



№7(42) октябрь – ноябрь 2013

НОРМЫ

СОБЫТИЯ

МАТЕРИАЛЫ

КОНСТРУКЦИИ

МЕТОДЫ

МОДЕЛИ



**ТЕМА НОМЕРА:
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ.
ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬСТВА**

**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](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

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Научный редактор:

Николай Иванович Ватин

Литературный редактор:

Елена Викторовна Соболева

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф., зав. каф. ФГБОУ ВПО СПбГПУ Н.В. Арефьев;
д.т.н., проф., ректор ФГБОУ ВПО СГАСУ М.И. Бальзаников;
к.т.н., проф., проректор по перспективным проектам ФГБОУ ВПО СПбГПУ А.И. Боровков;
д.т.н., проф., Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Э.К. Завадскас;
д.т.н., проф., зав. каф. ФГБОУ ВПО СПбГПУ В.В. Лалин;
к.т.н., директор РУП «Институт БелНИИС» М.Ф. Марковский;
и другие.

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

Установочный тираж 1000 экз.

Подписано в печать 12.11.13
Формат 60х84/8, усл. печ. л. 9,5.
Заказ № 2777

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

Тел. +7(812)535-52-47

E-mail: engstroy@inbox.ru

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

Содержание

СОБЫТИЯ

- Обследование зданий и сооружений: конференция как путь решения проблем 4

НОРМЫ

- Горшков А.С., Соколов Н.А. Несоответствие российских и международных стандартов при определении расчетных значений теплопроводности строительных материалов и изделий 7

МАТЕРИАЛЫ

- Селяев В.П., Неверов В.А., Маштаев О.Г., Колотушкин А.В. Свойства микрокремнезема из природного диатомита и его применение в производстве вакуумных теплоизоляционных панелей 15
- Морозов Н.М., Авксентьев В.И., Боровских И.В., Хозин В.Г. Применение отсевов дробления щебня в самоуплотняющихся бетонах 26

МЕТОДЫ

- Улыбин А.В., Старцев С.А., Зубков С.В. Контроль влажности при обследовании каменных конструкций 32
- Попова О.Н., Симанкина Т.Л. Методика оценки ресурса работоспособности конструктивных элементов жилых зданий 40

МОДЕЛИ

- Болотин С.А., Дадар А.Х., Котовская М.А. Модель пространственно-временной аналогии в оптимизации последовательности реконструируемых объектов 51
- Калюжнюк М.М., Калюжнюк А.В. Организационная подготовка автоматизированного производства и монтажа элементов конструкций светопрозрачных фасадов 58

КОНСТРУКЦИИ

- Булатов Г.Я., Колосова Н.Б. Эффективность свай различных форм поперечного сечения 67

© ФГБОУ ВПО СПбГПУ, 2013

На обложке: ОАО «Павловский завод» (ПО «Ленстройматериалы»), п. Павлово, Ленинградская обл., Россия

MosBuild

ufi
Approved
Event

Главная строительная
и интерьерная выставка России

Строительство. Интерьер
1 – 4 апреля 2014, Москва, ЦВК «Экспоцентр»

Окна. Фасады. Ворота. Автоматика
1 – 4 апреля 2014, Москва, ВВЦ, Павильон 75

Керамика. Камень. Сантехника
15 – 18 апреля 2014, Москва, ЦВК «Экспоцентр»

Подробнее на сайте
www.mosbuild.com

MosBuild 20 лет –
строим будущее
вместе!

MosBuild
Архитектура • Строительство • Дизайн • Декор

Генеральный
деловой партнер:
ВЕДОМОСТИ

Официальный
информационный партнер:
ИЗВЕСТИЯ

При поддержке:
Коммерсантъ



Обследование зданий и сооружений: конференция как путь решения проблем

18 октября в Санкт-Петербурге прошла научно-техническая конференция «Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения». Конференция проводится в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете уже в четвертый раз. В этом году конференция стала подлинно всероссийской, в ней приняли участие специалисты из 20 городов страны.

В своем вступительном слове один из ведущих участников конференции, член оргкомитета Роман Болеславович Орлович, д.т.н., профессор Западно-Померанского технологического университета (г. Щецин, Польша), отметил, в частности, специфику работы специалистов по обследованию. Для нее базовых знаний инженера-строителя недостаточно, потому что работа идет не с новыми материалами и конструкциями. Материалы с историей нагрузок ведут себя совсем по-другому, и нужно уметь анализировать эту работу, а также учиться «лечить» поврежденные конструкции с историей. Для этого во многих зарубежных вузах создаются особые направления подготовки специалистов по обследованию. В России, где пока таких направлений нет, конференции и семинары – единственный способ получить последнюю информацию и поделиться опытом в этой области.

О сложностях работы с историческими зданиями говорили и другие докладчики. Например, Константин Георгиевич Шашкин, к.т.н., руководитель отдела геотехнических расчетов ООО ПИ «Георекострукция», рассказывал об определении долгосрочных осадок таких зданий.



На исторических зданиях есть репера, а по ним в архивах можно найти данные нивелировок. По Санкт-Петербургу есть данные нивелировок за последние 130 лет. Такая работа, проведенная специалистами ООО ПИ «Георекострукция», показала незатухающие осадки зданий исторической застройки в диапазоне 0,6–1,3 мм в год. В некоторых зонах осадки значительно больше: прежде всего, на набережных рек и каналов и в зонах подработок (строительство метрополитена). В частности, в радиусе около 500 м вокруг подземного перехода метро осадки зданий составляют десятки сантиметров.

Также К.Г. Шашкин обратил внимание на необходимость совместного расчета здания и грунтового основания при обследовании исторических зданий. В большинстве случаев трещинообразование связано с неравномерными осадками здания и, соответственно, взаимодействие между зданием и основанием очень важно для обследования таких конструкций. Так, докладчик отметил, что расчеты помогают обнаружить места возможного развития трещин по зонам максимальных усилий растяжения в здании. Такой метод был использован при обследовании Кронштадтского Морского собора (о мониторинге собора см. также: Савин С.Н., Демишин С.В., Ситников И.В. Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по гост р 53778-2010 // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 33–39). К.Г. Шашкин также рассказал о случаях, когда несовпадение результатов расчета и обследования дает дополнительную информацию. Очевидно, что в этом случае модель не соответствует реальности, а значит, нужно искать непроектные изменения в конструкции, дополнительные неучтенные нагрузки и т. п.



На конференции обсуждался и такой смежный к обследованию вид работ, как мониторинг технического состояния. По новым нормативным требованиям для уникальных зданий такой мониторинг обязателен. Тем не менее, пока ни среди исполнителей, ни среди заказчиков нет четкого понимания, что это такое. Владимир Юрьевич Грачев, директор ООО «СИТИС», рассказал об опыте своей компании по разработке и использованию системы мониторинга зданий. В частности, в докладе освещался опыт применения системы «СИТИС» на строительстве свода реактора Белоярской АЭС. Необходимо было контролировать следующие параметры: симметричность нагруженности арок, температуру бетона, скорость усадки бетона. Для этого были использованы 220 струнных тензодатчиков, 450 термодатчиков, 60 даталогеров. Докладчик отметил, что, по сравнению с построенным объектом, возможности системы на строительной площадке значительно ниже: дальность радиосвязи в 4–10 раз ниже (20–30 м максимум); ресурс питания также падает в 4–5 раз.

Алексей Геннадьевич Сергушин, к.т.н., ведущий инженер-программист отдела систем безопасности ОАО «Авангард», также посвятил свой доклад мониторингу зданий, конкретно контролю напряженно-деформированного состояния. Он рассказал о достоинствах и недостатках трех видов датчиков деформаций: тензометрического, потенциометрического и индукционного. По его словам, индукционный датчик сочетает в себе достоинства двух предыдущих, тем не менее, он более сложен технологически и потребляет больше энергии.

Доклад Валерия Николаевича Деркача, к.т.н., заместителя директора по научной работе филиала РУП «Институт БелНИИС» НТЦ, был посвящен оценке причин трещинообразования и путям борьбы с этой проблемой. Одной из основных причин образования трещин в каменной кладке (заполнении каркасных зданий) являются прогибы опорных перекрытий. В принципе, само по себе наличие трещин еще не говорит об ограничениях работоспособности конструкции. Например, по австралийским нормам трещина раскрытием 1,5 см считается допустимой. Но это касается эксплуатируемых зданий.



При новом строительстве следует исходить из недопустимости образования трещин. Для этого необходимо ограничить предельные прогибы перекрытий. По разным нормам эти ограничения разные: по российским – $1/150$ пролета, по европейским – $1/500$. Тем не менее, по словам В.Н. Деркача, предельные прогибы перекрытий зависят от типа кладки заполнения, в том числе от соотношения длины и ширины фрагмента перегородки. Конечно, в нормах дают конкретные цифры. По мнению докладчика, необходимо также указывать минимальную прочность кладки на растяжение (она зависит от типа материала). Что касается соотношения длины и ширины фрагмента стены, есть два варианта снижения риска трещинообразования: либо делить длинные перегородки на блоки так, чтобы соотношение «длина–ширина» было $1/1$, либо армировать такие перегородки.

Старший преподаватель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» Сергей Сергеевич Зимин также посвятил свой доклад проблемам работы кирпичной кладки и образования трещин в ней. Его анализ был основан на опыте обследования монолитных железобетонных зданий с облицовочным кирпичным слоем. В качестве основных причин образования трещин в кирпичной кладке докладчик привел:

- отсутствие горизонтальных деформационных швов;
- температурные деформации облицовки;
- отсутствие изоляции плит перекрытий.

Также С.С. Зимин отметил, что зачастую анкера, присутствующие в проекте, в реальном здании отсутствуют (см. об этом: 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). В таком случае происходит выпучивание кладки, т. е. отход от облицовки от стены там, где отсутствуют анкера.

В ходе обсуждения доклада участники конференции сошлись на том, что конструкция «монолитное здание – кирпичная облицовка», столь популярная в Петербурге и других городах России, неэффективна и несет постоянный риск разрушения облицовочного слоя. Также об этой проблеме см.: Огородник В.М., Огородник Ю.В. Некоторые проблемы обследования зданий с отделкой лицевым кирпичом в Санкт-Петербурге // Инженерно-строительный журнал. 2010. №7(17). С. 10–13.

Одной из причин разрушения кирпичной кладки являются температурные нагрузки, в том числе, такая климатическая особенность Санкт-Петербурга, как большое количество дней со знакопеременными температурами в течение года. Иван Александрович Казимиров, к.т.н., начальник отдела обследований ООО «Иркутскстройизыскания», обратил внимание на необходимость учета региональных особенностей в методике работ по обследованию. К региональным особенностям Иркутской области он отнес, в первую очередь, природно-климатические:



- сейсмичность от 7 баллов;
- значительная продолжительность холодного периода года;
- значительный годовой перепад температур (до 80°);
- значительный перепад суточных температур (весной до 35°);
- наличие районов с сухим и жарким климатом в летнее время.

Также для Иркутска, как и для Петербурга, особенностью является наличие охраняемых зон с высокой плотностью исторической застройки. Тем не менее, основными факторами, формирующими особенности проведения обследования в Иркутской области, являются первые два. При этом в ГОСТ 53778-2010 ничего не сказано об обследовании зданий в районах с высокой сейсмичностью, в СП 13-102-2003 – только о необходимости проведения поверочных расчетов и динамического мониторинга.



В связи с этим И.А. Казимиров считает, что необходимо разрабатывать территориальные нормы по обследованию для регионов, обладающих подобными особенностями.

В ходе дискуссии о путях создания новых стандартов участники сошлись во мнении, что необходимы тесное взаимодействие специалистов из разных регионов и инициатива со стороны профессионального сообщества. Только в таком случае можно получить нормативные документы, соответствующие запросам времени.

В.М. Якубсон

Несоответствие российских и международных стандартов при определении расчетных значений теплопроводности строительных материалов и изделий

*К.т.н., доцент А.С. Горшков,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»;
д.т.н., руководитель сектора эталонов и научных исследований
в области теплофизических измерений Н.А. Соколов,
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева»*

Ключевые слова: строительные материалы и изделия; международные стандарты; теплопроводность; заявленные теплотехнические характеристики; расчетные теплотехнические характеристики; энергоэффективность; энергосбережение

В настоящее время данные по теплопроводности эффективных теплоизоляционных материалов, имеющиеся в отечественных нормативных документах, существенно отличаются от результатов измерений, предоставляемых производителями и испытательными лабораториями. Для большинства европейских стран такая ситуация выглядит парадоксальной. В рамках данной работы постараемся разобраться в причинах упомянутых выше различий.

Российская Федерация

Итак, на территории Российской Федерации при определении теплопроводности сухих и влажных материалов действует ГОСТ 7076 [1].

Теплопроводность сухих и влажных материалов измеряют по ГОСТ 7076 [1] при средней температуре образца $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ [$(298 \pm 1)^\circ\text{K}$]. Определение теплопроводности сухих материалов происходит достаточно просто. Отобранные материалы высушивают до постоянной массы при температуре, указанной в нормативных документах на данный материал, либо в соответствии с ГОСТ 17177 [2]. Образец считается высушенным до постоянной массы, если расхождение между результатами двух последовательных взвешиваний не превышает 0,5%. При этом время сушки должно быть не менее 0,5 ч. По окончании сушки определяют массу и теплопроводность исследуемых образцов, количество которых должно быть не менее пяти (п. 4.2 ГОСТ 7076 [1]).

Более сложная ситуация с определением теплопроводности влажных материалов. Понятно, что в реальных условиях эксплуатации все материалы в составе ограждающих конструкций увлажняются в той или иной степени. Эта степень увлажнения материалов зависит от нескольких обстоятельств: влажностного режима помещений, зоны влажности, в которой строится и эксплуатируется здание, а также конструктивного исполнения ограждающей конструкции (порядка расположения слоев в составе ограждения, наличия пароизоляционных барьеров, вентилируемых наружным воздухом прослоек и т. п.).

Влажностный режим эксплуатации помещений в холодный период года в зависимости от относительной влажности и температуры внутреннего воздуха устанавливается по таблице 1 СНиП 23-02 [3]. Зоны влажности на территории России следует принимать по приложению В СНиП 23-02 [3]. В зависимости от зоны влажности предполагаемого района строительства (сухой, нормальной или влажной) и влажностного режима помещений (по таблице 1) определяются условия эксплуатации ограждающих конструкций, которые подразделяются на два типа – А и Б.

Таблица 1. Влажностный режим помещений зданий

Режим	Влажность внутреннего воздуха, %, при температуре, °C		
	до 12°C	св. 12 до 24°C	св. 24°C
Сухой	до 60	до 50	до 50
Нормальный	св. 60 до 75	св. 50 до 60	св. 40 до 50
Влажный	св. 75	св. 60 до 75	св. 50 до 60
Мокрый	-	св. 75	св. 60

Горшков А.С., Соколов Н.А. Несоответствие российских и международных стандартов при определении расчетных значений теплопроводности строительных материалов и изделий

Условия эксплуатации ограждающих конструкций А и Б предназначены для выбора теплотехнических показателей материалов наружных ограждений. В приложении Д СП 23-101 [4] даны характеристики материалов в сухом состоянии, а также расчетные коэффициенты: массового отношения влаги в материале, теплопроводности и теплоусвоения (при периоде 24 часа). Все расчетные коэффициенты приведены для двух типов условий эксплуатации: А и Б. Условия эксплуатации А и Б устанавливаются по таблице 2 СНиП 23-02 [3] (см. данные таблицы 2).

Таблица 2. Условия эксплуатации ограждающих конструкций

Влажностный режим помещений зданий (по таблице 1)	Условия эксплуатации А и Б в зоне влажности (по приложению В СНиП 23-02 [3])		
	сухой	нормальной	влажной
Сухой	А	А	Б
Нормальный	А	Б	Б
Влажный или мокрый	Б	Б	Б

В качестве примера рассмотрим случай, когда в Москве проектируется жилое многоквартирное здание. По таблице 1 ГОСТ 30494 [5] находим, что допустимая относительная влажность воздуха в жилых помещениях принимается не более 60%, допустимая температура воздуха в помещениях в холодный период года – 18÷24 °С. По таблице 1 определяем, что это относится к нормальному влажностному режиму помещений. По приложению В СНиП 23-02 [3] определяем, что Москва находится во второй (нормальной) зоне влажности. По таблице 2 для нормальной зоны влажности и нормального влажностного режима помещений принимаем для проектирования ограждающих конструкций и выбора расчетных значений теплопроводности строительных материалов условия эксплуатации Б.

В п. 5.3.1 СП 23-101 [4] указано, что расчетные теплотехнические показатели строительных материалов, в том числе теплопроводность, следует определять по приложению Д данного свода правил. В примечании к п. 5.3.1 [4] отмечено, что расчетные теплотехнические показатели эффективных теплоизоляционных материалов (минераловатных, стекловолокнистых и полимерных), а также материалов, не приведенных в приложении Д, следует принимать согласно теплотехническим испытаниям, проведенным аккредитованными испытательными лабораториями по методике приложения Е [4].

Обратимся далее к приложению Е СП 23-101 [4]. В приложении Е [4] указано, что расчетные значения теплопроводности определяют на пяти образцах для условий эксплуатации А и пяти образцах для условий эксплуатации Б, причем образцы должны быть отобраны от пяти партий конкретной марки материала или изделия по одному образцу от партии для каждого условия эксплуатации. Допускается последовательное определение теплопроводности пяти образцов для условий эксплуатации А, затем их доувлажнение и определение теплопроводности для условий эксплуатации Б.

Значения влажности исследуемого материала или изделия для условий эксплуатации А и Б следует принимать по приложению Д в случае, если данный вид материала указан в его перечне, или по фактическим значениям влажности аналогичного теплоизоляционного материала в конструкции после 3–5 лет эксплуатации. Допускается за величину влажности для условий эксплуатации А принимать значение сорбционной влажности материала при относительной влажности воздуха 80%, а для условий эксплуатации Б – значение сорбционной влажности материала при относительной влажности воздуха 97%. Сорбционную влажность материала или изделия определяют по ГОСТ 24816 [6].

В п. Е.4 Приложения Е СП 23-101 [4] приведена методика увлажнения образцов испытываемого строительного материала. Увлажнение производят на установках, обеспечивающих принудительное насыщение образца водяным паром (для материалов на основе минерального или стекловолокна) или капельно-воздушной смесью. При этом пар или капельно-воздушная смесь должны пронизывать (не омывать) образец.

Далее в качестве одного из вариантов увлажнения образцов приводится описание установки. По данному варианту образец плотно устанавливают в прямоугольный короб на сетку. На короб устанавливают крышку с подсоединенным к ней отсасывающим шлангом пылесоса. С противоположного конца короба в него несколько минут (от 2 до 10) подают при работающем пылесосе пар или капельно-воздушную смесь. Затем образец охлаждают при комнатной температуре и взвешивают. Процедуру насыщения повторяют до тех пор, пока не будет Горшков А.С., Соколов Н.А. Несоответствие российских и международных стандартов при определении расчетных значений теплопроводности строительных материалов и изделий

достигнута весовая влажность в интервале между 0,7 и 1,3 от требуемой для данных условий эксплуатации (А и Б). После достижения заданной влажности образец помещают в герметичный пакет и укладывают его горизонтально на плоскую поверхность. Ежечасно в течение 4 ч образец переворачивают вертикально (на ребро) и выдерживают до проведения испытаний на теплопроводность:

- не менее 2 суток – материалы на основе стекловолокна и минерального волокна;
- не менее 14 суток – материалы на основе пенопластов и пенокаучуков.

Отметим недостатки данного метода увлажнения и определения на его основе расчетных показателей теплопроводности строительных материалов, демонстрирующие его неэффективность. В данном методе увлажнения не указано ни требуемое давление, при котором должен работать пылесос, ни способ подачи пара, ни его требуемый объем. Метод не позволяет добиться равномерного распределения влаги в материале и, кроме того, может повредить целостность некоторых материалов в процессе их насыщения влагой под давлением. Погрешность данного метода значительна. Определение расчетных значений теплопроводности по методике приложения Е [4] приводит к завышению (ухудшению) расчетных теплотехнических характеристик теплоизоляционных материалов, следствием чего является необоснованное увеличение на 10–15% толщины теплоизоляционного слоя [7, 8]. Поэтому указанный метод нельзя рассматривать в качестве основы для достоверной оценки расчетных значений теплопроводности.

С 1 июля 2013 года на территории России Приказом Министерства регионального развития РФ от 30 июня 2012 г. №265 введена в действие актуализированная редакция СНиП 23-02 [3] – свод правил СП 50.13330 «Тепловая защита зданий» [9]. В приложении С СП 50.13330 [9] приведена таблица С.1, в которой расчетные теплотехнические характеристики оставлены практически без изменений по сравнению с введенными в приложении Д СП 23-101 [4]. В таблице С.1 также определены условия эксплуатации А и Б и для них даны расчетные значения массового содержания влаги в материале и соответствующие им значения теплопроводности (для условий эксплуатации А и Б).

Следует отметить, что традиция разбиения территории страны на зоны влажности и условия эксплуатации (А и Б) уходит корнями в 60-е годы прошлого столетия, когда была проведена масштабная работа по взятию образцов строительных материалов из конструкций зданий и определению массового содержания влаги в них. Однако с тех пор прошло уже более 50 лет. За это время существенно изменилась номенклатура выпускаемых строительных материалов и изделий, появились новые виды строительных материалов, исчезли многие старые. При моделировании процессов тепломассопереноса через ограждающие конструкции появились новые подходы к их проектированию, например, укладка пароизоляционных барьеров, антиконденсатных пленок и ветрозащитных мембран, применение гидрофобизированных отделочных составов. Тем не менее, авторы нового свода правил никак не отреагировали на эти глубинные изменения в строительной отрасли и снова выпустили стандарт, соответствующий в большей степени 60-м годам прошлого века, чем современным условиям строительной отрасли. Опять вводятся значения массового содержания влаги в строительных материалах, не подтвержденные ни практикой, ни расчетными методами.

Доходит до парадоксов, когда в своде правил [4, 9], например, для газобетона расчетное значение массового содержания влаги в материале принимается равным 8 и 12% (для условий эксплуатации А и Б соответственно), а в ГОСТ 31359 [10] для тех же изделий – 4 и 5%.

