инженерных расчетов все эти «тонкости» могут не учитываться, и допустимо пользоваться соотношениями (5).

Диаграммный метод позволяет установить корреляции между плотностями энергии, то есть температурой, и токами тепла в различных точках пространства. Рассмотрим двухточечное тождество для потоков тепла. Пусть при $x = x_1$ известны токи тепла $q_{1\leftrightarrow}(S)$. Определим их в произвольной точке x_2 (для определенности положим $x_2 > x_1$, см. рис. 3).

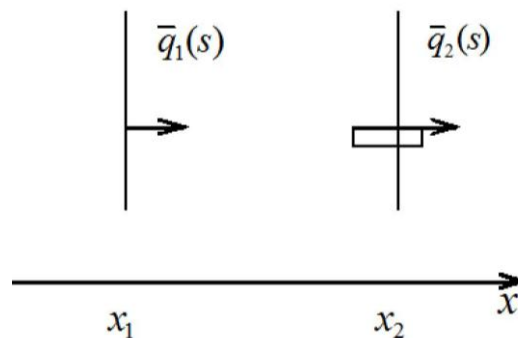


Рисунок 3. Диаграмма для определения токов тепла в произвольной точке

Используя метод диаграмм, сразу получим:

$$\begin{aligned}
\bar{q}_{\rightarrow}(x_2 | S) &= [\bar{q}_{1\rightarrow} + \bar{q}_{1\leftarrow} \otimes \bar{P}(x_1 | -\infty)] \otimes [I - \bar{P}(x_1 | +\infty) \otimes \bar{P}(x_1 | -\infty)]^{\otimes-1} \otimes \\
&\otimes \bar{\Lambda}(x_1 | x_2) \otimes [I - \bar{P}(x_2 | +\infty) \otimes \bar{P}(x_2 | x_1)]^{\otimes-1}, \\
\bar{q}_{\leftarrow}(x_2 | S) &= \bar{q}_{\rightarrow}(x_2 | S) \otimes \bar{P}(x_2 | +\infty).
\end{aligned} \quad (6)$$

Аналогично несложно выразить токи q_1 через q_2 . В частности, при $x_2 = x_1 = x$ получим верное тождество, связывающее $\bar{\Lambda}$ и $\bar{P}$ между собой. В общем случае, разбивая некоторый слой различными способами, можно получить полезные результаты, иногда значительно упрощающие решения конкретных задач. Таким образом, токи свойства в одной точке одномерного пространства полностью определяют токи свойства и для всех остальных точек. Метод учета многократного пересечения границ можно обобщить и на трехмерный случай [4].

Для непрерывного пространства целесообразно рассмотреть бесконечно тонкий слой dx . Поскольку $\bar{\Lambda}(x|x) \equiv 1, \bar{P}(x|x) = \bar{R}(x|x) \equiv 0$, если нет сингулярностей (имеющиеся сингулярности будем называть экранами). Разлагая $\bar{P}(x|x \pm dx)$ и $\bar{R}(x|x \pm dx)$ $dx > 0$ в ряд и оставляя первые члены разложения, будем иметь:

$$\begin{aligned}
\bar{P}(x | x \pm dx) &= a(x, t) dx + 0(dx) \\
\bar{R}(x | x \pm dx) &= \chi(x, t) dx + 0(dx)
\end{aligned}$$

где $a(x, t)$ и $\chi(x, t)$ будем называть показателями отражения и поглощения соответственно.

Таким образом, a и χ – суть локальные характеристики среды по отношению к распространению тепла.

Введем понятие среднего времени прохождения тепла слоем Δx так:

$$t_{\lambda}(\Delta x) \stackrel{Def}{=} - \frac{\partial}{\partial S} [\ln \bar{\Lambda}(x | x + \Delta x)] \Big|_{S=0}. \quad (7)$$

Иногда удобно пользоваться и соответствующими средними временами отражения и поглощения, определенными аналогичным образом:

$$\begin{aligned} t_p(\Delta x) &= - \frac{\partial}{\partial S} \ln [\bar{P}(x | x + \Delta x)] \Big|_{S=0}, \\ t_r(\Delta x) &= - \frac{\partial}{\partial S} \ln [\bar{R}(x | x + \Delta x)] \Big|_{S=0}. \end{aligned} \quad (8)$$

Скоростью свойства M в точке x в момент времени t в направлении оси Ox будем называть предел средней скорости, если он существует, при толщине слоя $\Delta x \rightarrow 0$.

$$c(t, x) \stackrel{Def}{=} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{t_{\lambda}(\Delta x)} = - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Lambda'_{S=0}(t, x | x + \Delta x, S)}. \quad (9)$$

В силу этого,

$$\bar{\Lambda}(t, x | x + dx, S) = 1 - \left[\frac{S}{c(x, t)} + a(x, t) + \chi(x, t) \right] dx. \quad (10)$$

Величину $\theta(x, t) = a(x, t) + \chi(x, t)$ будем называть показателем диссипации. Этот результат справедлив и для многоканального случая, l в этом случае – единица соответствующей алгебры.

Остановимся на введенном понятии скорости. Обратим внимание, что для многоканального свойства существует $2N$ скоростей, где N – число каналов распространения. При этом понятие скорости отличается от аналогичного понятия классической механики: рассматривается не скорость перемещения материальной точки, а средняя скорость прохождения между двумя фиксированными точками.

Аналогично понятию скорости можно ввести понятие ускорения прохождения теплом слоя Δx . Среднее ускорение определим по аналогии со скоростью так:

$$\langle w(t, \Delta x) \rangle \stackrel{Def}{=} \frac{c(x + \Delta x, t) - c(x, t)}{t_{\lambda}(\Delta x)} = \frac{c(x + \Delta x, t) - c(x, t)}{\Delta x} \cdot \langle v(t, x) \rangle. \quad (11)$$

Ускорением передачи тепла в точке x в направлении оси Ox в момент времени t будем называть предел среднего ускорения, если он существует, при толщине слоя $\Delta x \rightarrow 0$.

$$w(x, t) = c(t, x) \cdot \frac{\partial c(t, x)}{\partial x} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} c^2(t, x). \quad (12)$$

Введенные понятия скорости и ускорения позволяют приближенно оценивать температурные поля, используя механическую аналогию.

