www.engstroy.spb.ru

Инженерно-строительный журнал

научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

№8(26) декабрь 2011

СОБЫТИЯ

МАТЕРИАЛЫ

КОНСТРУКЦИИ

ТЕПЛОТЕХНИКА

РАСЧЕТЫ

ТЕМА НОМЕРА: СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Инженерно-строительный факультет
Курсы повышения квалификации и профессиональной переподготовки

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 «Строительство зданий и сооружений»

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 заказчика-застройщика***

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 заказчика-застройщика 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 заказчика-застройщика и генерального подрядчика***

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

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

Инженерно-строительный журнал
научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

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

Специализированный научный журнал

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Адрес редакции:

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 204

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Научный редактор:

Николай Иванович Ватин

Литературный редактор:

Александра Дмитриевна Федорак

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф., ректор ГОУ СГАСУ М.И. Бальзанников;
к.т.н., проф., проректор по перспективным проектам ФГБОУ ВПО СПбГПУ А.И. Боровков;
д.т.н., проф., декан факультета ГОУ ПГУАС О.В. Тараканов;
д.т.н., проф., зав. каф. ГОУ СПбГПУ В.В. Лалин;
к.т.н., директор РУП «Институт БелНИИС» М.Ф. Марковский;
д.т.н., проф., зав. каф. ГОУ СПбГПУ Б.Е. Мельников;
и другие.

Полный список редсовета и редколлегии – на веб-сайте журнала.

Установочный тираж 1000 экз.

Тел.: +7(812) 297-59-49

E-mail: engstroy@inbox.ru

Содержание

СОБЫТИЯ

Проект 144747-TEMPUS-2008-FR-JPCR «Разработка магистерских программ «Инженер-экономист в области энергетики и устойчивого развития» 2
Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции 3
Проблемы современного бетона и железобетона 4
Неделя науки в Политехническом 4

ТЕПЛОТЕХНИКА

Корниенко С.В. Оценка влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплозащиту и энергоэффективность зданий 5
Веселов В.В., Беляков В.А. Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчёта 13

МАТЕРИАЛЫ

Иванов А.Н., Трембицкий М.А. Пенобетон заданной средней плотности для утепления чердачных перекрытий 19
Портнягин Д.Г., Селиванов Ю.В., Селиванов В.М., Шильцина А.Д. Составы и свойства пеностеклокристаллических материалов из композиций стеклобоя и высококальциевого шлака 25
Личман Н.В. Применение серы и золы ТЭЦ Норильского региона при строительстве и реконструкции гидротехнических сооружений 29
Бабков В.В., Самофеев Н.С., Чуйкин А.Е. Силикатный кирпич в наружных стенах зданий: анализ состояния, прогноз долговечности и способы ее повышения 35

КОНСТРУКЦИИ

Гринфельд Г.И., Куптараева П.Д. Кладка из автоклавного газобетона с наружным утеплением. Особенности влажностного режима в начальный период эксплуатации 41
Петриченко М.Р., Петроченко М.В. Гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором 51
Протасевич А.М., Крутилин А.Б. Классификация вентилируемых фасадных систем. Влияние теплопроводных включений на их теплозащитные характеристики 57

РАСЧЕТЫ

Куренкова А.Ю., Кузьменко А.В., Куренкова О.М. Формула стеклопакета для зданий повышенной этажности 63
Лалин В.В., Рыбаков В.А. Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей 69

© ФГБОУ ВПО СПбГПУ

Education and Culture TEMPUS

№8, 2011 Инженерно-строительного журнала выходит за счет средств проекта 144747-TEMPUS-2008-FR-JPCR

На обложке: энергоэффективное многоэтажное здание, Рига, Латвия

Проект 144747-TEMPUS-2008-FR-JPCR «Разработка магистерских программ «Инженер-экономист в области энергетики и устойчивого развития»

Данный номер Инженерно-строительного журнала выходит в рамках проекта TEMPUS-2008-FR-JPCR и за счет средств этого проекта. Энергоэффективность и энергосбережение являются одним из тематических направлений программы TEMPUS.

Education and Culture
TEMPUS

Глобальная цель данного проекта TEMPUS – создание новых магистерских программ для инженеров и экономистов, полученных объединением знаний и профессиональных компетенций из разных областей деятельности: технической и экономической. Программы создаются в рамках концепции управления устойчивым развитием предприятий энергетики и связанной с ней промышленности.

Основные цели и задачи, реализованные в рамках проекта:

- разработка и модернизация экономическими вузами учебных модулей по экономике и менеджменту с их последующей интеграцией в учебные программы технических вузов, обеспечивающих подготовку инженеров;
- разработка и модернизация техническими вузами учебных модулей по промышленным технологиям, энергосбережению и энергетике с их последующей интеграцией в учебные программы экономических вузов, обеспечивающих подготовку экономистов;
- разработка и модернизация при участии европейских университетов специализированных модулей по изучению теоретических основ и практических инструментов (экономика, менеджмент) концепции устойчивого развития в сфере энергетики, включая их в программы подготовки, осуществляемые экономическими и техническими вузами РФ и Казахстана;
- разработка совместных образовательных программ (России и Казахстана с одной или несколькими европейскими странами), комбинирующих очное и дистанционное обучение;
- получение аккредитации новых образовательных программ (инженеров/экономистов в области энергетики и устойчивого развития) на уровне магистратуры, специалитета, повышения квалификации;
- развитие инноваций и качества за счет участия неакадемических партнеров (предприятий, культурных организаций или образовательных сетей, ассоциаций студентов) непосредственно в реализации образовательных программ.

Участники проекта:

- Университет им. Пьера Мендес-Франса, г. Гренобль, Франция;
- Университет прикладных наук Савонии, г. Копио, Финляндия;
- Университет Ла Сапьенца, Рим, Италия;
- Международная школа менеджмента г. Дортмунда, Германия;
- Санкт-Петербургский государственный университет экономики и финансов, Россия;
- Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия;
- Самарский государственный экономический университет, Россия;
- Самарский государственный технический университет, Россия;
- Казахский национальный технический университет имени К. И. Сатпаева, Алма-Ата, Казахстан;
- Алматинский институт энергетики и связи, Казахстан;
- Казахский экономический университет им. Т. Рыскулова, Алма-Ата, Казахстан.

Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции

В период 23–24 ноября 2011 года в ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (МГСУ) состоялась IV Международная научно-техническая конференция «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». В этот раз форум был посвящен сразу нескольким важным юбилеям: 90-летию МГСУ, 80-летию кафедры Отопления и вентиляции МИСИ-МГСУ и 55-летию Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН).

Мероприятие традиционно проходило в стенах центрального комплекса зданий МГСУ на Ярославском шоссе. Основной тематикой, как и прежде, стали вопросы энергосбережения, теоретические аспекты и перспективные направления научных исследований в области теплогазоснабжения и вентиляции и результаты их практического применения в современных условиях, а также сопутствующие вопросы градостроительства и архитектуры. В конференции приняли участие преподаватели, специалисты, а также студенты, аспиранты и докторанты из вузов, научно-исследовательских, проектных и производственных организаций РФ, стран ближнего и дальнего зарубежья.

Организаторами форума, наряду с МГСУ, выступили также НИИСФ РААСН и Ассоциация инженеров по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике (НП АВОК). В течение двух дней работа конференции была организована в формате одного расширенного пленарного заседания, четырех тематических секций и ряда неформальных встреч. Важным элементом конференции уже традиционно стал выделенный в отдельное мероприятие конкурс на лучшую научную работу среди молодых ученых в области теплогазоснабжения и вентиляции. Принять в нем участие смогли студенты, аспиранты, докторанты, инженеры и преподаватели в возрасте до 35 лет.

Среди основных целей конференции можно отметить ознакомление с обстановкой, сложившейся в последние годы в области теоретических и прикладных исследований в сфере изучения и совершенствования инженерных систем зданий, и ее всестороннюю оценку. Кроме того, большой интерес представляет определение и постановка первоочередных задач, стоящих перед сообществом специалистов, планирование и проведение организационной работы по поддержке и развитию перспективных научных направлений.

Открывшее конференцию пленарное заседание, состоявшееся в Актовом зале МГСУ, было посвящено наиболее важным и актуальным проблемам мероприятия. В частности, в выступлении д.т.н., профессора ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский университет технологии и дизайна» Г.М. Позина рассматривались вопросы точности определения коэффициента воздухообмена. Один из зарубежных гостей, д.т.н., профессор Белорусского национального технического университета П.И. Дячек рассказал слушателям о математических методах в отоплении, вентиляции и кондиционировании воздуха. Постоянный участник конференции генеральный директор ЗАО «Полимергаз» В.Е. Удовенко представил доклад на тему «Об обеспечении необходимой безопасности и повышения энергоэффективности сетей газораспределения и газопотребления». Наконец, другой постоянный участник и информационный партнер мероприятия к.т.н. Н.Л. Гаврилов-Кремичев, представляющий Информационно-издательский центр «Современные строительные конструкции», познакомил присутствующих на заседании с итогами жилищного строительства в России в 1991–2010 годах и его перспективами на 2011-2015 годы.

Пленарные доклады отличались методической выверенностью и были проиллюстрированы множеством показательных примеров, в том числе из практики обследования зданий и инженерных систем, находящихся в повседневной эксплуатации. Возможно, как раз этим можно объяснить огромный интерес студентов МГСУ, которые во множестве присутствовали среди слушателей в зале в это время. По оценкам будущих инженеров, доклады подобного уровня и содержания могли бы стать неплохим подспорьем в освоении некоторых ключевых учебных дисциплин строительной специальности.

Текст: О.Д. Самарин, К.И. Лушин
Фото: В.П. Коротихин

Проблемы современного бетона и железобетона

9-11 ноября 2011 г. в Минске, Республика Беларусь, состоялся III международный симпозиум «Проблемы современного бетона и железобетона», основным организатором которого выступил РУП «Институт БелНИИС». В работе конференции приняли активное участие представители не только Беларуси, но и стран СНГ, Европейского союза и Северной Африки.

На пленарном заседании большой интерес вызвал доклад Михаила Филипповича Марковского, к.т.н., директора РУП «Институт БелНИИС», который был посвящен проблемам технологии проектирования и строительства высотных зданий в республике Беларусь, путям развития и мировым тенденциям этого направления. Другие доклады пленарного заседания были посвящены проблемам индустриального домостроения, перспективам развития сталефибробетонных конструкций, разработке национальных нормативов по проектированию железобетонных конструкций в свете новых европейских и международных требований.

Работа симпозиума проходила по двум научным направлениям: технология бетона и техническое состояние бетонных и железобетонных конструкций. В работе секции «Технология бетона» был представлен анализ и даны рекомендации для дальнейшего исследования в области:

- совершенствования нормативной базы монолитного и сборного строительства;
- определения прочности и неразрушающего контроля бетона монолитных конструкций;
- технологий высокопрочного бетона с наноуглеродными добавками и добавками на основе промышленных отходов;
- изучения свойств керамзито- и газобетона, фибробетона и ячеистого бетона.

На секции «Бетонные и железобетонные конструкции» рассматривались:

- состояние конструкций при применении различных схем нагружения;
- исследования в области трещинообразования конструкций;
- анализ и моделирование конструктивных систем высотных зданий;
- свойства бетонных и железобетонных элементов при силовых и агрессивных воздействиях;
- свойства новых отделочных, звуко- и теплоизоляционных материалов;
- долговечность слоистых стен каркасных зданий, а также другие вопросы.

Н.Б. Колосова

Неделя науки в Политехническом

5-10 декабря в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» проходила ежегодная Международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ». В этом году конференция проходила в 40-й раз.

На кафедре ТОЭС инженерно-строительного факультета СПбГПУ заседания секций проходили с 5 по 8 декабря. Традиционно в них приняли участие студенты 3-6 курсов, а также аспиранты и соискатели кафедры. В названиях секций и подсекций отразились новые направления работы кафедры, такие как транспортное строительство, энергоэффективность зданий, подземное строительство. Но наибольшее количество докладов прошло в традиционных для кафедры секциях «Расчетное обоснование зданий и сооружений», «Инженерные системы зданий и сооружений», «Технология, организация и управление строительством».

В секции «Расчетное обоснование…», в том числе, с докладом «Влияние физико-технических и геометрических характеристик утеплителя на влажностный режим стен из газобетонных блоков» выступила Полина Даниловна Куптараева, статья которой в соавторстве с Г.И. Гринфельдом опубликована на стр. 41.

В подсекции «Энергоэффективнность зданий и сооружений» несколько докладов было посвящено вентилируемым фасадам. Статьи по этой тематике опубликованы на стр. 51 и стр. 57.

Текст: В.М. Якубсон
Фото: О.С. Гамаюнова

Оценка влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплозащиту и энергоэффективность зданий

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

Ключевые слова: энергоэффективность; теплопотери; краевые зоны ограждающих конструкций; компьютерная программа

Одним из приоритетных направлений в современном строительстве, отраженных в Федеральном законе РФ от 23.11.2009 г. № 261–ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», Федеральном законе от 30.12.2009 г. № 384–ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», национальных стандартах ГОСТ 31166–2003, ГОСТ 31167–2003, ГОСТ 31168–2003, сводах правил СНиП 23–02–2003, СНиП 31–01–2003 и других документах является обеспечение энергоэффективности зданий и сооружений. Эта задача может быть реализована путем совершенствования архитектурно-планировочных, конструктивных и инженерно-технических решений.

Особый интерес представляет оценка влияния температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на теплозащиту и энергоэффективность здания. Анализ имеющихся в литературе данных показал отсутствие эффективных методов расчета температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций, что затрудняет решение этой проблемы. В данной статье дана оценка влияния краевых зон на теплозащиту и энергоэффективность здания.

В разработку энергетической концепции проектирования зданий большой вклад внесли В.Н. Богословский [1, 2], Ю.А. Табунщиков [3, 4], В.К. Савин [5, 6], В.Г. Гагарин [7, 8], А.И. Ананьев [9], В.И. Прохоров [10], Ю.А. Матросов [11] и другие ученые. Следует также отметить работы [12-14]. Теплозащитные свойства и энергоэффективность зданий оценивают исходя из обеспечения нормируемого энергопотребления здания. Оценка энергоэффективности зданий производится по удельному энергопотреблению путем сравнения расчетного и нормируемого потребления энергии. При этом должно быть выполнено следующее условие:

$$q_{des} \le q_{req}\,, \tag{1}$$

где q_{des}, q_{req} – соответственно расчетное и нормируемое удельное энергопотребление здания.

Очевидно, что чем меньше величина q_{des}, удовлетворяющая условию (1), тем выше энергоэффективность здания.

Анализ различных подходов к расчету энергопотребления зданий показал, что для оценки энергоэффективности здания удобно использовать комплексный показатель – удельный расход энергии q, МДж/(м^3·год), на эксплуатацию здания за отопительный период, определяемый по формуле:

$$q = q_h + q_{hw} + q_e\,,$$

где q_h – удельный расход тепловой энергии на отопление;
q_{hw} – удельный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение;
q_e – удельный расход электрической энергии.

Удельный расход тепловой энергии на отопление q_h определяют на основе теплового баланса здания за отопительный период по формуле:

$$q_h = q_{tr} + q_a - \eta\left(q_{\text{int}} + q_s\right),$$

где q_{tr} – удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания;
q_a – удельные теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха;
q_{int} – удельные внутренние бытовые тепловыделения;
q_s – удельные теплопоступления за счет солнечной радиации;
$\eta \le 1$ – коэффициент использования суммарных теплопоступлений в здание.

Для оболочки здания, состоящей из m ограждающих конструкций ($m \geq 1$), удельные трансмиссионные теплопотери q_{tr} определяют по формуле:

$$q_{tr} = \frac{1}{V_h} \sum_{i=1}^{m} Q_{Ti} ,$$

где V_h – отапливаемый объем здания;
Q_{Ti} – общие трансмиссионные теплопотери через i-ю конструкцию.

В [15] показано, что для практических расчетов общих трансмиссионных теплопотерь через ограждающую конструкцию за отопительный период целесообразно использовать формулу:

$$Q_{Ti} = \frac{0{,}0864 M_{ht} A_i}{R_{hi}^{con}} \left(1 + \sum_{j=1}^{l_i} \psi_{ij} \right), \quad (2)$$

где M_{ht} – градусосутки отопительного периода, определяемые по формуле:

$$M_{ht} = \left(t_{\text{int}} - t_{ht} \right) z_{ht} ,$$

где t_{int} – температура внутреннего воздуха;
t_{ht} – средняя температура наружного воздуха за отопительный период;
z_{ht} – продолжительность отопительного периода;
A_i – площадь i-й конструкции по внутренним размерам;
R_{hi}^{con} – сопротивление теплопередаче по глади i-й конструкции (с учетом положения конструкции относительно наружного воздуха);
l_i – число краевых зон в i-й конструкции;
$\psi_{ij} = k_{ij}^{ez} A_{ij}^{ez} / A_i$ – коэффициент добавочных теплопотерь через j-ю краевую зону i-й конструкции;
k_{ij}^{ez}, A_{ij}^{ez} – соответственно коэффициент влияния и площадь зоны влияния j-й краевой зоны i-й конструкции.

Под краевыми зонами мы понимаем локально неоднородные по геометрическим или теплофизическим параметрам участки ограждения. Параметры k_{ij}^{ez} и A_{ij}^{ez} определяются по температурному полю на основе разработанного автором метода расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций зданий [16, 17].

Разработанный метод позволяет рассчитать общие теплопотери ограждения оболочки здания с учетом краевых зон. В отличие от метода [7], основанного на интегральной оценке теплозащитных свойств оболочки здания и теплопотерь без разделения отдельных неоднородностей между конструкциями, формула (2) позволяет определить теплопотери каждой конструкции оболочки здания и оценить вклад каждой краевой зоны в теплопотери конструкции.

Удельные теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха q_a определяют по формуле:

$$q_a = 0{,}024 c_a \rho_a u_{ht} k_V M_{ht} ,$$

где c_a, ρ_a – соответственно удельная теплоемкость и плотность воздуха;
u_{ht} – средняя кратность воздухообмена здания за отопительный период, определяемая по формуле:

$$u_{ht} = k_R k_{ven} u_{ven} + \left(1 - k_{ven} \right) u_{\text{inf}} ,$$

где $k_R \leq 1$ – коэффициент, учитывающий снижение расхода вентиляционного воздуха при рекуперации и регенерации тепла;
k_{ven} – коэффициент использования вентиляции;
u_{ven} – средняя кратность воздухообмена в рабочее время;
u_{inf} – средняя кратность воздухообмена в нерабочее время;
k_V – коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций.

Удельные внутренние бытовые тепловыделения q_{int} определяют по формуле:

$$q_{\text{int}} = \frac{0{,}0864\, z_{ht}}{V_h} \sum_{i=1}^{n} k_i^{\text{int}} Q_i^{\text{int}} ,$$

где n – число источников тепловыделений;
k_i^{int} – коэффициент использования тепловыделений i-го источника;
Q_i^{int} – суммарная мощность тепловыделений i-го источника.

Удельные теплопоступления за счет солнечной радиации q_s определяют по формуле:

$$q_s = \frac{1}{V_h}\left(\sum_{i=1}^{g} \tau_i^{ver} I_i^{ver} A_i^{ver} + \tau^{hor} I^{hor} A^{hor} \right),$$

где g – число вертикальных поверхностей различной ориентации;
τ_i^{ver}, τ^{hor} – соответственно общий коэффициент пропускания солнечной радиации вертикальной и горизонтальной светопрозрачными конструкциями;
I_i^{ver}, I^{hor} – соответственно суммарная солнечная радиация при средних условиях облачности за отопительный период на вертикальную и горизонтальную поверхности;
A_i^{ver}, A^{hor} – соответственно площадь вертикальной и горизонтальной поверхностей.

На основе статистической обработки многолетних климатических данных по суммарной солнечной радиации при средних условиях облачности методом наименьших квадратов конечными рядами Фурье в [18] получены результаты, позволяющие определить теплопоступления от солнечной радиации при различной продолжительности отопительного периода.

Удельный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение здания q_{hw} определяют по формуле:

$$q_{hw} = \frac{10^{-3} k_{hw} c_w \rho_w q_{hwo} N_{hw} (t_{hw} - t_{cw}) z_{ht}}{V_h},$$

где $k_{hw} \le 1$ – коэффициент использования расчетной нагрузки горячего водоснабжения;
c_w, ρ_w – соответственно удельная теплоемкость и плотность воды;
q_{hwo} – норма расхода горячей воды в средние сутки;
N_{hw} – число потребителей горячей воды;
t_{hw}, t_{cw} – соответственно температура горячей и холодной воды в отопительный период.

Удельный расход электрической энергии q_e определяют по формуле:

$$q_e = \frac{86{,}4 k_e q_{eo} N_e z_{ht}}{V_h},$$

где $k_e \le 1$ – коэффициент использования расчетной электрической нагрузки;
q_{eo} – удельная расчетная электрическая нагрузка;
N_e – число потребителей электрической энергии.

Указанная методика расчета энергетических показателей реализована в компьютерной программе «Энергетический паспорт здания (ЭНПАС)». Программа позволяет производить расчет энергозатрат на эксплуатацию здания за отопительный период, включая затраты на отопление, горячее водоснабжение, электроснабжение (рис. 1). Энергозатраты на отопление включают трансмиссионные теплопотери через оболочку здания с учетом краевых зон, теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха, внутренние бытовые тепловыделения, теплопоступления от солнечной радиации.

Основными достоинствами разработанной компьютерной программы являются:

- возможность оценки энергоэффективности здания на стадии проектирования;
- учет всех составляющих энергопотребления здания за отопительный период;
- определение структуры трансмиссионных теплопотерь через краевые зоны ограждающих конструкций;
- удобный пользовательский интерфейс, основанный на возможностях Delphi;
- хранение и накопление информации в базе данных;
- вывод результатов в удобном для пользователя виде.

Рисунок 1. Принципиальная блок-схема алгоритма расчета энергетических показателей в компьютерной программе «ЭНПАС»

На основе разработанной методики выполним оценку влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплопотери и энергоэффективность здания.

Рассмотрим жилое многоквартирное здание, имеющее квадратную форму в плане с размерами в осях 27,6×27,6 м. Количество этажей – 17. Место строительства – Волгоград. Конструктивная схема здания каркасная, с монолитным железобетонным каркасом. Наружные стены кирпичные трехслойные с эффективным утеплителем и поэтажным опиранием на перекрытия. Окна и балконные двери – в виде двухкамерных стеклопакетов в деревянных переплетах. Покрытие, перекрытия теплого чердака и перекрытие над техподпольем имеют эффективный утеплитель. Здание имеет автономное теплоснабжение и естественную вентиляцию.

Расчет энергетических показателей здания выполнен при следующих исходных данных: t_{int}=20°С; t_{ht}=−2,4°С; z_{ht}=177 сут/год; V_h=38785 м^3; u_{ven}=0,4 ч$^{-1}$; q_{hwo}=115 л/(сут·ед. изм.); q_{eo}=1,0 кВт/(ед. изм.); N_{hw}=N_e=140 ед. изм.; k_R=k_{ven}=k_{hw}=1; k_e=0,75. Значения q_{int}=17,3 МДж/(м^3·год) и q_s=19,6 МДж/(м^3·год) рассчитаны в соответствии с проектом.

Условно разобьем оболочку здания на ограждающие конструкции (m=6): наружные стены (A_1=4494 м^2, R_{h1}^{con}=4,06 м^2·°С/Вт), окна и балконные двери (A_2=1576 м^2, R_{h2}^{con}=0,68 м^2·°С/Вт), входные двери (A_3=55 м^2, R_{h3}^{con}=0,78 м^2·°С/Вт), совмещенное покрытие (A_4=412 м^2, R_{h4}^{con}=4,22 м^2·°С/Вт), перекрытие теплого чердака (A_5=381 м^2, R_{h5}^{con}=3,68 м^2·°С/Вт), перекрытие над техподпольем (A_6=793 м^2, R_{h6}^{con}=3,68 м^2·°С/Вт).

Рассмотрим следующие варианты расчета: 0 (базовый) – без учета краевых зон; 1 и 2 – с различным конструктивным решением краевых зон.

В наружной стене выделим краевые зоны: углы; сопряжения наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями; оконные откосы; теплопроводные включения.

В оконном блоке выделим краевые зоны: сопряжение стеклопакета со створкой; сопряжение коробки с наружной стеной.

Рассмотрим различные варианты конструктивного решения краевых зон.

Вариант 1: углы; сопряжения наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями без теплоизоляционных вкладышей; теплопроводные включения в виде ребер жесткости колодцевой кладки; оконный блок с узкой коробкой.

Вариант 2: углы; сопряжения наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями с теплоизоляционными вкладышами; теплопроводные включения в виде пластмассовых малотеплопроводных коннекторов; оконный блок с широкой коробкой.

Краевые зоны покрытия, перекрытий теплого чердака и перекрытия над техподпольем в обоих вариантах определены по проекту.

Коэффициенты добавочных теплопотерь ψ_{ij} для указанных вариантов краевых зон ограждающих конструкций определены по указанной выше методике.

В табл. 1 и 2 приведены удельные добавочные теплопотери по краевым зонам для рассмотренных вариантов конструктивного решения краевых зон.

Таблица 1. Удельные добавочные теплопотери по краевым зонам (вариант 1)

Ограждающая конструкция	Краевая зона	Коэффициент добавочных теплопотерь	Удельные добавочные теплопотери, МДж/(м^3·год)
Наружные стены	Угол наружных стен	0,021	0,21
	Сопряжение наружных стен с внутренними	0,0531	0,52
	Сопряжение с междуэтажными перекрытиями	0,186	1,82
	Оконные откосы	0,101	0,99
	Теплопроводные включения	0,517	5,06
Окна, балконные двери	Сопряжение стеклопакета со створкой	0,098	2,01
	Сопряжение коробки оконного блока с наружной стеной	0,053	1,08
Входные двери	Сопряжение стеклопакета со створкой	0,098	0,06
	Сопряжение коробки дверного блока с наружной стеной	0,053	0,03
Покрытие совмещенное	Сопряжение покрытия с наружными стенами	0,252	0,22
Перекрытие теплого чердака	Сопряжение перекрытия с наружными стенами	0,252	0,23
Перекрытие над техподпольем	Сопряжение перекрытия с наружными стенами	0,252	0,48

Таблица 2. Удельные добавочные теплопотери по краевым зонам (вариант 2)

Ограждающая конструкция	Краевая зона	Коэффициент добавочных теплопотерь	Удельные добавочные теплопотери, МДж/(м^3·год)
Наружные стены	Угол наружных стен	0,015	0,15
	Сопряжение наружных стен с внутренними	0,0158	0,15
	Сопряжение с междуэтажными перекрытиями	0,149	1,46
	Оконные откосы	0,0154	0,15
	Теплопроводные включения	0,052	0,51
Окна, балконные двери	Сопряжение стеклопакета со створкой		
	Сопряжение коробки оконного блока с наружной стеной		
Входные двери	Сопряжение стеклопакета со створкой		
	Сопряжение коробки дверного блока с наружной стеной		
Покрытие совмещенное	Сопряжение покрытия с наружными стенами	0,127	0,11
Перекрытие теплого чердака	Сопряжение перекрытия с наружными стенами	0,127	0,12
Перекрытие над техподпольем	Сопряжение перекрытия с наружными стенами	0,127	0,24

На основе полученных данных определены удельные трансмиссионные теплопотери через ограждающие конструкции для указанных вариантов расчета (табл. 3).

Таблица 3. Удельные трансмиссионные теплопотери через ограждающие конструкции

Ограждающая конструкция	Удельные трансмиссионные теплопотери, МДж/(м^3·год), по вариантам расчета		
	0	1	2
Наружные стены	9,78	18,4	12,2
Окна, балконные двери	20,5	23,6	20,5
Входные двери	0,623	0,717	0,623
Покрытие совмещенное	0,862	1,08	0,972
Перекрытие теплого чердака	0,914	1,14	1,03
Перекрытие над техподпольем	1,90	2,38	2,14

Данные табл. 3 использованы для определения удельных трансмиссионных теплопотерь через оболочку здания. Результаты расчета удельных энергетических показателей здания за отопительный период представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета удельных энергетических показателей здания

Наименование показателя	Значение показателя, МДж/(м^3·год), по вариантам расчета		
	0	1	2
Теплопотери через оболочку здания	34,6	47,3	37,4
Теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха	42,1	42,1	42,1
Внутренние бытовые теплопоступления	17,3	17,3	17,3
Теплопоступления за счет солнечной радиации	19,6	19,6	19,6
Расход тепловой энергии на отопление здания	39,8	52,5	42,6
Расход тепловой энергии на горячее водоснабжение	15,3	15,3	15,3
Расход электрической энергии	41,4	41,4	41,4
Расход тепловой и электрической энергии	96,5	109	99,3

Анализ полученных результатов показывает, что учет краевых зон по варианту 1 повышает трансмиссионные теплопотери через оболочку здания на 37 % (рис. 2). При этом расход тепловой энергии на отопление здания повышается на 32 %, а расход тепловой и электрической энергии на 13%.

Таким образом, температурно-влажностный режим в краевых зонах ограждений оказывает существенное влияние на энергопотребление здания. Поэтому в реальном проектировании необходимо учитывать это влияние.

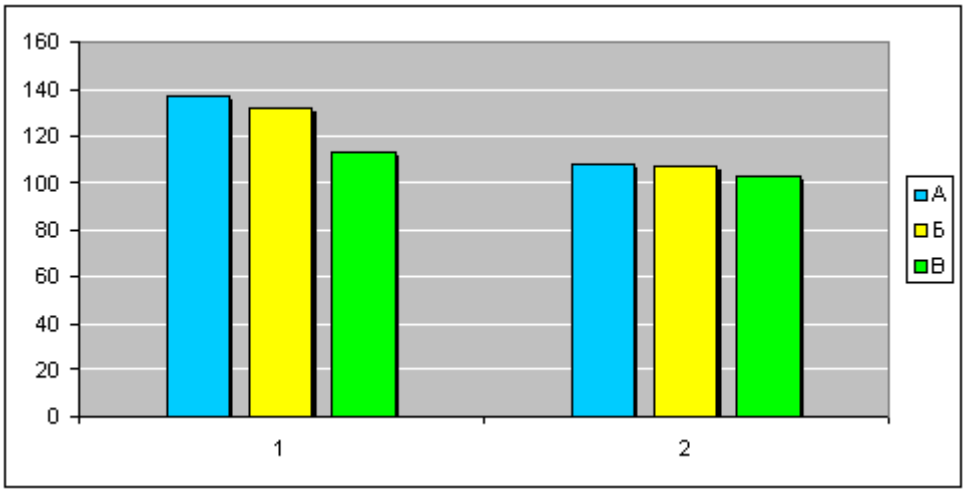


Рисунок 2. Структура удельных энергетических показателей здания (%) за отопительный период по вариантам расчета (1, 2): А – теплопотери через оболочку здания; Б – расход тепловой энергии на отопление здания; В – расход тепловой и электрической энергии

Энергоэффективность здания можно повысить за счет уменьшения влияния краевых зон на удельный расход энергии. Совершенствование конструктивного решения наружных ограждений (вариант 2) приводит к снижению трансмиссионных теплопотерь через оболочку здания на 29%, расхода тепловой энергии на отопление здания на 25%, расхода тепловой и электрической энергии на 10%. Сравнивая полученные результаты данного метода с другими мероприятиями по повышению энергоэффективности зданий, приведенными в СТО 17532043–001–2005, можно отметить, что совершенствование краевых зон ограждающих конструкций имеет высокий потенциал энергоэффективности.

Практическая значимость проведенных исследований подтверждена использованием компьютерной программы «ЭНПАС» при теплоэнергетическом сопровождении и энергоаудите ряда объектов жилищного строительства в Волгограде и Волгоградской области.

Литература

1. Богословский В. Н. Тепловой режим здания. М. : Стройиздат, 1979. 248 с.
2. Богословский В. Н. Три аспекта концепции ЗЭИЭ и особенности переходного периода // Проблемы строительной теплофизики и энергосбережения в зданиях: сб. докл. науч.-практ. конф. / под ред. В.Г. Гагарина / НИИСФ РААСН. М., 1997. Т. 1. С. 7– 9.
3. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М. : АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.
4. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М., Шилкин Н. В. Энергоэффективные здания. М. : АВОК-ПРЕСС, 2003. 200 с.
5. Савин В. К. Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение. М. : Лазурь, 2005. 432 с.
6. Савин В. К. Строительная физика. Энергоэкономика. М. : Лазурь, 2011. 418 с.
7. Гагарин В. Г., Козлов В. В. О нормировании теплопотерь через оболочку здания // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. С. 279– 286.
8. Гагарин В. Г., Козлов В. В. Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий» // Жилищное строительство. 2011. № 8. С. 2-6.
9. Ананьев А. И. Научно-технические основы повышения теплозащитных качеств и долговечности наружных ограждающих конструкций зданий из штучных материалов: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.01, 05.23.03 / НИИСФ РААСН. М., 1998. 40 с.
10. Прохоров В. И. Облик энергосбережения // Актуальные проблемы строительной теплофизики: сб. докл. 7-й науч.-практ. конф. Академические чтения / под ред. В. Г. Гагарина / НИИСФ РААСН. М., 2002. С. 73–93.
11. Матросов Ю. А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения / НИИСФ РААСН. М., 2008. 496 с.
12. Майнерт З. Теплозащита жилых зданий. М. : Стройиздат, 1985. 208 с.
13. Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов. М. : АСВ, 2008. 144 с.
14. Самарин О. Д., Зайцев Н. Н. Влияние ориентации остекленных фасадов на суммарное энергопотребление жилых зданий // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 8 (18). С. 16-20.
15. Корниенко С. В. Повышение энергоэффективности зданий за счет снижения теплопотерь через краевые зоны ограждающих конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. С. 348–351.
16. Корниенко С. В. Решение трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. 2007. № 10. С. 54– 55.
17. Корниенко С. В. Совместный влаготеплоперенос (СОВТ) / Свидетельство № 2011611175 о государственной регистрации программы для ЭВМ. М. : ФИПС, 2011.
18. Корниенко С. В. Расчет теплопоступлений от солнечной радиации за отопительный период // Жилищное строительство. 2010. № 6. С. 40– 41.

**Сергей Валерьевич Корниенко, Волгоград, Россия*

Тел. раб.: +7(8442)96-98-16; эл. почта: svkorn2009@yandex.ru

Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчёта

К.т.н., начальник отдела В.В. Веселов*,
ОАО «Уральский научно-исследовательский институт архитектуры и строительства»;
к.т.н., старший преподаватель В.А. Беляков,
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ключевые слова: морозозащищенный фундамент мелкого заложения; пенополистирол; тепловой расчет; температура массива грунта

Теплоизолированный малозаглубленный фундамент получил за рубежом специальное название – морозозащищенный фундамент мелкого заложения (МФМЗ), или, в оригинале, frost-protected shallow foundation (FPSF) [1,2,3,4].

По такой технологии построено несколько миллионов квадратных метров индивидуального жилья, в основном 1-2-этажного. Все строительство считается *экспериментальным* – за домами ведутся постоянные наблюдения, главная цель которых – установить *предельные ресурсы долговечности* различных теплоизоляционных материалов, находящихся многие годы в земле.

Пока же никаких противопоказаний их применению не выявлено. Такой же вывод следует и из 30-55-летних наблюдений в России за дорогами с утепляющим слоем из пенополистирола, за гидротехническими сооружениями и особенно за поведением пенополистирола в качестве эффективного заполнителя для бетона в конструкциях зданий, совмещающих несущую и теплозащитную функции [5,6,7].

Конструкция МФМЗ обеспечивает эффективную защиту от промерзания и от всех известных негативных проявлений морозного пучения грунтов. Положительным фактором является значительное сокращение материалоемкости и объемов земляных работ: глубина заложения фундамента составляет 0.5-0.8 м вместо привычных в Средней России 1.5-2.5 м, а на Севере и на Востоке – до 3-3.5 м, назначаемых требованиями действующих нормативных документов по условиям промерзания грунтов. Кроме того, на 15-20% сокращаются тепловые потери, что достигается экономией тепловой энергии в процессе эксплуатации здания.

В данной статье рассматривается метод решения нестационарной и нелинейной тепловой задачи промерзания-оттаивания грунта в двумерной постановке с использованием компьютерных программ на основе метода конечных элементов, например, программы COSMOS/M (Structural Research & Analysis Corp.). Приводятся характерные особенности по заданию исходных данных в программу расчета, вызванные нелинейностью и нестационарностью тепловой задачи.