В таблице С.1 приложения С [9] есть и явные несоответствия, подтвержденные испытаниями, проведенными в лаборатории теплофизических испытаний ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». Приведенные в таблице С.1 [9] расчетные теплотехнические показатели строительных материалов и изделий не позволяют обеспечить точность, достаточную для разделения по классам энергосбережения жилых и общественных зданий в соответствии с таблицей 15 [9] (класс «С» допускает отклонение от нормы $\pm 5\%$). В то же время приведенная в таблице С.1 [9] теплопроводность экструдированного пенополистирола занижена на 10–15% (действительное значение теплопроводности этого материала хорошо известно, т. к. из него изготавливают эталонные меры теплопроводности). Минимальное значение расчетной теплопроводности пенополиуретана, судя по таблице С.1, составляет 0,029 Вт/(м·К), тогда как теплопроводность изделий из пенополиуретана марки “SPU Sauna-Satu”, поставляемой на российский рынок финской компанией SPU Оу, подтвержденная испытаниями ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» [11] и Испытательного центра «БЛОК» ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ» [12], имеет значение 0,022±0,023 Вт/(м·К). То есть в данном случае расчетные данные завышены на 26% [13].

Горшков А.С., Соколов Н.А. Несоответствие российских и международных стандартов при определении расчетных значений теплопроводности строительных материалов и изделий

Результаты теплотехнических испытаний, проводимых в течение двух лет на образцах марки “SPU Sauna Satu” в лаборатории ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, представлены на рисунке 1. Здесь каждой точке соответствует среднее значение, полученное по результатам испытаний пяти образцов. Разброс данных на рисунке 1 обусловлен отклонением от плоскостности рабочих граней образцов, предоставленных для испытаний. В любом случае разброс не превышает погрешности измерений (не более $\pm 1\%$).

Кроме того, следует отметить, что СП 50.13330 [9] не гармонизирован с отечественными нормативными документами, регламентирующими правила обозначения и наименования физических величин (ГОСТ 8.417 [14], РМГ 29-99 [15]). Так, единица измерения теплопроводности – Вт/(м·К), любого теплового (термического) сопротивления – м²·К/Вт, коэффициента теплоотдачи – Вт/(м²·К) и т. д. Во всех нормативных документах стран СНГ давно используются правильные обозначения (см., например, СТБ ЕН 12667 [16], СТБ ЕН 12939 [17] (Республика Беларусь) и др.).

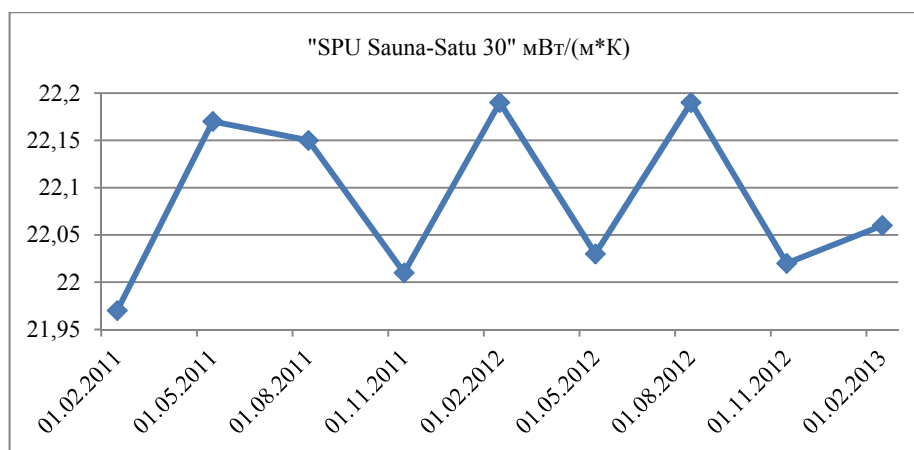


Рисунок 1. Результаты измерений теплопроводности изделий из пенополиуретана марки “SPU Sauna-Satu”

Европейский союз

Согласно п. 5.1 международного стандарта ISO 6949 [18] при расчете термического сопротивления однородного слоя теплоизоляции (thermal resistance of homogeneous layers – R-value) учитывается расчетное значение теплопроводности материала (design thermal conductivity of the material), рассчитываемое согласно международному стандарту ISO 10456 [19].

Стандарт ISO 10456 [19] устанавливает порядок определения заявленных (declared thermal values) и расчетных (design thermal values) значений теплотехнических характеристик термически однородных строительных материалов и изделий, а также правила преобразования значений, полученных при одних условиях, в соответствующие значения, действительные при других условиях применения материалов.

Заявленное значение теплопроводности (declared thermal conductivity) определяется на основе измерения показателя при заданной температуре и влажности, соответствующих определенным условиям, согласно методу испытаний с учетом срока службы материала или изделия в стандартных условиях эксплуатации. Заявленное значение теплопроводности определяют для условий а) или б) согласно таблице 1 стандарта ISO 10456 [19] (см. данные таблицы 3) при стандартной температуре по методам I (10 °C) или II (23 °C).

Измерение теплопроводности или термического сопротивления осуществляется по одной из следующих методик:

- ISO 8302 [20] или эквивалентному национальному методу;
- ISO 8301 [21] или эквивалентному национальному методу;
- ISO 8990 [22].

Среднюю температуру испытаний выбирают таким образом, чтобы применение коэффициентов преобразования по температуре не приводило к изменению значения более чем на 2% от значения, полученного в ходе измерений при испытаниях.

Расчетное значение теплопроводности (design thermal conductivity) – это теплопроводность строительного материала или изделия в конкретных условиях эксплуатации в составе ограждающей конструкции здания. Расчетное значение теплопроводности может быть получено на основании заявленных, измеренных или табличных значений.

Таблица 3. Условия для определения заявленного значения тепловых характеристик

Наименование параметра	Условия испытаний			
	I (10 °C)		II (23 °C)	
	а)	б)	а)	б)
Стандартная температура	10 °C	10 °C	23 °C	23 °C
Влага	$u_{\text{сух}}^a$	$u_{23,50}^b$	$u_{\text{сух}}^a$	$u_{23,50}^b$
Старение	Условия старения	Условия старения	Условия старения	Условия старения

$u_{\text{сух}}^a$ – влагосодержание после высушивания образцов до постоянной массы в соответствии с техническими условиями или стандартами на конкретный материал;

$u_{23,50}^b$ – реальное влагосодержание после кондиционирования образцов до постоянной массы при температуре воздуха 23 °C и относительной влажности 50%.

В качестве измеренных значений могут быть использованы:

- значения, непосредственно полученные в результате измерений по стандартизированной методике (ISO 8302 [20], ISO 8301 [21], ISO 8990 [22]);
- значения, полученные косвенным методом корреляции по какой-либо существенной характеристике материала, например, плотности.

Если условия определения заявленных, измеренных или табличных значений можно условно считать соответствующими фактическим условиям эксплуатации изделий или материалов в составе наружной ограждающей конструкции, то эти значения можно использовать в расчетах по стандарту ISO 6949 [18] в качестве расчетных. В ином случае следует действовать согласно разделу 7 стандарта ISO 10456 [19], т.е. производить преобразование теплотехнических характеристик, определенных при одних условиях (λ_1 , R_1) в значения, действительные для других условий (λ_2 , R_2), по следующим формулам:

- для теплопроводности:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot F_T \cdot F_m \cdot F_a, \quad (1)$$

- для термического сопротивления:

$$R_2 = \frac{R_1}{F_T \cdot F_m \cdot F_a}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) приняты следующие обозначения:

F_T – поправочный коэффициент влияния температуры на теплопроводность и термическое сопротивление строительного материала или изделия;

F_m – поправочный коэффициент влияния влажности материала на его теплопроводность и термическое сопротивление;

F_a – поправочный коэффициент влияния старения строительного материала на теплопроводность и термическое сопротивление.

Поправка теплопроводности по температуре F_T определяется по формуле:

$$F_T = e^{f_T \cdot (T_2 - T_1)}, \quad (3)$$

где f_T – температурный коэффициент, численные значения которого для теплоизоляционных материалов и материалов, предназначенных для кладок, приведены в приложении А стандарта ISO 10456 [19];

T_1 – температура при условиях 1 (например, заявленных в таблице 3);

T_2 – температура при условиях 2 (фактических).

Расчетные значения теплопроводности для фактических условий следует определять для средней температуры материала, используемого в конструкциях, эксплуатируемых в соответствующих климатических условиях.

Поправку теплопроводности материала F_m в зависимости от влажности определяют по формулам:

а) в зависимости от массового содержания влаги в материале:

$$F_m = e^{f_u \cdot (u_2 - u_1)}, \quad (4)$$

где f_u – коэффициент влияния массового содержания влаги в материале;

u_1 – массовое содержание влаги в материалах при условиях 1;

u_2 – массовое содержание влаги в материалах при условиях 2.

б) в зависимости от объемного влагосодержания:

$$F_m = e^{f_\psi \cdot (\psi_2 - \psi_1)}, \quad (5)$$

где f_ψ – коэффициент влияния массового содержания влаги в материале;

ψ_1 – объемное влагосодержание при условиях 1;

ψ_2 – объемное влагосодержание при условиях 2.

Расчет температурно-влажностного режима строительных конструкций выполняется по методике стандарта ISO 13788 [23].

Коэффициенты f_u и f_ψ для различных строительных материалов и изделий приведены в таблице 4 стандарта ISO 10456 [19]. Поправочные коэффициенты могут быть также получены на основе измеренных значений при условии, что методы определения поправок, указанных в таблице 4 стандарта ISO 10456 [19], утверждаются независимыми испытательными лабораториями.

В стандарте ISO 10456 [19] не приведены коэффициенты влияния для получения поправки теплопроводности в зависимости от температуры, связанные со старением материала или изделия F_a . Методы определения значений, учитывающих старение, и соответствующие им коэффициенты или поправки приводятся в стандартах на конкретные виды изделий.

Старение зависит от вида, структуры и толщины материала, а также наличия облицовок, применяемого вспенивающего реагента и температуры эксплуатации. Если применяют поправку теплопроводности в зависимости от старения F_a , то теплотехнические характеристики вычисляют с учетом старения в течение времени, составляющего не менее половины срока службы данного строительного изделия или материала. Срок службы, как правило, принимают равным 50 годам.

Таким образом, различие заявленной и расчетной теплопроводности заключается в том, что заявленные значения теплопроводности устанавливаются для заранее выбранных стандартных условий (см. данные таблицы 3). Расчетные значения теплопроводности устанавливаются по формуле (1) или (2) пересчетом из заявленной теплопроводности, применительно к заданной конструкции наружного ограждения и к конкретным фактическим условиям ее эксплуатации, которые определяются расчетом [23] при заданных параметрах микроклимата в помещениях и внешних условиях эксплуатации (параметрах наружного воздуха). При определении расчетных теплотехнических показателей строительных материалов на основе заявленных, при использовании одной и той же статистической оценки [24] заявленные значения пересчитывают в расчетные в соответствии с фактическими условиями эксплуатации материала или изделия в составе ограждающей конструкции.

Горшков А.С., Соколов Н.А. Несоответствие российских и международных стандартов при определении расчетных значений теплопроводности строительных материалов и изделий

Все поправочные коэффициенты, установленные в стандарте ISO 10456 [19], получены на основании обработки большого количества исследований и испытаний [25–32]. Безусловно, климатические параметры России могут отличаться от условий стран Европы, но сам подход к определению расчетных значений теплофизических величин, принятый в европейских стандартах, следует признать более обоснованным и методически правильным, в большей степени исключающим ошибку при определении расчетных показателей ограждающих конструкций.

Из сравнения российского и европейского методов определения расчетных характеристик строительных материалов и изделий мы видим, что последний представляется более обоснованным и грамотным. В российском методе расчетные условия в большинстве случаев принимаются без какого-либо обоснования и подтверждения. В европейском методе расчетные условия учитывают большее количество параметров – не только влагосодержание изделий, но еще температуру эксплуатации и старение материала или изделия. Для зданий, рассчитываемых на срок эксплуатации более 50 лет, совершенно неважно, какими свойствами обладают материалы сразу после выпуска и в первые несколько лет эксплуатации. Важно, какими свойствами они будут обладать через 10, 20 и более лет.

Заключение

Одной из задач разработки актуализированных версий российских СНиПов была гармонизация их с международными стандартами. Как мы видим из приведенного выше сравнения, при разработке СП 50.13330 [9] гармонизация не была осуществлена даже в минимальном объеме, т. е. поставленные задачи Правительства РФ выполнены не были. Со вступлением нашей страны в ВТО эти обстоятельства создают определенные барьеры. Вряд ли эти несоответствия станут барьерами для продвижения иностранных технологий и методов проектирования на российский рынок, но однозначно они ставят барьер для продвижения российских технологий и товаров на рынки иностранных государств.

Следует отметить, что российский ГОСТ 7076 [1] соответствует основным положениям европейских стандартов ISO 8301 [21] и ISO 8302 [20]. Поэтому при определении теплопроводности строительных материалов и изделий в сухом состоянии различия в результатах испытаний могут зависеть только от погрешности аппаратуры, на которой они проводятся. Что касается оценки расчетных значений теплопроводности, то в отношении их определения российские методы существенно отличаются от принятых в Европе. И как показывает представленный выше сравнительный анализ, методы определения расчетных значений теплопроводности, принятые в международных стандартах, являются более обоснованными. Поэтому логичным выглядит следующий шаг, направленный на сближение международных и российских нормативов в части определения расчетной теплопроводности, а именно их гармонизация.

Литература

1. ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме.
2. ГОСТ 17177-94. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний.
3. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий.
4. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий.
5. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
6. ГОСТ 24816-81. Материалы строительные. Метод определения сорбционной влажности.
7. Шойхет Б.М. Нормирование расчетных характеристик теплоизоляционных материалов ограждающих конструкций зданий // Энергосбережение. 2010. №8. С. 66–69.
8. Шойхет Б.М., Ставрицкая Л.В. О расчетных характеристиках теплоизоляционных материалов // Энергосбережение. 2003. №1. С. 72–73.
9. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003.
10. ГОСТ 31359-2007. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия.
11. Протокол ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» №01 от 10 февраля 2011 г. измерений теплопроводности продукции SPU Oy – плит из пенополиуретана “SPU Sauna-Satu 30” при 10 °С.

12. Протокол контрольных испытаний ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (Испытательный центр «БЛОК») №58 от 17.12.2012.
13. Соколов Н.А. Национальная база данных по теплопроводности теплоизоляторов // Материалы 4-й научно-практической конференции «Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности», 28–30 мая 2013 г., Санкт-Петербург, 2013. С. 5–7.
14. ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.
15. РМГ 29-99. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
16. СТБ ЕН 12667-2007. Теплотехнические характеристики строительных материалов и изделий. Определение сопротивления теплопередаче по методу защищенных термопластин и тепломера. Изделия с высоким и средним сопротивлением теплопередаче.
17. СТБ ЕН 12939-2007. Теплотехнические свойства строительных материалов и изделий. Определение теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме с использованием прибора, включающего плиту, горячую охранную зону и тепломер. Материалы утолщенные с высокой и средней теплопроводностью.
18. ISO 6949:2007 (E) Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method.
19. ISO 10456:2007 (E) Building materials and products – Hydrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.
20. ISO 8302:1991 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus.
21. ISO 8301:1991 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus.
22. ISO 8990:1994 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal transmission properties – Calibrated and guarded hot box.
23. ISO 13788:2012 Hydrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical humidity and interstitial condensation – Calculation methods.
24. ISO 16269-6:2005 Statistical interpretation of data – Part 6: Determination of statistical tolerance intervals.
25. Anderson B.R. [et al]. Analysis, selection and statistical treatment of thermal properties of building materials for the preparation of harmonized design values / BRE Scottish Laboratory, for Directorate General DG XII of the European Commission, Contract SMT4-CT96-2050, March, 1999.
26. Campanale M. Determination of thermal resistance of thick specimens by means of a guarded hot plate or heat flow meter // Congresso Nazionale ATI, Taormina. Vol. 1. Pp. 441–454.
27. Campanale M., De Ponte F. Temperature Effect on Steady-State Heat Transfer Properties of Insulating Materials // Congresso Nazionale ATI, Cagliari. 1990. Pp. IIA-37.
28. Bisiol B., Campanale M., Moro L. Theoretical and experimental characterization of insulating cork boards // Congresso Nazionale ATI. Saint Vincent, 12–15 Settembre 1995, Vol. 1. Padova: SGEditoriali, 1995. Pp. 247–260.
29. Campanale M., De Ponte F., Moro L., Zardo V. Separation of radiative contribution in heat transfer in polyurethanes // Proceedings of International Conference “CFCs, The day after”. Padova, 21–23 Settembre 1995. Padova: SGEditorial, 1995.
30. Campanale M., De Ponte F., Moro L. Theoretical characterization of homogeneous cellular plastic materials // Advances in thermal insulation: proceedings of the Eurotherm seminar no.44. Espinho–Portugal, 18–20 October 1995. Portugal, 1995.
31. De Ponte F. Arduini M. Combined Radiation and Conduction Heat Transfer in Insulating Materials // Proceedings 10th ETPC. High Temperatures – High Pressures. 1986. Vol. 19. Pp. 237–249.
32. Kumaran M.K. Material Properties // Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts. Vol. 3. Task 3. Leuven: Laboratorium Bouwfysica, Departement Burgerlijke Bouwkunde, 1996. 135 p.

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

*Николай Александрович Соколов, Санкт-Петербург, Россия
+7(812)323-96-32; эл. почта: n.a.sokolov@vniim.ru*

© Горшков А.С., Соколов Н.А., 2013

Свойства микрокремнезема из природного диатомита и его применение в производстве вакуумных теплоизоляционных панелей

*Д.т.н., профессор, зав. кафедрой строительных конструкций В.П. Селяев;
к.физ.-мат.н., доцент В.А. Неверов;
аспирант О.Г. Маштаев;
аспирант А.В. Колотушкин,
ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»*

Ключевые слова: диатомит; дисперсный микрокремнезем; вакуумная изоляционная панель

Кремнезем – одно из самых распространенных веществ в природе, оно широко используется в различных отраслях современной индустрии, в том числе строительной. Искусственные строительные материалы, производимые на основе кремнезема, такие как цемент, бетон, силикатные стекла, различные огнеупоры и теплоизоляция, грубая и тонкая керамика, имеют огромное хозяйственное значение. Наблюдается постоянный рост числа работ, связанных с получением различных коллоидных и микрогетерогенных форм кремнезема с развитой пористой поверхностью – порошков, зольей, гелей. Эти исследования послужили основой создания технологических процессов производства кремнийсодержащих материалов – микрокремнеземов, аэросила, белой сажи, кремнеземных волокон и т. д., которые уже нашли применение как сорбенты, селективные поглотители, наполнители (в том числе и армирующие), загустители дисперсных сред. Основными факторами, определяющими такое разнообразие физико-химических свойств кремнезема, являются его пористая структура и развитая поверхность. Растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства кремнезема подробно описаны в работе [1].

Авторами разработана технология получения золь-методом нанопорошков микрокремнезема на основе природного диатомита [2]. Задачи исследования: оценить свойства полученного порошка микрокремнезема; выявить его преимущества (кроме доступности) перед отечественными и зарубежными порошками микрокремнезема; оценить возможность его применения для создания вакуумных теплоизоляционных панелей и других теплоизоляционных материалов.

Согласно концепции долгосрочного развития Российской Федерации [3] особое внимание должно уделяться инновационным разработкам эффективных энергосберегающих систем для различных областей промышленности, строительства, ЖКХ и т. д. Современный рынок предлагает достаточно широкий выбор теплоизоляционных материалов для ограждающих конструкций зданий, позволяющих значительно уменьшить потери тепловой энергии при их эксплуатации. При общемировой тенденции снижения энергопотребления зданиями наиболее перспективным представляется использование вакуумных изоляционных панелей (ВИП) [4–6]. В качестве основного компонента наполнения сердцевины таких панелей используются высокопористые материалы – полидисперсные зернистые порошки, физические основы теплопроводности которых подробно рассмотрены в работах Г.Н. Дульнева [7, 8]. Так, выпускаемая промышленно вакуумная изоляционная панель FRONT-VIP компании VACU-ISOTEC KG (Радеберг, Германия) [9] имеет наполнитель в виде высокодисперсного диоксида кремния, между шарообразными нанопористыми частицами которого реализуются практически точечные переходы. Это значительно снижает теплопроводность каркаса зернистой системы, а ее вакуумирование блокирует конвективную составляющую теплопроводности. В качестве наполнителя ВИП применяется и пирогенный кремнезем, получаемый пламенным гидролизом четыреххлористого кремния высокой чистоты [10]. Однако пирогенный кремнезем имеет сложную технологию производства и высокую стоимость. Поэтому его замена, без ухудшения эксплуатационных качеств, на микрокремнезем из диатомита экономически и технологически обоснована. Для того чтобы замена была адекватной, необходимо обеспечить подобие свойств применяемых порошков. Именно с этой целью были проведены исследования строения и свойств микрокремнезема, полученного золь-методом из природного диатомита.

Селяев В.П., Неверов В.А., Маштаев О.Г., Колотушкин А.В. Свойства микрокремнезема из природного диатомита и его применение в производстве вакуумных теплоизоляционных панелей

Строение и свойства аморфного диоксида кремния различного происхождения достаточно подробно изучены. В работе [11] по данным измерения плотности большого набора образцов показано, что сферы SiO_2 не сплошные, а состоят из нескольких плотноупакованных сфер меньшего размера. Высказано предположение, что малые сферы могут иметь подобную субструктуру. Результатом такой укладки сферических частиц диоксида кремния будет наличие тетраэдрических и октаэдрических пустот различного размера: $\sim 40\ldots 80$ нм (большие пустоты первого порядка), $7\ldots 14$ нм (средние пустоты второго порядка) и $2\ldots 4$ нм (малые пустоты третьего порядка) (классификация авторов [11]). Кроме того, в работе [11] приводятся результаты измерений теплопроводности аморфного кремнезема (опала) в широком интервале температур. Внутренняя структура сферических частиц опала (аморфного диоксида кремния) исследовалась методом электронной микроскопии [12]. Авторам удалось показать, что относительно крупные (~ 1000 нм) сферические частицы кремнезема состоят из более мелких вторичных частиц диаметром ~ 100 нм, которые в свою очередь составлены из первичных частиц $\sim 5\ldots 10$ нм. При этом крупные частицы SiO_2 могут содержать центральное ядро, состоящее из первичных частиц и окруженное несколькими рядами вторичных частиц.

Исследования Н. Giesche [13] показали, что размеры субчастиц сферических частиц диоксида кремния заметно меньше 10 нм и могут изменяться от образца к образцу и не всегда регистрироваться методом электронной микроскопии. Данный вывод согласуется с результатами Р. Айлера [1], который полагает, что размер субчастиц составляет менее 5 нм.

