ISSN 2071-4726

Инженерно-строительный журнал

научно-прикладное издание

№8(43) ноябрь-декабрь 2013

Конструкция стены с воздушным зазором

СОБЫТИЯ

МАТЕРИАЛЫ

РАСЧЕТЫ

МЕТОДЫ

АНАЛИЗ

ТЕМА НОМЕРА: ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ

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

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

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

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

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

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

Инженерно-строительный журнал
научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

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

Специализированный научный журнал. Выходит с 09.2008.

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Адрес редакции:

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

Установочный тираж 1000 экз.

Подписано в печать 19.12.13
Формат 60х84/8, усл. печ. л. 9.
Заказ № 3179

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

Содержание

На обложке: иллюстрации авторов к статьям номера

Контакты:

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

Конгресс «Энергоэффективность. XXI век»: за рациональное энергопотребление

20–21 ноября в Санкт-Петербурге проходила сессия V Международного конгресса «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий». По словам ответственного секретаря оргкомитета, президента НП «АВОК Северо-Запад» Александра Михайловича Гримитлина, основная функция конгресса – просветительская. Сегодня все поддерживают государственную инициативу повышения энергоэффективности, но мало кто знает, как именно ее реализовывать. Это относится, в том числе, к различным участникам строительного процесса: проектировщикам, застройщикам, эксплуатирующим организациям.

Просветительскую цель преследует и Каталог энергоэффективных решений. Его первое издание выйдет в марте 2014 г. В нем будут опубликованы передовые инженерные решения по энергосбережению, прошедшие экспертную оценку.

Во многих выступлениях звучали сравнения российской ситуации в области энергосбережения с европейской. Известно, что за рубежом об этой проблеме стали задумываться раньше – со времен первого энергетического кризиса 1973 г. Леонид Юрьевич Питерский, вице-президент Национального объединения саморегулируемых организаций в области энергетического обследования (НОЭ), отметил, что сейчас в Европе пользователи думают в первую очередь об экологии, а затем уже об экономии средств. Этим объясняется более высокий уровень исполнения нормативно-правовых документов в этой области, хотя сама законодательная база во многих странах Европы сейчас отстает от российской.

Многие докладчики отмечали низкий уровень реализации законодательства в области энергосбережения. Это объясняется как недостаточной проработанностью подзаконных актов или их отсутствием, так и противоречиями, возникающими между документами разных ведомств. Например, форма энергетического паспорта не совпадает в приказе Министерства регионального развития и в новом своде правил «Тепловая защита зданий». Многие меры, декларированные в ФЗ-261 «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности…», так и не получили применения. Александр Александрович Журавлев, советник директора НП «БалтЭнергоЭффект», перечислил некоторые из этих мер:

- создание ГИС в области энергосбережения – сейчас она включает только данные энергопаспортов;
- государственная материальная поддержка программ энергосбережения, в том числе строительства многоквартирных домов высокого класса энергосбережения – пока реализация только обсуждается;
- обязательное размещение на вновь построенных зданиях таблички с обозначением класса энергоэффективности – форма не разработана;
- обязанность застройщика обеспечить соблюдение класса энергоэффективности в течение 5 лет – нет правового акта, предусматривающего, кто и за чей счет должен проводить обследование через 5 лет и кто должен это контролировать.

В связи с такими нестыковками профессиональное сообщество в лице национальных объединений самостоятельно занимается доработкой нормативной базы в этой области. Национальное объединение проектировщиков (НОП) совместно с Национальной ассоциацией малоэтажного и коттеджного строительства (НАМИКС) разрабатывает рекомендации по определению стоимости эксплуатации здания. Такие рекомендации необходимы для экономической оценки энергосберегающих решений. По словам Валерия Семеновича Казейкина, вице-президента НАМИКС, стоимость владения зданием необходимо рассчитывать исходя из срока эксплуатации 100 лет. При этом многие энергосберегающие решения будут выглядеть совсем по-другому: например, срок эксплуатации тепловых насосов около 7 лет, при расчете на 100 лет их применение становится малоэффективным.

Многие докладчики отмечали, что в малоэтажном строительстве меры энергосбережения внедряются более активно, т.к. экономическая заинтересованность застройщика очевидна. В.С. Казейкин на пленарном заседании рассказал о некоторых энергоэффективных проектах, реализованных в последнее время. Сегодня тенденция состоит в переходе от энергоэффективного дома к энергоэффективному поселку, от умного дома к умному поселку. Это позволяет получить большую экономию. Чаще всего застройщики таких поселков оставляют за собой управление ими после окончания строительства, что формирует заинтересованность в снижении стоимости эксплуатации. В рамках проектов НАМИКС уже построено несколько таких поселков (например, ЭкоДолье), а также 12-квартирный малоэтажный жилой дом класса «А», пассивный дом (снижение энергопотребления на 80%). Тем не менее, застройщики отмечают необходимость обеспечения энергосбережения не только на уровне поселка, но и на уровне всего муниципалитета.

При строительстве многоэтажных зданий самым актуальным вопросом является экономический интерес застройщика. В ситуации, когда застройщик заинтересован построить как можно дешевле и продать как можно дороже, повышение себестоимости не позволяет внедрять энергосберегающие мероприятия на должном уровне. По оценке Алексея Владимировича Бусахина, заместителя председателя Комитета по системам инженерно-технического обеспечения зданий и сооружений Национального объединения строителей (НОСТРОЙ), это удорожание составляет в среднем 8%. В данной ситуации только государственные гарантии возмещения этих дополнительных затрат могут сформировать у застройщика желание строить энергоэффективно.

Большую дискуссию на конгрессе вызвал вступивший в силу летом 2013 г. новый свод правил «Тепловая защита зданий». По мнению большинства участников, он во многом отбросил назад нормативную базу энергосбережения при строительстве зданий, так как впервые были снижены требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций. Доклад Александра Сергеевича Горшкова, доцента ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», был посвящен прогнозированию экономических потерь России в связи со снижением данных требований, а также сравнению развития отечественной и финской нормативных баз в этой области. Подробнее об этом см.: Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании // Инженерно-строительный журнал. 2012. №8(34). С. 4–14.

Об опыте другой страны, близкой нам по климату и нормативной базе – Республики Беларусь – рассказал первый заместитель директора государственного предприятия «Институт жилища – НИПТИС им. С.С. Атаева» Леонид Николаевич Данилевский. В Беларуси активное внедрение энергосбережения началось несколько лет назад. Тогда стартовало строительство первых энергоэффективных домов (тепловые потери около 40 кВт·ч/м^2/год, класс «А»). На данный момент построено уже около 4000 м^2 жилья этого класса. Контроль энергоэффективности этих зданий производится в 2 этапа. Первый – тепловизионный контроль при приемке здания в эксплуатацию. Основной целью этого этапа было обнаружение строительного брака (неоднородность конструкций). Второй этап – инструментальный контроль через 2–3 года после ввода в эксплуатацию. К этому времени здание переходит в рабочий режим – можно оценить реальные показатели потребления энергии. В основном было получено хорошее совпадение расчетных характеристик с результатами натурных исследований.

В качестве общего итога конгресса можно привести слова Л.Ю. Питерского о том, что цель программ энергоэффективности не в снижении энергопотребления. Потребление энергии с развитием общества повышается, и это нормально. Цель – снижать нерациональное потребление, сокращать потери.

В.М. Якубсон

Битумно-каучуковое вяжущее для эффективных вибропоглощающих покрытий

Д.т.н., профессор В.Д. Черкасов;
к.т.н., доцент Ю.В. Юркин;
преподаватель В.В. Авдонин,
ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»

Аннотация. В статье представлены результаты исследований по подбору состава битумно-каучукового вяжущего вибропоглощающего покрытия. Применение вибропоглощающих покрытий тонкостенных строительных конструкций позволяет значительно снизить негативные вибрации.

Существующие битумные и битумно-каучуковые материалы обладают недостаточным вибропоглощением в диапазоне отрицательных температур, что недопустимо в климатических условиях России. Подбор состава битумно-каучукового вяжущего и установление зависимости его свойств позволят получить материал с широким температурным диапазоном применения.

В качестве объекта исследования была выбрана полимерная матрица, представляющая собой смесь двух материалов – бутилкаучука и битума, пластифицированную маслом индустриальным И-20А; наполнитель – мел марки МТД-2. Представлена зависимость физико-механических свойств материала от содержания битум:бутилкаучук в смеси. Установлено, что материал на основе полученного вяжущего обладает эффективным вибродемпфированием в диапазоне температур от −40 до +40 °С.

Ключевые слова: вибропоглощающее покрытие; битум; каучук; физико-механические свойства; температура

Уже более 20 лет в авто-, машиностроении и строительстве широко применяются вибропоглощающие материалы листового типа на основе битума [1, 2]. В настоящее время широко распространены покрытия на битумно-каучуковом вяжущем [3, 4].

Способность материала при колебании упругой системы необратимо поглощать часть энергии циклических деформаций (обычно преобразовывая во внутреннюю тепловую энергию) называется демпфированием, или внутренним трением [5, 6], благодаря которому происходит быстрое затухание свободных колебаний конструкций [7]. Вследствие этого внутреннее трение является одной из важнейших динамических характеристик материала и конструкции [8]. Полимеры, благодаря их вязкоупругому поведению, положительно выделяются из числа прочих материалов способностью к эффективному вибродемпфированию.

Вибродемпфирующие свойства полимеров и композиций на их основе сильно зависят от внешних факторов, наиболее важный из которых – температура [9, 10]. На графике зависимости коэффициента потерь и модуля упругости от температуры [11, с. 107] выделяют четыре области, соответствующие четырем состояниям полимера или полимерной основы композита. Наибольшими вибропоглощающими свойствами полимер обладает во втором (переходном) состоянии, соответствующем $T_с$ на температурной шкале. В данной области полимер характеризуется резким уменьшением модуля упругости с ростом температуры, наблюдается наибольший максимум механических потерь. Это связано с тем, что именно в этот период времени в материале возникает потребность во внешней энергии, которая расходуется на размораживание еще неподвижных сегментов. Следовательно, приложенная внешняя нагрузка интенсивнее поглощается [5].

Очевидно, что для увеличения области высокоэффективного вибропоглощения покрытий необходимо расширить температурный диапазон, в котором будут обнаруживаться явления переходного состояния полимерного слоя.

В результате исследований, проведенных А. Нашифом [11], Б.К. Накра [12, 13] и другими учеными, установлено, что использование демпфирующих материалов, включающих в себя слои с различными полимерными материалами, расширяет температурный диапазон их применения, а использование слоистых структур увеличивает эффективность вибропоглощения [14].

В работе Л. Ку с соавторами [15] изучается влияние соотношения фенольной смолы и хлорбутилкаучука в матрице композита на его вибропоглощающие свойства. В результате проведенных исследований установлено, что даже после вулканизации звенья фенольной смолы остаются линейно диспергированными в объеме каучука. Первое пиковое значение тангенса угла механических потерь соответствует температуре стеклования хлорбутилкаучука в смеси. При увеличении содержания смолы количество возможных конформаций молекул хлорбутилкаучука уменьшается, а количество энергии, необходимой для размораживания сегментов, увеличивается, в результате уменьшаются вибропоглощающие свойства и увеличивается T_c. Увеличение содержания смолы в смеси расширяет температурный диапазон эффективной работы материала за счет сдвига второго пикового значения вправо.

Важное влияние на физико-механические свойства композита оказывает количество наполнителя [16], в зависимости от содержания которого полимерные композиционные материалы подразделяются на малонаполненные (0–35%) и высоконаполненные (более 35%) [17]. В малонаполненных материалах частицы наполнителя находятся друг от друга на некотором расстоянии и не оказывают никакого влияния друг на друга. Наполнители в них слабо воздействуют на свойства материала, что позволяет наиболее эффективно изучать свойства матрицы композита. Однако в работе К. Михальчука [18] показано, что применение футеровок для гашения вибрации из эластомеров без наполнителей малоэффективно ввиду низкого модуля упругости. В статье [19] представлено интересное исследование иранских ученых А. Накхаей с соавторами, которое доказывает эффективность применения резиновой крошки в качестве наполнителя в грунтобетонных вибропоглощающих композициях.

Таким образом, можно выделить три основных пути для получения эффективных вибропоглощающих покрытий, объединение которых в систему позволит получить материал с высокими демпфирующими свойствами в широком температурном диапазоне:

- использование комбинированного слоистого покрытия;
- использование смесей полимеров в качестве вяжущего;
- подбор состава вязкоупругого материала и типа наполнителя.

В настоящее время в промышлености России и зарубежных стран налажен выпуск вибропоглощающих покрытий на основе битума и бутилкаучука. Основное назначение этих материалов – уменьшение шума в транспортных средствах (в основном, автомобилях) за счет поглощения вибраций в тонкостенных элементах корпуса. Причем для выполнения действующих норм по обеспечению предельно допустимого внутреннего шума в автомобиле как в России, так и за рубежом необходимо использовать вибропоглощающие покрытия с коэффициентом потерь не менее 0,1, что подтверждается техническими требованиями к вибропоглощающим покрытиям различных производителей автотранспорта. Материалы с наилучшими вибропоглощающими свойствами представлены в таблице 1, зависимость коэффициента потерь этих материалов от температуры представлена на рисунке 1.

Таблица 1. Зарубежные и отечественные выпускаемые в промышленности вибропоглощающие покрытия

Наименование	**LD-17 (Antihpon, Швеция)**	**Dynamat Extreme (Dynamic Control, США)**	**Hushmat Ultra (HushMat, США)**	**DF-10AL (Noisebuster, ЗАО «НПП Тэкникал консалтинг»)**
Полимер, на основе которого изготавливается покрытие	битум модифицированный	бутилкаучук	бутилкаучук	битумно-полимерный материал
Коэффициент потерь при 20 °C	0,17	0,417	0,3	0,4
Коэффициент потерь при 0 °C	0,08	0,240	0,1	Нет данных
Температурный интервал оптимального использования, °C	от –10 до +60	от –10 до +60	от 0 до +60	Приводятся сведения только при +20, 40, 60, 80
Толщина покрытия, мм	2,4	1,7	1,5	5,5
Источник	20	21	22	23

Импортные материалы обладают высоким коэффициентом потерь (до 0,417 у. е.) при температуре +20 °С и толщине до 2,5 мм. Отечественный материал производства ЗАО «НПП Тэкникал консалтинг» (г. Тольятти) приближается по вибропоглощающим свойствам (0,4 у. е.) к импортному только при толщине 5,5 мм. Общим же недостатком всех представленных материалов является их низкая эффективность при отрицательных температурах. И если материалы на основе бутилкаучука становятся неэффективными при температуре ниже –5 °С [21, 22], то материалы на основе битума неэффективны уже при 0 °С [21, 23], что неприемлемо для климатических условий России.

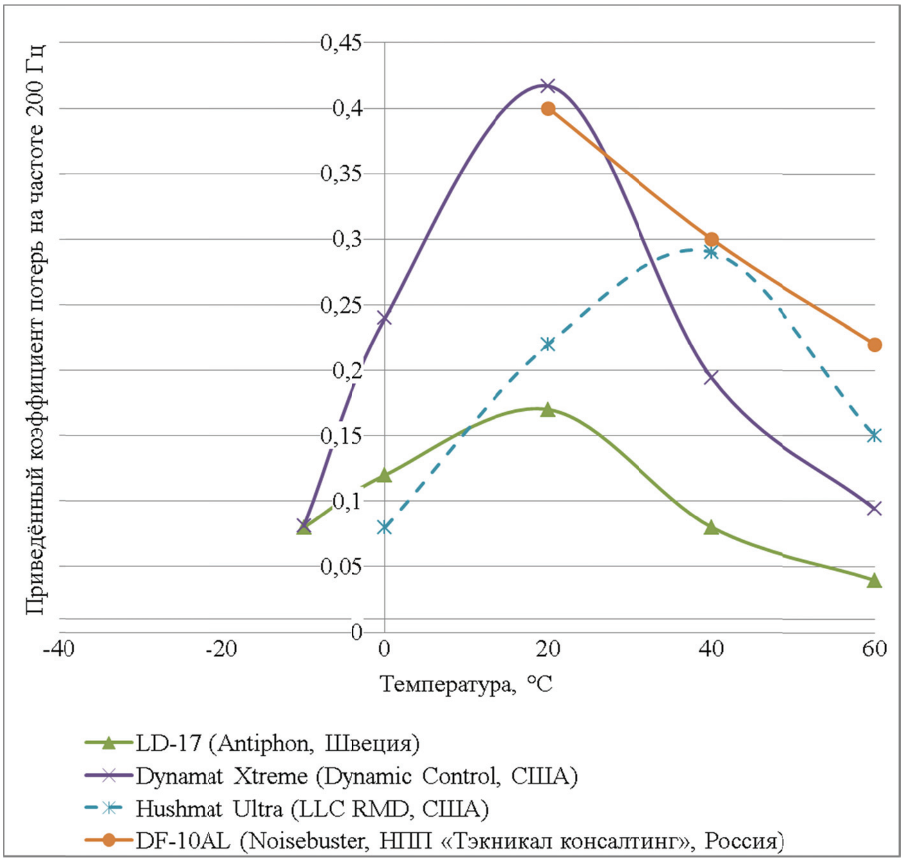


Рисунок 1. Зависимость коэффициента потерь вибропоглощающих покрытий от температуры

Помимо коэффициента потерь, немаловажное влияние на эффективность применения вибропоглощающих материалов оказывают и другие его физико-механические свойства, основными из которых являются модуль упругости, пенетрация и напряжение при отслаивании. Доступность битума и бутилкаучука на промышленном рынке страны, а также большой опыт применения побуждают к подбору составов вибропоглощающих покрытий на их основе с эффективным вибродемпфированием в диапазоне температур от –40 до +40 °С.

Задачи проводимого исследования:

1) изучить влияние соотношения битум:бутилкаучук в матрице композита на физико-механические свойства материала;
2) установить вибропоглощающие свойства покрытий на основе битумно-каучукового вяжущего в диапазоне температур от −40 до +40 °С.

Экспериментальная часть

Для решения первой задачи в качестве объекта исследования была выбрана полимерная матрица композиционного материала, представляющая собой смесь двух материалов – бутилкаучука БК-1675Н ТУ 2294-034-05766801-2002 и битума БН 90/10 ГОСТ 6617-76, пластифицированная маслом индустриальным И-20А ГОСТ 20799-88 (20% от массы вяжущего); наполнитель – мел марки МТД-2 ТУ 5743-020-05346453-2008 (30% от массы вяжущего). Малая степень наполнения позволяет изучить влияние состава смеси на свойства покрытия без потери технологических свойств последнего.

Планирование экспериментальных составов производили согласно методике правильного шестиугольника ротатабельного плана [24], матрица планирования представлена в таблице 2.

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

Факторы	Уровень варьирования							Интервалы варьирования (ε)
	–0,87	–0,5	–1	0	+1	+0,5	+0,87	
Содержание БК-1675Н, кг	28,25	37,5	25	50	75	62,5	71,75	25
Содержание БН 90/10, кг	26,95	32,5	25	40	55	47,5	53,05	15

Уравнение регрессии для выходного параметра коэффициент потерь:

$$\hat{Y}_u = 0{,}0504 - 0{,}0073x_1 + 0{,}004x_2 - 0{,}00275x_1x_2 + 0{,}006x_1^2 + 0{,}0048x_2^2 .$$

Исследование вибропоглощающих свойств покрытий в диапазоне температур от –40 до +40 °С проводилось на образцах: смесь бутилкаучука БК-1675Н и битума БН 90/10 (в соотношении 1:3, 1:1 и 3:1) – 25 мас. ч.; пластификатор – масло индустриальное И-20А – 6 мас. ч., наполнители и добавки – 69 мас. ч.

Полимерный композиционный материал изготавливался в лабораторной резиномешалке с Z-образными лопастями путем механического перемешивания смеси компонентов. После смесь экструдировали в ленту толщиной от 2 до 4 мм, шириной не менее 300 мм. С одной стороны вибропоглощающее покрытие дублировалось антиадгезионным материалом, с другой – армирующим слоем из фольги толщиной 100 мкм. Для определения механических свойств полученного композита использовали разрывную машину Instron модели 3365, пенетрацию определяли по ГОСТ 25945-98. Динамические свойства вибропоглощающих покрытий исследовались на установке Bruel&Kjaer 08-13-10, помещенной в камеру тепла и холода для испытаний по ГОСТ 7025-91 или ГОСТ 10060.0-95.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований установлены зависимости модуля накопления E’, модуля потерь E’’ и приведенного коэффициента потерь η на частоте 200 Гц (рис. 2), пенетрации и напряжения при отслаивании $\sigma_{отсл}$ (рис. 3), предела прочности $\sigma_{пр}$ и относительной деформации ε (рис. 4) от содержания бутилкаучука в матрице малонаполненного вибропоглощающего материала.

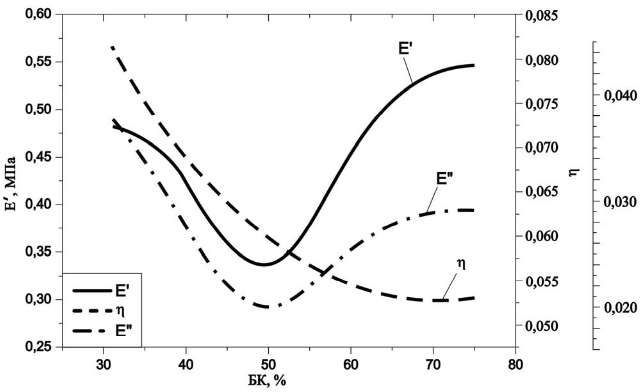


Рисунок 2. Зависимость модуля накопления E’, модуля потерь E’’ и коэффициента потерь η от содержания БК в матрице композита

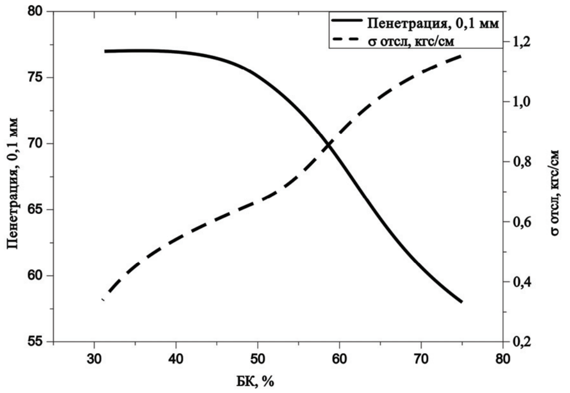


Рисунок 3. Зависимость пенетрации и напряжения при отслаивании от содержания БК в матрице композита

Смесь вяжущих материалов представляет собой дисперсионную систему, в которой дисперсная фаза и дисперсионная среда зависят от содержания БК и битума. Следовательно, вид кривой модуля накопления E’ на рисунке 2 объясняется следующим образом [25]:

- в первой области (содержание БК 30–50%) высокомодульная дисперсная фаза БК не деформируется вместе с мягкой дисперсионной средой битума; в результате в матрице битума возникают большие внутренние напряжения, которые вызывают ее быстрое разрушение;
- во второй области (содержание БК 50–80%) дисперсная фаза битума практически не мешает деформированию жесткой дисперсионной среды (матрицы бутилкаучука); в этом случае бутилкаучук может в полной мере проявить свои прочностные и деформационные свойства.

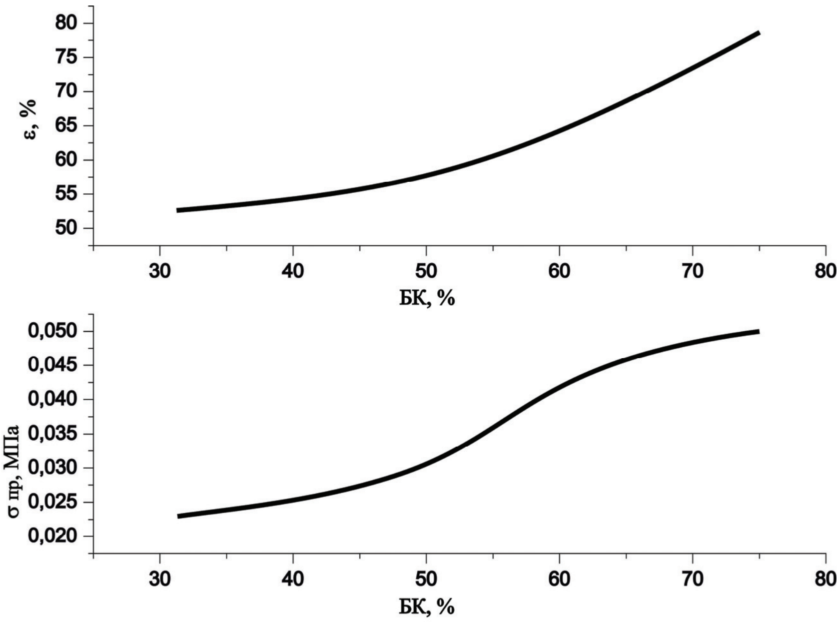


Рисунок 4. Зависимость предела прочности $\sigma_{пр}$ и относительной деформации ε от содержания БК в матрице композита

Зависимость модуля потерь E'' (рис. 2) имеет седловидную форму с минимумом при равном содержании БК и битума в материале. С увеличением количества бутилкаучука в матрице композита коэффициент потерь η и пенетрация снижаются, потому что бутилкаучук обладает большими прочностными свойствами (рис. 4), а свойства битума как пластификатора снижаются [26]. Для увеличения адгезионных свойств (рис. 3) эффективнее применение композитов с наибольшим содержанием БК.

На рисунке 5 представлена зависимость коэффициента потерь от температуры в матрице высоконаполненного вибропоглощающего материала при соотношении в смеси битум:БК, равном 3:1, 1:1 и 1:3 соответственно. Увеличение количества наполнителя положительно влияет на вибропоглощающие свойства за счет дополнительных потерь на поверхности частиц наполнителя и в межфазном слое.

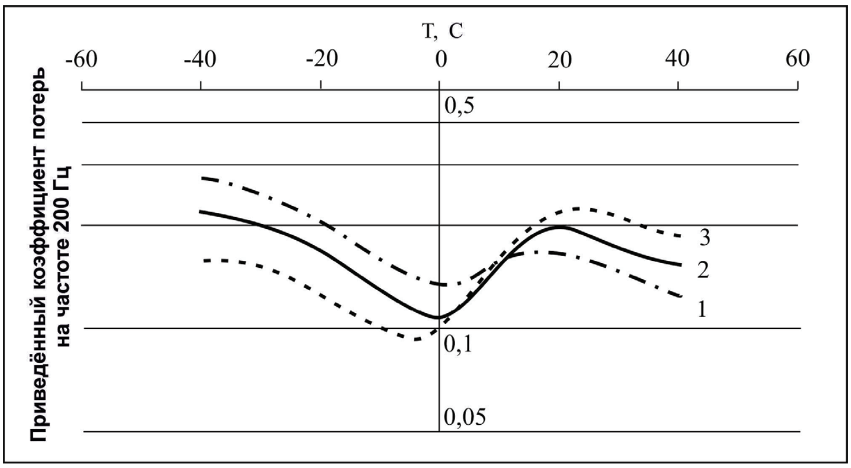


Рисунок 5. Температурная зависимость коэффициента потерь η от соотношения в смеси битум:БК (мас. ч.): 1 – 1:3; 2 – 1:1; 3 – 3:1

В диапазоне температур от −40 °С до +40 °С на графике зависимости коэффициент потерь–температура четко видны два максимума и минимум в области 0 °С. Первый максимум при температуре ниже −40 °С соответствует температуре стеклования БК в смеси. Второй максимум при температуре +20 °С соответствует температуре стеклования битума. При увеличении содержания бутилкаучука в смеси максимумы смещаются влево, материал становится более эффективным в диапазоне отрицательных температур. Однако из-за большей стоимости БК увеличивать его содержание более 60–70% невыгодно. При содержании БК менее 25% в диапазоне от −10 до +10 °С значение коэффициента потерь ниже 0,1, значит, вибропоглощающее покрытие неэффективно.

Следовательно, для получения вибропоглощающего покрытия с заданными эксплуатационными свойствами и эффективного в диапазоне температур от −40 до +40 °С необходимо придерживаться соотношения битум:БК=1:1 в матрице композиционного материала.

Выводы

1. Проведенные исследования позволили установить зависимости физико-механических свойств композиционного материала от содержания битум:бутилкаучук в матрице композита.

2. В результате исследований матрицы композита установлено, что для вибропоглощающих материалов оптимальной является смесь битум:бутилкаучук в соотношении 50:50, обеспечивающая требуемые физико-механические свойства композита.

3. Установлено, что композиции с большим содержанием битума обладают наиболее эффективным вибропоглощением в диапазоне положительных температур. С целью получения вибропоглощающего материала, эффективного в диапазоне температур от −40 до +40, необходимо применять составы, в которых содержание бутилкаучука не менее 50% от массы матрицы композита.

Работа выполнена по ГК № 14.527.12.0007 от 11.10.2011 г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы»

Литература

1. Воскун М.Д., Милонова Н.А., Егоров П.Г., Мальков А.М. Пат. 2188214 Российская Федерация, МПК C08L95/00, B32B11/02, B60R13/08. Виброшумопоглощающий листовой материал и способ его получения; заявитель и патентообладатель ООО "Стандартпласт-плюс". – № 2000127377/04; заявл. 01.11.00; опубл. 27.08.02.
2. Patent – 5229216 US, F16F 9/30 Vibration damping sheet/ W. Yoshiaki, S. Hideo, T. Masataka; Nihon Tokushu Toryo Co., Ltd. (Tokyo, JP) – N 07/784602; Filing Date 10/24/1991; Publication Date 07/20/1993
3. Бурмистров В.А., Корженевский А.Б., Койфман О.И., Росин М.В. Пат. 2235106 Российская Федерация, МПК7 C08L95/00, C08L23/22, C08L91/00, C08L93/00, C08K3/04, C08K7/18. Вибропоглощающий материал; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «Ивановский гос. хим.-тех. унив.» – № 2003128616/04 ; заявл. 23.09.03 ; опубл. 27.08.04.
4. Литус А.А., Синицына И.Н., [и др.] Пат. 2368630 Российская Федерация, МПК C08L95/00, C08K3/26. Виброшумопоглощающий листовой материал; заявитель и патентообладатель Саратовский гос. тех. унив. – № 2008112756/04 ; заявл. 02.04.08; опубл. 27.09.09, Бюл. № 27. 7 с.
5. Rao M.D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes // Journal of Sound and Vibration. 2003. Vol. 262. – Pp. 457–474.
6. Соломатов В.И., Черкасов В.Д., Фомин Н.Е. Вибропоглощающие композиционные материалы. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. 96 с.
7. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Изд-во литер. по строительству, архитектуре и строит. механике, 1960. 146 с.
8. Тарануха Н.А., Журбин О.В., Журбина И.Н. Исследование колебаний судовых стержневых конструкций с учётом сопротивления внешней среды различной плотности // Мореходство и морские науки – 2011: избранные доклады Третьей Сахалинской региональной морской науч.-техн. конф. Южно-Сахалинск, 2011. С. 82–94.