Для случая непрерывного пространства в уравнении (4) целесообразно перейти к бесконечно тонкому слою, то есть получить локальные уравнения для коэффициентов $\bar{\Lambda}, \bar{P}, \bar{R}$. Сделав предельный переход, получим:

$$\begin{aligned}
\bar{\Lambda}'_{x_1}(x_1|x_2) &= [S(x_1, t) - \bar{P}(x_1|x_2) \otimes a(x_1, t)] \otimes \bar{\Lambda}(x_1|x_2), \\
\bar{\Lambda}'_{x_2}(x_1|x_2) &= \bar{\Lambda}(x_1|x_2) \otimes [a(x_2, t) \otimes \bar{P}(x_2|x_1) - S(x_2, t)], \\
\bar{\Lambda}'_{x_1}(x_2|x_1) &= \bar{\Lambda}(x_2|x_1) \otimes [S'(x_1, t) - a(x_1, t) \otimes \bar{P}(x_1|x_2)], \\
\bar{\Lambda}'_{x_2}(x_2|x_1) &= [\bar{P}(x_2|x_1) \otimes a(x_2, t) - S(x_2, t)] \otimes \bar{\Lambda}(x_2|x_1), \\
\bar{P}'_{x_1}(x_1|x_2) &= [S(x_1, t) \otimes \bar{P}(x_1|x_2) + \bar{P}(x_1|x_2) \otimes S(x_1, t)] - a(x_1, t) - \\
&\quad - P(x_1|x_2) \otimes a(x_1, t) \otimes \bar{P}(x_1|x_2), \\
\bar{P}'_{x_2}(x_1|x_2) &= \bar{\Lambda}(x_1|x_2) \otimes a(x_2, t) \otimes \bar{\Lambda}(x_2|x_1), \\
\bar{P}'_{x_1}(x_2|x_1) &= -\bar{\Lambda}(x_2|x_1) \otimes a(x_1, t) \otimes \bar{\Lambda}(x_1|x_2), \\
\bar{P}'_{x_2}(x_2|x_1) &= a(x_2, t) + \bar{P}(x_2|x_1) \otimes a(x_2, t) \otimes \bar{P}(x_2|x_1) - \\
&\quad - [\bar{P}(x_1|x_2) \otimes S(x_2, t) + S(x_2, t) \otimes \bar{P}(x_2|x_1)], \\
\bar{R}'_{x_1}(x_1|x_2) &= [S(x_1, t) - \bar{P}(x_1|x_2) \otimes a(x_1, t)] \otimes \bar{R}(x_1|x_2) - \\
&\quad - P(x_1|x_2) \otimes \chi(x_1, t) - \chi(x_1, t), \\
\bar{R}'_{x_2}(x_1|x_2) &= \bar{\Lambda}(x_1|x_2) \otimes [a(x_2, t) \otimes \bar{R}(x_2|x_1) + \chi(x_2, t)], \\
\bar{R}'_{x_1}(x_2|x_1) &= -\bar{\Lambda}(x_2|x_1) \otimes [a(x_1, t) \otimes \bar{R}(x_1|x_2) + \chi(x_1, t)], \\
\bar{R}'_{x_2}(x_2|x_1) &= \chi(x_2, t) + \bar{P}(x_2|x_1) \otimes \chi(x_2, t) - \\
&\quad - [S(x_2, t) - \bar{P}(x_2|x_1) \otimes a(x_2, t)] \otimes \bar{R}(x_2|x_1), \\
x_2 &\geq x_1.
\end{aligned} \tag{13}$$

С граничными условиями вида:

$$\begin{aligned}
\bar{P}(x_1|x_1) &= \bar{P}(x_2|x_2) = 0, \\
\bar{R}(x_1|x_1) &= \bar{R}(x_2|x_2) = 0, \\
\bar{\Lambda}(x_1|x_1) &= \bar{\Lambda}(x_2|x_2) = I.
\end{aligned} \tag{14}$$

Система уравнений (13) полностью определяет коэффициенты $\bar{\Lambda}, \bar{P}, \bar{R}$, если известны локальные свойства среды. Из системы (13) видно, что $\bar{R}$ и $\bar{\Lambda}$ легко выражаются через $\bar{P}$. Само же $\bar{P}(x_1|x_2)$ определяется из пятого и восьмого уравнений соответственно.

Для однородной симметричной среды в одноканальном случае $\bar{\Lambda}, \bar{P}, \bar{R}$ имеют простой вид:

$$\begin{aligned}
\bar{\Lambda}(z, S) &= \frac{2\mu(S - \mu)e^{-\mu z}}{a^2 - (S - \mu)^2 e^{-2\mu z}}, \\
\bar{P}(z, S) &= \frac{a(S - \mu)[1 - e^{-2\mu z}]}{a^2 - (S - \mu)^2 e^{-2\mu z}}, \\
\bar{R}(z, S) &= \frac{\sqrt{2}\chi\sqrt{S - \mu}}{\sqrt{S - a}} \cdot \frac{[1 - e^{-\mu z}]}{[a + (S - \mu)e^{-\mu z}]}.
\end{aligned} \tag{15}$$

Здесь введены обозначения: $z = x_2 - x_1$, $\mu = \sqrt{S^2 - a^2}$.

В отсутствие поглощения ($\chi = 0$) стационарные прозрачность и коэффициент отражения тепла имеют вид:

Gorshkov A.S., Rymkevich P.P. A diagram method of describing the process of non-stationary heat transfer

$$\begin{aligned}\lambda z &= \lim_{s \rightarrow 0} \bar{\lambda} z = \frac{1}{1 + a z} \\ p z &= \lim_{s \rightarrow 0} \bar{p} z = \frac{a z}{1 + a z}\end{aligned}\quad (16)$$

Очевидно, что $\lambda z + p z = 1$.