Работы по разработке метода решения тепловых задач для обоснования конструкций теплоизолированных фундаментов выполнялись в период с 1999 года по 2004 год в ОАО «УралНИИАС» (Екатеринбург) группой ученых – авторов патентов РФ на изобретение [8,9,10]. Результаты исследований легли в основу двух научно-поисковых тем 2002-2003 гг., кандидатской диссертации в 2004 году [11], кроме того, в настоящее время исследования по данной тематике продолжены совместно с кафедрой «Материаловедение в строительстве» ФГАОУ ВПО «УрФУ» [12].

Для теплового прогноза состояния оснований зданий и сооружений в условиях сезонного промерзания грунтов, (например, при устройстве теплоизолированных фундаментов, позволяющих снизить глубину заложения до 0.5–1 м в любых природно-климатических условиях, не допустив опасного промерзания грунта ниже подошвы) требуется выполнить численный анализ температурных полей в грунте в процессе промерзания-оттаивания.

В настоящее время отсутствуют четкие рекомендации по выполнению тепловых расчетов промерзания-оттаивания грунта (нелинейных и нестационарных, с учетом фазовых переходов воды). При решении таких задач в двух– и трехмерной постановке компьютерными программами

на основе МКЭ возникают трудности с постановкой задачи: заданием граничных условий, выбором расчетной схемы задачи и др.

Рассмотрим решение нестационарной и нелинейной тепловой задачи в двумерной постановке с использованием компьютерных программ расчета на основе метода конечных элементов, например, программы COSMOS/M.

Программа имеет достаточно универсальный характер и позволяет решать множество задач данного класса. Особенности конкретной задачи (конфигурация расчетной области, неоднородность по теплофизическим свойствам, граничные условия и т.п.) отражаются в исходной информации и не требуют изменения алгоритма решения. Тем не менее, среди перечисленных вопросов (применительно к задачам промерзания грунтов) есть принципиальные вопросы – способ задания краевых условий, конфигурация расчетной области и прочие, заслуживающие отдельного рассмотрения и анализа.

Была рассмотрена задача промерзания оголенной от снега и растительности поверхности (расчетная схема ***«бесснежная поляна»***).

Расчетная схема ***«бесснежная поляна»*** – полупространство (в частном, двумерном случае – полуплоскость) из бесконечного по простиранию массива вещества, неоднородного по теплофизическим характеристикам, ограниченного сверху плоскостью (линией). Эта «поляна», как постулируется нормативами, свободна от снега и растительного покрова; на нее воздействуют: сверху – знакопеременный тепловой поток от наружного воздуха и солнечной радиации, снизу – геотермальный поток, характеризующий влияние нижележащего массива грунта, с характерным для рассматриваемой местности температурным градиентом.

При задании исходных данных в программу теплотехнического расчета, прежде всего, необходимо ввести теплофизические характеристики грунтов. Так как учитывается нелинейная работа грунтов, требуются специальные приемы для задания исходных значений в компьютерную программу. Значения теплофизических величин для грунтов взяты по табл. 3 СНиП 2.03.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».

Нелинейность теплофизических свойств грунтов вызвана различием значений характеристик для талого и мерзлого состояний грунта. Диапазон температур, в пределах которого происходят фазовые переходы, находится в пределах от 0°С до –3°С (для глин и суглинков в среднем от 0°С до –2°С, а для песков от 0°С до 0.2-0.5°С).

При вводе исходных данных в программу расчета конкретные значения характеристик для талого и мерзлого состояния грунта трансформированы в непрерывные зависимости свойств грунта от температуры (т.к. программа расчета не воспринимает резких скачков и разрывов при задании таких функций). Например, для суглинка, с теплопроводностью λ = 1.57/1.45 Вт/(м·К) для мерзлого/талого грунта зависимость теплопроводности от температуры показана на рис. 1.

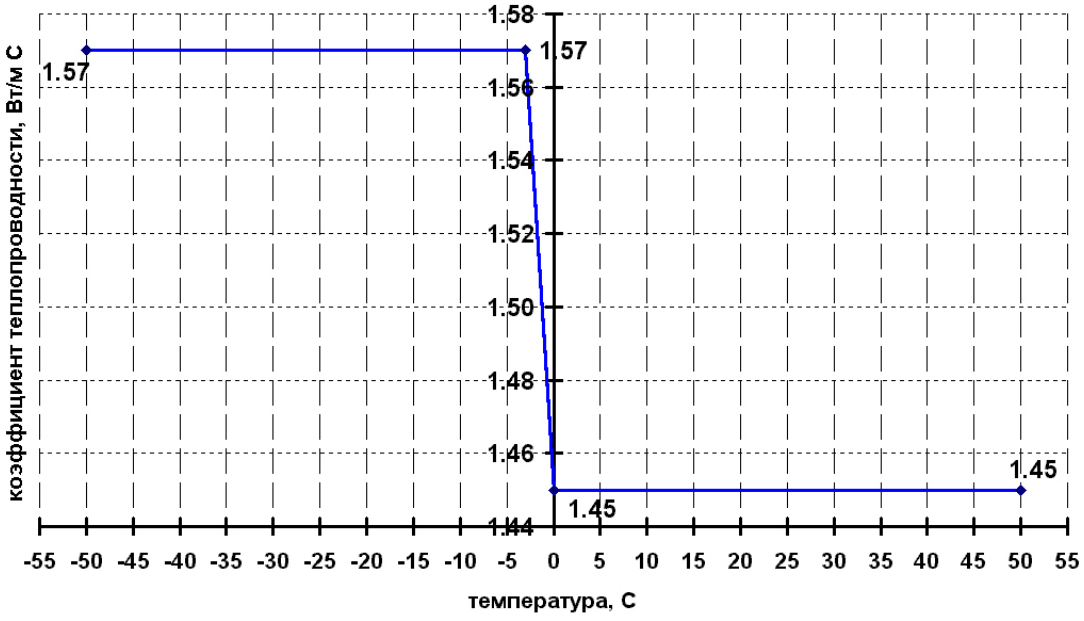


Рисунок 1. График зависимости теплопроводности грунта от температуры

Для теплоемкости грунта сохраняется нелинейность свойств; при этом для ввода значений теплоемкости в программу расчета использованы аналогичные принципы построения непрерывных зависимостей, описывающие изменения теплоемкости грунта при изменении температуры. Кроме того, в предлагаемой методике расчетов принято, что все тепловыделения и теплопоглощения, связанные с фазовыми переходами воды, будут учтены при задании зависимости теплоемкости грунта от температуры. В этом случае на графике зависимости удельной теплоемкости от температуры появляется характерный скачок на интервале температур основных фазовых переходов от –3°С до 0°С. Количественно площадь скачка на графике равна удельной теплоте фазовых переходов объема жидкости в грунте.

Выявлено, что различный диапазон задания фазовых переходов при постоянной площади под графиком (рис. 2) практически не влияет на температурные поля за пределами зоны фазовых переходов (выше и ниже ее по глубине грунта). Также он не влияет на глубину промерзания, т.к. размер зоны фазовых переходов при этом составляет не более 5-15 см (при промерзании грунта в естественных условиях).

Таким образом, основным фактором, влияющим на распределение температуры в грунте за пределами зоны фазовых переходов, будет площадь эпюры графика эффективной теплоемкости. Кроме того, существуют ситуации, связанные с наличием теплоизоляции в грунте (при теплоизоляции фундаментов, дорог и других заглубленных сооружений), для которых задание интервала фазовых переходов требует отдельного анализа: при промерзании под подошвой теплоизолированного фундамента возникает большая зона грунта в пластично-мерзлом состоянии с температурами от начала ($t_{ЗАМ}$) до окончания замерзания ($t_К$).

Заметим, что для реальных грунтов температура $t_{ЗАМ}$ несколько меньше 0°С. Кроме того, нижняя граница диапазона фазовых переходов условно принята за температуру конца замерзания $t_К$ (при этой температуре в грунте уже не остается большого количества незамерзшей воды). Ниже для примера при известной влажности и плотности грунта определяется площадь эпюры участка графика, имеющего характерный пик (график эффективной теплоемкости, см. рис. 2).

Для построения графика удельной теплоемкости выполнены следующие вычисления: масса воды в объеме грунта равна произведению его влажности на плотность сухого грунта 0.3x1400 = 420 (кг/м^3).

Теплота фазовых переходов для вычисленной массы воды в объеме грунта:

$$Q_{Ф.П.}=420 \text{ x } 3.35\cdot10^5=140.7 \text{ МДж/м}^3,$$

где 3.35·10^5 Дж/кг – удельная теплота фазовых переходов для воды.

Площадь эпюры участка графика, имеющего характерный пик, равна:

$$140.7 \text{ МДж/м}^3/(1°\text{Cx}1400)=100500 \text{ Дж/(кг°С)},$$

где 1°С – длина участка графика.

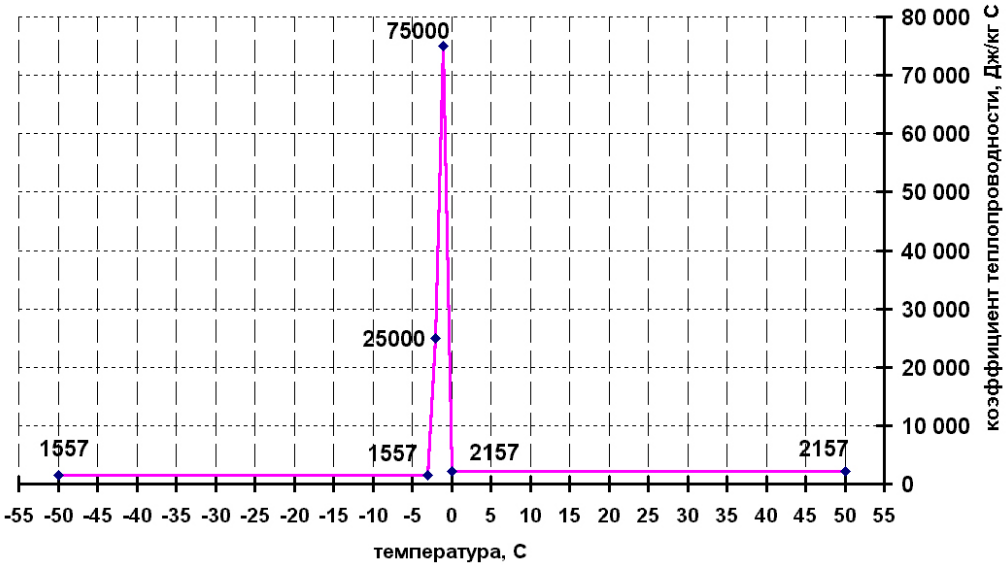


Рисунок 2. График зависимости удельной теплоемкости грунта от температуры с учетом фазовых переходов воды, содержащейся в объеме грунта

При вводе исходных данных в расчет значения температур воздуха по СНиП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика» также были трансформированы в непрерывные зависимости температуры от времени. Для примера, на рис. 3 показан график зависимости температуры воздуха от времени.

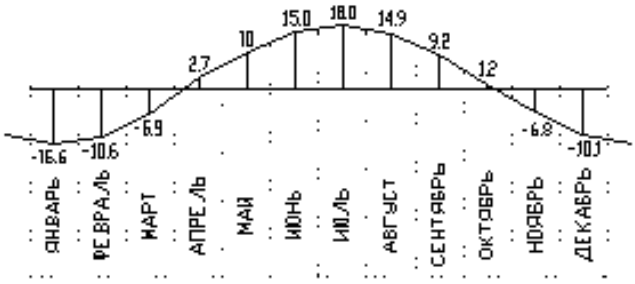


Рисунок 3. Кривая нормативной температуры наружного воздуха, Екатеринбург

Графики изменения величины солнечной радиации в зависимости от времени года были построены по значениям суммарной солнечной радиации из СНиП 2.01.01-82 и пособия к нему. Общий вид графика для Екатеринбурга показан на рис. 3.

При выполнении расчетов учтено не суммарное значение солнечной радиации, а только поглощенная ее часть.

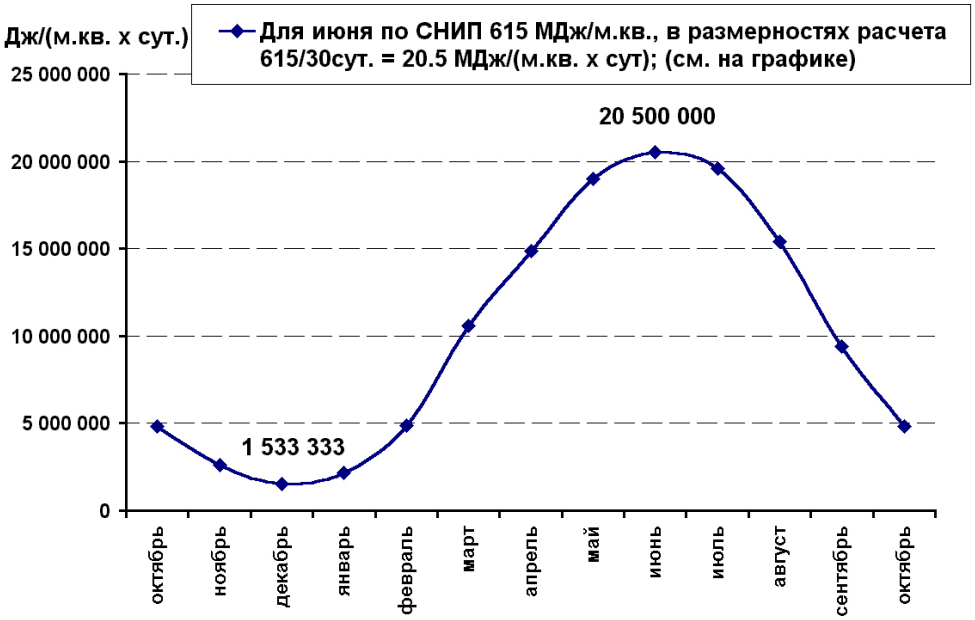


Рисунок 4. Зависимость изменения величины солнечной радиации от времени для Екатеринбурга

Для расчета величины поглощенной радиации учитывалась характеристика отражательной способности земной поверхности (альбедо α_L). Средневзвешенное значение коэффициента отражения грунтом солнечной радиации (использованное в расчетах) принято равным α_L = 0.3, а коэффициента поглощения – равным 0.7. Заметим, что если использовать в расчетах схему «бесснежная поляна», когда зимой снег расчищается, а летом удаляется какая-либо растительность с поверхности грунта, очевидно завышается рассчитываемая глубина промерзания.

Далее приводятся результаты анализа по определению оптимальной глубины расчетной зоны. Ставилась цель выявить, до какой глубины на результат решения тепловых задач влияют различные возмущающие факторы на поверхности и их сочетания, т.е. определить размеры расчетной зоны. Само понятие расчетной зоны (как оно здесь сформулировано выше) не является абсолютно точным и определенным, поскольку теоретически воздействие поверхности распространяется бесконечно глубоко. Для примера, задав на «гарантированной» глубине 50 м постоянную температуру, уже на 49-м метре, пусть даже немного, но температура будет изменяться: строго постоянной температура будет только на глубине 50 м. Следовательно, понятие расчетной зоны привязано к определенным допускам; она не задается абсолютно точно.

Численным анализом установлено, что глубина 15 м и задаваемое на ней краевое условие обладают инвариантностью относительно верхних краевых условий задачи. Следовательно, расчетная глубина обеспечена доказательной базой и выбрана правильно. Влияние возмущающих факторов приводилось к поверхности расчетной зоны. Однако возможны случаи,

когда какие-либо возмущения действуют на определенной глубине от поверхности. При этом для нахождения глубины расчетной зоны необходимо к соответствующей глубине действия возмущающего фактора прибавить 15 м. Таким образом, такая расчетная глубина выбрана как универсальная нижняя граница, позволяющая корректно рассчитывать не только тепловые задачи с естественным температурным режимом на поверхности, но и заглубленные сооружения, подвалы и проч.

Формирование и динамика процессов сезонного промерзания грунтов определяются структурой радиационно-теплового баланса поверхности. Для изучения связи тепловых процессов в грунтах и горных породах с тепловыми процессами, протекающими на земной поверхности, необходимо рассматривать влияние всех составляющих радиационно-теплового баланса на температуру поверхности и подстилающих пород. Так как в среднем за год теплосодержание слоя грунта в пределах глубины расчетной зоны не меняется (т.е. никакое количество тепла не накапливается и не вытекает из слоя), существует некий поток, влияющий на массив грунта как краевое условие снизу. На этом основании было составлено уравнение теплового баланса и на этой основе оценена степень влияния каждого источника тепла (радиации, геотермального тепла, потерь через конвекцию).

Расчетами выявлено, что температуры внизу расчетной зоны и величины теплового потока снизу мало отражаются на верхних слоях (например, на глубине промерзания), а геотермальный поток тепла почти не влияет на них. Этот фактор (тепловой поток снизу) следует считать малозначительным и задавать его в реальных расчетах можно обоснованно с точностью до порядка. В частности, величина такого теплового потока согласуется с понятием геотермальной ступени. Градиент температур в грунте в среднем составляет 20°С на 1000 м или (0.02°С/м).

Таким образом, фактически равнозначны следующие варианты.

1. Задавать на глубине 15 метров температуру 3°С или 15°С. При задании граничного условия снизу через постоянную температуру на заданной глубине – менее предпочтительный способ задания граничного условия по сравнению с тепловым потоком.

2. Задавать соответствующий геотермальной ступени тепловой поток (с точностью до порядка, в зависимости от средней теплопроводности массива). Это является естественным «люфтом», практически не влияющим на тепловой баланс системы.

Соответственно, пытаться подобрать нужную температуру/поток на фиксированной глубине в зависимости от остальных исходных данных, т.е. решать обратную задачу, бесполезно.

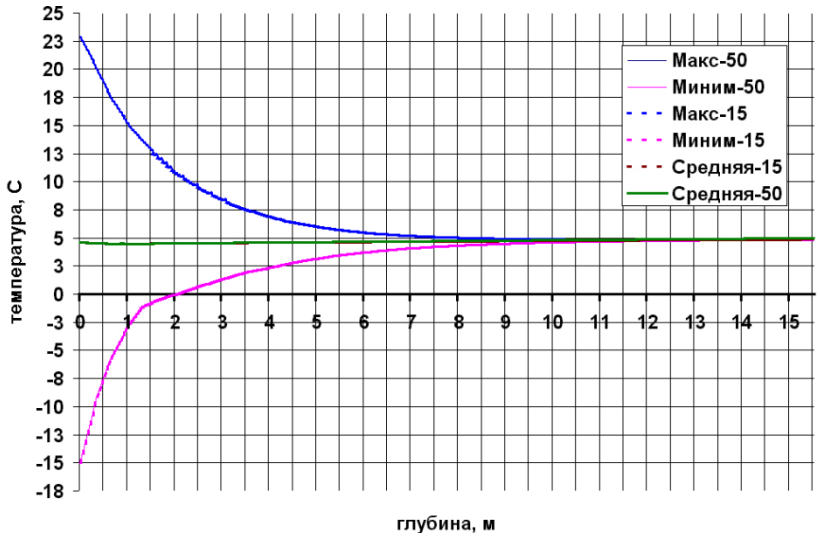


Рисунок 5. Общий вид графика среднегодовой температуры и ее амплитуды по глубине расчетной зоны без учета возмущающих факторов, Екатеринбург

Решая с помощью компьютерных программ нестационарные тепловые задачи, необходимо задать некую начальную температуру, близкую к предполагаемым реальным значениям, для каждого узла расчетной зоны. Разумеется, можно задать точные значения температур, полученные аналитически для конкретного случая.

Также рассмотрен и решен такой постановочный вопрос, как проблема задания начального распределения температур в массиве грунта. Предложено два способа назначения начального

распределения температур. Например, при решении задачи можно задать начальную температуру от 5°С до 10°С для всего массива грунта. После чего требуется произвести расчет большого числа годовых циклов. Практика показывает, что в течение 3-5 годовых циклов задача сама «выходит» на температурное распределение, характерное для грунта в естественных условиях залегания. Далее достаточно добавить рассчитываемую конструкцию и продолжить выполнение расчета.

Начальное распределение температур в грунте, близкое к реальному, также можно получить, составив уравнение теплового баланса для расчетного года и построив график среднегодовых температур в грунте (рис. 5).

Приведенные в статье подходы к решению тепловых задач промерзания-оттаивания грунта с помощью компьютерной программы COSMOS/M на основе метода МКЭ были использованы автором статьи для разработки и обоснования методики расчета теплоизолированных фундаментов на сезонно промерзающих грунтах УрФО.

Практическая реализация результатов исследовательской работы обеспечена разработанными альбомом технических решений [13] и территориальными строительными нормами ТСН 50-302-02 «Проектирование оснований и фундаментов строящихся и реконструируемых зданий и сооружений в г. Ханты-Мансийске», которые регламентируют этапы проектирования и строительства малозаглубленных теплоизолированных фундаментов для малоэтажных домов.

Литература

1. Design guide for frost-protected shallow foundations / U.S. Department of Housing and Urban Development, Office of Policy Development and Research. 1994. 46 p.
2. Standard No. 032-01. Design and Construction of Frost-Protected Shallow Foundations / American Society of Civil Engineers. 2001. 36 p.
3. Morris Richard A. Frost-Protected Shallow Foundations: Current State-of-the-Art and Potential Application in the U.S. [Электронный ресурс] / Prepared for Society of the Plastics Industry, Inc. URL: http://www.nahb.org/generic.aspx?genericContentID=3326 (Дата обращения: 08.12.2011).
4. Crandell Jay H., Steurer Peter M., Freebome William. Demonstration, Analysis, and Development of Frost Protected Shallow Foundations and Freezing Index Climatography for Residential Construction Applications in the United States // Proceedings of the 7th International Cold Regions Engineering Specialty Conference. Montreal Quebec, 1994. Pp. 64-74.
5. Веселов В. В., Зобова М. В. Анализ конструктивных решений узла утепления цоколя с применением экструзионного пенополистирола «ЭКСТРОЛ» // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2007. №10. С. 32-35.
6. Носков А. С., Беляков В. А. Конструкции из полистиролбетона для строительства жилых зданий // Жилищное строительство. 2008. № 5. С. 24-25.
7. Беляков В. А., Королева М. А., Аузинь И. А. Экономические аспекты решения теплотехнических проблем в современном строительстве // Проблемы и перспективы экономического развития России: инновации, финансирование, управление производством: Сборник научных трудов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. С. 270-272.
8. Патент RU № 2135693, МКИ 6 E 02 D 27/01, 27/35. Теплоизолированный фундамент / В.В. Лушников и Ю.Р. Оржеховский. Опубл. 27.08.99, Бюл. № 24. 12 с.
9. Лушников В. В., Оржеховский Ю. Р. и др. Поверхностные фундаменты для малоэтажных домов // Стройкомплекс Среднего Урала. 1999. № 11. С. 20-22.
10. Пат. 2237780 МКИ 7 E 02 D 27/01, 27/35. Теплоизолированный фундамент / В.В. Лушников, Ю.Р. Оржеховский, В.В. Веселов. №2002118813/03; Заявл. 12.07.2002; Опубл. 27.01.2004; RU БИПМ №3.
11. Веселов В. В. Методика расчета теплоизолированных фундаментов на сезонно промерзающих грунтах: автореферат дис. … канд. техн. наук: 05.23.02. Пермь, 2004. 24 с.
12. Веселов В. В., Беляков В. А. Секреты «теплого фундамента» // Новый уральский строитель. 2011. № 9-10 (114). С. 53-60.
13. Альбом технических решений для массового применения с теплоизоляцией на основе экструзионной плиты утепления «Экстрол» марок 35..45 по ТУ 2244-001-77909577-2005» [Электронный ресурс] / ОАО институт «УралНИИАС». Екатеринбург, 2006. URL: http://www.extrol.org/sertificat_files/file_20100121165545_e3c81f.rar. (Дата обращения: 08.12.11)

**Владимир Вячеславович Веселов, Екатеринбург, Россия*
Тел. моб.: +7(902) 270-00-88; эл. почта: 9022700088@mail.ru

Пенобетон заданной средней плотности для утепления чердачных перекрытий

К.т.н., старший преподаватель А.Н. Иванов;
адъюнкт М.А. Трембицкий*,
Военный инженерно-технический институт (филиал)
ФГВОУ ВПО «Военная академия тыла и транспорта им. генерала армии Хрулева А.В.»

Ключевые слова: методика; средняя плотность; пенобетон; смесь; утеплитель; цемент; водоцементное отношение

По оценке ведущих учёных, запасов основных источников энергии (нефти, газа, угля) в мире осталось примерно на 50 лет [1]. Половина потребляемой энергии приходится на поддержание нормативного температурно-влажностного режима в помещениях жилых домов и сооружений [1]. В основном расход энергии обуславливается потерей тепла через ограждающие конструкции зданий – стены, окна, чердачные и цокольные перекрытия [2].

Одним из важных направлений исследований, направленных на снижение теплопотерь в зданиях, является выбор теплоизоляции для чердачных перекрытий, которые, в результате снижения термического сопротивления утеплителя, становятся источниками передачи тепла в зимний период из отапливаемых помещений зданий в нежилые помещения чердака. В результате снег, лежащий на кровле, тает, вода стекает вниз и замерзает, превращается в сосульки. Таким образом, создаются условия, угрожающие здоровью и жизни людей [3].

На рис. 1 представлена картина, характерная для большинства кровель Санкт-Петербурга в зимний период.

Рисунок 1. Кровля малоэтажного здания в Санкт-Петербурге

Таблица 1. Оценка существующих утеплителей, применяемых в чердачных перекрытиях

№ п.п.	Наименование утеплителя	Плотность, кг/м^3	Расчётный коэффициент теплопровод-ности, Вт/м°С	Стоимость 1 м^3 тепло-изоляции на IV квартал 2010 г., руб.	Удельная стоимость изготовления, Вт руб./м°С	Долго-вечность, лет
1	Плиты минераловатные	200	0,08	8838,82	707,10	20
2	Пенополистирол	35	0,031	14329,01	444,20	15-20
3	Гравий керамзитовый	250	0,12	2037,90	244,55	50
4	Полистиролбетон	150	0,06	2300,00	138,00	25
5	Газобетон	300	0,13	2980,82	387,50	50
6	Монолитный пенобетон	160	0,078	1301,46	101,51	50
7	Сборный пенобетон	160	0,078	2568,59	200,35	50
8	Пеностекло	200	0,09	15767,03	1419,03	70

В России для теплоизоляции чердачных перекрытий чаще всего применяют минераловатные и полимерные утеплители, засыпки, а также ячеистые бетоны. На основании сравнений эффективности существующих утеплителей применяемых в чердачных перекрытиях было выявлено, что основными критериями эффективности утеплителя являются стоимость, коэффициент теплопроводности, удельная стоимость (позволяет рассмотреть стоимость и коэффициент теплопроводности совместно) и долговечность. Стоимость рассчитывалась с учётом изготовления, доставки утеплителя и работ по теплоизоляции чердачного перекрытия. Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что теплоизоляция из монолитного пенобетона естественного твердения, изготовленного промышленным способом, превосходит существующие утеплители по всем рассмотренным критериям.

В результате проведённых исследований была разработана пенобетонная смесь для получения пенобетона средней плотностью 100…190 кг/м^3 [4]. Физико-механические характеристики полученного пенобетона представлены на рис. 2-4.

На рис. 2 представлена зависимость расхода цемента от средней плотности пенобетона. По графику видно, что с уменьшением средней плотности пенобетона уменьшается расход цемента. Это объясняется тем, что 84 % массы пенобетона составляют частицы цемента. Для получения 1 м^3 пенобетона средней плотностью 100 кг/м^3 требуется 84 кг портландцемента, а для пенобетона средней плотностью 190 кг/м^3 – 158 кг.

На рис. 3 представлена зависимость величины водоцементного отношения от средней плотности пенобетона. Из рис. 3 следует, что с уменьшением средней плотности пенобетона возрастает водоцементное отношение. Это объясняется тем, что количество воды, используемое для приготовления пены, одинаково при получении пенобетона средней плотностью 100…190 кг/м^3, а расход портландцемента разный.

Рисунок 2. Зависимость расхода цемента от средней плотности пенобетона

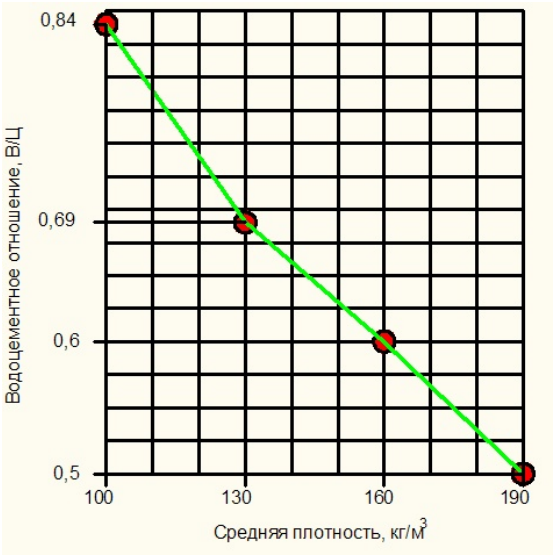


Рисунок 3. Зависимость величины водоцементного отношения от средней плотности пенобетона

На рис. 4 представлены две зависимости прочности пенобетона от его средней плотности, полученные для пенобетона, изготовленного на портландцементе М500Д0 и М400Д20 Сланцевского цементного завода. Известно, что на прочность пенобетона влияет водоцементное отношение, расход портландцемента, тонкость его помола, минералогический состав, а также предел прочности при сжатии [5, 6, 7]. С увеличением водоцементного отношения возрастает пористость цементного камня, образующего межпоровые перегородки. Это приводит к снижению средней плотности и прочности пенобетона.

С увеличением расхода портландцемента возрастает средняя плотность пенобетона, уменьшается объём воздушной фазы и, следовательно, повышается прочность. Объём воздушной фазы в пенобетоне определяется разностью объёмов пенобетона и цементного камня.

Из графиков на рис. 4 следует, что при использовании портландцементов М400Д20 и М500Д0 получается пенобетон с одинаковой средней плотностью, но разными значениями прочности.

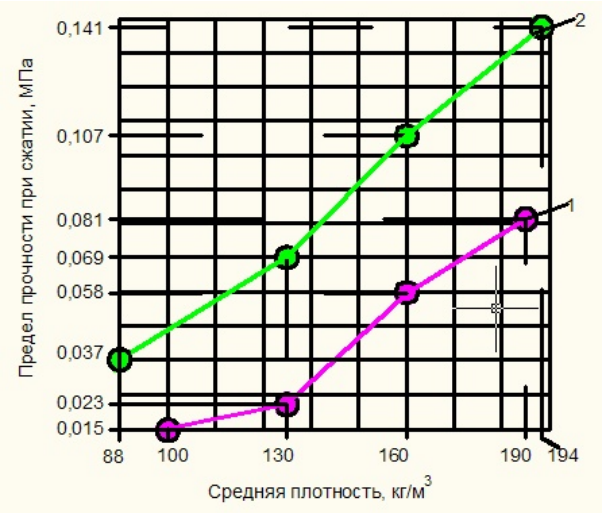


Рисунок 4. Зависимость прочности пенобетона от средней плотности: 1 – портландцемент 400Д20; 2 – портландцемент 500Д0

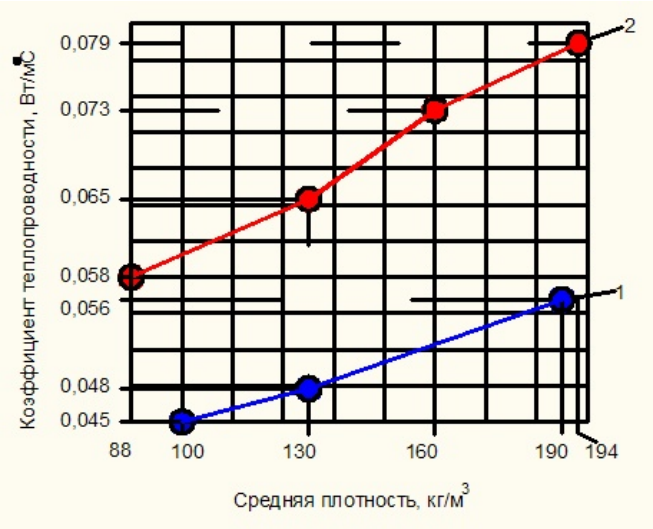


Рисунок 5. Зависимость коэффициента теплопроводности от средней плотности и однородности структуры пенобетона: 1 – однородная структура; 2 – неоднородная структура

Рассмотрим портландцемент марки 400Д20. Данный портландцемент изготавливается из портландцементного клинкера с добавлением доменного гранулированного шлака в количестве 20% от массы клинкера. Известно, что доменный шлак – это активная минеральная добавка, замедляющая схватывание и твердение цемента [5, 7]. Тонкость помола портландцемента характеризуется удельной поверхностью. Для портландцемента 400Д20 она находится в пределах 270–300 м^2/кг [7]. Предел прочности измерений при сжатии половинок образцов-балочек через 28 сут. твердения составляет 44,2-46,0 МПа [8].

Рассмотрим портландцемент марки 500Д0. Данный портландцемент изготавливается из высокомарочного портландцементного клинкера с добавлением гипса. Удельная поверхность портландцемента 500Д0 находится в пределах 300 – 330 м^2/кг [9]. Предел прочности измерений при сжатии половинок образцов-балочек через 28 сут. твердения составляет 50,5-52,0 МПа [8].

Сравнивая показатели качества двух рассмотренных марок портландцемента, можно сделать вывод, что полученный пенобетон средней плотностью 100…190 кг/м^3 на портландцементе 500Д0 будет превосходить по прочности пенобетон, полученный на портландцементе 400Д20.

Результаты исследований и анализ технической литературы [10-14] показали, что зависимость коэффициента теплопроводности от плотности и однородности структуры пенобетона имеет линейный характер. На рис. 5 представлены графики зависимости коэффициента теплопроводности от плотности и однородности структуры пенобетона. Из графиков рис. 5 следует, что с уменьшением средней плотности пенобетона уменьшается и коэффициент теплопроводности. Это явление связано с увеличением объёма воздушной фазы в пенобетоне и уменьшением доли твёрдой фазы. Коэффициент теплопроводности воздуха в состоянии покоя составляет 0,02 Вт/м°С, а цементного камня – 0,58 Вт/м°С (СНиП 23-101-2004). Из графиков рис. 5 следует, что пенобетон одинаковой средней плотности, но разной структуры пористости отличается коэффициентом теплопроводности. Пенобетон плотностью 130 кг/м^3 неоднородной структуры (поры разного диаметра от 10 мм до 1 мм) имеет коэффициент теплопроводности 0,065 Вт/м°С, а пенобетон однородной структуры (поры одинакового диаметра 1,4 мм) – 0,048 Вт/м°С, это на 26,2 % меньше предыдущего значения.

В результате проведённого теплотехнического расчёта было установлено, что при постоянной величине приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции R_0, м^2°С/Вт, понижение коэффициента теплопроводности утеплителя на 2,56% или 0,002 Вт/м°С приводит к уменьшению толщины утеплителя на 5 мм. Следовательно, снижение коэффициента теплопроводности на 26,2% позволяет уменьшить толщину утеплителя на 51 мм.

Таким образом, задаваясь определённой средней плотностью пенобетона, можно с высокой достоверностью прогнозировать получение пенобетона с необходимыми физико-механическими свойствами.

Для достижения поставленной цели была разработана расчётно-экспериментальная методика изготовления пенобетона естественного твердения заданной средней плотности. Пенобетон получается в результате твердения пенобетонной смеси, изготовленной с помощью промышленной установки [15], состоящей из закрытого смесителя объёмом замеса $V_з$ от 0,2 м^3 до 1 м^3, пеногенератора без движущихся элементов, компрессора, героторного насоса [16]. Разработанная методика представлена в виде блок-схемы на рис. 6 и состоит из восьми этапов.