9. Комова Н.Н., Потапов Е.Э., Грусков А.Д. [и др.] Особенности принципа температурно-временной эквивалентности в полиэтилене низкой плотности, наполненном шунгитом // Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова. 2013. Т. 8. №1. С. 24–35.
10. Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Авдонин В.В. Прогнозирование демпфирующих свойств композита с учетом температурной зависимости свойств полимера // Вестн. Томского гос. архит.-строит. ун-та. 2012. №4. С. 216–225.
11. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний. М.: Мир, 1988. 488 с.
12. Dutt J.K., Nakra B.C. Stability of rotor systems with viscoelastic supports // Journal of Sound and Vibration. 1992. Vol. 153. Pp. 89–96.
13. Nakra B.C. Vibration control in machines and structures using viscoelastic damping // Journal of Sound and Vibration. 1998. Vol. 211. Pp. 449–465.
14. Sarlin E., Liu Y., Vippola M. [et al]. Vibration damping properties of steel/rubber/composite hybrid structures // Composite structures. 2012. Vol. 94. Pp. 3327–3335.
15. Qu L., Huang G., Wu J., Tang Z. Damping mechanism of chlorobutyl rubber and phenolic resin vulcanized blends // Journal of materials science. 2007. Vol. 42. Pp. 7256–7262.
16. Бочарова Е.Г. Разработка мастичных вибропоглощающих полимерных материалов на основе модифицированных карбамидноформальдегидных смол: дис. … канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1994. 138 с.
17. Соломатов В.И., Бобрышев А.Н., Химмлер К.Г. Полимерные композиционные материалы в строительстве. М.: Стройиздат, 1988. 312 с.
18. Michalczyk K. Analysis of the influence of elastomeric layer on helical spring stresses in longitudinal resonance vibration conditions // Archives of civil and mechanical engineering. 2013. Vol. 13. Pp. 21–26.
19. Nakhaei A., Marandi S.M. , Kermani S.S., Bagheripour M.H. Dynamic properties of granular soils mixed with granulated rubber // Soil dynamics and earthquake engineering. 2012. Vol. 43. Pp. 124–132.
20. Structure-borne sound damping pads [Электронный ресурс] // Antiphon AB. Åmotfors, Sweden. URL: http://www.antiphon.se/noise-reduction/antiphon_ld_engelsk09_id346.pdf. (дата обращения: 02.10.2013).
21. Dynamat xtreme [Электронный ресурс] // Dynamic Control of North America, Inc. Hamilton, USA. URL: http://www.dynamat.com/technical_specs_dynamat_xtreme.html. (дата обращения: 02.10.2013).
22. Hushmat ultra [Электронный ресурс] // Speedway Motors, Inc Lincoln, USA. URL: http://static.speedwaymotors.com/pdf/Hushmat_Ultra.pdf. (дата обращения: 02.10.2013).
23. Damping faced 10AL [Электронный ресурс]. URL: http://www.noisebuster-msk.ru/view.php?id=6. (дата обращения: 02.10.2013).
24. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. М.: Легкая индустрия, 1974. 263 с.
25. Влияние состава и структуры смесей полимеров на их механические свойства: [Электронный ресурс] // Полимерные композиционные материалы. М., 2010–2013. URL:http://www.http://p-km.ru. (дата обращения: 11.05.2013).
26. Cherkasov V.D., Yurkin Yu.V., Avdonin V.V. Plasticization peculiarities of vibration damping composite materials on the basis of elastomers // Nauka i studia: Przemyśl, «Nauka i studia». 2012. Pp. 99–103.

Василий Дмитриевич Черкасов, г. Саранск, Республика Мордовия
+7(8342)473713; e-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Юрий Викторович Юркин, г. Саранск, Республика Мордовия
+7(8342)473713; e-mail: yurkinuv@gmail.com

Валерий Викторович Авдонин, г. Саранск, Республика Мордовия
+7(8342)473713; e-mail: avdoninvalerii@bk.ru

Применение камней с высокой пустотностью в облицовочном слое многослойных стен

Д.т.н., профессор, зав. кафедрой общего строительства Р.Б. Орлович,
Западно-Померанский технологический университет;
к.т.н., доцент А.С. Горшков,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»;
старший преподаватель С.С. Зимин,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»;

Аннотация. В связи с повышением нормативных требований к теплозащитным свойствам наружных стен в последнее время стали широко применяться многослойные ограждающие конструкции. Отечественная практика эксплуатации многослойных наружных стен выявила их повышенную дефектность. В первую очередь это относится к лицевому слою, выполняемому обычно из камней с высокой пустотностью.

Лицевой слой, кроме эстетических свойств, должен в течение всего периода эксплуатации здания надежно выполнять функции защиты внутренних конструкций от негативного влияния окружающей среды. Это может быть достигнуто только с помощью анализа его работы (как прочностного, так и теплотехнического), которому не уделяется соответствующее внимание. Цель работы – оценить возможность дальнейшего повсеместного применения в России кладки из камней с высокой пустотностью в качестве лицевого наружного слоя, а также выявить наиболее рациональный способ анализа напряженно-деформированного состояния облицовочного слоя.

Рассмотрен зарубежный опыт применения многопустотных камней, проведены соответствующие прочностные и теплотехнические расчеты. Сделаны выводы о необходимости отказа от повсеместного применения в России камней с высокой пустотностью для облицовки многослойных каменных стен и о возможности применения камней с пустотностью не более 15%. Также сделаны выводы, что наиболее достоверное напряженно-деформированное состояние лицевого облицовочного слоя может быть получено по результатам совместного прочностного и температурного расчетов с учетом результатов мониторинга существующих зданий, а также натурных и лабораторных испытаний.

Ключевые слова: каркасно-монолитные дома; лицевой кирпичный слой; слоистая кладка; теплотехника наружных стен

С середины 1990-х годов в связи с повышением требований к сопротивлению теплопередаче в странах СНГ стали широко применяться многослойные конструкции с лицевым слоем из камней с высокой пустотностью. К настоящему времени выявлено множество недостатков подобных конструкций [1–6], которые во многих случаях приводили к аварийному состоянию стенового ограждения и даже к обрушению лицевого слоя. Одной из причин этого является недостаточная проработка решений по материалу облицовочного слоя, который рассматривается, в первую очередь, с эстетической точки зрения.

В частности, не уделяется должного внимания анализу напряженно-деформированного состояния лицевого слоя. Кроме этого, распространено необоснованное мнение, что использование в лицевом слое камней с высокой пустотностью повышает теплотехнические характеристики стены и снижает ее вес.

Целью данной статьи является оценка преимуществ или недостатков применения в лицевом облицовочном слое пустотелых камней по сравнению с полнотелыми.

Камни, применяемые в облицовочном слое

По своему определению каменная облицовка, кроме эстетических свойств, должна в течение всего периода эксплуатации здания надежно выполнять функции защиты внутренних конструкций от негативного влияния окружающей среды: знакопеременных температурных воздействий, периодического увлажнения и высыхания, агрессивных воздействий окружающей среды, солнечной радиации, силовых воздействий (например, ветровой нагрузки) и т. д.

Очевидно, что обеспечение этих функций достигается не только качеством производства работ, но и подбором соответствующих материалов. Облицовочные камни должны обладать соответствующими морозостойкостью, водопоглощением, пористостью и прочностью в зависимости от климатических условий. В странах с относительно мягким климатом, например, в Южной Америке или в странах южной Европы, для лицевого слоя обычно используются пустотелые керамические камни с пустотностью 50% и более. При этом во избежание попадания воды от косых дождей в пустоты камней (через горизонтальные растворные швы) пустоты выполняются в виде горизонтальных щелей, параллельных ложковой поверхности.

В северных европейских странах с отрицательными зимними температурами для облицовочного слоя используются полнотелые либо дырчатые керамические камни с пустотностью не более 15% (рис. 1а), что регламентировано европейскими нормами [7]. Более того, во избежание проникновения дождевой воды внутрь облицовочного слоя кладки облицовка выполняется на гидрофобизированных растворах. Особое внимание при этом уделяется качеству разделки горизонтальных и вертикальных растворных швов.

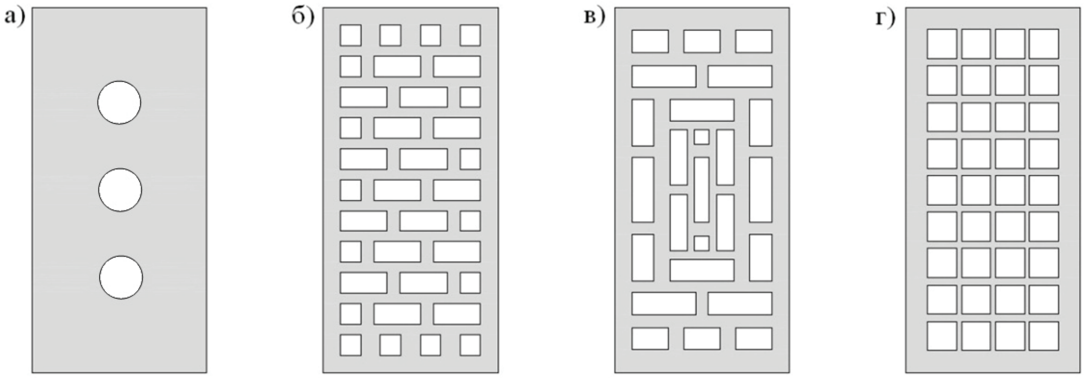


Рисунок 1. Виды керамических кирпичей лицевого слоя

В практике стран СНГ почти повсеместно используются керамические камни с высокой пустотностью (рис. 1б) для кладок облицовочного слоя, что приводит к преждевременному исчерпанию их защитно-декоративных свойств. Причины такого состояния широко освещены в технической литературе, например, в работах [1, 3, 8–10].

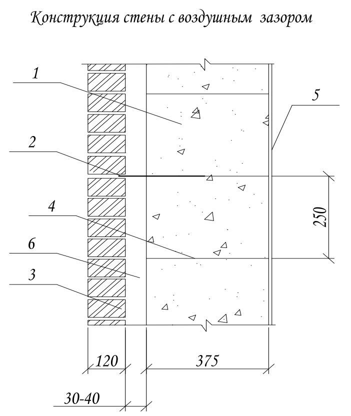
По мнению ряда исследователей [1, 10], основным фактором, влияющим на разрушение лицевого керамического кирпича в облицовочном слое наружных стен в условиях эксплуатации, являются знакопеременные температурно-влажностные воздействия наружной среды в осенне-зимний и зимне-весенний периоды года. В эти периоды количество переходов наружной температуры через 0 °С в облицовочном слое зависит от климата региона строительства. Эта специфика не учитывается при назначении марки по морозостойкости лицевого кирпича, применяемого для облицовочного слоя наружных стен. Нерациональное расположение пустот в камнях создает в облицовочном слое участки с пониженными теплозащитными свойствами и повышенной паропроницаемостью, которая способствует накоплению влаги и, как следствие, переувлажнению и преждевременному разрушению камней от размораживания. В связи с этим предлагается использовать лицевой керамический кирпич [1], обеспечивающий одинаковую теплопроводность в тычковом и ложковом направлениях (рис. 1в, 1г). Однако применение таких камней, по мнению авторов настоящей статьи, не решает проблемы долговечности облицовочного слоя. Более того, улучшение теплофизических характеристик камней за счет повышения их пустотности приводит к снижению прочности камней [11].

Теплотехническая эффективность облицовочного слоя

Аргументами проектировщиков при использовании для лицевого слоя камней с высокой пустотностью являются облегченный вес кладки и повышение теплофизических свойств лицевого слоя. В действительности применение полнотелых кирпичей взамен пустотных в лицевом слое с оконными и дверными проемами приводит к увеличению общей нагрузки на диски перекрытий (с учетом их собственного веса, веса внутренних перегородок и полезной нагрузки) менее чем на 2%.

Применение пустотелого кирпича для лицевого слоя (по сравнению с полнотелым) практически не оказывает влияния на повышение теплофизических свойств слоистого стенового ограждения. В доказательство данного аргумента произведены несложные теплотехнические расчеты.

На рисунке 2 приведены фрагменты кладки наружных стен, выполненных из газобетонных блоков с облицовочным слоем из кирпича.



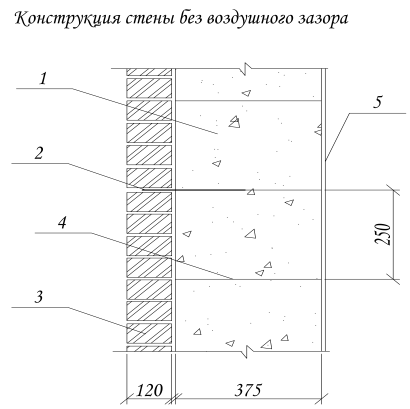


Рисунок 2. Фрагмент вертикального сечения наружной стены здания, выполненной с воздушным вентилируемым зазором между кладкой из газобетонных блоков и лицевым слоем из керамического кирпича (а) и без зазора между внутренним и наружным слоями двухслойной кладки (б):
1 – изделия стеновые неармированные из ячеистого бетона автоклавного твердения (газобетонные блоки); 2 – гибкие металлические связи для крепления лицевого слоя; 3 – кладка из лицевого кирпича; 4 – швы кладки из газобетонных блоков; 5 – внутренний отделочный слой стены; 6 – воздушный вентилируемый зазор

Теплотехнические расчеты, выполненные в соответствии с требованиями СП 23-101 [12], показывают, что при наличии вентилируемой наружным воздухом прослойки (рис. 2а) сопротивление теплопередаче стены в случае использования для лицевого слоя полнотелого керамического (глиняного) кирпича и в случае использования поризованного кирпича одинаково. Вне зависимости от типа кирпичей лицевого слоя и их теплопроводности теплотехнические характеристики наружной стены остаются неизменными ввиду того, что слои конструкции, расположенные между воздушной прослойкой и наружной поверхностью, в теплотехническом расчете не участвуют (см. п. 9.1.2 СП 23-101 [12]).

Если воздушный вентилируемый зазор между лицевым кирпичным и внутренним слоем из газобетонных блоков отсутствует (рис. 2б), то при расчете сопротивления теплопередаче наружной стены лицевой слой кладки следует учитывать. Однако влияние теплопроводности лицевого слоя на теплотехнические параметры всей конструкции стены оказывается незначительным. Сопротивление теплопередаче наружной стены, представленной на рисунке 2б, при использовании в качестве облицовки лицевого слоя из обыкновенного глиняного кирпича (с теплопроводностью 0,81 Вт/(м·°С)) согласно расчетам, выполненным по формуле (8) СП 23-101-2004 [12], составляет 2,81 ($м^2·°С/Вт$), а из поризованного керамического кирпича (с теплопроводностью 0,58 Вт/(м·°С)) – 2,87 ($м^2·°С/Вт$), то есть всего на 2% выше.

Таким образом, даже при отсутствии воздушного вентилируемого зазора между лицевым облицовочным слоем из керамического кирпича и основной конструкцией наружной стены теплотехническая эффективность лицевого слоя не оказывает существенного влияния на уровень тепловой защиты наружной стены.

Аналогичные результаты получаются для наружных стен иного конструктивного исполнения.

Из представленных выше расчетов следует, что почти двукратное уменьшение коэффициента теплопроводности кладки из пустотного кирпича в лицевом слое наружной стены по сравнению с лицевой кладкой из обыкновенного глиняного кирпича практически не сказывается на теплозащитных свойствах стеновой конструкции. При учете коэффициента теплотехнической однородности r конструкции наружной стены, который всегда из-за наличия теплопроводных включений в составе стен будет оказываться меньше единицы (для представленных на рисунках 2а, 2б стеновых конструкций r ≈ 0,5 ÷ 0,7), различие будет еще меньшим.

Следует также отметить, что в реальных условиях теплотехнические свойства пустотных камней в кладке приближаются к аналогичным свойствам полнотелых. Это связано с тем, что при возведении кладки из пустотных камней кладочный раствор, попадая в пустоты, иногда наполовину заполняет их (рис. 3). При этом имеет место перерасход растворных материалов. Проваливание раствора в пустоты создает для каменщиков проблемы в создании ровной растворной постели в горизонтальных растворных швах. Из-за перфорации камней горизонтальные растворные швы оказываются менее плотными и однородными, в отличие от швов в кладке из полнотелых камней. Это способствует проникновению атмосферной влаги внутрь пустот, особенно при косых дождях. Кроме того, пустотелые камни из-за наличия раствора в них входят в эксплуатационное влажностное состояние за более короткий срок [9]. Такое состояние является особенно неблагоприятным для регионов с влажным климатом и частыми годовыми сменами отрицательных и положительных температур, таких как Санкт-Петербург.

а)

б)

Рисунок 3. Заполнение щелей строительным раствором во время кладочных работ:
а – выкрашивание кирпичей на торцевых участках плит перекрытий;
б – выкрашивание кирпичей на участке примыкания к плите перекрытия

Анкеровка лицевого слоя

Одним из недостатков применения в лицевом слое камней с повышенной пустотностью является низкая надежность анкерных связей, соединяющих лицевой и внутренний каменные слои стены (рис. 4). Последние воспринимают не только горизонтальные, но и вертикальные сдвиговые усилия, вызванные температурными деформациями лицевого слоя. Сдвиговые усилия вызывают концентрацию местных напряжений на контакте анкеров с лицевыми частями обоих слоев каменной кладки. В пустотных камнях это вызывает выкрашивание материала под анкерами и уменьшение эффективной длины анкеровки.

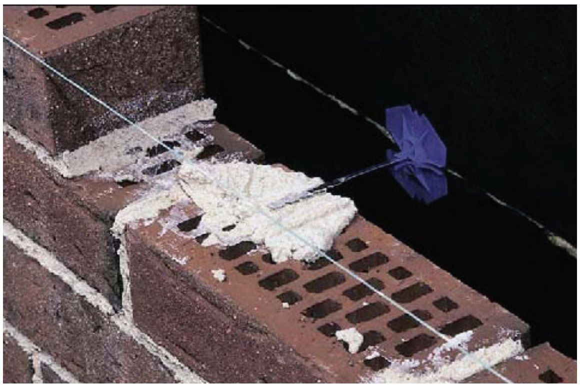


Рисунок 4. Анкерная связь, соединяющая лицевой слой с внутренним

Наиболее чувствительными к таким деформациям являются верхние ряды каменной кладки (примыкающие к горизонтальным деформационным швам между дисками перекрытий и кладкой), где сжимающие усилия от собственного веса кладки являются минимальными. В результате уменьшения эффективной длины анкеровки связей последние выключаются из работы, что неблагоприятно влияет на напряженно-деформированное состояние лицевого слоя [13].

Деформационные швы в лицевом слое

В крайне неблагоприятных условиях лицевой слой находится в случае отсутствия горизонтальных деформационных швов. Такое решение, к сожалению, имеет широкое распространение в практике возведения монолитно-каркасных зданий. Отсутствие горизонтального деформационного зазора приводит к защемлению лицевого слоя между дисками перекрытий смежных этажей. В результате стесненных температурных деформаций, а также прогибов дисков перекрытий лицевой слой испытывает вертикальные сжимающие напряжения, наибольшая концентрация которых имеет место на контакте с дисками перекрытий. При этом согласно исследованиям [14] в стенках камней между щелями возникают растягивающие напряжения σ_x (рис. 5), которые приводят к образованию трещин и прогрессирующему разрушению камней. Этому также способствуют касательные напряжения, возникающие на контакте кладки с плитами перекрытий от горизонтальных температурных деформаций облицовочного слоя. В результате действия указанных напряжений и размораживания кладки от попадания воды в пустоты кирпичей происходит выкрашивание и раздробление последних (рис. 3), что предопределяет аварийное состояние лицевого слоя.

Для предотвращения такого разрушения в работе [2] предлагается 3–5 нижних верст кладки лицевого слоя выполнять из полнотелого кирпича. Следует отметить, что в зарубежной практике в целях снижения касательных напряжений на контакте лицевого слоя с плитами перекрытий используются скользящие прокладки.

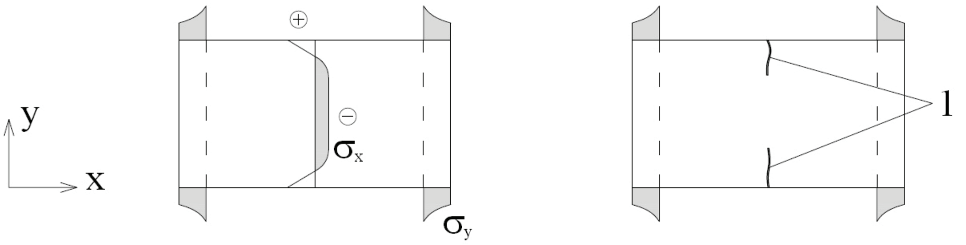


Рисунок 5. Напряженное состояние в тычковом сечении щелевых камней при сжатии (1 – трещина)

Температурные деформации лицевого слоя

Лицевой слой из пустотных камней по сравнению с полнотелыми является более уязвимым к действию напряжений, вызванных температурными деформациями. Величина последних определяется следующими факторами: наличием горизонтальных и вертикальных швов; ориентацией фасада относительно сторон света; неравномерностью нагрева в зависимости от цветовой гаммы лицевого слоя либо наличия остекления лоджий; наличием армирования горизонтальных растворных швов; расположением анкеров между лицевым и внутренним слоями; способом анкеровки стальных перемычек и т. д. На рисунке 6 приведены результаты выполненного авторами расчета напряженно-деформированного состояния фрагмента облицовочного слоя в пределах одного этажа при наличии горизонтального деформационного шва в зоне сопряжения с верхней плитой перекрытия и стесненных деформациях лицевого слоя в местах сопряжения с нижней плитой перекрытия. Расчет выполнен на температурные воздействия в зимнее время в соответствии с [12, 15] и рекомендациями, представленными в [2, 16].

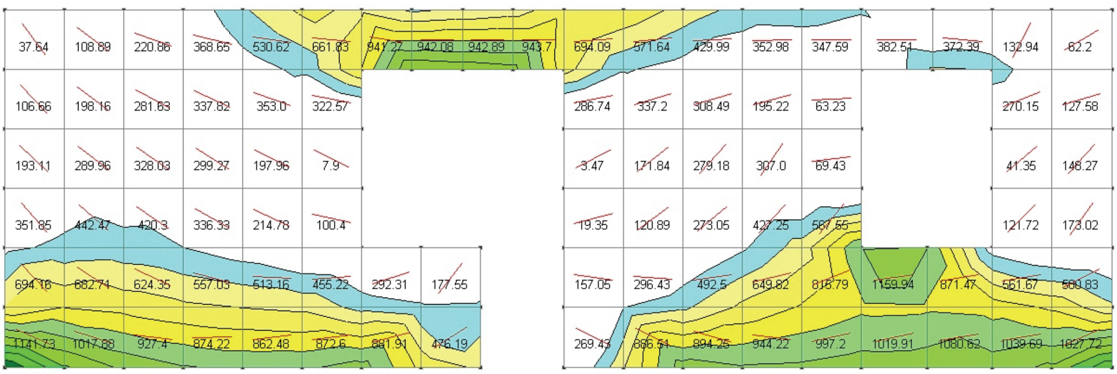


Рисунок 6. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния фрагмента облицовочного слоя с дверными и оконными проемами на температурные воздействия (изополя и траектория главных растягивающих напряжений, кПа)

Из результатов расчета видно, что наибольшая концентрация главных растягивающих напряжений в лицевом слое наблюдается в его нижней зоне, где температурные деформации наиболее стеснены сцеплением кладки с плитой перекрытия, а также над перемычками дверного и оконных проемов. Существенным является то, что максимальные главные растягивающие напряжения ориентированы вдоль горизонтальных растворных швов ($\alpha = 0°$) или под близким к ним углом, то есть в направлении, в котором прочность кладки из пустотелых камней существенно ниже прочности кладки, выполненной из полнотелых камней (рис. 7а).

Из экспериментальных исследований [17] следует, что при $\alpha = 90°$, то есть при растяжении поперек горизонтальных растворных швов, прочность кладки из полнотелых и пустотелых кладочных элементов примерно одинакова (рис. 7а). Разрушение кладки в этом случае происходит в результате разрыва растворного шва или нарушения сцепления с поверхностью камня. При растяжении вдоль горизонтальных растворных швов ($\alpha = 0°$) прочность кладки из пустотных кладочных элементов лимитируется, как правило, прочностью ослабленных щелями камней. На рисунке 7б приведена экспериментальная зависимость относительной прочности каменной кладки R_{0t} на растяжение вдоль растворных швов от пустотности камней V (%) [17]. При пустотности V = 50% указанная прочность по сравнению с кладкой из полнотелых камней (V = 0%) снижается более чем в 3 раза.

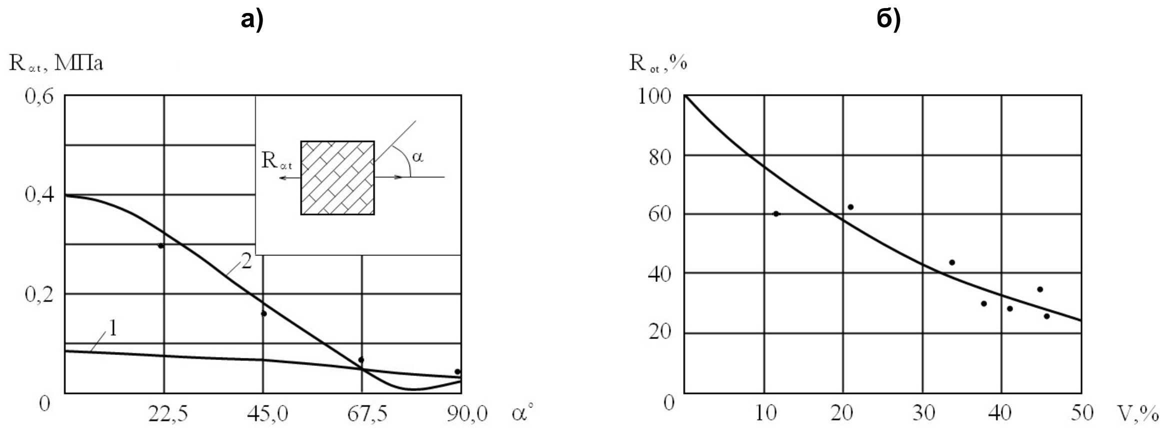


Рисунок 7. Сопротивление кладки $R_{\alpha t}$ при растяжении под различными углами α к растворным швам (а) и в зависимости от пустотности камней (б):
1 – аппроксимирующая кривая для кладки из пустотных камней,
2 – аппроксимирующая кривая для кладки из полнотелых камней

Ремонтопригодность лицевого слоя

Недостатком лицевого слоя из пустотных камней также является его низкая ремонтопригодность (рис. 3). Выполнение отсутствующих горизонтальных и вертикальных деформационных швов в лицевом слое эксплуатируемых зданий приводит к раскрытию пустот в камнях, что при дальнейшей эксплуатации и некачественном уплотнении швов будет способствовать накоплению влаги в пустотах и интенсивному размораживанию камней в зоне указанных швов. Повышенное сцепление между пустотными камнями из-за анкерного эффекта растворных швов затрудняет замену выкрашивающихся камней из кладки. Применение перфораторов здесь не является эффективным, так как приводит к повреждению соседних камней.

Также проблемой является восполнение недостающих анкеров между лицевым и внутренним слоями стен эксплуатируемых зданий (рис. 4). При наличии пустотных камней монтажный раствор между пилотным отверстием и анкером может выпадать в пустоты камней, тем самым сводя к минимуму сцепление между кладкой и вновь устанавливаемыми анкерами. Это также касается надежности крепления к лицевому слою из пустотных камней кондиционеров, рекламных щитов, растяжек и другого оборудования, которое является дополнительной и чаще всего не учитываемой при проектировании нагрузкой.

Анализ напряженно-деформированного состояния лицевого слоя

Из вышесказанного можно заключить, что лицевой слой оказывается в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, вызванного как температурными, так и силовыми воздействиями. Причем, кроме напряжений в плоскости стены, лицевой слой испытывает изгиб из своей плоскости, напряжения от которого зависят, например, от надежности анкеровки. На напряженное состояние лицевого слоя существенное влияние могут оказать мостики холода в виде балконных плит, перемычек и т. п. В наиболее сложном напряженно-деформированном состоянии находятся угловые участки на пересечении стен; на прямолинейных участках состояние существенно зависит от расстояния между вертикальными деформационными швами, расположения и площади оконных и дверных проемов [2].

В связи с этим авторами данной статьи предлагается комплексный метод исследования, основанный как на результатах расчета, так и на результатах обследования и мониторинга лицевого слоя.

Анализ напряженно-деформированного состояния лицевого слоя необходимо проводить в пространственной постановке на основе совместного прочностного и температурного расчетов. Причем достоверность подобных расчетов может быть существенно повышена за счет анализа уже достаточного опыта эксплуатации зданий с наружными многослойными стенами, то есть результатов их обследования и мониторинга. Данные результаты могут, с одной стороны, являться исходными данными для расчета при проектировании нового здания, а с другой – выявить ошибки и «тонкости», которые необходимо будет учесть при проектировании.

Так, наиболее достоверные результаты по анкеровке (усилие вырыва из шва, сопротивляемость срезу и т. п.) могут быть получены по результатам лабораторных испытаний [3, 18–21, 22–27]. Располагая аналогичными натурными испытаниями, можно анализировать фактические характеристики по анкеровке, а также причины их снижения по сравнению с лабораторными испытаниями.