На практике $az \gg 1$, за исключением нанослоев. Откуда

$$\lambda z = \frac{1}{a z} = \frac{c}{2 a c z} \frac{\lambda}{c z} = \frac{2 a_T}{c z} = \frac{2 \lambda}{c C \rho z} = \frac{2}{c C \rho R}, \quad (17)$$

где $\lambda = c_v \rho \frac{c}{2 a}$ – теплопроводность среды;

$a_T = \frac{\lambda}{c_v \rho} = \frac{c}{2 a}$ – коэффициент диффузии тепла (коэффициент температуропроводности);

C – теплоемкость;

ρ – локальная плотность среды;

R – термическое сопротивление слоя среды.

Из системы (13) и (6) для одноканального случая распространения тепла следует:

$$\begin{aligned}\frac{1}{c} \frac{\partial q_{\rightarrow}}{\partial t} + \frac{\partial q_{\rightarrow}}{\partial x} + q_{\rightarrow} \Theta_{t,x} - q_{\leftarrow} a_{t,x} &= 0 \\ \frac{1}{c} \frac{\partial q_{\leftarrow}}{\partial t} - \frac{\partial q_{\leftarrow}}{\partial x} + q_{\leftarrow} \Theta_{t,x} - q_{\rightarrow} a_{t,x} &= 0\end{aligned}\quad (18)$$

Нетрудно убедиться, что уравнения (18) представляют собой уравнения непрерывности для одноканальных токов $q_{\leftrightarrow, x, t}$. Иными словами, скорость изменения плотности энергии определяется токовым слагаемым $\partial q_{\rightarrow} / \partial x$, количеством ушедшей энергии $\Theta q_{\rightarrow}$ за счет релаксации и поглощения (возможные фазовые переходы и химические реакции) и энергии, пришедшей за счет рассеяния тока $q_{\leftarrow}$. Аналогично трактуется и второе уравнение. Этот результат следовало ожидать с самого начала исследования, так как только из аддитивного свойства энергии ничего иного кроме уравнения баланса не получить. Складывая и вычитая почленно уравнения (18) в отсутствие поглощения получим уравнения в более привычном виде:

$$\begin{aligned}c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} &= 0 \\ \frac{1}{c} \frac{\partial q}{\partial t} + c c_v \rho \frac{\partial T}{\partial x} + 2 a q &= 0\end{aligned}\quad (19)$$

Здесь $\tau = \frac{1}{2 a c} = \frac{a_T}{c^2}$ – время релаксации.

Переход на трехмерный случай можно произвести, рассматривая задачу как многоканальную (3 канала распространения тепла). Данный подход приводит к гиперболическому уравнению теплопроводности, то есть к закону Фурье с учетом запаздывания.

$$\begin{aligned}
 \tau \frac{\partial \vec{q}}{\partial t} + \vec{q} &= -\lambda \vec{\nabla} T \\
 c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{q} &= 0 \\
 \tau \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\partial T}{\partial t} &= \operatorname{div} \left[\tau \operatorname{grad} T \right]
 \end{aligned}
 \quad (20)$$

В реальных процессах время релаксации мало, поэтому обычно его можно положить в конечных формулах равным нулю.

Практическое применение метода

В качестве примера практического использования предложенного метода расчета рассмотрим прохождение нестационарного теплового потока через многослойную конструкцию, состоящую из трех последовательно расположенных слоев (рис. 4). В рамках данного примера абстрагируемся от конкретных геометрических и теплотехнических характеристик рассматриваемых слоев. Расположим слои в различной последовательности, например 1–2–3 и 1–3–2 (рис. 4а, 4б), и рассмотрим влияние порядка расположения слоев на теплоустойчивость наружного ограждения.

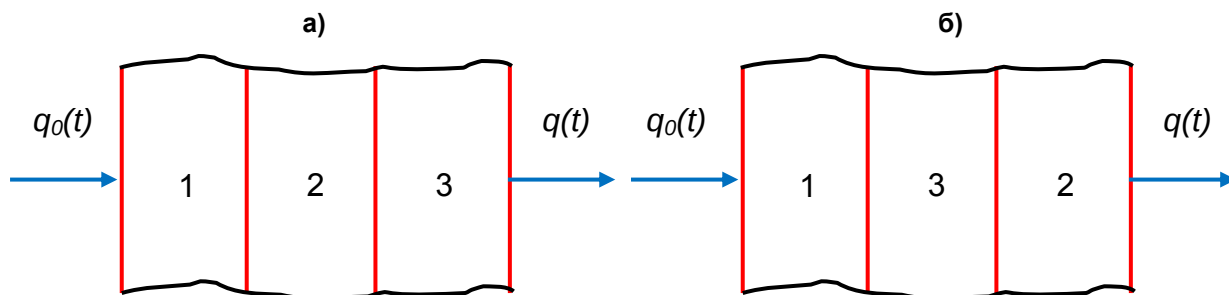


Рисунок 4. Схематическое изображение наружной ограждающей конструкции при расположении слоев в последовательности 1–2–3 (а) и 1–3–2 (б)

Понятно, что сопротивление теплопередаче многослойной ограждающей конструкции не зависит от порядка расположения слоев. Однако нельзя сделать аналогичный вывод применительно к теплоустойчивости рассматриваемого ограждения.

В качестве основной расчетной характеристики примем среднее время прохождения теплового потока через слои в последовательности 1–2–3 (t_{λ} (123)) и 1–3–2 (t_{λ} (132)). Воспользуемся соотношением (5) и определим для рассматриваемых случаев соответствующие коэффициенты прохождения – $\bar{\Lambda}_{123}$, $\bar{\Lambda}_{132}$. Имеем для последовательности 1–2–3:

$$\begin{aligned}
 \bar{\Lambda}_{123} &= \frac{\bar{\Lambda}_1 \bar{\Lambda}_{2,3}}{1 - \bar{P}_1 \bar{P}_{2,3}} = \frac{\bar{\Lambda}_1 \bar{\Lambda}_2 \bar{\Lambda}_3}{\left[1 - \bar{P}_2 \bar{P}_3 \right] \left\{ 1 - \bar{P}_1 \left[\bar{P}_2 + \frac{\bar{P}_3 \bar{\Lambda}_2^2}{\bar{P}_2 \bar{P}_3} \right] \right\}} = \\
 &= \frac{\bar{\Lambda}_1 \bar{\Lambda}_2 \bar{\Lambda}_3}{1 - \bar{P}_2 \bar{P}_3 - \bar{P}_1 \bar{P}_2 + \bar{P}_1 \bar{P}_2^2 \bar{P}_3 - \bar{P}_1 \bar{P}_3 \bar{\Lambda}_2^2}.
 \end{aligned}
 \quad (21)$$