В работе [14] представлена оболочечная модель строения частиц аморфного диоксида кремния, полученного методом Штобера – Финка – Бона. По мнению авторов, частица SiO_2 состоит из центрального ядра, сложенного первичными частицами диаметром $5\ldots 10$ нм, и оболочек, состоящих из слоев вторичных частиц размером $20\ldots 40$ нм, покрытых слоями первичных частиц. Рассмотрены варианты распределения первичных частиц в оболочках и топология поровой системы, возникающей при этом. Фрактальная и поровая структуры частиц кремнезема в значительной степени определяются условиями синтеза и параметрами среды, в которой он происходит [15].

Следовательно, наполнитель сердцевины ВИП должен представлять собой полидисперсную систему аморфных пористых частиц нано- и субмикрометровых размеров с развитой поверхностью и сетью пустот различного масштаба. Этим требованиям отвечают частицы дисперсного микрокремнезема, которые могут быть получены из природных минеральных порошков – недорогого местного сырья, например, диатомита Атемарского месторождения (Республика Мордовия), который представляет собой сцементированную породу серого цвета, состоящую из панцирей диатомовых водорослей. Химический состав этого диатомита представлен следующими оксидами (в процентном отношении): SiO_2 – 79,50; CuO – 2,54; MgO – 1,49; R_2O_3 – 8,84; Fe_2O_3 – 3,36; Al_2O_3 – 4,01; TiO_2 – 1,47; прочие – 7,90; истинная плотность – 2200 кг/м^3 .

Исследование частиц дисперсного микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения

Частицы дисперсного микрокремнезема из Атемарского диатомита получали путем выделения кремниевой кислоты из коллоидно-растворенного состояния в осадок [2]. Для этого диатомитовую породу сплавляли со щелочными плавнями (K_2CO_3 – Na_2CO_3) в муфельной печи при температуре 800°C . Полученный таким образом сплав выщелачивали водой и разбавленным раствором соляной кислоты. Образовавшийся тонкодисперсный порошок белого цвета подвергся комплексному исследованию с целью определения его теплофизических и структурных характеристик. Анализ элементного состава (в пересчете на оксиды) полученного микрокремнезема показал, что он состоит в основном из диоксида кремния (в процентном отношении): SiO_2 – 97,82; Fe_2O_3 – 0,16; Al_2O_3 – 0,46; TiO_2 – 0,31; K_2O – 0,50; прочие – 0,75.

Исследование структуры осажденного микрокремнезема проводилось методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-6 (CuK_α – излучение) в интервале углов дифракции 2θ $20\ldots 90^\circ$ [16, 17]. Дифрактограмма имеет типичный для аморфного материала вид – наблюдается широкое диффузное гало в интервале углов $20\ldots 40^\circ$, что характерно для дисперсных материалов, в которых отсутствует дальний порядок в расположении составляющих их структурных единиц [18].

ИК-спектры поглощения микрокремнезема, выделенного из Атемарского диатомита, получены на Фурье-спектрометре «Инфралюм ФТ-02» в диапазоне волновых чисел Селяев В.П., Неверов В.А., Маштаев О.Г., Колотушкин А.В. Свойства микрокремнезема из природного диатомита и его применение в производстве вакуумных теплоизоляционных панелей

450...4000 cm^{-1} . Вид спектра соответствует аморфному кремнезему: кроме линий, соответствующих колебаниям Si–O связей, присутствует широкая полоса поглощения в области волновых чисел 3300...3600 cm^{-1} и более узкая полоса в пределах 1630...1640 cm^{-1} , которые соответствуют валентным и деформационным колебаниям адсорбированных молекул воды. Достаточно широкая полоса поглощения $\sim 950 \text{ cm}^{-1}$ характеризует либрационные колебания молекул воды. Всё это указывает на то, что частицы исследуемого микрокремнезема имеют поверхность с развитым поровым пространством, что и определяет многие свойства данной дисперсной системы.

Гранулометрический анализ порошка микрокремнезема показал, что он представляет собой полидисперсную систему, состоит из частиц, крупность которых лежит в двух интервалах – 330...450 нм и 2...640 мкм, причем на первый интервал приходится около 17% их общего числа, а 75% частиц микрометрового масштаба имеют крупность 7...300 мкм.

Для исследования процессов, происходящих при нагревании дисперсного микрокремнезема, мы воспользовались данными термогравиметрического анализа [19, 20], проведенного в интервале температур 25...1200 °C. Скорость увеличения температуры составляла 10 °C/мин. При нагревании аморфного микрокремнезема происходит потеря массы образца в три этапа. На первом, в интервале температур 66,9...165,2 °C, теряется 21,5% исходной массы – происходит интенсивное удаление адсорбированной воды, содержащейся в материале в силу особенностей его синтеза [15]. Пик этого эндотермического процесса приходится на 120,5 °C, а его высота достигает 2,9 °C. Второй, менее выраженный, экзотермический пик наблюдается на 315,7 °C, его высота 0,7 °C, а интервал эффекта приходится на 248,6...406,0 °C. Образец при этом теряет еще 5,7% массы. Третий этап нагрева в интервале температур 420,5...494,0 °C приводит к потере еще 1,7% массы, что связано, по-видимому, как и на втором этапе, со структурными перестройками полиморфных модификаций диоксида кремния. Таким образом, при нагревании дисперсного микрокремнезема до температур выше 500 °C теряется около 31% его исходной массы, в основном за счет удаления адсорбированных молекул воды. Следовательно, для дегидратации данного порошка необходимо его прокалывание при температурах 400...600 °C. Аналогичные результаты термогравиметрического анализа получены и для порошков синтетических опалов [21], для которых также характерна структурная модификация в процессе термообработки.

Известно, что теплопроводность дисперсных систем определяется многими факторами: теплопроводностью твердого каркаса, конвекцией газа в поровом пространстве и его давлением, излучением, пористостью каркаса и отдельных частиц [6, 7, 10, 22, 23].

На рисунке 1 представлены графики зависимости теплопроводности от плотности засыпки порошков природного диатомита Атемарского месторождения (кривая 1), микрокремнезема, полученного из этого диатомита методом, описанным в работе [15] (кривая 2) и микрокремнезема, прокаленного при температуре 500 °C в течение 2 часов (кривая 3). В области значений плотности засыпки 200...340 кг/м^3 для всех дисперсных порошков наблюдается практически линейное увеличение эффективной теплопроводности, что, видимо, связано с уменьшением их пористости и, как следствие, с увеличением кондуктивной составляющей теплопроводности. Минимальные значения эффективной теплопроводности в указанном диапазоне изменений плотности имеет дисперсный микрокремнезем, прокаленный при 500 °C. Это, вероятно, связано с удалением адсорбированных молекул воды с поверхности частиц кремнезема, а также из макро- и мезопор.

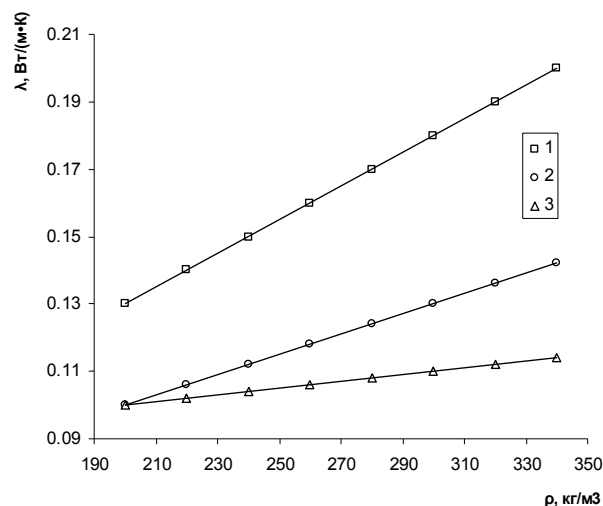


Рисунок 1. Зависимость теплопроводности от плотности засыпки для диатомита Атемарского месторождения (кривая 1), микрокремнезема (кривая 2) и термообработанного микрокремнезема (кривая 3)

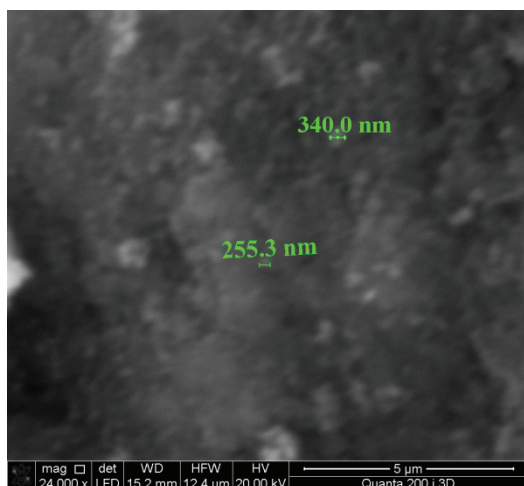


Рисунок 2. Микрофотография частицы аморфного микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения

Исследование тонкой структуры поверхности частиц микрокремнезема проведено методом электронной микроскопии [24] при увеличении в 24000 раз. На микрофотографии (рис. 2) отчетливо видно, что поверхность частиц покрыта порами различных размеров и форм микро- и нанометрового масштабов. Кроме того, наблюдаются протяженные, извилистые углубления, имеющие складчатую структуру, а также агломераты частиц аморфного кремнезема в виде диффузных шароподобных образований.

Структурные неоднородности частиц микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения, исследовались методом малоуглового рентгеновского рассеяния [25–27]. Индикатриса рассеяния рентгеновских лучей имеет вид плавно спадающей кривой, что характерно для системы неоднородностей с разными линейными размерами: зная интервал регистрируемых значений векторов рассеяния можно оценить их масштаб – 2...60 нм.

Высокие значения интенсивности рассеяния объясняются резким контрастом, вызванным большой разницей между плотностью частиц микрокремнезема и порами, которые и следует в данном случае считать рассеивающими неоднородностями. Рисунок 3 демонстрирует поведение индикатрисы малоуглового рентгеновского рассеяния структурными неоднородностями аморфного микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения.

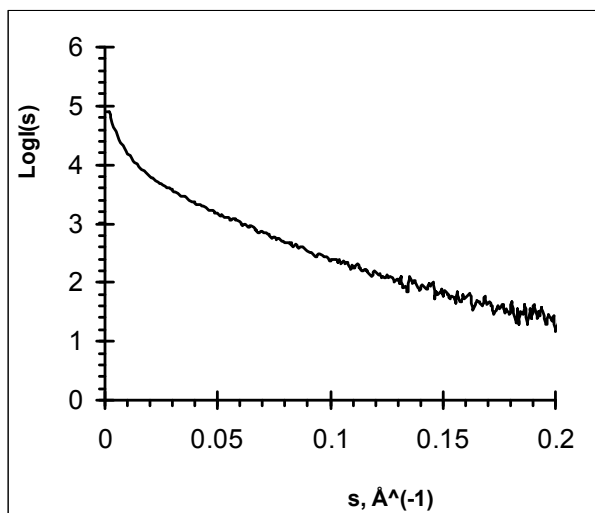


Рисунок 3. Экспериментальная кривая малоуглового рентгеновского рассеяния

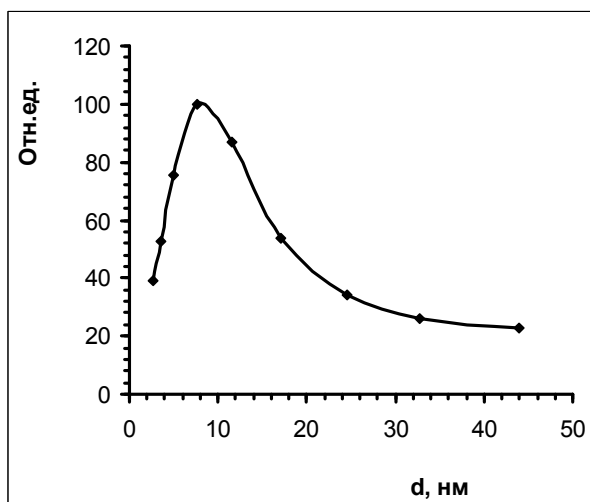


Рисунок 4. Функция распределения по размерам рассеивающих неоднородностей (пор) частиц микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения

Радиусы инерции рассеивающих неоднородностей (пор) и их линейные размеры определялись методом Гинье [28]. Так как поры (и их кластеры) имеют разные линейные масштабы, мы построили приближенную функцию распределения по размерам с использованием метода Китайгородского [25, 29] (рис. 4). Максимум этой функции приходится на значение $d \sim 8$ нм, среднее значение наблюдаемых неоднородностей составляет ~ 12 нм, разброс линейных размеров, оцениваемый на полувысоте кривой распределения – 3...18 нм.

Характерной особенностью кривой распределения пор по размерам аморфного микрокремнезема является наличие протяженного «хвоста» в области больших значений d , что, по-видимому, свидетельствует об относительно небольшом количестве крупномасштабных неоднородностей, участвующих в малоугловом рассеянии, а максимальную долю объема пор составляют наиболее мелкие, порядка 2...20 нм. Полученные результаты хорошо согласуются с

данными работ [13, 30, 31], в которых обсуждается оболочечная модель строения частиц аморфного диоксида кремния, а пустоты (поры) с близкими к найденным нами линейными размерами характерны для плотноупакованных первичных частиц диоксида кремния при их тетраэдрической, октаэдрической или кубической укладке.

Анализ индикатрисы рассеяния, перестроенной в двойные логарифмические координаты, позволил установить, что в интервале значений векторов $s \sim 0,016...0,160 \text{ \AA}^{-1}$ наблюдается фрактальный режим рассеяния [32]. На кривой $\log I(s) - \log(s)$ выделяются три прямолинейных участка, различающихся углом наклона $\alpha = \Delta \log I(s) / \Delta \log(s)$. Интервалы значений векторов рассеяния, угол наклона прямой, фрактальная размерность и линейные размеры рассеивающих образований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры малоуглового рассеяния, фрактальные размерности и линейные масштабы неоднородностей (пор) аморфного микрокремнезема

Образец \ Параметр	$\Delta S, \text{ \AA}^{-1}$	α	D	D_s	d, нм
Аморфный микрокремнезем	0,016 – 0,025	2,32	2,32		25 - 40
	0,025 – 0,080	2,13	2,13		8 - 25
	0,080 – 0,160	3,36		2,64	4 - 8

Точками кроссовера кривой $\log I(s) - \log(s)$ можно считать значения s 0,025 и 0,080 $\text{\AA}^{-1}$. Фрактальная размерность неоднородностей с линейными размерами $\sim 25...40$ нм имеет значение $D = 2,32$, а более мелкие образования $\sim 8...25$ нм – 2,13. Неоднородности (поры) указанных линейных масштабов представляют собой массовые (объемные) фракталы с негладкой, изрезанной поверхностью. Рассеяние от такого рода образований дисперсной системы по характеру близко к рассеянию обычной трехмерной частицы соответствующего размера с резкими межфазными границами.

Прямолинейный фрагмент кривой $\log I(s) - \log(s)$ в интервале s 0,080...0,160 $\text{\AA}^{-1}$ дает значение параметра $\alpha = 3,36$. Отсюда следует, что наиболее маломасштабные поры (4...8 нм) обладают фрактальной поверхностью раздела с размерностью $D_s = 2,64$. Такое значение фрактальной размерности соответствует достаточно сильно изрезанной, складчатой поверхности, в то время как совершенно гладкой поверхности соответствует $D_s = 2,0$.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- частицы дисперсного кремнезема нано- и микроразмерного масштаба могут быть получены из природного диатомита, например, Атемарского месторождения (Республика Мордовия), который на $\sim 80\%$ состоит из аморфного диоксида кремния;
- в составе частиц порошка, полученных золь-методом, преобладает диоксид кремния (до 97%);
- согласно данным рентгеноструктурного анализа диоксид кремния дисперсного микрокремнезема представлен аморфной фазой;
- инфракрасные спектры микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения, содержат полосы поглощения, характерные для валентных, деформационных и либрационных колебаний адсорбированных молекул воды, частично заполняющих поровое пространство частиц дисперсного кремнезема;
- анализ гранулометрических характеристик аморфного микрокремнезема показал, что в состав этого полидисперсного материала входит до 17% частиц (агломератов) масштаба 330...450 нм;
- термогравиметрические измерения доказывают возможность частичной дегидратации порошка дисперсного микрокремнезема при его прокаливании при температурах $\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$;
- эффективная теплопроводность порошка микрокремнезема линейно увеличивается в зависимости от плотности (в интервале 200–360 кг/м^3); аналогичная зависимость наблюдается и для порошкообразного природного диатомита Атемарского месторождения, что объясняется уменьшением порового пространства системы с взаимопроницаемыми компонентами и, как следствие, увеличением кондукционной составляющей теплопроводности. При одинаковой плотности теплопроводность порошка микрокремнезема меньше, чем у природного диатомита.

Селяев В.П., Неверов В.А., Маштаев О.Г., Колотушкин А.В. Свойства микрокремнезема из природного диатомита и его применение в производстве вакуумных теплоизоляционных панелей

- методом малоуглового рентгеновского рассеяния изучены структурные неоднородности частиц диоксида кремния, среднее значение размеров которых ~ 12 нм, а линейные масштабы лежат в интервале 2...20 нм, что соответствует размерам пустот (пор) между первичными сферическими частицами при их упаковке в процессе самоорганизации и формировании частиц диоксида кремния нано- и микрометровых размеров;
- рассеивающие неоднородности микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения, представляют собой массовые фракталы, а поверхности раздела поры – твердое тело, имеющее фрактальную размерность 2,64.

Таким образом, проведенные исследования микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения, подтверждают наличие развитой поровой структуры частиц полидисперсного порошка, что соответствует системе с большой удельной поверхностью. Содержание значительного числа частиц и пор нанометровых размеров ведет к увеличению реакционной способности дисперсного материала, что дает возможность использования его не только в качестве наполнителя вакуумных изоляционных панелей, но и как активную добавку к сухим строительным смесям [33] и цементным композитам, в качестве источника аморфного диоксида кремния при производстве пеностекла, а учитывая высокую термостойкость – как компонент жаростойких бетонов, огнеупорных материалов, теплоизолирующих засыпок.

Результаты малоуглового рентгеновского рассеяния могут быть полезными при построении топологических моделей теплопроводности зернистых систем, позволят учесть специфику свойств нанодисперсных материалов, например, их склонность к самоорганизации в кластеры и ансамбли подструктур разных масштабных уровней [34–36], а также могут способствовать проведению количественного описания сложных структур на основе мультифрактального подхода. Кроме того, различные пути развития процессов самоорганизации дисперсных систем дают возможность использования приведенных результатов для анализа процессов синтеза и деградации наноматериалов [37] в неравновесных и метастабильных условиях.

Сравнение химического и гранулометрического состава, топографии поверхности частиц микрокремнезема аморфного, полученного из природного диатомита, и частиц микрокремнезема, российского и зарубежного производства позволяет сделать вывод: по гранулометрическому и химическому составу, топографии поверхности порошок аморфного микрокремнезема (из природного диатомита) отличается от природного диатомита и близок по свойствам к порошку, применяемому для изготовления теплоизоляционных панелей FRONT-VIP (см. табл. 2, 3, 4).

Таблица 2. Химический состав природных диатомитов, микрокремнеземов и порошка FRONT-VIP

Оксид, %	Диатомит Атемарский	Диатомит Инзенский	Диатомит Никольский	Микрокремнезем аморфный	Конденсированный микрокремнезем	Белая сажа	FRONT-VIP
SiO ₂	87,23	86,26	84,11	97,8	90,34	96,47	99,77
Fe ₂ O ₃	3,41	2,67	3,87	0,2	1,7	0,19	0,09
Al ₂ O ₃	5,15	7,09	7,16	0,5	0,6	0,62	-
TiO ₂	0,32	0,42	0,52	0,3	-	-	0,01
K ₂ O	1,21	1,53	1,77	0,1	2,5	-	0,02
CaO	1,75	0,5	1,26	-	0,6	0,54	0,02
MgO	0,73	1,21	0,98	-	1,8	0,15	-
Na ₂ O	-	0,20	-	-	0,9	0,74	-
SO ₃	0,03	0,03	0,17	-	0,7	0,12	-
P ₂ O ₅	0,06	0,03	0,03	-	0,3	-	-
MnO	-	-	-	-	0,3	0,18	-
V ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	0,03
Cl	-	-	-	-	-	-	0,02
NiO	-	-	-	-	-	-	0,01

Из анализа данных таблицы 2 видно, что микрокремнезем аморфный по своему химическому составу достаточно близок к порошку FRONT-VIP.

Таблица 3. Гранулометрический состав диатомита Атемарского, микрокремнезема и порошка FRONT-VIP

Дисперсный порошок	Крупность, нм	Крупность, мкм
Диатомит Атемарский	360 — 1500	2 – 100
Микрокремнезем аморфный	330 — 450	2 – 640
Конденсированный микрокремнезем	290 — 1200	2 – 640
Белая сажа	290 – 1000	3 – 1900
FRONT-VIP	290 – 1000	2 – 64

По гранулометрическому составу (таблица 3) микрокремнезем аморфный также близок к FRONT-VIP и имеет более мелкодисперсную структуру нанометрового уровня.

Таблица 4. Фрактальные характеристики исследованных дисперсных материалов

№	Образец	Параметр	$\Delta S, \text{\AA}^{-1}$	α	D	D_s	d, нм
1	Диатомит Атемарский		0,013 – 0,026 0,031 – 0,061 0,067 – 0,095	2,59 1,56 3,73	2,59 1,56	2,27	24 – 48 10 – 20 7 – 9
2	Никольский		0,011 – 0,025 0,035 – 0,068 0,075 – 0,102	2,53 1,07 3,72	2,53 1,07	2,28	25 – 57 9 – 18 6 – 8
3	Инзенский		0,010 – 0,025 0,030 – 0,047 0,047 – 0,071	2,40 1,73 2,63	2,40 1,73 2,63		25 – 62 13 – 21 9 – 13
4	Аморфный микрокремнезем		0,016 – 0,025 0,025 – 0,080 0,080 – 0,160	2,32 2,13 3,36	2,32 2,13	2,64	25 – 40 8 – 25 4 – 8
5	Конденсированный микрокремнезем		0,016 – 0,160	3,60		2,40	4 – 40
6	Белая сажа		0,016 – 0,025 0,025 – 0,160	3,17 2,66		2,83	25 – 40 4 – 25
7	FRONT - VIP		0,016 – 0,032 0,032 – 0,056 0,056 – 0,160	2,59 3,30 4,10	2,59	2,70	20 – 40 12 – 20 4 – 12

В таблице 4 приняты обозначения:

ΔS – диапазон значений векторов рассеяния;

α – параметр, определяющий наклон прямолинейного участка индикатрисы малоуглового рассеяния и характеризующий фрактальную размерность неоднородности;

D – фрактальная размерность рассеивающих неоднородностей ($D=\alpha$);

D_s – фрактальная размерность рассеивающих поверхностей ($D=6-\alpha$);

d – линейные масштабы рассеивающих неоднородностей (массовых фракталов и фрактальных поверхностей), соответствующие диапазонам векторов рассеяния ΔS .