Авторами данной статьи уже проведен ряд подобных экспериментов, некоторые результаты которых отражены в работе [13].

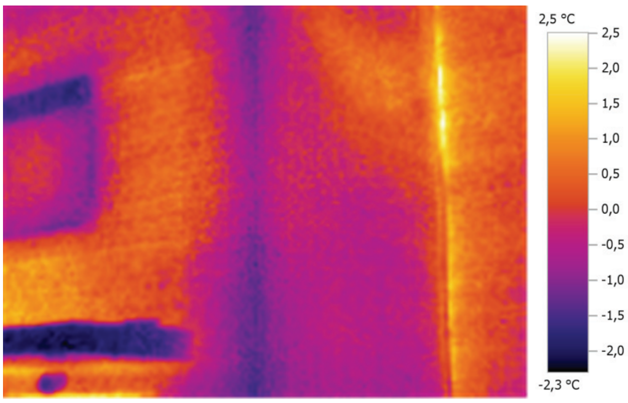


Рисунок 8. Тепловизионная съемка углового участка лицевого слоя в зимний период, результаты которой являются исходными данными для совместного прочностного и температурного расчетов

Наиболее достоверные сведения о распределении температуры в лицевом слое могут быть получены по результатам тепловизионного мониторинга существующих зданий. Это дает возможность отследить изменения в температурных полях за весь годичный цикл, а также выявить численные значения температур мостиков холода, участков на пересечении стен (рис. 8), вокруг проемов и т. п. Авторами данной статьи в настоящее время ведется тепловизионный мониторинг нескольких зданий.

Полученные разности температур, а также результаты испытаний анкеров являются при этом исходными данными для дальнейших расчетов и анализа напряженно-деформированного состояния лицевого слоя.

После проведения совместного прочностного и температурного расчетов при анализе напряженно-деформированного состояния важнейшим вопросом является критериальная оценка прочности кладки.

Так, для участков стен, меняющих направление, наибольшие растягивающие напряжения σ_x изгиба лицевого слоя возникают в угловых зонах стен как на внутренней, так и на наружной стороне лицевого слоя (рис. 9). Следствием указанных напряжений будут вертикальные трещины в угловых зонах. В качестве критериальной оценки в этом случае можно использовать зависимость:

$$\sigma_x \le f_{x1},$$

где f_{x1} – сопротивление кладки лицевого слоя при изгибе по перевязанному сечению перпендикулярно его плоскости [28].

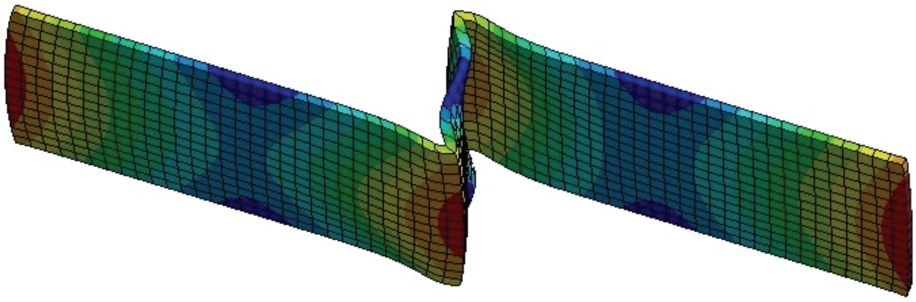


Рисунок 9. Результаты совместного прочностного и температурного расчетов (деформированное состояние) углового участка лицевого слоя

На прямолинейных участках стен предельное состояние лицевого слоя в этом случае может быть установлено путем сравнения полученных расчетом растягивающих напряжений $\sigma_1(\alpha)$ с прочностью кладки на растяжение под углом α, то есть:

$$\sigma_1(\alpha) \le f_{x1}.$$

Выводы

Приведенный выше далеко не исчерпывающий анализ является, по мнению авторов, убедительным аргументом в пользу отказа от повсеместного применения в России камней с высокой пустотностью в облицовочном слое многослойных каменных стен. В ходе анализа было выяснено:

- применение пустотелых камней взамен полнотелых практически не сказывается на теплозащитных свойствах всего стенового ограждения; общий вес стены при этом уменьшается не более чем на 2%;
- раствор, заполняющий пустоты при устройстве кладки, создает мостики холода и тем самым уменьшает теплозащитные характеристики лицевого слоя, которые в отдельных случаях могут оказаться даже ниже, чем при применении в лицевом слое полнотелого кирпича;
- пустоты в камнях уменьшают эффективную длину анкеровки связей, соединяющих лицевой слой с внутренним, что резко снижает надежность анкеровки и отрицательно сказывается на напряженно-деформированном состоянии лицевого слоя;
- пустотные камни более восприимчивы к эффектам от защемления лицевого слоя между перекрытиями, чем полнотелые; возникающие в стенках между щелями растягивающие напряжения, а также касательные напряжения на контакте кладки с плитами перекрытия приводят к образованию трещин и прогрессирующему разрушению камней;
- попадание воды в пустоты при одновременном действии отрицательных температур приводит к деструкции пустотных камней;
- лицевой слой, выполненный с применением пустотных камней, имеет крайне низкую ремонтопригодность.

Если к вышеперечисленному добавить сложное напряженно-деформированное состояние, в котором находится лицевой слой как от силовых, так и от температурных воздействий (особенно в угловых зонах, в областях сопряжения с дисками перекрытия, перемычечных зонах и т. п.), то можно заключить, что применение пустотелых камней сегодня предопределяет аварийное состояние лицевого слоя завтра.

В заключение хочется еще раз отметить безаварийную работу лицевого слоя многослойных стен из полнотелого или дырчатого керамического кирпича с пустотностью не более 15% в зарубежной практике, в том числе в северных европейских странах.

Однако перед тем как рекомендовать аналогичное решение для российский практики строительства, необходимо провести ряд исследований в этом направлении. Авторами данной статьи предлагается комплексный метод исследования, основными элементами которого можно назвать:

- проведение совместного прочностного и температурного расчетов в пространственной постановке;
- использование в качестве исходных данных по анкеровке результатов лабораторных и натурных испытаний (усилие вырыва и т. п.);
- использование в качестве исходных данных по распределению и изменению температур в лицевом слое результатов тепловизионного мониторинга;
- выявление оптимальных конструктивных решений по лицевому слою путем совместного анализа результатов расчетов с результатами обследования и мониторинга зданий с наружными многослойными стенами.

Только после проведения подобных исследований можно будет убедительно рекомендовать конкретное решение по проценту пустотности камней, применяемых в лицевом слое наружных многослойных стен, а также другие конструктивные решения по стенам.

Литература

1. Лобов О.И., Ананьев А.И. Долговечность наружных стен современных многоэтажных зданий // Жилищное строительство. 2008. №8. С. 48–54.
2. Ищук М.К. Отечественный опыт возведения зданий с наружными стенами из облегченной кладки. М.: РИФ «Стройматериалы», 2009. 360 с.
3. Гроздов В.Т. О недостатках существующих проектных решений навесных наружных стен в многоэтажных монолитных железобетонных зданиях // Труды ВИТУ «Дефекты зданий и сооружений». Санкт-Петербург, 2003. С. 36–39.
4. Деркач В.Н., Орлович Р.Б. Вопросы качества и долговечности облицовки слоистых каменных стен // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2. С. 42–47.
5. Ищук М.К. Требования к многослойным стенам с гибкими связями // Жилищное строительство. 2008. №5. С. 15–19.
6. Ищук М.К. Причины дефектов наружных стен с лицевым слоем из кирпичной кладки // Жилищное строительство. 2008. №3. С. 28–31.
7. EN 1996-1-1. Eurocode 6. Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten. Teil 1-1/Allgemeine Regein fur bewehrtes und unbewertes Mauerwerk.
8. Гагарин В.Г. Теплофизические свойства современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий. // Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции «Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий. Санкт-Петербург, 2009. С. 33–44.
9. Ананьев А.И., Абарыков В.П. Обоснование теплотехнических требований в межгосударственном стандарте ГОСТ 530-2007 «Кирпич и камни керамические. Общие технические условия» // Сборник Трудов II Всероссийской научно-технической конференции «Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий». Санкт-Петербург, 2009. С. 7–18.
10. Ананьев А.А., Гохберг Ю.Ц. Пути повышения срока безремонтной службы наружных стен жилых зданий, облицованных кирпичом // Промышленное и гражданское строительство. 2011. №1. С. 14–19.
11. Орлович Р.Б., Малышко Л. Принцип создания новых керамических изделий для кирпичного домостроения // Известия вузов. Строительство. №6. 2000. С. 59–63.
12. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. М., 2004.
13. Орлович Р.Б., Рубцов Н.М., Зимин С.С. О работе анкеров в многослойных ограждающих конструкциях с наружным кирпичным слоем // Инженерно-строительный журнал. 2013. №1(36). С. 3–11.
14. Page A.W., Shrive N.G. A Critical Assessment of Compression Tests for Hollow Block Masonry. Masonry International. 1988. Vol. 2. No.2. Pp. 64–70.

15. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. М., 2011.

16. Ищук М.К., Зуева А.В. Назначение расчетной температуры наружных стен с лицевым слоем из кирпичной кладки // Строительная механика и расчет сооружений. 2006. №4. С. 71–73.

17. Орлович Р.Б., Найчук А.Я., Деркач В.Н. Анизотропия прочности каменной кладки из кладочных элементов с щелевыми вертикальными пустотами // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. №3. С. 35–38.

18. Орлович Р. Б., Найчук А.Я., Деркач В.Н. Анкеровка лицевого слоя в слоистых каменных стенах // Промышленное и гражданское строительство. 2010. №6. С. 36–39.

19. Грановский А.В., Киселев Д.А. О методике испытаний анкеров на вырыв из различных стеновых материалов и возможных областях их применения // Жилищное строительство. 2010. №2. С. 7–8.

20. EN 846-5: 2002 (Еврокоды) Определение несущей способности и жесткости анкеров, работающих на сжатие и растяжение.

21. EN 846-7: 2002 (Еврокоды) Определение несущей способности и жесткости на сдвиг анкеров и связей.

22. Murauer T. Edelstahl im zweishaligen Mauerwerk-Sicherheit im Hintergrund // Mauerwerk. 2006. No.6. Pp. 230–234.

23. Roumani N.A. The shear strength of prestressed brichwork sections. PhD thesis. University of Manchester, 1985.

24. Simudic G., Page A.W. Australian developments in the use of walls of geometric section // 7th North American Masonry Conference, University of Notre Dame -South Bend, Indiana, USA. 1996. Vol. 2. Pp. 1007–1018.

25. Phipps M.E., Montague T.I. The behaviour and design of steel shear connectors in plain and prestressed masonry // 7th North American Masonry Conference, University of Notre Dame -South Bend, Indiana, USA. 1996. Vol. 2. Pp. 789–798.

26. Beasley K.J. Masonry Facade Stress Failures // The Construction specifier. 1998. Vol. 51. No.2. Pp. 25–28.

27. Jager W., Pfeifer G. Konstruktionsregeln für Mauerwerk. Mauerwerk Kalender. Berlin, 2005. Pp. 233–264.

28. EN 1996-2.2006 Eurocode 6. Design of masonry structures. Design considerations, selection of materials and execution of masonry.

Ромуальд Болеславович Орлович, г. Шецин, Польша
Тел. раб.: 48-661868850 эл. почта: orlowicz@mail.ru

Александр Сергеевич Горшков, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)388-43-15 эл. почта: alsgor@yandex.ru

Сергей Сергеевич Зимин, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)347-77-01 эл. почта: zimin_sergei@mail.ru

Расчетно-экспериментальный контроль энергосбережения зданий

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

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной проблемы — энергосбережению и повышению энергоэффективности зданий. Разработана экспресс-методика расчетно-экспериментального контроля энергосбережения на основе удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. Преимуществом указанной методики является то, что она позволяет выполнить оценку эффективности комплекса энергосберегающих мероприятий без измерений суммарной солнечной радиации при действительных условиях облачности и бытовых тепловыделений при сопоставимой с ГОСТ 31168—2003 точности результатов.

На основе разработанной методики произведена оценка эффективности комплекса энергосберегающих мероприятий, реализованных в эксплуатируемом многоквартирном жилом здании. По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что указанное здание отвечает требованию по энергосбережению согласно актуализированной редакции СНиП 23-02–2003, класс энергосбережения здания — *C* (нормальный). Апробация методики на результатах экспериментальных исследований, выполненных для того же здания по ГОСТ 31168–2003, подтверждает достоверность результатов, полученных по предлагаемой методике.

Разработанная методика может быть использована при мониторинге энергопотребления и энергоаудите зданий.

Ключевые слова: класс энергосбережения; энергоэффективность; расчетно-экспериментальный контроль; энергоаудит; экспресс-методика

Энергоэффективность и энергосбережение относятся к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, отмеченным в Указе Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. №899. В современной архитектуре и строительстве они могут быть достигнуты совершенствованием архитектурно-планировочных решений, применением наружных ограждающих конструкций здания с необходимым уровнем теплозащиты, внедрением эффективных систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях, применением возобновляемых источников энергии, повышением качества проектирования зданий.

Обзор литературы

В разработку энергетической концепции проектирования зданий большой вклад внесли В.Н. Богословский – в части теплового режима здания [1] и Ю.А. Табунщиков – в части рассмотрения здания как единой энергетической системы [2]. Данное направление получило развитие в работах отечественных ученых [3–11]. В монографии [3] разработаны модель и методы расчета при строительстве и эксплуатации зданий с целью получения максимальной энергетической эффективности при минимальных суммарных затратах энергии. В работе [4] рассмотрены опыт законодательных инициатив США, ЕС и РФ в области энергосбережения и методы их реализации. Книга [5] содержит результаты теоретических и практических исследований по применению тепловизоров для термографического обследования объектов с акцентом на повышение точности методов тепловизионного контроля. В работе [6] приведено описание математической модели здания как единой энергетической системы и предложен метод учета эффективности энергосберегающих мероприятий в теплоэнергетическом балансе помещений зданий. В работе [7] на основе анализа мирового опыта предложена концепция нормирования энергоэффективности зданий. В монографии [8] рассмотрены проблема энергосбережения в зданиях и пути ее решения, приведены методики мониторинга энергопотребления, воздухопроницаемости и энергетической сертификации зданий.

В работе [9] показана возможность применения комплексного мониторинга строительных объектов с использованием технологии «интеллектуального здания» с целью повышения их энергоэффективности. В монографии [10] исследованы особенности реализации отдельных энергосберегающих мероприятий в гражданских зданиях и выявлены наиболее целесообразные решения по снижению энергопотребления с учетом архитектурно-конструктивных и технико-экономических факторов. Основные требования к энергетическому паспорту здания сформулированы в работе [11]. Из числа последних публикаций, посвященных решению данной проблемы за рубежом, можно отметить работы [12–19].

В ГОСТ 31168–2003 [20] приведен метод определения удельного потребления тепловой энергии на отопление здания (включая вентиляцию), который позволяет количественно выявить соответствие или отклонение от нормируемых энергетических и теплотехнических параметров тепловой защиты, установить класс энергоэффективности здания и определить влияние отдельных мероприятий по энергосбережению в здании. Класс энергоэффективности здания устанавливают по величине отклонения фактического значения удельного потребления тепловой энергии на отопление здания (отнесенного к градусосуткам отопительного периода) от нормируемого значения. Для определения удельного потребления тепловой энергии необходимо экспериментальное определение следующих величин:

- расхода тепловой энергии на отопление здания;
- температуры внутреннего воздуха здания;
- температуры наружного воздуха;
- суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации на горизонтальную поверхность при действительных условиях облачности;
- бытовых тепловыделений.

Измерение указанных величин представляет собой сложную и трудоемкую задачу, требует применения дорогостоящей аппаратуры.

Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003 «Тепловая защита зданий» [21] дает возможность оценки энергоэффективности на основе удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. Для определения указанного параметра необходимо знать только расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию, температуру внутри здания и температуру наружного воздуха. При этом не нужно измерять теплопоступления в здание от солнечной радиации и бытовые тепловыделения, что требует значительных материально-технических затрат. Эта идея положена в основу методики расчетно-экспериментального контроля энергосбережения зданий, предлагаемой автором.

Постановка задачи

Целью данной работы является оценка эффективности комплекса энергосберегающих мероприятий на основе расчетно-экспериментального контроля энергосбережения зданий.

Из поставленной цели вытекают следующие задачи:

- разработка методики расчетно-экспериментального контроля энергосбережения на основе удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания;
- оценка энергоэффективности эксплуатируемого жилого здания на основе разработанной методики.

Описание исследования

Теоретическая часть

Согласно п. 10.1 [21] показателем расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию жилого или общественного здания является удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, численно равная расходу тепловой энергии на 1 м^3 отапливаемого объема здания в единицу времени при перепаде температуры в 1 °С.

Здание отвечает требованию энергосбережения при выполнении следующего условия:

$$q_h \le q_h^{req}, \qquad (1)$$

где q_h – расчетная (или фактическая) удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий, Вт/(м^3·°С); q_h^{req} – нормируемая (базовая) удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий, Вт/(м^3·°С), определяемая для различных типов жилых и общественных зданий по таблицам 13 и 14 [21].

Класс энергосбережения жилых и общественных зданий определяется по таблице 15 [21] по относительному отклонению расчетной (или фактической) удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания от нормируемого (базового) значения.

Отсутствие в актуализированной редакции СНиП [21] методики определения фактического значения удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания затрудняет предусмотренный нормами [21] обязательный расчетно-экспериментальный контроль нормируемых энергетических показателей и энергосбережения эксплуатируемых зданий.

Сущность предлагаемой методики расчетно-экспериментального контроля энергосбережения зданий заключается в том, что в исследуемом здании в отопительный период для определенных интервалов времени измеряют расход тепловой энергии на отопление и среднюю температуру воздуха внутри и снаружи здания, на основании которых рассчитывают удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания и определяют класс энергосбережения здания.

Расчетно-экспериментальный контроль энергосбережения зданий производят в следующей последовательности.

1. В отопительном периоде выделяют произвольный двухнедельный интервал, в течение которого ежесуточно измеряют расход тепловой энергии на отопление Q_{hm}^i, кДж/сут (i = 1,2,…14).

2. В том же временном интервале определяют среднесуточные значения температур внутреннего и наружного воздуха, t_{int}^i и t_{ext}^i, °С.

3. На основе измерений расхода тепловой энергии на отопление рассчитывают тепловой поток в системе отопления Q_h^i, Вт, по формуле:

$$Q_h^i = \frac{Q_{hm}^i 10^3}{86400}. \tag{2}$$

4. Принимая за факторную переменную разность температур $\Delta t_i = t_{int}^i - t_{ext}^i$ и за результативную переменную Q_h^i, на основе статистической обработки данных по малому объему выборки (N = 14) строят математическую модель $Q_h(\Delta t)$ в виде уравнения линейной регрессии:

$$Q_h = a\left(t_{int} - t_{ext}\right), \tag{3}$$

где a – эмпирический коэффициент, Вт/°С.

5. По данным измерений или проектным данным определяют отапливаемый объем здания V_h, м^3.

6. На основании полученных данных определяют удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию q_h, Вт/(м^3·°С), по формуле:

$$q_h = \frac{a}{V_h}. \tag{4}$$

7. На основе полученной удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию определяют класс энергосбережения согласно [21].

Применение метода дает возможность определить удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление с относительной ошибкой, не превышающей ±10%.

Преимуществами разработанной методики являются:

- возможность оценки энергоэффективности здания на основе измерений параметров в течение короткого промежутка времени;

- использование удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, что позволяет оценить энергоэффективность здания на основе измерений сравнительно небольшого числа параметров;
- по сравнению с ГОСТ 31168–2003 [20] в разработанной методике не требуется проведение измерений суммарной солнечной радиации при действительных условиях облачности и бытовых тепловыделений;
- предлагаемая методика обеспечивает сопоставимую точность результатов по сравнению с [20];

Разработанная экспресс-методика была апробирована при оценке энергоэффективности эксплуатируемого жилого здания.

Экспериментальная часть

Объектом исследования является жилое многоквартирное здание в Волгограде (рис. 1). Здание имеет Г-образную форму в плане. Количество этажей – 23. Количество секций – 3. Количество квартир – 234. Здание имеет отапливаемый подвал, в котором размещаются паркинг и помещения инженерно-технического назначения. На первом этаже здания располагаются офисные помещения, на чердаке – инженерные коммуникации. Отапливаемый объем здания – 87000 м^3.

Рисунок 1. Общий вид обследованного здания

Конструктивная система здания каркасная, с монолитным железобетонным каркасом. Наружные стены выполнены из газобетонных блоков с облицовкой кирпичной кладкой и поэтажным опиранием на перекрытия. Окна и балконные двери выполнены из однокамерных стеклопакетов (с низкоэмиссионным покрытием стекла) в ПВХ переплетах. Покрытие, перекрытия над подвалом и под эркерами имеют эффективный утеплитель.

Теплоснабжение здания осуществляется от централизованного источника тепла (тепловых сетей). Система отопления двухтрубная с поквартирной горизонтальной разводкой, отопительные приборы (конвекторы) имеют встроенные терморегуляторы.

Система вентиляции квартир естественная, с притоком воздуха через регулируемые оконные створки и удалением воздуха из кухонь, уборных, ванных комнат и совмещенных санузлов через вытяжные каналы. Инженерные системы здания оснащены приборами учета тепловой энергии, холодной и горячей воды, а также электрической энергии. На момент проведения энергоаудита продолжительность эксплуатации здания составила около 5 лет.

В указанном здании реализован следующий комплекс энергосберегающих мероприятий:

- использование компактной формы здания;
- устройство теплого входного узла с тамбуром;
- использование буферных зон с применением подвала и теплого чердака;
- использование в наружных стенах теплоизоляционных материалов, обеспечивающих требуемую температуру и отсутствие конденсации влаги на внутренних поверхностях конструкций в помещениях с нормальным влажностным режимом;
- использование эффективных светопрозрачных ограждений с заполнением однокамерными стеклопакетами, с применением стекла с селективным покрытием;
- применение поквартирной водяной системы отопления.

В ходе проведенного обследования установлено, что наружные ограждающие конструкции здания находятся в состоянии, обеспечивающем в целом нормальную эксплуатацию объекта в отопительный период. Окна, балконные и входные двери имеют уплотняющие прокладки в притворах. Требуемые по ГОСТ 30494–96 [22] параметры микроклимата в помещениях здания обеспечены. Вместе с тем, в ряде квартир зафиксировано неплотное примыкание притворов светопрозрачных ограждающих конструкций окон и балконных дверей, а также наружных дверей в лестнично-лифтовых узлах, что приводит к избыточным тепловым потерям вследствие инфильтрации воздуха через теплозащитную оболочку здания и снижению его энергоэффективности.

Рисунок 2. Общий вид теплового пункта обследованного здания

Измерение и регистрация параметров энергопотребления здания выполнены по указанной методике в течение двух недель с 22.12.2011 по 04.01.2012. Мониторинг расходов тепловой энергии на отопление производился в автоматическом режиме один раз в сутки по общедомовому теплосчетчику (рис. 2). Среднесуточная температура внутреннего воздуха (t_{int}^i = 22 °C) принята согласно [22] по верхней границе комфортных условий. Среднесуточная температура наружного воздуха t_{ext}^i определена по данным ближайшей метеостанции. На основе измерений расхода тепловой энергии на отопление рассчитан тепловой поток в системе отопления Q_h^i при разности температур внутреннего и наружного воздуха Δt_i (табл. 1).

Таблица 1. Тепловой поток в системе отопления при разности температур внутреннего и наружного воздуха

№ п.п.	Разность температур Δt, °C	Тепловой поток $Q_h \times 10^5$, Вт	№ п.п.	Разность температур Δt, °C	Тепловой поток $Q_h \times 10^5$, Вт
1	20,8	5,095	8	23,6	5,847
2	23,6	5,51	9	24,6	6,109
3	22,8	5,659	10	22,1	5,086
4	24,9	6,377	11	23,2	5,888
5	25,8	6,685	12	23,1	6,047
6	21,2	5,041	13	26,6	6,904
7	19,5	4,446	14	24,2	6,338

Как видно из таблицы 1, тепловой поток в системе отопления изменяется от $4{,}446 \cdot 10^5$ Вт до $6{,}904 \cdot 10^5$ Вт, что связано с колебаниями температуры наружного воздуха.

Принимая за факторную переменную Δt_i и за результативную переменную Q_h^i, на основе статистической обработки данных по малому объему выборки (N = 14) получим математическую модель $Q_h(\Delta t)$ в виде уравнения линейной регрессии (3) с эмпирическим коэффициентом $a = 2{,}479 \cdot 10^4$ Вт/°C. Полученный коэффициент корреляции $r = 0{,}962$ свидетельствует о весьма тесной связи между факторной и результативной переменной по шкале Чэддока. При этом относительные ошибки на узлах колеблются от −8,74 до +5,34% при допустимом значении ±10%. Таким образом, построенная математическая модель в целом адекватна, и выводы, полученные по результатам малой выборки, можно с вероятностью 0,95 распространить на всю гипотетическую генеральную совокупность.

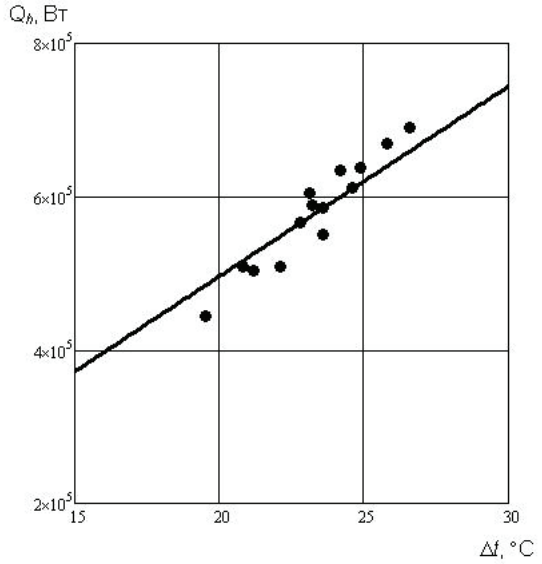


Рисунок 3. График зависимости $Q_h(\Delta t)$

График зависимости $Q_h(\Delta t)$ приведен на рисунке 3 (маркерами показаны результаты измерений).

По формуле (4) фактическая удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию q_h = 0,285 Вт/(м^3·°С).

По таблице 14 [21] нормируемая (базовая) удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию для указанного здания q_h^{req} = 0,290 Вт/(м^3·°С).

Поскольку $q_h < q_h^{req}$, то условие (1) выполняется. Следовательно, указанное здание отвечает требованиям энергосбережения [21].

Относительное отклонение фактического значения удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания от нормируемого равно –1,72%.

Согласно таблице 15 [21] класс энергосбережения здания – *C* (нормальный). Используя значение удельной характеристики q_h, получим фактический удельный расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания q_h^y = 97,6 МДж/(м^3·год) при значении градусосуток отопительного периода D_d = 3965 °С·сут/год.

На основании результатов экспериментальных исследований, выполненных для того же здания по ГОСТ [20], фактический удельный расход тепловой энергии на отопление (включая вентиляцию) равен 94,5 МДж/(м^3·год) [23].

Относительное отклонение фактического удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, полученного на основании разработанной методики, от соответствующего значения, полученного по [20], равно 3,28%. Хорошее согласование результатов подтверждает достоверность результатов, полученных по предлагаемой методике.

Заключение

На основе проведенных автором исследований сформулированы основные выводы.

1. Разработана экспресс-методика расчетно-экспериментального контроля энергосбережения на основе удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, которая позволяет выполнить оценку эффективности комплекса энергосберегающих мероприятий без измерений суммарной солнечной радиации при действительных условиях облачности и бытовых тепловыделений при сопоставимой с ГОСТ 31168–2003 точности результатов.

2. На основе разработанной методики произведена оценка эффективности комплекса энергосберегающих мероприятий, реализованных в эксплуатируемом многоквартирном жилом здании. Апробация методики на результатах экспериментальных исследований, выполненных для того же здания по ГОСТ 31168–2003, подтверждает достоверность результатов, полученных по предлагаемой методике.

Литература

1. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. 248 с.
2. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.
3. Савин В.К. Строительная физика. Энергоэкономика. М.: Лазурь, 2011. 418 с.
4. Шубин И.Л., Спиридонов А.В. Законодательство по энергосбережению в США, Европе и России. Пути решения // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. №3. С. 4–14.
5. Левин Е.В., Окунев А.Ю., Умнякова Н.П., Шубин И.Л. Основы современной строительной термографии. М.: НИИСФ РААСН, 2012. 176 с.
6. Табунщиков Ю.А., Миллер Ю.В. Принципы определения годового энергопотребления на климатизацию зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. №31-2. С. 549–554.
7. Пугачев С.В., Табунщиков Ю.А., Наумов А.Л. Концепция нормирования энергоэффективности зданий: Мировой опыт и российские перспективы // Academia. Архитектура и строительство. 2012. №1. С. 108–116.
8. Матросов Ю.А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения. М.: НИИСФ, 2008. 496 с.
9. Викулин Д.Ю., Мохов А.И. Комплексный мониторинг зданий и сооружений в обеспечении норм повышения их энергоэффективности // Промышленное и гражданское строительство. 2010. №11. С. 79–80.
10. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. М.: АСВ, 2009. 296 с.
11. Матросов Ю.А., Бутовский И.Н., Гольдштейн Д. Энергетический паспорт здания // АВОК. 1997. №3. С. 6–11.
12. Moreno-Munoz A., Pallarés-Lopez V., Real-Calvo R.J., Gil-De-Castro A., De La Rosa J.J.G. Distributed DC-UPS for Energy Smart Buildings // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. No.1. Pp. 93–100.
13. Kennedy S.D., Vangeem M.G., Lawrence T., Lord R. Energy Efficiency: Building on Standard 90.1 // ASHRAE Journal. 2010. Vol. 52. No.6. Pp. 22–28.
14. Laverge J., Van Den Bossche N., Janssens A., Heijmans N. Energy Saving Potential and Repercussions on Indoor Air Quality of Demand Controlled Residential Ventilation Strategies // Building and Environment. 2011. Vol. 46. No.7. Pp. 1497–1503.
15. Verbeeck G., Hens H. Life Cycle Inventory of Buildings: A Contribution Analysis // Building and Environment. 2010. Vol. 45. No.4. Pp. 964–967.
16. Gustavsson L., Dodoo A., Truong N.L., Danielski I. Primary Energy Implications of End-Use Energy Efficiency Measures in District Heated Buildings // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. No.1. Pp. 38–48.
17. Lagüela S., Martínez J., Armesto J., Arias P. Energy Efficiency Studies Through 3D Laser Scanning and Thermographic Technologies // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. No.6. Pp. 1216–1221.
18. Serra V., Zanghirella F., Perino M. Experimental Evaluation of a Climate Façade: Energy Efficiency and Thermal Comfort Performance // Energy and Buildings. 2010. Vol. 42. No.1. Pp. 50–62.
19. Richman R.C., Cianfrone C., Pressnail K.D. More Sustainable Masonry Façades: Preheating Ventilation Air Using a Dynamic Buffer Zone // Journal of Building Physics. 2010. Vol. 34. No.1. Pp. 27–41.
20. ГОСТ 31168–2003. Здания жилые. Метод определения удельного потребления тепловой энергии на отопление. М.: ФГУП ЦПП, 2003.
21. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003. М.: Минрегион России, 2012.
22. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М.: ФГУП ЦПП, 1999.
23. Корниенко С.В. Оценка энергоэффективности жилого здания по результатам энергоаудита // Жилищное строительство. 2012. №6. С. 19–22.