Аналогично для последовательности 1–3–2 получим:

$$\bar{\Lambda}_{132} = \frac{\bar{\Lambda}_1 \bar{\Lambda}_2 \bar{\Lambda}_3}{1 - \bar{P}_2 \bar{P}_3 - \bar{P}_1 \bar{P}_3 + \bar{P}_1 \bar{P}_2^2 \bar{P}_3 - \bar{P}_1 \bar{P}_2 \bar{\Lambda}_2^2}.
 \quad (22)$$

Для того чтобы воспользоваться соотношениями (21) и (22), введем дополнительное тождество. С этой целью рассмотрим систему уравнений (13).

Для однородного слоя толщиной z второе и шестое уравнение системы (13) имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{\Lambda}}{dz} &= a\bar{\Lambda} \left[\bar{P} - \tilde{S} \right]; \\ \frac{d\bar{P}}{dz} &= a\bar{\Lambda}^2.\end{aligned}\quad (23)$$

Здесь $\tilde{S} = \frac{S}{a} = \frac{S}{ac} + 1$, $S = \frac{S}{c} + a$.

Откуда для однородного слоя следует:

$$\frac{d\bar{\Lambda}}{d\bar{P}} = \frac{\bar{P} - \tilde{S}}{\bar{\Lambda}}. \quad (24)$$

Отсюда с учетом граничных условий (14) следует тождество:

$$\bar{\Lambda}^2 - \bar{P}^2 = 1 - 2\tilde{S}\bar{P}. \quad (25)$$

Введем величину $\rho = \frac{\bar{\Lambda}_{123}}{\bar{\Lambda}_{132}}$. Тогда с учетом тождества (25) получим:

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{\left[1 - \bar{P}_2 \bar{P}_3 - \bar{P}_1 \bar{P}_3 + \bar{P}_1 \bar{P}_2 + 2\tilde{S}_3 \bar{P}_3 - 1 \right]}{\left[1 - \bar{P}_2 \bar{P}_3 - \bar{P}_1 \bar{P}_2 + \bar{P}_1 \bar{P}_3 + 2\tilde{S}_2 \bar{P}_2 - 1 \right]} = \\ &= \frac{\left[1 - \bar{P}_2 \bar{P}_3 - \bar{P}_1 \bar{P}_3 - \bar{P}_1 \bar{P}_2 \right] + 2\tilde{S}_3 \bar{P}_1 \bar{P}_2 \bar{P}_3}{\left[1 - \bar{P}_2 \bar{P}_3 - \bar{P}_1 \bar{P}_3 - \bar{P}_1 \bar{P}_2 \right] + 2\tilde{S}_2 \bar{P}_1 \bar{P}_2 \bar{P}_3}.\end{aligned}\quad (26)$$

В стационарном случае при $S' \rightarrow 0$, то есть при $\tilde{S}_2 = \tilde{S}_3 = 1$, следует, что $\rho \equiv 1$. Последнее означает, что термические сопротивления последовательностей слоев равны: $R_{123} = R_{132}$, чего и следовало ожидать.

Определим разность средних времен прохождения теплового потока через слои 1–2–3 и 1–3–2. Для этого воспользуемся соотношением (7). Получим:

$$\tau = t_{\lambda}(123) - t_{\lambda}(132) = -\frac{\partial}{\partial S} \bigg|_{S=0} \left[\ln \bar{\Lambda}(123) - \ln \bar{\Lambda}(132) \right] = -\frac{\partial}{\partial S} \bigg|_{S=0} \rho. \quad (27)$$

Тогда с учетом выражения (16):

$$\tau = \frac{2\bar{P}_1 \bar{P}_2 \bar{P}_3 \left[\frac{1}{a_3 c_3} - \frac{1}{a_2 c_2} \right]}{\left[1 - \bar{P}_2 \bar{P}_3 - \bar{P}_1 \bar{P}_2 - \bar{P}_1 \bar{P}_3 + 2\bar{P}_1 \bar{P}_2 \bar{P}_3 \right]}. \quad (28)$$

Так как в стационарном случае, в отсутствие внешних источников и стоков $\lambda z + p z = 1$, то с учетом выражения (16) имеем:

$$\tau = \frac{2 a_1 z_1 a_2 z_2 a_3 z_3 \left[\frac{1}{a_3 c_3} - \frac{1}{a_2 c_2} \right]}{1 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3}, \quad (29)$$

где a_1, a_2, a_3 – показатели отражения;

z_1, z_2, z_3 – толщины слоев 1, 2 и 3 соответственно.

Для слоя толщиной z термическое сопротивление равно:

$$R = \frac{z}{\lambda} = \frac{2 a z}{c C \rho}, \quad (30)$$

где λ – теплопроводность;

c – скорость звука;

C, ρ – то же, что и в уравнении (17).

Тогда с учетом соотношения (30) выражение (29) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} \tau = & \frac{\left[\frac{C_1 \rho_1 c_1}{2} R_1 \right] \left[\frac{C_2 \rho_2 c_2}{2} R_2 \right] \left[\frac{C_3 \rho_3 c_3}{2} R_3 \right] \left[\frac{\lambda_3}{C_3 \rho_3 c_3^2} - \frac{\lambda_2}{C_2 \rho_2 c_2^2} \right]}{\frac{C_1 \rho_1 c_1}{2} R_1 + \frac{C_2 \rho_2 c_2}{2} R_2 + \frac{C_3 \rho_3 c_3}{2} R_3} = \\ & = \frac{R_2 R_3 \left[\lambda_3 \rho_2 C_2 \frac{c_2}{c_3} - \lambda_2 \rho_3 C_3 \frac{c_3}{c_2} \right]}{4 \left[1 + \frac{C_2 \rho_2 c_2}{C_1 \rho_1 c_1} \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_3 \rho_3 c_3}{C_1 \rho_1 c_1} \frac{R_3}{R_1} \right]}. \end{aligned} \quad (31)$$

Заключение

В реальных условиях эксплуатации режим теплопередачи через наружные ограждения всегда оказывается нестационарным. Однако на практике в большинстве случаев рассматривается стационарный режим теплопередачи, характеризующийся постоянством во времени величины теплового потока и температуры ограждения. При рассмотрении стационарного режима теплопередачи значительно упрощаются уравнения, что делает их практичными при разработке инженерных методик расчета.