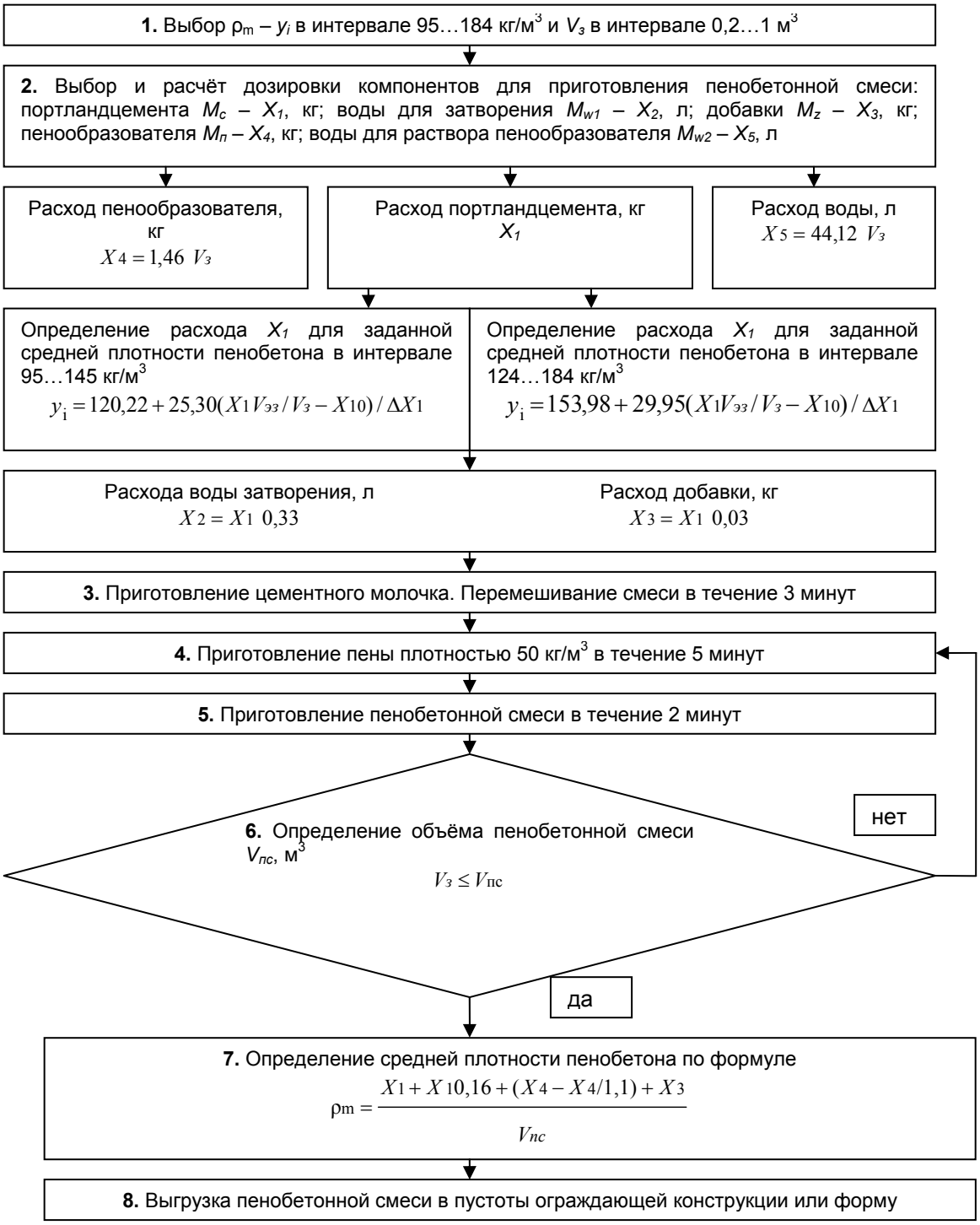


Рисунок 6. Блок-схема алгоритма методики изготовления пенобетона заданной средней плотности

На первом этапе производится выбор необходимой средней плотности пенобетона в интервале 95…184 кг/м^3 и объёма замеса пенобетонной смеси.

На втором этапе производится подбор компонентов и расчёт их дозировки для приготовления пенобетонной смеси. Дозирование цемента и химической добавки осуществляется с помощью весов, а дозирование воды – мерным цилиндром. Расчёт количества цемента M_c, кг, производится согласно математическим моделям, полученным в результате статистической обработки известных справочных данных [17, 18]:

- для заданной средней плотности пенобетона в интервале 95…145 кг/м^3

$$y_i = 120{,}22 + 25{,}30(X1\,V_{эз}/V_з - X10)/\Delta X1\,; \quad (1)$$

- для заданной средней плотности пенобетона в интервале 124…184 кг/м^3

$$y_i = 153{,}98 + 29{,}95(X1\,V_{эз}/V_з - X10)/\Delta X1\,, \quad (2)$$

где y_i – средняя плотность пенобетона, кг/м^3;
X_1 – расход портландцемента, кг;
$V_{эз}$ – объём экспериментального замеса, м^3;
$V_з$ – объём замеса, принимаемый от 0,2 м^3 до 1м^3;
X_{10} – основной уровень переменного фактора, кг;
ΔX_1 – интервал варьирования переменного фактора, кг.

Объем воды M_{w1}, л, необходимой для затворения цемента, определяется по водоцементному отношению M_{w1}/M_c=0,33. Дозировка химической добавки M_z, кг, принимается в количестве 3% от массы портландцемента. Дозировки концентрата пенообразователя $M_п$ – X_4, кг, и воды для раствора пенообразователя M_{w2} – X_5, л, определяются по формулам:

$$X4 = 1{,}46\,V_з\,, \quad (3)$$

$$X5 = 44{,}12\,V_з\,. \quad (4)$$

На третьем этапе приготавливают цементное молочко. В смеситель добавляют воду, химическую добавку, портландцемент. Портландцемент загружают в смеситель в последнюю очередь, после полного растворения в воде химической добавки (время перемешивания около 1 минуты). После добавки цемента смесь перемешивают ещё 2 минуты.

На четвёртом этапе производится приготовление пены плотностью 50 кг/м^3. В пеногенератор заливают через приёмную воронку концентрат пенообразователя, а затем воду. С помощью компрессора в пеногенератор закачивают воздух в течение 5 минут до момента получения пены плотностью 50 кг/м^3.

На пятом этапе приготавливают пенобетонную смесь (рис. 7). Полученная пена под давлением, которое создаёт компрессор, подаётся в работающий смеситель. Продолжительность перемешивания в смесителе цементного молочка и пены составляет 2 минуты.

Рисунок 7. Приготовление пенобетонной смеси

На шестом этапе определяется объём пенобетонной смеси $V_{пс}$, м^3. При этом должно соблюдаться условие:

$$V_з \le V_{пс}\,. \quad (5)$$

Если условие (5) не выполняется, приготавливается дополнительная порция пены и добавляется в смеситель в количестве 6-8% (от объёма замеса $V_з$). После чего повторяются пятый и шестой этапы.

На седьмом этапе определяется средняя плотность пенобетона ρ_m, кг/м^3, по формуле:

$$\rho m = \frac{X1 + X10{,}16 + (X4 - X4/1{,}1) + X3}{Vпс}\,. \quad (6)$$

На восьмом этапе пенобетонную смесь подают с помощью героторного насоса в ограждающую конструкцию или форму. Температура окружающего воздуха должна находиться в пределах 18…30 °С. Высота каждого слоя пенобетонной смеси не должна превышать 150 мм. Каждый последующий слой пенобетонной смеси укладывают на предыдущий через сутки. Поверхность пенобетонной смеси после выравнивания накрывают полиэтиленовой плёнкой и выдерживают семь суток. В первые сутки твердения пенобетона не допускают воздействий на него вибрации, толчков.

Таким образом, рассмотренная методика позволяет получать пенобетон естественного твердения с требуемыми физико-механическими свойствами, что очень важно при проектировании толщины чердачной теплоизоляции. Дальнейшие исследования предусматривают изучение новых технологических процессов позволяющих повысить прочность и долговечность пенобетона без увеличения его средней плотности за счёт снижения водоцементного отношения и применения дисперсного армирования.

Литература

1. Легалов И. Н., Александров Е. Е., Лагутенко М. И. Энергоэффективный дом («passive house») – дом будущего // Популярное бетоноведение. 2008. № 3. С. 81-84.
2. Вылегжанин В. П., Пинскер В. А. Эффективность ячеистых бетонов в ограждающих конструкциях // Популярное бетоноведение (Приложение к журналу). 2008. С. 35-37.
3. Ватин Н. И., Володин В. В., Золотарёва Е. А., Петров К. В., Жмарин Е. Н. Реконструкция крыш Санкт-Петербурга на основе лёгких стальных тонкостенных конструкций и антиобледенительной системы // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 2 (12). С. 59-64.
4. Петраков Б. И. Заявка 2010151109 Российская Федерация, МПК С04 В38/10. Смесь для изготовления пенобетона; заявитель Военная академия тыла и транспорта имени генерала армии Хрулёва А. В; приоритет 13.12.2010.
5. Баталин Б. С., Пряхин И. П. Использование цемента в приготовлении пенобетона // Технологии бетонов. 2008. № 7. С. 64-65.
6. Кобидзе Т. Е., Коровяков В. Ф., Киселёв А. Ю., Листов С. В. Взаимосвязь структуры пены, технологии и свойств получаемого пенобетона // Строительные материалы. 2005. № 1 (601). С. 26-29.
7. Шахова Л. Д., Рахимбаев Ш. М., Черноситова Е. С., Самборский С. А. Роль цемента в технологии пенобетонов // Строительные материалы. 2005. № 1 (601). С. 42-44.
8. Пахтинов В. М. Сланцевский цементный завод «Цесла» // Популярное бетоноведение. 2009. № 3. С. 113-115.
9. Коковин О. А., Ромахин В. А., Будникова П. П. К вопросу о росте сырцовой прочности в пенобетонных массивах // Строительные материалы. 2006. № 1 (613). С. 41-43.
10. Шахова Л. Д., Черноситова Е. С., Гончаров Д. В. Сопоставление расчётных и экспериментальных значений теплопроводности пенобетонов // Строительные материалы. 2007. № 8 (632). С. 36-37.
11. Семченков А. С., Ухова Т. А., Сахаров Г. П. О корректировке равновесной влажности и теплопроводности ячеистого бетона // Строительные материалы. 2006. № 6 (618). С. 4-7.
12. London A. C. Effect of moisture concrete in thermal conductivity // Autocl. Aer. Concr. Moist. and Proper. Amsterdam. 1983. Pp. 131-141.
13. Лундышев И. А. Методика расчёта толщины слоя монолитного пенобетона, применяемого для теплоизоляции трубопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 8 (10). С. 47-51.
14. Hums D. Relation between humidity and heat conductivity in aerated concrete // Autocl. Aer. Concr. Moist. and Proper. Amsterdam. 1983. Pp. 110-120.
15. Балмасов Г. Ф., Мешков П. И. Пенообразователь Foam Cem для ячеистого бетона // Строительные материалы. 2006. № 6 (618). С. 20-21.
16. Шлегель И. Ф., Шаевич Г. Я., Корчагин А. Б., Лукановский Е. А., Карабут Л. А., Беляев А. А., Пуликов В. А. Новый насос для пенобетона // Строительные материалы. 2005. № 1 (601). С. 24-25.
17. Руководство по подбору состава тяжёлого бетона. НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1979. 103 с.
18. Адлер Ю. П., Макарова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 278 с.

Максим Андреевич Трембицкий, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(911)263-69-38; эл. почта: tryamhello_86@mail.ru

Составы и свойства пеностеклокристаллических материалов из композиций стеклобоя и высококальциевого шлака

Аспирант Д.Г. Портнягин*;
К.т.н., доцент Ю.В.Селиванов;
Д.т.н., профессор В.М. Селиванов;
Д.т.н., профессор А.Д. Шильцина,
Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВПО Сибирский федеральный университет

Ключевые слова: пеностеклокристаллические материалы; гранулированные материалы; блочные материалы; стеклобой; высококальциевый шлак

Пеностеклокристаллические материалы с высокими показателями теплофизических и механических свойств из композиций с пониженным расходом стеклобоя, дефицитного как вида сырья, наиболее перспективны для теплоизоляции строительных конструкций. Разработка составов и исследование свойств таких материалов весьма актуальны [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Решение этих задач позволит расширить производство пеностеклокристаллических материалов на территории России.

К настоящему времени исследованы составы и свойства пеностеклокристаллических материалов из композиций, в которых уменьшение расхода стеклобоя достигается его частичной или полной заменой диатомитом, трепелом, опокой, перлитом [7, 8, 9]. Однако перечисленные виды сырья для многих регионов России, в том числе Сибири, являются привозными, а значит, с экономической точки зрения неэффективными для применения в пеностеклокристаллических материалах.

В данной работе приведены результаты исследования свойств пеностеклокристаллических материалов из композиций стеклобоя и высококальциевого шлака от сгорания бурых углей Канско-Ачинского бассейна, на которых работают ТЭЦ Хакасии, Красноярского и Алтайского краев, Новосибирской области.

При проведении исследований в композициях со стеклобоем из смеси оконного и тарного стекла в соотношении 1:1 использовали шлак жидкого шлакоудаления Абаканской ТЭЦ. Средний химический состав применяемых сырьевых компонентов приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав сырьевых компонентов

Наименование сырья	Содержание оксидов, % мас.							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	п.п.п.
Стеклобой	67,40	5,81	1,76	7,21	3,38	12,73	2,00	–
Высококальциевый шлак	50,69	8,09	8,94	27,51	3,50	0,27	0,20	0,8

В соответствии с данными, приведенными в работе [10], определили, что высококальциевый шлак относится к кислым. Рентгенофазовым анализом установили, что он имеет подобное стеклобою аморфное строение. Высококальциевый шлак сложен в основном (80-90%) стеклофазой кальций-ферроалюмосиликатного состава и кристаллофазой (10-20%) из минералов кварца, анортита, диопсида и волластонита. Химический состав шлака и сходство аморфного строения шлака и стеклобоя явились предпосылкой к его использованию в качестве эффективного заменителя части стеклобоя в композициях. А небольшое содержание анортита, диопсида и волластонита в виде кристаллической фазы в шлаке дало основание предположить возможность повышения прочности пеностеклокристаллических материалов с его использованием в составах композиций.

При исследовании составов композиций исходили из условия их вспенивания после обжига при температуре 800-850°С, обычно применяемой для получения пеностекла [2, 9]. Поэтому стеклобой как активатор плавления композиций измельчали до тонкости, характеризуемой остатком не более 5% на сите с размером ячейки 0,063 мм, применяемой для обеспечения образования расплава при температуре 700-800°С в обжиговых материалах [11, 12]. Шлак как вовлекаемый компонент измельчали в меньшей степени – до полного прохождения частиц через сито с размером ячейки 0,16 мм, экспериментально установленным в качестве оптимальной тонкости помола.

Изготовление гранулированных и блочных пеностеклокристаллических материалов проводили с учетом экспериментально установленных оптимальных технологических условий [13]. Так, изготовление гранулированных пеностеклокристаллических материалов проводили путем грануляции композиций из смеси стеклобоя и шлака на тарельчатом грануляторе с применением в качестве связки жидкого стекла с плотностью 1400 кг/м^3 в количестве 30% с последующим обжигом полученных гранул. Для обжига гранулы диаметром 8-10 мм укладывали на огнеупорные подложки на расстоянии друг от друга. Получение блочных пеностеклокристаллических материалов проводили путем обжига подготовленного гранулята свободно засыпанного в металлические формы размером 250x120x90 мм на 1/3 их объема. Обжиг гранулированных и блочных пеностеклокристаллических материалов проводили в течение 3 часов до температуры 800°С с выдержкой 20 мин при конечной температуре.

Из показателей свойств исследованных гранулированных пеностеклокристаллических материалов, приведенных в табл.2, установили, что наилучшее их сочетание достигается при использовании в составе композиций высококальциевого шлака в количестве 30-40%. Насыпная плотность и коэффициент теплопроводности гранулированных материалов из композиций с добавкой шлака в количестве 30-40% ниже насыпной плотности и коэффициента теплопроводности гранулированного материала, полученного по той же технологии из стеклобоя без добавки шлака. При этом материалы характеризуются более высоким коэффициентом конструктивного качества, определяемого отношением прочности при сжатии в цилиндре к его насыпной плотности (0,054-0,056 против 0,043), а сами гранулы имеют более высокую прочность при сжатии (4,1-4,5 против 1,8 МПа). По совокупности свойств исследованные гранулированные пеностеклокристаллические материалы из композиций с содержанием шлака в количестве 30-40% превосходят применяемое гранулированное пеностекло.

Таблица 2. Состав и свойства исследованных гранулированных пеностеклокристаллических материалов из композиций с различным содержанием шлака

Компонент	**Состав композиций**					**Гранулированное пеностекло ТУ 5914-001-73893595-2005**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	
	Содержание компонента в составе, % мас.					
Стеклобой	100	80	70	60	50	
Высококальциевый шлак	–	20	30	40	50	
Жидкое стекло	30	30	30	30	30	
Показатель свойства						
Температура обжига, °С	800	800	800	800	800	
Диаметр гранул, мм	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20
Насыпная плотность, кг/м^3	220-230	190-200	180-190	190-200	240-250	150-200
Прочность при сжатии в цилиндре, МПа	1,2	0,9	1,0	1,1	1,2	до 0,5-1,0
Прочность гранул, МПа	1,8	3,2	4,5	4,1	3,9	
Коэффициент конструктивного качества	0,053	0,046	0,054	0,056	0,050	0,043
Водопоглощение по объему, % об.	4,1-4,7	1,2-1,8	2,8-3,4	3,1-3,7	2,1-2,7	≤10
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С	0,060-0,068	0,053-0,060	0,049-0,057	0,053-0,061	0,066-0,074	0,053-0,062

Свойства исследованных в работе блочных пеностеклокристаллических материалов, изготовленных на основе гранулята из композиций стеклобоя с добавкой высококальциевого шлака в количестве 30% (состав 1) и 40% (состав 2), приведены в табл. 3, где для сравнения указаны свойства применяемого в строительстве блочного пеностекла. Исследованные блочные пеностеклокристаллические материалы превосходят применяемое пеностекло по коэффициенту конструктивного качества при незначительном увеличении коэффициента теплопроводности.

Таблица 3. Свойства исследованных блочных пеностеклокристаллических материалов

Показатель свойства*	Блочный пеностеклокристаллический материал		Блочное пеностекло ТУ 5914-001-73893595-2005
	Состав 1	Состав 2	
Температура обжига, °С	800	800	
Плотность средняя, кг/м^3	320-330	340-350	300-400
Прочность при сжатии, МПа	4,1-4,5	4,9-5,3	1,5-3,5
Коэффициент конструктивного качества	0,132	0,148	0,071
Водопоглощение, % об.	3,4-4,8	2,9-3,4	≤10
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С	0,077-0,091	0,086-0,091	0,060-0,075

* – свойства образцов из пяти партий образцов

Высокая прочность исследованных пеностеклокристаллических материалов обусловливается их структурой и фазовым составом. Проведенные исследования показали, что структура пеностеклокристаллических материалов характеризуется наиболее благоприятным для прочности равномерным распределением пор меньших размеров (0,5-0,8 мм) между порами больших размеров (1,3-1,5 мм) по всему объему гранул и блоков (рис. 1). Материалы сложены преимущественно аморфной фазой с содержанием кристаллофазы в количестве 10-15%, которая представлена волластонитом и анортитом, упрочняющими материалы [11, 12].

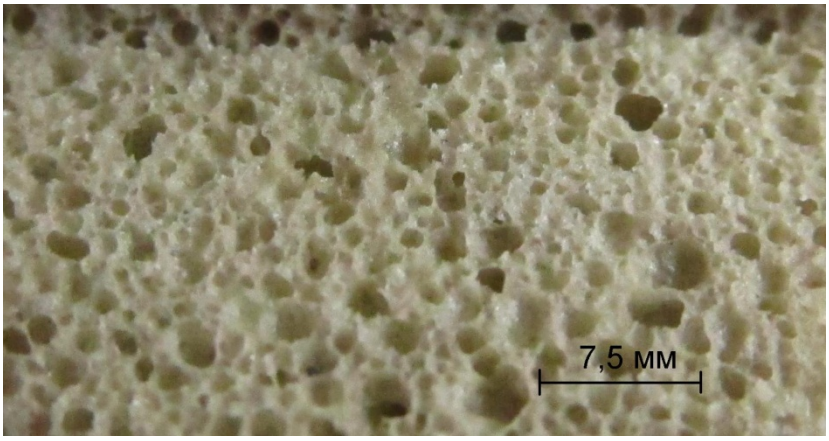


Рисунок 1. Микроструктура пеностеклокристаллического материала из композиции стеклобоя и высококальциевого шлака в количестве 30%

Данные дифференциально-термического анализа показали, что исследованные материалы вплоть до 800°С не испытывают потерь массы, а максимальное их значение, соответствующее температуре 950°С, составляет всего 0,25%. Эти результаты свидетельствуют о плавлении материала при нагревании без превращений, связанных с выделением газообразных продуктов, что позволяет их отнести к группе негорючих.

Анализ совокупности полученных результатов исследования показывает, что пеностеклокристаллические материалы из композиций с использованием высококальциевого шлака по сравнению с пеностеклом могут иметь преимущество по гигроскопичности за счет очень низкого объемного водопоглощения (табл. 2, 3). Это очень важно для сохранения стабильности их теплоизоляционных свойств в процессе эксплуатации, так как при увеличении влажности теплоизоляционных материалов за счет гигроскопичности всего на 5% их теплоизоляционная способность уменьшается почти в 2 раза [14]. Теплоизоляция из исследованных пеностеклокристаллических материалов по сравнению с теплоизоляцией из пеностекла сравнимой плотности может выдержать более высокие нагрузки без снижения качества за счет более высокого коэффициента конструктивного качества (табл. 2, 3).

При пожаре исследованные пеностеклокристаллические материалы, в отличие от волокнистых минераловатных или стекловатных изделий, содержащих не менее 5% связующего полимера, не выделяют токсичных веществ [2]. Кроме того, применение пеностеклокристаллических материалов, сравнимых по стоимости с пеностеклом за счет их одинаковой технологии изготовления, но получаемых из композиций, включающих высококальциевый шлак в значительных (30-40%) количествах, обеспечит снижение экономических издержек [10], связанных с его утилизацией.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что композиции из смеси стеклобоя и высококальциевого шлака в количестве 30-40%, гранулированные с применением жидкого стекла, после обжига при температуре 800°С обеспечивают получение гранулированных и блочных пеностеклокристаллических материалов, способных конкурировать с другими видами теплоизоляционных материалов. Насыпная плотность гранулированных пеностеклокристаллических материалов составляет 180-200 кг/м^3, прочность при сжатии в цилиндре 1,0-1,1 МПа. Средняя плотность блочных материалов составляет 320-400 кг/м^3, прочность при сжатии 4,1-5,3 МПа.

Литература

1. Апкарьян А. С., Христюков В. Г., Смирнов Г. В. Гранулированная пеностеклокерамика – перспективный теплоизоляционный материал // Стекло и керамика. 2008. № 3. С. 10-12.
2. Маневич В. Е., Субботин К. Ю. Пеностекло и проблемы энергосбережения // Стекло и керамика. 2008. № 4. С. 3-6.
3. Vereshchagin V. I., Sokolova S. N. Effect of technological parameters on the properties of granular porous crystal glass material based on ceolite-bearing // Glass Ceram. 2009. No. 66. Pp. 46-49.
4. Fernandes H. R., Tylyaganov D. U., Ferreira I. M. F. Preparation and Characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents // Ceram Int. 2009. No. 35. Pp. 229-239.
5. Bernardo E., Cedro R. et. al. Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams // Ceram Int. 2007. No. 33. Pp. 963-968.
6. Bobkova N. M., Barantseva S. E., Trusova E. E. Production of foam glass with granite siftings from the Mikashevich deposit // Glass Ceram. 2007. No. 64. Pp. 47-50.
7. Иванов К. С., Радаев С. С. Обжиговый теплоизоляционный материал из диатомита и щелочи // Строительные материалы. 2010. №11. С. 36-37.
8. Иванов Н. К., Иванов К. С. Получение ячеистого стекла на основе опаловых пород // Приложение к научно-техническому журналу «Строительные материалы». 2004. № 5. С. 13-14.
9. Казьмина О. В., Верещагин В. И., Семухин Б. С., Абияка А. Н. Низкотемпературный синтез стеклогранулята из шихт на основе кремнеземсодержащих компонентов // Стекло и керамика. 2009. № 10. С. 5-7.
10. Ватин Н. И., Петросов Д. В., Калачев А. И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2011. №4(22). С. 16-21.
11. Будников, П. П., Бережной А. С. Химическая технология керамики и огнеупоров. М. : Стройиздат, 1972. 552 с.
12. Кингери У. Д. Введение в керамику. М. : Стройиздат, 1967. 449 с.
13. Портнягин Д. Г., Селиванов Ю. В., Селиванов В. М. Пеноситаллы на основе техногенного сырья // Вестник Хакасск. техн. ин-та – филиала Сибирского федерального университета. 2008. № 26. С. 91-94.
14. Бердюгин И. А. Теплоизоляционные материалы в строительстве. Каменная вата или стекловолокно: сравнительный анализ // Инженерно-строительный журнал. 2010. №1. С. 26-31.

**Денис Геннадьевич Портнягин, Абакан, Россия*

Тел. раб.: +7(3912)35-73-05, доб.221; эл. почта: my4455@yandex.ru

Применение серы и золы ТЭЦ Норильского региона при строительстве и реконструкции гидротехнических сооружений

К.т.н., доцент Н.В. Личман*,
ФГБОУ ВПО Норильский индустриальный институт,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Ключевые слова: серное вяжущее; серные композиты; зола ТЭЦ; утилизация отходов промышленности; гидротехническое строительство

Разработка долговечных и надежных эффективных строительных изделий и конструкций продолжает оставаться одной из актуальных проблем строительного материаловедения. Если под долговечностью понимать устойчивость по отношению к широкому диапазону агрессивных воздействий в течение длительного периода эксплуатации без значительной потери технических характеристик, то очевидно, что повышенные требования, предъявляемые к гидротехническим сооружениям, совершенно оправданы. Эксплуатация в жестких агрессивных условиях (особенно в зоне переменного уровня воды в периоды межсезонья при многократно повторяющихся циклах замораживания-оттаивания) приводит к разрушению конструкций в силу прогрессирующей коррозии и неравномерных температурно-влажностных деформаций в бетоне конструкций. В этом случае для длительной эксплуатации необходимо проводить дорогостоящие регулярные ремонтные и восстановительные работы. В связи с этим наиболее рациональным с точки зрения технико-экономической целесообразности является использование на этапе изготовления бетонных смесей особых технологий, снижающих проницаемость бетона гидротехнических сооружений [1]. Композиты при этом должны отличаться сравнительно низкой стоимостью при повышенных плотности, водонепроницаемости, морозостойкости, трещиностойкости, долговечности. Достичь сочетания указанных параметров возможно в случае использования ряда техногенных отходов [2,3] и замены высокомарочного цемента на модифицированное комплексными наполнителями серное вяжущее [4,5,6,7,8,9].

Известно, что серные бетоны, являясь относительно новым видом материалов, отличаются рядом положительных свойств по сравнению с традиционными цементными бетонами: повышенной плотностью, отсутствием усадочных деформаций, меньшей ползучестью, водонепроницаемостью, гидрофобностью, атмосферо- и морозостойкостью, высокой химической стойкостью к слабым щелочам, кислотам, сульфатам, органическим растворителям (табл. 1), способностью твердеть под водой, быстрым набором прочности, связанным только с периодом остывания смеси, низкой стоимостью исходных материалов, что и определяет их высокую востребованность в гидротехническом строительстве. Т.о. наиболее целесообразно применять такие бетоны при аварийных работах для предотвращения фильтрации воды под давлением. В этом случае обеспечивается надежная совместная работа в силу высокого сцепления (более 1,7 МПа) серобетона с бетонными поверхностями при схожести их деформативных характеристик: модуле упругости при кратковременном нагружении у серобетона $E_в$ = (35–40)·10^3 МПа, у традиционного цементного бетона – $E_в$ = (32–37)·10^3 МПа, коэффициенте линейного температурного расширения в диапазоне температур от +20°С до +60°С у серобетона (9,3-10,3)·10^{-6} град$^{-1}$, у цементного бетона на крупном заполнителе из гранита – (9,5-9,8)·10^{-6} град$^{-1}$. Также эффективно применять серобетоны в «горячих» технологиях устройства отдельных конструктивных элементов гидротехнических сооружений при замене ими традиционных для этой области материалов.

В серных бетонах в качестве связующего используют серу, серосодержащие отходы или серные руды, которые являются попутным продуктом металлургической и нефтеперерабатывающей промышленности. Очевидно, что только строительная индустрия, как одна из самых материалоемких отраслей, способна их утилизировать, решая тем самым не только техническую задачу, но и устраняя экологическую и экономическую проблемы некоторых регионов России [10].

Таблица 1. Коэффициент химической стойкости серного бетона в различных средах

Среда	Коэффициент химической стойкости
Растворы кислот 10% концентрации	
– серная	0,87–0,90
– соляная	0,78–0,83
– азотная	0,86–0,89
Растворы солей 10% концентрации	
– сульфат натрия	0,90–0,95
– хлорид натрия	0,92–0,95
– фторид натрия	0,90–0,92
– гидроксид натрия	0,78–0,83
Магнезиально-хлоридно-сульфатная (в грунтовых водах)	0,95–0,98
Машинное масло	0,95–0,98

Эффективные решения подобных вопросов осуществляются не только в нашей стране, но и за рубежом (в частности – в Канаде, США, Чешской республике, Японии) [9,11,12], где работают крупнейшие заводы по производству сероцемента, серобетона, сероасфальта и изделий строительного назначения на их основе. В целом наблюдается общемировая тенденция вовлечения во вторичный производственный цикл серосодержащих отходов [13]. При этом основы технологии серобетонов отражены в отечественных работах Ю.М. Баженова, Г.И. Бердова, И.И. Бернея, А.Н. Волгушева, Е.В. Королева, В.И. Соломатова, Д.А. Угинчуса, В.М. Хрулева и зарубежных трудах Р. Грегора, Д. Каретти, М. Штейнберга и др. В настоящее время интерес к данной проблематике не исчерпал себя, и исследования продолжаются.

Так, в частности, предлагается перспективное, на наш взгляд, направление применения серобетонов при устройстве противофильтрационных экранов.

Известно, что одним из недостатков проектирования и строительства хвостохранилищ Норильского промышленного региона является либо полное отсутствие противофильтрационных мероприятий, либо их некачественное исполнение. Этим и объясняются потери объемов оборотного водоснабжения, загрязнение поверхностных и подземных вод (ярким примером чего являются хвостохранилища Надеждинского металлургического завода и «Лебяжье»), оттаивание вечномерзлых грунтов оснований и сопровождающие их деформации подпорных конструкций. Все это в последующем приводит к существенным затратам на обеспечение статической и фильтрационной устойчивости сооружений.

Различные предлагаемые мероприятия по устройству противофильтрационных экранов, способных полностью предотвратить фильтрацию из накопителя, схожи одним существенным недостатком – сравнительно сложной технологией при высоких трудозатратах и стоимости работ. Учитывая положения концепции развития горно-металлургического комплекса ОАО «ГМК «Норильский никель», в соответствии с которыми предполагается наращивание объемов перерабатываемой руды, можно предположить, что количество отходов также будет постоянно увеличиваться. Таким образом, возникает весьма важная проблема не только безопасного и экологически чистого складирования отходов, но и поиска технологий их утилизации, в том числе и при устройстве гидротехнических сооружений.

Задача наших исследований заключалась в использовании зол ТЭЦ и серосодержащих материалов Норильского промышленного региона в строящихся и проектируемых хвостохранилищах с учетом особенностей эксплуатации в криолитозоне. Одновременно изучались возможности пропитки серой и серным вяжущим существующих дамб; устройства водонепроницаемых покрытий из серы и серного вяжущего на откосах ограждающих дамб и в пляжной зоне; устройства противопылевых завес в основаниях пионерных дамб строящихся хвостохранилищ.

Одним из основных используемых компонентов в решении поставленных задач является техническая сера Норильского горно-металлургического комбината – это практически чистый продукт, структура и свойства которого отвечают требованиям ГОСТ 127.1-93. Она характеризуется оптимальной температурой плавления (112,8°С), низкой вязкостью, достаточной механической прочностью, низкой химической активностью, высокой адгезией к заполнителям бетона благодаря кристаллизации при переходе из расплавленного состояния в силу своей термопластичности, низкой себестоимостью и доступностью. Гидрофобность, высокая химическая стойкость серы к кислотной и солевой агрессии, химическая инертность по отношению к металлической арматуре делают серное связующее предпочтительнее цементного для производства изделий и конструкций, эксплуатирующихся в воде и химически агрессивных средах. При этом недостатки чистого серного связующего – хрупкость и невысокая прочность, устраняются модификацией наполнителями и химическими добавками.

Наполнители, вводимые в расплав, в зависимости от их природы, количества и дисперсности существенным образом повышают твердость и прочность, уплотняя и стабилизируя структуру получаемого композита, а также снижают расход серы [14,15]. В качестве наполнителей используются тонкодисперсные материалы с удельной поверхностью не менее 2000 см^2/г. В любом промышленно развитом регионе имеются такие материалы, примером которых являются золы ТЭЦ.

За годы реформ и структурной перестройки промышленности в России почти на треть снизилось использование золошлаковых отходов, и в настоящее время их выход не превышает 5%, что в пересчете составляет примерно 0,5 млн. т на 1 млн. кВт мощности ТЭЦ в год [16]. В Норильском промрайоне ежегодно складируется около 4 тыс. тонн золы ТЭЦ. Содержание золошлаковых отвалов, в которых скопились миллионы тонн золы ТЭЦ, требует значительных затрат. При этом в последнее время в России экологическим аспектам развития техники и технологии стали уделять более пристальное внимание, в связи с чем вновь актуальным стал комплексный поход в решении задач по утилизации различных отходов, в том числе зол и шлаков, которые обладают специфическими свойствами, определяющими возможность их эффективного использования в производстве различных строительных материалов, что подтверждается многолетними научными исследованиями и практическим опытом.

Имеются основательные теоретические проработки вариантов утилизации золы применительно к выпуску широкой номенклатуры строительных материалов [17,18]. Однако на практике довольно часто не используются исходные преимущества этих отходов: дисперсность, агрегатное состояние, наличие химически активных фаз и поверхностно-активных веществ. Обычно основным критерием выбора отходов служит их химический состав. При таком подходе вторичное сырье безвозвратно теряет свои уникальные свойства [6].

Зола Норильской ТЭЦ, как показали исследования, имеет высокую удельную поверхность (3000–4000 см^2/г), термостойкость (до 200°С), при этом ее отличает стабильный химический состав (табл. 2) по вертикали и горизонтали в пределах основного отвала, что и определяет возможность ее использования в качестве структурообразующего наполнителя при изготовлении серного вяжущего.

Таблица 2. Химический состав золы ТЭЦ

Наименование	Содержание оксидов, %							
	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	$Na_2O + K_2O$	SO_3	п.п.п.
Зола ТЭЦ	57,24	24,37	–	1,81	7,3	8,35	0,93	11,86

Наполнение расплава серы тонкодисперсным инертным наполнителем, играющим роль зародышей кристаллов, приводит к увеличению структурных центров с образованием плотно упакованной матрицы, что подтверждается электронномикроскопическими исследованиями (рис. 1, 2), выполненными в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН на электронном микроскопе SEM ABT 55 (Япония) с применением микрозондовой приставки Link AN 10000 (Великобритания).

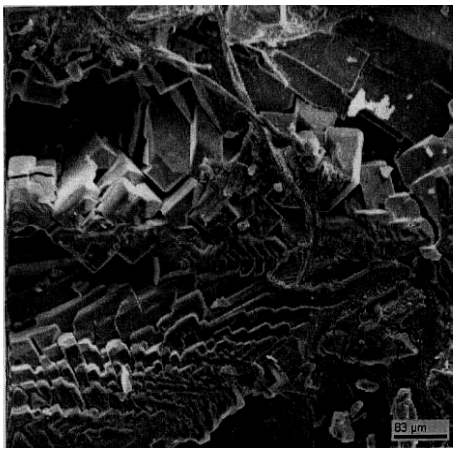


Рисунок 1. Кристаллы застывшего расплава серы (увеличение 100х)

Рисунок 2. Сера с золой в качестве наполнителя (увеличение 100х)

Оптимальное соотношение между количеством серы и наполнителя способствует снижению пористости, повышению водостойкости и прочности серного бетона или застывшего серного вяжущего, которое может применяться само по себе вне состава композита. Исследуя зависимости свойств серного вяжущего от степени наполнения, удалось получить композит с высокими физико-механическими характеристиками (табл. 3), определенными по стандартным методикам ГОСТ 10180-90, ГОСТ 12730.3-78, ГОСТ 27677-88.