Сергей Валерьевич Корниенко, г. Волгоград, Россия
Тел. моб.: +7(988)491-24-59; эл. почта: svkorn2009@yandex.ru

Экспериментальное исследование теплового режима легкой ограждающей конструкции в натурных условиях

К.т.н., старший преподаватель Д.В. Петросова,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»;
ассистент Н.М. Кузьменко,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»;
старший преподаватель Д.В. Петросов,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Аннотация. Эффективность потребления тепла зданиями зависит от многих факторов. В первую очередь к ним относятся объемно-планировочные и строительные решения, то есть уровень теплозащиты отдельных наружных ограждений и здания в целом. Для повышения тепловой защиты зданий в настоящее время применяют многослойные ограждающие конструкции. В связи с этим вопрос определения теплофизических свойств, в частности приведенного сопротивления теплопередаче, является актуальным.

В статье представлены результаты натурного эксперимента, целью которого является оценка эффективности использования легкой стальной ограждающей конструкции. В ходе исследования определялись тепловой поток через ограждающую конструкцию, влияние термопрофилей на температурный режим помещения, измерение уровня тепловой защиты. Объектом натурных исследований являлось одноквартирное жилое здание в Ленинградской области.

По результатам исследований получено приведенное сопротивление теплопередаче и коэффициент теплотехнической однородности легкой ограждающей конструкции.

Ключевые слова: ограждающие конструкции; тепловой поток; приведенное сопротивление теплопередаче

Эффективность потребления тепла зданием зависит, в частности, от уровня теплозащиты его наружных ограждений. Этим обосновывается актуальность задачи определения теплофизических свойств ограждающих конструкций, в частности, приведенного сопротивления теплопередаче [1, 2].

Комплекс вопросов по теплофизическим свойствам конструкций опирается на исследования отечественных ученых разных поколений: строительных физиков О.Е. Власова [3], В.Н. Богословского [4], Б.Ф. Васильева [5]. Научно-технические основы повышения тепловой защиты легкобетонных ограждающих конструкций зданий были разработаны В.Р. Хлевчуком [6, 7]. Исследования влияния фильтрации воздуха в ограждающих конструкциях на теплозащитные свойства проведены В.В. Гагариным, В.В. Козловым, А.В. Садчиковым, М.Р. Петриченко, [8–12]. Работа С.С. Солощенко посвящена влиянию вентилируемого зазора на теплофизические характеристики систем наружного утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки [13]. В работе С.В. Корниенко приводится комплексная оценка теплозащиты ограждающих конструкций оболочки здания [14]. Исследования энергосберегающих решений зарубежных авторов приведены в работах [15–18].

Обзор литературы показал, что натурных исследований приведенного сопротивления легкой ограждающей конструкции нет.

Основной целью проведения эксперимента является оценка энергетической эффективности использования в качестве наружной стены легкой стальной ограждающей конструкции из тонкостенного холодногнутого оцинкованного профиля (так называемого термопрофиля [19–29]). Определялись тепловой поток через ограждающую конструкцию и влияние термопрофилей на приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции.

Объект исследования

Объектом натурных исследований являлось одноквартирное жилое здание в поселке Коробицино, Ленинградская область, спроектированное и построенное строительной организацией ООО «Авекс Плюс». Здание двухэтажное с чердаком (рис.1).

Рисунок 1. Жилое здание, поселок Коробицино, Ленинградская область

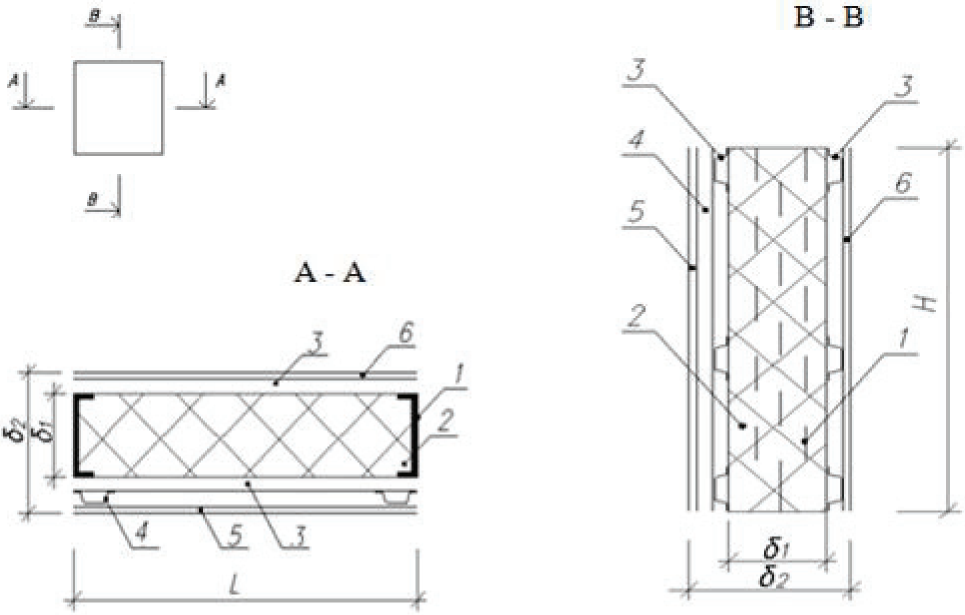


Рисунок 2. Легкая ограждающая конструкция: 1 – термопрофиль; 2 – утеплитель; 3 – горизонтальная обрешетка; 4 – вертикальная обрешетка; 5 – вагонка; 6 – два листа ГКЛ (2х12,5 мм); 7 – пароизоляционный слой; 8 – ветрогидрозащитная паропроницаемая мембрана; L – длина, мм; H – высота, мм; δ_1 – толщина утеплителя, мм; δ_2 – толщина конструкции, мм

Наружные стены (рис. 2) представляют собой каркас из термопрофилей сечения П и С-с (рис. 3). К нему посредством саморезов крепится горизонтальная обрешетка 3. С наружной стороны к обрешетке крепится вертикальная обрешетка 4, к ней – вагонка 5. С внутренней стороны к обрешетке 3 саморезами крепятся гипсокартонные листы 6. Внутри термопрофилей укладывается утеплитель 2. Термопрофили расположены с шагом 600 мм. Толщина утеплителя δ_1 = 200 мм. Высота стенки термопрофиля обусловлена конструктивными расчетами. Она совпадает с толщиной утеплителя, δ_1 = 200 мм. В качестве утеплителя применен эффективный теплоизоляционный материал с теплопроводностью λ = 0,045 Вт/(м·°С). На внутренней поверхности утеплителя крепится пароизоляционный слой 7, на наружной – ветрогидрозащитная паропроницаемая мембрана 8. Общая толщина ограждающей конструкции составляет δ_2 = 300 мм. Проектное сопротивление теплопередаче наружных стен R_0 = 4,6 (м^2·°С)/Вт. В качестве оконного заполнения применен однокамерный стеклопакет. Полы здания утепленные. Вентиляция естественная. Система отопления – горизонтальная двухтрубная от отопительного котла.

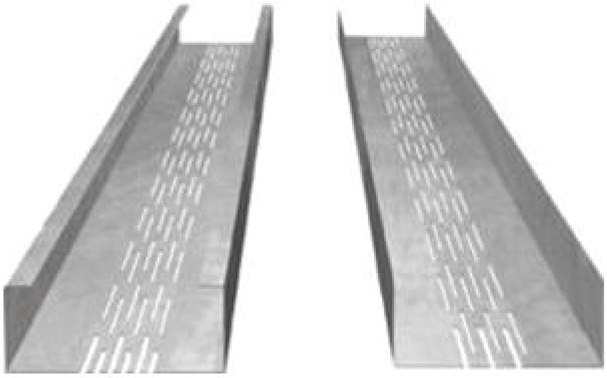


Рисунок 3. Термопрофили сечением П и Сс

Методика проведения эксперимента

Натурное обследование и обработка результатов проведены по «Комплексной методике контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений», утвержденной Госстроем РФ и рекомендованной к использованию при проведении контроля качества тепловой изоляции ОК в натурных условиях (письмо Госстроя России №9-14/932 от 23.12.2002 г.), ГОСТ 26629-85 «Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций», ГОСТ 26254-84 «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций», ГОСТ 30494-96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».

Для проведения натурных экспериментов применены следующие контрольно-измерительные приборы и оборудование: тепловизор ThermaCAM P60, измеритель-регистратор ИТП-МГ4.03-10 «ПОТОК», термогигрометр CENTER 314, рулетка измерительная металлическая STAYER.

С помощью тепловизора определены термически однородные зоны и места расположения теплопроводных включений. Для измерения плотности теплового потока, проходящего через ограждающую конструкцию, на внутренней поверхности конструкции установили преобразователи теплового потока в каждой характерной зоне (рис. 4). Измерение температуры поверхности проводилось с помощью термощупа, снабженного термопарой, и вторичного прибора – измерителя температуры. Температура и плотность теплового потока измерялись после достижения в ограждающей конструкции стационарного режима, наступление которого определяли по контрольным измерениям температур на поверхности и внутри конструкции. Измерения температур проводились многократно при небольших колебаниях температуры наружного воздуха от 7 °С до 13 °С . Процесс испытаний автоматизирован: специальный программный продукт производил сбор результатов измерений теплового потока и температуры и формирует протокол измерений.

Испытания проводились в ноябре месяце, показания снимались в течение пяти календарных дней. В период проведения исследования температура воздуха в помещениях коттеджа в среднем составляла +24 °С, температура наружного воздуха составляла от −7 до −13 °С.

Рисунок 4. Расположение датчиков температуры на внутренней поверхности стены

Результаты испытаний

Термограммы, полученные в ходе испытаний, представлены на рисунке 5. Установлено, что дефектов нет. Показано, что температура на внутренней поверхности ограждающей конструкции здания составила +23 °С, температура в зоне термопрофилей составила +22 °С. Таким образом, установлено, что температура на внутренней поверхности легкой ограждающей конструкции превышает температуру точки росы, равную +10,7 °С.

На основе анализа динамики изменения параметров, измеряемых контактными датчиками, выбран расчетный период и определен тепловой поток, проходящий через базовые участки ограждающих конструкций (таблица 1).

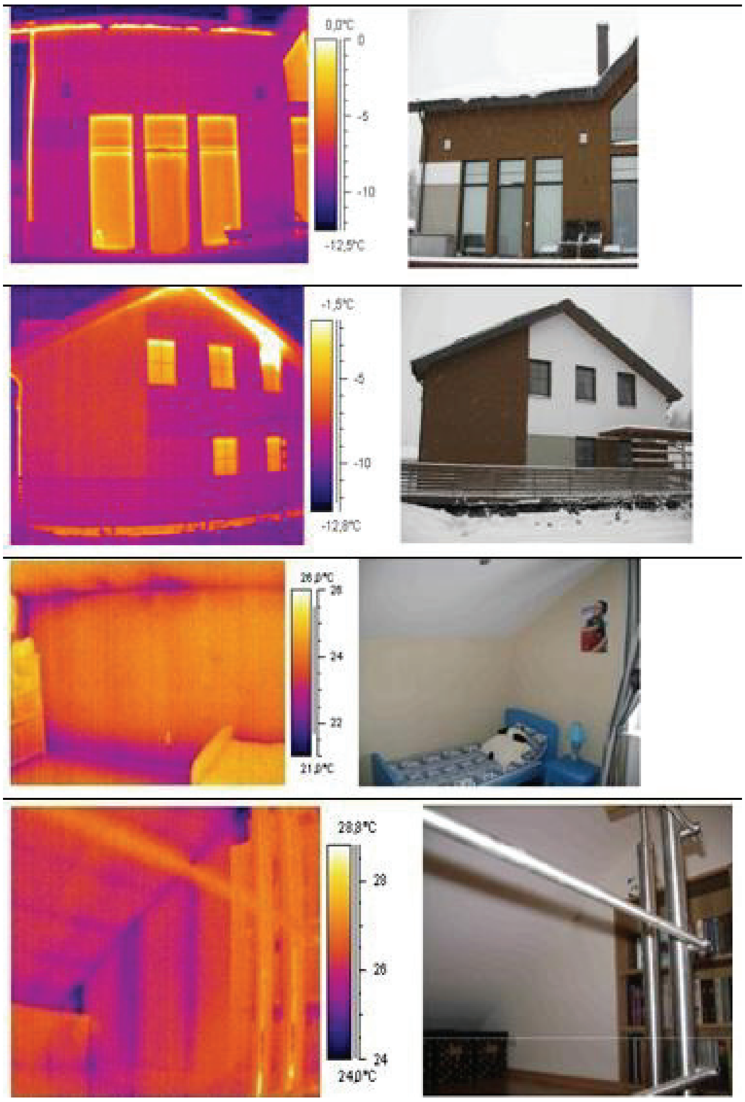


Рисунок 5. Термограммы

Таблица 1. Тепловой поток, проходящий через ограждающую конструкцию

№ п/п	День испытаний	$t_н$, °C	φ, %	$t_в$, °C	тепловой поток, Вт/м^2	
					q_1	q_2
Комната №1						
1	1-й день	−7	98	23,5	6,05	6,55
2	2-й день	−9	96	23	6,54	7,55
3	3-й день	−11	95	23,5	7,09	8,39
4	4-й день	−13	96	23	7,42	8,65
5	5-й день	−12	97	23,5	7,32	8,44
Комната №2						
6	1-й день	−7	98	23	6,07	6,56
7	2-й день	−9	96	23,5	6,54	7,55
8	3-й день	−11	95	23	7,09	8,39
9	4-й день	−13	96	23	7,42	8,65
10	5-й день	−12	97	23	7,32	8,44

Примечание: q_1 – тепловой поток в основной части легкой ограждающей конструкции, Вт/м^2; q_2 – тепловой поток в зоне тепрмопрофиля легкой ограждающей конструкции, Вт/м^2, $t_н$ – температура наружного воздуха, °C; $t_в$ – температура воздуха внутри помещения, °C; φ – относительная влажность воздуха внутри помещения, %.

Приведенное сопротивление теплопередаче $R_0^{пр}$ ограждающей конструкции определяем по формуле:

$$R_o^{пр} = \frac{F}{\sum \frac{F_i}{R_{oi}}}, \tag{1}$$

где F – площадь испытываемой ограждающей конструкции, м;
F_i – площадь характерной изотермической зоны, м;
R_{oi} – сопротивление теплопередаче характерной зоны, (м^2·°C)/Вт.

Сопротивление теплопередаче R_{0i} для характерной зоны ограждающей конструкции определяем по формуле:

$$R_o = \frac{t_{в_i i} - t_{нi}}{t_{в_i i} - \tau_{вi}} R_{вi}, \tag{2}$$

где

$$R_{вi} = \frac{1}{\alpha_{вi}} = \frac{1}{\alpha_{кi} + \alpha_{лi}}, \tag{3}$$

где $\alpha_{кi}, \alpha_{лi}$ – коэффициенты соответственно конвективного и лучистого теплообмена внутренней поверхности характерной зоны, Вт/(м^2·°C), определяемые по чертежам 1 и 2 приложения 7 ГОСТ 26254-84.

Получаем:

1) основная зона:

$\alpha_в$ = 6,9 Вт/(м^2·°C);
R_{o1} = 4,98 (м^2·°C)/Вт;

2) зона термопрофиля:

$\alpha_в$ = 7,2 Вт/(м^2·°C);
R_{o2} = 2,39 (м^2·°C)/Вт.

Тогда приведенное сопротивление теплопередаче легкой ограждающей конструкции будет равно:

$$R_o^{пр} = \frac{11{,}34}{\frac{1{,}42}{2{,}39} + \frac{9{,}92}{4{,}98}} = 4{,}39 (м^2 \cdot {}^\circ C)/Вт \ .$$

Суммарная абсолютная погрешность результата испытания термического сопротивления теплопередаче легкой ограждающей конструкции вычислена в соответствии с требованиями приложения 3 ГОСТ 26254-84 и равна 0,45 (м^2·^{o}C)/Вт.

Коэффициент теплотехнической однородности легкой ограждающей конструкции $r = 0{,}88$.

Таким образом, в работе получены следующие результаты.

1. Показано, что температура на внутренней поверхности легкой ограждающей конструкции здания составила +23 °С, температура в зоне термопрофилей составила +22 °С. Таким образом, установлено, что температура на внутренней поверхности легкой ограждающей конструкции превышает температуру точки росы равной +10,7 °С.
2. Установлено, что приведенное термическое сопротивление теплопередаче легкой ограждающей конструкции (толщиной утеплителя 200 мм и λ=0,045 Вт/(м·°С), с термопрофилем высотой стенки 200 мм, толщиной 1,5 мм и шагом расстановки 600 мм) составляет 4,39±0,45 (м^2·°С)/Вт, коэффициент теплотехнической неоднородности конструкции 0,88.

Показано, что легкая ограждающая конструкция имеет высокое значение приведенного сопротивления теплопередаче и является энергетически эффективной. Легкая ограждающая конструкция может быть использована в малоэтажном строительстве, а также при возведении общественных зданий каркасного типа.

Литература

1. Крайнов Д.В., Сафин И.Ш., Любимцев А.С. Расчет дополнительных теплопотерь через теплопроводные включения ограждающих конструкций (на примере узла оконного откоса) // Инженерно-строительный журнал. 2010. №6(16). С. 17–22.
2. Малявина Е.Г. Строительная теплофизика и проблемы утепления современных зданий // АВОК. 2009. №1. С. 4–10.
3. Власов О.Е. Основы строительной теплотехники. ВИА РККА, 1938. 94 с.
4. Богословский В.Н.Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. 248 с.
5. Васильев Б.Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима зданий. М.: Стройиздат, 1957. 347 с.
6. Хлевчук В.Р., Черников С.Г. Повышение теплозащитных качеств панелей из легкого бетона // Труды НИИСФ. М.: НИИСФ, 1984. С. 10–15.
7. Хлевчук В.Р. Научно-технические проблемы повышения теплозащитны легкобетонных ограждений зданий: Автореферат дис. докт. техн.наук: 05.23.10; 05.23.03 / НИИСФ Госстроя СССР. М., 1989. 88 с.
8. Гагарин В.Г., Козлов В.В, Садчиков В.В., Мехнецова И.А. Продольная фильтрация воздуха в современных ограждающих конструкциях // АВОК. 2005. №8. С. 60–70.
9. Гагарин В.Г., Козлов В.В, Крышов С.И., Пономарев О.И. Теплозащита наружных стен зданий с облицовкой из кирпичной кладки // АВОК. 2009. №5. С. 46–60.
10. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Садчиков А.В. Учет продольной фильтрации воздуха при оценке теплозащиты стены с вентилируемым фасадом // Промышленное и гражданское строительство. 2005. №6. С. 42–45.
11. Петриченко М.Р., Петросова Д.В., Петроченко М.В. Фильтрационный перенос воздухом консервативной примеси (температуры и теплоты) сквозь стену // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. №4(159). С, 221–226.

12. Садчиков А.В. Влияние продольной фильтрации воздуха в утеплителе на теплозащитные свойства стен с навесными вентилируемыми фасадами: Автореферат дисс. канд. техн. наук. Москва, 2007. 24 с.

13. Солощенко С.С. Влияние вентилируемого зазора на теплофизические характеристики систем наружного утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 39–41.

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

15. Guo W., Qiao X., Huang Y., Fang M., Han X. Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone // Energy and Buildings. 2012. Vol. 50. Pp. 196–203.

16. Xinhong Zhao, Congyu Ma, Pingdao Gu. Energy Saving Methods and Results Analysis in the Hotel // Energy Procedia. 2012. Vol. 14. Pp. 1523–1527.

17. Ehringer H., Hoyaux G., Zegers P. Energy Conservation in Buildings Heating, Ventilation and Insulation. Springer, 1983. 512 p.

18. Govan F.A. Thermal Insulation, Materials, and Systems for Energy Conservation in the '80s. Astm Intl, 1983. 890 p.

19. Жмарин Е.Н. Технология будущего - строительство облегчённых зданий и сооружений с применением термопрофилей и лёгких балок // Стройпрофиль. 2004. №5(35). С. 83.

20. Жмарин Е.Н. Международная ассоциация легкого стального строительства // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №2. С. 27–30.

21. Кузьменко Д.В. Ограждающая конструкция на базе легких стальных конструкций // Строительные материалы.2009.№4.С. 2–4.

22. Кузьменко Д.В. Ограждающая термопанель с каркасом из термопрофилей // Жилищное строительство. 2009. №4. С 2–4.

23. Кузьменко Д.В., Ватин Н.И. Ограждающие конструкции «нулевой» толщины для каркасных зданий // Инженерно-строительный журнал. 2008. №1. С. 13–21.

24. Кузьменко Д.В., Ватин Н.И. Новый тип ограждающий конструкции – термопанель // Стройпрофиль. 2008. №6(68). С. 56.

25. Ватин Н.И., Попова Е.Н. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях. [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург, 2006. URL: http://elib.spbstu.ru/dl/1307.pdf/view (дата обращения: 16.12.2013).

26. Рыбаков В.А., Гамаюнова О.С. Влияние перфорации стенки на несущую способность термопрофилей // Стройпрофиль. 2008. №1(63). С. 128–130.

27. Лалин В. В., Рыбаков В.А. Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 69–80.

28. Milan Veljkovic, Bernt Johansson. Light steel framing for residential buildings // Thin-Walled Structures. 2006. Vol. 44. Issue 12. Pp. 1272–1279.

29. Davies J.M. Light gauge steel cassette wall construction – theory and practice // Journal of Constructional Steel Research. 2006. Vol. 62. Issue 11. Pp. 1077–1086.

Дарья Владимировна Петросова, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(905)211-44-17; эл. почта: d_kuzmenko@list.ru

Наталья Михайловна Кузьменко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(960)276-48-37; эл. почта: d_kuzmenko@list.ru

Дмитрий Вадимович Петросов, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)750-08-70; эл. почта: dpetrosov@mail.ru

Диффузорная конструкция навесного вентилируемого фасада

Инженер Е.Б. Явтушенко,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»;
к.т.н., старший преподаватель М.В. Петроченко,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Аннотация. Основной проблемой при проектировании фасадных систем является эмпирический выбор параметров вентилируемого воздушного зазора и рустов между облицовочными панелями, в результате чего появляются невентилируемые прослойки. Недостаточный воздухообмен при этом приводит к обледенению элементов подконструкции, выходящих в воздушный вентилируемый зазор, и облицовочного слоя в зимний период, снижению теплозащитных свойств конструкции в целом.

Целью настоящей работы была разработка методики гидравлического расчета параметров течения воздуха в вентилируемом воздушном зазоре, позволяющая определить рациональные размеры гидравлически оптимального воздушного зазора в навесных фасадах зданий и сооружений. В результате было установлено, что с точки зрения минимизации потерь необходимо проектировать вентилируемый навесной фасад с вентилируемой воздушной прослойкой, расширяющейся снизу вверх.

Ключевые слова: навесной вентилируемый фасад; свободноконвективное течение; воздушный зазор; диффузорный профиль навесного фасада; оптимальная ширина воздушного зазора; показатель политропы; тепловой поток; энергоэффективность; наружные ограждающие конструкции

На сегодняшний день вопрос внедрения новых технологий строительства, позволяющих рационально использовать энергоресурсы, экономить средства и минимизировать затраты на эксплуатацию зданий и сооружений, становится все более актуальным. В настоящее время происходит поиск новых возможностей для повышения энергоэффективности зданий.

В целом объем домостроения на территории Российской Федерации постоянно растет и требует новейших технических решений абсолютно во всех аспектах. Одним из таких решений стало применение ограждающих конструкций с использованием эффективных утеплителей, в том числе навесных вентилируемых фасадов (НВФ) с воздушным зазором. Воздушная вентилируемая прослойка оказывает влияние на все теплофизические характеристики фасада, и ее правильная организация является важной практической задачей.

Основной проблемой при проектировании фасадных систем является эмпирический выбор параметров воздушного зазора и рустов между облицовочными панелями, в результате чего появляются невентилируемые прослойки. Недостаточный воздухообмен при этом приводит к обледенению элементов подконструкции, выходящих в воздушный вентилируемый зазор, и облицовочного слоя в зимний период, а также к снижению теплозащитных свойств конструкции в целом. В период эксплуатации в ограждающих конструкциях здания возможны конденсация и накапливание влаги, вследствие чего снижаются долговечность и теплозащитные свойства материалов конструкции. Распространены конструктивные решения по выведению влаги восходящим потоком воздуха, движущимся в плоских каналах ограждающих конструкций. К таким решениям относятся, в том числе, и вентилируемые фасадные системы [1].

Для проектирования ограждающих конструкций необходим тщательный анализ условий и возможности вывода влаги из конструкции через вентилируемую воздушную прослойку, а также уточнение параметров течения воздуха в вентилируемом канале [2].

Течение воздуха в вертикальных плоских каналах ограждающих строительных конструкций можно охарактеризовать как свободноконвективное (термогравитационное). Воздух, поступая снаружи в вентилируемый канал, движется за счет естественной тяги, возникающей вследствие разницы температур наружного воздуха и стенок вентилируемого канала. Наличие свободноконвективных течений в элементах строительных конструкций делает актуальными оценки гидравлических характеристик свободноконвективного потока, в первую очередь, средней скорости течения как функции тепловой нагрузки и размеров воздушного зазора [3].

Свободная конвекция – это экономичный и практичный метод удаления влаги из воздушного зазора, так как он не требует дополнительных материальных затрат [4].

Для обоснования эффективности работы вентилируемого фасада необходима методика расчета параметров воздушного потока в вентилируемом зазоре между стеной и защитным экраном, а именно, требуется решить вопрос о том, каков должен быть размер (ширина) воздушного зазора, обеспечивающий пропуск максимального расхода воздуха. Многими исследователями были приняты попытки описания характера движения воздушного потока в вентилируемом зазоре [5–18], но дальнейшее развитие этого направления требует более точного расчета и формулировки общей универсальной методики расчета гидравлических параметров воздушного потока в зазоре.

Целью данной работы является разработка методики гидравлического расчета параметров течения воздуха в вентилируемом воздушном зазоре. Данный расчет позволит определить рациональные размеры гидравлически оптимального воздушного зазора в навесных фасадах зданий и сооружений.

Рассматривается вертикальный воздушный зазор стандартной фасадной системы (рис. 1) [19–22], образованный двумя плоскостями y = 0, y = L, высотой L и шириной воздушного зазора h. Правая стенка y = h охлаждена и поддерживается при температуре T_c, меньшей, чем температура T_h левой стенки y = 0. Давление на отметке z = 0 равно p_0, давление на отметке z = L равно p_1, причем $p_0 > p_1$.

Свободная конвекция обусловлена наличием разности плотностей в поле массовых сил.

Решение задачи конвективного теплообмена сводится к совместному определению температурного и скоростного полей движущейся жидкости или газа в пограничном слое стенки [3]. Для этого составляется система дифференциальных уравнений, описывающих конвективный перенос, которая включает уравнение энергии, уравнение количества движения в приближении пограничного слоя, уравнение неразрывности потока.

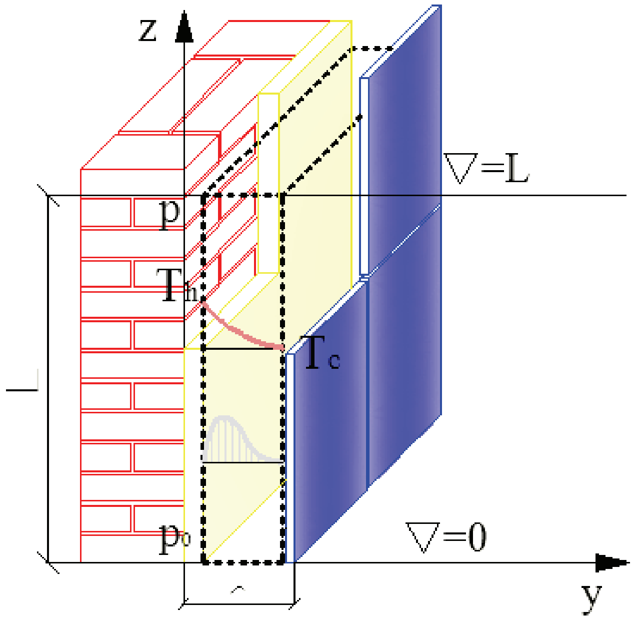


Рисунок 1. Схема фасадной системы с воздушным зазором

Уравнение количества движения в приближении пограничного слоя:

$$U_z\frac{\partial U_z}{\partial z}+U_y\frac{\partial U_y}{\partial y}=v\frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2}+g\theta \quad (1)$$

Уравнение энергии:

$$U_z\frac{\partial \theta}{\partial z}+U_y\frac{\partial \theta}{\partial y}=\frac{v}{\sigma}\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad (2)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial U_z}{\partial z}+\frac{\partial U_y}{\partial y}=0, \quad (3)$$

где U_z, U_y – продольные и поперечные компоненты скорости;

$\theta := \dfrac{T - T_c}{T_h - T_c}$ – безразмерный температурный напор, 0 < θ < 1;

σ – число Прандтля;

z – вертикальная координата, отсчитываемая снизу вверх от входа в воздушный зазор;

y – горизонтальная координата, отсчитываемая от горячей стенки.