Задачи нестационарной теплопередачи также находят практическое применение. Однако для решения ряда задач нестационарной теплопроводности и тепловой устойчивости существующие методы и методики имеют ряд существенных неудобств.

Авторами предложен метод решения задач нестационарной теплопередачи, основанный на вероятностных методах общей теории переноса. В работе рассмотрен перенос тепла через плоскую ограждающую конструкцию, состоящую из нескольких последовательно расположенных слоев. Показано, как влияет порядок расположения слоев в составе многослойной ограждающей конструкции на ее теплоустойчивость. Получено уравнение для определения разности средних времен прохождения теплового потока через ограждающую конструкцию при различной последовательности расположения слоев.

Примеры расчетов применительно для конкретных конструктивных решений будут представлены в последующих публикациях.

Литература

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). СПб.: АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД, 2006. 400 с.
2. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.

References

1. Bogoslovskiy V.N. *Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskiye osnovy otopleniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh)* [Engineering Thermal Physics (thermal bases of heating, ventilation and air conditioning)]. St. Petersburg. AVOK SEVERO-ZAPAD. 2006. 400 p. (rus)
2. Fokin K.F. *Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastei zdaniy* [Thermal heat engineering of building envelope]. Moscow. AVOK-PRESS. 2006. 256 p. (rus)

3. Карслоу Г.С. Теория теплопроводности. М.; Л.: ОГИЗ, 1947. 288 с.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. Минск: Наука, 1964. 488 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
6. Шкловер А.М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. М.: Стройиздат, 1961. 160 с.
7. Юшков П.П. Приближенное решение задач нестационарной теплопроводности методом конечных разностей. Минск: Научн. тр. Институт энергетики АН БССР, 1958. 159 с.
8. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. М.: 2004. 712 с.
9. Рымкевич П.П., Горшков А.С. Модели современного мира в механике, физике и экономике. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 28 с.
10. Рымкевич П.П., Горшков А.С. Теория переноса. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 120 с.
11. Рымкевич П.П., Горшков А.С. Уравнения переноса аддитивных свойств в квантовой механике. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 119 с.
12. Pukhkal V., Murgul V., Garifullin M. Reconstruction of buildings with a superstructure mansard: option to reduce energy intensity of buildings // *Procedia Engineering*. 2015. №117. Pp. 629–632.
13. Pukhkal V., Vatin N., Murgul V. Central ventilation system with heat recovery as one of measures to upgrade energy efficiency of historic buildings // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. №633–634. Pp. 1077–1081.
14. Vatin N., Nemova D., Ibraeva Y., Tarasevskii P. Development of energy-saving measures for the multi-story apartment buildings // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. №725–726. Pp. 1408.
15. Murgul V., Vuksanovic D., Vatin N., Pukhkal V. The use of decentralized ventilation systems with heat recovery in the historical buildings of St. Petersburg // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. №635–637. Pp. 370–376.
16. Murgul V., Vuksanovic D., Vatin N., Pukhkal V. Decentralized ventilation systems with exhaust air heat recovery in the case of residential buildings // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. №680. Pp. 524–528.
17. Aronova E., Radovic G., Murgul V., Vatin N. Solar power opportunities in northern cities (case study of St. Petersburg) // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. №587–589. Pp. 348–354.
18. Lecompte T., Le Bideau P., Glouannec P., Nortershauser D., Le Masson S. Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material // *Energy and buildings*. 2015. №94. Pp. 52–60.
19. Kočí J., Maděra J., Jerman M., Černý R. Computational assessment of thermal performance of contemporary ceramic blocks with complex internal geometry in building envelopes // *Energy and buildings*. 2015. №99. Pp. 61–66.
20. Santos P., Martins C., Simoes da Silva L. Thermal performance of lightweight steel framed wall: the importance of flanking thermal losses // *Journal of Building Physics*. 2014. №38(1). Pp. 81–98.