Фрактальные характеристики микрокремнезема аморфного (табл. 4), полученные методом малоуглового рентгеновского рассеяния, имеют примерно схожие значения с характеристиками порошка FRONT-VIP.

Вакуумные теплоизоляционные панели на основе порошков микрокремнезема из природного диатомита

На основе аморфного микрокремнезема, полученного из природного диатомита, были разработаны составы и технология изготовления вакуумных теплоизоляционных панелей. Панели состоят из минерального наполнителя и воздухонепроницаемой оболочки, торцы которой запаиваются после создания вакуума заданного уровня с применением специальной вакуум-упаковочной машины типа TITAN-F800.

Наполнитель формируется из аморфного микрокремнезема, минерального волокна и специальных добавок. Компоненты дозируются в определенной пропорции, перемешиваются, и затем из полученной волокнисто-дисперсной системы формируется плита заданных размеров. После этого плита помещается в оболочку и отправляется для вакуумирования и запайки в вакуум-упаковочную машину.

В экспериментальных исследованиях состав наполнителя подбирался в соответствии с планом Коно (см. табл. 5). После изготовления вакуумных теплоизоляционных панелей были проведены испытания на теплопроводность. Установлено, что теплопроводность вакуумных теплоизоляционных панелей экспериментальных составов меняется в пределах от 0,0204 до 0,0268 Вт/м·°C. Зависимость теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей от содержания в наполнителе порошка аморфного микрокремнезема и минеральных волокон показана на рисунке 5.

Экспериментальные значения теплопроводности, определенные для вакуумных теплоизоляционных панелей на основе аморфного микрокремнезема, сопоставимы с теплопроводностью зарубежного аналога FRONT-VIP ($\lambda=0,018-0,022$ Вт/м·°C).

Таблица 5. Теплопроводность опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей на основе аморфного микрокремнезема

Номер образца	Количество наполнителя по массе	Теплопроводность, Вт/м·°C
1	Минеральное волокно – 2,5% Аморфный микрокремнезем – 87,5% Специальные добавки – 10%	0,0224
2	Минеральное волокно – 2,5% Аморфный микрокремнезем – 90% Специальные добавки – 7,5%	0,0229
3	Минеральное волокно – 2,5% Аморфный микрокремнезем – 92,5% Специальные добавки – 5%	0,0205
4	Минеральное волокно – 5% Аморфный микрокремнезем – 87,5% Специальные добавки – 7,5%	0,0220
5	Минеральное волокно – 5% Аморфный микрокремнезем – 90% Специальные добавки – 5%	0,0221
6	Минеральное волокно – 5% Аморфный микрокремнезем – 92,5% Специальные добавки – 2,5%	0,0204
7	Минеральное волокно – 7,5% Аморфный микрокремнезем – 87,5% Специальные добавки – 5%	0,0268
8	Минеральное волокно – 7,5% Аморфный микрокремнезем – 90% Специальные добавки – 2,5%	0,0216
9	Минеральное волокно – 7,5% Аморфный микрокремнезем – 92,5% Специальные добавки – 0%	0,0213

Селяев В.П., Неверов В.А., Маштаев О.Г., Колотушкин А.В. Свойства микрокремнезема из природного диатомита и его применение в производстве вакуумных теплоизоляционных панелей

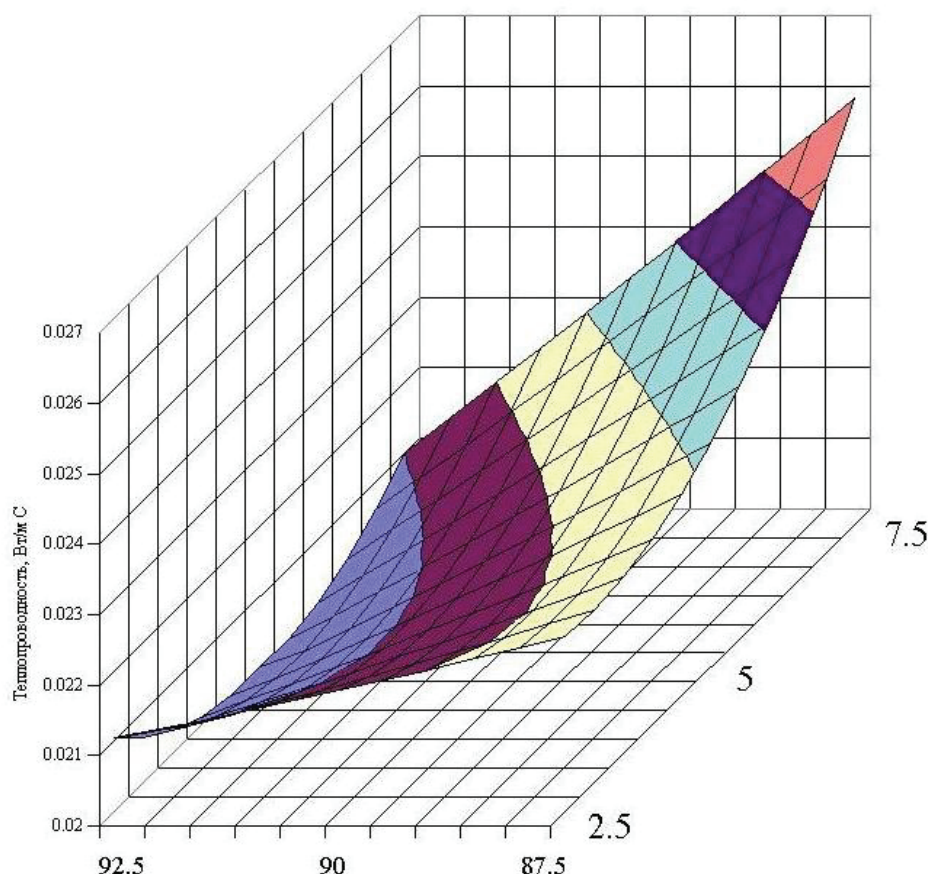


Рисунок 5. Влияние количества минерального волокна и порошка микрокремнезема на теплопроводность

Выводы

1. Впервые золь-методом получен порошок микрокремнезема из природного диатомита. Исследования частиц порошка показали, что он вполне может конкурировать по структуре, свойствам, химическому составу, стоимости с порошками микрокремнезема, производимыми в России и за рубежом.

2. Разработаны составы и технология изготовления вакуумных теплоизоляционных панелей на основе порошков микрокремнезема из природного диатомита, минеральных волокон и специальных добавок, которые по сравнению с зарубежным аналогом FRONT-VIP значительно (на 20%) ниже по стоимости при одинаковых физико-технических характеристиках.

3. Результаты исследований структуры, химического состава, свойств порошков микрокремнезема, полученного из природного диатомита, свидетельствуют о том, что по химическому составу, микроразмерному масштабу частиц, структурной неоднородности поверхности эти порошки могут применяться: в качестве активных добавок в цементном вяжущем; для получения пеностекла, фильтровальных порошков; для получения теплоизоляционных материалов и изделий.

Литература

1. Iler R. The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica. New York: Wiley-Interscience, 1979. 866 p.
2. Селяев В.П., Осипов А.К., Куприяшкина Л.И., Седова А.А., Кечуткина Е.Л., Супонина Л.А. Возможность создания теплоизоляционных материалов на основе наноструктурированного микрокремнезема из диатомита // Наука: 21 век. 2011. №3(15). С. 76–86.
3. Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года. Распоряжение Правительства РФ №2227-р от 08.12.2011 [Электронный ресурс]. URL: http://minsvyaz.ru/ru/doc/?id_4=685 (дата обращения: 24.10.2013).
4. Данилевский Л.Н. Вакуумная теплоизоляция и перспективы ее использования в строительстве // Архитектура и строительство. 2006. №5. С.114–117.
5. Oehler S. Münsterländer Hof renoviert // 10 Internationale Passivhaustagung 2006. Hannover, 2006. Pp. 57–62.
6. Dieferbach N. Modernisierung von Zweifamilienhäusern auf unterschiedliche energetische Standards unter einatz von Großelementen mit Vakuumdämmung // 10 Internationale Passivhaustagung 2006. Hannover, 2006. Pp. 63–68.
7. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Справочная книга. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
8. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр.отд-ние, 1991. 248 с.
9. FRONT-VIP - Das Vakuum Isolationspaneel [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vacu-isotec.de/vip-front.php?herkunft=baugewerbe> (дата обращения: 24.10.2013).
10. Порошковая вакуумная теплоизоляция [Электронный ресурс] // Архитектура и строительство. 2011. №1(219). URL: www.aiz.by/story/12315 (дата обращения: 24.10.13).
11. Богомолов В.Н., Парфеньева Л.С., Прокофьев А.В., Смирнов И.А. [и др.] Влияние периодической кластерной сверхструктуры на теплопроводность аморфного кремнезема (опалов) // Физика твердого тела. 1995. Т. 37. №11. С. 3411–3418.
12. Карпов И.А., Самаров Э.Н., Масалов В.М., Божко С.И. и др. О внутренней структуре сферических частиц опала // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. №2. С. 334–338.
13. Giesche H. Synthesis of monodispersed silica powders // Journal of the European Ceramic Society. 1994. Vol. 14. Issue 3. Pp.189–204.
14. Масалов В.М., Сухинина Н.С., Емельченко Г.А. Наноструктура частиц диоксида кремния, полученных многоступенчатым методом Штобера-Финка-Бона // Хімія, фізика та технологія поверхності. 2011. Т. 2. №4. С. 373–384.
15. Keefer K.D., Schaefer D.W. Growth of fractally rough colloids // Physical Review Letters. 1986. Vol. 56. Issue 22. Pp. 2376–2379.
16. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСИС, 2002. 360 с.
17. Bowen D.K., Tanner B.K. High Resolution X-ray Diffractometry and Topography. London: Taylor and Francis, 1998. 278 p.
18. Klug H.P., Alexander L.T. X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials. New York: John Wiley and Sons, 1974. 966 p.
19. Wendlandt W. Thermal Analysis. New York: John Wiley and Sons, 1986. 833 p.
20. Brown M.E. Introduction to Thermal Analysis. Techniques and Applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 264 p.
21. Самаров Э.Н., Мокрушин А.Д., Масалов В.М., Абросимова Г.Е. [и др.] Структурная модификация синтетических опалов в процессе их термообработки // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. Вып. 7. С. 1212–1215.
22. Алиев Ф.Э., Ахмеджанова Н.Х., Криворотов В.Ф., Холманов И.Н. [и др.] Теплопроводность опала, заполненного ионным проводником LiIO_3 // Физика твердого тела. 2003. Т. 45. Вып. 1. С. 60–67.

23. Гладков С.О. Газокинетическая модель теплопроводности гетерогенных веществ // Журнал технической физики. 2008. Т. 78. Вып. 7. С. 12–15.
24. Goldstein J. [et al]. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. New York: Plenum Publishers, 2002. 586 p.
25. Китайгородский А.И. Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел. М.–Л.: Гос. изд. техн.-теорет. лит., 1952. 588 с.
26. Svergun D.I., Semenyuk A.V. and Feigin L.A. Small-Angle-Scattering-Data Treatment by the Regularization Method // Acta Crystallographica. 1988. Vol. A44. Pp. 244–250.
27. Svergun D.I. Determination of the regularization parameter in indirect-transform methods using perceptual criteria // Journal of Applied Crystallography. 1992. Vol. 25. Part 4. Pp. 495–503.
28. Guinier A. Theorie et technique de la radiocristallographie. Paris: A.Dunod, 1964. 740 p.
29. Кютт Р.Н., Сморгонская Э.А., Гордеев С.К., Гречинская А.В., Данишевский А.М. Исследование структуры нанопористого углерода, полученного из поликристаллических карбидных материалов, методом малоуглового рентгеновского рассеяния // Физика твердого тела. 1999. Т. 41. №8. С. 1484–1488.
30. Philipse A.P. Quantitative aspects of the growth of (charged) silica spheres // Colloid and Polymer Science. 1988. Vol. 266. Issue 12. Pp. 1174–1180.
31. Bogush G.H., Zukoski IV C.F. Uniform silica particle precipitation: an aggregative growth model // Journal of Colloid and Interface Science. 1991. Vol. 142. Issue 1. Pp. 19–34.
32. Martin J.E., Hurd A.J. Scattering from fractals // Journal of Applied Crystallography. 1987. Vol. 20. Part 2. Pp. 61–78.
33. Пустовгар А.П. Эффективность применения активированного диатомита в сухих строительных смесях // Строительные материалы. 2006. №10. С. 62–64.
34. Halsey T.C., Jensen M.H., Kadanoff L.P. [et al]. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets // Physical Review A. 1986. Vol. 33. Issue 2. Pp. 1141–1151.
35. Колмаков А.Г., Солнцев К.А., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Хейфец М.Л., Баринов С.М. Системное описание структуры наноматериалов // Материаловедение. 2012. №9. С. 37–45.
36. Vstovsky G.V. Transform information: A symmetry breaking measure // Foundations of Physics. 1997. Issue 10. Pp. 1413–1444.
37. Колмаков А.Г., Солнцев К.А., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Хейфец М.Л., Баринов С.М. Системное описание структуры наноматериалов // Материаловедение. 2012. №10. С. 33–38.

*Владимир Павлович Селяев, г. Саранск, Республика Мордовия
+7(8342)47-71-56; эл. почта: nform80@mail.ru*

*Вячеслав Александрович Неверов, г. Саранск, Республика Мордовия
+7(8342)47-71-56; эл. почта: ua4uu@mail.ru*

*Олег Геннадьевич Маштаев, г. Саранск, Республика Мордовия
+7(927)195-57-65; эл. почта: oleg.mashtaev@bk.ru*

*Алексей Владимирович Колотушкин, г. Саранск, Республика Мордовия
+7(927)173-52-72; эл. почта: karlson1520@yandex.ru*

© Селяев В.П., Неверов В.А., Маштаев О.Г., Колотушкин А.В., 2013

Применение отсевов дробления щебня в самоуплотняющихся бетонах

К.т.н., доцент Н.М. Морозов;

аспирант В.И. Авксентьев;

к.т.н., старший преподаватель И.В. Боровских;

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой В.Г. Хозин,

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон; отсев дробления щебня; суперпластификаторы; наполнители; прочность

Рациональное использование ресурсов является одной из важнейших задач промышленности строительных материалов. Применение отходов различных производств в составе тяжелых бетонов позволяет не только утилизировать отходы, но и повышать физико-механические характеристики или экономические показатели бетонов [1].

Отсевы дробления при производстве щебня относятся к крупнотоннажным отходам промышленности. Отсевы дробления применяются в настоящее время как заполнители в составе цементных бетонов [2, 3] или при дополнительной обработке в качестве минеральных добавок [4, 5]. Применение отсевов без дополнительной обработки в качестве заполнителей позволяет снизить себестоимость бетона [6], но это эффективно только в низкомарочных бетонах, так как гранулометрический состав отсевов далек от оптимального. При производстве высокомарочных бетонов отсевы дробления необходимо дополнительно обогащать или размалывать до получения качественных минеральных добавок.

По объему применения минеральных добавок первое место среди цементных бетонов занимают самоуплотняющиеся бетоны. Для получения самоуплотняющихся бетонов (СУБ) необходимо введение большого количества наполнителя для увеличения объема цементного теста [7–9]. Реологической матрицей СУБ, обеспечивающей свойства упруго-вязкого пластического тела, является цементное тесто, увеличение доли которого для обеспечения текучести связано с повышением расхода цемента и снижением экономических показателей производства бетона. Использование наполнителей и эффективных пластификаторов позволяет увеличить текучесть цементного теста, снизить расход воды и повысить прочность бетона [10–13].

Выбор наполнителей является сложной задачей, так как помимо их гранулометрического состава важными являются их химическая природа и стоимость [14–17]. В настоящее время в качестве наполнителей в составе СУБ в основном используют золы [18], микрокремнезем [7] и молотые шлаки [7, 8]. Данные наполнители имеют высокую удельную поверхность и значительную стоимость, иногда превышающую стоимость портландцемента. С экономической стороны наиболее предпочтительно применение в качестве наполнителей отсевов дробления, образующихся при производстве заполнителей. Отсевы дробления щебня по химической природе близки к основным компонентам бетона и не вызывают его коррозии, что позволяет предположить их достаточную эффективность в составе самоуплотняющихся бетонов. Поэтому целью данной работы стала разработка самоуплотняющегося бетона с применением отсевов дробления щебня. В качестве отсева дробления была использована песчано-щебеночная смесь (ПЩС) предприятия ООО «Миньярский карьер», образующаяся при дроблении щебня. Основные свойства ПЩС представлены в таблице 1.

На первом этапе ПЩС подвергалась предварительному дроблению ввиду слишком большой крупности зерен исходного материала. Дробление производили в лабораторной щековой дробилке 100х200 (ДхШ) до размеров частиц менее 1,25 мм (удельная поверхность $S_{уд}=50\text{ м}^2/\text{кг}$). На втором этапе производили помол в вибрационно-шаровой мельнице СВМ-3 (производитель ООО «Опытный завод со специальным бюро», Москва). Оценку размолоспособности материала производили по изменению удельной поверхности с течением времени помола и по гранулометрическому составу материала различной удельной поверхности (рис. 1).

Таблица 1. Физико-технические свойства ПЩС

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значение показателя	
1	Содержание фракций 5...10 мм	%	9,2	
2	Истинная плотность	кг/м ³	2690	
3	Насыпная плотность	кг/м ³	1720	
4	Фракционный состав, сито, мм	%	Частные остатки	Полные остатки
	2,5		31,9	31,9
	1,25		16,6	48,5
	0,63		16,8	65,3
	0,315		9,7	75,0
	0,14		4,4	79,4
	< 0,14		20,6	
5	Модуль крупности	-	3,0	
6	Пустотность	%	36	

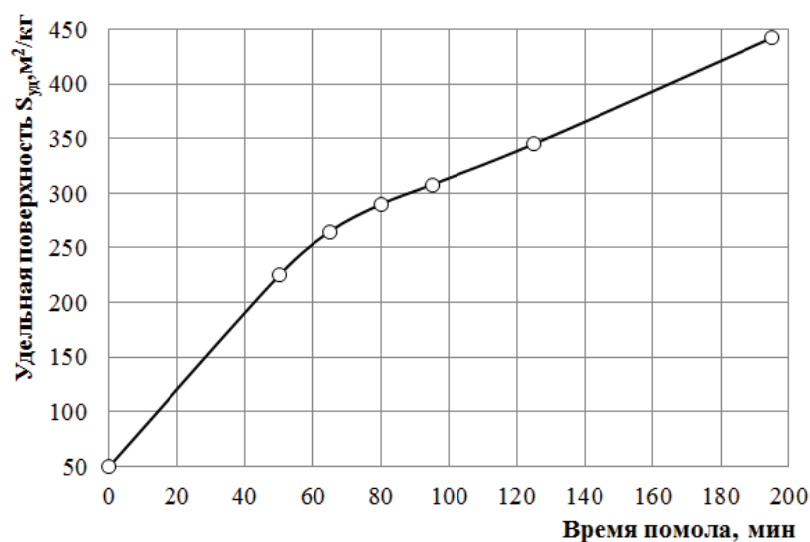


Рисунок 1. Зависимость удельной поверхности ПЩС от времени помола

При изготовлении самоуплотняющегося бетона важен выбор суперпластификатора [15, 16]. В качестве суперпластификатора для самоуплотняющихся бетонов обычно используют добавки на основе поликарбоксилатов, отличающихся не только большей водоредуцирующей способностью (рис. 2). Как видно из рисунка 2, все добавки на основе поликарбоксилатов (Sika VC 5, Glenium ACE 430) по снижению расхода воды превосходят суперпластификатор С-3.

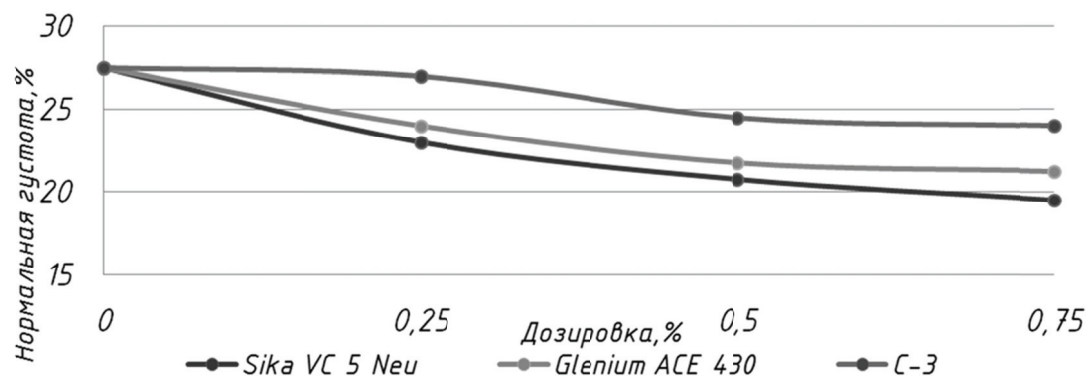


Рисунок 2. Зависимость нормальной плотности от вида и дозировки пластификатора

Это объясняется разным механизмом действия добавок. Добавки на нафталин-формальдегидной основе (С-3) вызывают эффект электростатического отталкивания, отодвигая молекулы воды от частиц цемента, а поликарбоксилаты обладают стерическим эффектом – вызывают проскальзывание. Предпочтение в выборе той или иной добавки, разумеется, зависит не от ее названия или механизма действия, а определяется двумя основополагающими факторами – эффективностью и стоимостью.

Следующим этапом исследования было определение оптимальной дозировки наполнителя. Так как самоуплотняющийся бетон, помимо высокой подвижности, должен обладать еще низкой расслаиваемостью [22, 23], то в качестве химической добавки использовали не чистый поликарбоксилат Sika VC 5 Neu, а его смесь с водоудерживающей добавкой – Sika ViscoCrete 32 SCC (Sika VC32). Эта комплексная добавка, помимо пластифицирующего, обладает стабилизирующим эффектом и предназначена для производства высококачественных бетонных смесей, в том числе самоуплотняющихся с высокой сегрегационной устойчивостью [18].