Заменим Uz, Uy на производные функции тока:

$$\psi(y,z): U_z = \frac{\partial\psi}{\partial y}; U_y = -\frac{\partial\psi}{\partial z},$$

где Ψ(y,z) – функция тока плоского движения.

В производных функции тока условие неразрывности принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial\psi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\frac{\partial\psi}{\partial z}\right) = 0.$$

Уравнения движения и энергии производных функции тока:

$$\frac{\partial}{\partial z}\frac{\partial^2\psi}{\partial z\partial y} - \frac{\partial\psi}{\partial z}\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} = \nu\frac{\partial^2\psi}{\partial y^3} + g\theta; \tag{1'}$$

$$\frac{\partial\psi}{\partial y}\frac{\partial\theta}{\partial z} - \frac{\partial\psi}{\partial z}\frac{\partial\theta}{\partial y} = \frac{\nu}{\sigma}\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} \tag{2'}$$

приводятся к переменным ζ, f(ζ):

$$\begin{aligned} & f''' + 3ff'' - 2f'^2 + \theta = 0; \\ & \theta'' + 3\sigma \cdot f \cdot \theta' = 0, \end{aligned} \tag{4}$$

где f – функция тока пристеночного течения, связанная с размерной функцией тока Ψ тождеством $\psi := G \cdot f\left(\dfrac{y}{\delta(z)}\right)$;

δ – толщина слоя подъемной силы, $\delta := \sqrt[4]{\dfrac{4\nu^2 z}{g}}$;

$G(z) := \dfrac{g\delta^3}{\nu}$ – масштаб функции тока;

f=f(ζ) – безразмерная функция тока;

ζ – безразмерная координата, $\zeta = \dfrac{y}{\delta(z)}$, ζ∈(0, ∞), где z, y – продольная и поперечная координаты, δ > z > 0, y > 0.

Причем предельные условия ставятся в зависимости от обстановки на горячей плоскости ζ = 0 [23]. Это может быть:

1) изотермическая стенка, θ(0) – 1 = 0;
2) стенка, пропускающая постоянный тепловой поток, $\theta'(0) = -Nu_\delta = const$;
3) смешанные условия Робэна, случай граничных условий III рода, когда задается коэффициент теплоотдачи; предельные условия на функцию тока f и температурный перепад записываются в виде:

$$f(0) = f''(0) = f'(\infty) = \theta'(0) + \alpha\theta(0) + \gamma = \theta(\infty) = 0.$$

В данном случае используются результаты простейшей предельной задачи в условиях изотермической стенки $\theta(0) - 1 = 0$:

$$f(0) = f^{'}(0) = f^{'}(\infty) = \theta(0) - 1 = \theta(\infty) = 0 .$$

Решения этой задачи известны. Для удобства вычислений используется метод расщепляющих разложений [23]. Тогда для профилей безразмерного напора температуры и безразмерной скорости получается:

$$\theta(\zeta) = \exp(-3a\zeta) ;$$

$$f^{'}(\zeta) = \frac{\zeta \exp(-3a\zeta)}{3a} .$$

Здесь $a = \dfrac{1}{\sqrt[4]{27}}$ – параметр задачи. Для коэффициента теплообмена получается выражение:

$$Nu_{\delta} = -\theta^{'}(0) = 3a = \sqrt[4]{3} ;$$

$$\alpha(z) = \frac{\lambda}{\delta(z)} Nu_{\delta} = \frac{\sqrt[4]{3g}\lambda}{\sqrt[4]{4\nu^2 z}} = 0{,}9306\lambda\sqrt[4]{\frac{g}{\nu^2 z}} .$$

Среднее по длине плоскости $\zeta = 0$ значение α:

$$\alpha_m = 1{,}2408\lambda\sqrt[4]{\frac{g}{\nu^2 L}} .$$

Таким образом, скорость свободноконвективного течения повышается с увеличением теплового потока.

Для инженерных расчетов вентилируемых фасадных систем используются гидравлические переменные: расход, массовый расход, средняя скорость, массовая скорость, коэффициенты потерь и скорости. Основные положения гидравлического расчета обозначены в работе М.В. Петроченко [3].

Для оценки средней скорости свободноконвективного течения вычисляется техническая работа при баротропном движении воздуха с показателем политропы n < k. Прежде всего, считается, что СКТ – баротропное движение, т. е. существует биекция $p = p(\rho)$, причем эта зависимость аппроксимируется степенной функцией (политропой) [24], это допущение «исключает из системы уравнений дифференциальное уравнение энергии, заменяя его проинтегрированным соотношением, связывающим плотность и давление (политропным равенством)» [25]. При этом условие n = k равносильно отсутствию внешнего теплообмена, а условие n < k – подводу теплоты к воздушному потоку.

Далее из элементарных соображений получено выражение для средней скорости в СКТ [26]:

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

где φ – коэффициент скорости, который находится по формуле:

$$\varphi := \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta + \lambda \dfrac{L}{h}}} , \tag{6}$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; ζ – коэффициент местных потерь напора, учитывающий потери напора на вход в щелевой канал и внутри канала; T_0 – температура воздуха на входе в канал.

Формула (5) приводит к правдоподобным оценкам средней скорости течения в выходном сечении канала. Например, пусть k = 1,4; 0,05 < n < 1,4; T_0 = 300 K; 0 < φ < 0,5; L = 100 м (рис. 2).

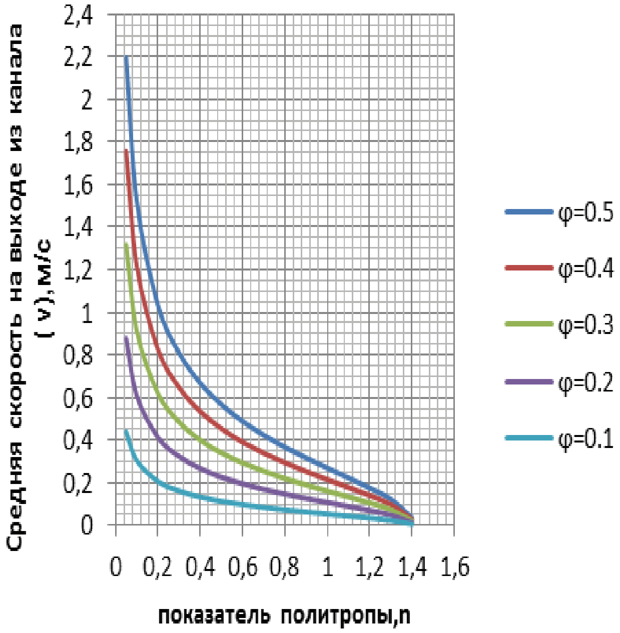


Рисунок 2. График зависимости средней скорости от показателя политропы

Из графика, приведенного на рисунке 2, видно, что средняя скорость свободноконвективного течения возрастает с увеличением разности (k−n). При малых значениях этой разности средняя скорость мало зависит от коэффициента скорости φ. Эта зависимость средней скорости течения от коэффициента скорости заметна при достаточно больших значениях средней скорости.

Для того чтобы построить продольный профиль канала для вертикального воздушного зазора, обеспечивающего постоянство средней скорости по высоте зазора, требуется доказать, что средняя скорость связана с шириной воздушного зазора.

Из формул (5) и (6) видно, что скорость воздушного потока имеет прямую зависимость от ширины воздушного зазора $v \approx \sqrt{\dfrac{h}{\lambda \cdot L}}$. Для обоснования данного утверждения принимаем высоту воздушного зазора 100 м.

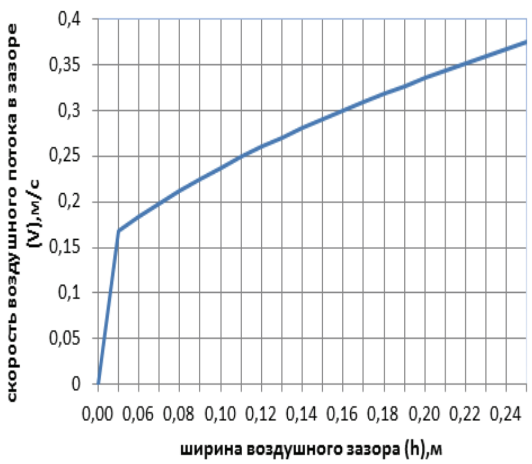


Рисунок 3. График зависимости средней скорости от ширины воздушного зазора в прямоугольном вертикальном канале

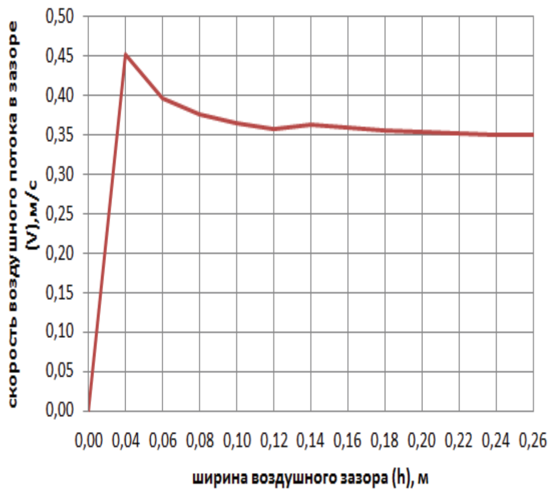


Рисунок 4. График зависимости средней скорости от ширины воздушного зазора в диффузорном вертикальном канале

Из графика, приведенного на рисунке 3, следует, что темп увеличения средней скорости растет при увеличении ширины воздушного зазора (h), но, как видно, максимум скорости достигается при больших значениях h (порядка метра), что, конечно, конструктивно неприемлемо. В существующих конструкциях величина h составляет порядка 10–30 см. Важно, что при небольших ширинах канала средняя скорость прямо пропорциональна ширине канала.

Из графика, приведенного на рисунке 4, следует, что темп увеличения средней скорости растет до определенной ширины, после чего скорость становится постоянной, что очень важно для минимизации потерь по высоте.

Таким образом, можно сделать вывод, что при обычной прямоугольной конструкции навесного фасада скорость в зависимости от ширины воздушного зазора растет. В соответствии с этим можно сказать, что применение конструкции диффузорного навесного фасада более приемлемо, так как при определенной ширине скорость становится постоянной, за счет чего уменьшаются потери.

Анализ формулы (5) для средней скорости показывает, что средняя скорость монотонно возрастает при увеличении высоты воздушного зазора (L) (эффект «драфта», или тяги) и при уменьшении n. При уменьшении n возрастает интенсивность подвода теплоты к воздушному потоку. Тем самым устанавливается связь скорости течения и интенсивности передачи теплоты [3]. На входе в канал интенсивность передачи теплоты велика, n мало и градиент средней скорости максимален. При постоянной температуре стенки поток на входе в канал турбулизированный, «возмущения» возникают от условий входа. По высоте канала поток прогревается, вследствие чего плотность воздуха понижается, а средняя скорость растет. При прогреве потока $n \to k-0$ и вблизи выходного сечения канала градиент средней скорости уменьшается, приближаясь к минимальному значению. К выходу из канала возникает некая диффузорность за счет потерь напора на резкое расширение.

В работе вводится понятие о гидравлически оптимальном канале. Канал является гидравлически оптимальным, если при заданной длине L, коэффициенте φ, температуре T_0 он обеспечивает пропуск максимального массового расхода [27].

Переменное поле температур вызывает переменное поле плотности, и вследствие этого в поле земного тяготения происходит перемещение масс с разной плотностью (легкие слои поднимаются вверх, тяжелые опускаются вниз). По графику, изображенному на рисунке 5, можно сказать, что плотность воздуха падает с набором высоты. Поэтому целесообразно применение диффузорного канала.

Переменное поле температур вызывает переменное поле плотности, вследствие чего в поле земного тяготения происходит перемещение масс с разной плотностью (легкие слои поднимаются вверх, тяжелые опускаются вниз). По данному графику можно сказать, что плотность воздуха падает с набором высоты. Поэтому целесообразно применение диффузорного канала.

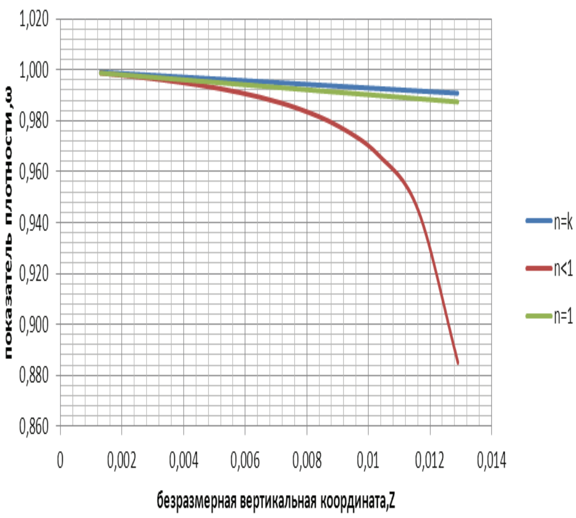


Рисунок 5. График зависимости плотности от безразмерной вертикальной координаты

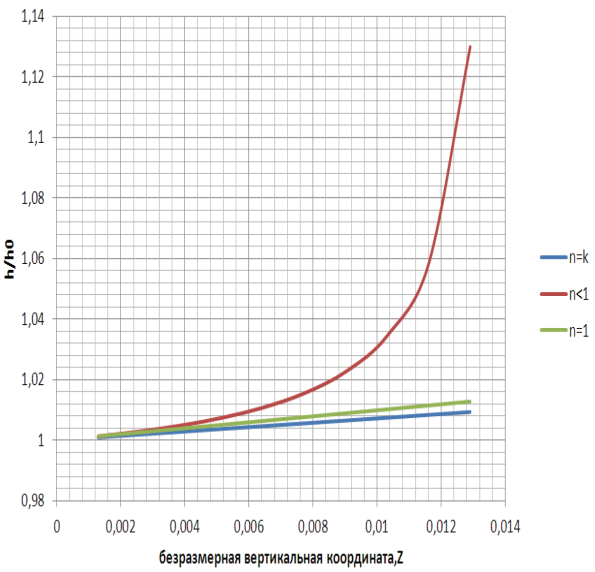


Рисунок 6. Профиль продольного сечения вертикального щелевого канала

Для обоснования применения диффузорного канала воспользуемся уравнением неразрывности $\rho Vh = const$.

При показателе политропы $n = k$ примем, что адиабатный газ неподвижен: $h = const$.

Газ нагревается, плотность снижается, скорость растет. Следовательно, для того чтобы скорость была постоянной V = const, требуется увеличение h. Это важно для минимизации потерь.

С точки зрения минимизации потерь (увеличения φ) необходимо проектировать вентилируемый навесной фасад НВФ с вентилируемым воздушным зазором, расширяющимся снизу вверх. Профиль продольного сечения воздушного зазора найден и изображен на рисунке 6.

Таким образом, гидравлический расчет вентилируемых каналов является неотъемлемой частью проектирования и расчета ограждающих строительных конструкций с вентилируемыми воздушными зазорами, а именно навесных вентилируемых фасадов.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Понятие гидравлически оптимального канала определяется значениями температуры и коэффициентами теплопередачи и трения (сопротивления) щели, иначе говоря, понятие оптимального воздушного зазора соответствует сезонным условиям эксплуатации НВФ.
2. Определено, что при стандартной прямоугольной конструкции НВФ скорость воздушного потока растет. Постоянство средней скорости в воздушном зазоре, обеспечивающее минимум потерь напора, реализуется при небольшом продольном уширении зазора, так называемом «диффузорном воздушном зазоре».

Литература

1. Лапин В.Г., Лапин С.В. Расчет конвективного движения воздуха в канале вентилируемого фасада при наличии горизонтальных щелей между плитками облицовки // Приволжский научный журнал. 2012. №2(22). С. 85–92.
2. Фасадные теплоизоляционные системы с воздушным зазором. Рекомендации по составу и содержанию документов и материалов, представляемых для технической оценки пригодности продукции. М.: Госстрой России, 2004.
3. Петроченко М.В. Основы гидравлического расчета свободноконвективных течений в ограждающих строительных конструкциях: дис. канд. техн. Санкт-Петербург, 2012. 122 с.
4. Петриченко М.Р., Петроченко М.В. Гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 51–56.
5. Ayinde T.F., Said S.A.M., Habib M.A. Experimental investigation of turbulent natural convection flow in a channel // Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 42. Issue 3. Pp. 169–177.
6. Ayinde T.F., Said S.A.M., Habib M.A. Turbulent natural convection flow in a vertical channel with anti-symmetric heating / // Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 44. Issue 10. Pp. 1207–1216.
7. Bodia J.R., Osterle J.F.The development of free convection between heated vertical plates // Journal Heat Transfer. 1962. Vol. 84. Issue 1. Pp. 40–43.
8. Elenbaas W. Heat dissipation of Parallel plates by free Convection // Physica. 1942. Vol. 9. Issue 1. Pp. 1–28.
9. Fedorov A.G., Viskanta R., Mohamad A.A. Turbulent heat and mass transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel plate channel // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1997. Vol. 18. Issue 3. Pp. 307–315.
10. Fedorov A.G., Viskanta R. Turbulent natural convection heat transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel-plate channel // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1997. Vol. 40. Issue 16. Pp. 3849–3860.
11. Naylor D., Floryan J.M., Tarasuk J.D. A Numerical study of Developing Free convection Between Isothermal vertical plates // Journal of Heat Transfer. 1991. Vol. 113. Issue 3. Pp. 620–626.
12. 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. Issue 2. Pp. 377–387.
13. Sparrow E.M. Azevedo L.F.A. Vertical channel natural convection spanning between fully-developed limit and the single-plate boundary-layer limit // International Journal Heat Mass Transfer. 1985. Vol. 28. Issue 10. Pp. 1847–1857.

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. Issue 9. Pp. 2173–2185.
15. Miyamoto M. [et al]. Turbulent Free Convection Heat Transfer From Vertical Parallel Plates // Proceeding of the International Heat Transfer Conference. 1986. Vol. 4. Pp. 1593–1598.
16. Badr H.M. [et al]. Turbulent natural convection in vertical parallel-plate channels // International Journal Heat Mass Transfer. 2006. Vol. 43. Pp. 73–84.
17. Habib M.A. [et. al]. Velocity characteristics of turbulent natural convection in symmetrically and asymmetrically heated vertical channels // Experimental Thermal and Fluid Science. 2002. Vol. 26. Issue 1. Pp. 77–87.
18. Yilmaz T., Gilchrist A. Temperature and velocity field characteristics of turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating // Heat Mass Transfer. 2007. Vol. 43. Issue 7. Pp. 707–719.
19. Рекомендации по проектированию навесных фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором для нового строительства и реконструкции зданий. М.: Москомархитектура, 2001.
20. СП 23-101-2000 «Проектирование тепловой защиты зданий». М.: Госстрой России, 2004.
21. СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». М., 2004.
22. ТР по проектированию, монтажу и эксплуатации навесных фасадных систем ТР 161-05. М., 2005.
23. Петриченко М.Р. Расщепляющие разложения в предельных задачах для обыкновенных квазилинейных дифференциальных уравнений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2012. №2(146). С. 143–150.
24. Страхович К.И. К вопросу об одноразмерном установившемся движении газа в трубах // Гидро-газодинамика, избранные труды. М.: Наука, 1980. С. 102–105.
25. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика. М.: Наука, 1964. 275 с.
26. Петриченко М.Р., Петроченко М.В. Достаточные условия существования СКТ в вертикальном щелевом канале // НТВ СПбГПУ. 2012. №2–2(147). С. 276–282.
27. Петриченко М.Р., Петроченко М.В., Явтушенко Е.Б. Гидравлически оптимальная вентилируемая щель // Инженерно-строительный журнал. 2013. №2(37). С. 35–39.

Евгения Борисовна Явтушенко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(965)761-58-24; эл. почта: yavtushenko_89@mail.ru

Марина Вячеславовна Петроченко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)552-94-60; эл. почта: mpetroch@mail.ru

Экстремальные задачи расчета свободноконвективных движений в навесных вентилируемых фасадах

Инженер, ассистент Д. В. Немова,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
магистрант В.А. Емельянова,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
студент Д.Р. Мифтахова,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Аннотация. Системы навесных вентилируемых фасадов в последнее время набирают все большую популярность. В первую очередь это объясняется многофункциональностью этих систем. Навесные вентилируемые фасады не только придают зданиям выразительный архитектурный облик, но и обеспечивают защиту здания от внешних воздействий и эффективно справляются с теплозащитой здания. Основные существующие методики для расчета этих ответственных конструкций базируются на требованиях нормативных документов.

В настоящей статье представлен гидравлический метод расчета систем навесных вентилируемых фасадов с помощью экстремальных задач. Экстремальные условия разделяют действительные и виртуальные движения вязкого воздуха в вертикальных вентилируемых щелях. Их применение приводит к слабым формулировкам предельных задач, удобным для оценки гидравлических элементов движения. Метод базируется на экстремальной задаче Эккера, решение приводится с помощью уравнений Крокко.

Ключевые слова: свободноконвективное движение; баротропность; потери напора; предельная задача; топология

Элементарное условие экстремума. Свободноконвективные движения (СКД) в вентилируемых вертикальных каналах навесных фасадов реализуются за счет работы силы Архимеда. Пусть задана высота канала, условия передачи теплоты и значения потерь. Среди множества каналов необходимо найти канал, обеспечивающий пропуск максимального расхода (гидравлически оптимальный канал). Доказывается, что в таком канале средняя скорость v СКД и размеры канала (высота L и ширина h) удовлетворяют оценкам:

$$v = O\left(\frac{\sqrt{(gL)^3}}{RT_0}\right),$$

$$\frac{L}{h} = O\left(\frac{1}{\lambda}\right),$$

где λ – коэффициент гидравлического трения.

Вариационная задача и уравнение типа Крокко. Интенсивность СКД и условие передачи теплоты. Пусть $\dot{Q} = \dot{Q}(\theta),\ u = u(\theta)$ – безразмерный тепловой поток и безразмерная скорость в сечениях СКД (потока как функции безразмерного температурного напора θ), $\theta := \dfrac{T - T_c}{T_h - T_c} \in [0,1]$.

Переменная θ удобна тем, что монотонно изменяется от горячей стенки щели к холодной поперек потока. Тогда безразмерный тепловой поток формируется предельной задачей типа Крокко:

$$\dot{Q}\frac{d^2\dot{Q}}{d\theta^2} + 3\sigma u(\theta) = 0,\ \dot{Q}(0) = \left(\frac{d\dot{Q}}{d\theta}\right)_{\theta=1} = 0.$$

Обозначим: $\dot{Q}(1) := \mathrm{N}, \mathrm{N} := \dfrac{\alpha\delta}{\kappa}$ – число Нуссельта по толщине пограничного слоя (примерно $3^{1/4}$). Тогда в действительном СКД:

1) выполняется неравенство: $\mathrm{N} \le \sqrt{3\sigma \int_0^1 u d\theta}$ – аналогия Рейнольдса, связывающая норму скорости и норму интенсивности теплообмена;

2) выполняется условие минимума положительного функционала:

$$\Im\left(\dot{Q}\right) = \int_0^1 \left(\frac{1}{2}\left(\frac{d\dot{Q}}{d\theta}\right)^2 + 3\sigma u \ln\frac{\mathrm{N}}{\dot{Q}} \right) d\theta \to \inf \ge 0 .$$

Из условия минимума следует, что поперек пограничного слоя подъемной силы величина теплового потока наименее отклоняется от N. Действительно, если $\dot{Q} = \mathrm{N}$ везде поперек СКД, то функционал достигает точной нижней грани (равной 0).

1. Аналитический обзор

Конструкция навесного фасада предусматривает проветривание воздушного зазора между горячей (защищаемой) стеной здания и холодной плоскостью покрытия в условиях свободного (термогравитационного) движения воздуха в зазоре. Определение скорости движения воздуха в обогреваемом вертикальном плоском зазоре – старая задача гидродинамики, восходящая к Омбеку, Лоренцу, Эккерту. Гидравлические расчеты таких движений представлены в меньшей степени [1–17].

В одной из последних работ [18] предпринята попытка гидравлической интерпретации модельных экспериментов Ю.С. Чумакова [19–22] по свободной конвекции воздуха в плоской вертикальной щели с управляемым обогревом горячей плоскости. В специальной серии экспериментов рассматривались изотермический обогрев зазора и обогрев при постоянной плотности теплового потока на горячей плоскости. Холодная плоскость имитировала адиабатную границу щели. Изменялась также величина толщины воздушного зазора (примерно вдвое). Область режимов движения воздуха – низкорейнольдсова, числа Gr=O(10^6-10^8). Область изменения температурного напора варьировалась на порядок (от 10 до 70–80 ºС). Определялись: поля осредненной скорости и температурного напора, моменты скорости и температурного напора второго порядка, градиенты осредненной скорости и температурного напора на горячей (обогреваемой) плоскости.

Основные результаты интерпретировались в предположении, что рейнольдсово число для движения в зазоре связано с масштабом свободной конвекции порядковой оценкой:

$$\mathrm{Re}_h = O(Gr_h),\ \mathrm{Re}_h := \frac{vh}{\nu},\ Gr_h = \frac{gh^3}{\nu^2}\frac{T_h - T_c}{T_f},$$

где $T_{h,c}$ – температура горячей плоскости и холодного воздуха; T_f – температура воздуха в зазоре.

Получены оценки порядка средней скорости v, коэффициента трения и средних по длине канала значений коррективов квадрата и куба скорости движения. Вместе с тем, как всякий модельный эксперимент, это исследование опускает существенные детали. Задачей настоящей работы является уточнение особо значимых нюансов.

1. *Оценка влияния протечек холодного воздуха через швы между плитами облицовки.* Наличие швов необходимо по условиям работы фасада. Подсос холодного воздуха опрокидывает восходящее движение воздуха тем интенсивнее, чем больше перепад давления на щели между холодным воздухом и потоком прогретого воздуха в щели. *Пьезометрическая же линия вертикального канала в работе* [18] *не определялась,* протечки локализовывались уплотнениями на штуцерах датчика скорости и температуры (термоанемометра) на горячей плоскости модели.

2. *Расчет переменности плотности воздуха по высоте*. В работе [18] определялась только средняя по высоте канала скорость v и она же считалась неизменной в каждой серии опытов. В условиях сильной баротропности (n < 1) прогрев воздуха приводит к заметному падению его плотности по ходу потока, так что будет правильнее обозначить постоянство массовой скорости ρv. Косвенно это замечание подтверждается падением моментов второго порядка по длине канала, что характерно именно для конфузорного (разгонного) движения. Действительно, поскольку $d\rho / dz < 0$, то $dv / dz > 0$, z – продольная (вертикальная) координата.

3. *Оценка влияния местных потерь напора, обусловленных конструкцией фасада.* В работе [18] *исключались все местные потери напора, кроме неизбежных потерь напора на выход.* Так, безударный вход в канал симулировался вертикальным выносом экрана на 10–15 калибров щели вверх и т. д.

В работе [23] предложено оценивать среднюю по высоте воздушной прослойки скорость по формуле:

$$v = \frac{\sqrt{(gL)^3}}{RT_c},$$

где v – средняя скорость;
R – индивидуальная газовая постоянная воздуха;
T_c – температура холодного воздуха;

Размер воздушной прослойки фасада, достаточный для проветривания (оптимальный зазор), предложено оценивать как $\frac{L}{h} = O\left(\frac{1}{\lambda^*}\right)$,

где $\lambda^* = \lambda + \frac{h}{L}\zeta$;
ζ – коэффициент местных потерь напора без учета потерь напора на выход;
L, h – соответственно продольный и поперечный размеры воздушной прослойки;
λ – коэффициент гидравлического трения.

2. Постановка задачи

2.1. В работе [24] получено выражение для средней скорости затекания воздуха в щель снизу вверх при свободноконвективном движении:

$$\beta_0 = \beta\pi^{\frac{2}{n}} = \varphi\pi^{\frac{2}{n}}\Lambda\sqrt{\frac{k-n}{kn\left(1-\varphi^2\pi^{\frac{2}{n}}\right)}}, \beta_0 = \frac{v_0}{\sqrt{RT_c}}.$$

Индексом 0 отмечены параметры в сечении z = 0. Как видно, интенсивность течения определяется показателем n, $\pi = p / p_0$, $\varphi < 1$ – коэффициент скорости. Точное определение n (показателя политропы) связано с расчетом интенсивности теплообмена, т. е. с решением уравнений гидродинамики неизотермических движений. В принципе такой подход возможен, но трудоемок и не позволяет получить обозримых результатов. Так, симуляция неизотермического течения требует предварительной настройки солвера. Такие расчеты были выполнены и показали, что:

- в широкой щели влияние адиабатной границы не влияет на развитие течения;
- пограничный слой подъемной силы не заполняет целиком сечения канала;
- движение такое же, как и в пограничном слое на вертикальной пластине в неограниченном пространстве;
- деформация профиля скорости существенна по длине (узкого или широкого) канала;
- профиль температурного напора мало деформируется
- располагая профилями скорости и напора, можно рассчитать коэффициенты трения и теплопередачи по длине канала и найти поля коэффициентов трения, передачи теплоты, коррективов квадрата и куба скорости и т. д.

2.2. В работе [24] показано, что изменением профиля скорости по длине вертикального потока пренебрегать нельзя. Изменение корректива куба скорости существенно. Высказано эвристическое предположение, что *в действительном восходящем потоке изменение скоростного напора по длине не больше, чем в любом виртуальном восходящем потоке.* Иначе: $d\left(\alpha v^2\right) \le \delta\left(\alpha v^2\right)$, где α – корректив куба скорости. Ввиду неравенства Коши $\alpha_0^2 \le \alpha$, где α_0 – корректив квадрата скорости, изменение импульса по длине потока минимально.