21. Garay R., Uriarte A., Apraiz I. Performance assessment of thermal bridge elements into a full scale experimental study of a building façade // *Energy and buildings*. 2014. №85. Pp. 579–591.
22. Vasilyev G.P., Lichman V.A., Peskov N.V., Brodach M.M., Tabunshchikov Y.A., Kolesova M.V. Simulation of Heat and Moisture Transfer in a Multiplex Structure. *Energy and Buildings*. 2015. No. 86. Pp. 803–807.
3. Karslou G.S. *Teoriya teploprovodnosti [Heat conductivity theory]*. Moscow; Leningrad. OGIz. 1947. 288 p. (rus)
4. Karslou G., Yeger D. *Teploprovodnost tverdykh tel [heat of solids]*. Minsk. Nauka. 1964. 488 p. (rus)
5. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti [Heat conductivity theory]*. Moscow. Vysshaya shkola. 1967. 600 p. (rus)
6. Shklover A.M. *Teploperedacha pri periodicheskikh teplovykh vozdeystviyakh [Heat transfer at periodic thermal actions]*. Moscow. Stroyizdat. 1961. 160 p. (rus)
7. Yushkov P.P. *Priblizhennoye resheniye zadach nestatsionarnoy teploprovodnosti metodom konechnykh raznostey [Approximate of non-stationary heat conductivity problem solving]*. Minsk. Institut energetiki AN BSSR. 1958. 159 p. (rus)
8. Aleksandrovskiy S.V. *Raschet betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy na izmeneniye temperatury i vlazhnosti s uchetom polzuchesti [Calculation of concrete and reinforced concrete structures on change of temperature and humidity subject to creeping]*. Moscow. 2004. 712 p. (rus)
9. Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. *Modeli sovremennogo mira v mekhanike, fizike i ekonomike [Models of modern world in mechanics, physics and economics]*. St. Petersburg. Izd-vo SPbGPU. 2013. 28 p. (rus)
10. Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. *Teoriya perenosa [Transport theory]*. St. Petersburg. Izd-vo SPbGPU. 2013. 120 p. (rus)
11. Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. *Uravneniya perenosa additivnykh svoystv v kvantovoy mekhanike [Transport equation of additive behavior in quantum mechanics]*. Saarbrücken. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2015. 119 p. (rus)
12. Pukhkal V., Murgul V., Garifullin M. Reconstruction of buildings with a superstructure mansard: option to reduce energy intensity of buildings. *Procedia Engineering*. 2015. No. 117. Pp. 629–632.
13. Pukhkal V., Vatin N., Murgul V. Central ventilation system with heat recovery as one of measures to upgrade energy efficiency of historic buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 633–634. Pp. 1077–1081.
14. Vatin N., Nemova D., Ibraeva Y., Tarasevskii P. Development of energy-saving measures for the multi-story apartment buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. No. 725–726. Pp. 1408.
15. Murgul V., Vuksanovic D., Vatin N., Pukhkal V. The use of decentralized ventilation systems with heat recovery in the historical buildings of St. Petersburg. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 635–637. Pp. 370–376.
16. Murgul V., Vuksanovic D., Vatin N., Pukhkal V. Decentralized ventilation systems with exhaust air heat recovery in the case of residential buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 680. Pp. 524–528.
17. Aronova E., Radovic G., Murgul V., Vatin N. Solar power opportunities in northern cities (case study of St. Petersburg). *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 587–589. Pp. 348–354.
18. Lecompte T., Le Bideau P., Glouannec P., Nortershauser D., Le Masson S. Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material. *Energy and buildings*. 2015. No. 94. Pp. 52–60.
19. Kočí J., Maděra J., Jerman M., Černý R. Computational assessment of thermal performance of contemporary ceramic blocks with complex internal geometry in building envelopes. *Energy and buildings*. 2015. No. 99. Pp. 61–66.
20. Santos P., Martins C., Simoes da Silva L. Thermal performance of lightweight steel framed wall: the importance of flanking thermal losses. *Journal of Building Physics*. 2014. No. 38 (1). Pp. 81–98.
21. Garay R., Uriarte A., Apraiz I. Performance assessment of thermal bridge elements into a full scale experimental study of a building façade. *Energy and buildings*. 2014. No. 85. Pp. 579–591.
22. Vasilyev G.P., Lichman V.A., Peskov N.V., Brodach M.M., Tabunshchikov Y.A., Kolesova M.V. Simulation of Heat and Moisture Transfer in a Multiplex Structure. *Energy and Buildings*. 2015. No. 86. Pp. 803–807.