Таблица 3. Свойства серозольного композита оптимизированного состава

Серозольное вяжущее	Показатели качества	
Техническая сера (ГОСТ 127.1-93), зола ТЭЦ	Предел прочности при сжатии, МПа	26,7
	Водопоглощение, масс. %	1,0–1,1
	Коэффициент коррозионной стойкости в магнезиально-сульфатно-хлоридной среде	0,9

При изготовлении бетонов на серозольном вяжущем в качестве заполнителей в наших исследованиях использовались отходы металлургической промышленности: шлаковые пески (табл. 4) и отсевы базальтовых горных пород, которые способствуют увеличению прочности композита за счет повышения сцепления с серной матрицей в силу весьма развитой шероховатой поверхности зерна. В результате исключительно из техногенных отходов был получен мелкозернистый прочный ($R_{сж}$ = 40 МПа) серный бетон (ρ = 2300–2500 кг/м^3), превосходящий цементный бетон по плотности, водонепроницаемости, морозостойкости и химической стойкости.

Таблица 4. Химический состав шлакового песка

Наименование	Содержание оксидов, мас. %								
Гранулированный шлак Никелевого завода	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	Na_2O+K_2O	SO_3	Fe_2O_3	FeO	S
	39	8	6	6	1,01	0,99	–	38	–

Также были исследованы возможности использования технической серы и композиций на ее основе в гидротехническом строительстве в качестве противофильтрационного экрана при подготовке оснований строящихся и действующих хвостохранилищ. В частности, было предложено использовать искусственный щебень на основе технической серы с наполнителем – золой ТЭЦ (табл. 2) [19, 20]. Щебень был получен путем охлаждения серного вяжущего с последующим его дроблением и рассеиванием на фракции 5–10 мм, 10–20 мм и 20–40 мм. В дальнейшем искусственный щебень использовался при подборе составов различных материалов, которые могут служить противофильтрационным экраном. Для этого щебень разных фракций заливался расплавом серы, вязкость которого при температуре 155°С составляет 0,0065 Па·с и приближается к вязкости воды.

С целью изучения свойств получаемых серобетонных композитов в лабораторных условиях изготавливались образцы с размером ребра 100 мм путем заполнения предварительно нагретых металлических форм серозольным щебнем с последующей заливкой расплавом серы (140°С). Распалубливание образцов производилось после полного остывания.

Сравнительно простая технология пропитки серозольного щебня серным расплавом [15] обеспечивает его равномерное распределение по всему объему, в результате чего достигается высокая плотность и низкое водопоглощение образцов, физико-механические характеристики которых приведены в табл. 5. При этом определение коэффициента фильтрации выявило высокую водонепроницаемость.

Основными параметрами материала, обеспечивающего устойчивость ограждающих дамб хвостохранилищ, являются плотность, удельное сцепление, угол внутреннего трения, коэффициент фильтрации как намывного массива, так и материала (шлак металлургических заводов), используемого для отсыпки дамб под распределительный пульпопровод. Сравнительная характеристика серосодержащих материалов и металлургического шлака, используемого в настоящее время на хвостохранилищах Норильского промышленного района, приведена в табл. 6.

Очевидно, что физико-механические характеристики предложенных серосодержащих композитов существенно отличаются в положительную сторону от применяемых в настоящее время материалов. При этом оценочные расчеты устойчивости ограждающей дамбы, проведенные по двум вариантам: существующая технология (металлургический шлак); использование серосодержащих материалов, показывают, что значения коэффициента устойчивости с применением серосодержащих материалов повышаются на 10-15%. Промышленная апробация, проведенная в 2005 г. на хвостохранилище, подтвердила выводы лабораторных исследований и предварительных расчетов.

Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать, что на основе техногенных отходов можно получить высококачественные бетоны и серные композиты специального назначения, что позволит существенно расширить области и степень утилизации техногенных отходов.

Таблица 5. Физико-механические свойства противофильтрационных материалов на основе серозольного щебня и серного связующего

№ образца	Состав композиции	Фракция серощебня, мм	Степень пропитки	Основные свойства		
				ρ_o, кг/м^3	*W*, %	$R_{сж}$, МПа
4	серозольный щебень, расплав серы	5-10	равномерная до дна	2024	0,1	21,5
5		10-15		1865	0,1	21,1
6		10-20		1887	0,2	20,2

Таблица 6. Сравнительная характеристика серосодержащих материалов и металлургического шлака

Наименование параметра	Металлур-гический шлак	Металлургический шлак с наполнителем из отвальных «хвостов»	Серозольный щебень	Серозольный щебень, пропитанный модифицированной серой
Плотность, т/м^3	1,8–2,0	2,0–2,4	1,8–2,2	2,0–2,5
Удельное сцепление, МПа	0,01	0,05–0,2	0,04–0, 8	3,0–12,0
Угол внутреннего трения, градус	35–40	30–35	28–33	35–40
Коэффициент фильтрации, м/сут	20–50	0,01–1,0	5–50	0

По результатам комплексных исследований определены наиболее перспективными направлениями использования предлагаемых материалов:

- строительство морских и речных портовых сооружений, пирсов, волнорезов, дамб, причалов;
- устройство противофильтрационных экранов и противофильтрационных завес действующих и строящихся хвостохранилищ;
- совмещение противофильтрационных устройств с сооружением дамб в виде монолитных конструкций из серных бетонов.

Литература

1. Пухаренко Ю. В., Аубакирова И. У., Староверов В. Д. Коррозионностойкие наномодифицированные цементные бетоны // Технологии бетонов. 2010. №7–8. С. 24–27.
2. Боженов П. И. Комплексное использование минерального сырья и экология: Учебное пособие. М. : АСВ, 1994.
3. Волженский А. В., Иванов И. А., Виноградов Б. Н. Применение зол и шлаков в производстве строительных материалов. М. : Стройиздат, 1984. 216 с.
4. Альбакасов А. И., Гарькина И. А., Данилов А. М., Королев Е. В. Дисперсные фазы для серных композитов специального назначения // Региональная архитектура и строительство. 2011. №2. С. 18–23.
5. Киселев Д. Г., Королев Е. В., Прошина Н. А., Альбакасов А. И. Комплексный способ управления структурой и свойствами серных радиационно-защитных строительных материалов // Региональная архитектура и строительство. 2010. № 1. С. 4–10.
6. Личман Н. В. Комплексное исследование золы ТЭЦ как наполнителя в серные композиционные материалы // Строительные материалы. 2009. №12. С. 75–77.
7. Личман Н. В., Уголков В. Л. Создание строительных связующих серных композиций как один из путей утилизации золы ТЭЦ // Сухие строительные смеси. 2010. №3. С. 32–33.
8. Пат. 2276115 Российская Федерация, МПК C04B 12/00. Вяжущее / Л.В. Кухаренко, Н.В. Личман, И.В. Никитин. – №2003136225/03; приоритет 15.12.2003; опубл. 10.05.2006. Бюл. №13.
9. McBee W. C., Saylak D., Sullivan T. A., Barnett R. W. Sulfur as a partial replacement for asphalt cement // World Construction. 1977. №10. Pp. 44–47.
10. Draycott T., Schoor K., Wong G. World sulfur outlook [presentation] // Sulphur 2005: conference, 23–26 october, 2005, Moscow, Russia. Pp. 1-15.
11. Chasez K., Mulhall A. North American sulphur: a volatile future // Conference. 2–5 november, 2003. Alberta, Canada. Pp. 37–50.
12. Thaulow Niels. Sulphuric impregnated concrete // Cement and Concrete Research. 1974. №2. Pp. 269-277.
13. Kaitmazov N. G., Kozlov A. N., Ilyukhin I. V. Sulphur dioxide recovery from smelting off-gas // Sulphur 2003, Banff–Canada, 2-5 November, 2003. Pp. 23–35.
14. Алехин М. Н., Васильев В. Ю., Мотин Н. В., Сарычев И. Ю. Сероасфальтобетонные смеси // Строительные материалы. 2011. №10. С. 17–19.
15. Пат. 2276119 Российская Федерация, МПК C04B 28/36. Сырьевая смесь для изготовления строительных конструкций и изделий / Л. В. Кухаренко, Н. В. Личман, И. В. Никитин, Б. А. Дунаев. – №2004101342/03; приоритет 16.01.2004; опубл. 10.05.2006. Бюл. №13
16. Чистов Ю. Д., Чумаков Л. Д. Технологические и эколого-экономические аспекты утилизации отходов ТЭС // Строительные материалы XXI века. 2004. №3. С. 66–67.
17. Панибратов Ю. П., Староверов В. Д. К вопросу применения зол ТЭС в бетонах // Технологии бетонов. 2011. №1–2. С. 43–47.
18. Стольников В. В., Кинд В. В. Гидротехнический бетон с добавкой топливной золы-уноса. М.–Л. : Госэнергоиздат, 1963. 86 с.
19. Кухаренко Л. В., Личман Н. В., Личман Я. В. Искусственный щебень из техногенных отходов Норильского комбината // Материалы региональной научно-технической конференции «Молодые ученые Норильского промышленного района – Российскому Северу». Норильск : НИИ, 2006. С. 115–118.
20. Пат. 2302531 Российская Федерация, МПК E21F 15/00. Состав закладочной смеси / Л. В. Кухаренко, Н. В. Личман, Н. Н. Плеханова, Я. В. Личман. – №2005120480/03; приоритет 30.06.2005; опубл. 10.07.2007. Бюл. №19.

** Нелли Викторовна Личман, г. Норильск, Россия*

Тел. раб.: +7(3919) 42-16-32; эл. почта: norvuz.nii@norcom.ru

Силикатный кирпич в наружных стенах зданий: анализ состояния, прогноз долговечности и способы ее повышения

Д.т.н., профессор В. В. Бабков;
аспирант Н. С. Самофеев*;
к.т.н., доцент А. Е. Чуйкин,
ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет

Ключевые слова: карбонизация структурообразующих гидросиликатных фаз; поврежденность наружных стен; продление и повышение долговечности; эксплуатационная надежность

Применение силикатного полнотелого кирпича в жилищном домостроении имеет длинную историю. Характерным примером развития этой отрасли является Республика Башкортостан.

Силикатный полнотелый кирпич как основной строительный материал начал применяться в Башкирии в начале XX века. Первое производство силикатного кирпича (по архивным материалам Уфимской губернии) относится к 1904 году, тогда как производство керамического кирпича уже к середине 1880 гг. в Башкирии реализовывалось на 9 заводах, из них 8 располагалось в Уфе. Первое производственное оборудование УКСМ (Уфимский Комбинат Строительных материалов, ныне «ОАО Башкирский кирпич») было представлено одним прессом, двумя гасильными барабанами и двумя автоклавами, обеспечивали работу известковый (пос. «Александровка») и гипсовый (пос. «Новиковка») заводы, располагавшиеся вблизи Уфы. К концу 1920-х годов жилищный фонд города насчитывал почти 10 тысяч домов: главным образом это были одноэтажные деревянные постройки. На всю Уфу приходилось всего 484 кирпичных здания, и только 41 из них имело три этажа.

Активное применение силикатного кирпича в жилищном домостроении началось после принятия в первой половине 1950-х гг. «Генерального плана реконструкции и развития г. Уфы». Жилые дома, построенные в этот период, реализовывались в основном по типовым сериям (1-447 и 1-511) в силикатном кирпиче с толщиной наружной стены 640 мм в 4-5-этажном исполнении.

В целом, развернутая в то время жилищная программа в значительной степени решила острый дефицит достаточно комфортных и пригодных для проживания жилых домов для многих жителей не только Уфы, но и в целом по СССР. Объем введенного жилого фонда в период с 1940-хх по 1970-е гг. на основе силикатного кирпича в крупных городах Республики Башкортостан оценивается в 18,3 млн. м^2 общей площади, в т.ч. в Уфе примерно 6–6,5 млн.м^2.

Стоит отметить, что на современной территории Уфы сосредоточено более 200 крупных и средних промышленных предприятий, большая часть которых расположена в северной части города. По данным 2011 г. по количеству вредных выбросов столица республики Башкортостан занимает 9 место по России. Значительная часть жилых домов на основе силикатного полнотелого кирпича расположена в Орджоникидзевском и Октябрьском районах города и, учитывая розу ветров, находится в наиболее неблагоприятной экологической ситуации.

Очевидно, что силикатный кирпич автоклавного твердения, применяемый в массовом строительстве по типовым сериям жилых домов в Уфе, после 70 лет эксплуатации требует комплексной оценки изменения основных эксплуатационных свойств материала в конструкции наружной стены.

Исследование протекающих в структуре силикатного кирпича процессов и их последствий, а также вызывающих эти изменения причин, является актуальной задачей. Ее решение позволит более достоверно прогнозировать поведение материала кирпичных стен на основе силикатного кирпича в последующий период эксплуатации. В данной статье силикатный кирпич рассматривается в составе одной из наиболее повреждаемых частей здания – стеновой ограждающей конструкции жилого дома – в условиях длительной эксплуатации в крупном промышленном городе с развитой нефтехимической и химической промышленностью и со сложной экологической обстановкой.

В период 2006-2008 гг. специалистами кафедры «Строительные конструкции» УГНТУ в Уфе были проведены натурные визуальные обследования более 80% (около 600 объектов) 4-5-этажных жилых домов на основе силикатного кирпича постройки 40-70-х гг. с фотофиксацией характерных повреждений и дефектов наружных стеновых конструкций. По результатам

обследований были выявлены основные деструктурирующие факторы [1, 2], воздействующие на силикатный кирпич в конструкциях наружных стен:

- попеременные увлажнение и осушение поверхностного слоя, вызывающие неравномерные объемные деформации набухания-усадки, обусловленные действием механизма сорбции-десорбции, а также напряжений капиллярного стягивания, приводящие к развитию внутренних напряжений и локальным структурным повреждениям, деструкции материала. Природа этих механизмов связана с замачиванием наружной стены косым дождем и действием конденсатообразования;
- процессы замораживания-оттаивания, сочетающиеся с поверхностным увлажнением, приводящие к деструкции и деградации поверхностных слоев материала;
- изменения, вызванные воздействием углекислого газа воздуха на структуру гидросиликатной связки силикальцитного материала;
- объемное глубокое замачивание стены (подкарнизной и подоконной зон), связанное с залповым попаданием влаги при нарушениях кровли и подоконных водоотливов, нарушениях общих систем водостоков. При сочетании с замораживанием и оттаиванием силикатная кладка в этих условиях подвергается массированному разрушению и вывалам.

Особое место среди механизмов разрушения силикатной кладки занимает глубокое замачивание массива кладки на большую глубину по механизму ее промачивания дефектами кровли и подоконной защиты. Совпадение такого глубокого замачивания и замораживания-оттаивания в переходные периоды года приводит к интенсивному размораживанию кладки на большую глубину. Восстановление несущей способности и ремонт кладки наружных стен в данном случае связаны с переборкой кладки и ее заменой на новый полнотелый силикатный кирпич.

Оценка состояния силикатного кирпича и кладочного раствора в конструкциях наружных стен в лабораторных и натурных условиях была проведена на образцах 40-х, 70-х и 2000-х гг. с диагностикой изменения основных физико-химических и физико-механических параметров.

Обследованиями установлено, что глубина поверхностного слоя элементов кладки, полностью деструктированного за счет попеременного замачивания – осушения в летний и замораживания-оттаивания в переходные периоды (осень – зима, зима – весна), а также карбонизации и перекристаллизационных процессов в гидросиликатных фазах структуры силикатного кирпича, на объектах 70-х годов составляет 3-4 мм, на объектах 40-хх гг. – 8-10 мм. За пределами деструктурированного слоя структура силикатного кирпича сохраняет прочность и жесткость.

Интенсивную деструкцию поверхностного слоя можно объяснить действием механизма коррозии II вида по В.М. Москвину. В данном случае в силу развития внутренних напряжений от воздействия попеременного замачивания-осушения и замораживания-оттаивания происходит частичная деструкция силикатного материала. Содержащаяся в воде углекислота (H_2CO_3), проникая в структуру разуплотненного материала, образует растворимый гидрокарбонат кальция ($Ca(HCO_3)_2$), который, диффундируя к наружной поверхности кирпича, вымывается дождевой водой, снижает относительное содержание кальцита в этой зоне кирпича, вплоть до его полной деструкции.

Прочность на сжатие образцов силикатного кирпича лицевого слоя кирпичной кладки за пределами деструктурированного слоя наружной стены жилых домов начала 40-х – середины 50-х гг. в среднем составила 8,4 МПа, начала 60-х – середины 70-х – 10,9 МПа. С конца 40-х – начала 50-х гг. промышленное производство силикатного кирпича велось по действующему в то время ГОСТ 379-53 и для кладки наружных стен применялся лицевой кирпич марки 75, а с середины 60-х уже использовался ГОСТ 379-69, повысивший требования к облицовочному кирпичу до марки 125. Учитывая это, можно сделать вывод о применении в лицевом слое кладки на объектах 40-50-хх гг. силикатного кирпича марки около 100 (что согласуется с результатами наших испытаний изделий, взятых из наружных стен жилых домов), а на объектах 60–70-х гг – марки 125.

Предел прочности на сжатие кладочного раствора на объектах 40-х гг. постройки в среднем составил 5,6 МПа, 70-х – 7,4 МПа. На образцах силикатного кирпича 40-х гг. также было проверено сцепление кирпича с цементно-известковым раствором. Прочность раствора на отрыв составила в среднем 1.26 кгс/см^2 при когезионном характере разрушения.

Рентгенофазовым и дифференциально-термическим анализом проб, взятых на глубине 25 мм от наружной поверхности силикатного кирпича 40-х и 70-х гг., установлено, что

минералогический состав материала в основном представлен (рис. 1, 2 (а, б)) α-кварцем, низкоосновными гидросиликатными структурообразующими фазами (ксонотлит (C_6S_6H), тоберморит ($C_5S_6H_{5,5}$), гиролит ($C_2S_3H_{2,5}$)) с соотношением (CaO/SiO2) ≤ 1 и кальцитом ($CaCO_3$). Минералогический состав «молодого» кирпича (производства 2010 г), взятого для сравнения, представлен (рис.1 и 2 (в)) α-кварцем, в большей степени и высокоосновными гидросиликатами (гиллебрандит ($C_2SH_{1.17}$), фошагит ($C_5S_3H_{.3}$), афвиллит ($C_3S_2H_{.3}$)) со степенью основности (CaO/SiO2) ≥ 1 и в меньшей – низкоосновными гидросиликатными фазами (ксонотлит, тоберморит, гиролит), портландитом ($Ca(OH)_2$), а также следами кальцита.

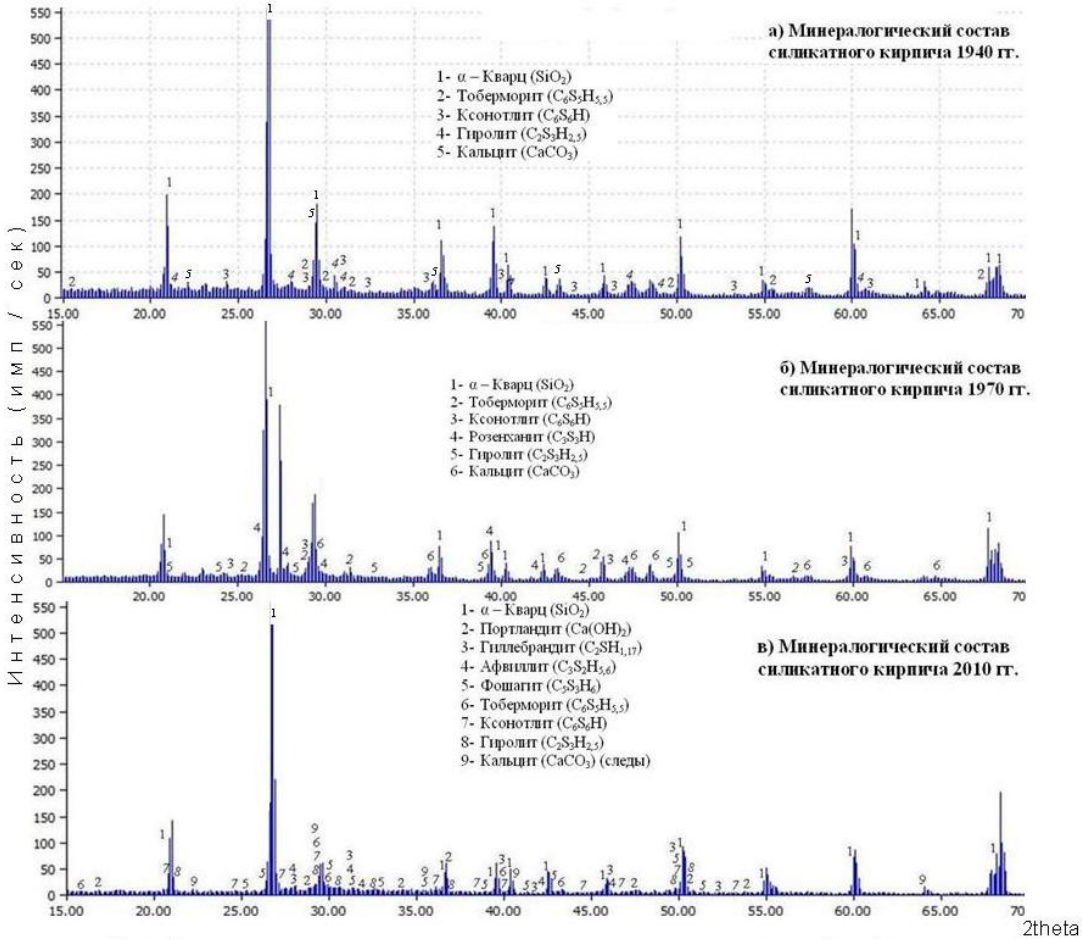


Рисунок 1. Рентгенограммы минералогического состава силикатного кирпича (на глубине 25 мм от наружной поверхности) на 70-летнем интервале эксплуатации (а-в) в климатических условиях Уфы

Отметим, что все образцы (40-х, 70-х, и 2010 гг), отобранные для исследования, взяты на объектах, имевших одного и того же поставщика силикатного кирпича (ОАО «Башкирский кирпич» (ранее ОАО «УКСМ»)).

При изучении минералогического состава проб силикатного кирпича по данным рентгенограмм (рис. 1) и дериватограмм (рис. 2) было отмечено, что частота и интенсивность пиков на рентгенограммах и отчетливо выражающиеся эндоэффекты на дериватограммах у кальцита ($CaCO_3$) увеличиваются в направлении образцов более раннего возраста (70-е → 40-е гг.), что отражает происходящие процессы карбонизации в кирпиче (рис. 3).

Наблюдаемое количественное увеличение низкоосновных гидросиликатов и кальцита в кирпиче более «зрелого» возраста, связанное с 2-х стадийным протеканием процессов перекристаллизации высокоосновных гидросиликатов кальция под влиянием CO_2 в низкоосновные (первая стадия – реакции 2.1, 3.1, 4.1, указанные в табл. 1) и далее в кальцит (вторая стадия – реакции 2.2, 3.2, 4.2, 5, 6, 7, 8), подтверждается результатами рентгенофазового и дифференциально-термического исследований проб образцов силикатного кирпича с разным сроком эксплуатации. Принципиальный характер двухстадийности подобных процессов в силикатных структурах называется также в работах [3, 5].

Расчеты, касающиеся процессов перекристаллизации основных структурообразующих фаз силикатного кирпича, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Перекристаллизация и объемные изменения в структурообразующих гидросиликатных фазах силикатного кирпича при карбонизации (по данным [3, 4])

Реакции карбонизации	Исходные продукты до карбонизации		Кристаллические продукты карбонизации ($CaCO_3$)		Коэффициент изменения объема кристаллической фазы
	Молекулярная масса, m_x	Плотность, γ_x, г/см^3	Молекулярная масса, m_y	Плотность, γ_y, г/см^3	
1	2	3	4	5	8
1 $Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O$	74,09	2,23	100,09	2,71	1,111
2.1(гиллебрандит) => (ксонотлит) $6C_2SH_{1.17}+6CO_2 = C_6S_6H+6CaCO_3+6H$ 2.2 (ксонотлит) $C_6S_6H+6CaCO_3+6H+6CO_2 \Rightarrow 12CaCO_3+6SiO_2+7H$	1159,8 - 	2,64 - 	714,96 600,54 1201,1	2,69 2,71 2,71	1,11 1,01
3.1 (фошагит) => (ксонотлит) $2C_5S_3H_{.3}+4CO_2 = C_6S_6H+4CaCO_3+5H$ 3.2 (ксонотлит) $C_6S_6H+4CaCO_3+5H+6CO_2 = 10CaCO_3+6SiO_2+6H$	1029,28 - 	2,67 - 	714,96 400,36 1000,1	2,69 2,71 2,71	1,073 0,957
4.1 (афвиллит) => (ксонотлит) $3C_3S_2H_{.3} + 3CO_2 = C_6S_6H + 3CaCO_3 + 8H$ 4.2 (ксонотлит) $C_6S_6H+3CaCO_3+8H+6CO_2 = 9CaCO_3+6SiO_2+9H$	1027,14 - 	2,64 - 	714,96 300,27 600,54	2,69 2,71 2,71	0,994 0,877
5 (ксонотлит) $C_6S_6H+6CO_2 = 6CaCO_3+6SiO_2+H$	714,96	2,69	600,54	2,71	0,834
6 (риверсайдит) $C_5S_6H_3 + 5CO_2 = 5CaCO_3 + 6SiO_2 +H_3$	694,98	2,6	500,45	2,71	0,691
7 (тоберморит) $C_6S_5H_{5,5}+5CO_2 = 5CaCO_3+6SiO_2+5,5H_2O$	739,8	2,43	500,45	2,71	0,606
8 (гиролит) $C_2S_3H_{2,5}+2CO_2 = 2CaCO_3+3SiO_2+H_{2,5}$	328,4	2,4	200,18	2,71	0,54

а

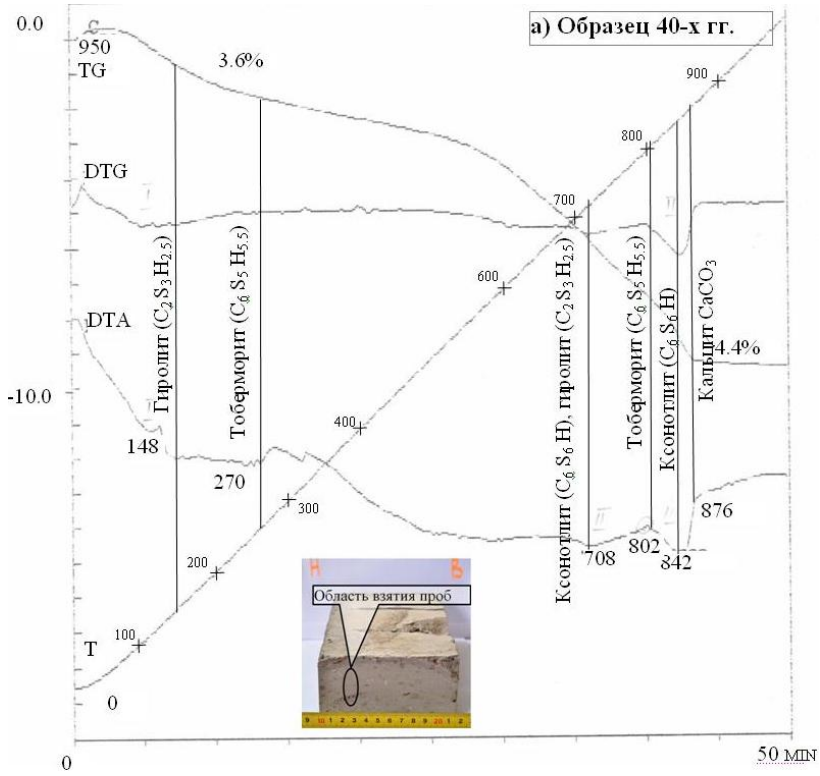
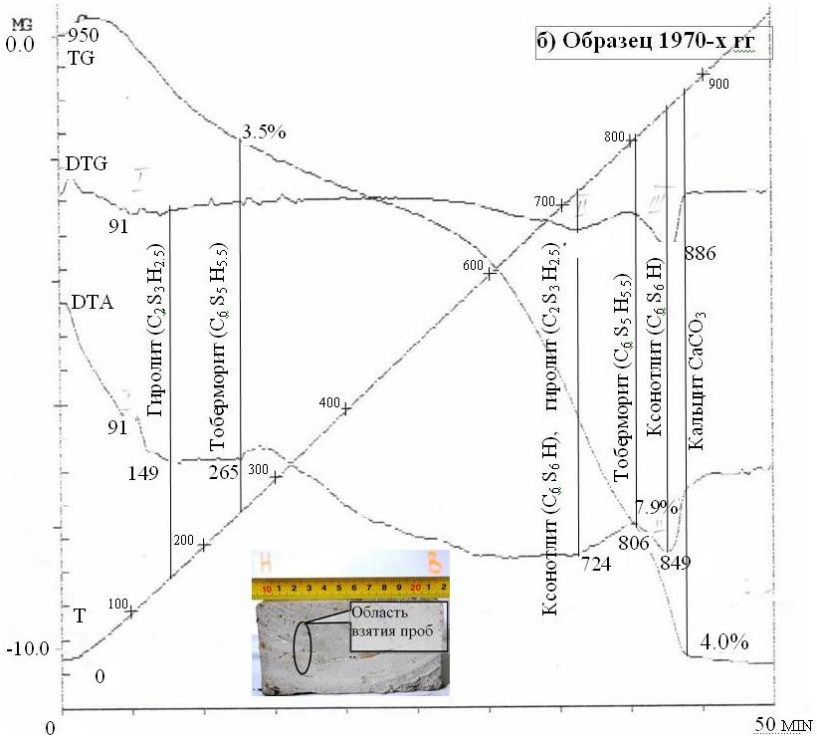


Рисунок 2. Дериватограммы проб (на глубине 25 мм от наружной поверхности) силикатного кирпича 1940-х (а), 1970-х (б) и 2010 г. (в)

б



в

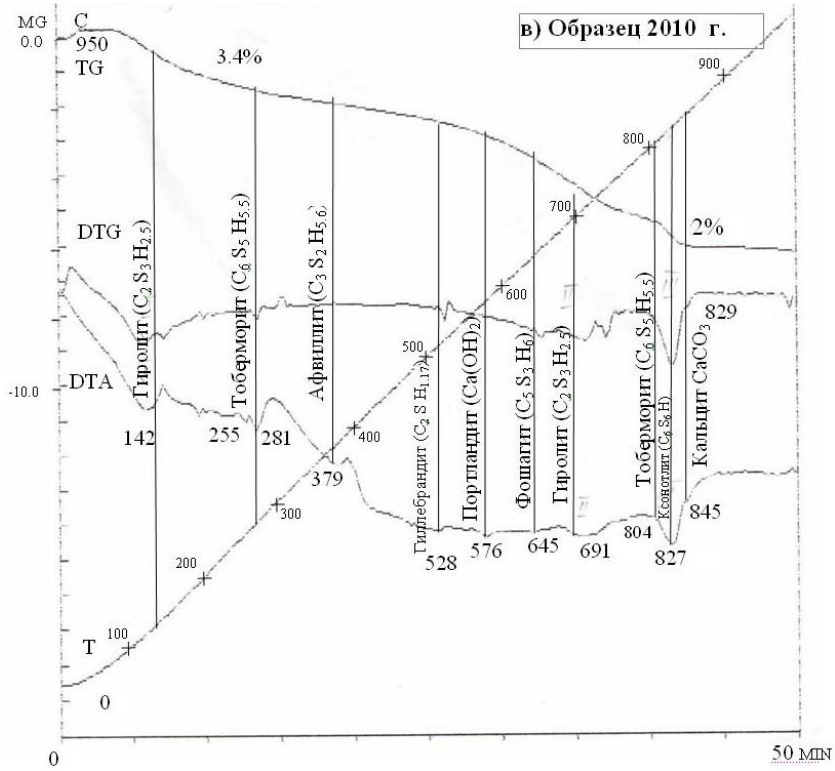


Рисунок 2. Дериватограммы проб (на глубине 25 мм от наружной поверхности) силикатного кирпича 1940-х (а), 1970-х (б) и 2010 г. (в)

В ряде работ [6, 7, 8] также отмечается, что снижение прочности облицовочного кирпича (до 15-20%) в кладке наружных стен за длительный период эксплуатации (30-40 лет) характерно для силикатного кирпича в наружном облицовочном слое. После соответствующих расчетных оценок прочностных характеристик кладок можно сделать вывод о снижении прочности стены за счет уменьшения эффективного сечения вследствие разрушения наружного слоя на 7-12 %. Состояние материалов (кирпича и кладочного раствора) более глубоких слоев кладки наружных стен зданий находится в значительно лучшем или даже в исходном состоянии, что подтверждается нашими обследованиями состояния большого количества жилых объектов на основе силикатного кирпича разного возраста.

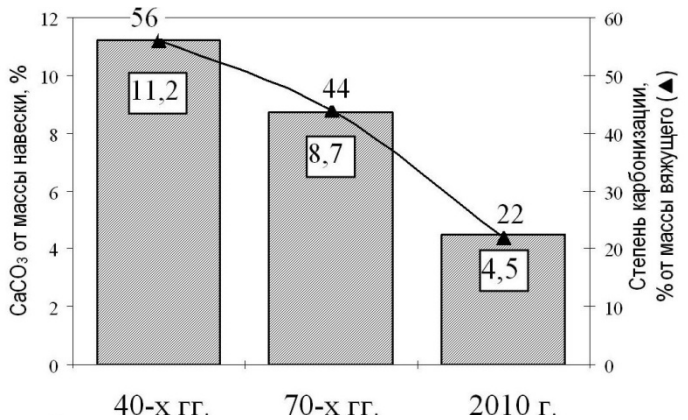


Рисунок 3. Относительное содержание кальцита в пробах силикатного кирпича разного возраста (на глубине 25 мм от наружной поверхности стены)

Анализ результатов проведенных физико-механических и физико-химических исследований позволяет сделать вывод, о том, что наружная стена в силикатном кирпиче после 50-70 лет эксплуатации в основном сохраняет свои эксплуатационные качества с уровнем потерь несущей способности до 10-15%. Продление эксплуатационного ресурса наружной стены на основе силикатного кирпича возможно путем ее защиты гидроизоляционными материалами (штукатурные системы, гидрофобные проникающие композиции) при сочетании названных систем гидрозащиты с эффективной фасадной теплоизоляцией [9, 10].

Такие системы должны обладать необходимой паропроницаемостью и обеспечивать требования нормативов по температурно-влажностному состоянию стены за зимние месяцы и годовой период [11, 12].

Литература

1. Бабков В. В., Самофеев Н. С., Проторчин Р. В., Садыков И. М. Реализация программы комплексной санации жилых домов постройки 1950-1980 гг в Республике Башкортостан // Жилищное строительство. 2010. №4. С. 22-26.
2. Бабков В. В., Самофеев Н. С. Состояние силикатного кирпича в наружных стенах жилых домов после длительной эксплуатации // Инженерные системы. 2011. Май. С. 25-28.
3. Силаенков Е. С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М. : Стройиздат, 1986. 176 с.
4. Бабков В. В., Мохов В. Н., Капитонов С. М., Комохов П. Г. Структурообразование и разрушение цементных бетонов / ГУП «Уфимский полиграфкомбинат». Уфа, 2002. 376 с.
5. Кржеминский С. А., Судина Н. К., Кройчук Л. А., Варламов В. П. Автоклавная обработка силикатных изделий. М. : Стройиздат, 1974. 160 с.
6. Песельник В. Е. Исследование поведения силикатных облицовок фасадов зданий. М. : Стройиздат, 1956. 156 с.
7. Смирнов Н. Н. Исследования в области силикатного кирпича // Труды НИИ минералогии и петрографии. 1928. Вып. 1. С. 5-17.
8. Кнатько М. В., Горшков А. С., Рымкевич П. П. Лабораторные и натурные исследования долговечности (эксплуатационного срока службы) стеновой конструкции из автоклавного газобетона с облицовочным слоем из силикатного кирпича // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 8. С. 20-26.
9. Гайсин А. М., Бабков В. В., Синицин Д. А. Теплоэффективные конструкции наружных стен в практике проектирования и строительства зданий в Республике Башкортостан, опыт эксплуатации и существующие проблемы // Строительные материалы. 2006. №5. С. 43-46.
10. Синицин Д. А., Бабков В. В. Результаты наблюдений за объектами, выполненными с применением фасадной теплоизоляции в Республике Башкортостан // Материалы X международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России» при X Международной специальной выставке «Строительство. Коммунальное хозяйство». 2006. С. 27-29.
11. Бабков В. В., Кузнецов Д. В., Гайсин А. М., Резвов О. А., Самофеев Н. С. Проблемы эксплуатационной надежности наружных стен зданий на основе автоклавных газобетонных блоков и возможности их защиты от увлажнения // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С. 28-31.
12. Савин В. К. Долговечность и эффективность зданий // Стены и фасады. 2004. № 3-4. С. 21-26.