2.3. *Для гидравлических задач постановка предельных условий в любом симуляторе CFD избыточна* и ставится в сильной топологии (поточечной или равномерной сходимости), типичной для предельных задач физики. Разумно же ослаблять топологию задачи, решая вместо точных дифференциальных уравнений задачи на минимум некоторых функционалов, загрубляя тем самым предельные условия [25]. На этом пути удается просто оценить гидравлические элементы неизотермического движения. Опираясь на исследования предшественников [26–33] и данное исследование, удалось получить следующие результаты.

3. Конкретные результаты

3.1. *Эволюция восходящего потока*. Решается дифференциальное уравнение Бернулли для восходящего потока на корректив куба скорости α:

$$\frac{dp}{\rho} + d\left(\frac{\alpha w^2}{2\rho^2}\right) + ghd\bar{z} + \lambda^* \frac{w^2}{2\rho^2} d\bar{z} = 0, d\bar{z} := \frac{dz}{h}.$$

Тогда $\alpha = \alpha_0 + \left(\mathrm{E} + Fr - \lambda^* \dfrac{gh}{RT_c}\dfrac{L}{h}\right)Z$, где $Z = \dfrac{gz}{RT_0}, \mathrm{E} = \dfrac{2p_0\rho_0}{w^2}, Fr = \dfrac{2\rho_0^2 gh}{w^2}$ – числа Эйлера и Фруда; индексом 0 отмечены значения в сечении z = 0. Попутно получается, что при $Z \le \Lambda = gL/(RT_c) << 1$ распределение корректива куба скорости не зависит от n. Это следует из формулы бинома Ньютона.

Значит, если $\mathrm{E} + Fr - \lambda^* \dfrac{gh}{RT_c}\dfrac{L}{h} < 0$, то корректив куба скорости убывает вдоль потока, иначе – не убывает вдоль потока. В действительных движениях экспериментально фиксируются обе ситуации: неоднородность профиля скорости может расти и уменьшаться по длине восходящего потока. CFD симуляторы не позволяют выяснить причин эффекта стабилизации в явном виде. Вот возможное объяснение.

Для создания равномерного потока необходимо, чтобы отклонение корректива куба скорости от 1 было бы минимально. Например, по среднеквадратичной норме:

$$\int_0^{\Lambda} (\alpha - 1)^2 dZ \to \inf \ge 0.$$

Это условие равносильно такому: $\lambda^* \dfrac{L}{h} - \Lambda(\mathrm{E} + Fr) = \dfrac{3}{2}(\alpha_0 - 1)$. Стало быть, справедлива оценка для канала, обеспечивающего равномерный в среднем по длине поток: $\dfrac{L}{h} = \dfrac{3(\alpha_0 - 1)}{2\lambda^*} + \dfrac{\Lambda}{\lambda^*}(\mathrm{E} + Fr)$. Такую вентилируемую щель естественно назвать *гидравлически оптимальной*.

Пусть высота фасада L фиксирована. Значит, чем больше массовый расход сквозь вентилируемый зазор, тем меньше обратный калибр и тем больше ширина канала h; чем больше коэффициент потерь λ^*, тем более широкая щель необходима для пропуска потока и т. д. Как видно, это определение гидравлически оптимальной щели согласуется с определением, данным в работе [18] для частного случая модельной щели.

3.2. *Предельная задача Крокко*. В работе [26] приведены решения уравнений движения и энергии для свободной конвекции в виде рядов функций от безразмерной поперечной координаты ζ.

Оказывается, что в качестве поперечной координаты удобнее рассматривать безразмерный температурный напор $\theta \in [0,1]$, монотонно убывающий поперек слоя подъемной силы от 1 до 0. Пусть $Q = -\frac{d\theta}{d\zeta} = Q(\theta)$, $u = f'(\zeta) = u(\theta)$, f – безразмерная функция тока. Тогда $u = u(\theta)$ – безразмерная скорость в слое подъемной силы. Очевидно, что на внешней границе пограничного слоя подъемной силы $\theta = 0$, $Q(0) = 0$. Уравнение энергии принимает вид:

$$\frac{dQ}{d\theta} - 3\sigma\int_{\theta}^{1}\frac{udt}{Q(t)} = 0.$$

Число Прандтля σ для воздуха близко к 1; кроме того, сразу же получается:

$$\left(\frac{dQ}{d\theta}\right)_{\theta=1} = 0.$$

Дифференцированием по θ дифференциальное уравнение энергии приводится к уравнению типа Крокко [27]:

$$Q\frac{d^2Q}{d\theta^2} + 3\sigma u = 0.$$

Предельные условия:

$$Q(0) = \left(\frac{dQ}{d\theta}\right)_{\theta=1} = 0.$$

Пусть $u = u_0 = \text{const}$ – распределение скорости поперек потока стилизовано «ступенькой» (см. рис. 3). Решение предельной задачи Крокко есть:

$$\sqrt{6\sigma u_0}\,\theta = \mathrm{N}\sqrt{\pi}\,erfc\left(\sqrt{\ln\frac{\mathrm{N}}{Q}}\right), \mathrm{N} := Q(0),$$

причем $\mathrm{N} = k\delta/\kappa$ – число Нуссельта, построенное по толщине пограничного слоя, где k – коэффициент теплопередачи от стенки к воздуху; κ – коэффициент теплопроводности воздуха; erfc(z) – дополнительный интеграл вероятности. Считается, что конвекция «morte» по Верно.

Пусть $\theta = 1$, тогда $Q = \mathrm{N}$ и $\mathrm{N} = \sqrt{\frac{6\sigma u_0}{\pi}}$.

С другой стороны, значение N известно, см. [27]. Тогда для средней безразмерной скорости в пограничном слое получается:

$$u_0 = \frac{\pi \mathrm{N}^2}{6\sigma}.$$

Простые подсчеты показывают, что тогда

$$\sqrt{\frac{1}{n} - \frac{1}{k}} = 1{,}24\sqrt{\lambda^*}\left(\frac{L}{h}\right)^{\frac{5}{4}}\sqrt{\frac{\mathrm{B}}{\Re}}, B := \frac{RT_c}{gL}, \ \Re := \frac{\sqrt{gh}L}{\nu}.$$

Примеры.

1. Дано: $\lambda^* = 0{,}04$; h = 0,2 м, L = 50 м; R = 287 м^2/(с^{2}К), $T_c = 270$ К. Тогда: В = 155; R = $7\cdot 10^6$, $n^{-1} = 0{,}204$, n = 0,495.

2. Те же условия, но $\lambda^* = 0{,}02$. Тогда $n^{-1} = 1{,}38$, n = 0,72. Уменьшение λ^* (интегральных потерь в щели) приводит к тому, что для перемещения воздуха требуется меньшая интенсивность передачи теплоты.

3. Пусть h = 0,3 м, $\lambda^* = 0{,}04$, остальные значения те же. Тогда n = 0,92. Увеличение ширины канала увеличивает его пропускную способность: требуется меньшая, чем в примере 1, интенсивность теплообмена.

4. Условия примера 3, $\lambda^* = 0{,}02$; тогда n = 1,12.

5. Условия примера 3, L = 100 м. Тогда В = 78, R = $1{,}73\cdot 10^7$, n = 0,51. По сравнению с примером 3 требуется большая интенсивность теплопередачи для перемещения воздуха в канале большей длины;

6. Условия примера 5, $\lambda^* = 0{,}02$. Тогда n = 0,75 и перемещение воздуха при уменьшении потерь требует меньшей интенсивности теплопередачи.

3.3. *Вариационное условие для уравнения Крокко* [28]. Прежде всего, из уравнения Крокко и предельных условий интегрированием по θ от 0 до 1 получается интегральное тождество:

$$\int_0^1 \left(\frac{dQ}{d\theta}\right)^2 d\theta = 3\sigma \int_0^1 u d\theta .$$

В левой части применяется неравенство Коши:

$$\left(\int_0^1 \frac{dQ}{d\theta} d\theta\right)^2 = Q^2(0) = \mathrm{N}^2 \le 3\sigma \int_0^1 u d\theta ,$$

что немедленно приводит к «аналогии Рейнольдса» между теплопередачей и переносом импульса в восходящем потоке:

$$\mathrm{N} \approx \sqrt{3\sigma \|u\|} .$$

Здесь под нормой скорости понимается среднее арифметическое по температурному напору значение скорости. Оценка теплопередачи может производиться в слабой топологии.

Далее, предельная задача для уравнения Крокко – это необходимое условие минимума для положительного функционала:

$$\varphi(Q) = \int_0^1 \left(\frac{1}{2}\left(\frac{dQ}{d\theta}\right)^2 + 3\sigma u(\theta) \ln \frac{\mathrm{N}}{Q}\right) d\theta .$$

В действительном неизотермическом движении $0 = d\varphi \le \delta\varphi$. Кроме того, ясно, что для решения вариационной задачи необходимо, чтобы $Q \in W_2^{(1)}[0,1]$, а для решения предельной задачи необходимо, чтобы $Q \in C^{(2)}[0,1]$. Но $C^{(m)}(0,1) \subset W_2^{(m)}(0,1)$, т.е. решение вариационной задачи слабее решения точной предельной задачи.

Пусть $Q = \mathrm{N} = \mathrm{const}$. Тогда $\varphi(\mathrm{N}) = 0$ и функционал $\varphi(Q)$ достигает точной нижней грани, равной 0. Значит, в действительном движении тепловой поток, передаваемый поперек слоя щели от горячей стенки воздуху, наименее отличается от теплового потока на стенке, т. е. передача теплоты осуществляется предельно экономно, с минимальным рассеиванием тепловой мощности, вводимой в поток от горячей грани канала.

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Определено, что в действительном термогравитационном движении воздуха в вентилируемой вертикальной щели выполняется эвристическое условие минимума теплового потока.

Показано, что в действительном термогравитационном движении передаваемый воздуху от горячей стенки поток теплоты минимален. На это указывает то, что уравнение Крокко для переноса теплоты совпадает с необходимым условием минимума для положительного функционала $\varphi(Q)$.

Показано, что преимущество прямого подхода состоит в том, что можно минимизировать функционал $\varphi(Q)$, не решая дифференциального уравнения на тепловой поток. Из аналогичных соображений устанавливается форма профиля скорости по всей длине канала, минимизирующая потери напора в термогравитационном движении.

Литература

1. Страхович К.И. Гидрогазодинамика. Л.: Изд-во ЛПИ, 1964, 132 с.
2. Страхович К.И., Гидрогазодинамика, избранные труды. Л.–М.: Наука, 1980. С. 234.
3. Прандтль Л., Гидроаэромеханика. М.: ИИЛ, 1951. 516 с.
4. Колешко С.Б., Чумаков Ю.С. Турбулентный свободноконвективный теплообмен на вертикальной поверхности со ступенчатым нагревом при инверсии теплового потока // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. №3. С. 419–423.
5. Volodina Yu.M., Chumakov Yu.S.Structure of a free-convective flow near a vertical surface with stepwise heating // Heat Transfer Research. 2008. Т. 39. №6. С. 469–478.
6. Колешко С.Б., Чумаков Ю.С. Моделирование турбулентного теплообмена применительно к пристенному свободноконвективному течению // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. №3. С. 392–399.
7. Колешко С.Б., Лапин Ю.В., Чумаков Ю.С. Тубулентный пограничный свободноконвективный слой на вертикальной нагретой пластине. Закономерности температурного слоя. // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. №3. С. 431–441.
8. Kuzmitskiy O.A., Nikolskaya S.B., Chumakov Yu.S. Spectral and correlation characteristics of velocity and temperature fluctuations in a free-convection boundary layer // Heat Transfer Research. 2002. Vol. 33. No. 3–4. Pp. 144–147.
9. Fedotov A.V., Chumakov Y.S Multi-equation turbulence model for a free convection boundary layer // Heat Transfer Research. 2002. Vol. 33. No. 1–2. С. 22–27.
10. Kishinami K., Saito H. Natural Convective Heat Transfer on a Vertical Plate with Discontinuous Surface Temperature. Effect of Heat Conduction in the Plate // Bulletin of JSME. 1986. Vol. 29. No.253. P. 2145.
11. Rosca A.V., Pop I. Flow and heat transfer over a vertical permeable stretching/shrinking sheet with a second order slip Original Research Article // International Journal of Heat and Mass Transfer 2013. Vol. 60. Pp. 355–364.
12. Greene G.A. Heat Transfer // Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), 2003. Pp. 279–292.
13. Гершуни Г.С., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемых жидкостей. // М., Наука, 1972, 392 с.;
14. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Теплообмен смешанной конвекцией. Минск: Наука и техника, 1975. 266 с.
15. Соковишин Ю.А., Мартыненко О.Г. Введение в теорию свободно-конвективного теплообмена. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981, 232 с.
16. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Теория струй вязкой жидкости. Минск: Наука и техника, 1984. 216 с.

17. Петриченко М.Р., Петроченко М.В. Гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 51–56.

18. Петроченко М.В. Основы гидравлического расчета свободноконвективных течений в ограждающих строительных конструкциях: автореф. дисс …к.т.н.. Санкт-Петербург, 2011. 20 с.

19. Chumakov Yu.S. Experimental study of the transition and developed turbulent flow regimes in free convection boundary layer near a vertical heated surface // Heat Transfer Research. 2001. Vol. 32. No. 7–8. Pp. 424–428.

20. Чумаков Ю.С. Экспериментальное исследование переходного и турбулентного свободноконвектиновго пограничного сло на вертикальной нагретой поверхности: автореф. дисс. д.физ.-мат.н. Санкт-Петербург, 2000. 32 с.

21. Nikolskaya S.B., Chumakov Yu.S. Experimental investigation of pulsation motion in a free-convection boundary layer // High Temperature. 2000. Vol. 38. No. 2. Pp. 231–237.

22. Chumakov Yu.S. Temperature and velocity distribution in a free-convection boundary layer on a vertical isothermal surface // High Temperature. 1999. Vol. 37. No. 5. Pp. 714–719.

23. Немова Д.В., Петриченко М.Р. Гидравлически оптимальные конструкции навесных вентилируемых фасадов (НВФ) // Шестая Международная научная конференция «Архитектура, строительство – современность», сборник: в 2 ч. Ч. 2.. Варна: ВСУ «Черноризец Храбър», 2013. С. 20–25.

24. Немова Д.В. Интегральные характеристики термогравитационной конвекции в воздушной прослойке навесных вентилируемых фасадов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №2(37). С. 25–34.

25. Петриченко М.Р. Гидравлика неизотермических потоков в системах охлаждения тепловых двигателей: автореф. дисс..... д.т.н. Л.: ЛГТУ, 1990. 32 с.

26. Петриченко М.Р. Расщепляющие разложения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. Т. 2(146). С. 143–149.

27. Петриченко М.Р., Серов Д.В. Типичные предельные задачи для уравнения Крокко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. Т. 1(141). С. 108–112.

28. Горшков А.С., Гладких А.А. Мероприятия по повышению энергоэффективности в строительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2010. №3. С. 246–250.

29. Горшков А.С., Гладких А.А. Влияние растворных швов кладки на параметры теплотехнической однородности стен из газобетона // Инженерно-строительный журнал. 2010. №3. С. 39.

30. Горшков А.С., Попов Д.Ю., Глумов А.В. Конструктивное исполнение вентилируемого фасада повышенной надежности // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С. 5–8.

31. Ватин Н.И., Горшков А.С., Глумов А.В. Влияние физико-технических и геометрических характеристик штукатурных покрытий на влажностной режим однородных стен из газобетонных блоков // Инженерно-строительный журнал. 2011. №1. С. 28–33.

32. Петриченко М.Р., Харьков Н.С. Экспериментальное исследование насосного действия винтового потока // Журнал технической физики. 2009. Т. 79. №7. С. 137–139.

33. Bukhartsev V.N., Petrichenko M.R. Approximation of the depression curve of the inflow to an ideal trench // Power Technology and Engineering. 2011. Vol. 44. No. 5. Pp. 374–377.

Дарья Викторовна Немова, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)890-02-67; эл. почта: darya.nemova@gmail.com

Варвара Алексеевна Емельянова, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(904)550-36-96; эл. почта: shein91@mail.ru

Динара Робертовна Мифтахова, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(981)888-37-18; эл. почта: d_i_n_a_r_k_a@mail.ru

Теплотехнические свойства различных конструктивных систем навесных вентилируемых фасадов

Аспирант О.А. Туснина,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»;
аспирант А.А. Емельянов,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»;
к.т.н., профессор В.М. Туснина,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»

Аннотация. Сегодня навесные вентилируемые фасады широко применяются для утепления и облицовки наружных стен зданий различного функционального назначения. В статье приводятся результаты исследования теплотехнических свойств навесных вентилируемых фасадных систем.

Рассматриваются две конструктивные системы – традиционная, получившая распространение на практике и новая, предложенная авторами, система, в которой вертикальные направляющие заменены перфолентами из антикоррозионной стали, а крепление керамогранитных плит осуществляется в узловых точках с помощью кляммеров. Был выполнен численный теплотехнический расчет обеих систем в вычислительном комплексе TEPL, реализующем решение задачи трехмерной стационарной теплопроводности.

По результатам расчета сравнивались величины приведенных сопротивлений теплопередаче и коэффициенты теплотехнической однородности рассматриваемых конструкций. Определено, что разработанная система обладает лучшими теплотехническими свойствами (повышенным сопротивлением теплопередаче) в сравнении с традиционной.

Ключевые слова: приведенное сопротивление теплопередаче; навесная фасадная система; теплотехнический расчет; теплопроводные включения

В настоящее время навесные фасадные системы с вентилируемым воздушным зазором достаточно широко применяются для утепления и облицовки наружных стен зданий различного функционального назначения. Несмотря на их повсеместное использование как в новом строительстве, так и при санации реконструируемых зданий, остаются неизученные вопросы их применения, особенно в отношении теплотехнических свойств этих конструкций. Главными особенностями системы вентилируемого фасада с этой точки зрения являются неоднородность конструкции и наличие вентилируемого зазора. Увеличение коэффициента теплотехнической однородности вентилируемых фасадов является на сегодняшний день одной из важных задач, решение которой позволит не только уменьшить теплопотери через наружные стены, но и повысить энергоэффективность и долговечность зданий в целом.

Обзор литературы

Изучению теплофизических свойств неоднородных ограждающих конструкций зданий были посвящены работы В.Г. Гагарина, В.В. Козлова, В.Д. Мачинского, К.Ф. Фокина, В.Н. Богословского, Ю.А. Табунщикова, Н.Н. Щербака, В.И. Лукьянова, Н.П. Умняковой, В.А. Езерского и др. [1–19]. В них рассматриваются вопросы теплопроводности наружных ограждающих конструкций, в том числе вентилируемых навесных фасадов как сложных, неоднородных ограждений.

В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, Е.Ю. Цыкановский [4] разработали методику расчета коэффициента теплотехнической однородности фасада с учетом влияния конструктивных элементов навесных фасадных систем. Авторами подчеркивается невозможность учета всех факторов, влияющих на снижение коэффициента, что вызывает необходимость создавать ряд упрощений при замене реальной конструкции ее моделью. Приводятся результаты расчетов коэффициента теплотехнической однородности различных систем, показывающие, что количество кронштейнов и их площадь поперечного сечения значительно влияют на значение коэффициента теплотехнической однородности ограждения. Так, при увеличении количества кронштейнов от 1 до 4 этот коэффициент снижается с 0,93 до 0,76 для стальных и с 0,83 до 0,56 для алюминиевых кронштейнов.

В.А. Езерский, П.В. Монастырев, С.В. Федоров [10] решают задачу определения сопротивления теплопередаче стены с неоднородными участками численными методами. Авторы видят решение проблемы в наличии соответствующих программ, а также навыков работы у проектировщиков со сложными программными продуктами. Подчеркивается недостаточная изученность влияния крепежных элементов на коэффициент теплотехнической однородности наружных стен. Приводится анализ зависимости коэффициента теплотехнической однородности от различных факторов, в том числе от свойств материалов и геометрических параметров крепежных элементов. Авторами производятся расчеты сопротивления теплопередаче стены с учетом и без учета теплопроводных включений. Для упрощения определения коэффициента теплотехнической однородности на основании результатов расчетов разработана справочная таблица [11].

Анализ применяемых в европейских странах методик для учета теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций [12–17] подтверждает, что в большинстве стран Северной и Центральной Европы учет теплотехнических неоднородностей производится, но проверка правильности таких расчетов на практике не осуществляется.

В работе [18] представлены результаты теплотехнических расчетов однослойных и многослойных конструкций. Показаны температурные поля в конструкции, на основании которых определены зоны излишних теплопотерь – теплопроводные включения в виде шпонок, жесткие ребра – для многослойных ограждающих конструкций.

В статье [19] описывается применяемая в Австралии методика определения теплотехнических характеристик вентилируемых фасадных систем вручную и с помощью компьютерного моделирования.

В работах [20–24] приведены результаты исследования теплозащитных свойств вентилируемых фасадных систем. Произведена оценка факторов, влияющих на энергоэффективность фасадов.

На основании вышесказанного можно заключить, что важным фактором, влияющим на теплотехнические свойства навесных фасадов, является наличие теплопроводных включений в виде элементов крепления, которыми являются кронштейны и анкеры, значительно снижающие коэффициент теплотехнической однородности конструкции. В связи с этим целью данной работы было исследование теплотехнических свойств разработанной авторами конструкции фасадной системы в сравнении с традиционной.

Постановка задачи

В настоящей статье приведен анализ сравнения теплотехнических свойств двух конструктивных систем навесных вентилируемых фасадов с облицовкой керамогранитными плитами: традиционной, широко применяемой в настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом (рис. 1), далее называемой «система 1», и разработанной авторами, где крепление керамогранитных плит осуществляется с помощью анкеров и резьбовых шпилек (рис. 2), называемой «система 2».

Традиционная система в своем конструктивном решении представляет подконструкцию, состоящую из кронштейнов, вертикальных направляющих, вентилируемого воздушного зазора 50 мм и облицовки из керамогранита. Несущие кронштейны крепятся на 1 анкерном дюбеле (100 мм) к наружной стене с шагом 900 мм по вертикали и с шагом облицовки по горизонтали 600 мм. Такой шаг кронштейнов является наиболее распространенным в системах с облицовкой керамогранитом. Все элементы системы выполняются из стали. Несущий кронштейн имеет П-образную форму. Его высота составляет 70 мм, ширина 40 мм, толщина металла 2 мм. Вертикальные направляющие крепятся к кронштейнам заклепками. Керамогранит крепится к вертикальным направляющим на кляммерах.

Основное назначение разработанной системы – ее применение в зданиях с несущим железобетонным каркасом (колонны, пилоны, плиты перекрытий) и заполнением ограждающих стеновых конструкций легкобетонными блоками. Система предусматривает 2 вида кронштейнов: ветровые (в виде анкерных резьбовых шпилек), которые устанавливаются в узловых точках с шагом облицовки 600 х 600 мм и несущие, устанавливаемые в межэтажное перекрытие с шагом 600 мм. Несущий кронштейн представляет собой консоль, имеющую увеличение высоты поперечного сечения к заделке от 25 мм до 150 мм. Высота несущего кронштейна составляет 150 мм, ширина двух боковых опорных пластин кронштейна 50 мм, ширина верхней пластины кронштейна 50 мм. Крепление осуществляется на 2 анкерных дюбеля. В описанной системе, в отличие от всех существующих, отсутствуют вертикальные направляющие, а их роль выполняет перфолента, которая натягивается вертикально между кронштейнами. Перфолента работает на растяжение и перераспределяет вертикальную нагрузку от веса облицовки с ветровых кронштейнов на несущие. Крепление облицовки к кронштейнам осуществляется кляммерами. Кляммеры крепятся к несущим кронштейнам через уголки и пластину, а к ветровым кронштейнам – через обратную часть резьбовой шпильки (пластину с приваренной в центре гайкой). Система в своем конструктивном решении также предусматривает вентилируемый воздушный зазор 50 мм.

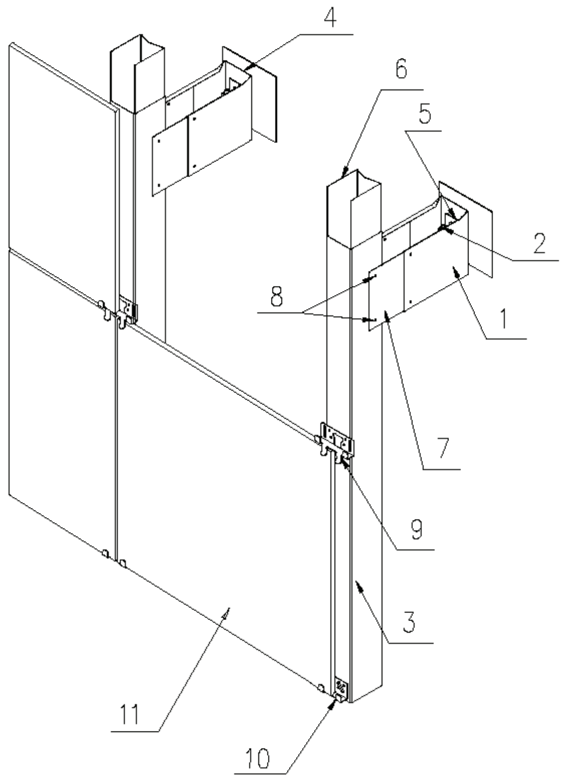


Рисунок 1. Конструкция навесного вентилируемого фасада («система 1»): 1 – кронштейн; 2 – анкерный дюбель; 3 – направляющая; 4 – паранитовая прокладка; 5 – шайба; 6 – скоба; 7 – вставка; 8 – заклепка; 9 – кляммер рядовой; 10 – кляммер концевой; 11 – плита керамогранита

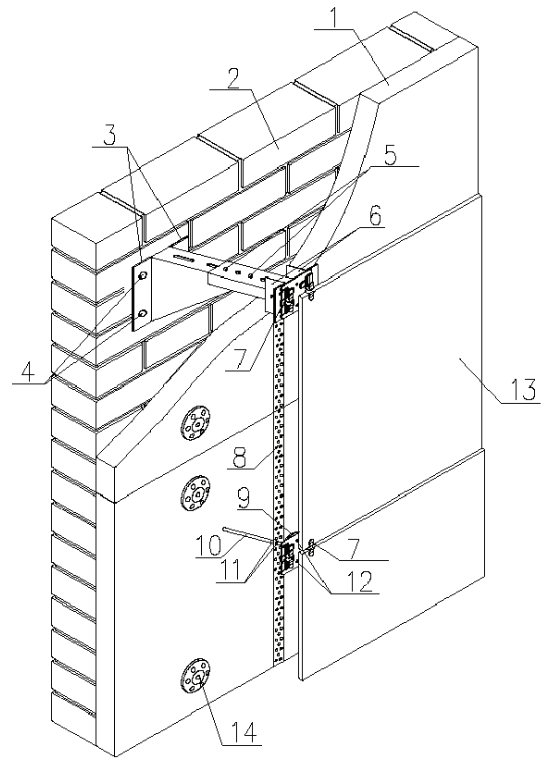


Рисунок 2. Конструкция навесного вентилируемого фасада («система 2»): 1 – утеплитель; 2 – стена; 3 – паранитовая прокладка; 4 – анкерный дюбель; 5 – болт М8 с двумя шайбами и самоконтрящейся гайкой; 6 – уголок крепления пластины; 7 – пластина крепления кляммера; 8 – перфолента; 9 – обратная часть резьбовой шпильки; 10 – анкерная резьбовая шпилька М8; 11 – шайба с самоконтрящейся гайкой; 12 – заклепка; 13 – плита керамогранита; 14 – тарельчатый дюбель

Описание исследования

Был выполнен теплотехнический расчет двух описанных выше систем вентилируемых фасадов численным методом в вычислительном комплексе TEPL [25]. Данный программный комплекс реализует численное решение дифференциального уравнения трехмерной стационарной теплопроводности. Решение задачи таким способом позволяет учесть все геометрические особенности конструкции и имеющиеся теплотехнические неоднородности. При расчете моделировалась регулярно повторяющаяся часть фасада – по высоте – между двумя соседними перекрытиями, по ширине – один ряд кронштейнов. С целью учета теплопотерь, происходящих через угловые зоны сопряжения стены с перекрытием, при расчете в вычислительном комплексе также моделировались части перекрытий (рис. 1, 2). Традиционная система («система 1») представлена на рисунке 3. Разработанная система («система 2») представлена на рисунке 4.

Материалы элементов конструкции задавались со следующими характеристиками: перекрытие – железобетонная плита (λ = 2.04 Вт/м^2·°С), наружная стена кирпичная (λ = 0.81 Вт/м^2·°С), утеплитель – минеральная вата (λ = 0.07 Вт/м^2·°С), кронштейны и шпильки из стали (λ = 58 Вт/м^2·°С), облицовка из керамогранитной плитки (λ = 3.49 Вт/м^2·°С). Воздушная прослойка толщиной 50 мм задавалась с коэффициентом теплопроводности (λ = 0.294 Вт/м^2·°С). В обеих задачах принято, что температура наружного воздуха равна −30 °С, внутреннего воздуха +18 °С. Коэффициент теплоотдачи на поверхностях, граничащих с наружным воздухом, равен 8.7 Вт/м^2·°С, на поверхностях, граничащих с внутренним воздухом, – 23 Вт/м^2·°С.