Гранулометрический состав всех компонентов самоуплотняющейся бетонной смеси должен быть приближен к кривой, обозначенной на рисунке 3.

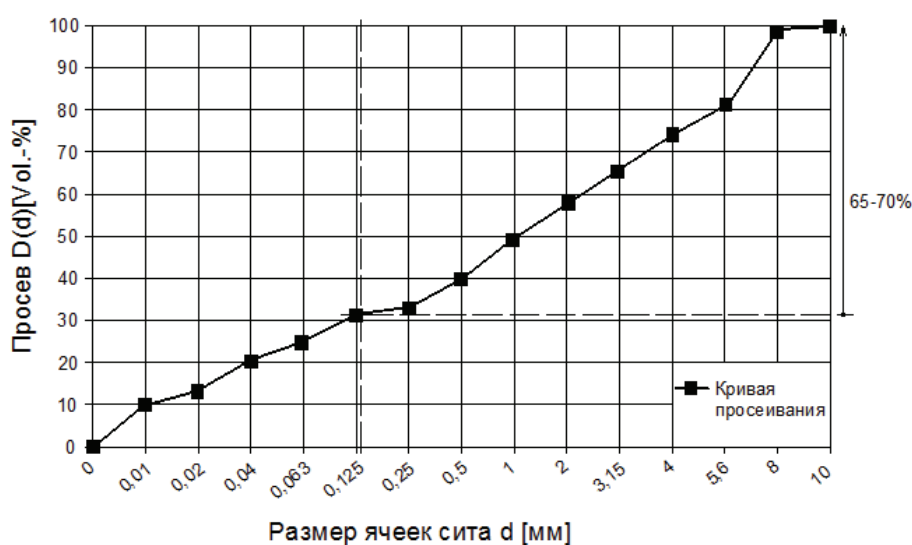


Рисунок 3. Гранулометрический состав компонентов смеси для СУБ [7, 18]

Как видно из рисунка 3, количество заполнителя с крупностью более 5 мм должно быть менее 900 кг/м³, мелкого заполнителя – не менее 750 кг/м³ и наполнителей – не менее 100 кг/м³.

Таблица 2. План-матрица и результаты двухфакторного эксперимента

№ состава	Факторы				Отклики		
	X ₁		X ₂		Т500, с	В, мл	Вв, %
	Цемент, кг		Микрокремнезем, %				
	Код	Знач.	Код	Знач.			
1	-1	350	-1	10	2,5	189	4,6
2	-1	350	0	15	1,5	201	5,5
3	-1	350	+1	20	1	214	4,1
4	0	400	+1	20	1,5	237	3,3
5	+1	450	+1	20	1,0	200	4,8
6	+1	450	0	15	2,0	193	4,7
7	+1	450	-1	10	4,0	171	5,4
8	0	400	-1	10	2,8	187	4,5
9	0	400	0	15	2,5	196	4,9

$$R_{T500} = 4 - 0,8x_1 + 1,2x_2 - 2,3x_1^2 - 0,38x_2^2 + 2,15x_1x_2 \quad (1)$$

Морозов Н.М., Авксентьев В.И., Боровских И.В., Хозин В.Г. Применение отсевов дробления щебня в самоуплотняющихся бетонах

Подвижность бетонных смесей напрямую зависит от расхода цемента в их составе [19, 20]. В связи с этим количество наполнителя подбирали при разных расходах цемента. Подвижность СУБ, как и обычной бетонной смеси, зависит от напряжения сдвига и вязкости смеси [21]. Нами было исследовано влияние расхода вяжущего и наполнителя на вязкость бетонной смеси. Показатель вязкости определялся с помощью косвенного метода Т500, используемого для самоуплотняющихся бетонов. Суть этого метода заключается в определении времени истечения бетонной смеси из перевернутого стандартного конуса. В исследованиях мы использовали двухфакторный метод математического планирования эксперимента. План эксперимента представлен в таблице 2, зависимость показателя Т500 от расхода цемента и наполнителей описывается по формуле (1). Расплыв конуса самоуплотняющихся смесей в эксперименте находился в интервале 65–70 см.

Из рисунка 4 видно, что увеличение расхода наполнителя приводит к уменьшению времени истечения бетонной смеси, и соответственно, к снижению ее вязкости. С увеличением расхода цемента с 350 до 450 кг/м³ вязкость увеличивается незначительно. Также следует отметить, что расход воды в бетонной смеси напрямую влияет на показатели истечения суспензии из конуса. С ее увеличением вязкость снижается, однако это приводит к снижению и прочности бетона. Поэтому для регулирования вязкости и, следовательно, улучшения свойств самоуплотняющегося бетона нужно изменять дозировку наполнителей: чем больше наполнителя, тем меньше время истечения бетонной смеси. Как видно из рисунка 4, за начальный расход цемента можно принять 400 кг/м³, а расход наполнителя должен быть более 15% от массы цемента.

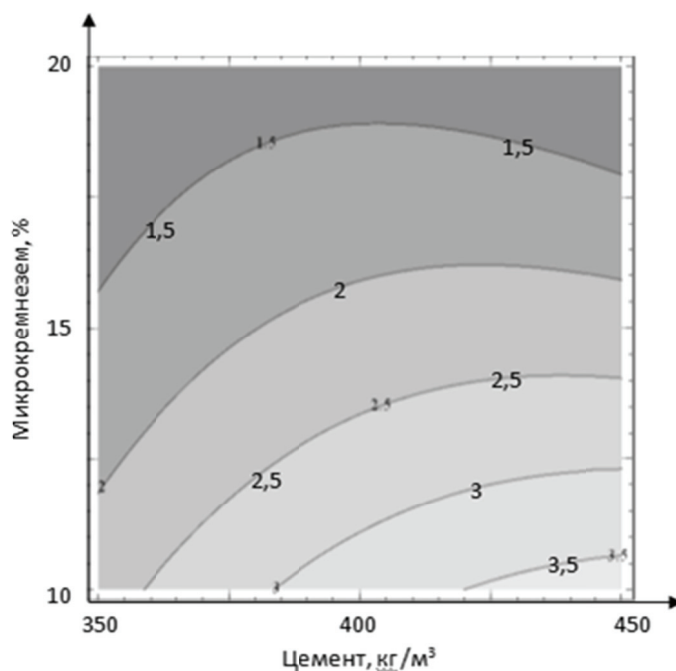


Рисунок 4. Изменение времени истечения (с) бетонной смеси из перевернутого стандартного конуса в области варьируемых факторов

Далее в качестве наполнителя был использован тонкомолотый отсев дробления щебня – песчано-щебеночная смесь (ПЩС). ПЩС размалывали до удельной поверхности 250–300 м²/кг. При большей удельной поверхности значительно возрастает водопотребность бетонных смесей и снижается прочность бетона. При меньшей удельной поверхности увеличивается водоотделение самоуплотняющейся бетонной смеси. В дополнение к молотой ПЩС добавляли микрокремнезем в количестве 10% от массы цемента, так как он снижает расслаиваемость и повышает прочность бетона.

Для оценки свойств самоуплотняющегося бетона был использован следующий состав: расход цемента в составе бетона принят 400 кг/м³, расход микрокремнезема – 40 кг/м³, расход молотой ПЩС (МПЩС) – 70 кг/м³. В составе бетона были использованы цементы ЦЕМ I 42,5Б двух заводов – Мордовского и Стерлитамакского. Состав самоуплотняющегося бетона определялся экспериментально (табл. 3).

Таблица 3. Составы самоуплотняющихся бетонных смесей

№ состава	Расход компонентов, кг/м³							Вода
	Цемент (Мордов.)	Цемент (Стерлит.)	МК	МПЩС	Песок	Гравий	СП SikaVC 32	
1	400		40	70	900	800	6	215
2	400		40	70	900	800	6	197
3		400	40	70	900	800	6	192
4		400	40	70	900	800	6,8	194
5	360		40	110	900	800	6,2	187

Морозов Н.М., Авксентьев В.И., Боровских И.В., Хозин В.Г. Применение отсева дробления щебня в самоуплотняющихся бетонах

Таблица 4. Свойства самоуплотняющейся бетонной смеси и бетона

№ состава	Свойства бетонной смеси					Прочность бетона после ТВО, МПа	Прочность бетона на 28 сут., МПа
	В/Ц	Распływ конуса	Плотность, кг/м ³	Воздуховлечение, %	Расслоение		
1	0,53	73	2356	3,6	-	42,9	55,7
2	0,49	68	2304	4,3	-	43,8	58,5
3	0,49	63	2236	5,9	+	34,1	44,5
4	0,48	69	2310	4,6	-	39,8	53,6
5	0,52	65	2292	4,5	-	38,7	52,8

Как видно из таблицы 4, получен состав СУБ с распылом конуса 73 см и прочностью 55,7 МПа в возрасте 28 суток нормального твердения. Во втором составе таблицы 4 был снижен расход воды и получен СУБ с распылом 68 см, при этом прочность возросла незначительно. При замене Мордовского цемента на Стерлитамакский распыл конуса составил 63 см, но бетонная смесь расслаивалась (табл. 4, состав 3) и прочность значительно снизилась. Для снижения расслаиваемости был увеличен расход суперпластификатора до 6,8 кг/м³, и распыл бетонной смеси составил 69 см при сохранении стабильности смеси (табл. 4, состав 4). Такое увеличение расхода суперпластификатора связано с большим содержанием трехкальцевого алюмината в составе Стерлитамакского цемента (7–8%), в то время как в Мордовском цементе его содержание меньше (5–5,5%). С увеличением трехкальцевого алюмината расход суперпластификатора увеличивается, так как именно этот минерал в большей степени адсорбирует на себе молекулы суперпластификатора [23, 24].

По данным таблицы 4 можно видеть, что предпочтительным по технологическим свойствам является состав самоуплотняющегося бетона №1, обладающий самым большим распылом конуса и низким воздуховлечением. С экономической точки зрения более предпочтительным является состав №5, так как увеличение доли МПЩС позволило снизить расход цемента на 10% при сохранении распыла конуса 65 см и прочности на сжатие более 50 МПа.

Выводы

По результатам исследований установлена возможность использования отходов дробления щебня в качестве наполнителей для самоуплотняющихся бетонов. В составе СУБ отходы дробления использовали совместно с микрокремнеземом, что позволило получить высокие технологические свойства смеси и прочностные свойства затвердевшего бетона. В рамках работы показано, что увеличение расхода цемента и количества наполнителя в самоуплотняющихся бетонах ведет к снижению вязкости бетонной смеси. Авторами установлено, что при дозировке наполнителя более 15% от массы цемента вязкость уже практически не зависит от расхода цемента. При использовании тонкомолотых отходов дробления щебня прочность самоуплотняющихся бетонов достигает 58,5 МПа при расходе цемента 400 кг/м³, что сравнимо с известными составами СУБ на других наполнителях [8, 17]. Стоит отметить, что в результате совместного использования микрокремнезема и МПЩС был получен состав СУБ с низким расходом цемента (360 кг/м³) и прочностью более 50 МПа, что превосходит известные результаты [7, 8]. Таким образом, разработаны самоуплотняющиеся бетоны с применением отсеков дробления щебня ООО «Миньярский карьер».

Литература

1. Калашников В.И. Промышленность нерудных строительных материалов и будущее бетонов // Строительные материалы. 2008. №3. С. 20–22.
2. Трамбовецкий В.П., Бабаев Ш.Т. Мировая тенденция использования вторичных продуктов и техногенных отходов в производстве цемента и бетона // Бетон и железобетон. 1994. №5. С. 23–26.
3. Лазуткин А.В., Эйрих В.И., Жуков В.П. Использование отсеков дробления важный фактор экономического роста предприятий нерудной промышленности // Строительные материалы. 2003. №11. С. 6–8.
4. Артамонов В.А., Воробьев В.В., Свитов В.С. Опыт переработки отсеков дробления // Строительные материалы. 2003. №6. С. 28–29.

5. Морозов Н.М., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Сравнительная оценка мельниц по размолоспособности кварцевого песка и его эффективности в цементных бетонах // Известия КазГАСУ. 2011. №1. С. 177–181.
6. Харо О.Е., Левкова Н.С., Лопатников М.И., Горностаева Т.А. Использование отходов переработки горных пород при производстве нерудных строительных материалов // Строительные материалы. 2003. №9. С. 18–19.
7. Paratibha aAggarwal, Rafat Siddique, Yogesh aAggarwal, Surinder M. gGupta. Self-Compacting Concrete – Procedure for Mix Design // Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies. 2008. Issue 12. Pp. 15–24.
8. Mazzotti C., Savoia C. An Experimental Campaign on the Long-Term Properties of Self Compacting Concrete // Advances in Structural Engineering. 2012. Vol. 15. No. 7. Pp. 1155–1166.
9. Lanier M. Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in PCI Member Plants // PCI Journal. 2003. Vol. 48, No.3. Pp. 14–18.
10. Roncero J., Gimenez V., Corradi M. What Makes More Effective Polycarboxylates Comparing to Lignosulphonates? Differences on Adsorption Mechanisms // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, 2007. Pp. 342–355.
11. Sudarsana Raoet H. [et al]. Strength and Workability Characteristics of Flya Ash based Glass Fibre reinforced High-Performance-Concrete // International Journal of Engineering Science and Technology. 2011. Vol. 3. Issue 8. Pp. 6266–6277.
12. Spiratos N., Page M., Mailvaganam N.P., Malhotra V.M., Jolicoeur C. Superplasticizers for Concrete. Fundamentals, Technology and Practice. Ottawa, Canada: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, 2003. 322 p.
13. Gyuyong Kim, Euibae Lee, Kyungmo Koo. Hydration Heat and Autogenous Shrinkage of High-Strength Mass Concrete // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2009. Vol. 8. No.2. Pp. 509–516.
14. Морозов Н.М., Хозин В.Г., Мугинов Х.Г. Особенности формирования структуры модифицированных песчаных бетонов // Строительные материалы. 2010. №9. С. 72–73.
15. Mustafa Sahmaran, Heru Ari Christianto, Ismail Ozgur Yaman. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars // Cement and Concrete Composites. 2006. Vol. 28. Pp. 462–440.
16. Морозов Н.М., Морозова Н.Н. Исследование долговечности модифицированных бетонов для монолитного строительства // Известия КазГАСУ. 2012. №4. С. 312–318.
17. Mucteba Uysal, Kemallettin Yilmaz. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete // Cement and Concrete Composites. 2011. Vol. 33. No.7. Pp. 771–776.
18. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete // Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1. No.1. Pp. 5–15.
19. Зоткин А.Г., Саенко П.А. Прогнозирование прочности бетона с суперпластификаторами с учетом эффекта объема цементного камня // Бетон и железобетон. 2008. №4. С. 14–16.
20. Вовк А.И. Суперпластификаторы в бетоне: анализ химии процессов. Часть 1 // Технологии бетонов. 2007. №2. С. 8–10.
21. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н., Хетагуров Б.А. Самоуплотняющиеся бетоны: некоторые факторы, определяющие текучесть смеси // Строительные материалы. 2009. №3. С. 54–57.
22. Василик П.Г., Голубев И.В. Стабилизаторы для самоуплотняющихся бетонов и самовыравнивающихся масс // Технология бетонов. 2006. №6. С. 27–29.
23. Koizumi K., Umemura Y., Tsuyuki N. Effects of Chemical Admixtures on the Silicate Structure of Hydrated Portland Cement. Differences on Adsorption Mechanisms // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, 2007. Pp. 64–71.
24. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.: «Технопроект», 1998. 768 с.

*Морозов Николай Михайлович, г. Казань, Россия
+7(903)314-42-26; эл. почта: nikola_535@mail.ru*

*Авксентьев Владислав Игоревич, г. Казань, Россия
+7(843)510-47-34; эл. почта: nikola_535@mail.ru*

*Боровских Игорь Викторович, г. Казань, Россия
+7(843)510-47-34; эл. почта: borigor83@list.ru*

*Хозин Вадим Григорьевич, г. Казань, Россия
+7(843)238-39-13; эл. почта: Khozin@ksaba.ru*

© Морозов Н.М., Авксентьев В.И., Боровских И.В., Хозин В.Г., 2013

Морозов Н.М., Авксентьев В.И., Боровских И.В., Хозин В.Г. Применение отсевов дробления щебня в самоуплотняющихся бетонах

Контроль влажности при обследовании каменных конструкций

*К.т.н., доцент А.В. Улыбин,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»;
генеральный директор С.А. Старцев,
ООО «БиоспейсСтрой»;
инженер С.В. Зубков,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»*

Ключевые слова: влажность кирпича; солевая коррозия; обследование зданий; дефекты каменной кладки

При детальном обследовании несущих конструкций определяется широкий спектр характеристик и параметров. В составе работ по исследованию каменных конструкций весомую роль, наряду с другими свойствами, играет определение влажности материалов, в частности, кирпича.

Помимо различных повреждений, напрямую связанных с увлажнением конструкций, повышение влажности вызывает изменение прочности кирпича. Масштаб данного эффекта недостаточно полно отражен в технической литературе и требует экспериментального исследования. Результаты такого исследования представлены в настоящей статье.

Основными проблемами, связанными с инструментальным контролем влажности, являются выбор методов измерения и оценка достоверности получаемых результатов. В статье описаны результаты экспериментальных исследований по сопоставлению основных применяемых методов контроля.

Источники увлажнения

Рассмотрим основные причины увлажнения каменной кладки. Во-первых, это замачивание атмосферными осадками («атмосферная влага»), которое происходит при косом дожде и таянии снега, скопившегося на не защищенных от увлажнения участках ограждающих конструкций, а также вследствие протечек, некачественного устройства кровли, дефектов и повреждений отливов и других причин (рис. 1).

Во-вторых, это увлажнение цокольной зоны из-за проникновения в кладку грунтовой воды («грунтовая влага»), дефектов гидроизоляции, повышения культурного слоя, повреждения отмостки и облицовки цоколя [1] (рис. 2). Сюда же можно отнести замачивание водой, брызгающей на стены при дефектах системы наружного водоотвода либо неорганизованном водоотводе.

Следующей причиной является увлажнение водяными парами, проникающими в кладку из внутренних помещений («эксплуатационная влага») любого типа (производственных, жилых, общественных). Увлажнение происходит за счет конденсации влаги внутри кладки, что может быть вызвано наличием паронепроницаемой преграды (слоя с меньшей паропроницаемостью) или теплопроводного, например, металлического, включения в наружных стенах (рис. 3). Конденсат внутри и на поверхности стен может образовываться и в результате резкого потепления воздуха при высокой влажности, например, весной.

Еще одним источником увлажнения является гигроскопическая влага («сорбционная влага»), т.е. влага, находящаяся в ограждении вследствие гигроскопичности его материалов. Гигроскопичностью в разной степени обладают все строительные материалы. Наиболее гигроскопичны хлористые соли (хлористый магний, хлористый кальций, поваренная соль и др.). Содержание хлористых солей в материалах ограждения (штукатурке, растворе, кирпиче) делает эти материалы также очень гигроскопичными, что часто служит единственной причиной появления в них влаги. Добавление к раствору кладки поваренной соли (хлористого натрия) или нитрата натрия, что иногда практикуется при кладке стен в зимний период, увеличивает гигроскопичность кладки. Повышенной гигроскопичностью обладает также магнезиальный фибролит, изготовленный с неправильной дозировкой хлористого магния.

Последней из основных причин увлажнения являются утечки систем инженерного обеспечения (рис. 4).

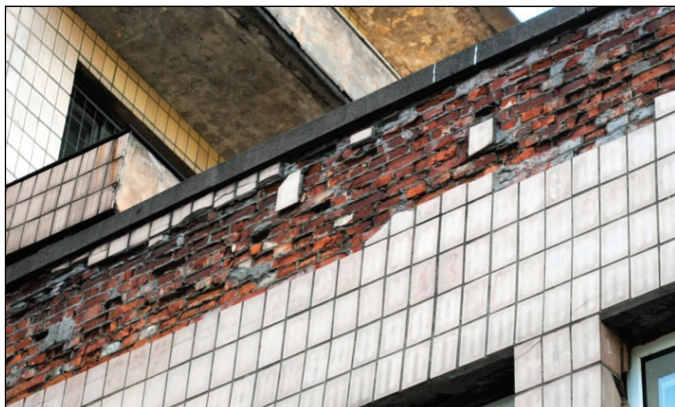


Рисунок 1. Размораживание участка парапета вследствие дефектов покрытия



Рисунок 2. Биоповреждение цокольной зоны



Рисунок 3. Разрушение облицовочного кирпича из-за конденсации влаги на стальных уголках внутри кладки



Рисунок 4. Увлажнение стены вследствие протечек системы канализации

Если рассматривать конструкции в период их возведения, то к указанному выше перечню необходимо добавить увлажнение кирпичей при строительстве вследствие ненадлежащего хранения материалов на стройплощадке, отсутствия защитных конструкций и прочее («построечная влага»).

Возможны и другие причины увлажнения кладки, например, замачивание при тушении пожара.

Рассмотрим, на что влияет изменение влажности кирпичной кладки, каковы нормируемые пределы ее значений и какие методы наиболее достоверно и производительно позволяют измерить ее фактическое значение.

Последствия увлажнения

Повышение влажности каменной кладки приводит к большому количеству различного рода повреждений и негативных последствий, основные из которых указаны на рисунке 5.

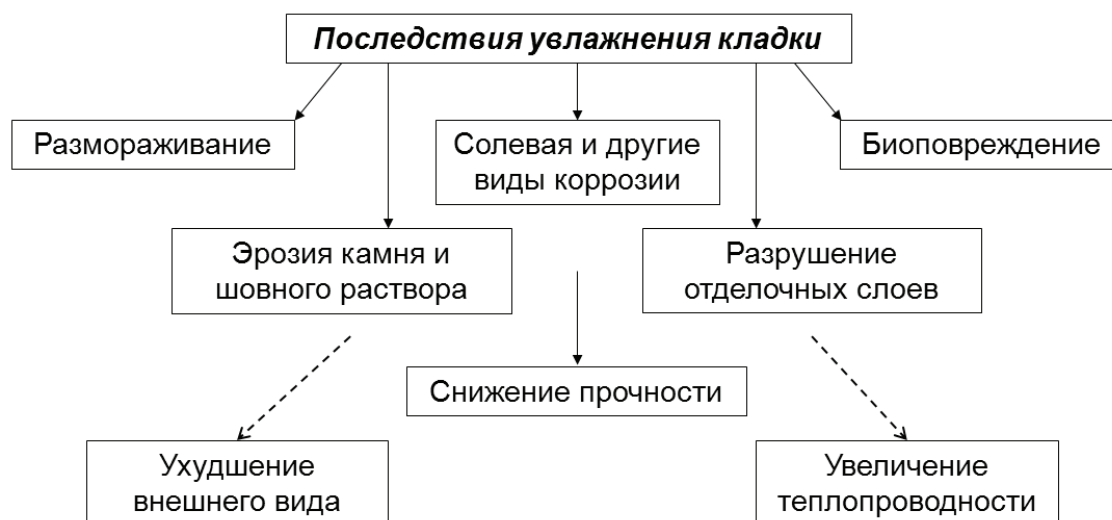


Рисунок 5. Последствия увлажнения кирпичной кладки

Указанные последствия в разной степени влияют на несущую способность кладки, однако все они имеют негативный характер и сокращают долговечность конструкций. С точки зрения разрушительной силы на первое место можно поставить размораживание, или морозную деструкцию [2–4] (рис. 6, 7).