**Никита Святославович Самофеев, г. Уфа, Россия*

Тел. моб.: +7(917)404-93-21; эл. почта: volvita@inbox.ru

Кладка из автоклавного газобетона с наружным утеплением. Особенности влажностного режима в начальный период эксплуатации

Инженер технической поддержки Г. И. Гринфельд*,
филиал ООО «ЛСР» – Стеновые
магистрант П. Д. Куптараева,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: автоклавный газобетон; наружное утепление; влагосодержание; высыхание

Введение

Одним из самых массовых стеновых материалов, используемых в настоящее время для устройства наружных ограждений, является автоклавный газобетон. Кладка из ячеистобетонных блоков с тонким швом из бетона марок по плотности D500 и ниже обладает теплопроводностью в пределах 0,15 Вт/м×°С [1, 2], что позволяет получить достаточное сопротивление теплопередаче при разумной толщине конструкции (R_0 до 4,3 м^2·°С/Вт при марке бетона D400 и толщине конструкции до 500 мм). Однослойная кладка толщиной до полуметра позволяет соблюдать требования тепловой защиты наружных ограждений жилых зданий практически во всех регионах России.

В некоторых случаях, однако, в силу разных причин, применяются конструкции, в которых по кладке из ячеистого бетона устанавливается слой дополнительной теплоизоляции.

Примеры ситуаций, в которых целесообразно применение наружного утепления:

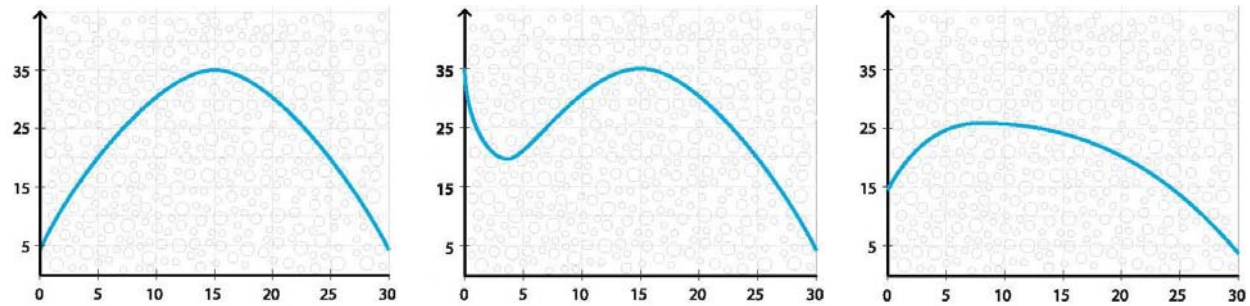
- кладка из блоков высокой плотности;
- заполнение ячеистым бетоном несущих каркасов зданий с выходящими на фасад колоннами/стенами и торцами межэтажных перекрытий;
- исправление ошибок, допущенных при проектировании и строительстве: толстые растворные швы, железобетонные пояса на всю ширину стены, высокотеплопроводные участки в местах сопряжения кладки с цоколем, перекрытиями, конструкциями крыши.

Системы теплоизоляции (клей для монтажа утеплителя, утеплитель, защитный и отделочный слой) влияют на выход начальной влаги из толщи кладки и прохождение транзитной влаги через стену. Специальных конструктивных требований к системам теплоизоляции по кладке из газобетона не предъявляется. Конструкция стены проверяется на соответствие требованиям СНиП 23-02 «Тепловая защита зданий» в части сопротивления теплопередаче и защиты от переувлажнения. Такая проверка, однако, не учитывает особенностей начального периода эксплуатации конструкции, когда кладочный материал обладает высокой влажностью.

В данной работе результаты натурных обследований конструкций с разным сроком эксплуатации представлены в виде кривых распределения влаги по толщине стены в зависимости от срока и режима эксплуатации. Проведена проверка влажностного режима конструкций из автоклавного газобетона с наружным утеплением с тонким штукатурным слоем – на соответствие действующим нормативным требованиям по ограничению влагонакопления, на возможность образования конденсата в толще данной конструкции при расчетных характеристиках материалов, на возможность удаления из кладки начальной (технологической и построечной) влаги. Дополнительно качественно оценивается интенсивность и пути миграции влаги в начальный период эксплуатации исследуемых конструкций. В конце работы результаты натурных обследований сопоставляются с данными расчетов и формулируются основные рекомендации по учету особенностей начального периода эксплуатации конструкций из автоклавного газобетона с наружным утеплением.

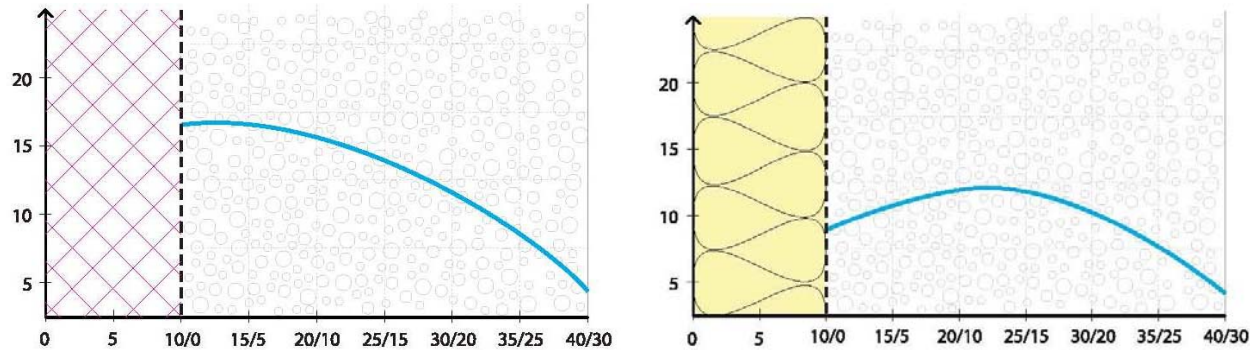
Общее описание динамики влажностного состояния

На объект газобетон поставляется, как правило, в упаковке из полимерной пленки, с одной стороны, защищающей блоки от увлажнения осадками, с другой – препятствующей удалению из них начальной технологической влаги, содержание которой обычно превышает 1/3 от массы бетона в высушенном состоянии [3]. Интенсивное высушивание начинается после возведения конструкций – обдув способствует интенсивному испарению, капиллярный перенос и диффузия обеспечивают вынос влаги из толщи бетона к поверхностным слоям. В кладке из газобетонных блоков, простоявшей без отделки несколько месяцев, влажность распределяется согласно рис. 1 [3, 4 (рис. 53)], убывая от максимальной в центре до незначительной в наружных слоях. Оштукатуривание приводит сначала к намоканию внешнего слоя (рис. 1 б), а потом отражается на скорости высыхания. В кладке, оштукатуренной с одной стороны, влажность распределяется с некоторой асимметрией, вызванной тормозящим действием штукатурки на выход влаги из стены (рис. 1В). Устройство на поверхности кладки слоя из теплоизоляционного материала также оказывает влияние на скорость удаления из кладки начальной влаги. Пенополистирол практически останавливает выход воды через наружную поверхность кладки (рис. 2А), минеральная вата замедляет данный процесс (рис. 2Б).



А Б В

Рисунок 1. Распределение влаги по толщине стены.
По оси абсцисс – расстояние от наружной поверхности кладки, см;
по оси ординат – массовая влажность кладки, %.
А – стена здания с незакрытым контуром через месяц после кладочных работ;
Б – стена здания после нанесения штукатурки;
В – стена здания через месяц после штукатурных работ



А **Б**

Рисунок 2. Распределение влаги по толщине утепленной стены. Стена здания с незакрытым контуром через четыре месяца после кладочных работ.
По оси абсцисс – расстояние от наружной поверхности кладки, см;
По оси ординат – массовая влажность кладки, %.
А – штукатурка по пенополистиролу; Б – штукатурка по минеральной вате

Распределение влаги по толщине стены изменяется, когда кладка с высокой влажностью начинает эксплуатироваться в качестве ограждения отапливаемого помещения.

Температурный перепад, возникающий по обе стороны стены, ограждающей отапливаемое помещение, запускает механизмы, основанные на градиенте температур и связанном с ним градиенте парциальных давлений водяного пара [5]. В результате распределение влаги по толще стены становится еще менее симметричным: не меняя средней влажности стены, вода из внутренних теплых слоев перемещается в сторону холодной улицы. В наружных слоях газобетона и теплоизоляции влага конденсируется, вызывая их переувлажнение.

Характер увлажнения стены зависит от ее конструктивного решения. Наружное утепление тонкими слоями пенополистирола приводит к переувлажнению поверхностных слоев газобетона, которые оказываются в зоне стабильно отрицательных температур. Минеральная вата со слоем наружной штукатурки сама становится увлажняемым слоем с влагоемкостью практически равной ее объему – поскольку увлажнение происходит не за счет сорбции, а вследствие конденсации, слой минеральной ваты толщиной 50 мм способен сконденсировать в себе до 50 л воды на 1 м^2. Облицовка на относе значительно снижает количество воды, остающейся в слое минеральной ваты, но не сводит его к нулю.

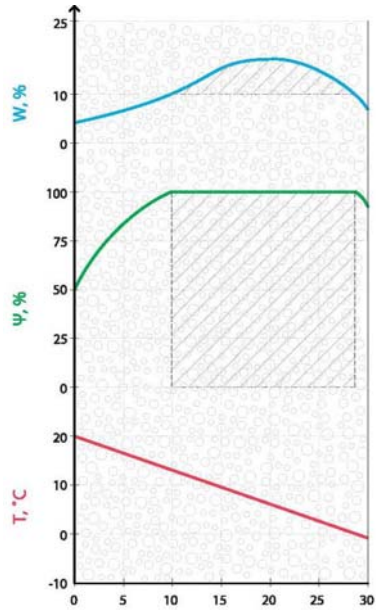
Через 1–3 года, когда влажность газобетонного слоя конструкций снижается до близких к равновесным значений [3, 4, 6], распределение влаги по толщине стены становится более равномерным, а зоны возможной конденсации уменьшаются.

Натурное обследование эксплуатируемых конструкций

Натурное определение влажностного состояния современных конструкций из автоклавного газобетона в условиях эксплуатации Северо-запада является предметом нескольких исследовательских работ [3, 6]. В данной работе приведены обобщающие кривые распределения влаги, полученные на основе обследований, проведенных в 2008–2010 гг. в эксплуатируемых зданиях, расположенных на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. На рис. 3 представлены кривые распределения влаги по толщине ограждающих конструкций помещений с нормальным режимом эксплуатации (жилые и административные здания) в первый отопительный сезон. На рис. 4 представлены аналогичные данные для конструкций со сроком эксплуатации более двух лет.

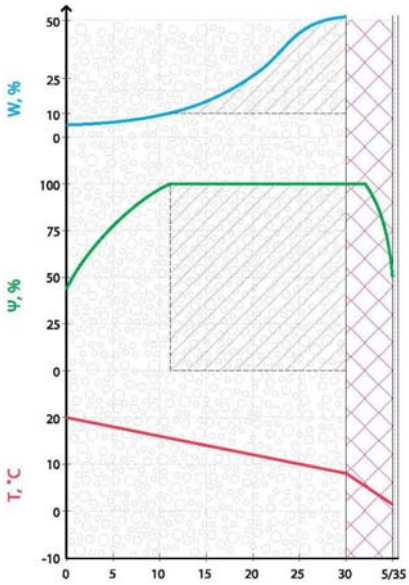
Верхняя кривая (W, %) отражает распределение влаги по толщине стены и построена по результатам натурных обследований. Средняя кривая (ψ, %) показывает относительную влажность воздуха в порах материала (отношение парциальных давлений реального и насыщенного пара). Кривая построена на основании данных о фактическом распределении влаги в толще стены и данных о сорбционных характеристиках материала (использованы данные [7, 8, 9]). Нижняя кривая (T, °C) условно показывает среднее распределение температур за отопительный период по толщине стены (построена на основании расчетных значений теплопроводности без учета фактической влажности).

Заштрихованная область ограничивает следующие зоны: в газобетоне – зону, в которой влажность выше сорбционной, в теплоизоляционных материалах – зону, в которой конденсация вероятна при расчетной для периода влагонакопления температуре и влажности наружного воздуха.

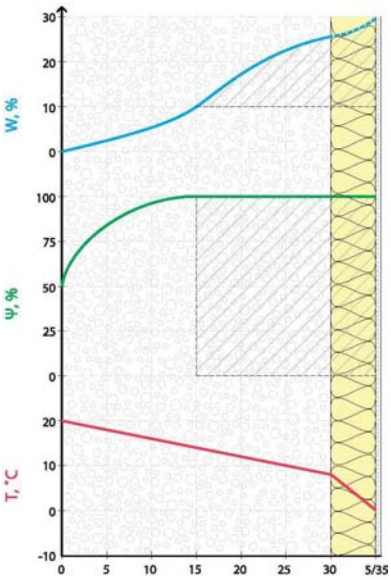


А

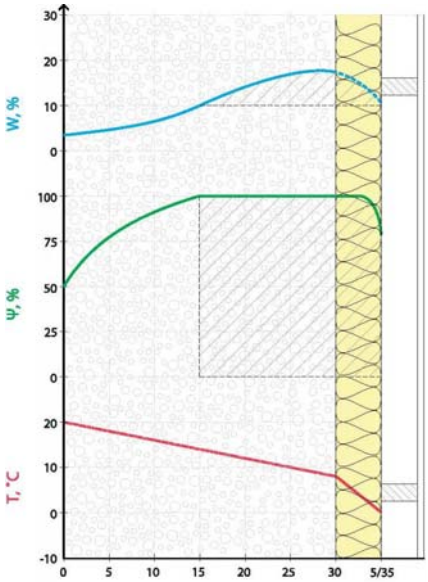
Рисунок 3. Распределение влаги, температуры и влажности воздуха в порах материала по толщине стены в первый отопительный сезон.
Заштрихованная область – зона, в которой влажность газобетона выше сорбционной.
Влагосодержание утеплителей показано условно.
По оси абсцисс – расстояние от внутренней поверхности, см.
А – однослойная кладка;
Б1 – мокрое утепление по ППС 50 мм;
Б2 – мокрое утепление по ППС 100 мм;
В1 – мокрое утепление по минвате 50 мм;
В2 – мокрое утепление поминвате 100 мм;
Г1, Г2 – минвата и облицовка на относе



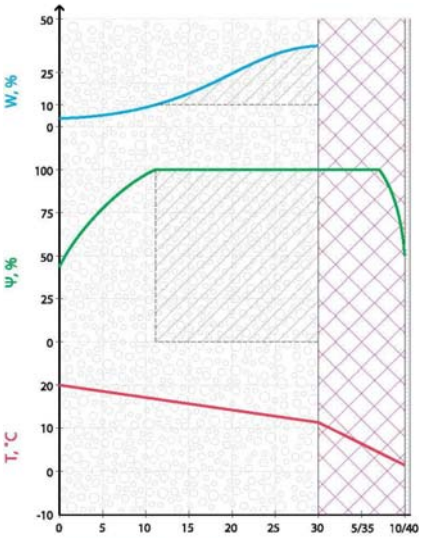
Б1



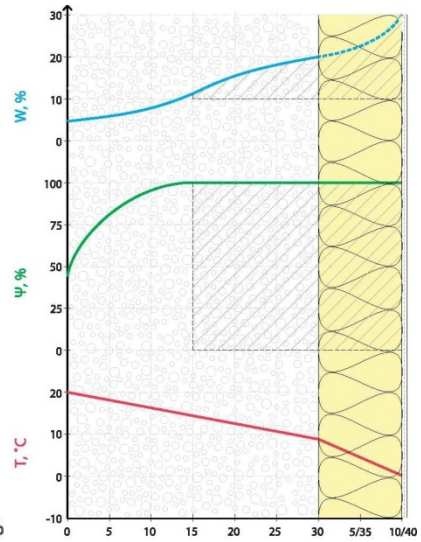
В1



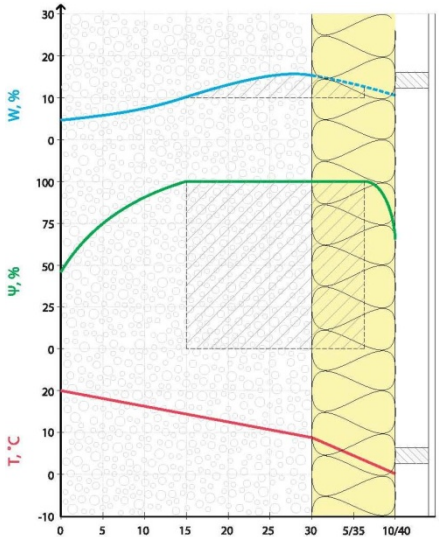
Г1



Б2



В2



Г2

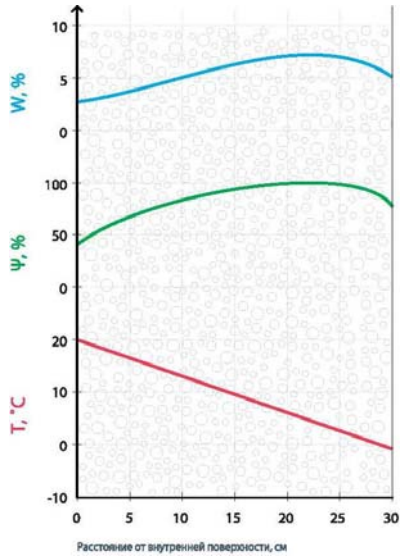
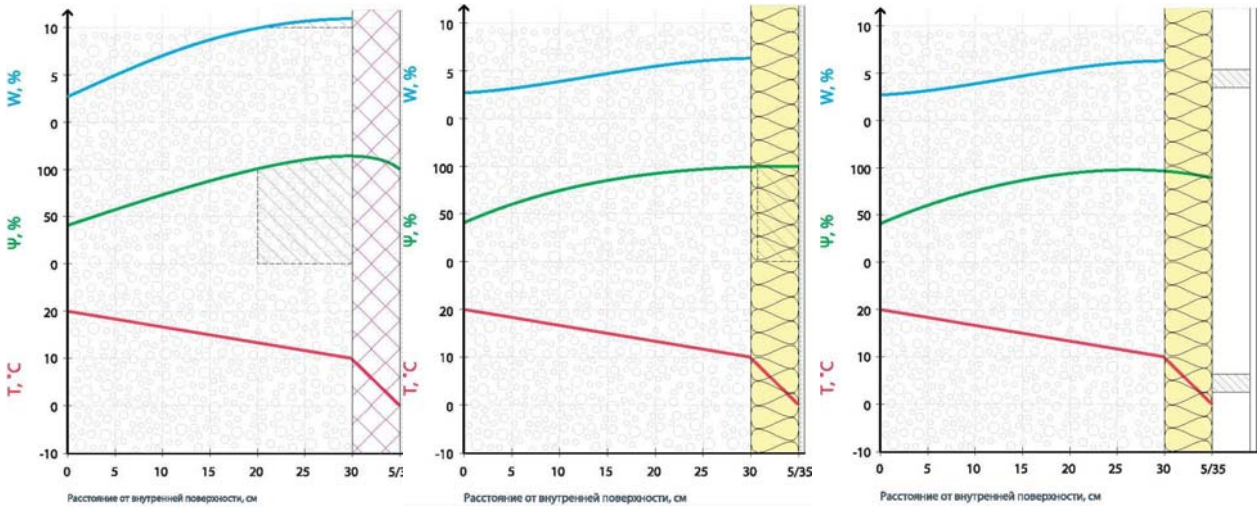
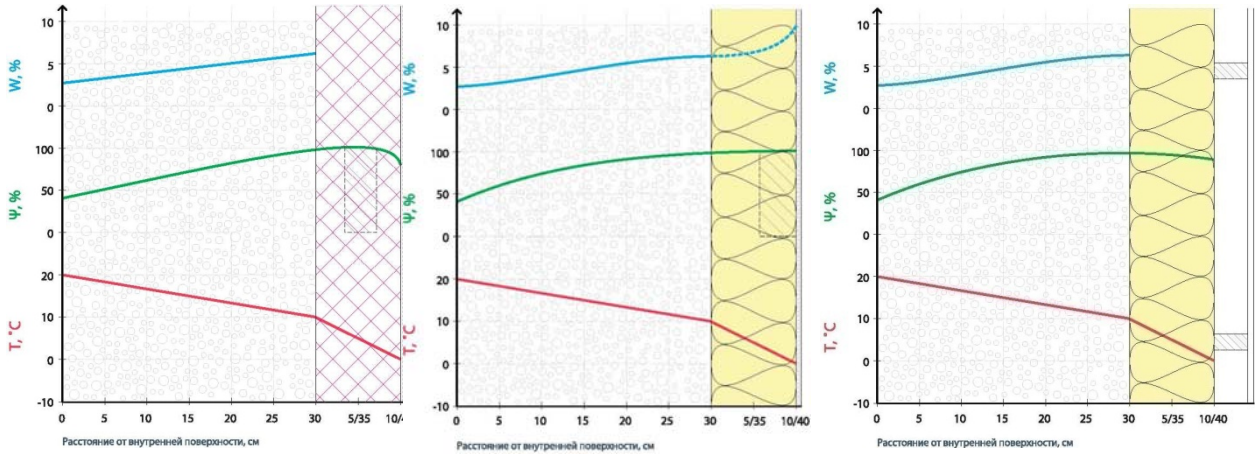


Рисунок 4. Распределение влаги, температуры и влажности воздуха в порах материала по толщине стены в отопительный период. Установившаяся равновесная влажность кладки.
Заштрихованные области – зона возможной конденсации (при расчете по климатическим параметрам расчетного периода влагонакопления в Санкт-Петербурге).
По оси абсцисс – расстояние от внутренней поверхности, см.
А – однослойная кладка;
Б1 – мокрое утепление по ППС 50 мм;
Б2 – мокрое утепление по ППС 100 мм;
В1 – мокрое утепление по минвате 50 мм;
В2 – мокрое утепление поминвате 100 мм;
Г1, Г2 – минвата и облицовка на относе

А



Б1 **В1** **Г1**



Б2 **В2** **Г2**

Расчет влажностного состояния конструкций при различной начальной влажности

Влажностное состояние строительных конструкций является предметом исследований на протяжении последних восьмидесяти лет. Методики, позволяющие учитывать различные факторы и механизмы влагопереноса с хорошей сходимостью с практикой, представлены в виде инженерных методов [10, 11, 12].

Здесь мы, однако, приведем расчет, основанный на нормативном методе расчета влажностного состояния наружных ограждений, приведенном в СНиП 23-02-2003. Этот расчет учитывает только перенос парообразной влаги.

Для расчета взяты следующие типы ограждающих конструкций, выполненных из газобетонных блоков толщиной 300 мм:

1) кладка из газобетонных блоков с наружным утеплением пенополистиролом толщиной 50 мм с тонким штукатурным слоем;
2) кладка из газобетонных блоков с наружным утеплением минеральной ватой толщиной 50 мм с тонким штукатурным слоем;
3) кладка из газобетонных блоков без утеплителя.

Характеристики материалов, использованные при расчетах, приведены ниже.

Параметры газобетона:

- толщина 300 мм;
- плотность 400 кг/м^3;
- теплопроводность $\lambda = \lambda_0 + kw = 0{,}096 + 0{,}004 \times w, \frac{Вт}{м \times °C}$, для w = 5% $\lambda_{5\%} = 0{,}117 \frac{Вт}{м \times °C}$, для w = 25% $\lambda_{25\%} = 0{,}196 \frac{Вт}{м \times °C}$;
- коэффициент паропроницаемости 0,23 мг/(м×ч×Па);
- коэффициент теплотехнической однородности кладки 0,96 (кладка на клею).

Параметры внутренней штукатурки:

- толщина 5 мм;
- плотность 1100 кг/м^3;
- теплопроводность 0,41 Вт/(м×К);
- коэффициент паропроницаемости 0,12 мг/(м×ч×Па).

Параметры наружного покрытия из полимерной композиции:

- толщина 3,5 мм;
- плотность 1870 кг/м^3;
- теплопроводность 0,7 Вт/(м×К);
- коэффициент паропроницаемости 0,12 мг/(м×ч×Па).

Параметры пенополистирола:

- плотность 35 кг/м^3;
- теплопроводность 0,028 Вт/(м×К);
- коэффициент паропроницаемости 0,018 мг/(м×ч×Па).

Параметры минеральной ваты:

- плотность 100 кг/м^3;
- теплопроводность 0,045 Вт/(м×К);
- коэффициент паропроницаемости 0,32 мг/(м×ч×Па).

Расчетная температура и относительная влажность внутреннего воздуха приняты в соответствии с требованиями ГОСТ 30494 и СНиП 23-02: t_{int} = 20°С, φ_{int} = 55%. Расчетные параметры наружного воздуха взяты для климатических условий Санкт-Петербурга согласно СНиП 23-01: t_{ext} = −1,8°С для отопительного периода, φ_{ext} = 86%.

Расчет нормируемого сопротивления паропроницанию ограждающей конструкции производят по СНиП 23-02 с учетом следующего требования: сопротивление паропроницанию Ω_{req}

[м^2*ч*Па/мг] ограждающей конструкции (в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации) должно быть не менее наибольшего из следующих нормируемых сопротивлений паропроницанию:

1) из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации:

$$\Omega^{*}_{req} = \frac{(e_{\text{int}} - E)\Omega_e}{(E - e^{cp}_{ext})}; \qquad (1)$$

2) из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха:

$$\Omega^{**}_{req} = \frac{0{,}0024 z_0 \left(e_{\text{int}} - E_0\right)}{\gamma \delta_W \Delta W_{av} + \eta}. \qquad (2)$$

Следует отметить, что условие (2) выполняется для всех рассмотренных в настоящей работе типов стен, при расчетной влажности W = 5%. Но начальная влажность кладки из ячеистого бетона всегда выше расчетной эксплуатационной. Поэтому более интересным представляется анализ графических зависимостей, показывающих распределение значений парциальных давлений по толщине ограждающих конструкций при расчетной и начальной влажности. За начальную принята влажность газобетона 25% по массе. Такое значение достигается через 1–3 месяца после производства кладочных работ, т.е. кладка может иметь подобную влажность к началу первого отопительного сезона.

Приведем расчет для оштукатуренной снаружи стены из газобетонных блоков с применением минеральной ваты толщиной 50 мм (схема конструкции представлена на рис. 5).

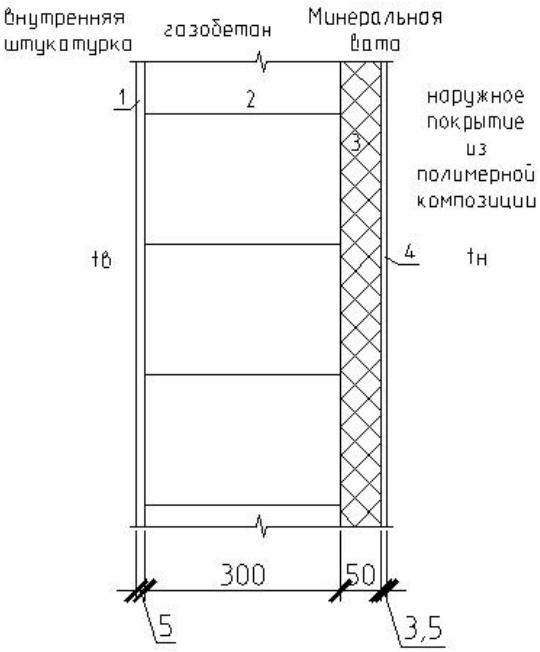


Рисунок 5. Теплотехническая модель ограждающей конструкции

Расчет для влажности газобетона w = 5%

Определяем парциальное давление водяного пара внутри и снаружи стены:

t_{int} = 20 °C; φ_{int} = 55%;
e_{int} = (55/100)2338 = 1286 Па;
$t_{ext»}$ = –1,8 °C; e_{ext} = 477 Па.

Определяем температуры τ_i на границах слоев по формуле, нумеруя от внутренней поверхности к наружной, и по этим температурам максимальное парциальное давление водяного пара E_i по графикам зависимости $E = f(t)$.

$$\tau_i = t_{int} - (t_{int} - t_{ext»})(R_{si} + \Sigma R_i)/R_o. \qquad (3)$$

τ_{12} = 20 – (20 + 1,8) *0,11 / 3,77 = 19,3°C;
E_{12} = 2253 Па;
τ_{23} = 20 – (20 + 1,8) *2,61 / 3,77 = 4,9 °C;
E_{23} = 866 Па;
τ_{34} = 20 – (20 + 1,8) *3,72/ 3,77 = -1,5°C;
E_{34} = 540 Па;
τ_{ext} = 20 – (20 + 1,8) *3,73 / 3,77 = -1,5 °C;
E^{τ}_{ext} = 535 Па.

Рассчитаем действительные парциальные давления e_i водяного пара на границах слоев по формуле по толщине ограждения (по координате x). Результаты расчета представлены в табл. 1; график, построенный на основании данных таблицы 1, приведен на рис. 6.

$$e_i = e_{int} - (e_{int} - e_{ext})(\Omega_{int} + \Sigma\Omega_i)/\Omega_0. \qquad (4)$$

Расчет для влажности газобетона w = 25%

Определяем температуры τ_i на границах слоев по формуле (3).

τ_{12} = 20 – (20 + 1,8) *0,11 / 2,8 = 19,4°C;

E_{12} = 2225 Па;
τ_{23} = 20 – (20 + 1,8) *1,64 / 2,8 = 7,2 °C;
E_{23} = 1016 Па;
τ_{34} = 20 – (20 + 1,8) *2,75/ 2,8 = -1,4°C;
E_{34} = 544 Па;
τ_{ext} = 20 – (20 + 1,8) *2,76 / 2,8 = -1,6 °C;
E^{τ}_{ext} = 540 Па.

Таблица 1. Результаты оценки возможности конденсации пара внутри стен

Граница слоев	*x*, м	ΣR_i, (м²·°C)/Вт	τ_i, °C	E_i, Па	$\Sigma\Omega_i$, м²·ч·Па/мг	e_i, Па
int-1	0	0	20	2338		1286
1-2	0,005	0,11	19,3	2256		
2-3	0,305	2,61	4,9	866	1,5	838
3-4	0,355	3,72	-1,5	540	1,656	614
4-*ext*	0,3585	3,73	-1,5	535	1,81	544

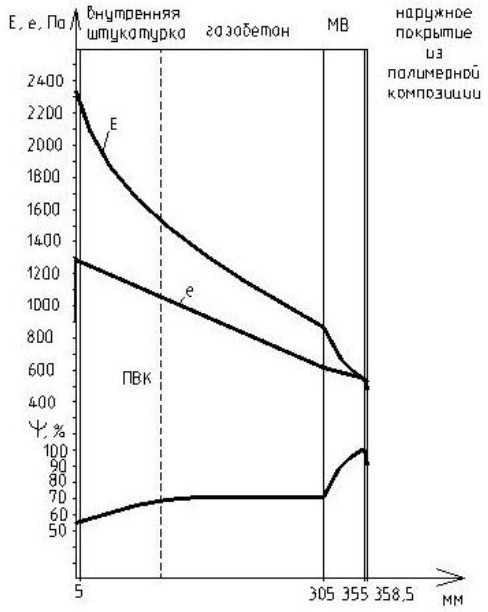


Рисунок 6. График распределения значений парциальных давлений по толщине ограждающей конструкции с применением минеральной ваты толщиной 50 мм при расчетной влажности 25%

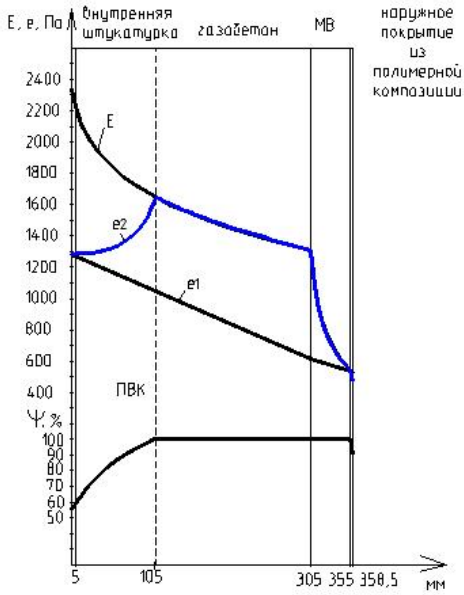


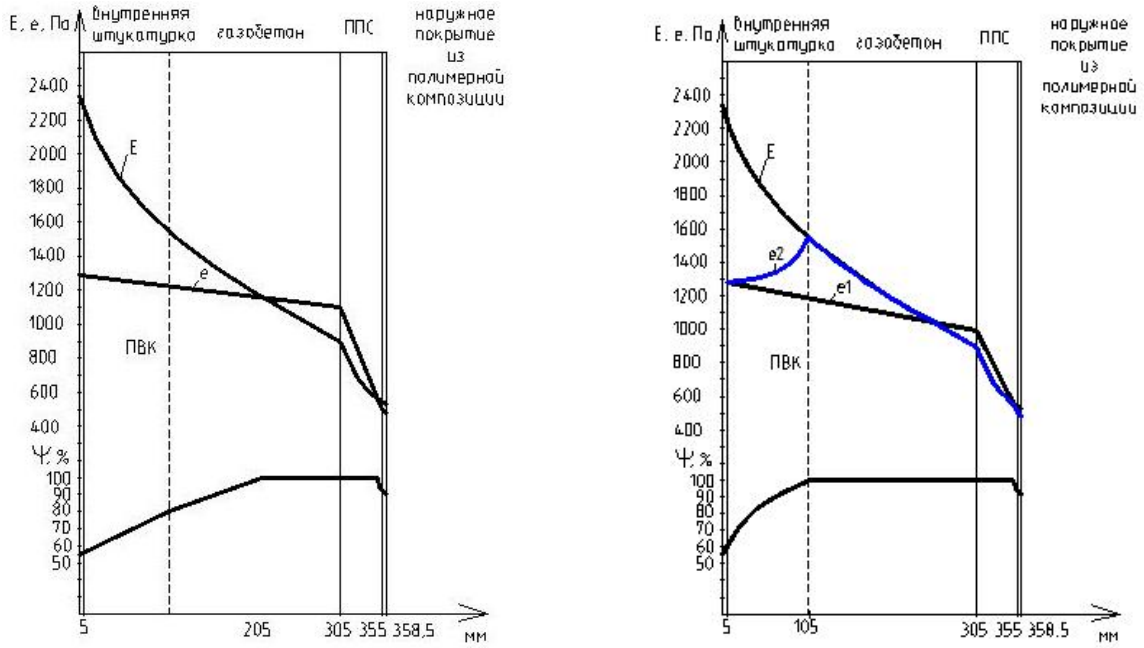
Рисунок 7. График распределения значений парциальных давлений по толщине ограждающей конструкции с применением минеральной ваты толщиной 50 мм при влажности газобетона 25%. Кривая e_1 построена без учета распределения влаги по толщине стены, кривая e_2 учитывает распределение влаги, полученное по данным натурных обследований

Рассчитаем действительные парциальные давления e_i водяного пара на границах слоев по формуле (4) по толщине ограждения (по координате *x*). Результаты расчета представлены в табл. 2; график, построенный на основании данных таблицы 2, приведен на рис. 7.