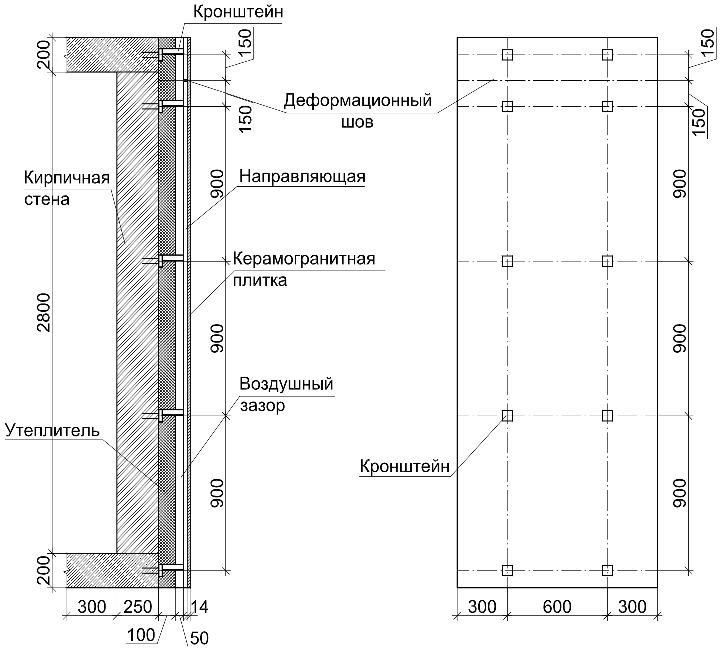


Рисунок 3. Традиционная система навесного вентилируемого фасада («система 1»)

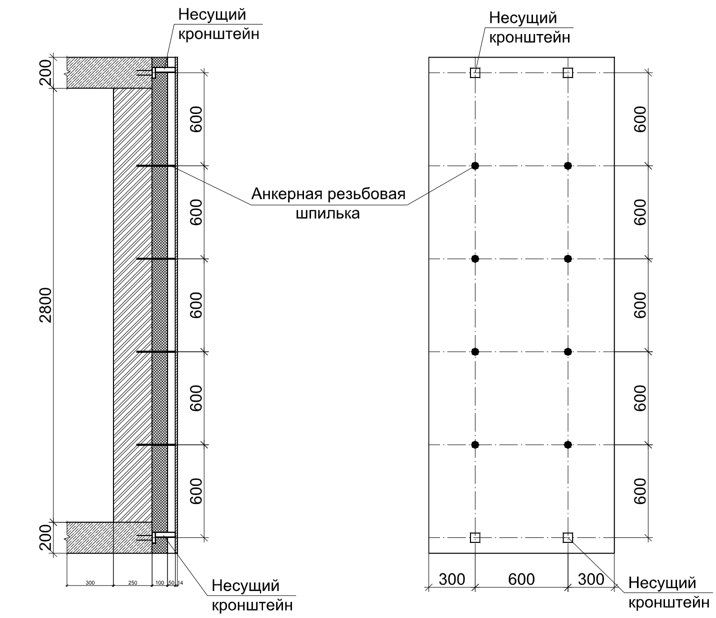


Рисунок 4. Разработанная система навесного вентилируемого фасада («система 2»)

Кроме того, с целью определения коэффициента теплотехнической однородности исследуемых систем был произведен расчет приведенного сопротивления теплопередаче аналогичной однородной конструкции без кронштейнов и прочих крепежных элементов системы, вносящих неоднородность в утепляющий слой.

Для получения достоверных результатов расчет трехмерного температурного поля данных конструкций выполнялся при различной точности (0,1–0,00001 град). На основании полученных результатов расчета температурного поля определялись величины приведенного сопротивления теплопередаче конструкций. Результаты расчета представлены в табличном (табл. 1) и графическом (рис. 5) видах.

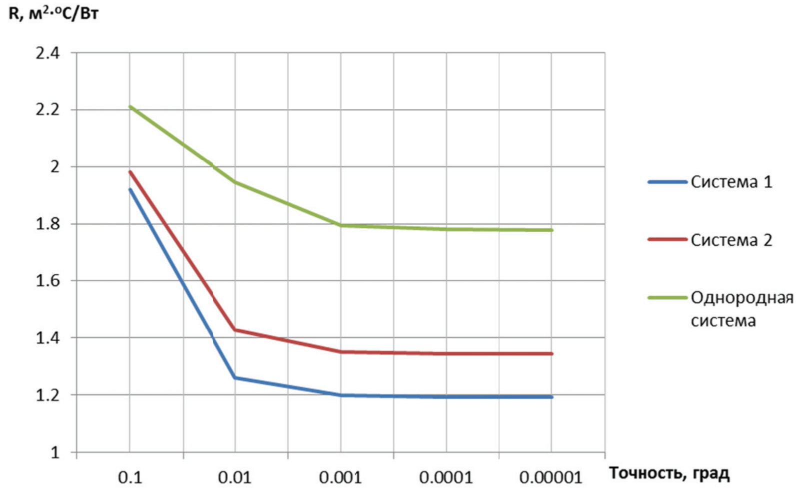


Рисунок 5. Графики зависимости приведенного сопротивления теплопередаче от заданной точности расчета температурного поля

Как видно из графиков, с повышением точности расчета результаты для всех трех систем сходятся к определенному пределу. Увеличение точности расчета более 0,001 град практически не влияет на изменение сопротивления теплопередаче. Из этого можно сделать вывод, что достаточно достоверный результат можно получить при точности расчета 0,001 град. В таблице 1 строка, соответствующая выбранной оптимальной точности расчета, выделена жирным шрифтом.

Таблица 1. Сравнение теплотехнических характеристик исследуемых систем

Точность расчета, град	Приведенное сопротивление теплопередаче *R*, м^2·°С/Вт			Разница, %	Коэффициент однородности *r*	
	Система 1	Система 2	Однородная система	Система 2-система 1	Система 1	Система 2
0,1	1,9186	1,9797	2,2122	3,1%	0,867	0,895
0,01	1,2602	1,4287	1,9462	11,8%	0,648	0,734
0,001	**1,1989**	**1,3518**	**1,7951**	**11,3%**	**0,668**	**0,753**
0,0001	1,1939	1,3449	1,7803	11,2%	0,671	0,755
0,00001	1,1934	1,3442	1,7791	11,2%	0,671	0,756

На основании данных таблицы 1 видно, что новое конструктивное решение навесной фасадной системы (система 2) обладает более высокими теплозащитными свойствам, чем распространенная в настоящее время система 1. Приведенное сопротивление теплопередаче новой системы (система 2) составляет 1,352 м^2·°С/Вт, что превосходит сопротивление существующей системы (система 1), равное 1,199 м^2·°С/Вт, на 11,3%.

Для дальнейшей оценки теплотехнических свойств конструкций был определен коэффициент теплотехнической однородности обеих систем. Коэффициент теплотехнической однородности *r* – вспомогательная величина, характеризующая эффективность утепления конструкции, определяется по формуле [26]:

$$r = \frac{R_o^{пр}}{R_o^{усл}}, \quad (1)$$

где $R_o^{пр}$ – приведенное сопротивление теплопередаче конструкции, м^2·°С/Вт; $R_o^{усл}$ – условное сопротивление теплопередаче однородной конструкции, м^2·°С/Вт.

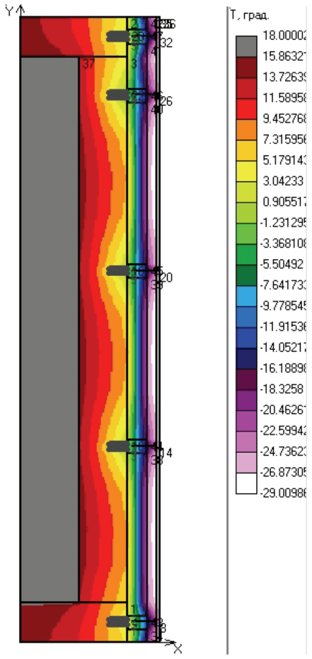
В данном случае коэффициент теплотехнической однородности определялся как отношение приведенных сопротивлений теплопередаче рассматриваемой системы и однородной системы, полученных в результате численного расчета.

Коэффициент теплотехнической однородности новой системы (0,753) выше, чем у существующих аналогов (0,668), что подтверждает более высокую энергоэффективность разработанной системы навесного вентилируемого фасада.

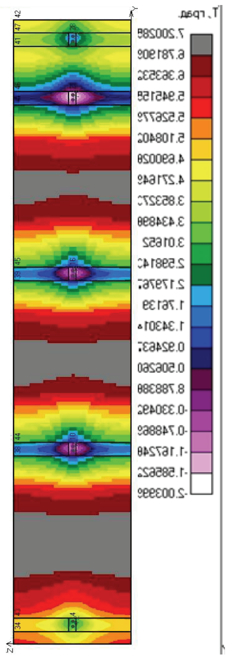
Ниже представлены изополя температур в конструкциях. На рисунке 6 показана традиционная система (система 1), на рисунке 3 – разработанная система (система 2).

Очевидно, что в системе 1 влияние кронштейнов значительнее, чем совместное влияние несущих кронштейнов и шпилек в системе 2. Это наиболее заметно на рисунках 6б и 7б, где области пониженных температур на поверхности стены вокруг шпилек (рис. 7б) намного меньше, чем вокруг кронштейнов (рис. 6б).

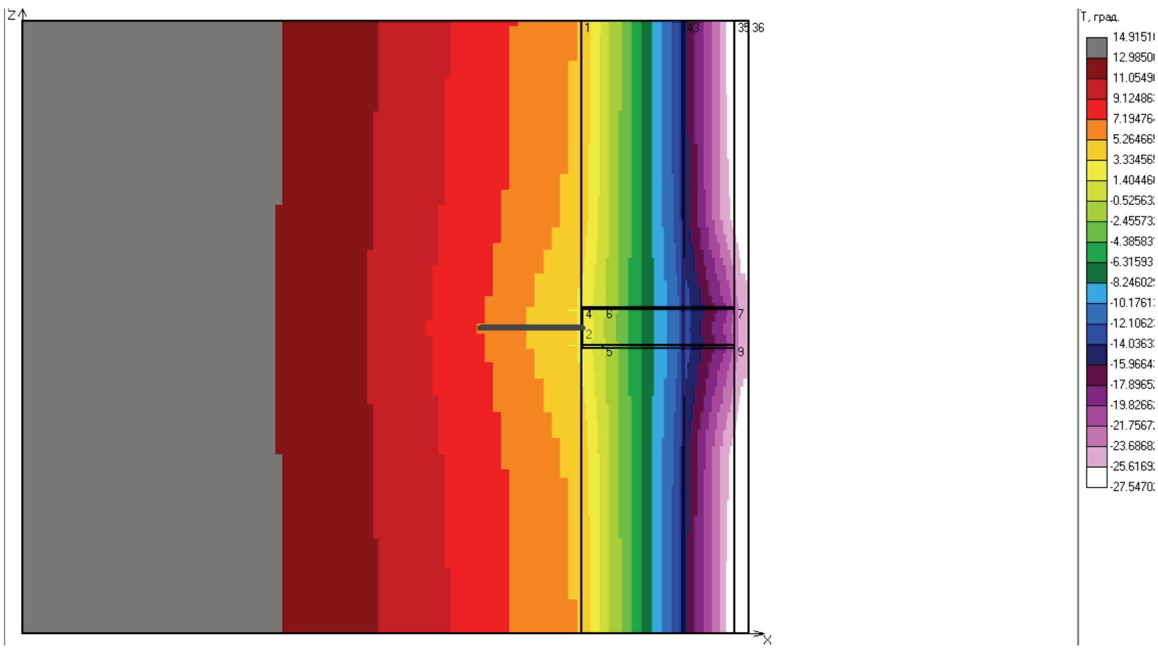
а)



б)



в)



г)

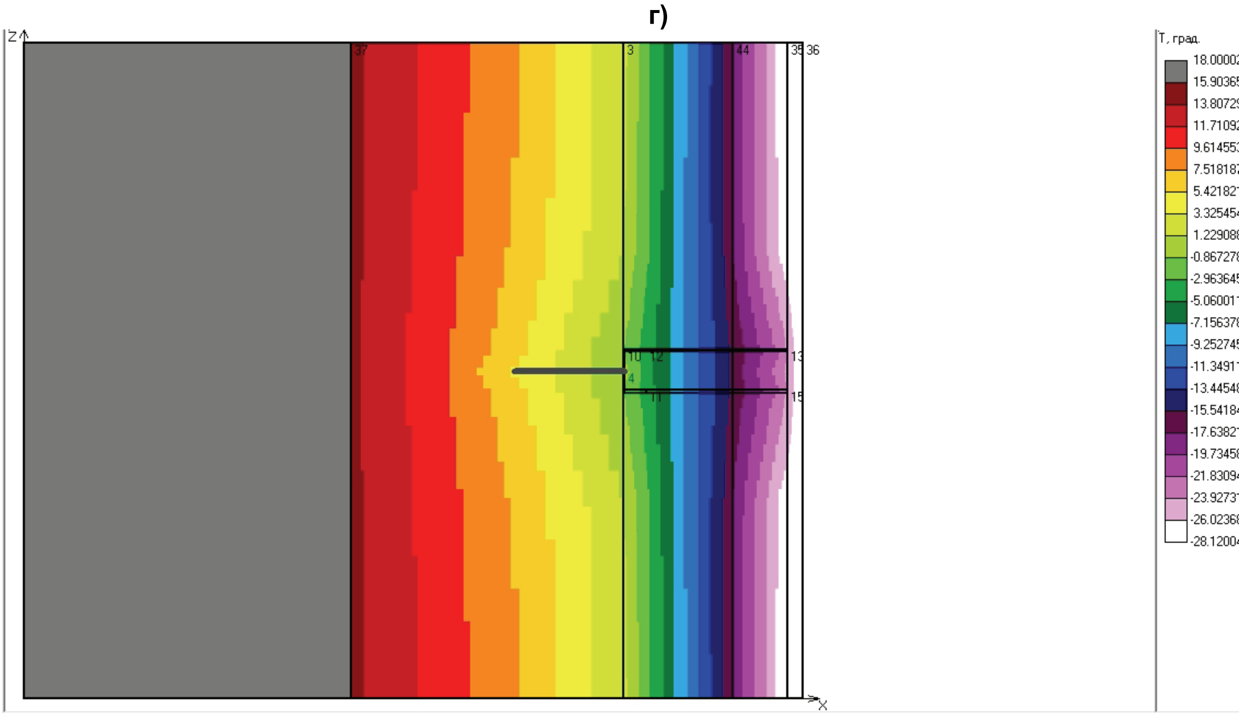
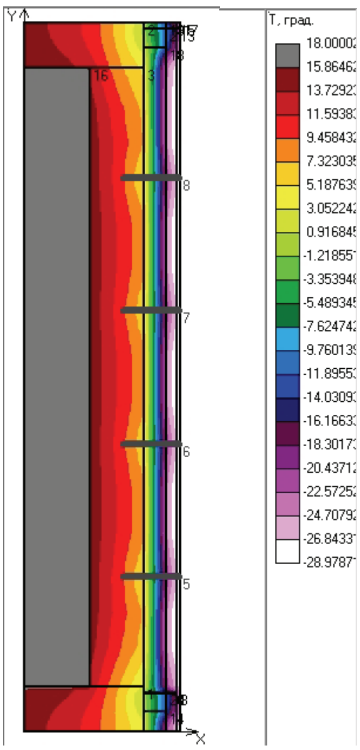
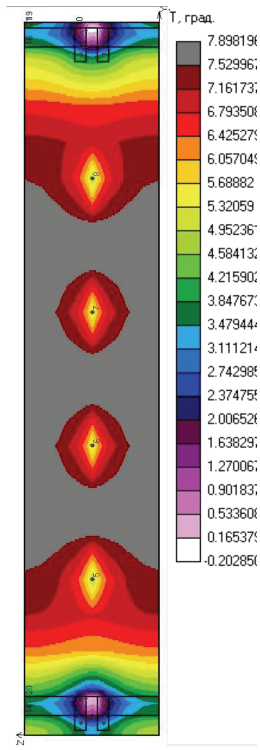


Рисунок 6. Изополя температур в существующей системе (система 1):
а) по вертикальному сечению стены; б) по плоскости стены; в) по горизонтальному сечению стены, проходящему через кронштейн, установленный в перекрытии;
г) то же через кронштейн, установленный в стене

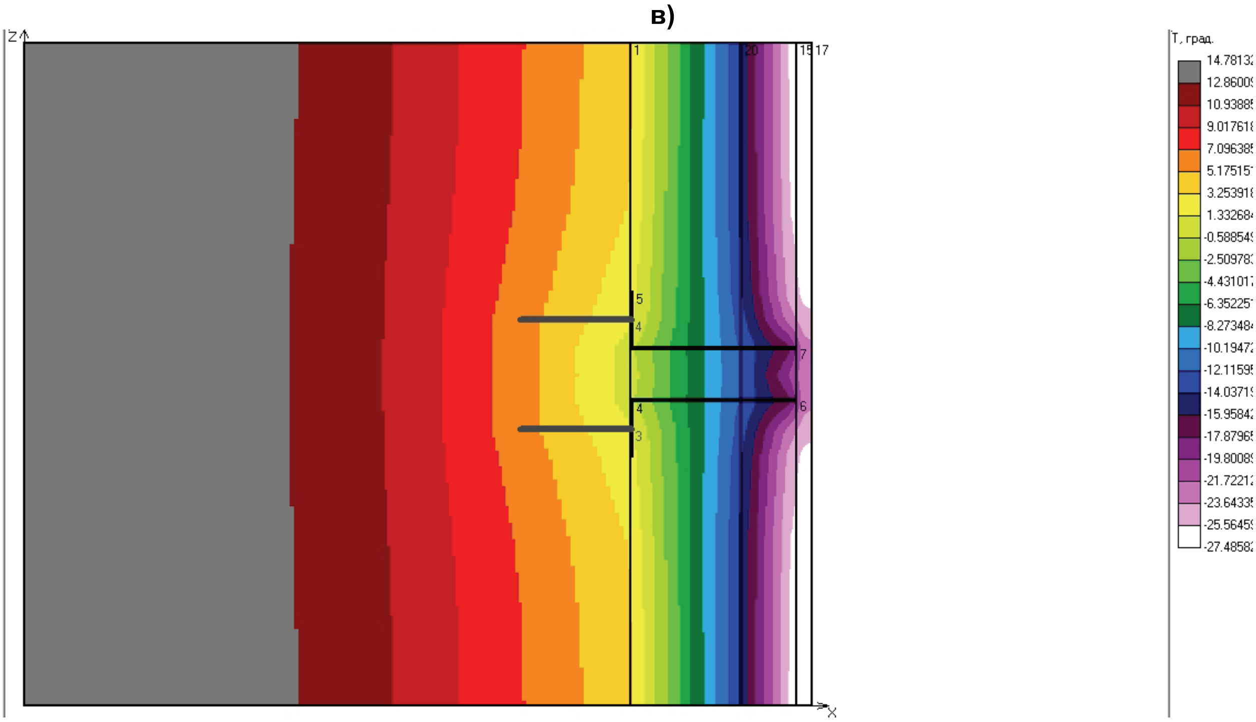
а)



б)



в)



г)

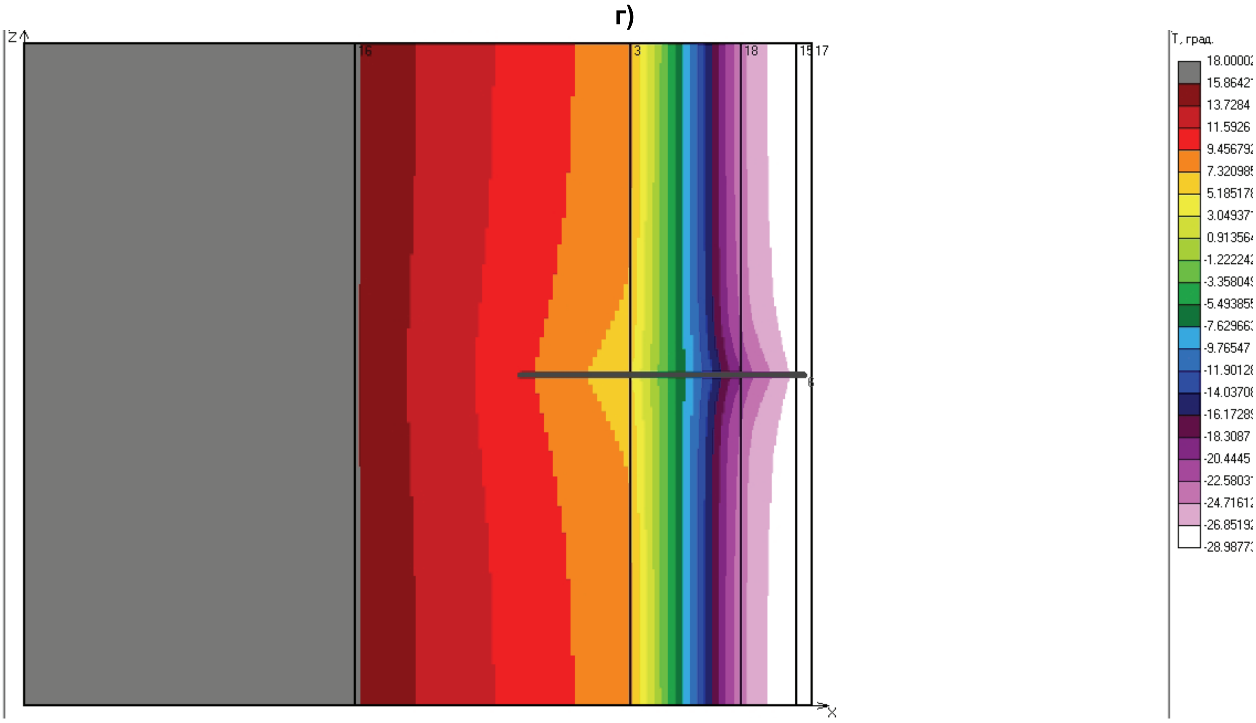


Рисунок 7. Изополя температур в разработанной системе (система 2): а) по вертикальному сечению стены; б) по плоскости стены; в) по горизонтальному сечению стены, проходящему через несущий кронштейн (устанавливается в перекрытии); г) то же через анкерно-резьбовую шпильку (устанавливается в стене)

Выводы

Разработанная конструкция навесного вентилируемого фасада обладает более высокими теплотехническими свойствами по сравнению с системами, повсеместно применяемыми в настоящее время, вследствие больших величин приведенного сопротивления теплопередаче и коэффициента теплотехнической однородности.

Повысить коэффициент теплотехнической однородности фасадной системы также можно, применяя кронштейны из коррозионностойкой стали, теплопроводность которой значительно ниже, чем теплопроводность оцинкованной стали или алюминиевых сплавов (для сравнения: коэффициент теплопроводности антикоррозионной стали составляет 20 Вт/м·°С, оцинкованной – 47 Вт/м·°С, алюминиевых сплавов – 209 Вт/м·°С). Фасады с применением несущих систем, выполненных из коррозионностойкой стали, считаются дорогими, но более долговечными в эксплуатации, в связи с чем они все больше применяются в современном строительстве. При этом хотелось бы отметить, что в разработанной конструкции навесного вентилируемого фасада анкерные резьбовые шпильки можно изготавливать из стеклопластика, что значительно повысит коэффициент однородности системы (коэффициент теплопроводности стеклопластика составляет 0.35 Вт/м·°С). Однако применение стеклопластика в конструкции навесного вентилируемого фасада требует дополнительных исследований в области их пожарной безопасности, долговечности и надежности.

Литература

1. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Садчиков А. В., Мехнецов И. А. Продольная фильтрация воздуха в современных ограждающих конструкциях. Метод оценки теплозащиты стены здания с вентилируемым фасадом с учетом продольной фильтрации воздуха // АВОК. 2005. №8. С. 60–70.
2. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Достоинства и недостатки применения ветрозащитных плёнок в вентилируемых фасадах // Строй ПРОФИль. 2008. №1. С. 29–33.
3. Гагарин В.Г., Козлов В.В. О комплексном показателе тепловой оболочки здания // АВОК. 2010. №4. С. 1–10.
4. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором. Часть 1 // АВОК. 2004. №2. С. 20–26.
5. 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.
6. Протасевич А.М., Крутилин А.Б. Классификация вентилируемых фасадных систем. Влияние теплопроводных включений на их теплозащитные характеристики // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 57–62.
7. Протасевич А.М., Крутилин А.Б. Натурные исследования наружных стен зданий, теплоизоляционных 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.
8. Езерский В.А., Монастырев П.В. «Влияние вентилируемого фасада на теплозащитные качества утеплителя» // Жилищное строительство. 2003. №3. С. 18–20.
9. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором. Часть 2 // АВОК. 2004. №3. С. 20–26.
10. Езерский В.А., Монастырев П.В, Федоров С.В. Коэффициент теплотехнической однородности наружных стен вентилируемых фасадов // Жилищное строительство. 2004. №12. С. 8–11.
11. Гузачев А.Н. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены здания, ослабленной теплопроводными включениями в виде крепежного каркаса вентилируемого фасадаR-VENT) / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2004611234. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20 мая 2004 г.
12. Tanner C., Zurcher C. Bauphysik der hinterlufteten Fassade/ Ein Einblick in ausgewahlte physikalische Phanomene und Fologerungen fur die konstruktive Umsetzung und Ausfuhrung [Электронный ресурс] // Hinterluftete Fassade als Witterungsschutz: WTA Seminar “Hinterluftete Fassade als Witterungsschutz”. Системные требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.wta-schweiz.ch/mitglieder/seminar-04-hugentobler.pdf. (Дата обращения: 20.01.2011).

13. Peer L.B.B. Practical Use of Thermal Breaks in Cladding Support Systems // Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference. Florida, USA, December 2–7, 2007.
14. 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-технической конференции. Москва, НИИСФ, 26–28 апреля, 2001 г. С. 157–188.
15. Самаяаускас Р., Станкявичюс В., Блюджюс Р. Воздействие конвекции на теплопередачу через вентилируемые ограждения. Каунас: Технология, 2003. 125 с.
16. Умнякова Н.П. Как сделать дом теплым. М.: Стройиздат, 1996. 367 с.
17. Гагарин В.Г., Дмитриев К.А. Учет теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах // Строительные материалы. 2013. №6. С. 14–17.
18. Овсянников С.Н., Вязова Т.О. Теплозащитные характеристики наружных стеновых конструкций с теплопроводными включениями // Строительные материалы. 2013. №6. С. 24–28.
19. Dagnall M., Window A., Leung A., Thompson D. Analytical assessment of thermal performance of a ventilated glazed facade system // Proceedings of Building Simulation: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 2011, 14–16 November. Pp. 808–815.
20. Ciampi M., Leccese F., Tuoni G. On the thermal behavior of ventilated facades and roofs // La Termotecnica. 2002. No. 1. Pp. 87–97.
21. Ciampi M., Leccese F., Tuoni G. Some thermal parameters influence on the energy performance of the ventilated walls // Proceedings of 20th UIT National Heat Transfer Conference, 2002, Maratea, Italy. Pp. 357–362.
22. Немова Д.В. Интегральные характеристики термогравитационной конвекции в воздушной прослойке навесных вентилируемых фасадов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №2(15). С. 25–34.
23. Явтушенко Е.Б. Основы гидравлического расчета навесных вентилируемых фасадов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №2(7). С. 55–61.
24. Корниенко С.В. Температурно-влажностный режим наружных стен с вентилируемым фасадом // Academia. Архитектура и строительство. 2009. №5. С. 389–394.
25. Туснина О.А. Вычислительный комплекс TEPL для теплотехнического расчета строительных конструкций на основе решения задачи стационарной трехмерной теплопроводности // Сборник докладов V Международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях». М., 2013. С. 154–157.
26. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий / Минрегион России. М., 2012. 95 с.

Ольга Александровна Туснина, Москва, Россия
Тел. моб.: +7(910)476-16-77; эл. почта: lazoltus@mail.ru

Алексей Андреевич Емельянов, Москва, Россия
Тел. моб.: +7(909)927-57-63; эл. почта: snegiri_emelianov@mail.ru

Валентина Матвеевна Туснина, Москва, Россия
Тел. моб.: +7(916)510-72-24; эл. почта: valmalaz@mail.ru

Оценка энергоэффективности архитектурно-строительных решений начального этапа проектирования в программе Revit Architecture

Д.т.н., профессор С.А. Болотин,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»;
к.т.н., доцент А.И. Гуринов,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»;
к.т.н., зав. кафедрой городского строительства А.Х. Дадар,
ФГБОУ ВПО «Тувинский государственный университет»;
аспирант З.Х. Оолакай,
ФГБОУ ВПО «Тувинский государственный университет»

Аннотация. Одним из важнейших требований на сегодняшний день является снижение уровня потребления энергетических и материальных ресурсов на протяжении всего жизненного цикла здания. Очевидно, что наиболее существенные свойства и параметры создаваемого объекта, определяющие его облик, эксплуатационные характеристики и потребительские качества закладываются на стадии проектирования.

Целью данного исследования является формирование оценочного критерия для различных вариантов реализации проекта на информационной базе начального этапа проектирования. Задачей исследования является разработка методики оценки архитектурно-строительных решений на основе информационной модели здания (BIM), формируемой программой Autodesk Revit Architecture.

В ходе исследований предложены новые компактные решения по оценке инсоляции на вертикальные и горизонтальные поверхности и алгоритм упрощенного расчета тепловых потерь здания, что позволяет при введении соответствующей информации в программу типа Revit Architecture уже на начальных этапах проектирования моделировать виртуальные водный и энергобаланс. Применяя к итоговым величинам тарифы на водоснабжение и электроснабжение данной территории, можно получить виртуальные годовые эксплуатационные доходы или расходы, то есть виртуальный эксплуатационный денежный поток. Для корректного экономического сравнения вариантов концептуального проектирования необходимо учитывать разновременность затрат и доходов путем дисконтирования. Для экспресс-оценки проектных решений разработана модель, позволяющая имитировать календарное планирование строительства объекта, которое необходимо для формирования инвестиционного денежного потока.

Предлагаемая методика позволяет существенно расширить возможности вариантного проектирования, заложенные в программу типа Revit Architecture.

Ключевые слова: энергоэффективность; ресурсосбережение; архитектурно-строительное проектирование; информационная модель здания; оценка проекта

Энергоемкость экономики России вдвое выше, чем мировой в целом, и в три раза выше, чем в странах Евросоюза. На заседании Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России в июне 2009 года проблема энергоэффективности и энергосбережения была названа в числе основных стратегических направлений приоритетного технологического развития.

Для обеспечения реализации этой стратегии разработан и принят целый ряд документов и нормативных актов [1–3], в том числе Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности…», который определяет энергосбережение как «реализацию организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направленных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования» [1].

Огромными резервами повышения энергоэффективности обладают здания. По статистике, приводимой Советом по экологическому строительству (RuGBC), на их долю приходится до 40% от общей потребляемой в мире первичной энергии, 67% электричества, 40% сырья и 14% запасов питьевой воды [4]. В нашей стране здания ответственны за более чем 25% потенциального энергосбережения, необходимого для достижения важнейшей стратегической задачи – снижения энергоемкости отечественной экономики (ВВП) на 40% к 2020 году [5].