Рисунок 6. Выпучивание наружной версты кладки вследствие размораживания и потери прочности



Рисунок 7. Обрушение плит покрытия из-за потери несущей способности размороженной кладки внутренних стен недостроенного здания



Рисунок 8. Домовой гриб на кирпичной кладке

Учитывая, что вода, несущая разрушение конструкциям, является источником жизни для всех биологических форм, повышение влажности конструкций сопровождается развитием различных форм биоповреждения. Существенные разрушения происходят при проникновении в каменную кладку корневой системы самосеянных растений (кустарников и деревьев) [5]. Домовые грибы, специфичные для деревянных конструкций, при попадании органики в кладку (например, при утечке из фановых труб) способны развиваться на кладке и повреждать ее (рис. 8). Микробиодеструкторы (микровицеты и бактерии), поселившиеся на поверхности или внутри кирпичной кладки, выделяют агрессивные по отношению к кладочному раствору метаболиты, которые преобразуют труднорастворимые соли в легко растворимые. Таким образом, они способствуют разрушению (выветриванию и вымыванию) кладочного раствора [6].

Солевая коррозия кирпича [7] заключается в кристаллообразовании различных солей в порах материала с образованием внутренних напряжений, снижением прочности, разрушением материала и уменьшением несущей способности конструкции в целом [8–11]. Обязательным условием коррозии является влага, растворяющая соли и позволяющая им мигрировать вместе с ней в теле конструкции. По данным В.В. Инчика [12], за срок эксплуатации различных сооружений при агрессивном воздействии на кладку солей ее прочность может снижаться на 20% и более. Однако чаще встречаются высолы, которые отлагаются не внутри кирпича, а на поверхности раздела сред, под отделочными слоями (краской, штукатуркой, плиткой). В данном случае в большей степени ухудшается внешний вид конструкций и возрастает скорость износа отделочных слоев.

По сравнению с солевой коррозией реже встречаются случаи химической коррозии каменной кладки, которая происходит, в том числе, при попадании на материал растворов кислот и щелочей. В ряде исследований предложены зависимости, позволяющие определить снижение прочности кладки при химической коррозии [13].

Для силикатного кирпича агрессивным также является сочетание увлажнения с углекислым газом, так как при долговременном увлажнении материала происходит реакция гидрокарбонизации кальцита: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Образующийся гидрокарбонат кальция имеет повышенную водорастворимость, таким образом, происходит вымывание материала с дополнительными образованиями трещин, пор, раковин и т. д. Кирпич теряет прочность и разрушается [14].

За счет увеличения объема материала при его увлажнении и обратном процессе при снижении влажности возникают знакопеременные напряжения в теле конструкций, которые со временем разрушают структуру материала, приводят к снижению прочности и разрушению. Данный процесс относят к эрозии. Более характерно эрозионное повреждение для менее однородных по структуре растворных швов, чем для кирпичей.

Увеличение теплопроводности ограждающей конструкции вследствие ее увлажнения [15] приводит к нарушению нормальных условий микроклимата внутренних помещений и снижает энергоэффективность конструкций. Данное последствие является хорошим диагностическим признаком, который используется при обследовании с помощью тепловизионной съемки.

Влияние влажности на прочность

Влияние влажности на прочность кирпича недостаточно освещено в научно-технической литературе. Коэффициент размягчения, определяющий соотношение прочностей материала в водонасыщенном и сухом состояниях, нормируется только для природных камней по ГОСТ 4001-84 «Камни стеновые из горных пород. Технические условия». В нормативных документах на изготовление силикатного и керамического кирпича и камней аналогичный коэффициент отсутствует. Для учета снижения несущей способности кладки при увлажнении в рекомендациях [16] приводится коэффициент $K_{тс}=0,85$. Однако в действительности степень снижения зависит от разных факторов, среди которых фактическая влажность, вид камня и раствора, их изначальная прочность и другие.

По требованиям ГОСТ 8462-85 «Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе» для определения прочности материалов каменной кладки образцы перед испытанием должны быть естественным или искусственным образом высушены. Как следствие, при обследовании конструкций прочность материалов определяется в условиях, не соответствующих фактическим.

Для оценки степени влияния влажности на прочность кирпича при сжатии авторами проведен эксперимент. Исследование выполнено на двух партиях современного кирпича (силикатном и керамическом) марки М200. В ходе исследований из каждого кирпича выбурено по три керны, из которых изготовлены образцы-цилиндры одинаковых размеров с высотой, равной диаметру, составляющему 57 мм [17]. Путем такого отбора полностью сохранена идентичность исследуемого материала внутри каждой партии образцов. Образцы испытаны на сжатие в трех влажностных состояниях: полностью высушенном, водонасыщенном и при промежуточной влажности. Результаты исследований представлены на рисунках 9, 10, по которым видно, что изменение влажности приводит к изменению прочности материала, а зависимость близка к линейной.

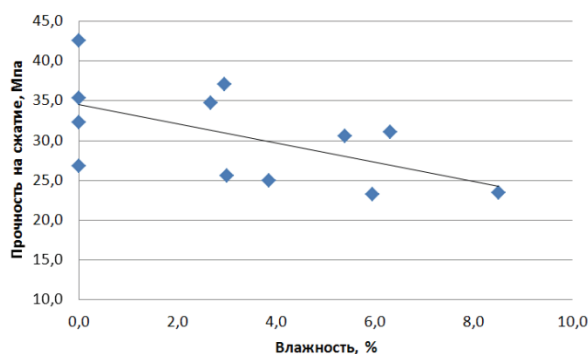


Рисунок 9. Влияние влажности на прочность при сжатии керамического кирпича

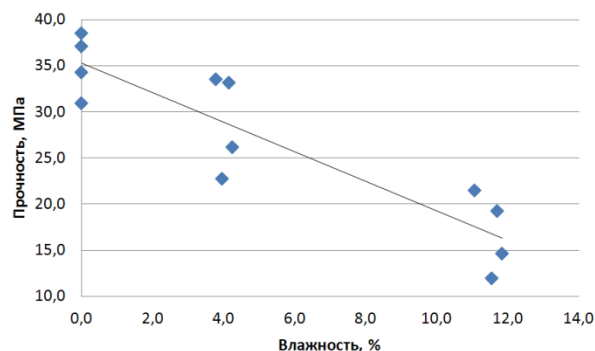


Рисунок 10. Влияние влажности на прочность при сжатии силикатного кирпича

По результатам эксперимента выявлено, что для исследуемых партий материала коэффициент размягчения K_p достиг величин 30 и 50% для керамического и силикатного кирпичей соответственно. Таким образом, при исследовании прочности кирпичей пренебрежение их фактической влажностью в кладке приводит к ошибочным результатам и, как правило, к завышению прочности.

Изложенное выше показывает, насколько важным является измерение влажности материалов кладки при техническом обследовании зданий и сооружений.

Методы контроля влажности

До рассмотрения возможных методов контроля уместно вспомнить о предельном значении влажности кирпича. В отечественной научно-технической литературе однозначного мнения по этому вопросу нет. Например, в пособии по обследованию [18] в качестве нормальной влажности керамического кирпича указано значение 1,5%, а для силикатного – 2,5%. В то же время, в «Правилах и нормах технической эксплуатации жилищного фонда» в качестве нормальной для кирпичных стен указывается влажность 4%. В издании [19] нормальной для керамического кирпича считается влажность до 0,5%. В.В. Инчиком в диссертационном исследовании [20] выявлено, что критическое значение влажности кирпича, при превышении которого возможна миграция солей, составляет 2–5%. До недавнего времени в основных стандартах четких указаний по этому поводу не было. Ситуация изменилась с введением с января 2013 г. СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии», где в приложении Ч указано предельное значение влажности кирпича 2%.

В качестве экспресс-метода контроля влажности можно использовать тепловизионную съемку. Основными преимуществами данного метода являются возможность применения без контакта с материалом (на удаленном расстоянии) и возможность выявления зон увлажнения (контроль не точечный). К безусловным недостаткам следует отнести невозможность определения величины влажности и применимость метода только при наличии перепада температур, что резко снижает диапазон применения как по времени года, так и по обследуемым конструкциям.

Основным методом измерения влажности строительных материалов является определение потери массы образца после его искусственного высушивания по ГОСТ 24816-81 «Материалы стеновые. Метод определения сорбционной влажности». Метод является наиболее точным и достоверным, однако для его применения необходим отбор проб материала, а выполнение измерений производится в лабораторных условиях.

В практике обследования широко применяются методы неразрушающего контроля (НК) влажности. Основными из них являются диэлькометрический, основанный на изменении параметров электромагнитного поля, возбуждаемого датчиком прибора, и кондуктометрический, измеряющий электрическое сопротивление материала в поверхностном слое. Данные методы применяются для исследования древесины и искусственных каменных материалов (бетона, раствора, кирпича). Однако государственных стандартов, регламентирующих их применение для кирпича в России, нет. Основными достоинствами методов являются высокая производительность контроля и отсутствие необходимости выполнения подготовительных мероприятий при наличии непосредственного доступа к кирпичу. Основным недостатком электрических методов НК является резкое увеличение погрешности измерений при засоленности кладки. Присутствие соли в исследуемом материале сильно искажает отклик регистрируемого параметра, что приводит к завышению результата измерения.

Помимо этого, необходимо отметить, что указанные электрические методы контроля измеряют поверхностную или приповерхностную влажность. В действительности влажность кирпичной кладки (отдельного камня) распределена по высоте, глубине и длине конструкции (отдельного камня), причем это распределение весьма резкое. Поэтому электронные влагомеры в разных точках одного кирпича могут показывать разные значения влажности.

Относительно недавно на отечественном рынке появилось оборудование для измерения влажности методом карбида кальция (CaC_2), который применим и для кирпича. Набор инструментов для применения метода предполагает следующую последовательность действий. Отбирается проба исследуемого материала. Проба измельчается до песчано-пылевой фракции. Часть пробы известной массы помещается в емкость вместе с ампулой карбида кальция и стальными шариками. Емкость герметично закрывается крышкой с манометром. После встряхивания и разбивания ампулы карбид кальция вступает в реакцию с имеющейся в навеске влагой, что сопровождается выделением определенного объема газа. По изменению давления в емкости, пропорционального массе влаги и известной массе материала, определяется относительная влажность. Основными преимуществами метода являются:

- 1) контроль в полевых условиях (отсутствует операция высушивания);
- 2) высокая точность измерения при меньшем времени контроля по сравнению с лабораторным;
- 3) отсутствие влияния на результат измерений наличия засоленности кладки.

Для сравнения трех вышеуказанных методов контроля (метод взвешивания, диэлькометрический и карбида кальция) и выявления погрешности измерения авторами проведен эксперимент. Суть исследования заключалась в измерении влажности керамического и силикатного кирпичей косвенными методами при известной фактической влажности, определенной по стандартной методике. Часть исследуемых образцов была искусственно засолена в растворе NaCl . Результаты эксперимента представлены на рисунках 11, 12.



Рисунок 11. Погрешность определения влажности керамического кирпича (красным выделены засоленные образцы)



Рисунок 12. Погрешность определения влажности силикатного кирпича (красным выделены засоленные образцы)

Как видно по представленным на рисунках результатам эксперимента, погрешность измерения влажности методами карбида кальция и диэлькометрическим методом увеличивается при повышении влажности. При малых значениях влажности (до 5%) ошибка не превышает 2%, при увеличении влажности до 14% ошибка возрастает до 4–6% (без солей). При этом в случае засоленности кирпича ошибка измерений диэлькометрическим методом резко увеличивается, а при использовании карбида кальция остается на прежнем уровне.

Выводы

1. Увлажнение кирпичной кладки приводит к большинству из возможных для данного строительного материала повреждений (см. рис. 5).
2. Получена зависимость между прочностью на сжатие керамического и силикатного кирпича. Показано, что увеличение влажности приводит к существенному снижению прочности кирпича, что необходимо учитывать при поверочном расчете конструкций.
3. Предлагается производить испытание образцов при влажности, соответствующей эксплуатационной. Другой возможный вариант заключается в учете повышенной влажности путем введения в расчет коэффициента, полученного опытным путем для кирпича, примененного в кладке.
4. Показано наличие недопустимо высокой погрешности, которая сопровождает применение электрических методов НК влажности при наличии в кирпиче солей. Однако, с учетом высокой производительности контроля, применение данных методов целесообразно для качественного анализа, выявления зон увлажнения (засоленности) и составления карт влажности.
5. Экспериментально выявлено, что результаты измерения влажности методом карбида кальция характеризуются приемлемой погрешностью измерений, не зависящей от засоленности материала.
6. Для определения величины влажности рекомендуется комплексное применение методов «карбид кальция + электрический метод» или «карбид кальция + тепловизионная съемка». При этом первым методом определяется величина влажности, а вторым – размеры зоны увлажнения.

Литература

1. Старцев С.А. Анализ причин неблагоприятного состояния подвалов в Санкт-Петербурге // Инженерно-строительный журнал. 2009. №2(4). С. 31–42.
2. Бабков В.В., Самофеев Н.С., Чуйкин А.Е. Силикатный кирпич в наружных стенах зданий: анализ состояния, прогноз долговечности и способы ее повышения // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 35–40.
3. Bajare D, Svinka V. Restoration of the historical brick masonry. // Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. 2000. Pp. 3–11.

4. Огородник В.М., Огородник Ю.В. Некоторые проблемы обследования зданий с отделкой лицевым кирпичом в Санкт-Петербурге // Инженерно-строительный журнал. 2010. №7(17). С. 10–13.
5. Старцев С.А. Проблемы обследования строительных конструкций, имеющих признаки биоповреждения // Инженерно-строительный журнал. 2010. №7(17). С. 41–46.
6. Qi-Wang, Guang-You Ma, Lin-Yan He. Characterization of bacterial community inhabiting the surfaces of weathered bricks of Nanjing Ming city walls // Science of The Total Environment. 2011. Vol. 409. No.4. Pp. 756–762.
7. Мироненко Е.В. Физико-механические процессы высолообразования в кирпичной кладке и методы их устранения: дисс... канд. техн. наук. Самара, 2006. 160 с.
8. Jonaitis B., Marčiukaitis G., Valivonis J. Analysis of the mechanics of carbamide induced destruction of concrete and ceramic bricks // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 48. Pp. 917–924.
9. Koniorczyk M., Gawin D. Modelling of salt crystallization in building materials with microstructure – Poromechanical approach // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 36. Pp. 860–873.
10. Gentilini C., Franzoni E., Bandini S. Effect of salt crystallisation on the shear behaviour of masonry walls: An experimental study // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 37. Pp.181–189.
11. Lubelli B., Van Hees R.P.J., Brocken H.J.P. Experimental research on hygroscopic behaviour of porous specimens contaminated with salts // Construction and Building Materials. 2004. Vol. 18. No.5. Pp. 339–348.
12. Инчик В.В. Опыт обследования состояния кирпичных стен зданий, сооружений и памятников архитектуры, подвергшихся солевой коррозии // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2001. №1(4). С. 64–71.
13. Попеско А.И., Макаренко С.В. Экспериментально-теоретические исследования элементов кирпичной кладки при воздействии химически агрессивных сред // Вестник ВСГУ. 2012. №1(36). С. 184–188.
14. Фасеева Г.Р., Салахов А.М., Хацринов А.И. Структура пор и сравнительные характеристики кирпича // Вестник Казанского технологического университета. 2010. №8. С. 220–223.
15. Ананьев А.И., Абарыков В.П. Обоснование теплотехнических требований в межгосударственном стандарте ГОСТ 530-2007 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» // Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции «Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий», 10 ноября – 12 декабря 2009 г. Санкт-Петербург, 2009. С. 7–18.
16. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. М.: ЦНИИСК им В.А. Кучеренко, 1988. 36 с.
17. Улыбин А.В., Зубков С.В. О методах контроля прочности керамического кирпича при обследовании зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2012. №3(29). С. 29–34.
18. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий. М.: ОА «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ», 1997. 179 с.
19. Калинин В.М., Сокова С.Д. Оценка технического состояния зданий: Учебник. М.: ИНФРА-М, 2006. 268 с.
20. В.В.Инчик. Высолы и солевая коррозия кирпичных стен: Дис... докт. техн. наук. Санкт-Петербург, 2000. 47 с.

*Алексей Владимирович Улыбин, Санкт-Петербург, Россия
+7(921)777-45-16; эл. почта: ulybin@mail.ru*

*Сергей Александрович Старцев, Санкт-Петербург, Россия
+7(911)134-60-39; эл. почта: StartsevSA@biospacestroy.ru*

*Сергей Владимирович Зубков, Санкт-Петербург, Россия
+7(812)535-57-82; эл. почта: svzubkov@mail.ru*

© Улыбин А.В., Старцев С.А., Зубков С.В., 2013

Методика оценки ресурса работоспособности конструктивных элементов жилых зданий

Аспирант О.Н. Попова,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»;

к.т.н., доцент Т.Л. Симанкина,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Ключевые слова: нестационарный (постепенный) отказ; моделирование нарастания физического износа конструкций; безопасность эксплуатации; долговечность; сметная стоимость ремонтно-строительных работ; планирование текущего и капитального ремонта

Современное здание представляет собой сложную систему, состоящую из множества конструктивных элементов. При этом к любому строительному объекту предъявляется ряд требований, которые выражаются через совокупность показателей качества [1–11]. Таким образом, его качество зависит от свойств этих элементов, соответствия их параметров нормативным или расчетным показателям, обеспечивающим безотказную работу, и от их способности выполнять заданные функции на протяжении установленного срока службы.

Качество конструктивных элементов, обеспечивающих безопасность эксплуатации здания, является комплексным свойством конструкций объекта (здания или сооружения) противостоять его переходу в аварийное состояние [12, 13]. Безопасность здания зависит от проектных решений и их реализации при строительстве объектов, от остаточного ресурса и технического состояния объекта, от степени изменения объекта и окружающей среды, от нормативов по эксплуатации и качества их соблюдения в течение срока службы объекта и пр. Обеспечение безопасности эксплуатации является не только технической, но и экономической задачей, поскольку совокупность затрат на воспроизводственные мероприятия в течение срока службы объекта сопоставима с затратами на новое строительство, а зачастую и превышает их. Этап эксплуатации является наиболее длительным периодом функционирования объекта, поэтому планирование затрат на восстановление объекта должно основываться на изучении и прогнозировании технического состояния здания и его элементов, происходящих во времени, для установления состава и объема работ.

Обзор литературы

Качество строительного объекта с течением времени снижается относительно уровня, заложенного при проектировании. Таким образом, безопасная эксплуатация здания предполагает постоянное обследование его технического состояния, т. е. проведение комплекса мероприятий по определению и оценке фактических значений контролируемых параметров, характеризующих работоспособность объекта обследования и определяющих возможность его дальнейшей эксплуатации, реконструкции или необходимости восстановления, усиления, ремонта [12, 13]. Объем восстановительных мероприятий и затраты на их проведение зависят от текущего состояния здания и его конструктивных элементов, определенных на основании технического обследования. Планирование затрат на восстановление осуществляется посредством прогнозирования динамики изменения технического состояния здания в течение его срока службы.

Согласно ГОСТ Р 54257-2010 срок службы определяется как продолжительность нормальной эксплуатации строительного объекта до состояния, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна. Долговечность – это способность строительного объекта сохранять физические и другие свойства, устанавливаемые при проектировании и обеспечивающие его нормальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы при надлежащем техническом обслуживании [14].

В СНиПе срок службы зданий, отдельных его элементов и конструкций не регламентируется. Вместе с тем, именно показатель долговечности является основным как при проектировании, так и при эксплуатации зданий и их отдельных конструктивных элементов. Таким образом, принципиальное значение приобретает проблема определения норм долговечности строительных объектов, которой занимались и продолжают заниматься многие ученые [1–7, 15–22].

Попова О.Н., Симанкина Т.Л. Методика оценки ресурса работоспособности конструктивных элементов жилых зданий

Прогнозирование долговечности является очень сложной задачей ввиду необходимости сбора данных о величине износа на протяжении длительного времени, которое может превышать 100 лет, а в некоторых случаях исчисляться веками. Прогнозирование темпов нарастания износа и оценка долговечности основных конструкций чаще осуществляется на основании теоретических научных методов [1, 5, 7, 23]. Для всех существующих методик прогнозирования технического состояния конструктивных элементов здания необходимы длительный срок наблюдений и достаточный объем анализируемых данных. Не следует безусловно применять какую-либо из современных методик, поскольку имеют место ограничения и неточности расчетов. Таким образом, корректность существующих подходов требует дальнейшего исследования.

Фактический срок службы может существенно отличаться от нормативного или расчетного, который является рекомендуемым сроком эксплуатации до выполнения ремонта, поскольку по совокупному воздействию неучтенные факторы могут значительно изменить особенности и условия эксплуатации элемента. Практика показывает, что большинство конструкций за период нормативной эксплуатации не полностью исчерпывают ресурс долговечности.

Моментом окончания срока службы конструктивного элемента и здания в целом является наступление предельного состояния, или отказ. Отказы строительных конструктивных элементов могут быть условно разделены на стационарные (внезапные) и нестационарные (постепенные). Внезапные отказы характеризуются почти мгновенным выходом элемента из строя, и предсказать его по изменению величины параметров надежности во времени практически невозможно. Вопросы надежности конструкций при стационарных причинах отказов (т. е. не зависящих от времени, при которых вероятность повреждения постоянна) достаточно широко освещены в специальной литературе [19, 24–34]. Однако такой вид отказов является нетипичным для строительных конструкций.