Горшков А.С., Рымкевич П.П. Диаграммный метод описания процесса нестационарной теплопередачи

- Simulation of Heat and Moisture Transfer in a Multiplex Structure // *Energy and Buildings*. 2015. №86. Pp. 803–807.
23. Ливчак В.И. Повышать ли уровень теплозащиты зданий? Ответ – «да» // *АВОК*. 2009. №7. С. 22–29.
 24. Васильев Г.П., Колесова М.В. Экономически и экологически целесообразный уровень теплозащиты зданий // *Вестник МГСУ*. 2011. №8. С. 293–302.
 25. Ливчак В.И. Европейская тенденция повышения теплозащиты зданий: как она реализуется в России? // *АВОК*. 2011. №6. С. 64–71.
 26. Ливчак В.И. Почему СП 50-13330-2012 «Тепловая защита зданий» приводит к снижению энергоэффективности зданий и как выполнить постановление Правительства России об их повышении // «Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад». 2013. №3. С. 14–24.
 27. Табунщиков Ю.А. В поисках истины // *АВОК*. 2014. №6. С. 4–9.
 28. Ливчак В.И. Базовый уровень потребления энергетических ресурсов при установлении требований энергетической эффективности зданий // «Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад». 2014. №1. С. 34–46.
 29. Matrosov Yu.A., Butovsky I.N., Norfold L.K., Opitz M.W. Standards For Heating Energy Use In Russian Buildings: A Review And A Report Of Recent Progress // *Energy and Buildings*. 1997. Vol. 25. №3. С. 207–222.
 30. Matrosov Y.A., Chao M., Goldstein D.B. Development, Review and Implementation of Buildings Energy Codes in Russia: History, Process and Stakeholder Roles // *Proceedings ACEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. 2000. №9. Pp. 9.275–9.286.
 31. Opitz M.W., Norfold L.K., Matrosov Yu.A., Butovsky I.N. Energy Consumption And Conservation In The Russian Apartment Building Stock // *Energy and Buildings*. 1997. Vol. 25. №1. Pp. 75–92.
 32. Matrosov Yu.A., Butovsky I.N. Concept Of Development Of Building Physics In USSR // *Energy and Buildings*. 1992. Vol. 18. №1992. Pp. 25.
 33. 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. No. 14. Pp. 401.
 34. Matrosov Yu.A., Butovsky I.N. USSR Experience in Thermal Design of Building Envelopes with Improved Thermal Properties // *Energy and Buildings*. 1989. No. 14. Pp. 31.
 35. Drozdov V.A., Matrosov Yu.A., Tabunshchikov Yu.A. The Main Trends In Energy Saving In Buildings – Theory and Practice In USSR // *Energy and Buildings*. 1989. No. 14. Pp. 43.
 36. Корниенко С.В. Учет формы при оценке теплозащиты оболочки здания // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2013. №5 (10). С. 20–27.
 37. Корниенко С.В. Комплексная оценка теплозащиты ограждающих конструкций оболочки здания // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. №7(33). С. 43–49.
 38. 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.
 39. Корниенко С.В. Расчетно-экспериментальный контроль энергосбережения зданий // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №8(43). С. 24–30.
 40. Корниенко С.В. О нормировании тепловой защиты зданий с влажным и мокрым режимами //
 23. Livchak V.I. Povyshat li uroven teplozashchity zdaniy? Otvet – «da» [Is it necessary to raise heat shield level of buildings? The answer is "yes"]. *AVOK*. 2009. No. 7. Pp. 22–29. (rus)
 24. Vasilyev G.P., Kolesova M.V. Ekonomicheski i ekologicheski tselesoobraznyy uroven teplozashchity zdaniy [Economically and environmentally effective buildings level thermal shielding]. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 8. Pp. 293–302. (rus)
 25. Livchak V.I. Yevropeyskaya tendentsiya povysheniya teplozashchity zdaniy: kak ona realizuyetsya v Rossii? [European trend for enhancement of thermal protection of buildings: how is it implemented in Russia?] *AVOK*. 2011. No. 6. Pp. 64–71. (rus)
 26. Livchak V.I. Pochemu SP 50–13330–2012 «Teplovaya zashchita zdaniy» privodit k snizheniyu energoeffektivnosti zdaniy i kak vypolnit postanovleniye Pravitelstva Rossii ob ikh povyshenii [“Heat shielding of buildings” brings to power-efficient fading and how to implement decree of Government of Russia about its rise]. *Inzhenernyye sistemy*. 2013. No 3. Pp. 14–24. (rus)
 27. Tabunshchikov Yu.A. V poiskakh istiny [Searching for the Truth]. *AVOK*. 2014. No. 6. Pp. 4–9. (rus)
 28. Livchak V.I. Bazovyy uroven potrebleniya energeticheskikh resursov pri ustanovlenii trebovaniy energeticheskoy effektivnosti zdaniy [Consumption of power resources base level by installation of requirements of energy effectiveness of buildings]. *Inzhenernyye sistemy. AVOK – Severo-Zapad*. 2014. No. 1. Pp. 34–46. (rus)
 29. Matrosov Yu.A., Butovsky I.N., Norfold L.K., Opitz M.W. Standards For Heating Energy Use In Russian Buildings: A Review And A Report Of Recent Progress. *Energy and Buildings*. 1997. Vol. 25. No. 3. Pp. 207–222.
 30. Matrosov Y.A., Chao M., Goldstein D.B. Development, Review And Implementation Of Buildings Energy Codes In Russia: History, Process And Stakeholder Roles. *Proceedings ACEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. 2000. No. 9. Pp. 9.275–9.286.
 31. Opitz M.W., Norfold L.K., Matrosov Yu.A., Butovsky I.N. Energy Consumption And Conservation In The Russian Apartment Building Stock. *Energy and Buildings*. 1997. Vol. 25. No. 1. Pp. 75–92.
 32. Matrosov Yu.A., Butovsky I.N. Concept Of Development Of Building Physics In USSR. *Energy and Buildings*. 1992. Vol. 18. No. 1992. Pp. 25.
 33. 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. No. 14. Pp. 401.
 34. Matrosov Yu.A., Butovsky I.N. USSR Experience In Thermal Design Of Building Envelopes With Improved Thermal Properties. *Energy and Buildings*. 1989. No. 14. Pp. 31.
 35. Drozdov V.A., Matrosov Yu.A., Tabunshchikov Yu.A. The Main Trends In Energy Saving In Buildings – Theory and Practice In USSR. *Energy and Buildings*. 1989. No. 14. Pp. 43.
 36. Korniyenko S.V. Uchet formy pri otsenke teplozashchity obolochki zdaniya [The accounting of the form at the assessment of the thermal performance of the envelopes]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013. No. 5(10). Pp. 20–27. (rus)
 37. Korniyenko S.V. Kompleksnaya otsenka teplozashchity ograzhdayushchikh konstruktsey obolochki zdaniya [The complex assessment of a thermal performance of the building envelope]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 7. Pp. 43–49. (rus)
 38. Korniyenko S.V. Testirovaniye metoda rascheta temperaturno-vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruktsey na rezultatakh naturnykh izmereniy parametrov mikroklimata pomeshcheniy [Testing of calculation method of the enclosing structures temperature-humidity conditions on the results of indoor climate in-situ measurements]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 2. Pp. 18–23. (rus)
 39. Korniyenko S.V. Raschetno-eksperimentalnyy kontrol energosberezheniya zdaniy [Settlement and experimental

Gorshkov A.S., Rymkevich P.P. A diagram method of describing the process of non-stationary heat transfer