С 1 марта 2013 года вступил в силу ГОСТ Р 54964–2012. Экологические требования к объектам недвижимости в этом документе определены совокупностью следующих базовых категорий [6]:

- экологический менеджмент;
- инфраструктура и качество внешней среды;
- качество архитектуры и планировка объекта;
- комфорт и экология внутренней среды;
- качество санитарной защиты и утилизации отходов;
- рациональное водопользование и регулирование ливнестоков;
- энергосбережение и энергоэффективность;
- охрана окружающей среды при строительстве, эксплуатации и утилизации объекта;
- безопасность жизнедеятельности.

Таким образом, важнейшей задачей в строительстве и сфере ЖКХ является снижение уровня потребления энергетических и материальных ресурсов на протяжении всего жизненного цикла здания: от выбора участка к проектированию, строительству, эксплуатации, ремонту и ликвидации [7–9].

Наиболее существенные свойства и параметры создаваемого объекта, определяющие его облик, эксплуатационные характеристики и потребительские качества, закладываются на этапе проектирования. В процессе проектирования энергоэффективного здания архитектор решает непростую задачу – как наилучшим образом использовать положительное и максимально нейтрализовать отрицательное воздействие окружающей среды на тепловой баланс здания. Задача инженера – организовать такую систему климатизации здания, которая с наименьшими затратами энергии обеспечит требуемые параметры микроклимата в помещениях [10]. На сегодняшний день в строительной отрасли известно множество направлений энергосбережения. Поскольку все принимаемые решения должны быть осуществимы технически, обоснованы экономически, а также приемлемы с экологической и социальной точек зрения, необходимы методы оценки конкретного энергосберегающего решения.

Во многих зарубежных странах проблемы энергоэффективности в строительстве начали исследовать и решать значительно раньше и под контролем государства, поэтому методы повышения энергоэффективности там детально проработаны. Так, в Канаде для обеспечения реализации правительственной программы стимулирования энергоэффективности еще в конце 90-х годов прошлого столетия были реализованы алгоритмы компьютерного моделирования зданий [11]. Многие исследования для формирования оценок базировались на результатах массовых обследований зданий. В частности, для разработки интегрированных системных решений по модернизации зданий с перспективой 30–50% сокращения потребления энергоресурсов использовалась статистика по 250 тыс. объектов надвижимости Министерства обороны США [12]. Задача оценки архитектурно-строительных и инженерных решений, в том числе их энергоэффективности, в ряде стран решена и даже реализована в новейших программных продуктах, как специализированных (но при этом требуется решить проблему передачи данных из систем САПР [13]), так и интегрированных в САПР на уровне дополнительных возможностей [14]. Однако следует отметить следующие особенности:

- различные инструменты моделирования энергопотребления приводят к различным результатам, что влияет даже на достоверность определения оценок в признанных рейтинговых системах BREEAM и LEED [15];
- разработчики не раскрывают алгоритмы расчетов, и их применение не описывается в научной литературе, следовательно, мы не можем оценить их соответствие нашим нормативным требованиям, а на основании работ [16,17] можно сделать вывод, что такого соответствия нет;
- в России характеристикой энергоэффективности зданий является удельный расход энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период; во многих же странах этот показатель определяет общее удельное потребление энергии, идущей на отопление,

вентиляцию, кондиционирование, горячее водоснабжение, освещение и эксплуатацию общедомового инженерного оборудования;

- организация и стадийность проектирования в нашей стране значительно отличаются от принятых в других странах;
- единицы измерений в предоставляемых программой отчетах, как правило, не соответствуют принятым в нашей стране (метрическим).

Отечественных программных продуктов такого уровня на сегодня нет.

Важность и сложность задачи оценки отмечаются многими отечественными и зарубежными учеными, при этом все большее значение приобретает требование осуществлять такую оценку на ранних стадиях разработки проекта [18–20], которые характеризуются неполнотой информации и требуют моделирования. В работе [21] предлагается «упрощенный универсальный метод оценки вклада широкого спектра энергосберегающих решений в снижение теплопотребления конкретного здания на основе использования метода экспертных оценок эффективности энергосберегающего оборудования, технологий и мероприятий». Таким образом, разработанный экспресс-метод ориентирован на оценку инженерных мероприятий и систем, но не архитектурно-строительных решений. В работе [22] для оценки и оптимизации энергоэффективных решений предлагается использовать генетический алгоритм, который требует формализации исходных данных.

Проектирование любого объекта является сложным и ответственным процессом, состоящим из нескольких этапов. Однако эффективность всего процесса проектирования во многом зависит от решений, принимаемых на начальном этапе, который, как будет показано далее, может и должен быть ориентирован на энергоресурсосбережение. Известно, что на раннем (концептуальном) этапе формируется и уточняется основная идея проекта и определяется цель инвестирования, то есть ставится традиционная задача разработки технико-экономического обоснования (ТЭО) инвестиций в строительство объекта по принятому критерию. Но основы будущей энергоэффективности инвестиционно-строительных проектов должны продумываться еще на этапе формирования ТЭО [9]. Считаем очевидным, что заказчик-инвестор должен принимать решение о дальнейшем развитии проекта только по итогам рассмотрения различных вариантов его реализации.

Целью данного исследования является формирование оценочного критерия для различных вариантов реализации проекта на основе информационной базы начального этапа проектирования. Тогда по результатам процедуры оценки заказчик может точнее сформулировать техническое задание на проектирование, в котором будут указаны:

1) требования к основным параметрам здания – этажность, площадь, строительный объем и др.;
2) основные требования к архитектурно-планировочным и конструктивным решениям, материалам несущих и ограждающих конструкций;
3) основные требования к инженерному оборудованию.

Первая группа требований, по сути дела, связана с конфигурацией наружной оболочки здания, которая предопределяет результаты расчетов не только тепловых потерь здания [23], но и нормативной продолжительности строительства проектируемого здания [24, 25]. Вторая группа требований может и должна учитывать возможность утилизации тепла (например, с помощью теплового насоса) и атмосферных осадков (с помощью коллектора).

И, наконец, некоторые требования к инженерному оборудованию не могут быть сформированы должным образом, если на ранней стадии не учесть, например, размещение теплоулавливающих элементов на наружных конструкциях проектируемого здания. Объединение всех перечисленных требований может быть осуществлено на основе конвергенции организационно-технологического и архитектурно-строительного проектирования, ориентированного на энергоресурсосбережение при строительстве и эксплуатации зданий [26].

В настоящее время одной из наиболее перспективных технологий в проектной деятельности является *BIM* – информационное моделирование здания (англ. *Building Information Modeling*) [27]. При использовании этой технологии можно не только создать трехмерную модель здания, но и связать ее с информационной базой данных, где каждый элемент модели характеризуется набором параметров, который при необходимости может быть дополнен пользователем. Не менее значимым преимуществом *BIM*-моделирования является параметризация модели, которая обеспечивает возможность согласованного изменения характеристик объекта во всей совокупности проектной документации [28]. Применение технологии *BIM* обеспечивает несомненные преимущества и в управлении строительными проектами [29].

Задачей исследования является разработка методики оценки архитектурно-строительных решений для эффективной реализации начального этапа проектирования на основе *BIM*-моделирования. Практическое обоснование предлагаемой методики обеспечивается применением программы *Revit Architecture* (разработчик – компания *Autodesk*), реализующей *BIM*-моделирование, что не исключает применение аналогичных программ других разработчиков, таких как *Bentley Systems* или *Graphisoft*.

Энергетические характеристики будущего объекта во многом определяются его местоположением и ориентацией наружных ограждающих конструкций, которые связаны с соответствующими климатическими условиями. Например, данные строительной климатологии по инсоляции характеризуют распределение потока солнечной энергии по месяцам в зависимости от географической широты и ориентации по сторонам света для вертикальных и горизонтальных поверхностей [30]. Анализ этих данных применительно к поставленной задаче позволил трансформировать их к более адекватному виду. Например, определяя годовое поступление солнечной энергии, мы получили регрессионное выражение, позволяющее рассчитывать инсоляционный поток, падающий на горизонтальную поверхность (например, плоскую крышу проектируемого здания) I_h с погрешностью менее 2% в диапазоне углов Ф от 40 до 65° северной широты по следующей формуле:

$$I_h = 11623 - 105 \cdot \Phi . \quad (1)$$

Анализ инсоляции вертикальных ограждающих конструкций показал, что годовой поток тепла практически не зависит от географической широты расположения здания и с погрешностью менее 6% зависит от ориентации вертикальной поверхности, определяемой углом Ψ, отсчитываемым по часовой стрелке от северного направления, по следующей регрессионной формуле:

$$\begin{aligned} I_v &= 7647\left[0{,}5 + \frac{1}{\pi} Arctg\left(\frac{\Psi - 90}{45}\right)\right] \quad \text{при} \quad 0 < \Psi < 180; \\ I_v &= 7647\left[0{,}5 + \frac{1}{\pi} Arctg\left(\frac{270 - \Psi}{45}\right)\right] \quad \text{при} \quad \Psi \geq 180. \end{aligned} \quad (2)$$

Далее для концептуального этапа проектирования рассмотрим алгоритм упрощенного расчета тепловых потерь, используя при этом актуальную нормативную литературу [31, 32]. Принятая при этом схема расчета тепловых потерь представлена на рисунке 1.

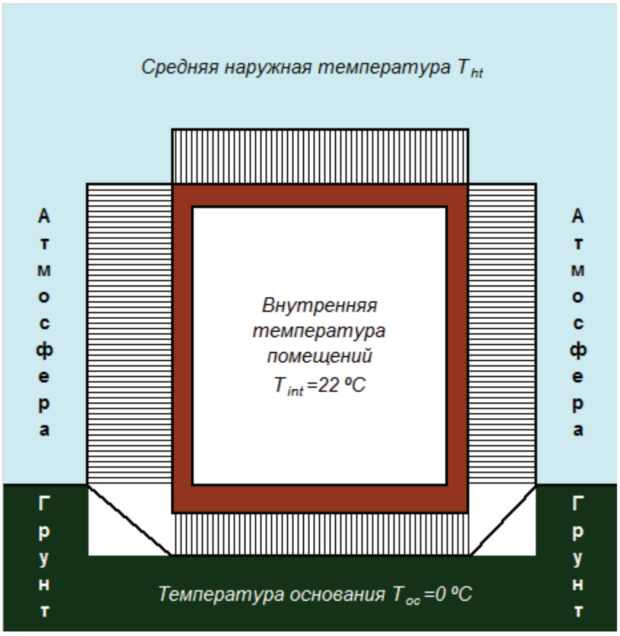


Рисунок 1. Схема для упрощенного расчета тепловых потерь здания

Расчетная температура воздуха внутри жилых зданий, лечебно-профилактических и детских учреждений для холодного периода года может быть принята T_{int} = 22 ºС [32]; продолжительность отопительного периода Z_{ht} и средняя за отопительный период температура T_{ht}, зависящие от местоположения проектируемого здания, – в соответствии с [30]. На основании этих данных рассчитываются так называемые градусо-сутки отопительного периода D_d по формуле:

$$D_d = \left(T_{int} - T_{ht}\right) \cdot Z_{ht} . \qquad (3)$$

Далее на основе данных таблицы 1 [31] можно определить минимально допустимое сопротивление теплопередаче (термическое сопротивление) ограждающих конструкций по формуле:

$$R_{reg} = a \cdot D_d + b . \qquad (4)$$

Таблица 1. Коэффициенты для расчета нормируемых значений сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

<table>
<tr><th rowspan="2">Градусо-сутки отопительного периода, °С·сут</th><th colspan="5">Коэффициенты для расчета нормируемых значений сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций жилых зданий, лечебных и детских учреждений</th></tr>
<tr><th>Окна и балконные двери, витрины и витражи</th><th>Стены</th><th>Покрытия и перекрытия над проездами</th><th>Чердачные перекрытия и перекрытия над неотапливаемыми подпольями и подвалами</th><th>Фонари с вертикальным остеклением</th></tr>
<tr><td>менее 6000</td><td>a = 0,000075
b = 0,15</td><td rowspan="3">a = 0,00035
b = 1,4</td><td rowspan="3">a = 0,0005
b = 2,2</td><td rowspan="3">a = 0,00045
b = 1,9</td><td rowspan="3">a = 0,00025
b = 0,25</td></tr>
<tr><td>от 6000 до 8000</td><td>a = 0,00005
b = 0,3</td></tr>
<tr><td>свыше 8000</td><td>a = 0,000025
b = 0,5</td></tr>
</table>

Часть тепловых потерь связана с необходимостью подогрева наружного воздуха при вентиляции помещений. Соответствующий расчет должен учесть задаваемый архитектором объем здания и принятую им кратность воздухообмена.

При расчете тепловых потерь через подземную часть (см. рисунок) в случае реализации специальных теплотехнических мер, предотвращающих замерзание основания под зданием [33], температуру грунта следует принять равной 0 ºС, а ее изменение по высоте рассчитывать по линейному закону.

В ходе проектирования в программе типа *Revit Architecture* создаваемые для ограждающих конструкций спецификации позволяют добавлять так называемые пользовательские столбцы, где возможно размещение необходимой, в том числе для расчета энергетических параметров, информации. В дальнейшем сформированные в программе *Revit Architecture* спецификации могут быть экспортированы в выбранную для окончательного расчета программу, например, *Excel*. На концептуальной стадии может быть реализован и замысел архитектора по включению в конструкцию основания здания теплового насоса, а в конструкцию крыши – коллектора для сбора атмосферных осадков.

Регионы России весьма существенно различаются по климату, ресурсным возможностям (водным и энергетическим), потенциалу альтернативной энергетики (табл. 2). И уже на самых ранних этапах проектирования архитектор может определить, на какие ресурсы с целью их экономии в данном регионе в первую очередь необходимо обратить внимание. Например, для такого города как Якутск, который находится в зоне сурового климата [34], капитальные расходы более целесообразно направить не на теплоулавливание, а на снижение тепловых потерь.

Таблица 2. Сравнительные климатические данные городов РФ

№ п/п	Населенные пункты	Место-поло-жение, °с.ш.	Инсоляция горизон-тальной поверх-ности, I_h, МДж/м^{2}год	Продолжительность отопительного периода (при средней суточной температуре воздуха менее 8°С), Z_{ht}, сут.	Средняя температура холодного (отопитель-ного) периода, T_{ht}, °С	Градусо-сутки при T_{int} = 22°С, D_d	Коли-чество осадков, мм в год
1	Архангельск	65	4798	253	-4.4	6679	590
2	Астрахань	47	6688	167	-1.2	3874	208
3	Волгоград	49	6478	177	-2.4	4319	386
4	Воронеж	52	6163	196	-3.1	4920	539
5	Казань	56	5743	215	-5.2	5848	508
6	Москва	56	5743	214	-3.1	5371	644
7	Пермь	58	5533	229	-5.9	6389	616
8	Псков	58	5533	212	-1.6	5003	603
9	Ростов-на-Дону	47	6688	171	-0.6	3865	555
10	Санкт-Петербург	60	5323	220	-1.8	5236	620
11	Сочи	44	7003	92	6.4	1435	1954
12	Томск	47	6688	236	-8.4	7174	591
13	Якутск	62	5113	256	-20.6	10906	234
14	Ярославль	57	5638	221	-4	5746	578

В рамках представленной выше методики при введении соответствующей информации в программу типа *Revit Architecture* уже на начальных этапах проектирования появляется возможность моделировать виртуальные водный и энергобаланс. Применяя к итоговым величинам тарифы на водоснабжение и электроснабжение данной территории, можно получить виртуальные годовые эксплуатационные доходы или расходы, то есть виртуальный эксплуатационный денежный поток. В итоге полученные результаты расчета должны дать архитектору, работающему в программной среде *Revit Architecture*, количественные характеристики энергоресурсосберегающего потенциала проектируемой оболочки здания.

В предлагаемом алгоритме оценки предусмотрено, что для окончательного и корректного экономического сравнения вариантов концептуального проектирования необходимо учитывать разновременность затрат и доходов путем дисконтирования [35]. Таким образом, для цели экспресс-оценки проектных решений требуется методика, позволяющая имитировать календарное планирование, необходимое для формирования инвестиционного денежного потока. Основополагающими элементами для календарного планирования строительства являются организационно-технологическая схема возведения строительного объекта [36] и нормы продолжительности строительства [24, 25]. В декабре 2010 г. Министерством регионального развития Правительства РФ приняты новые нормы продолжительности строительства [25], которые, в отличие от старых норм [24], определяют продолжительности только двух периодов строительства – подготовительного и основного. Однако даже для календарного планирования, осуществляемого в составе проекта организации строительства (ПОС), такой детализации, на наш взгляд, явно недостаточно, так как при организационном проектировании необходимо, как минимум, учитывать продолжительности работ нулевого цикла, возведения надземной части здания и внутренних работ. С другой стороны, и количество норм, представленных в новом документе, даже для наиболее представительного класса жилых зданий явно недостаточно. Малое количество норм зачастую дезавуирует рекомендацию данного документа на использование экстраполяционно-интерполяционных процедур, поскольку в некоторых случаях в новых нормах присутствует всего лишь один объект-представитель.

В этом отношении гораздо более представительными являются старые нормы, определенные в СНиП 1.04.03-85* [24], которые, по нашему мнению, как раз и могут послужить статистической основой для рекомендаций по применению экстраполяционно-интерполяционных процедур. Анализируя структуру продолжительностей циклов основных работ, приходим к следующим выводам. Для подготовительного периода всех типов зданий как в старом СНиПе, так и в новом нормативе отводится $T_{под}$ = 1 мес. Считаем, что продолжительность работ нулевого цикла $T_{нц}$ функционально зависит от общей площади здания F, так как именно она определяет основную нагрузку на его основание и фундамент:

$$T_{нц} = a_{нц} \cdot F + b_{нц}. \tag{5}$$

Аналогичный вид регрессионной зависимости может быть принят и для аппроксимации отделочных работ (отд), объем и продолжительность которых также линейно связаны с общей площадью здания:

$$T_{отд} = a_{отд} \cdot F + b_{отд}. \tag{6}$$

В регрессионной зависимости продолжительности работ по надземной части (НЧ) здания следует дополнительно учитывать его этажность – продолжительности работ по каждому последующему этажу будут возрастать на некоторую постоянную величину по сравнению с предыдущим этажом. Тогда, суммируя добавки по всем этажам и ограничиваясь старшей степенью итогового выражения, принимаем, что общая добавка будет пропорциональна квадрату числа этажей здания (N^2):

$$T_{нч} = a_{нч} \cdot F + b_{нч} + c_{нч} \cdot N^2. \tag{7}$$

По результатам обработки статистических массивов данных по монолитным, кирпичным и панельным зданиям нами получены регрессионные коэффициенты (табл. 3), входящие в формулы (5)–(7).

Таблица 3. Коэффициенты для определения продолжительностей циклов работ, выполняемых при строительстве жилых зданий

Тип здания	Цикл работ	Коэфф. при F (a)	Св. член (b)	Коэфф. при N^2 (c)	Вероятность (P) отклонения продолжительности при Δ = 0,5 мес.
Кирпичное	Нулевой цикл (НЦ)	0,000067	0,885		1,00
	Надземная часть (НЧ)	0,000417	2,622	0,00284	1,00
	Отделка (Отд)	0,000047	1,505		1,00
Монолитное	Нулевой цикл (НЦ)	0,000106	0,570		0,71
	Надземная часть (НЧ)	0,000364	3,041	0,00354	0,77
	Отделка (Отд)	0,000118	0,837		0,85
Панельное	Нулевой цикл (НЦ)	0,000049	0,856		1,00
	Надземная часть (НЧ)	0,000168	2,284	0,00265	0,81
	Отделка (Отд)	0,000049	0,872		0,97
Кирпично-монолитное	Нулевой цикл (НЦ)	0,000093	0,684		(нет стат. данных)
	Надземная часть (НЧ)	0,000384	2,863	0,00340	(нет стат. данных)
	Отделка (Отд)	0,000093	1,101		(нет стат. данных)

В последнем столбце представлена вероятность (P) отклонения продолжительности, рассчитанной по полученным регрессионным уравнениям (5–7), от данных по нормативной статистике. Эта вероятность определена порогом в 0,5 месяца и менее. Она для всех типов зданий превышает 70%.

Для имитации виртуального денежного потока на концептуальной стадии проектирования зданий необходимо иметь информацию о распределении капитальных затрат по циклам работ. Получим ее на основе аналогичной статистической обработки старых норм. Анализ показал, что для четырех периодов строительства все коэффициенты парной корреляции продолжительностей и площадей зданий имеют небольшие значения (менее 0,25). Статистическим анализом также установлены малые величины наклона соответствующих регрессионных кривых (менее чем $3 \cdot 10^{-4}$ мес./м^2).

Таким образом, в качестве расчетных значений нами выбраны средние проценты распределения капитальных вложений по всем зданиям, составляющие $C_{под} = 6\%$, $C_{нц} = 12\%$, $C_{нч} = 71\%$ и $C_{отд} = 11\%$. Учитывая, что в нормах продолжительности строительства заложено последовательное выполнение работ и считая, что оплата работ по каждому из четырех циклов будет проводиться после их завершения, получаем формулу расчета дисконтированных инвестиций NPV_{in}:

$$NPV_{in} = C_F \cdot F \cdot \left[C_{под} \cdot \alpha^{-T_{под}} + C_{нц} \cdot \alpha^{-\left(T_{под}+T_{нц}\right)} + C_{нч} \cdot \alpha^{\left(T_{отд}-T_{н}\right)} + C_{отд} \cdot \alpha^{-T_{н}} \right], \tag{8}$$

где $T_н$ – общая нормативная продолжительность строительства;
α = (1 + E), где E – норма дисконта, принимаемая заказчиком;
C_F – планируемая стоимость квадратного метра возводимого здания.

Дисконтирование годового денежного потока операционного периода W_{op}, связанного со стоимостью рассчитанных ранее энергетических и материальных ресурсов, может быть сведено к бесконечному аннуитету [37], образуемому после окончания строительства, которое определяется соответствующей нормой продолжительности $T_н$:

$$NPV_{op} = \left(W_{op} / E\right) \cdot \alpha^{-T_{н}}, \tag{9}$$

Тогда итоговое значение чистого дисконтированного денежного потока, связанного с организационно-технологическими и энергоресурсосберегающими характеристиками концептуального этапа архитектурно-строительного проектирования, должно быть рассчитано по формуле:

$$NPV = NPV_{op} - NPV_{in}. \tag{10}$$

Предлагаемая методика позволяет существенно расширить возможности вариантного проектирования, заложенные в программы типа *Revit Architecture* [38]. Создаваемая в процессе архитектурно-строительного проектирования информационная модель здания в сочетании с разработанной авторами методикой расчета эксплуатационных характеристик может быть использована для оценки и анализа различных показателей энергоэффективности и ресурсосбережения уже на самой ранней – концептуальной – стадии проектирования. Принятие окончательного оценочного решения по выбору конкретного проектного варианта в условиях некоторой неопределенности исходных параметров может быть подкреплено анализом чувствительности.

В рамках внедрения национальной системы сертификации важная роль в обеспечении выполнения экологических требований отводится оптимизации проектных решений, в том числе путем моделирования и вариантного анализа экоустойчивости, теплофизических и энергетических свойств объекта недвижимости, оптимизации стоимости его жизненного цикла [6]. Рассмотренная методика отвечает современным требованиям и способствует решению поставленных задач буквально с первых шагов разработки проекта.

Литература

1. Федеральный закон №261–ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23 ноября 2009 г.
2. Распоряжение Правительства РФ от 01.12.2009 N 1830-р «Об утверждении плана мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в Российской Федерации».
3. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года». Утв. Распоряжением Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. N 2446-р.
4. Совет по экологическому строительству [Электронный ресурс]. URL: http://www.rugbc.org/ (дата обращения: 16.12.2013).

5. Медиаресурс EcoRussia.info [Электронный ресурс]. URL: http://www.ecorussia.info/ru/ecopedia/green-building-review (дата обращения: 16.12.2013).
6. ГОСТ Р 54964-2012. Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости.
7. Энергосбережение на стадии проектирования и строительства объектов: научно-практическая конференция, Санкт-Петербург, 31.03.2010 [Электронный ресурс]. URL: http://souz.conon.ru/g/p/4619.php (дата обращения: 16.12.2013).
8. Вопросы энергоэффективности в проектировании, строительстве и эксплуатации зданий: конференция в рамках деловой программы Международного строительного форума «Балтийская строительная неделя» от 12.09.13 [Электронный ресурс]. URL: http://stroy-profi.info/news/413 (дата обращения: 16.12.2013).
9. Запланированная экономия. Энергосбережение начинается с проекта (обзор, мнения) // Строительство и городское хозяйство в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. 2011. №126. С. 68–69.
10. Табунщиков Ю.А. Энергоэффективное здание – синтез архитектуры и технологии [Электронный ресурс]. URL: http://www.ecoteco.ru/id565/ (дата обращения: 16.12.2013).
11. Beausoleil-Morrison I., Calla R. [et al]. Using building simulation to support an energy efficient programme [Электронный ресурс] // Seventh International IBPSA Conference. Rio de Janeiro, Brazil, August 13–15, 2001. URL: http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive/IBPSA/UFSC498.pdf (дата обращения 16.12.2013).
12. Surana A., Taylor R.D., Narayanan S., Otto K. Rapid Assessment of Deep Retrofit System Solutions to Improve Energy Efficiency in DoD Installations and Buildings [Электронный ресурс] // International High Performance Buildings Conference. 2012. Paper 97. URL: http://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/97 (дата обращения: 16.12.2013).
13. Ahn K.-U., Kim Y.-J., Park C.-S., Kim I., Lee K. BIM interface for full vs. semi-automated building energy simulation // Energy and Buildings. 2014. Vol. 68. Part B. Pp. 671–678.
14. Carlos J.S., Nepomuceno M.C.S. A simple methodology to predict heating load at an early design stage of dwellings // Energy and Buildings. 2012. Vol. 55. Pp. 198–207.
15. Schwartz Y., Raslan R. Variations in results of building energy simulation tools, and their impact on BREEAM and LEED ratings: A case study // Energy and Buildings. 2013. Vol. 62. Pp. 350–359.
16. Горшков А.С., Соколов Н.А. Несоответствие российских и международных стандартов при определении расчетных значений теплопроводности строительных материалов и изделий // Инженерно-строительный журнал. 2013. №7(42). С. 7–14.
17. Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании // Инженерно-строительный журнал. 2012. №8(34). С. 4–14.
18. Vasco Granadeiro, José P. Duarte, João R. Correia, Vítor M.S. Leal. Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation // Automation in Construction. 2013. Vol. 32. Pp. 196–209.
19. Iddon C.R., Firth S.K. Embodied and operational energy for new-build housing: A case study of construction methods in the UK // Energy and Buildings. 2013. Vol. 67. Pp. 479–488.
20. Hemsath T.L. Conceptual energy modeling for architecture, planning and design: Impact of using building performance simulation in early design stages // Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association. 2013. Pp. 376–384.
21. Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В., Миллер Ю.В. Методы и результаты оценки эффективности энергосберегающих решений // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). 2013. №7. С. 38–44.
22. Pornkrisadanuphan Supatcharawadee, Chaiwiwatworakul Pipat. A Genetic Algorithm-Based Approach Design for Energy-Efficient Building in Thailand // 2011 International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE. Vol. 8. Singapore: IACSIT Press, 2011. Pp. 91–95.
23. Булгаков С.Н. [и др.] Теория здания. Здание-оболочка. М.: АСВ, 2007. 22 с.
24. СНиП 1.04.03-85. Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений.
25. Нормативы продолжительности строительства / Утверждены приказом Министерства регионального развития РФ от 21 декабря 2010 г. № 746.

26. Болотин С.А., Дадар А.Х. Конвергенция организационно-технологического и архитектурно-строительного проектирования, ориентированного на энергоресурсосбережение при строительстве и эксплуатации зданий. СПб.: СПбГАСУ, 2011. 200 с.

27. Криницкий Е.В. Информационная модель здания (BIM) // Инженерно-строительный журнал. 2010. №2. С. 16–18.

28. Талапов В.В. Информационное моделирование зданий – современное понимание // CADmaster. 2010. №4. С. 114–121.

29. Bryde D., Broquetas M., Volm J.M. The project benefits of Building Information Modelling (BIM) // International Journal of Project Management. 2013. Vol. 31. Issue 7. Pp. 971–980.

30. СП 131.13330.2011 (СНиП 23-01-99). Строительная климатология.

31. СП 50.13330.2012 (СНиП 23-02-2003). Тепловая защита зданий.

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

33. СП 22.13330.2011 (СНиП 2.02.01-83*). Основания зданий и сооружений.

34. Климов С.Э. Методология календарного планирования строительного производства в суровых условиях Крайнего Севера. СПб.: СПбГАСУ, 2005. 168 с.

35. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. М.: Экономика, 2000.

36. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию: постановление Правительства РФ от 16.02.2008 №87.

37. Ли Ч.Ф., Финнерти Д.И. Финансы корпораций: теория, методы и практика / Пер. с англ. М.: ИНФРА-М, 2000. 686 с.

38. Autodesk Revit Architecture 2012. Официальный учебный курс / Пер. с англ. В. Талапов. М.: ДМК Пресс, 2012. 312 с.

Сергей Алексеевич Болотин, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)316-22-79; эл. почта: sbolotin@mail.ru

Анатолий Иванович Гуринов, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)316-22-79; эл. почта: aigurinov@mail.ru

Алдын-кыс Хунаевна Дадар, г. Кызыл, Республика Тыва, Россия
Тел. раб.: +7(394)222-73-68; эл. почта: daryi@mail.ru

Зита Хулер-ооловна Оолакай, г. Кызыл, Республика Тыва, Россия
Тел. раб.: +7(394)222-73-68; эл. почта: zita-hertek@mail.ru

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

Инженерно-строительный институт
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 «Промышленное и гражданское строительство»

Программа включает учебные разделы:

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

П-02 «Экономика и управление в строительстве»

Программа включает учебные разделы:

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

П-03 «Инженерные системы зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

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

П-04 «Проектирование и конструирование зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

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

П-05 «Контроль качества строительства»

Программа включает учебные разделы:

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

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