Таблица 2. Результаты оценки возможности конденсации пара внутри стен

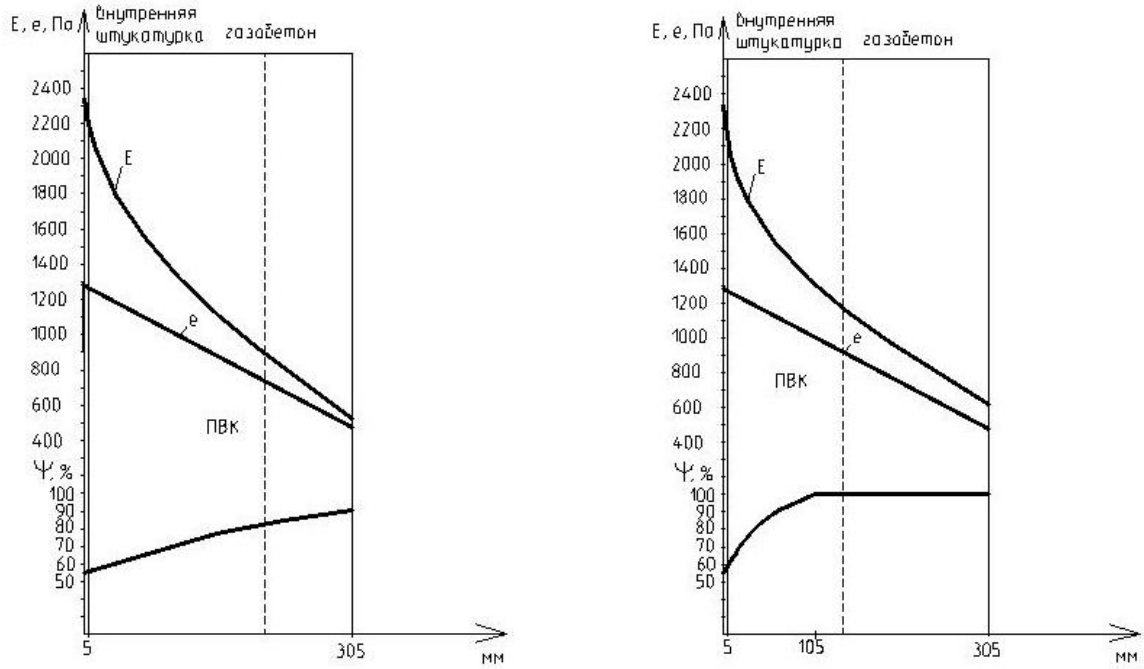
Граница слоев	*x*, м	ΣR_i, (м²·°C)/Вт	τ_i, °C	E_i, Па	$\Sigma\Omega_i$, м²·ч·Па/мг	e_i, Па
int-1	0	0	20	2338		1286
1-2	0,005	0,11	19,4	2225		
2-3	0,305	1,64	7,2	1016	1,5	838
3-4	0,355	2,75	-1,4	544	1,656	614
4-*ext*	0,3585	2,76	-1,6	540	1,81	544

Аналогичным образом проведем расчеты для стены с наружной теплоизоляцией из пенополистирола и для однослойной конструкции. Результаты расчетов графически представлены на рис. 8, 9.



А) Б)

Рисунок 8. График распределения значений парциальных давлений по толщине ограждающей конструкции с применением пенополистирола толщиной 50 мм: А) при расчетной влажности 5%; Б) при расчетной влажности 25%



А) Б)

Рисунок 9. График распределения значений парциальных давлений по толщине ограждающей конструкции без утеплителя: А) при расчетной влажности 5%; Б) при расчетной влажности 25%

Для всех рассмотренных ограждающих конструкций: кривые: e_1 – действительное парциальное давление водяного пара, полученное по графоаналитическому методу и e_2 – парциальное давление водяного пара, полученное с учетом фактического распределения влаги по толщине стены в разные сроки для разных конструкций.

Выводы

1. Начальная влага, содержащаяся в газобетоне, является источником увлажнения утеплителей в первые отопительные сезоны.

2. Характеристики наружного утепления (толщина, паропроницаемость) влияют на влажность газобетонной кладки и всей стены в целом.

3. Тонкие слои полимерной теплоизоляции приводят к вторичному увлажнению стен конденсирующейся влагой – за тонким слоем теплоизоляции происходит конденсация в зоне стабильно низких температур.

4. Монтаж систем теплоизоляции на основе минеральной ваты со штукатурным слоем на основание из свежей газобетонной кладки приводит к переувлажнению утеплителя в первый отопительный сезон.

5. Минеральная вата с экранной отделкой не подвержена значительному увлажнению вне зависимости от начальной влажности кладки основания.

6. При проектировании и монтаже конструкций с наружной теплоизоляцией по основанию из газобетонной кладки следует предусматривать возможность удаления из кладки начальной влаги:

- системы скрепленной теплоизоляции на основе минеральной ваты монтировать на следующий после кладочных работ строительный сезон;
- системы скрепленной теплоизоляции на основе полимерных утеплителей проектировать с учетом их низкой паропроницаемости.

Литература

1. 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.
2. Руководство по теплотехническому расчету наружных стеновых конструкций жилых и общественных зданий с применением изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения в Российской Федерации / ГОУ СПбГПУ, Ассоциация НААГ. СПб., 2011. 40 с.
3. Гринфельд Г. И., Морозов С. А., Согомонян И. А., Зырянов П. С. Влажностное состояние современных конструкций из автоклавного газобетона в условиях эксплуатации // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 33-38.
4. Силаенков Е. С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М. : Стройиздат, 1986. 176 с.
5. Крайнов Д. В., Садыков Р. А. Влияние влагосодержания на теплозащитные свойства ограждающей конструкции из ячеистого бетона // Вестник МГСУ. 2011. №3. Т.1. С. 404–410.
6. Ватин Н. И., Горшков А. С, Гринфельд Г. И., Пестряков И. И. Влажностный режим стеновой ограждающей конструкции, выполненной из газобетонных блоков автоклавного твердения с облицовочным слоем из лицевого силикатного кирпича // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции / под науч. ред. Н. И. Ватина. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 56-70.
7. Киселев И. Я. Метод расчета равновесной сорбционной влажности строительных материалов // Вестник МГСУ. 2011. №3. Т.2. С. 92–98.
8. EN ISO 10456:2007. Building materials and products – Hygrothermal properties.
9. Drochytka R., Zach J. The study of thermal and moisture behavior of autoclaved cellular concrete // Materials of 5th International Conference on AAC “Securing a sustainable future”. University of Technology and Life Sciences Press, Bydgoszcz, 2011. Pp. 201–207.
10. Козлов В. В. Метод инженерной оценки влажностного состояния современных ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты при учете паропроницаемости, влагопроводности и фильтрации воздуха: дисс. кандидата технических наук. М., 2004. 161 с.
11. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий / НИИСФ. М. : Стройиздат, 1984. 168 с.
12. EN 15026: 2007. Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation.

**Глеб Иосифович Гринфельд, Санкт-Петербург, Россия*
Тел. раб.: +7(812)640-33-40; эл. почта: gleb.grinfeld@aeroc.ru

Гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором

Д.т.н., профессор М. Р. Петриченко;
старший преподаватель М. В. Петроченко*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: свободноконвективное течение; течения в плоских каналах; естественная тяга; вентилируемый воздушный зазор

Свободноконвективное течение воздуха в плоских вертикальных щелевых каналах встречается во многих строительных конструкциях и инженерном оборудовании: вентиляционных каналах зданий и сооружений, в оконных конструкциях с двойным остеклением, в системах пассивного солнечного отопления, в конвекторах и батареях систем отопления. Понимание физических процессов, сопровождающих течение воздуха в вертикальных плоских щелевых каналах, может существенным образом улучшить процесс моделирования конструкций и, как следствие, улучшить их эксплуатационные характеристики. Также необходимо отметить, что при проектировании строительных конструкций и инженерного оборудования зданий учет свойств и характеристик свободноконвективного течения позволяет применить наиболее рациональные инженерные решения.

Например, при эксплуатации систем навесных вентилируемых фасадов с воздушным зазором, широко используемых на сегодняшний день в строительстве, возникает ряд проблем, связанных с конденсацией влаги в конструкции. В зимний период циклическое замораживание-оттаивание влаги оказывает негативное воздействие на конструкцию, приводя к растрескиванию штукатурного слоя и образованию микротрещин [1]. Выведение из конструкции влаги осуществляется благодаря наличию вентилируемого зазора и движущегося в нем воздуха. Воздух, поступая в вентилируемый зазор, движется за счет естественной тяги, возникающей вследствие перепада давления и градиента температур на стенках вентилируемого канала. Для прогнозирования влажностного режима конструкции фасада необходимо иметь четкое представление картины течения воздуха в вентилируемом канале и учитывать тепло-гидравлические параметры свободноконвективного течения воздуха в зазоре. Одной из важнейших характеристик воздухообмена для расчета влагоудаления является скорость воздуха в воздушной прослойке. [2]

Свободноконвективные течения возникают в результате действия объемной силы, зависящей от разности плотностей, обусловленной переносом тепловой энергии вследствие неоднородности температуры. Конвективные токи, вызывающие теплообмен между поверхностями и воздухом, возникают около нагретых и охлажденных поверхностей [3]. Плотность как жидкости, так и газа зависит от температуры, поэтому при наличии в жидкости или газе градиента температуры массовые силы в различных точках различны. Это вызывает движение газа или жидкости, определяемое направлением поля массовых сил, распределением температур в жидкости и геометрической формой объема [4]. Свободноконвективное течение в виде восходящего потока воздуха может быть ламинарным или турбулентным. При этом числа Релея, определяющие переход от ламинарного к турбулентному режиму свободноконвективного течения различны для вертикальной пластины и призматического (плоского) канала, образованного двумя параллельными поверхностями.

Большой вклад в изучение характеристик свободноконвективных течений внесли российские и зарубежные исследователи. В работах [5-14] представлены результаты экспериментальных и численных исследований свободноконвективных течений воздуха в вертикальных каналах, образованных двумя параллельными стенками с симметричным и асимметричным нагревом. Результаты исследований представляют большой интерес, но для практического применения полученных результатов требуется сформулировать общий подход для определения средней скорости свободноконвективного течения воздуха в вертикальных щелевых каналах.

Целью настоящей работы является оценка средней скорости свободноконвективного течения воздуха в вертикальном щелевом канале с различной температурой стенок.

Пусть свободноконвективное течение осуществляется в вертикальной щели, прямоугольнике $\Pi = (y, z : 0 < y < h; 0 < z < L), h << L$, где h – ширина канала; L – высота канала (см. рис. 1).

Правая грань с координатой $y = h$ охлаждена и поддерживается при температуре T_c, меньшей, чем температура T_h левой грани с координатой y = 0. Коэффициенты потерь напора на вход, по длине и на выход известны (или допускают правдоподобную оценку); известна также интегральная интенсивность теплообмена (число Стентона St) между свободно-конвективным потоком и стенками щели. Давление на отметке z = 0 равно p_0, давление на отметке z = L равно p_1, причем $p_0 > p_1$.

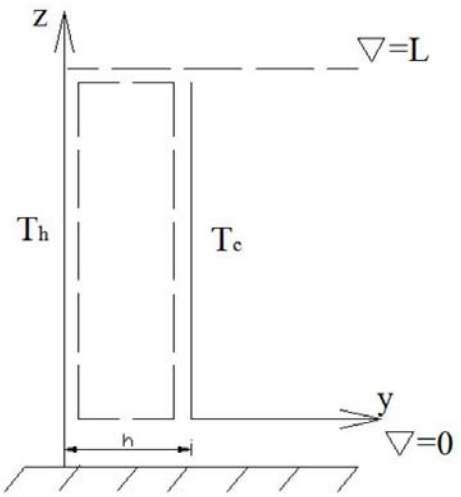


Рисунок 1. Схема вертикального щелевого канала

Решение основано на следующих предпосылках.

1. В адиабатной щели свободноконвективном течение отсутствует. Значит, если считать движение баротропным и заменить условие теплообмена (дифференциальное уравнение энергии) голономным условием баротропности, то средняя скорость свободноконвективного течения (v), равна нулю, показатель политропы (n) равен показателю адиабаты (k).
2. Расширение газа в свободноконвективном течении происходит при $n < k$. В случае, если $1 < n < k$, то расширение газа с подводом теплоты сопровождается его охлаждением и свободноконвективное течение неустойчивое. Если же $0 < n < 1$, подвод теплоты столь интенсивен, что температура газа по длине щели растет и свободноконвективное течение устойчиво по всей длине (высоте) щели. Если равновесному состоянию газа в вертикальном канале отвечает показатель политропы $n = n_1 > 0$, то при всяком значении $0 < n < n_1$ существует свободноконвективное течение.

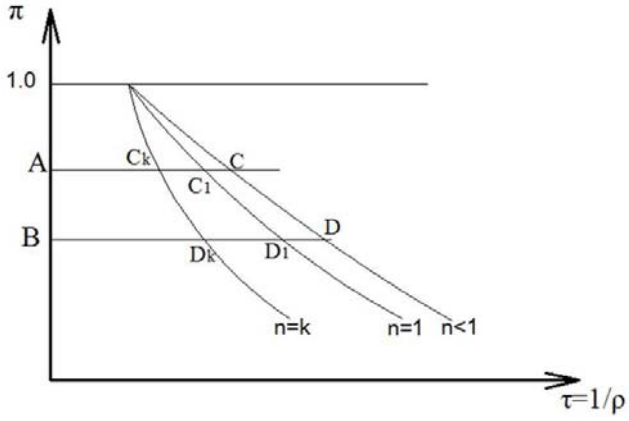


Рисунок 2. Политропное расширение газа в свободноконвективном течении

Действительно, расширение газа в свободноконвективном течении изображается траекторией (политропой) на плоскости переменных $\pi = \frac{p}{p_0}$ и $\tau = 1/\rho$, где τ – удельный объем (см. рис. 2).

Площадь между осью $\tau = 0$ и траекторией изображает «техническую работу» расширения. Если $n = k$, то работа недостаточна для перемещения (подъема) газа в вертикальной щели и превращается в потенциальную энергию покоящегося столба газа.. Если $n < k$, возникает профицит работы, реализуемый в кинетическую энергию столба газа. Чем больше разность $k - n$, тем больше профицит и выше скорость свободноконвективного течения.

В условиях свободноконвективного течения возможны оба неравенства. Если $1 < n < k$, то расширение газа при свободноконвективном течении сопровождается его охлаждением. В качестве примера можно привести движение воздуха в печной трубе (подвод теплоты от топочного пространства недостаточен для расширения с увеличением температуры по длине дымохода). Если $0 < n < 1$, подвод теплоты обеспечивает монотонный рост температуры газа по длине канала. Такая ситуация характерна для обогреваемых каналов, например, для вентилируемого канала фасада.

Итак, утверждается, что:

$$\forall\pi := \frac{p_1}{p_0} = \in (0,1), \forall n < k, \ \frac{k}{k-1}\left(1-\pi^{\frac{k-1}{k}}\right) < \frac{n}{n-1}\left(1-\pi^{\frac{n-1}{n}}\right),$$

причем $n \to 1, \frac{n}{n-1}\left(1-\pi^{\frac{n-1}{n}}\right) \to \ln\frac{1}{\pi}$ и,

если $n < 1$, то $\frac{n}{n-1}\left(1-\pi^{\frac{n-1}{n}}\right) = \frac{n}{1-n}\left(\left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{1-n}{n}} - 1\right)$.

Действительно, если $a > b \geq 0$, где $a = \frac{k-1}{k}, b = \left|\frac{n-1}{n}\right|$, то выполняется неравенство $\frac{1-\pi^a}{a} < \frac{1-\pi^b}{b}$.

Неопределенный показатель политропы n связан с интенсивностью теплопередачи в свободноконвективном течении тождеством: $\frac{n-k}{k(n-1)}\frac{dT}{d\zeta} = St(T_h - T), \zeta := \frac{z}{h}$, причем T – температура потока в щели. Значит $n = \frac{k(S-1)}{S\ k-1}, S := St\frac{d\zeta}{d\ln\frac{1}{1-\vartheta}}, \vartheta := \frac{T}{T_h} \leq 1$., где S – приведенное число Стентона.

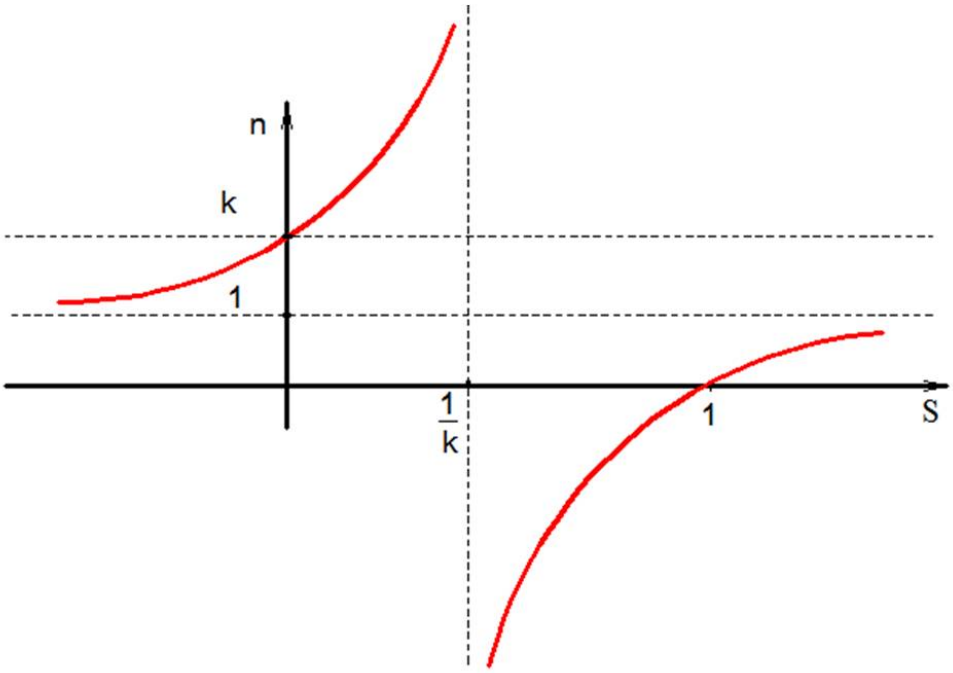


Рисунок 3. График зависимости n = n(S)

Очевидно, что 1<n<k, если S<0, т.е. в случае убывания температуры по длине щели. Если же 0<n<1, то S>1, т.е. в случае увеличения температуры по длине щели. График зависимости n = n(S) приводится на рис. 3.

3. В условиях адиабатного равновесия столба газа в щели уравнение равновесия (Эйлера) имеет вид:

$$\left(\frac{dp}{\rho}\right)_s + gdz = 0, \quad (1)$$

индекс s подчеркивает адиабатность статического состояния газа. При наличии подвода теплоты уравнение равномерного движения имеет вид:

$$\left(\frac{dp}{\rho}\right)_n + gdz + gdh_f = 0, \quad (2)$$

индекс n отмечает баротропность подвода теплоты при свободноконвективном течении. Можно представить, что подвод теплоты, создающий мощность подъемной (архимедовой) силы, заменяется «распределенным по высоте щели насосом» (источником механической мощности), перемещающим воздух в щели адиабатно. Тогда:

$$\left(\frac{dp}{\rho}\right)_s + gdz + gdh_f = dh_p, \quad (3)$$

где h_p – напор насоса, создающего адиабатный поток, эквивалентный по средней скорости свободноконвективного течения в обогреваемом канале.

Из (1) и (3) получается: $dh_p = dh_f$. Иначе, напор насоса затрачивается на (адиабатное) перемещение столба воздуха в щели. При этом $gh_f = \left(1+\zeta_j+\lambda\frac{L}{h}\right)\frac{v^2}{2} := \frac{v^2}{2\varphi^2}$, φ – коэффициент скорости.

В силу (1) и (2): $\left(\frac{dp}{\rho}\right)_n - \left(\frac{dp}{\rho}\right)_s + gdh_f = 0$.

Тогда $\frac{n}{n-1}\left(1-\pi^{\frac{n-1}{n}}\right) - \frac{k}{k-1}\left(1-\pi^{\frac{k-1}{k}}\right) = \frac{v^2}{2\varphi^2 RT_0}$ или, что то же:

$$\frac{n}{n-1}\left(1-\pi^{\frac{n-1}{n}}\right) - \frac{gL}{RT_0} = \frac{v^2}{2\varphi^2 RT_0}, \quad \frac{n}{n-1}\left(1-\left(1-\frac{k-1}{k}\Lambda\right)^{\frac{k}{n}\frac{n-1}{k-1}}\right) - \Lambda = \frac{\beta^2}{2\varphi^2},$$

где β – безразмерная скорость (число Барстоу);

Λ – приведенная длина;

$\beta := \frac{v}{\sqrt{RT_0}}$;

$\Lambda := \frac{gL}{RT_0}$, причем в реальных технических устройствах $\Lambda << 1$.

4. Поэтому, с погрешностью до членов O(Λ3), скорость на выходе из канала пропорциональна первой степени длины (высоты) канала (щели):

$$\beta = \varphi\Lambda\sqrt{\frac{1}{n}-\frac{1}{k}}, 0 < n \le k, \tag{4}$$

или:

$$v = \varphi\frac{gL}{\sqrt{RT_0}}\sqrt{\frac{1}{n}-\frac{1}{k}}. \tag{5}$$

Очевидно, $\beta \underset{n\to 1}{\to} \varphi\Lambda\sqrt{\frac{k-1}{k}}, \beta \underset{n\to 0}{\to} \infty$.

Действительно, пусть: $x := \frac{n-1}{n}, \quad b := \frac{k-1}{k}\Lambda > 0, \quad a = \frac{k}{k-1} > 0$.

Тогда $\frac{1-(1-b)^{ax}}{x} - ab = \frac{b^2}{2}a(1-ax) + O(b^3) = \frac{\Lambda^2}{2k}\frac{k-n}{n}$, что и доказывает (4).

Формула (5) решает поставленную задачу и приводит к правдоподобным оценкам средней скорости течения в выходном сечении щели. Например, пусть k = 1,4; n = 1,3; T_0 = 300K; φ = 0,6; L = 100м. Тогда, в силу (5) средняя скорость v равна 0,48 м/с. Уменьшение показателя политропы n до значения 0,9 (увеличение интенсивности теплообмена на горячей грани) при прочих неизменных данных увеличивает скорость до 1,29 м/с.

Массовая скорость свободноконвективного течения w постоянна по высоте щели и равна $w := \rho v$. Значит, в силу (4):

$$\beta_0 = \pi^{\frac{1}{n}}\beta = \varphi\Lambda\sqrt{\frac{1}{n}-\frac{1}{k}}\left(1-\frac{k-1}{k}\Lambda\right)^{\frac{k}{n(k-1)}}, \tag{6}$$

и, как видно, скорость по высоте щели увеличивается незначительно, примерно в $1+\frac{\Lambda}{n}$ раз. Во столько же раз уменьшается плотность по высоте щели. Для стометровой щели в условиях примера, Λ = 0,012 и, соответственно, изменение скорости по высоте щели меньше 1%. На самом деле, вертикальный градиент скорости мал (0,01% на метр высоты щели) и допущение о плавном изменении течения по средней скорости вполне оправдано. Из формулы (5) легко получить, что максимальное значение массовой скорости достигается, если $\Lambda\left(\frac{k-1}{k}+\frac{1}{n}\right) = 1$, т.е. $\frac{1}{n} = \frac{1}{\Lambda} - \frac{k-1}{k}, n = \frac{\Lambda}{1-\frac{k-1}{k}\Lambda} \doteq \Lambda + O(\Lambda^2)$. В реальных технических устройствах Λ<<1, поэтому приводимые оценки допустимы. Получается, что, чем меньше высота канала, тем более интенсивная передача теплоты необходима для достижения наибольшей массовой скорости. При этом, как правило, 0<n<1.

Следовательно, достаточное условие существования свободноконвективного течения в вертикальной щели имеет вид: $n < n_e$, где n_e – значение показателя политропы, отвечающее состоянию равновесия вертикального столба газа. Значение показателя политропы n в равномерном и баротропном свободноконвективном течении практически пропорционально длине канала. Иначе, чем короче канал, тем больше должна быть величина теплового потока, создающего вертикальную тягу, и наоборот.

Усиление достаточного (слабого) условия существования свободноконвективного течения до необходимого и достаточного связано с изучением структуры потока. В частности, развитие пограничных слоев (сдвига, подъемной силы), распределение скорости и температурного напора по сечению и по длине канала зависит от условий подвода теплоты к горячей грани [15]. В этом случае вместо грубого голономного условия баротропности необходимо решать (дифференциальное) уравнение теплопередачи.

При проектировании систем навесных вентилируемых фасадов и расчете влагоудаления из конструкции необходимо учитывать, что максимальная скорость течения воздуха будет в период максимального перепада температур на стенках вентилируемого канала, т.е. в зимнее время. В летний период, когда градиент температур будет весьма низким, скорость свободноконвективного течения воздуха в вентилируемом канале будет минимальна.

Литература

1. Солощенко С. С. Влияние вентилируемого зазора на теплотехнические характеристики систем наружного утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2. С. 39-41.
2. Солощенко С. С. Влажностный режим конструкции вентилируемого штукатурного фасада // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С. 10-15.
3. Богословский В. Н. Строительная теплофизика. Учебник для вузов. 3-е изд. СПб. : АВОК Северо-Запад, 2006. 399 с.
4. Гебхарт Б., Джалурия И., Махаджан Р., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. В 2-х книгах.кн.1 Пер. с англ. М. : Мир, 1991. 678 с.
5. Чумаков Ю. С. Экспериментальное исследование свободноконвективного течения около вертикальной поверхности // Научно-технические ведомости. Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика»). 2004. №2. С. 1-27.
6. Соковишин Ю. А., Мартыненко О. Г. Свободноконвективный теплообмен: Справочник. М. : Наука и техника, 1982. 400 с.
7. Elenbaas W. Heat dissipation of Parallel plates by free Convection // Physica. 1942. №9. Pp. 1-28.
8. Sparrow E. M., Azevedo L. F. Vertical channel natural convection spanning between the fully developed limit and the single plate boundary layer limit // International Journal of Heat Mass transfer. 1985. Vol. 28, No. 10. Pp. 1847-1857.
9. Said S. A. M., Krane R. J. An analytical and experimental investigation of Natural Convection Heat Transfer in vertical channels with single obstruction // International Journal of Heat Mass Transfer. 1990. Vol. 33, No. 6. Pp. 1121-1134.
10. Kihm K. D., Kim J. H., Fletcher L. S. Investigation of Natural Convection Heat Transfer in Converging Channel Flows Using a Specklegram Technique // Journal of Heat Transfer. 1993. Vol. 115. Pp. 140-148.
11. Kihm K. D., Kim J. H., Fletcher L. S. Onset of Flow Reversal and Penetration Length of natural Convective Flow Between Isothermal Vertical Walls // Journal of Heat Transfer. 1995. Vol. 117. Pp. 776-779.
12. Naylor D., Floryan J. M., Tarasuk J. D. A Numerical study of Developing Free convection Between Isothermal vertical plates // Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer. 1991. Vol. 113. Pp. 620-626.
13. Naylor D., Tarasuk J. D. Natural Convective Heat Transfer in a Divided vertical channel Part-I – Numerical Study // Journal of Heat Transfer. 1993. Vol. 115. Pp. 377-387.
14. Tanda G. Natural Convection Heat Transfer in vertical channels with and without transverse square ribs // International Journal of Heat Mass Transfer. 1997. Vol. 40, No. 9. Pp. 2173-2185.
15. Чумаков Ю. С. Экспериментальное исследование переходного и развитого турбулентного режимов течения в свободноконвективном пограничном слое, развивающемся около вертикальной нагретой поверхности // сб. докл. 4-го Минского международного форума по тепло- и массообмену. Минск, 22-26 мая, 2000. Т.1. С. 325-328.

**Марина Вячеславовна Петроченко, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)552-94-60; эл. почта: mpetrochenko@mail.ru

Классификация вентилируемых фасадных систем. Влияние теплопроводных включений на их теплозащитные характеристики

К.т.н., доцент А. М. Протасевич,
Белорусский национальный технический университет;
зав. сектором теплофизических исследований А. Б. Крутилин*,
РУП «Институт БелНИИС»

Ключевые слова: вентилируемая фасадная система; фильтрация воздуха; классификация; сопротивление теплопередаче; теплоизоляция; теплопроводные включения

В многослойных наружных стенах с эффективными теплоизоляционными материалами протекают процессы переноса теплоты и массы, формирующие их тепловлажностный режим. Особенностью многослойных конструкций является возможность образования зон с повышенной влажностью материалов, что интенсифицирует перенос теплоты, тем самым, ухудшая теплоизоляционные качества ограждений. Использование вентилируемых фасадных систем (ВФС) утепления для большинства конструкций наружных стен обеспечивает отсутствие накопления влаги в их толще и, следовательно, эксплуатацию материалов в области сорбционного увлажнения. Вентилируемая воздушная прослойка улучшает влажностный режим наружных стен с ВФС по сравнению с панельными стенами, стенами из штучных материалов и стенами со скрепленной теплоизоляцией.

В настоящее время разработано большое количество конструкций ВФС утепления. При этом конструкции значительно отличаются по организации вентиляции прослойки, по виду защиты от фильтрации воздуха в слое теплоизоляции, по уровню теплозащиты при одинаковой толщине утеплителя и т.д. Данные различия указывают на необходимость создания классификации ВФС, которая позволит принимать обоснованные конструктивные решения при их проектировании.

1. Классификация вентилируемых фасадных систем

На данный момент известно ряд классификаций ВФС, предложенных в разных странах. В Литве [1] выполнена классификация ВФС по типу вентиляции прослоек. На ее основании предложены меры по предотвращению фильтрации воздуха в теплоизоляционном слое. В Канаде и США [2] разработана классификация конструкций наружных стен, возводимых с защитными экранами и вентилируемыми воздушными прослойками.

Однако в предложенных классификациях не охвачен ряд конструктивных решений утепления ВФС, используемых в Республике Беларусь и странах ближнего зарубежья, что не позволяет их эффективно использовать. Многочисленные натурные и стендовые исследования, проведенные авторами [3], а также анализ работ зарубежных авторов [4, 5, 6, 7 и др.] показали, что при выполнении классификации ВФС для климатических условий Республики Беларусь и стран СНГ необходимо учитывать:

- вид организации вентиляции вентилируемых воздушных прослоек (естественная, механическая);
- расположение вентилируемых воздушных прослоек (в толще стен, у наружного или внутреннего слоя);
- назначение вентилируемых воздушных прослоек (для удаления водяного пара; для подогрева приточного воздуха трансмиссионным теплом и подача его в помещение и др.);
- интенсивность вентиляции вентилируемых воздушных прослоек (слабо вентилируемая – с суммарной площадью входных и выходных вентиляционных отверстий на квадратный метр поверхности стены $F_{от} \leq 3000$ мм^2/м^2, вентилируемая – $3000 < F_{от} \leq 18000$, мм^2/м^2, интенсивно вентилируемая – $F_{от} > 18000$, мм^2/м^2);
- тип защитного экрана (сплошной, из штучных материалов с открытыми вертикальными, либо горизонтальными, либо вертикальными и горизонтальными стыками);
- этажность зданий.

Предлагаемая классификация ВФС и наружных стен с вентилируемыми воздушными прослойками показана на рис. 1.

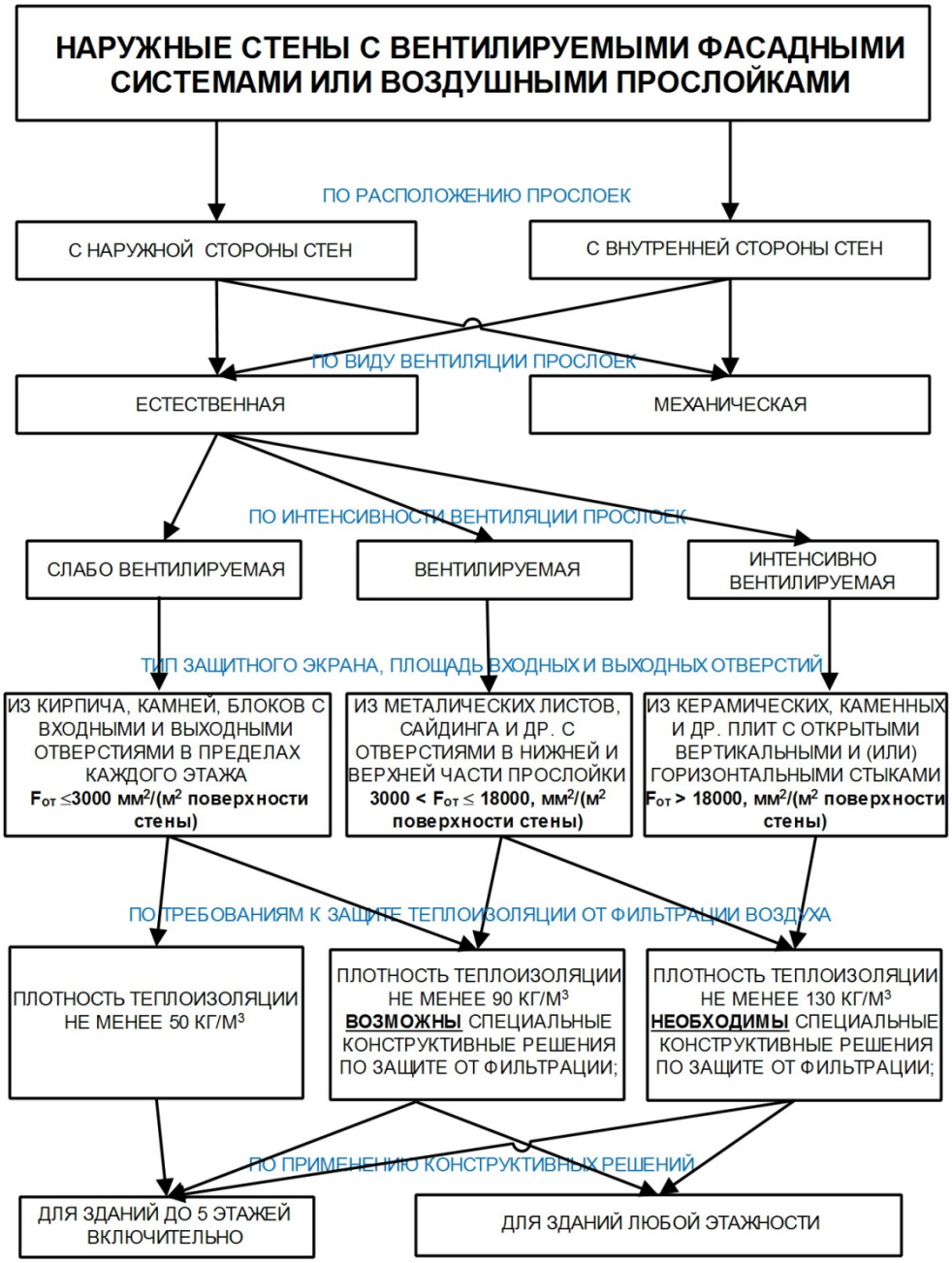


Рисунок 1. Классификация наружных стен с вентилируемыми воздушными прослойками, или ВФС

Наибольшее практическое применение в строительстве получили ВФС утепления с вентилируемыми воздушными прослойками, расположенными с наружной стороны стен, и сконструированные с использованием принципа естественной вентиляции. Различные конструкции наружных стен с ВФС нашли применение при проектировании жилых, административных и общественных зданий и зданий с повышенными требованиями к архитектурному облику, с экранами из стекла и стеклопакетов в высотном строительстве.

Одним из наиболее сложных вопросов при проектировании, строительстве и эксплуатации ВФС является обеспечение нормируемого сопротивления теплопередаче стен из-за возможности возникновения фильтрации воздуха в слое теплоизоляции и особенностей крепления подоблицовочной конструкции и экрана к основанию стены.

Несмотря на наличие проблемы защиты теплоизоляции от охлаждающего фильтрационного потока воздуха [7, 8, 9, 10 и др.], универсального решения на данный момент не разработано.

Для снижения негативного влияния фильтрации воздуха в ВФС утепления с «интенсивно вентилируемой» прослойкой предлагается, вне зависимости от этажности здания, использовать минераловатные плиты плотностью не менее 130 кг/м^3 и тщательно выполнять подготовку поверхности стен под теплоизоляцию. В «вентилируемых» прослойках фасадных систем возможно использование минераловатных плит плотностью не менее 90 кг/м^3 и, в зависимости от этажности, следует предусматривать специальные конструктивные решения для защиты от фильтрации воздуха.

2. Влияние подоблицовочной конструкции на сопротивление теплопередаче наружных стен с вентилируемыми фасадными системами

Многочисленные исследования [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 и др.] проведены по определению влияния элементов крепления ВФС утепления наружных стен на величину их приведенного сопротивления теплопередаче. Металлические элементы крепления являются теплопроводными включениями и значительно снижают величину сопротивления теплопередаче стен. Влияние на перенос теплоты оказывает каждая точка крепления, как слоя теплоизоляции, так и экрана, материал элементов крепления, вид защитного экрана и другие факторы. Снижение сопротивления теплопередаче стен из-за влияния теплопроводных включений принято учитывать введением коэффициентов теплотехнической однородности:

$$r = \frac{R_T^{Вк}}{R_T},$$

где R_T – сопротивление теплопередаче по «глади» наружной стены, м^2·°С/Вт;
$R_T^{Вк}$ – сопротивление теплопередаче расчетного фрагмента наружной стены с учетом влияния теплопроводных включений, м^2·°С/Вт.