При нормальных условиях эксплуатации зданий имеет место постепенный отказ, который возникает в результате длительного выхода параметров надежности за пределы нормативных допусков [1, 5, 35, 36]. Поэтому прогнозирование постепенных отказов является одной из важнейших задач исследований эксплуатационной надежности зданий, так как именно в таких условиях работает большая часть элементов здания. Вместе с тем, определению надежности конструктивных элементов зданий при нестационарных причинах отказов уделялось недостаточное внимание.

В настоящее время основным документом, определяющим правила обследования и мониторинга технического состояния зданий и сооружений, является ГОСТ Р 53778-2010 [12], а с 01.01.2014 года будет введен национальный стандарт ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [13]. В документе приведена справочная классификация и причины возникновения дефектов и повреждений в некоторых конструкциях. Представленные в ГОСТ справочные сведения позволяют определить текущее техническое состояние конструктивных элементов и спланировать состав и объем работ по ремонту или реконструкции в краткосрочной перспективе. Однако в документе не отражено изменение состояния конструктивных элементов во времени, таким образом, осуществить стратегическое планирование состава и объема ремонтно-строительных работ не представляется возможным.

Наиболее часто применяемым документом, регламентирующим контроль технического состояния жилищного фонда, является ВСН 53-86(р) «Правила оценки физического износа жилых зданий» [36], введенный в действие в 1987 году. В рамках данного документа разработаны таблицы физического износа конструкций и элементов жилых зданий, описывающие признаки износа, их количественную оценку и процент физического износа, соответствующий данным признакам, а также примерный состав работ по восстановлению элемента в соответствии с его техническим состоянием. В документе приведены графики изменения физического износа в зависимости от времени эксплуатации различных конструкций.

В работах многих авторов [1–5, 7, 21, 22, 34–36, 38–43] отмечается целесообразность определения срока службы исходя из оптимизации экономических затрат на эксплуатацию, т. е. срока службы, при котором минимизируются либо общие затраты на эксплуатацию, либо суммарные приведенные затраты на возведение и эксплуатацию зданий.

Согласно ВСН 53-86(р), физический износ на момент его оценки выражается соотношением стоимости объективно необходимых ремонтных мероприятий, устраняющих повреждения конструкции, элемента, системы или здания в целом, и их восстановительной стоимости. Таким образом, данный подход приближает нас к определению стоимостных показателей ремонтно-

Попова О.Н., Симанкина Т.Л. Методика оценки ресурса работоспособности конструктивных элементов жилых зданий

строительных работ при восстановлении элементов, конструкций и систем здания. Однако, как показывают практика и многочисленные исследования [1, 5, 7], примерная стоимость ремонта в процентах от восстановительной стоимости может значительно отличаться от заданных величин износа. При этом данная величина зависит как от вида проводимых работ (текущий или капитальный ремонт), так и от величины физического износа конструкции на момент проведения ремонта. Проведение текущего ремонта имеет своей целью поддержание конструкции, элемента или системы в работоспособном состоянии и предполагает лишь частичную их замену, поэтому часть конструкций не подвергается проведению восстановительных работ. С другой стороны, мероприятия капитального ремонта предполагают не только замену конструкции или большей ее части, но и проведение подготовительных и демонтажных работ. В результате суммарная стоимость капитального ремонта превышает восстановительную стоимость.

Постановка задачи

Задачей исследования является математическое моделирование динамики нарастания нестационарных отказов конструктивных элементов здания на протяжении всего срока их службы, а также расчет и моделирование динамики затрат на восстановление как доли сметной стоимости ремонтно-строительных работ от величины физического износа конструкций.

Описание исследования

Как было отмечено выше, наиболее полные данные о динамике нестационарных отказов конструктивных элементов в течение срока службы для различных конструктивных элементов представлены в ВСН 53-86(р). Одним из основных недостатков нормативных данных ВСН 53-86(р) является отсутствие описывающих физический износ математических моделей, что затрудняет проведение дальнейших прогнозных расчетов. Таким образом, на первом этапе исследования проведено моделирование физического износа на примере конструктивных элементов группы однородных жилых зданий.

В работах [1, 2, 44–46] указывается, что для математического моделирования сроков службы основных элементов и конструкций жилых зданий применим закон нормального распределения, а для некоторых ограждающих и защитных конструкций – экспоненциальный закон. Однако, по мнению авторов, наиболее приближенным к действительности является моделирование на основе логистической зависимости, поскольку она наиболее точно описывает полный цикл развития.

В большинстве случаев износ развивается медленно от нулевого уровня, но с возрастающим ускорением. В середине цикла рост происходит по линейному тренду, т. е. ускорение становится равным нулю. В завершающей части цикла при приближении к предельному значению показателя рост замедляется по гиперболе. Обобщенный вид логистической кривой изображен на рисунке 1а с диапазоном изменения ординаты (0; A), где середина ряда пересекает ось ординат, при этом кривая не может доходить и касаться нижней и верхней границ интервала, ограниченных асимптотами $y_1 = 0$ и $y_2 = A$.

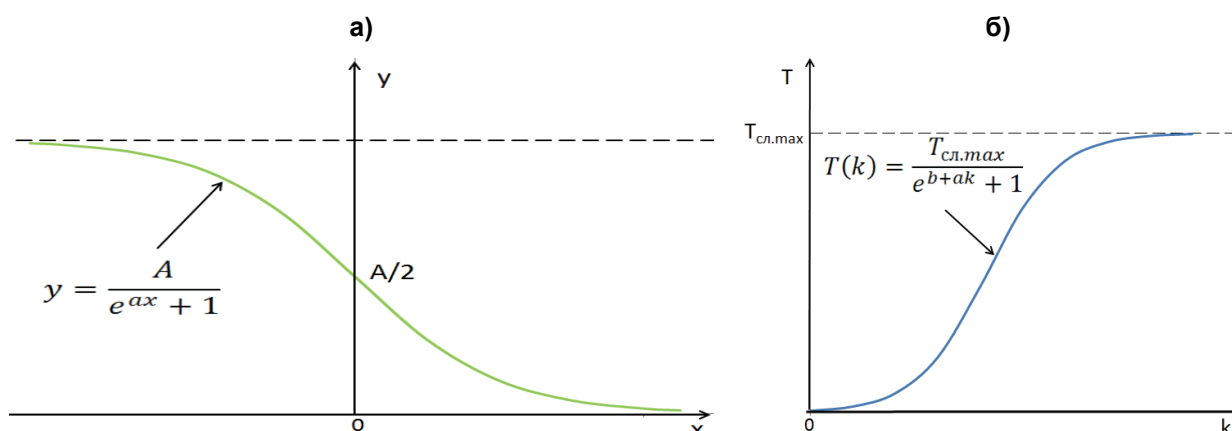


Рисунок 1: а) обобщенный вид логистической кривой; б) типовая кривая графика физического износа по ВСН 53-86(р) в виде логистической кривой

Представим кривую графика физического износа по ВСН 53-86(р) в виде логистической кривой [47] (рис. 1б):

$$T(k) = \frac{T_{cl.max} - T_{cl.min}}{e^{b+ak} + 1} + T_{cl.min}, \quad (1)$$

где $T_{cl.max}$ – нормативный (максимальный) срок службы, в годах;

$T_{cl.min}$ – минимальный срок службы, в годах;

a – параметр, определяющий наклон кривой в точке перегиба (для функции износа $a < 0$);

e – основание натуральных логарифмов;

b – параметр, определяющий положение точки перегиба;

k – физический износ, %.

Особенностью логистического тренда является этап обоснования значений максимального и минимального уровней временного ряда. Это обоснование осуществляется на основе, во-первых, уровней фактического ряда, во-вторых, теоретических, т. е. внешних по отношению к статистике соображений, относящихся к содержанию изучаемого процесса. Минимальный срок службы конструктивного элемента определяется начальным моментом его эксплуатации, т. е. $T_{cl.min} = 0$, максимальный – нормативным сроком эксплуатации, следовательно, преобразуем формулу (1) к виду:

$$T(k) = \frac{T_{cl.max}}{e^{b+ak} + 1}. \quad (2)$$

Уравнение логистического тренда в общем виде непосредственно логарифмировать невозможно. Преобразуем его в форму

$$\frac{T_{cl.max}}{T(k)} - 1 = e^{b+ak} \quad (3)$$

и обозначим его левую часть как

$$\frac{T_{cl.max}}{T(k)} - 1 = \hat{\xi}, \quad (4)$$

т. е.

$$\hat{\xi} = e^{b+ak} \quad (5)$$

$$\ln \hat{\xi} = b + ak. \quad (6)$$

Условие метода наименьших квадратов:

$$\sum (\ln \xi - \ln \hat{\xi})^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Подставляя значение $\ln \hat{\xi}$, получим:

$$\sum (\ln \xi - b - ak)^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

После вычисления частных производных по a и b получаем нормальные уравнения метода наименьших квадратов для логистической кривой, аналогичные таковым для прямой линии, так как заменой на $\hat{\xi}$ фактически проведена линеаризация функции логистической кривой:

$$nb + a \sum k = \sum \ln \xi, \quad (9)$$

где n – количество наблюдений.

$$b \sum k + a \sum k^2 = \sum k \ln \xi. \quad (10)$$

При переносе начала отсчета показателей износа в середину ряда система упрощается до двух уравнений с одним неизвестным в каждом из них:

$$nb = \sum \ln \xi, \text{ откуда } b = \overline{\ln \xi}; \quad (11)$$

$$a \sum k^2 = \sum k \ln \xi, \text{ откуда } a = \frac{\sum k \ln \xi}{\sum k^2}. \quad (12)$$

Характеристики исследуемых конструктивных элементов и результаты проведенного моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Моделирование срока эксплуатации конструктивных элементов

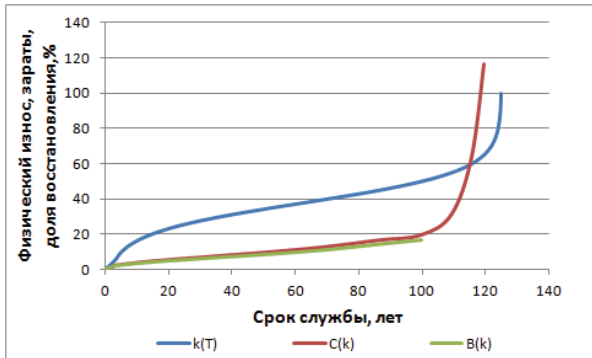
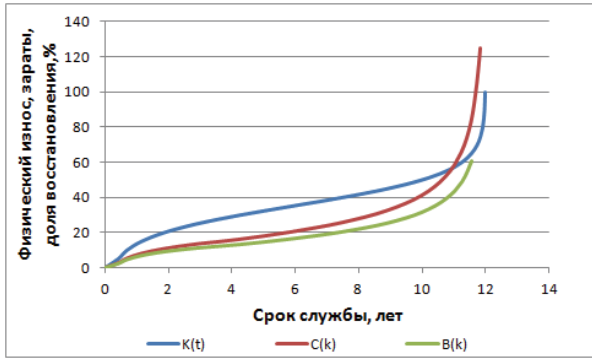
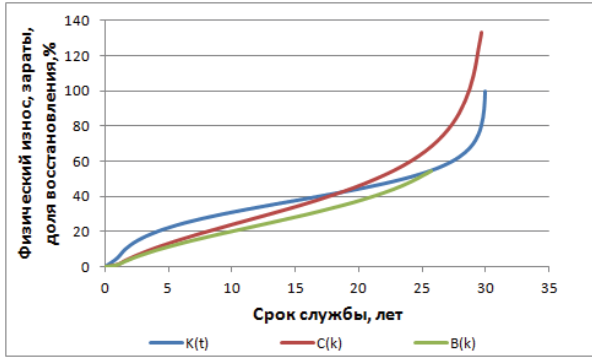
Наименование конструкции	Описание	Уравнение функции логистического временного ряда
Фундамент	свайный железобетонный	$T(k) = \frac{125}{e^{4,3-0,11k} + 1}$
Наружные стены	трехслойные железобетонные панели	
Перекрытия, покрытия	сборные железобетонные плиты	
Лестницы	железобетонные	
Полы	наливные	$T(k) = \frac{80}{e^{4,5-0,11k} + 1}$
Оконные проемы	закладные, двойные	$T(k) = \frac{50}{e^{3,8-0,10k} + 1}$
Дверные проемы	закладные, одностворчатые, филенчатые	
Крыша, кровля	рулонная по железобетонным плитам	$T(k) = \frac{12}{e^{3,9-0,11k} + 1}$
Отделка	масляная/водоэмульсионная окраска по оштукатуренным стенам, водоэмульсионная окраска потолков	$T(k) = \frac{10}{e^{3,3-0,08k} + 1}$
Система центрального отопления	стояки стальные	$T(k) = \frac{30}{e^{3,9+0,10k} + 1}$
Система внутреннего горячего водоснабжения	стояки и магистрали из черных труб	$T(k) = \frac{10}{e^{3,3-0,08k} + 1}$
Система внутреннего водопровода	трубопроводы стальные черные	$T(k) = \frac{15}{e^{4,1-0,11k} + 1}$
Система внутренней канализации	трубопроводы чугунные	$T(k) = \frac{40}{e^{4,3-0,11k} + 1}$
Система внутреннего электрооборудования	внутриквартирные сети, скрытые 220В	$T(k) = \frac{40}{e^{4,3-0,11k} + 1}$

Примечание: $T(k)$ – функция зависимости срока службы от величины физического износа конструкции

Согласно ВСН 53-86(р), значения физического износа для конструкций, элементов и систем следует округлять до 5%. Вероятность того, что износ окажется в границах доверительного интервала в диапазоне 5% от измеренного значения, составляет 90% для основных несущих конструкций (фундамент, наружные стены, перекрытия, покрытия, лестницы), для остальных конструкций – 95%.

Для целей планирования ремонтно-строительных работ целесообразно определение зависимости величины нестационарного износа от времени. Поэтому на втором этапе исследования произведено преобразование функции $T(k)$ в обратную ей функцию $K(t)$. Примеры уравнений функции и их графики представлены в таблице 2.

Таблица 2. Моделирование физического износа конструктивных элементов и затрат на их восстановление

Графики изменения физического износа, затрат на восстановление и доли восстановления	Уравнение функции
 Наружные стены	$K(t) = 37,89 - \frac{\ln\left(\frac{125}{t} - 1\right)}{0,11}$ $C(k) = \begin{cases} 1,71e^{0,05K(t)}, & 0 \leq K(t) < 50 \\ 0,41K(t)^2 - 40,7K(t) + 1029,6, & K(t) \geq 50 \end{cases}$ $B(k) = C(k) \cdot \left(1 - \frac{0,15 \cdot K(t) + 5}{100}\right)$
 Кровля	$K(t) = 36,85 - \frac{\ln\left(\frac{12}{t} - 1\right)}{0,11}$ $C(k) = \begin{cases} 0,54K(t), & 0 \leq K(t) < 30 \\ 3,95e^{0,05K(t)}, & K(t) \geq 30 \end{cases}$ $B(k) = C(k) \cdot \left(1 - \frac{0,25 \cdot K(t) + 10}{100}\right)$
 Система отопления	$K(t) = 37,76 - \frac{\ln\left(\frac{30}{t} - 1\right)}{0,10}$ $C(k) = 0,02K(t)^2 + 0,15K(t)$ $B(k) = C(k) \cdot \left(1 - \frac{0,2 \cdot K(t) + 10}{100}\right)$

Примечание: $K(t)$ – функция зависимости физического износа от срока службы конструкции; $C(k)$ – функция зависимости доли сметной стоимости ремонтно-строительных работ от восстановительной стоимости при изменении величины физического износа конструкции; $B(k)$ – функция зависимости доли восстановления конструкции от доли сметной стоимости ремонтно-строительных работ и величины физического износа конструкции.

В рамках работы произведен расчет величины затрат на ремонтно-восстановительные работы в зависимости от величины физического износа рассматриваемых конструктивных элементов зданий. Разработана сводная ведомость стоимости восстановительных ремонтов на основании признаков износа и работ по их устранению, описанных в ВСН 53-86(р), а также произведен сметный расчет стоимости нового строительства каждого конструктивного элемента в расчете на 100 м² общей площади. Расчеты выполнены на основании смет, составленных по сборникам государственных элементных сметных норм ресурсным методом в расчете на единицу измерения конкретного элемента (фундаменты, стены, перекрытия, кровля, полы, проемы, отделка – 100 м² поверхности конструкции; инженерные системы – 100 м конструкции), а также на основании «Сборника сметных нормативов планирования стоимости работ по капитальному ремонту зданий и сооружений на 2010 г.» [48] (табл. 3).

Таблица 3. Стоимость ремонта на основании признаков износа согласно ВСН-53-86(р)

Диапазон износа	Сметная стоимость ремонтно-строительных работ конструктивных элементов, руб. на единицу измерения. Составлено в ценах на 1 квартал 2013 г.															
	Фундамент	Стены		Перекрытия	Кровля	Полы	Проемы		Отделочные работы	Санитарно-электротехнические работы					Прочие работы	
		Наружные и внутренние капитальные стены	Перегородки				оконные	дверные		Внутренняя отделка	Отопление	Водопровод	Электроосвещение	Горячее водоснабжение		Канализация
Ж/б сваи с монолитным ростверком	Ж/б панели	Гипсобетонные	Ж/б плиты	Рулонная	Дощатые, плиточные	Двойные створные	Из стройплиты	Масляная окраска, поклейка обоев, побелка	Центр.	От гор. сети	Скрытая проводка	Центральное	Центральное	Ж/б лестницы		
0-10	530 - 990	34 492	211	6 385	1 766	85 - 150	288 - 515	515 - 1 117	-	477 - 2 453	156 - 360	1350 - 4168	206 – 2 925	212 – 1 119	568 - 770	
11-20		35 346 - 46 997		19 607												
21-30	1 170 - 2 652	55 702 - 68 248	303 - 908	24 928 –	2 340 - 2 525	390 - 772	543 - 773	1 730	195 - 810	2 755 - 9 800	1 801 - 5 884	4 895 - 11 128	3 910 - 6 330	1 738 - 9 424	1 540 - 3 005	
31-40		71 957 - 96 275		43 524 – 52 095 – 84 664												
41-50	4 282 - 6 590	111 737 - 157 755	1 095 - 1 520	89 013 - 143 293	4 712 - 5 920	845 - 1 305	852 - 1 870	2 420 - 2 815	1 305 - 1 785	15 721 - 14 962	6 179 - 8 565	15 261 - 24 515	7 046 – 12 816	10 034 - 14 956	3 030 - 6 660	
51-60		231 650 - 361 711		175 860 - 231 851												
61-70	-	1 124 221 - 1 279701	5 075	325 610	23 075	2 407	3 104	7 304	4 075	46 058	11 750	34 622	19 764	26 126	57 302	
71-80		-														
Стоимость восстановления	272 287	1 067 573	4 700	307 588	18 500	1 960	2 386	5 831	3 462	34 561	11 030	21 380	16 378	15 146	49 690	

Попова О.Н., Симанкина Т.Л. Методика оценки ресурса работоспособности конструктивных элементов жилых зданий

На основании величин сметной стоимости ремонтно-строительных работ, представленных в таблице 3, рассчитана доля затрат на восстановление от сметной стоимости устройства (монтажа) данных конструкций при новом строительстве. Примеры некоторых уравнений функций затрат на восстановление конструктивных элементов $C(k)$, а также их графики представлены в таблице 2. Из графиков видно, что на ранних сроках эксплуатации конструктивных элементов стоимость ремонтно-строительных работ текущего характера меньше величины физического износа элемента. Однако после некоторого периода эксплуатации, когда состояние конструкций приближается к ветхому, затраты на их восстановление резко возрастают. Прежде всего это объясняется тем, что при износе элементов в пределах 61–80% нормы ВСН 53-86(р) предполагают проведение работ по их полной замене, что приводит к скачку стоимости ремонтно-восстановительных работ за счет роста затрат по статье «Материалы».

Затраты на восстановление долгоживущих несменяемых конструкций (стены, перекрытия и лестницы) резко возрастают после 100 лет службы, что обусловлено высокими затратами на укрепление элементов. При этом положение [49], регламентирующее продолжительность эффективной эксплуатации, определяет, что данные конструкции не подлежат замене на протяжении всего периода их эксплуатации.

Аналогичная ситуация наблюдается при эксплуатации сменяемых элементов (полы, проемы, кровля, отделка, внутренние инженерные системы), затраты на восстановление которых резко возрастают, поскольку при достижении износа более 60% требуется капитальный ремонт – замена. При этом затраты на замену значительно превышают сметную стоимость нового строительства.

Следует отметить, что затраты на ремонтно-восстановительные работы предусматривают не только работы по воспроизводству аналогичных конструкций, но и подготовительные работы и демонтаж существующих изношенных элементов, увеличивая общую величину трудозатрат, а следовательно, и стоимость работ. В результате проведенного исследования было отмечено, что затраты на подготовительные и (или) демонтажные работы присутствуют практически при любом виде и объеме ремонтно-восстановительных мероприятий, и их доля увеличивается при росте физического износа конструкции. В условиях поставленной задачи доля таких работ выделена из общей суммы затрат на основании единичных норм и расценок, и определена степень восстановления для каждого конструктивного элемента как разница между общей суммой затрат и стоимостью подготовительных и демонтажных работ. Например, при отделке доля восстановления конструкции меньше затрат сметной стоимости работ на величину затрат по подготовке поверхности стен, включающих работы по расчистке отстающей (старой) краски (ЕНиР20.1-189-3-02-Е, ЕНиР20.1-189-3-01-Е), очистке от загрязнения и удалению пятен (промывка поверхности) (ЕНиР20.1-188-4-01-А), отбивке штукатурки (ЕНиР20.1-181-01-Б) и т. д. Таким образом, была определена функция зависимости доли восстановления конструктивных элементов $B(k)$ от затрат на восстановление и величины износа конструкции. Значение $B(k)$ определяет величину снижения уровня физического износа конструкции после проведенного ремонта, позволяя оценить эффективность проведения восстановительных мероприятий и техническое состояние конструкции по их завершении.

Исследования авторов, основанные на обследовании конструктивных элементов более 90 жилых домов, показали, что темпы износа данных конструкций отличаются от данных ВСН 53-86(р) и попадают в доверительный интервал 5% с вероятностью 90%. Представленная методика моделирования физического износа, стоимости ремонтно-строительных работ и доли восстановления может быть применена для конструктивных элементов, описанных нормами ВСН 53-86(р).