- Энергобезопасность и энергосбережение. 2014. №5. С. 19–24.
41. Корниенко С.В. Комплексная оценка энергоэффективности и тепловой защиты зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №11(26). С. 43–58.
 42. Корниенко С.В. О применимости методики СП 50.13330.2012 к расчету влажностного режима ограждающих конструкций с мультизональной конденсацией влаги // Строительство и реконструкция. 2014. №5 (55). С. 29–37.
 43. Кривошеин А.Д., Федоров С.В. К вопросу о расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С. 21–27.
 44. Крайнов Д.В., Сафин И.Ш., Любимцев А.С. Расчет дополнительных теплопотерь через теплопроводные включения ограждающих конструкций (на примере узла оконного откоса) // Инженерно-строительный журнал. 2010. №6. С. 17–22.
 45. Васильев Г.П., Личман В.А., Песков Н.В. Моделирование процесса сушки ограждающих конструкций зданий // Жилищное строительство. 2013. №7. С. 21–26.
 46. Васильев Г.П., Личман В.А., Голубев С.С. Результаты определения сопротивления теплопередаче наружных стеновых панелей // АВОВ. 2012. №4. С. 74–81.
 47. Васильев Г.П. Эффективная тепловая защита – дань моде или экономическая необходимость? // Энергосбережение. 2011. №6. С. 14–23.
 48. Vatin N., Gorshkov A., Rymkevich P., Nemova D., Tarasova D. Nonstationary Thermal Conduction Through The Building Envelope // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vols. 670–671. Pp. 365–369.
 49. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков // Инженерно-строительный журнал. 2014. №8(52). С. 38–48.
 - control of energy saving for buildings]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 8. Pp. 24–30. (rus)
 40. Korniyenko S.V. O normirovanii teplovoy zashchity zdaniy s vlazhnym i mokrym rezhimami [About thermal shield rating for buildings with humid and wet conditions]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2014. No. 5. Pp. 19–24. (rus)
 41. Korniyenko S.V. Kompleksnaya otsenka energoeffektivnosti i teplovoy zashchity zdaniy [Complex assessment of energy efficiency and thermal performance for buildings]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. No. 11(26). Pp. 43–58. (rus)
 42. Korniyenko S.V. O primenimosti metodiki SP 50.13330.2012 k raschetu vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruktсий s multizonalnoy kondensatsiyey vlagi [About applicability of SP 50.13330.2012 method to calculation of a moisture conditions of enclosing structures with multi-zone moisture condensation]. *Building and reconstruction*. 2014. No. 5 (55). Pp. 29–37. (rus)
 43. Krivoshein A.D., Fedorov S.V. K voprosu o raschete privedennogo soprotivleniya teploperedache ograzhdayushchikh konstruktсий [About the calculation of reduced total thermal resistance of walling]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 8. Pp. 21–27. (rus)
 44. Kraynov D.V., Safin I.Sh., Lyubimtsev A.S. Raschet dopolnitelnykh teplopoter cherez teploprovodnyye vklucheniya ograzhdayushchikh konstruktсий (na primere uzla okonnogo otkosa) [Calculation of additional heat loss through heat-conducting inclusions (on the example of window reveal)]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 6. Pp. 17–22. (rus)
 45. Vasilyev G.P., Lichman V.A., Peskov N.V. Modelirovaniye protsessov sushki ograzhdayushchikh konstruktсий zdaniy [Simulation of Drying Process of Building's Enclosing Structures]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*. 2013. No. 7. Pp. 21–26. (rus)
 46. Vasilyev G.P., Lichman V.A., Golubev S.S. Rezultaty opredeleniya soprotivleniya teploperedache naruzhnykh stenovykh paneley [Results of heat transmission resistance calculation in outside wall panels]. *AVOK*. 2012. No. 4. Pp. 74–81. (rus)
 47. Vasilyev G.P. Effektivnaya teplozashchita – dan mode ili ekonomicheskaya neobkhodimost'? [Effective heat shielding – follow the fashion or economic necessity?]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2011. No. 6. Pp. 14–23. (rus)
 48. Vatin N., Gorshkov A., Rymkevich P., Nemova D., Tarasova D. Nonstationary Thermal Conduction Through The Building Envelope. *Applied Mechanic and Materials*. 2014. No. 670–671. Pp. 365–369.
 49. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Vatin N.I. Modelirovaniye protsessov nestatsionarnogo perenosa tepla v stenovykh konstruktсийakh iz gazobetonnykh blokov [Simulation of non-stationary heat transfer processes in autoclaved aerated concrete-walls]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 8. Pp. 38–48. (rus)

Александр Сергеевич Горшков,
+7(921)3884315; эл. почта: alsgor@yandex.ru

Alexander Gorshkov,
+7(921)3884315; alsgor@yandex.ru

Павел Павлович Рымкевич,
+79112245913; эл. почта:
rymkewitch@yandex.ru

Pavel Rymkevich,
+79112245913; rymkewitch@yandex.ru

© Горшков А.С., Рымкевич П.П., 2015

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 и язык статей

В «Инженерно-строительном журнале» публикуются оригинальные, ранее не опубликованные статьи, содержащие полученные авторами новые научные результаты, по тематике «Строительство». Принимаются статьи на английском (предпочтительно) или русском языке. Статьи принимаются в тот или иной номер в соответствии с тематикой.

№	Дата выхода	Срок подачи материалов	Тема номера
1(61)	12.02.2015	25.12.2014	Строительные конструкции. Строительная механика
2(62)	01.04.2015	19.02.2015	Технология и организация строительства. Строительные материалы и изделия
3(63)	06.05.2016	14.03.2016	Гидротехническое строительство. Основания и фундаменты
4(64)	24.06.2016	16.05.2016	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 дополнительно 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/authors.html>



Магистратура по направлениям «Строительство» и «Природообустройство и водопользование»

Что такое магистратура?

- Фундаментальное профессиональное образование
- Получение специализированных знаний в рамках направления
- Подготовка к научно-исследовательской или педагогической деятельности
- Получение квалификации, признанной во всем мире
- Возможность дальнейшего обучения в аспирантуре и получения ученой степени



Условия поступления и обучения

- ✓ На обучение принимаются лица, имеющие высшее образование (квалификация «бакалавр», «специалист» или «магистр»)
- ✓ Документы принимаются в период работы приемной комиссии ФГАОУ ВО «СПбПУ»
- ✓ Зачисление проходит на конкурсной основе по результатам междисциплинарного экзамена в объеме требований ФГОС ВПО по направлению подготовки
- ✓ Обучение проходит в течение 2 лет
- ✓ Обучение проходит на бюджетной или контрактной основе
- ✓ Обучение проходит по очной или заочной форме



Особенности обучения

в инженерно-строительном институте:

- фундаментальность образования Политехнического университета
- научная школа, проверенная временем – в 2007 г. факультету исполнилось 100 лет
- широкий выбор самых актуальных специальностей
- индивидуальная работа с каждым студентом, включающая активную научно-исследовательскую работу и опыт педагогической деятельности;
- регулярное участие магистров в семинарах, конференциях, научных форумах;
- ориентация учебного процесса на применение современных компьютерных технологий;
- постоянное общение с представителями ведущих строительных и проектных организаций.

Магистерская программа	Кафедра
Теория и практика организационно-технологических и экономических решений в строительстве	СУЗИС
Морские гидротехнические сооружения и сооружения водных путей	ВИГС
Речное и гидротехническое строительство	ВИГС
Проектирование, строительство, управление и экспертиза объектов недвижимости в энергетике и водном хозяйстве	ВИГС
Теория и проектирование зданий и сооружений	СМИСК
Организация и управление инвестиционно-строительными проектами	СУЗИС
Теория и методы компьютерного моделирования в расчетах сооружений	СМИСК
Строительство объектов ландшафтной архитектуры	ВИГС
Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений	СМИСК
Автоматизированное проектирование зданий и сооружений	СУЗИС
Инженерные системы зданий и сооружений	СУЗИС
Ландшафтное обустройство территории	ВИГС
New! Civil engineering (на англ. яз.)	СУЗИС

Контакты



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