Определение сопротивления теплопередаче расчетного участка наружной стены следует выполнять с учетом влияния ветрового воздействия на здание, которое определяет режим движения и интенсивность теплообмена в вентилируемой воздушной прослойке.

Особое внимание следует уделить определению границ расчетных участков теплопроводных включений. Зоны влияния, создаваемые теплопроводными включениями, определяются по изолиниям или изоповерхностям температуры в каждом *i*-том расчетном фрагменте. При этом геометрические размеры расчетных фрагментов не должны быть «заужены».

В качестве примера определения влияния теплопроводных включений на уровень теплозащиты выполнены расчеты сопротивления теплопередаче участков наружной стены жилого дома, утепленной ВФС.

Наружная стена – из керамзитобетонных стеновых панелей с наружным железобетонным слоем толщиной δ = 30 мм, средним слоем из керамзитобетона (ρ = 1000 кг/м^3) толщиной δ = 250 мм и внутренним фактурным слоем из бетона, толщиной δ = 20 мм.

Вентилируемая фасадная система – с теплоизоляционным слоем из минераловатных плит на основе базальтового волокна (ρ = 90 кг/м^3, λ_A = 0,0406 Вт/(м·°С)) толщиной δ = 100 мм. Защитный экран выполнен металлическим профилированным сайдингом; крепление экрана к основанию стены – с помощью кронштейнов и анкеров. Крепление минераловатных плит к основанию предусмотрено с помощью дюбелей с металлическими сердечниками ∅5 мм. Толщина вентилируемой воздушной прослойки δ = 60 мм.

Геометрические размеры кронштейнов приняты как для ВФС утепления реального объекта.

В ходе расчетов варьировались:

- количество точек установки кронштейнов на 1 м^2 площади стены (1 и 2 шт./м^2);
- материал, из которого выполнены кронштейны (сталь и алюминий);
- количество дюбелей с металлическими сердечниками для крепления слоя теплоизоляции (2, 4, 6 и 8 шт./м^2).

Коэффициенты теплопроводности материалов приняты в соответствии с действующей нормативно-технической документацией для условий эксплуатации «А».

а)

б)

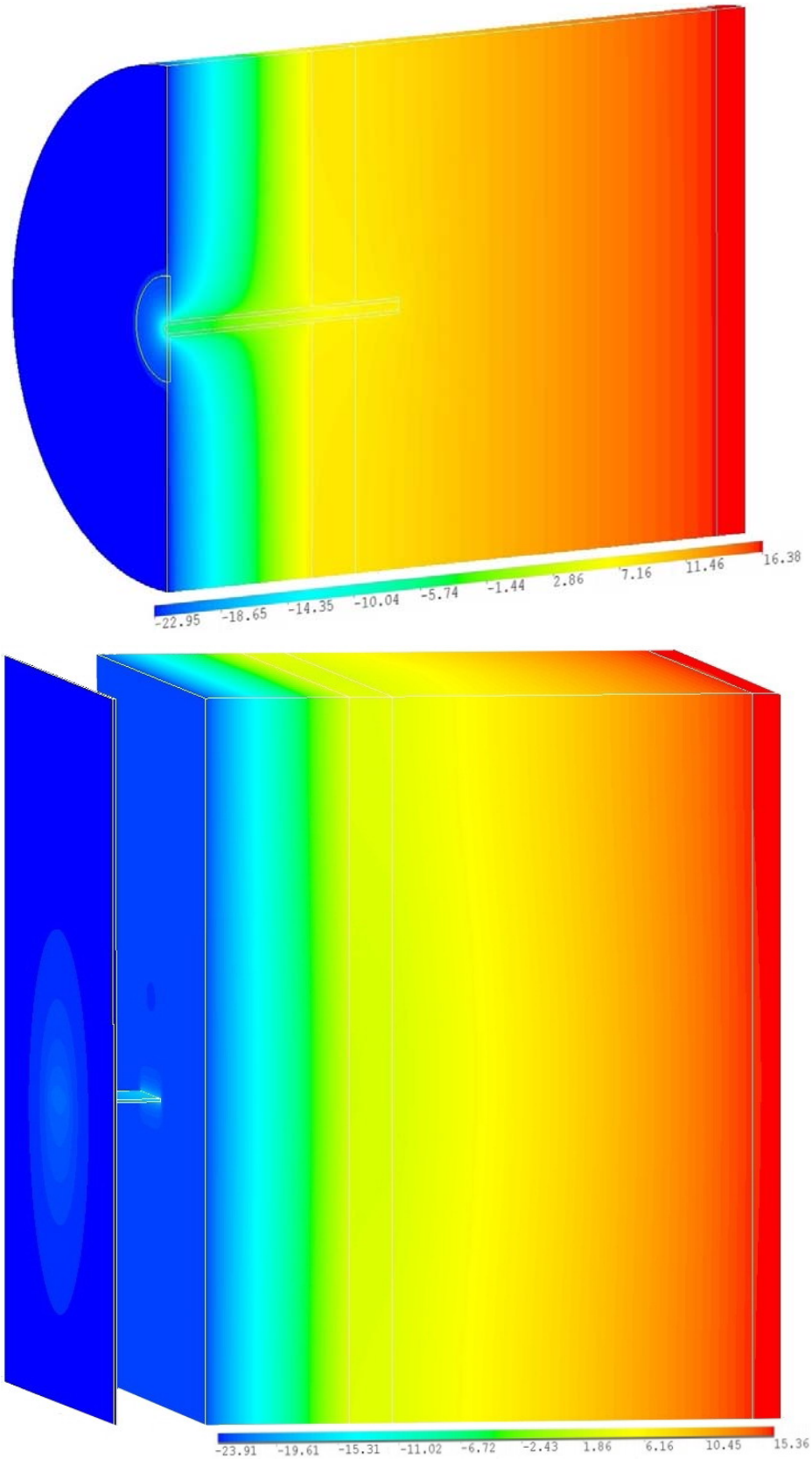


Рисунок 2. Трехмерные поля температур (t, °C) фрагментов наружной стены с ВФС утепления: а – дюбель с металлическим сердечником крепления слоя теплоизоляции; б – кронштейн с анкером крепления защитного экрана

Температурные поля фрагментов указанной наружной стены с теплопроводными включениями показаны на рис. 2. Результаты расчетов коэффициентов теплотехнической однородности приведены в табл. 1 и 2.

Определяющее влияние на уровень теплозащиты наружных стен с ВФС оказывают кронштейны, их материал и количество на единицу площади фасада. При этом установка стальных кронштейнов предпочтительнее по сравнению с алюминиевыми вследствие более высоких коэффициентов теплотехнической однородности утепленной стены.

Таблица 1

Сопротивление теплопередаче по «глади» стены R_T, м²·°С/Вт	**Коэффициент теплотехнической однородности для каждого из теплопроводных включений**							
	Кронштейны с анкерами				Дюбеля с металлическими сердечниками, шт./м²			
	алюминиевые, шт./м²		стальные, шт./м²		2	4	6	8
	1	2	1	2				
3,446	0,768	0,536	0,858	0,717	0,986	0,972	0,957	0,944

Таблица 2

Тип и количество теплопроводных включений на 1 м² поверхности стены	**Коэффициент теплотехнической однородности наружной стены с ВФС утепления**	**Сопротивление теплопередаче расчетного фрагмента наружной стены с учетом влияния включений $R_T^{Вк}$, м²·°С/Вт**
Стальной кронштейн с анкером (1 шт.) и дюбеля с металлическими сердечниками (6 шт.)	0,816	2,81
Алюминиевый кронштейн с анкером (1 шт.) и дюбеля с металлическими сердечниками (6 шт.)	0,726	2,50

Общий коэффициент теплотехнической однородности ВФС утепления при установке 1-го кронштейна и 6 дюбелей с металлическими сердечниками на 1 м² площади наружной стены (см. таблицу 2) получен в пределах r = 0,726 ... 0,816; сопротивление теплопередаче стены с учетом влияния теплопроводных включений – в пределах $R_T^{Вк}$ = 2,50 ... 2,81 м²·°С/Вт, что ниже нормативного сопротивления теплопередаче $R_{Т.Н.}$ = 3,2 м²·°С/Вт, принятого в Республике Беларусь.

При проектировании ВФС утепления с «тяжелыми» экранами (из керамических, керамогранитных и бетонных плит) увеличение точек крепления защитного экрана еще сильнее снижает уровень теплозащиты наружных стен в целом. В ряде случаев увеличением толщины слоя теплоизоляции сложно добиться действующих нормативных величин сопротивления теплопередаче наружных стен.

Заключение

Разработанная классификация вентилируемых фасадных систем и наружных стен зданий с вентилируемой воздушной прослойкой позволяет выполнить предварительную оценку при принятии решения по проектированию ВФС утепления для различных зданий. Особое внимание в данной статье уделено необходимости тщательного подхода к решению вопросов по защите теплоизоляции ВФС от фильтрации в их толще наружного воздуха.

Представлены результаты расчетов коэффициентов теплотехнической однородности наружных стен с ВФС утепления с различным количеством теплопроводных включений. Указано, что снижение уровня теплозащиты наружной стены может достигать 50% вследствие влияния элементов крепления экранов и слоя теплоизоляции.

Литература

1. Проектирование и строительство стен с воздушными промежутками: Рекомендации / Институт архитектуры и строительства. Вильнюс, 2002. 24 с.
2. Salonvarra M., Karagiozis Achilles N., Pazera M., Miller W. Air Cavities Behind Claddings – What Have We Learned? [Электронный ресурс] // Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference. – Florida, USA, December 2-7, 2007. URL: http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/B_X_Proceedings.htm. (Дата обращения: 20.01.2011).
3. Протасевич А. М., Крутилин А. Б. Натурные исследования наружных стен зданий, теплоизолированных по системе «вентилируемый фасад» // Современные фасадные системы: эффективность и долговечность: Материалы научно-технической конференции. Москва, 21 ноября 2008 г. М. : МГСУ, 2008. С. 212–217.
4. Езерский В. А., Монастырев П. В. Влияние вентилируемого фасада на теплозащитные качества утеплителя // Жилищное строительство. 2003. № 3. С. 18–20.
5. Блюджюс Р., Самаяаускас Р. Воздействие передвижения воздуха на теплопередачу конструкций с теплоизоляцией из минераловатных плит // Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях: Материалы шестой научно-практической конференции. Москва, НИИСФ, 26 – 28 апреля, 2001 г. М., 2001. С. 157–188.
6. Самаяускас Р., Станкявичюс В., Блюджюс Р. Воздействие конвекции на теплопередачу через вентилируемые ограждения. Каунас : Технология, 2003. 125 с.
7. Гагарин В. Г., Козлов В. В., Садчиков А. В. О влиянии продольной фильтрации воздуха на теплозащиту стен с вентилируемым фасадом // СтройПРОФИль. 2005. № 6. С. 34–36.
8. Лешкевич, М. В. Как строить чтобы меньше гореть? Перспективы перехода к европейским требованиям пожарной опасности вентилируемых фасадов // Мастерская. Современное строительство. 2010. № 7. С. 13–15.
9. Немова Д. В. Навесные вентилируемые фасады: обзор основных проблем // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 5(15). С. 7-11.
10. Мешалкин Е. А. Пожарная безопасность навесных вентилируемых фасадов // Пожарная безопасность в строительстве. 2011. № 3. С. 40-47.
11. Гагарин В. Г. Теплотехнические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 5. С. 297-305.
12. Гагарин В. Г.,. Козлов В. В, Цыкановский Е. Ю. Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором. Часть 1 // АВОК. 2004. № 2. С. 20–26.
13. Гагарин В. Г., Козлов В. В., Цыкановский Е. Ю. Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором. Часть 2 // АВОК. 2004. № 3. С. 20–26.
14. Езерский В. А., Монастырев П. В., Федоров С. В. Коэффициент теплотехнической однородности наружных стен вентилируемых фасадов // Жилищное строительство. 2004. № 12. С. 8–11.
15. Tanner C., Zürcher C. Bauphysik der hinterlüfteten Fassade. Ein Einblick in ausgewählte physikalische Phänomene und Folgerungen für die konstruktive Umsetzung und Ausführung [Электронный ресурс] // Hinterlüftete Fassade als Witterungsschutz: WTA Seminar. Системные требования: Adobe Acrobat Reader. URL: www.wta-schweiz.ch/mitglieder/seminar-04-hugentobler.pdf (Дата обращения: 20.01.2011).
16. Peer L. B. B. Practical Use of Thermal Breaks in Cladding Support Systems [Электронный ресурс] // Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference. Florida, USA, December 2-7, 2007. URL: http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/B_X_Proceedings.htm. (Дата обращения: 20.01.2011)

** Антон Борисович Крутилин, Минск, Республика Беларусь*

Тел. моб.: +37(529)754-05-67; эл. почта: ankr@tut.by

Формула стеклопакета для зданий повышенной этажности

Директор А. Ю. Куренкова,
НИУПЦ «МИО»;
магистрант А. В. Кузьменко;
магистрант О. М. Куренкова*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: светопрозрачные конструкции; формула стеклопакета; здания повышенной этажности; толщина наружного стекла; эксплуатационная нагрузка; монтажная нагрузка; ветровая нагрузка; оконные блоки; дверные блоки; гармонизация норм

В городах нашей страны все больше строится домов высотой более 16 этажей. С переходом на массовое применение стеклопакетов в оконных блоках становится актуальным расчет формулы стеклопакета для новых высотных зданий.

Почему проблема расчёта формулы стеклопакета не рассматривалась ранее? На начальном этапе производства (в советский период) расчёт производился по СН-481-75 «Инструкция по проектированию, монтажу и эксплуатации», но на оборудовании того времени не могли изготавливаться стеклопакеты больших размеров, поэтому особой актуальности таких расчётов не было. Кроме того, методика расчёта прочностных свойств стеклопакета, изложенная в данной инструкции, довольно сложна и крайне редко применялась при проектировании.

В 90-х годах XX века, с приходом в нашу страну новых технологий изготовления стеклопакетов, появилась возможность значительно увеличить их габаритные размеры. Но стеклопакеты монтировали главным образом на высотах до 40 м, что также не вызывало потребности в расчётах толщины наружного стекла или величины межстекольного расстояния в стеклопакете.

Однако увеличение доли светопрозрачных конструкций на фасадах и повышение этажности жилых домов поставили новые задачи и потребовали учитывать в расчёте формулы стеклопакета не только ветровые нагрузки, указанные в СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия», но и конкретные условия их эксплуатации.

Европейские нормативные документы включают в себя DIN 1055-4-2005 [1], DIN1249 [2], DIN 18516 [3] и позволяют произвести достаточно обоснованный расчёт прочности стеклопакетов с учетом всех видов нагрузок. Но в отличие от европейских, в российских климатических условиях стеклопакет испытывает гораздо большие температурные перепады, особенно в весенний период. В течение года температура меняется от −50ºС до +80ºС на южных фасадах, а весной в течение суток изменение температуры может быть до 40ºС. Такие температурные воздействия требуют увеличения толщины стекла для обеспечения нормальной эксплуатации при резких изменениях нагрузок. Кроме того, продолжительность строительства высотных объектов в России превышает один год, что ставит стеклопакет в период производства строительных работ в условия эксплуатации, отличные от проектных. Эти особенности описаны в работах Борискиной И.В. [4, 5, 6], Кондратьева Н. [7], Лаутер К. [8], Микова В.Л. [9], Милькова В.Г. [10], Щурова А.Н. [11, 12].

Для объектов многоэтажного и высотного строительства определение ветровых нагрузок, действующих на стеклопакет, играет важную роль. Кроме того, разрушение стеклопакетов может быть обусловлено воздействием перепадов температур и атмосферного давления на стадии зимнего монтажа, а также в период эксплуатации стеклопакетов, особенно в период незавершённого или приостановленного строительства.

Компенсация повышенных нагрузок и воздействий увеличением толщины стекла влечёт за собой рост цены не только стеклопакета, но и всего окна в целом, т.к. увеличение веса может потребовать дополнительных затрат как на фурнитуру, так и на элементы несущей конструкции оконного блока. Поэтому расчёт формулы стеклопакета является также финансовым инструментом.

Постановка задачи

Целью данной статьи является адаптация методики расчета формулы стеклопакета с учётом кратковременных монтажных нагрузок в период возведения и нагрузок, возникающих на стадии эксплуатации здания. Учитывая тот факт, что сегодня предстоит гармонизация российских нормативов с европейскими, в методике были взяты за основу и адаптированы к российским климатическим условиям нормы, применяемые в Европейском Союзе.

Прочностные расчёты стеклопакетов по данной методике должны выполняться после теплотехнического расчёта оконного блока по СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» и СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». Затем происходит уточнение и корректировка его формулы с учётом монтажных и эксплуатационных нагрузок в соответствии с требованиями к стеклу ГОСТ 111-2001 «Стекло листовое. Технические условия». Прочностные расчёты стеклопакетов производятся из условия совместного воздействия ветровой и климатической нагрузок (перепады температур и давления во внутренней полости стеклопакета) и сводятся к определению необходимой толщины стёкол и величины межстекольного расстояния для стеклопакета в соответствии с его габаритными размерами и высотной отметкой установки.

Предлагаемая методика включает в себя учёт нагрузки на стеклопакет и расчет прогиба стекла как оценочной характеристики разрушения стекла.

Расчет нагрузки на стеклопакет

При расчёте принимаем, что наибольшую нагрузку испытывает наружное стекло стеклопакета. Цилиндрическую жесткость стекла считаем не зависящей от температуры, атмосферное давление в период производства и давление при эксплуатации одинаковы.

По европейской методике полная нагрузка, действующая на наружное стекло, определена как:

$$P = P_{\delta} + W_m + \Delta P, \quad (1)$$

где P_{δ} – собственный вес стекла и снега на единицу площади [кН/м2];
W_m – ветровая нагрузка [кН/м2];
ΔP – климатическая нагрузка от перепадов атмосферного давления и температуры, [кН/м2].

Для стеклопакета, установленного вертикально, P_{δ}=0 (оконные и фасадные конструкции), соответственно, формула (1) запишется в виде:

$$P = W_m + \Delta P. \quad (1.1)$$

Аналогично статическим расчётам профильных элементов, расчётное значение ветрового давления принимается согласно DIN EN 12210-2003 [13].

Значение климатической нагрузки ΔP определяется согласно DIN 1055 [1] по формуле:

$$P_0 = 0{,}34\Delta T - \Delta P_{мет} + 0{,}012\Delta h, \quad (2)$$

где $\Delta T = T_t - T_{пр}$ – разница температур эксплуатации и производства стеклопакета (разница температур в воздушной полости стеклопакета во время производства и в данный момент эксплуатационного периода), [°К];
$\Delta P_{мет} = P_t - P_{пр}$ – разница атмосферных давлений во время эксплуатации и во время производства стеклопакета, [кН/м^2];
$\Delta h = h_t - h$ – разница геодезических высот места эксплуатации и места производства стеклопакета, [м] (не более 500 м).

При условии производства и эксплуатации стеклопакетов в одном климатическом регионе и при относительно постоянном атмосферном давлении уравнение (2) запишется в виде:

$$P_0 = 0{,}34\Delta T. \quad (2.1)$$

При этом расчётное значение климатической нагрузки может быть приближённо определено из соотношения:

$$P_0 = 0{,}34\alpha\Delta T, \quad (3)$$

где α – коэффициент, определяющий жёсткость стеклопакета и зависящий от его габаритных размеров и толщины стёкол и воздушной прослойки [5].

Прогиб стекол

Возможность разрушения стеклопакета под действием неблагоприятного сочетания климатических и ветровых нагрузок оценивается величиной максимально допустимого прогиба в центральной зоне, зависящего от величины расчётного сопротивления листового стекла растяжению при изгибе. Согласно рекомендациям ГОСТ 24866-99 «Стеклопакеты клееные строительного назначения», эту величину рекомендуется принимать $\sigma_{из}$ =15 МПа = 150 кгс/см^2 = 0,15 кН/м^2 = 15 Н/мм^2. В европейских документах это значение намного выше российских нормативов. Так, согласно DIN 1249-10 [2], расчётное сопротивление листового стекла растяжению при изгибе принимается равным $\sigma_{из}$ = 30 Н/мм^2, закалённого стекла – 50 Н/мм^2.

Согласно рекомендациям [13], величину максимально допустимого прогиба при изгибе принимаем равной $f_{изг} \leq L/100$, где L – длинная сторона стеклопакета [мм].

Фактический прогиб стёкол в реальных условиях эксплуатации не является постоянным и зависит как от температуры воздуха в воздушной прослойке стеклопакета в текущий момент времени, так и от жёсткости стёкол, определяемой их толщиной и габаритами.

Пример расчета формулы стеклопакета

Рассчитаем с использованием данной методики формулу стеклопакета для здания, имеющего следующие характеристики:

- место строительства – Санкт-Петербург;
- район строительства – II согласно СНиП 2.01.07-85*;
- тип местности – С: согласно п. 6.5 СНиП 2.01.07-85*;
- высота здания Н = 81 м;
- аэродинамический коэффициент с = 1,2 (определён генеральным проектировщиком).

Приведём расчёт стеклопакета размером 637х1290 мм.

На основании теплофизических требований для Санкт-Петербурга (согласно СНиП 23-01-99) задаётся предварительная формула стеклопакета 4М1-16-И4. Из того же СНиП интервал эксплуатационных температур задаётся от −30°С до +22°С.

Максимальная высота отметки фасада 81 м от поверхности земли.

$W_m = 1{,}435$ *кН/м^2*

Наихудшие условия для стеклопакета создаются в крайней зимней температурной точке (−30°С):

$$t_{расч} = \frac{t_в + t_н}{2} = \frac{+20-30}{2} = -5°C\,, \qquad (4)$$

где $t_в$ – температура воздуха помещения (+20°С);
$t_н$ – температура наружного воздуха (−30°С).

Эксплуатационная климатическая нагрузка:

$$P_0 = 0{,}34\Delta T = 0{,}34(T_t - T_{пр}) = 0{,}34((-5+273)-(+18+273)) = -7{,}82\,. \qquad (2.1)$$

Монтажная климатическая нагрузка:

$$P_0 = 0{,}34\Delta T = 0{,}34(T_t - T_{пр}) = 0{,}34((-30+273)-(+18+273)) = -16{,}32\,. \qquad (2.1)$$

Коэффициент жёсткости стеклопакета:

$$\alpha = \frac{1}{1+\left(K/K^*\right)^4}\,, \qquad (5)$$

где К – короткая сторона стеклопакета, [мм];
К* – «характеристическая длина» стеклопакета, [мм], определяемая как:

$$K^* = \sqrt[4]{\frac{SD_1D_2}{Pn(D_1+D_2)Av}}. \quad (6)$$

Для стеклопакета с одинаковыми стёклами уравнение (6) запишется в виде:

$$K^* = \sqrt[4]{\frac{SD^2}{2D\,Pn\,Av}} = \sqrt[4]{\frac{SD}{2\,Pn\,Av}}, \quad (6.1)$$

где S – ширина межстекольного пространства (воздушной прослойки) стеклопакета, [мм];
Pn – нормальное атмосферное давление, принимаемое равным Pn=0,1Н/мм^2;
D_1, D_2 – цилиндрические жесткости стёкол, определяемые как

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (7)$$

где E – модуль упругости стекла E=70000 [Н/мм^2];
δ – толщина стекла, [мм];
μ – коэффициент Пуассона (для стекла μ=0,23).

Следовательно:

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-0{,}23^2)} = \frac{70000\,\delta^3}{11{,}37} = 6156\,\delta^3.$$

Av – безразмерная величина, зависящая от соотношения короткой и длинной сторон стеклопакета. Для стеклопакета 637x1290 это соотношение составит K/L=637/1290=0,49. Методом интерполяции по данным табл. 1 получаем *Av* = 0,00447.

Таблица 1. Зависимость значения Av от сторон стеклопакета [4]

Соотношение сторон (K/L)	Av
1:2	0,0044
0,45	0,00478

Для δ =4 мм (предварительная толщина стекла):

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)} = 6156\times 4^3 = 393984.$$

Предварительная величина воздушной прослойки 16 мм:

$$K^* = \sqrt[4]{\frac{SD}{D\,Pn\,Av}} = \sqrt[4]{\frac{16\times 393984}{2\times 0{,}1\times 0{,}0047}} = 286, \quad (6.1)$$

тогда

$$\alpha = \frac{1}{1+\left(K/K^*\right)^4} = \frac{1}{1+(637/286)^4} = 0{,}039. \quad (5)$$

При учёте коэффициента жёсткости стеклопакета расчётные климатические нагрузки составят:

- эксплуатационная нагрузка

$$\Delta P = \alpha P_0 = 0{,}039\times 7{,}82 = 0{,}3 \ \text{кН/м}^2; \quad (8.1)$$

- монтажная нагрузка

$$\Delta P = \alpha P_0 = 0{,}039\times 16{,}32 = 0{,}64 \ \text{кН/м}^2. \quad (8.2)$$

Суммарные расчётные нагрузки на наружное стекло:

- эксплуатационная нагрузка

$$P = W_m + \Delta P = 1{,}435 + 0{,}3 = 1{,}735 \ кН/м^2; \quad (1.1)$$

- монтажная нагрузка

$$P = W_m + \Delta P = 1{,}435 + 0{,}64 = 2{,}075 \ кН/м^2. \quad (1.1)$$

Требуемая толщина наружного стекла δ, необходимая для восприятия расчётных нагрузок, определяется согласно [2] по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{\varphi P (K/2)^2 \times 10^3}{\sigma_{из}}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{из}$ – прочность стекла при изгибе [Н/мм^2], принимается согласно ГОСТ 24866-99 $\sigma_{из}$ = 15 Н/мм^2.

$$\delta = \sqrt{\frac{2{,}45 \times 1.735 (0.637/2)^2 \times 10^3}{15}} = 5{,}36.$$

Таким образом, **необходимая толщина наружного стекла по расчету 6 мм**.

Эксплуатационный прогиб наружного стекла равен:

$$f = \frac{\psi P (K/2)^4 \times 10^9}{E\delta^2} \le f_{изг}. \quad (10)$$

Здесь *φ, ψ* определяются из соотношения *L/K* по табл. 2 методом интерполяции.

Таблица 2. Зависимость расчётных коэффициентов от отношения сторон стеклопакета [4]

L/K	φ	ψ
1,36	1,76	1,19
1,38	1,79	1,22

Отсюда получаем для наружного стекла:

$$f = \frac{1{,}78 \times 2{,}075 \times (0{,}637/2)^4 \times 10^9}{70000 \times 6^2} = 2{,}51 \ мм,$$

эксплуатационный прогиб внутреннего стекла определяем аналогично:

$$f = \frac{1{,}78 \times 2{,}075 \times (0{,}637/2)^4 \times 10^9}{70000 \times 4^2} = 8{,}48 \ мм.$$

Тогда суммарный «встречный» расчетный прогиб обоих стёкол составит 8,48 + 2,51 = 10,99 мм.

Таким образом, воздушная прослойка между стеклами для рассчитываемых условий должна быть не менее 11 мм, что исключает применение в стеклопакетах наиболее распространенной межстекольной рамки 10 мм. Кроме того, прогиб внутреннего стекла превышает действующие нормативы, что потребует также увеличения его толщины.

Выводы

1. Предлагаемая методика позволяет в расчете формулы стеклопакета учесть не только ветровые нагрузки, но и температурные климатические воздействия для конкретного места установки оконного блока.

2. Расчёты свидетельствуют о необходимости использования данной методики, в первую очередь, для зданий повышенной этажности. Обязательность таких расчётов повысит безопасность эксплуатации стеклопакетов и практически исключит вероятность растрескивания стекла. Расчёт позволяет получить наиболее точную формулу стеклопакета, рассчитать не только толщину наружного и внутреннего стекла, но и величину межстекольного расстояния, что ранее не практиковалось.

3. Для конкретных условий расчёта при высоте установки оконного блока более 80 метров максимальный расчетный «встречный» прогиб обоих стёкол с учетом всех нагрузок и воздействий составил 11 мм, что исключает применение для данной и большей высотности наиболее распространенной межстекольной рамки толщиной 10 мм. Кроме того, толщина внутреннего стекла по результатам расчета должна быть увеличена до 5 мм для обеспечения требований ГОСТ 24866-99.

4. Для минимизации растрескивания стекла в стеклопакете и получения графика зависимости соотношения сторон и толщины стёкол в дальнейшем необходимо проведение лабораторных исследований.

Литература

1. DIN 1055-4-2005. Action on structures – Part 4: Wind loads.
2. DIN 1249. Glass for use in building construction; chemical and physical properties.
3. DIN 18516. Cladding for external walls, ventilated at rear – Part 1: Requirements, principles of testing.
4. Борискина И. В., Щуров А. Н., Плотников А. А. Окна для индивидуального строительства. Техническое руководство по проектированию современных окон из ПВХ для объектов коттеджного строительства и зданий малоэтажной застройки / ООО «Функе Рус», ООО «Кристалл Гласс», «ЗИГЕНИА-АУБИ КГ». М., 2010. 320 с.
5. Борискина И. В., Шведов Н. В., Плотников А. А. Современные светопрозрачные конструкции гражданских зданий. Справочник проектировщика. Том II Оконные системы из ПВХ / НИУПЦ «Межрегиональный институт окна». СПб., 2005. 320 с.
6. Борискина И. В., Плотников А. А., Захаров А. В. Проектирование оконных систем гражданских зданий: Учебное пособие. СПб. : ВЫБОР, 2008. 360с.
7. Кондратьева Н. В. Прочность листового стекла в фасадных системах, покрытиях и перекрытиях зданий и сооружений // Стекло и бизнес. 2010. №2. С. 40-42.
8. Лаутер К., Веер Ф. Экспериментальное исследование армированной стеклянной балки длиной 18 м в масштабе 1:4. Часть I // Стекло и бизнес. 2009. №3. С. 40-45.
9. Миков В. Л. Внимание высота // Светопрозрачные конструкции. 2003. №6(32). С. 51-52.
10. Мильков В. Г., Успенкий А. А. Создание стеклопакетов для зданий повышенной этажности // Стройпрофиль. 2006. №3(49). С. 72-74.
11. Щуров А. Н. Прочностные расчёты стёкол в стеклопакете // Светопрозрачные конструкции. 2005. №6(44). 2005. С. 33.
12. Щуров А. Н. Прочностные расчёты стёкол в стеклопакете // Светопрозрачные конструкции. 2006. №1(45). С. 48-49.
13. DIN EN 12210-2003: Windows and doors – Resistance to wind load – Classification (includes Corrigendum AC: 2002). Publication Date: Aug 1, 2003.

** Ольга Мирославовна Куренкова, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(904)639-28-32; эл. почта: kurenkova.om@mail.ru

Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей

Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой В.В. Лалин;
аспирант В.А. Рыбаков*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: термопанель; кручение; депланация; интерполяционные полиномы; деформация сдвига; бимомент; матрица жесткости

В последние годы в России и за рубежом [1, 2] наблюдается широкое применение металлоконструкций в промышленном и гражданском строительстве. Особое место в строительной индустрии занимают легкие стальные тонкостенные конструкции, имеющие ряд технологических и эксплуатационных достоинств (легкость, быстровозводимость и т.д.) [3, 4].

В сборно-монолитном и каркасном строительстве, объемы которого постоянно растут, в качестве эффективных и экономичных ограждающих конструкций можно использовать так называемые термопанели [5, 6]. Термопанели – это панели наружных стен с каркасом из тонкостенных термопрофилей [7]. Из термопанелей строятся наружные стены многоэтажных зданий на железобетонном или стальном каркасе, которые воспринимают ветровую нагрузку, действующую на фасад, и переносят её на основной несущий каркас здания (рис. 1).

Рисунок 1. Вариант ограждающей конструкции: навесная конструкция стены

Теории расчета обычных (толщиной, как правило, более 4 мм) конструкций оказываются неприменимы к тонкостенным, являющимися основными, конструкциям термопанели, ввиду малой толщины профилей.

Для повседневного решения инженерных задач расчета элементов тонкостенных конструкций можно выделить принципиально 2 группы способов расчета: основанные на оболочечном моделировании и на стержневом.

Первая группа связана с представлением тонкостенного стержня в виде оболочки и дальнейшим численным расчетом, как правило, с помощью метода конечных элементов, в программных комплексах SCAD, Lira, SOFiSTiK и т.д. [8-12 и др.]. Такие способы расчета являются достаточно точными, но весьма трудоемкими в инженерно-конструкторской деятельности, особенно с точки зрения комплексного расчета конструкции.

Во второй группе способов можно выделить аналитические и численные методы расчета тонкостенных стержней, связанные с введением дополнительной «седьмой» степени свободы [13, 14].

Как нами отмечалось ранее в [15, 16], аналитические методы решения [17-20], как правило, являются трудоемкими для повседневного применения ввиду сложности математических

уравнений и функций, и возникает необходимость использования численных методов расчета, например, метода конечных элементов (МКЭ) [21, 22].

Так, в диссертации Туснина А.Р. [23] предлагается так называемый метод тонкостенных конечных элементов, анализируя который, следует отметить следующее.

1. Безразмерные коэффициенты $\mu, g.\alpha, \lambda$ при компонентах матриц жесткости являются отношением гиперболических функций, например,

$$\mu = \frac{kl(kl\,ch(kl) - sh(kl))}{kl\,sh(kl) - 2ch(kl) + 2}, \quad (1)$$

знаменатель которых при определенных значениях параметров может быть вырожден.

2. Не решена задача учета деформаций сдвига при кручении в тонкостенных стержнях. Принимаемое в теории В.З. Власова [10] допущение о равенстве нулю угла сдвига $\gamma_\omega = 0$, автоматически влечет за собой зависимость между углом закручивания $\theta(x)$ и мерой депланации $\beta(x)$:

$$\theta^{/} = \beta\,. \quad (2)$$

3. Метод тонкостенных конечных элементов неприменим для расчета тонкостенных стержней замкнутого профиля (коробчатый, составной и др.).

С другой стороны, в различных теориях тонкостенных стержней фигурирует понятие дополнительного силового фактора, ***бимомента***, отвечающего «седьмой степени свободы» – депланации тонкостенного стрежня [14, 18].

Следует отметить, что в инженерной практике бимомент является важной характеристикой, поскольку он напрямую влияет на нормальные напряжения [14, 18]:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} + \frac{B_\omega}{W_\omega}\,. \quad (3)$$

Как известно, нормальные напряжения относятся к первой группе предельного состояния конструкции, нормируются строительными нормами, отвечают за прочность и устойчивость конструкции и, соответственно, нуждаются в точном вычислении.

Также следует отметить, что в новом СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*», введенного в действие с 20 мая 2011 г., бимомент как силовой фактор фигурирует наравне с остальными силовыми факторами: формула (43) для поперечно-изгибаемых элементов сплошного сечения; формулы (105) и (106) – для элементов, воспринимающих продольную силу с изгибом.

Формулы (43), (105) и (106) СП 16.13330.2011 по своей сути являются модификацией формулы (3), приведенной выше.

Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям [9, 14, 18, 19, 23, 24 и др.], в тонкостенных конструкциях, находящихся в условиях изгибного кручения, составляющая нормальных напряжений от бимомента может значительно превышать составляющую от изгибающего момента, а влияние касательных напряжений на напряженно-деформированное состояние мало по сравнению с влиянием нормальных напряжений.

Поэтому, с учетом того, что бимомент является производной некоторого порядка от функций перемещений, в данной статье рассмотрим различные способы аппроксимаций функций перемещений, влияющих на точность вычисления бимомента.

Итак, **целью работы** является разработка численного метода расчета тонкостенных стержневых систем по полусдвиговой и бессдвиговой теориям расчета. В данной статье рассмотрим первый этап разработки численного метода – построение тонкостенных конечных элементов различных типов в зависимости от способа аппроксимации функций деформаций (кручения и депланации): линейной, квадратичной и кубической.

1. Кубическая аппроксимация функции кручения для бессдвиговой теории тонкостенных стержней В.З. Власова

Согласно [24], выражение энергии деформации E тонкостенного стержня можно представить как функционал от функций перемещений ξ,θ,ζ,η, являющийся частью функционала Лагранжа:

$$E(\xi,\theta,\zeta,\eta)=\frac{1}{2}\int_0^l((EA(\xi^{/})^2+EI_y(\zeta^{//})^2+EI_z(\eta^{//})^2+EI_\omega(\theta^{//})^2+GI_d(\theta^{/})^2)dx\,, \qquad (4)$$

где EA, EI_y, EI_y – жесткости на растяжение-сжатие и изгиб в двух плоскостях;

EI_ω и GI_d – жесткости на депланацию и кручение соответственно.

Поскольку функции $\xi=\xi(x),\zeta=\zeta(x),\eta=\eta(x)$ описывают деформации соответственно растяжения-сжатия и изгиба в двух направлениях и являются независимыми от функции кручения $\theta=\theta(x)$, то в дальнейшем будем опускать составляющие подынтегрального выражения с их участием и рассматривать только функцию кручения как независимую:

$$E(\theta)=\frac{1}{2}\int_0^l(EI_\omega(\theta^{//})^2+GI_d(\theta^{/})^2)dx\,. \qquad (5)$$

Разобьем тонкостенный стержень, имеющий длину L, на n двухузловых конечных элементов.

Рассмотрим *i*-й конечный элемент длиной l с 4 степенями свободы: два узловых поворота относительно оси *x*, отвечающих углам закручивания θ_i и θ_{i+1}; две меры депланации $\theta_i^{/}$ и $\theta_{i+1}^{//}$ (рис. 2).

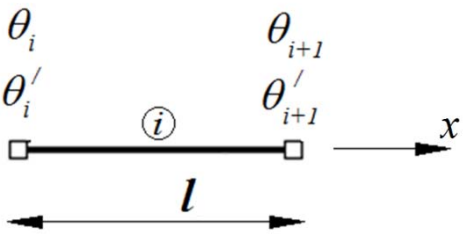


Рисунок 2. Двухузловой конечный элемент с 4 степенями свободы (по бессдвиговой теории)

Столбец узловых перемещений в пределах одного КЭ:

$$[U^{(i)}]=\begin{pmatrix}\theta_i\\ \theta_i^{/}\\ \theta_{i+1}\\ \theta_{i+1}^{/}\end{pmatrix}. \qquad (6)$$

Для применения метода конечных элементов к теории тонкостенных стержней представим функцию кручения $\theta(x)$ в пределах одного конечного элемента с помощью кубических интерполяционных полиномов Эрмита $Э^{(i)}$ [25], умноженных на узловые неизвестные:

$$\theta(x)=Э_1^{(i)}\theta_i+Э_2^{(i)}\theta_i^{/}+Э_3^{(i)}\theta_{i+1}+Э_4^{(i)}\theta_{i+1}^{/}\,. \qquad (7)$$

Поскольку в выражении функционала (5) максимальная степень производной от входящей в него аппроксимируемой функции перемещений θ – вторая, то минимальной степенью интерполяционных полиномов будет третья степень.

Запишем в матричной форме функционал энергии деформации (4). Для этого функцию $\theta(x)$ представим в виде матричного произведения:

$$\theta(x)=[Э^{(i)}][U^{(i)}]\,, \qquad (8)$$

где $[Э^{(i)}]$ – матрица-строка, состоящая из 4 полиномов третьей степени, вид которых приводится, например, в [25]:

$$[Э^{(i)}]=[Э_1^{(i)}(x),Э_2^{(i)}(x),Э_3^{(i)}(x),Э_4^{(i)}(x)]. \quad (9)$$

Подставляя (8) в функционал (5), получим:

$$E=\frac{1}{2}[U^{(i)}]^T[K_\omega^{(i)}][U^{(i)}]+\frac{1}{2}[U^{(i)}]^T[K_d^{(i)}][U^{(i)}], \quad (10)$$

где введены обозначения:

$$[K_\omega^{(i)}]=EI_\omega\int_0^l[Э^{//}]^T[Э^{//}]dx\,;\ [K_d^{(i)}]=GI_d\int_0^l[Э^{/}]^T[Э^{/}]dx\,. \quad (11)$$

Матрицы $[K_\omega^{(i)}]$ и $[K_d^{(i)}]$, имеющие размер 4x4, являются соответственно ***депланационной*** и ***крутильной*** составляющими матрицы жесткости *i*-го элемента $[K^{(i)}]$:

$$[K^{(i)}]=[K_\omega^{(i)}]+[K_d^{(i)}]. \quad (12)$$

После подстановки (9) в (11) и проведения вычислительных операций дифференцирования, а затем – интегрирования, эти составляющие матрицы жесткости окажутся равными:

$$[K_\omega^{(i)}]=\begin{pmatrix} k_{11}^{(i)} & k_{12}^{(i)} & k_{13}^{(i)} & k_{14}^{(i)} \\ k_{21}^{(i)} & k_{22}^{(i)} & k_{23}^{(i)} & k_{24}^{(i)} \\ k_{31}^{(i)} & k_{32}^{(i)} & k_{33}^{(i)} & k_{34}^{(i)} \\ k_{41}^{(i)} & k_{42}^{(i)} & k_{43}^{(i)} & k_{44}^{(i)} \end{pmatrix}=EI_\omega\begin{pmatrix} \frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} & -\frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} \\ \frac{6}{l^2} & \frac{4}{l} & -\frac{6}{l^2} & \frac{2}{l} \\ -\frac{12}{l^3} & -\frac{6}{l^2} & \frac{12}{l^3} & -\frac{6}{l^2} \\ \frac{6}{l^2} & \frac{2}{l} & -\frac{6}{l^2} & \frac{4}{l} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$[K_d^{(i)}]=\begin{pmatrix} k_{11}^{(i)} & k_{12}^{(i)} & k_{13}^{(i)} & k_{14}^{(i)} \\ k_{21}^{(i)} & k_{22}^{(i)} & k_{23}^{(i)} & k_{24}^{(i)} \\ k_{31}^{(i)} & k_{32}^{(i)} & k_{33}^{(i)} & k_{34}^{(i)} \\ k_{41}^{(i)} & k_{42}^{(i)} & k_{43}^{(i)} & k_{44}^{(i)} \end{pmatrix}=GI_d\begin{pmatrix} \frac{6}{5l} & \frac{1}{10} & -\frac{6}{5l} & \frac{1}{10} \\ \frac{1}{10} & \frac{2}{15}l & -\frac{1}{10} & -\frac{1}{30}l \\ -\frac{6}{5}l & -\frac{1}{10} & \frac{6}{5l} & -\frac{1}{10} \\ \frac{1}{10} & -\frac{1}{30}l & -\frac{1}{10} & \frac{2}{15}l \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Окончательно выражение для энергии деформации конечного элемента запишется как:

$$E=\frac{1}{2}[U^{(i)}]^T[K^{(i)}][U^{(i)}]. \quad (15)$$

Силовой потенциал, согласно [22], запишем в виде:

$$\Pi_S(u)=\frac{1}{2}\int_0^l(\xi p_x+\eta p_y+\zeta p_z+\theta m_x+\eta^{/}m_z-\zeta^{/}m_y-\theta^{/}m_B)dx\,, \quad (16)$$

где $p_x, p_y, p_z, m_x, m_z, m_y, m_B$ – распределенные по длине внешние силовые факторы соответственно: 3 силовых нагрузки вдоль осей *x,y* и *z*, далее 3 моментных нагрузки относительно осей *x,y* и *z*, и внешний распределенный бимомент.

Если выделить составляющие работы кручения и депланации, связанные только с функцией $\theta(x)$, то выражение (16) упростится до следующего:

$$\Pi_S(\theta) = \int_0^l (\theta m_x - \theta' m_B)dx . \quad (17)$$

С учетом выражения (8):

$$\Pi_S(u) = \int_0^l ([Э^{(i)}][U^{(i)}]m_x - [Э^{(i)}][U^{(i)}]m_B)dx , \quad (18)$$

или:

$$\Pi_S(u) = [P^{(i)}][U^{(i)}] , \quad (19)$$

где $[P^{(i)}]$ – столбец узловых нагрузок, выражаемый равенством:

$$[P^{(i)}] = \int_0^l ([Э^{(i)}]m_x - [Э^{(i)}]m_B)dx . \quad (20)$$

Стоит отметить, что второе слагаемое подынтегрального выражения (20) практически может быть приравнено к нулю ввиду того, что внешней нагрузки в виде распределенного бимомента в инженерной практике не встречается.

Если обратиться к общей формуле для функционала Лагранжа $L(u)$ [14] в виде:

$$L(u) = E(u) - \Pi_S(u) , \quad (21)$$

то условие минимума лагранжиана на кинематически допустимых полях перемещений сводится к уравнениям Эйлера для этого функционала, являющимися в нашем случае уравнениями равновесия стержня:

$$[K^{(i)}][U^{(i)}] = [P^{(i)}] . \quad (22)$$

2. Полусдвиговая теория расчета. Линейная аппроксимация функций кручения и депланации

В книге Сливкера В.И. [24] предлагается особый вид функционала энергии деформации:

$$E(\theta,\beta) = \frac{1}{2}\int_0^l (EI_\omega(\beta')^2 + GI_d(\theta')^2 + \frac{GI_d}{\psi - 1}(\theta' - \beta)^2)dx , \quad (23)$$

основанного на так называемой полусдвиговой теории тонкостенных стержней, в которой, в отличие от бессдвиговой теории, условие (2) не выполняется. Поэтому функции кручения и депланации (*θ=θ(x)* и *β=β(x)* соответственно) являются независимыми.

В формуле (23) введено обозначение *ψ* – параметр, определяемый коэффициентом влияния формы $\mu_{\omega\omega}$, вычисляемый на основе геометрических характеристик и эпюры секториальных координат.

Данная теория, учитывающая часть энергии сдвига (третье слагаемое подынтегрального выражения (23)) и подходящая для расчета тонкостенных стержней не только открытого, но и замкнутого профилей, в настоящее время не реализована.

Рассмотрим двухузловой *i*-й конечный элемент длиной l, имеющий 4 степени свободы: 2 поворота и 2 возможности депланировать из плоскости сечения в каждом узле (см. рис.3).

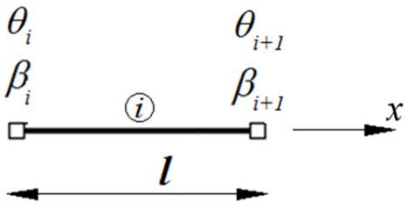


Рисунок 3. Двухузловой конечный элемент с 4 степенями свободы (по полусдвиговой теории)

Начало координат совместим с левым узлом *i*.

Функции перемещений представим в виде произведения суммы линейных полиномов и значений перемещений в узлах:

$$\theta(x) = Э_1^{(i)}\theta_i + Э_2\theta_{i+1}^{(i)}, \tag{24}$$

$$\beta(x) = Э_1^{(i)}\beta_i + Э_2^{(i)}\beta_{i+1}, \tag{25}$$

где $Э_1^{(i)}, Э_2^{(i)}$ – линейные интерполяционные полиномы:

$$Э_1^{(i)}(x) = -\frac{1}{l}x + 1, \tag{26}$$

$$Э_2^{(i)}(x) = \frac{1}{l}x. \tag{27}$$

Отметим, что в выражении функционала (23) обе функции θ и β имеют только первую производную. Поэтому минимальной степенью интерполяционных полиномов будет первая степень.

Столбец неизвестных представим в виде:

$$[U_d^{(i)}] = \begin{pmatrix} \theta_i \\ \beta_i \\ \theta_{i+1} \\ \beta_{i+1} \end{pmatrix}. \tag{28}$$

Запишем в матричной форме функционал энергии деформации (23).

Для этого выражения (24) и (25) для функций $\theta(x)$ и $\beta(x)$ перепишем в виде матричных произведений:

$$\theta(x) = [Э^{(i)}][U_d^{(i)}],\ \beta(x) = [Э^{(i)}][U_\omega^{(i)}], \tag{29}$$

где $[Э^{(i)}]$ – матрица-строка, состоящая из 2 полиномов (26) и (27):

$$[Э^{(i)}] = [Э_1^{(i)}(x), Э_2^{(i)}(x)]; \tag{30}$$

$[U_d^{(i)}]$ и $[U_\omega^{(i)}]$ – столбцы перемещений одного вида:

$$[U_d^{(i)}] = \begin{pmatrix} \theta_i \\ \theta_{i+1} \end{pmatrix}; [U_\omega^{(i)}] = \begin{pmatrix} \beta_i \\ \beta_{i+1} \end{pmatrix}. \tag{31}$$

Разность ($\theta^{/} - \beta$) представим в виде:

$$\theta^{/}(x) - \beta(x) = [\Phi^{(i)}][U^{(i)}], \tag{32}$$

где $[\Phi^{(i)}]$ – матрица-строка, имеющая вид:

$$[\Phi^{(i)}] = [\frac{dЭ_1^{(i)}(x)}{dx}, -Э_1^{(i)}(x), \frac{dЭ_2^{(i)}(x)}{dx}, -Э_2^{(i)}(x)]. \tag{33}$$

Подставляя (29) и (32) в функционал (23), получим:

$$E = \frac{1}{2}[U^{(i)}]^T[K_\omega^{(i)}][U^{(i)}] + \frac{1}{2}[U^{(i)}]^T[K_d^{(i)}][U^{(i)}] + \frac{1}{2}[U^{(i)}]^T[K_{\omega d}^{(i)}][U^{(i)}], \quad (34)$$

где введены обозначения:

$$[K_\omega^{(i)}] = EI_\omega \int_0^l [Э^/]^T[Э^/]dx\,;\ [K_d^{(i)}] = GI_d \int_0^l [Э^/]^T[Э^/]dx\,;[K_{\omega d}^{(i)}] = \frac{GI_d}{\psi - 1}\int_0^l [\Phi]^T[\Phi]dx\,. \quad (35)$$

Матрицы $[K_\omega^{(i)}]$ и $[K_d^{(i)}]$, имеющие размер 2x2, и матрица $[K_{\omega d}^{(i)}]$, имеющая размер 4x4, являются соответственно ***депланационной, крутильной*** и ***депланационно-крутильной*** составляющими матрицы жесткости *i*-го элемента $[K^{(i)}]$:

$$[K^{(i)}] = [K_\omega^{(i)}] + [K_d^{(i)}] + [K_{\omega d}^{(i)}]. \quad (36)$$

После подстановки (30) и (33) в (35) и проведения вычислительных операций дифференцирования, а затем интегрирования, эти составляющие матрицы жесткости, с учетом перехода от размеров 2x2 к 4x4, окажутся равными:

$$[K_\omega^{(i)}] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22}^{(i)} & 0 & k_{24}^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{42}^{(i)} & 0 & k_{44}^{(i)} \end{pmatrix} = EI_\omega \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{l} & 0 & -\frac{1}{l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{l} & 0 & \frac{1}{l} \end{pmatrix}, \quad (37)$$

$$[K_d^{(i)}] = \begin{pmatrix} k_{11}^{(i)} & 0 & k_{13}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{31}^{(i)} & 0 & k_{33}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = GI_d \begin{pmatrix} \frac{1}{l} & 0 & -\frac{1}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{l} & 0 & \frac{1}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (38)$$

$$[K_{\omega d}^{(i)}] = \begin{pmatrix} k_{11}^{(i)} & k_{12}^{(i)} & k_{13}^{(i)} & k_{14}^{(i)} \\ k_{21}^{(i)} & k_{22}^{(i)} & k_{23}^{(i)} & k_{24}^{(i)} \\ k_{31}^{(i)} & k_{32}^{(i)} & k_{33}^{(i)} & k_{34}^{(i)} \\ k_{41}^{(i)} & k_{42}^{(i)} & k_{43}^{(i)} & k_{44}^{(i)} \end{pmatrix} = \frac{GI_d}{\psi - 1} \begin{pmatrix} \frac{1}{l} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{l} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3}l & -\frac{1}{2} & \frac{1}{6}l \\ -\frac{1}{l} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{l} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{6}l & -\frac{1}{2} & \frac{1}{3}l \end{pmatrix}. \quad (39)$$

Силовой потенциал, согласно [24], запишем в виде:

$$\Pi_S(\theta, \beta) = \int_0^l (\theta m_x - \beta m_B)dx\,. \quad (40)$$

С учетом выражений (29):

$$\Pi_S = \int_0^l ([Э^{(i)}][U_d^{(i)}]m_x - [Э^{(i)}][U_\omega^{(i)}]m_B)dx\,, \quad (41)$$

или:

$$\Pi_S = [P^{(i)}][U^{(i)}]\,, \quad (42)$$

где $[P^{(i)}]$ – столбец узловых нагрузок, выражаемый равенством:

$$[P^{(i)}] = \int_0^l ([Э^{(i)}]m_x - [Э^{(i)}]m_B)dx\,. \quad (43)$$

3. Линейная аппроксимация функции депланации и квадратичная аппроксимация функции кручения в полусдвиговой теории

Как показали численные эксперименты, скорость сходимости построенного линейного конечного элемента достаточно низка. Так, например, численное значение максимального угла закручивания 3-метровой швеллеровой балки под нагрузкой от распределенного крутящего момента имеет приемлемую 5%-ю погрешность лишь при разбиении стержня на 64 конечных элемента.

Возникает необходимость в более точной аппроксимации функций перемещения. В связи с этим перейдем к рассмотрению параболической аппроксимации функции кручения θ с сохранением линейной аппроксимации функции депланации β.

Рассмотрим трехузловой i-й конечный элемент длиной l, имеющий 5 степеней свободы: 3 поворота в каждом узле и 2 возможности депланировать из плоскости сечения в крайних узлах (рис. 4).

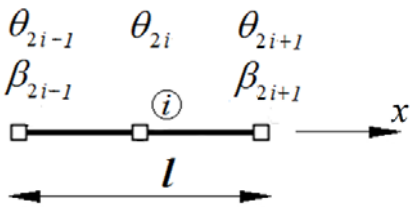


Рисунок 4. Трехузловой конечный элемент с 5 степенями свободы

Функции перемещений θ и β представим в виде произведения суммы полиномов и значений перемещений в узлах:

$$\theta(x) = Э_3^{(i)}\theta_{2i-1} + Э_4^{(i)}\theta_{2i} + Э_5^{(i)}\theta_{2i+1}, \tag{44}$$

$$\beta(x) = Э_1^{(i)}\beta_{2i-1} + Э_2^{(i)}\beta_{2i+1}, \tag{45}$$

где $Э_3^{(i)}$, $Э_4^{(i)}$, $Э_5^{(i)}$ – квадратичные интерполяционные полиномы:

$$Э_3^{(i)}(x) = \frac{2}{l_i^2}x^2 - \frac{3}{l_i}x + 1;\ Э_4^{(i)}(x) = -\frac{4}{l_i^2}x^2 + \frac{4}{l_i}x;\ Э_5^{(i)}(x) = \frac{2}{l_i^2}x^2 - \frac{1}{l_i}x. \tag{46}$$

Столбец неизвестных в таком случае будет выглядеть следующим образом:

$$[U^{(i)}] = \begin{pmatrix} \theta_{2i-1} \\ \beta_{2i-1} \\ \theta_{2i} \\ \theta_{2i+1} \\ \beta_{2i+1} \end{pmatrix}. \tag{47}$$

Запишем в матричной форме функционал энергии деформации (23).

Для этого выражения (44) и (45) для функций $\theta(x)$ и $\beta(x)$ перепишем в виде матричных произведений:

$$\theta(x) = [Э_{кв}^{(i)}][U_d^{(i)}],\ \beta(x) = [Э^{(i)}][U_\omega^{(i)}], \tag{48}$$

где $[Э^{(i)}]$ – матрица-строка, состоящая из 2 полиномов (формула (30)), а $[Э_{кв}^{(i)}]$ – матрица-строка, состоящая из 3 полиномов (46):

$$[Э_{кв}^{(i)}] = [Э_3^{(i)}(x), Э_4^{(i)}(x), Э_5^{(i)}(x)]; \tag{49}$$

$[U_d^{(i)}]$ и $[U_\omega^{(i)}]$ – столбцы перемещений одного вида:

$$[U_d^{(i)}] = \begin{pmatrix} \theta_{2i-1} \\ \theta_{2i} \\ \theta_{2i+1} \end{pmatrix};\ [U_\omega^{(i)}] = \begin{pmatrix} \beta_{2i-1} \\ \beta_{2i+1} \end{pmatrix}. \tag{50}$$

Разность ($\theta^{/} - \beta$) представим в виде:

$$\theta^{/}(x) - \beta(x) = [\Phi^{(i)}_{кв/лин}][U^{(i)}], \tag{51}$$

где $[\Phi^{(i)}_{кв/лин}]$ – матрица-строка, имеющая вид:

$$[\Phi^{(i)}_{кв/лин}] = [\frac{d\text{Э}^{(i)}_3(x)}{dx}, -\text{Э}^{(i)}_1(x), \frac{d\text{Э}^{(i)}_4(x)}{dx}, \frac{d\text{Э}^{(i)}_5(x)}{dx}, -\text{Э}^{(i)}_2(x)]. \tag{52}$$

Подставляя (48) и (51) в функционал (23), получим формулу (34) для выражения энергии деформации, но уже для случая квадратичной аппроксимации функции кручения и линейной аппроксимации функции депланации.

Компоненты матрицы жесткости (36), имеющей размер 5x5, для данного случая будут следующими:

$$[K^{(i)}_{\omega}] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k^{(i)}_{22} & 0 & 0 & k^{(i)}_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k^{(i)}_{52} & 0 & 0 & k^{(i)}_{55} \end{pmatrix} = EI_{\omega} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{l} & 0 & 0 & -\frac{1}{l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{l} & 0 & 0 & \frac{1}{l} \end{pmatrix}, \tag{53}$$

$$[K^{(i)}_{d}] = \begin{pmatrix} k^{(i)}_{11} & 0 & k^{(i)}_{13} & k^{(i)}_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k^{(i)}_{31} & 0 & k^{(i)}_{33} & k^{(i)}_{34} & 0 \\ k^{(i)}_{41} & 0 & k^{(i)}_{43} & k^{(i)}_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = GI_d \begin{pmatrix} \frac{7}{3l} & 0 & -\frac{8}{3l} & \frac{1}{3l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{8}{3l} & 0 & \frac{16}{3l} & -\frac{8}{3l} & 0 \\ \frac{1}{3l} & 0 & -\frac{8}{3l} & \frac{7}{3l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \tag{54}$$

$$[K^{(i)}_{\omega d}] = \begin{pmatrix} k^{(i)}_{11} & k^{(i)}_{12} & k^{(i)}_{13} & k^{(i)}_{14} & k^{(i)}_{15} \\ k^{(i)}_{21} & k^{(i)}_{22} & k^{(i)}_{23} & k^{(i)}_{24} & k^{(i)}_{25} \\ k^{(i)}_{31} & k^{(i)}_{32} & k^{(i)}_{33} & k^{(i)}_{34} & k^{(i)}_{35} \\ k^{(i)}_{41} & k^{(i)}_{42} & k^{(i)}_{43} & k^{(i)}_{44} & k^{(i)}_{45} \\ k^{(i)}_{51} & k^{(i)}_{52} & k^{(i)}_{53} & k^{(i)}_{54} & k^{(i)}_{54} \end{pmatrix} = \frac{GI_d}{\psi - 1} \begin{pmatrix} \frac{7}{3l} & \frac{5}{6} & -\frac{8}{3l} & \frac{1}{3l} & \frac{1}{6} \\ \frac{5}{6} & \frac{l}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{1}{6} & \frac{l}{6} \\ \frac{8}{3l} & -\frac{2}{3} & \frac{16}{3l} & -\frac{8}{3l} & \frac{2}{3} \\ \frac{1}{3l} & -\frac{1}{6} & -\frac{8}{3l} & \frac{7}{3l} & -\frac{5}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{l}{6} & \frac{2}{3} & -\frac{5}{6} & \frac{l}{3} \end{pmatrix}. \tag{55}$$

Силовой потенциал $\Pi_S(\theta, \beta)$ и столбец узловых нагрузок $[P^{(i)}]$ можно выразить с помощью формул (40)-(43), но вкладывая в обозначения уже смысл, заключенный в формулах (49)-(50).

4. Квадратичная аппроксимация функций кручения и депланации в полусдвиговой теории

При использовании линейной аппроксимации функции депланации β на конечном элементе значение бимомента окажется постоянной величиной в пределах одного конечного элемента. Таким образом, эпюра бимоментов окажется ступенчатой в пределах длины стержня, если не производить никаких сглаживаний функций.

Рассмотрим трехузловой *i*-й конечный элемент длиной l, имеющий 6 степеней свободы: 3 поворота и 3 депланации из плоскости сечения в каждом узле (см. рис. 5).

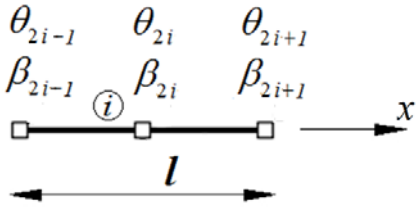


Рисунок 5. Трехузловой конечный элемент с 6 степенями свободы

Функции перемещений θ и β представим в виде произведения суммы квадратичных полиномов и значений перемещений в узлах:

$$\theta(x) = Э_3^{(i)}\theta_{2i-1} + Э_4^{(i)}\theta_{2i} + Э_5^{(i)}\theta_{2i+1}, \tag{56}$$

$$\beta(x) = Э_3^{(i)}\beta_{2i-1} + Э_4^{(i)}\beta_{2i} + Э_5^{(i)}\beta_{2i+1}, \tag{57}$$

где $Э_3^{(i)}, Э_4^{(i)}, Э_5^{(i)}$ – квадратичные интерполяционные полиномы (46).

Столбец неизвестных, по сравнению с формулой (47), дополнится еще одним компонентом и приобретет размер 6x6:

$$[U^{(i)}] = \begin{pmatrix} \theta_{2i-1} \\ \beta_{2i-1} \\ \theta_{2i} \\ \beta_{2i} \\ \theta_{2i+1} \\ \beta_{2i+1} \end{pmatrix}. \tag{58}$$

Запишем в матричной форме функционал энергии деформации (23).

Для этого выражения (56) и (57) для функций $\theta(x)$ и $\beta(x)$ перепишем в виде матричных произведений:

$$\theta(x) = [Э_{кв}^{(i)}][U_d^{(i)}], \ \beta(x) = [Э_{кв}^{(i)}][U_\omega^{(i)}], \tag{59}$$

где $[Э_{кв}^{(i)}]$ – матрица-строка, состоящая из 3 полиномов (формула (49));

$[U_d^{(i)}]$ и $[U_\omega^{(i)}]$ – столбцы перемещений одного вида:

$$[U_d^{(i)}] = \begin{pmatrix} \theta_{2i-1} \\ \theta_{2i} \\ \theta_{2i+1} \end{pmatrix}; [U_\omega^{(i)}] = \begin{pmatrix} \beta_{2i-1} \\ \beta_{2i} \\ \beta_{2i+1} \end{pmatrix}. \tag{60}$$

Разность ($\theta^{/} - \beta$) представим в виде:

$$\theta^{/}(x) - \beta(x) = [\Phi_{кв}^{(i)}][U^{(i)}], \tag{61}$$

где $[\Phi_{кв}^{(i)}]$ – матрица-строка, имеющая вид:

$$[\Phi_{кв}^{(i)}] = [\frac{dЭ_3^{(i)}(x)}{dx}, -Э_3^{(i)}(x), \frac{dЭ_4^{(i)}(x)}{dx}, -Э_4^{(i)}(x), \frac{dЭ_5^{(i)}(x)}{dx}, -Э_5^{(i)}(x)]. \tag{62}$$

Подставляя (59) и (61) в функционал (23), получим формулу (34) для выражения энергии деформации, но уже для случая квадратичной аппроксимации функции кручения и депланации.

Компоненты матрицы жесткости (36), имеющей размер 6x6, для рассматриваемого случая будут следующими:

$$[K_{\omega}^{(i)}]=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22}^{(i)} & 0 & k_{24}^{(i)} & 0 & k_{26}^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{42}^{(i)} & 0 & k_{44}^{(i)} & 0 & k_{46}^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{62}^{(i)} & 0 & k_{64}^{(i)} & 0 & k_{66}^{(i)} \end{pmatrix}=EI_{\omega}\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{7}{3l} & 0 & -\frac{8}{3l} & 0 & \frac{1}{3l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{8}{3l} & 0 & \frac{16}{3l} & 0 & -\frac{8}{3l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3l} & 0 & -\frac{8}{3l} & 0 & \frac{7}{3l} \end{pmatrix}, \quad (63)$$

$$[K_{d}^{(i)}]=\begin{pmatrix} k_{11}^{(i)} & 0 & k_{13}^{(i)} & 0 & k_{15}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{31}^{(i)} & 0 & k_{33}^{(i)} & 0 & k_{35}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{51}^{(i)} & 0 & k_{53}^{(i)} & 0 & k_{54}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}=GI_{d}\begin{pmatrix} \frac{7}{3l} & 0 & -\frac{8}{3l} & 0 & \frac{1}{3l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{8}{3l} & 0 & \frac{16}{3l} & 0 & -\frac{8}{3l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3l} & 0 & -\frac{8}{3l} & 0 & \frac{7}{3l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (64)$$

$$[K_{\omega d}^{(i)}]=\begin{pmatrix} k_{11}^{(i)} & k_{12}^{(i)} & k_{13}^{(i)} & k_{14}^{(i)} & k_{15}^{(i)} & k_{16}^{(i)} \\ k_{21}^{(i)} & k_{22}^{(i)} & k_{23}^{(i)} & k_{24}^{(i)} & k_{25}^{(i)} & k_{26}^{(i)} \\ k_{31}^{(i)} & k_{32}^{(i)} & k_{33}^{(i)} & k_{34}^{(i)} & k_{35}^{(i)} & k_{36}^{(i)} \\ k_{41}^{(i)} & k_{42}^{(i)} & k_{43}^{(i)} & k_{44}^{(i)} & k_{45}^{(i)} & k_{46}^{(i)} \\ k_{51}^{(i)} & k_{52}^{(i)} & k_{53}^{(i)} & k_{54}^{(i)} & k_{54}^{(i)} & k_{56}^{(i)} \\ k_{61}^{(i)} & k_{62}^{(i)} & k_{63}^{(i)} & k_{64}^{(i)} & k_{64}^{(i)} & k_{66}^{(i)} \end{pmatrix}=\frac{GI_{d}}{\psi-1}\begin{pmatrix} \frac{7}{3l} & \frac{1}{2} & -\frac{8}{3l} & \frac{2}{3} & \frac{1}{3l} & -\frac{1}{6} \\ \frac{1}{2} & \frac{2}{15}l & -\frac{2}{3} & \frac{1}{15}l & \frac{1}{6} & -\frac{1}{30}l \\ -\frac{8}{3l} & -\frac{2}{3} & \frac{16}{3l} & 0 & -\frac{8}{3l} & \frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{15}l & 0 & \frac{8}{15}l & -\frac{2}{3} & \frac{1}{15}l \\ \frac{1}{3l} & \frac{1}{6} & -\frac{8}{3l} & -\frac{2}{3} & \frac{7}{3l} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{6} & -\frac{1}{30}l & \frac{2}{3} & \frac{1}{15}l & -\frac{1}{2} & \frac{2}{15}l \end{pmatrix}. \quad (65)$$

Выводы

В результате работы была построена матрица жесткости конечных элементов тонкостенных стержней открытого профиля по **бессдвиговой теории** посредством кубической аппроксимации функций кручения и депланации

Построены 3 типа матриц жесткости конечных элементов тонкостенных стержней открытого и закрытого профилей **по полусдвиговой теории**, основанные соответственно на 3 видах аппроксимаций функций деформаций:

1) линейная аппроксимация функций кручения 2-узлового конечного элемента с 4 степенями свободы;
2) квадратичная аппроксимация функции кручения и линейная аппроксимация функции депланации 3-узлового конечного элемента с 5 степенями свободы;
3) квадратичная аппроксимация функций кручения и депланации 3-узлового конечного элемента с 6 степенями свободы.

Предложенные матрицы жесткости являются универсальными для расчетов методом конечных элементов как тонкостенных стержней открытого профиля (на основе теорий В.З. Власова [18] и В.И. Сливкера [24]), так и закрытого профиля (на основе теории А.А. Уманского) ввиду схожести соответствующих дифференциальных уравнений кручения и функционалов энергии деформации.

Результаты работы наиболее применимы при проектировании строительных конструкций на основе холодногнутых оцинкованных тонкостенных стержневых элементов **открытого профиля** и при проектировании элементов **замкнутого профиля**.

Литература

1. Cheng Y., Schafer B.W. Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method // Journal of Constructional Steel Research. Volume 63, Issue 5. 2007. Pp. 581-590.
2. Sedlacek G., Bild J., Ungermann D. On the buckling of plates – Some recent developments in light weight structures // 4th international conference on aluminium weldments, Tokyo. 1988.
3. Альхименко А. И., Ватин Н. И., Рыбаков В. А. Технология легких стальных тонкостенных конструкций. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2008. 27 с.
4. Назмеева Т. В. Обеспечение пространственной жесткости покрытия в зданиях из ЛСТК // Инженерно-строительный журнал. 2009. №6(8). С. 12-15.
5. Айрумян Э. Л., Каменщиков Н. И. Рамные конструкции стального каркаса из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий различного назначения// Мир строительства и недвижимости. 2006. №36. С. 9-11.
6. Кузьменко Д. В., Ватин Н. И.. Ограждающая конструкция «нулевой» толщины – термопанель // Инженерно-строительный журнал. 2008. №1. С. 13-21.
7. Ватин Н. И., Попова Е. Н. Термопрофиль в легких стальных тонкостенных конструкциях. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. 63 с.
8. Гордеева А. О., Ватин Н. И. Расчетная конечно-элементная модель холодногнутого перфорированного тонкостенного стержня в программно-вычислительном комплексе SCAD Office // Инженерно-строительный журнал. 2011. №3(21). С. 36-46.
9. Смазнов Д. Н. Конечноэлементное моделирование работы жестких вставок тонкостенных холодноформованных стальных профилей // Научный журнал КубГАУ. 2011. №67(03). С. 1-13.
10. Смазнов Д. Н. Устойчивость при сжатии составных колонн, выполненных из профилей из высокопрочной стали // Инженерно-строительный журнал. 2009. №3(5). С. 42-49.
11. Шатов Д. С. Конечноэлементное моделирование перфорированных стоек открытого сечения из холодногнутых профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. №3(21). С. 32-35.
12. Юрченко В. В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде SCAD Office // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8(18). С. 38-46.
13. Ватин Н. И., Рыбаков В. А. Расчет металлоконструкций: седьмая степень свободы. // СтройПРОФИль. 2007. № 2(56). С. 60-63.
14. Рыбаков В. А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций: учеб. пособие. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2010. 206 с.
15. Рыбаков В. А. Применение метода конечных элементов для полусдвиговой теории тонкостенных стержней // Материалы Пятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 30-32.
16. Недвига П. Н., Рыбаков В. А. Эмпирические методы оценки несущей способности стальных тонкостенных просечно-перфорированных балок и балок со сплошной стенкой // Инженерно-строительный журнал. 2009. №8(10). С. 27-30.
17. Бычков Д. В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. М. : Госстройиздат, 1962. 476 с.
18. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни (прочность, устойчивость, колебания). М. : Госстройиздат, 1940. 276 с.
19. Кузьмин Н. А., Лукаш П. А., Милейковский И. Е. Расчет конструкций из тонкостенных стержней и оболочек. М. : Госстройиздат, 1960. 264 с.
20. Белый Г. И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме // Межвуз. темат. сб. тр. 1983. №42 (Строительная механика сооружений). С. 40-48.
21. Лалин В. В., Колосова Г. С. Численные методы в строительстве. Решение одномерных задач методом конечных элементов: Учеб.пособие. СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2001. 72 с.
22. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред: Пер. с англ. М. : Недра, 1974. 239 с.
23. Туснин А. Р. Расчет и проектирование конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.т.н.: Спец. 05.23.01. М. , 2004. 37 с.
24. Сливкер В. И. Строительная механика. Вариационные основы. Учебное пособие. М. : Издательство ассоциации строительных вузов, 2005. 736 с.
25. Колосова Г. С. Решение одномерных задач строительной механики численными методами : учеб. пособие. СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1993. 84 с.

Владимир Александрович Рыбаков, Санкт-Петербург, Россия

Тел. моб. +7(964)331-29-15; эл. почта: fishermanoff@mail.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Инженерно-строительный факультет
Курсы повышения квалификации и профессиональной переподготовки

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-0104	«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 заказчика-застройщика 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**
	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**
ПР-09	«Обследование строительных конструкций и грунтов основания зданий и сооружений»	**6**
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 государственного 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.