В настоящее время появилось множество новых материалов, конструктивных решений и технологий производства работ, которые позволяют значительно увеличить долговечность конструкций. Нормативные сроки службы новых конструктивных элементов регламентированы ГОСТ, а также заявлены изготовителями. Однако исследования сроков службы этих конструкций и материалов не проведены, т. е. заключение о действительной долговечности и темпах нарастания физического износа можно будет получить по истечении заявленных сроков службы на основании наблюдений. Тем не менее, при необходимости прогнозирования затрат на восстановление целесообразно использовать типы графиков, представленные в нормативах, ориентируясь на соответствие сроков службы изучаемых материалов, изделий и конструкций графикам ВСН 53-86(р), поскольку с большой долей вероятности можно предположить, что динамика изменения состояния будет описываться типовыми графиками логистических кривых.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Численное значение физического износа, определенное нормами ВСН 53-86(р), не может использоваться для определения затрат на восстановление элементов ввиду несоответствия затратам на восстановление и доле восстановления конструктивных элементов. Такое несоответствие является следствием следующих причин:

- проводимые ремонтно-восстановительные работы текущего характера направлены лишь на частичную замену износившейся конструкции;
- необходимость осуществления сопутствующих работ при проведении ремонта, таких как демонтаж, очистка поверхностей и пр., снижают долю восстановления конструкции по сравнению с величиной затрат на него.

2. В целях осуществления эффективного планирования ремонтных мероприятий необходимо учитывать индивидуальные характеристики объектов управления посредством использования разработанных моделей, описывающих процессы нарастания физического износа, общей стоимости затрат ремонтных работ и доли восстановления элементов во времени на протяжении всего периода эксплуатации конструктивного элемента.

3. Безопасность эксплуатации здания зависит от качества планирования ремонтно-восстановительных работ и определяется не только техническим состоянием конструктивных элементов объектов, но и экономической эффективностью воспроизводственных мероприятий. В свою очередь, математическое моделирование в настоящее время является наиболее эффективным инструментом прогнозирования в системе планово-предупредительных ремонтов, повышающим точность и значимость управленческих решений.

Литература

1. Рогонский В.А., Костриц А.И., Шеряков В.Ф. [и др.] Эксплуатационная надежность зданий и сооружений. СПб.: Стройиздат 2004. 172 с.
2. Ройтман А.Г. Надежность конструкций эксплуатируемых зданий. М.: Стройиздат, 1985. 175 с.
3. Стражников А.М. Мониторинг технического состояния жилых зданий. // Доркомэкспо. Сб. докладов. 2001. С. 32–33.
4. Стражников А.М. Мониторинг качества жилищного фонда. М., 2002. 338 с.
5. Тарасевич Е.И. Управление эксплуатацией недвижимости. СПб.: МКС, 2006. 838 с.
6. Уткин В.С., Уткин Л.В. Расчет надежности строительных конструкций при различных способах описания неполноты информации. Учебное пособие / ВоГТУ. Вологда, 2009. 126 с.
7. Шрейбер К.А. Технология и организация ремонтно-строительного производства. Научное издание. М.: АСБ, 2008. 296 с.
8. Положение по оценке непригодности жилых домов и жилых помещений государственного и общественного жилищного фонда для постоянного проживания [Электронный ресурс]. М.: МЖКХ РСФСР, 1986. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://snipov.net/c_4746_snip_106624.html (дата обращения: 12.07.2013).
9. Cheong-Hoon Baek, Sang-Hoon Park. Changes in renovation policies in the era of sustainability // Energy and Buildings. 2012. No.47. Pp. 485–496.
10. Alanne K. Selection of renovation actions using multi-criteria «knapsack» model // Automation in Construction. 2004. Vol. 13. Issue 3. Pp. 377–391.
11. Thomsen A. Housing Pathology // International Encyclopedia of Housing and Home. Oxford: Elsevier, 2012. Vol. 3. Pp. 550–558.
12. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2010. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. <http://files.stroyinf.ru/Data1/59/59073/> (дата обращения: 18.10.2013).

13. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2011. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.gostinfo.ru/PRI/Page/GetPage?MaterialID=246290&Ipage=12&page=1> (дата обращения: 18.10.2013).
14. ГОСТ Р 54257-2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. М.: Стандартинформ, 2013. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://vsegost.com/Catalog/50/50634.shtml> (дата обращения: 28.09.2013).
15. Абраштов В.С. Техническая эксплуатация и обследование строительных конструкций. М.: АСВ, 2002. 288 с.
16. Бойко М.Д. Диагностика повреждений и методы восстановления эксплуатационных качеств зданий. Л.: Стройиздат, 1975. 336 с.
17. Горохов Е.В., Брудка Я., Лубиньски М. [и др.] Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции. М.: Стройиздат, 1994. С. 224–237.
18. Дружинин Г.В. Процессы технического обслуживания автоматизированных систем. М.: Энергия, 1973. 272 с.
19. Колотилкин Б.М. Долговечность жилых зданий. М.: Стройиздат, 1965. 254 с.
20. Афанасьев А.А., Матвеев Е.П. Реконструкция жилых зданий. Часть I. Технологии восстановления эксплуатационной надежности жилых зданий [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/537194/rekonstruktsiya_zhilykh_zdaniy_chast_I_tekhnologii_vosstanovleniya_ekspluat.pdf (дата обращения: 15.07.2013).
21. Дементьева М.Е. Техническая эксплуатация зданий: оценка и обеспечение эксплуатационных свойств конструкций зданий: Учебное пособие для студентов специальности 270105 «Городское строительство и хозяйство». М.: МГСУ, 2008. 227 с. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.lidermsk.ru/site-media/uploads/materials/docs/02/02d3e5a4ea24390bcfd8f6e081de5df8.pdf> (дата обращения: 15.07.2013).
22. Visscher H.J., Meijer F.M., Branco J.P. Housing Standards: Regulation International Encyclopedia of Housing and Home. Oxford: Elsevier, 2012. Pp. 613–619.
23. Kaklauskas A., Tupenaite L., Kanapeckiene L., Naimaviciene J. Knowledge-Based Model for Standard Housing Renovation // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. Pp. 497–503.
24. Дудышкина Л.А., Жуковская В.И. Ремонт полносборных жилых зданий. М.: Стройиздат, 1987. 223 с.
25. Шрейбер К.А. Вариантное проектирование при реконструкции жилых зданий. М.: Стройиздат, 1991. 287 с.
26. Сморгачев А.А., Кереб С.А., Орлов Д.А., Барановская К.О. Оценка технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2012. №7(33). С. 70–75.
27. Исхаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., Васкевич В.М., Рыжиков В.Ю. Оценка надёжности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний // Инженерно-строительный журнал. 2012. №7(33). С. 76–78.
28. Соколов В.А. Оценка технического состояния строительных конструкций зданий на основе многоуровневого вероятностного анализа // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 45–51.
29. Соколов В.А. Диагностика технического состояния конструкций зданий и сооружений с использованием методов теории нечетких множеств // Инженерно-строительный журнал. 2010. №5(15). С. 31–37.
30. Соколов В.А. Вероятностный метод оценки технического состояния конструкций железобетонного монолитного перекрытия зданий старой городской застройки // Инженерно-строительный журнал. 2010. №4(14). С. 49–58.
31. Солдатенко Т.Н. Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 52–61.
32. Симанкина Т.Л., Ширко Н.В. Оценка физического износа зданий с применением визуального моделирования дефектов // Известия вузов. Строительство. 2011. №7(633). С. 91–97.
33. Симанкина Т.Л., Ширко Н.В. Создание графических образов физического износа объектов и связанных с ним затрат // Вестник гражданских инженеров. 2011. №4(29). С. 30–37.

34. Брайла Н.В. Календарное планирование ремонтно-строительных работ на основе совершенствования методики определения физического износа объектов: дисс. ... канд.техн.наук.: спец. 05.23.08. Санкт-Петербург, 2012. 174 с.
35. Мищенко В.Я., Головинский П.А., Драпалюк Д.А. Прогнозирование темпов износа жилищного фонда на основе мониторинга дефектов строительных конструкций // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2009. №4(16). С. 111–117.
36. Мищенко В.Я., Головинский П.А., Драпалюк Д.А. Мониторинг дефектов и учет старения строительных конструкций жилищного фонда // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2009. №4(16). С. 118–123.
37. ВСН 53-86(р) Правила оценки физического износа жилых зданий. Госгражданстрой. М.: Прейскурантиздат, 1988. 72 с.
38. Martinaitis V., Rogoža A., Bikmanien I. Criterion to evaluate the «twofold benefit» of the renovation of buildings and their elements // Energy and Buildings. 2004. Vol.36. Issue 1. Pp. 3–8.
39. Yi-Kai Juan, Jun Ha Kim, Kathy Roper, Daniel Castro-Lacouture. GA-based decision support system for housing condition assessment and refurbishment strategies // Automation in Construction. 2009. Vol. 18. Issue 4. Pp. 394–401.
40. Clapp John M., Eichholtz Piet, Lindenthal Thies. Real option value over a housing market cycle // Regional Science and Urban Economics. 2013. Vol. 43. Issue 6. Pp. 862–874.
41. Carol C. Menassa. Evaluating sustainable retrofits in existing buildings under uncertainty // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Issue 12. Pp. 3576–3583.
42. 5 - EPA Lead Renovation, Repair, and Painting Program Overview Construction Hazardous Material Compliance Guide. 2012. Pp. 79–108.
43. 6 – Structure of EPA Lead Renovation, Repair, and Painting Program Construction Hazardous Material Compliance Guide. 2012. Pp. 109–137.
44. Рибички Р. Повреждения и дефекты строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1982. 432 с.
45. Авиром Л.С. Надежность конструкций сборных зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 216 с.
46. Кикин А.И., Васильев А.А., Кошутин Б.Н., Уваров Б.Ю., Вольберг Ю.Л. Повышение Долговечности Металлических Конструкций Промышленных Зданий. М.: Стройиздат, 1984. 302 с.
47. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование: Учебник. М.: Финансы и статистика, 2001. 226 с.
48. Сборник сметных нормативов планирования стоимости работ по капитальному ремонту зданий и сооружений на 2010 год. Санкт-Петербург, 2009. 132 с.
49. ВСН 58-88(р) Положение об организации и проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания жилых зданий, объектов коммунального и социально-культурного назначения [Электронный ресурс]. М.: Стройиздат, 1990. URL: <http://www.ocenchik.ru/docs/545.html> (дата обращения: 29.09.2013).

*Ольга Николаевна Попова, Санкт-Петербург, Россия
+7(911)570-59-64; эл. почта: oly-porova@yandex.ru*

*Татьяна Леонидовна Симанкина, Санкт-Петербург, Россия
+7(812)495-35-44; эл. почта: sealsi@mail.ru*

© Попова О.Н., Симанкина Т.Л., 2013

Модель пространственно-временной аналогии в оптимизации последовательности реконструируемых объектов

Д.т.н., профессор С.А. Болотин;

к.т.н., доцент А.Х. Дадар;

аспирант М.А. Котовская,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Ключевые слова: пространственно-временная аналогия; очередность освоения объектов; порядковая значимость объекта; горизонт планирования; методика наискорейшего пуска

В современном строительстве достаточно большую долю составляют объекты, на которых проводят реконструкцию, капитальный ремонт, санацию и другие подобные виды работ [1]. Данные объекты имеют определенную специфику, связанную с тем, что продолжительности, стоимости и объемы проводимых на них работ значительно меньше, чем на объектах нового строительства. Из этого следует, что даже для сравнительно непродолжительного времени строительства (например, 2 года) количество реконструируемых объектов будет исчисляться десятками. Задача поиска оптимальных очередностей освоения объектов была сформулирована еще в работе [2] и становится особенно актуальной в современных условиях.

Основной целью данной статьи является построение модели пространственно-временной аналогии для оптимизации последовательности реконструируемых объектов.

По принятой в научной литературе классификации задача поиска оптимальных очередностей освоения объектов относится к категории *NP*-трудных [3], что связано с экспоненциальным увеличением ее вычислительной трудоемкости в зависимости от линейного увеличения числа объектов в очереди [4]. Если на возможные перестановки объектов в очереди не накладывать никаких ограничений, то для числа объектов N затраты времени на вычисление всех вариантов очередности будут определяться формулой $Q = \alpha \cdot N!$, в которой α – это время, затрачиваемое на расчет одного варианта перестановки объектов. Например, для решения задачи оптимизации очередности по реконструкции энергоресурсосберегающих объектов, описанной в работе [5], расчет каждого варианта, осуществляемый в программе типа Microsoft Project, производится за время $\approx 0,001$ с. Из этого следует, что для полного перебора всех вариантов комплекса, состоящего из 10 объектов, общее время расчета составит более чем один час. А если решать задачу с 20 объектами, расчетное время составит более 10^{12} часов, то есть расчет будет длиться годами.

В работе [6] был поставлен вопрос, связанный с тем, что при планировании долговременной оптимальной очередности реконструируемых объектов необходимо учитывать возрастающую во времени неопределенность их характеристик. В частности, в этой работе показано, что на формируемый порядок освоения объектов в планируемой последовательности будет влиять место объекта в очереди таким образом, что чем позже запланирована реконструкция объекта, тем выше его неопределенность, и, следовательно, ниже значимость этого объекта. На рисунке 1 в виде гистограммы показан условный пример, отображающий изменение оценочного показателя объекта в зависимости от его места в формируемой очереди.

Каждый из представленных на рисунке 1 объектов характеризуется значением некоторого условного критерия и порядковой значимостью, определяющей монотонное убывание по мере возрастания номера в очереди строительства. Произведение значения условного критерия на порядковую значимость объекта дает взвешенный критерий, который, как показано на рисунке 1, существенно меняет исходную оценку оптимизируемых объектов.

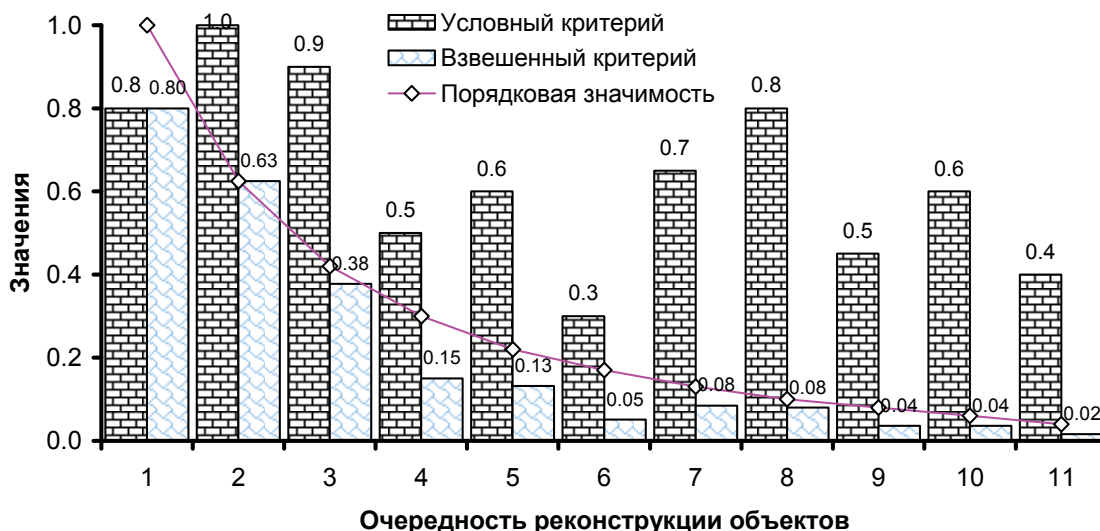


Рисунок 1. Изменение оценочного показателя объекта в зависимости от его очередности

Критерии, по которым осуществляется оптимизация последовательности выполнения работ, достаточно подробно описаны в многочисленных работах по теории расписаний. Например, на базе теории расписаний минимизируются простои при обработке деталей на станках, минимизируется общее время обработки деталей, максимизируется загрузка станков и оборудования и т. д. [7, 8, 9]. Однако применение методов теории расписаний в строительстве, как правило, не учитывает фактор неопределенности, который объективно растет вместе с ростом прогнозируемого времени формирования адресной программы реконструируемых объектов.

Рассмотрим динамику изменения значимостей объектов на основе формирования модели пространственно-временной аналогии (ПВА). В современных научных работах достаточно широко рассматриваются прогнозируемые во времени изменения в различных объектах. Например, в работе [10] произведен анализ уровня риска инновационного процесса, и на основании него сделан вывод о том, что «радикальные нововведения представляют собой нелинейный, стохастический и непрерывный процесс с непредсказуемыми последствиями, рассчитанный в среднем на 10 лет». Однако этот вывод частично опровергается в работе [11], где утверждается правомерность аппроксимационного прогнозирования и дополнительно резюмируется, что аппроксимационный подход возможен как база для оценки возможных отклонений для продолжительных интервалов времени.

Однако приведенных выше утверждений недостаточно для количественного решения поставленной задачи. Поэтому для формирования модели пространственно-временной аналогии рассмотрим такие чисто физические понятия, как пространственная перспектива и горизонт. Дело в том, что эти два понятия довольно часто и широко используют для целей планирования в переносном смысле. Так, в работе [12] излагаются методические аспекты перспективного планирования развития сельских территорий, при этом под перспективой планирования подразумевается, прежде всего, ее временной аспект. В работе [13] рассматривается понятие горизонта планирования как категории времени, адаптированной к области финансового права. В работе [14] представлен анализ современных тенденций научно-технического прогресса и горизонта планирования, также имеющего чисто временной характер. Данное понятие рассматривается и в работах [15, 16].

Используем приведенные выше утверждения в качестве первоначальной основы для формируемой нами модели, ориентированной на количественный аспект применения пространственно-временной аналогии. В качестве изменяемой величины рассмотрим продолжительность работы. На рисунке 2 показано геометрическое представление перспективы уменьшения продолжительности, определенное по аналогии с уменьшением истинных размеров предметов при их рассмотрении в пространстве.

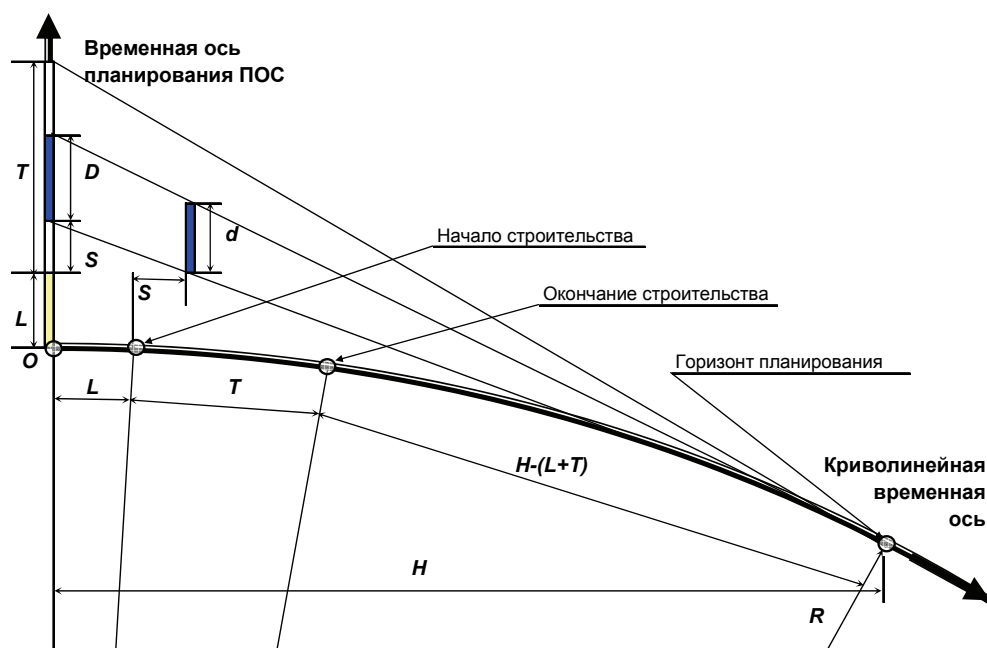


Рисунок 2. Геометрическое представление перспективы уменьшения продолжительности

Известно, что визуальный эффект, определяемый как перспектива, зависит от радиуса поверхности Земли и от высоты нахождения наблюдателя над ее уровнем. При перенесении пространственной перспективы на отображаемую плоскость, например, на плоскость рисунка, используют свойство схождения параллельных линий в точке горизонта, дальность которого отсчитывают от места нахождения наблюдателя. В результате, с точки зрения наблюдателя, горизонтом называется линия, характеризующаяся видимым схождением неба и земли. В итоге такого схождения получается, что выше этой линии находится небо, а ниже – земля.

В качестве аналогичной временной характеристики горизонта может быть использовано значение периода окупаемости проекта, которое обозначено на рисунке 2 литерой H . Как нам представляется, данная аналогия заключается в том, что на временном горизонте возникает равенство между интегральными инвестиционными расходами на строительный проект и интегральными операционными доходами, получаемыми от эксплуатации готового объекта. По аналогии с пространственным горизонтом получается, что до точки временного горизонта имеется, как правило, отрицательный денежный поток, а после нее денежный поток становится положительным. В итоге можно сказать, что временным горизонтом является точка схождения отрицательного и положительного денежных потоков. При развитии принятой аналогии следует отметить, что понятие горизонта планирования должно быть связано с временным аналогом высоты нахождения наблюдателя. За данную высоту целесообразно принять момент времени окончания строительства, так как именно с этой высоты можно оценить срок окупаемости всего проекта.

Если ориентировать создаваемую модель ПВА на ее применение в проекте организации строительства (ПОС), то тогда за точку анализа будущих характеристик очередности строительства объектов может быть принят момент времени окончания проектирования календарного плана, разработанного с учетом задания очередности освоения объектов. Однако время окончания проектирования календарного плана отдельно не фиксируется, поэтому за начало отсчета времени целесообразно принять общий момент завершения ПОС. Суммарная продолжительность строительства очереди объектов T и лаг времени между окончанием ПОС и началом строительства L как раз и определяют ту высоту нахождения наблюдателя, с которой виден срок окупаемости проекта, используемый в качестве горизонта планирования.

Для модели ПВА следует указать и на ее отличие от прямой геодезической задачи, в которой радиус кривизны земной поверхности является константой. В нашем случае константой является срок окупаемости, а значение высоты наблюдения является параметром, который определяется календарным планом, разрабатываемым в ПОС. В итоге возникающая временная кривизна имеет статус функции, определяющей искомый эффект перспективы уменьшения продолжительностей работ во времени. Определение значения временной кривизны необходимо для оценки тех приближений, которые использованы в дальнейшем при выводе расчетных формул. Ее расчет проводится по следующей формуле:

$$R = \frac{H^2 - (L + T)^2}{2(L + T)} \quad (1)$$

При выводе формулы (1) принято, что длина касательной, определенная от точки горизонта до пересечения с ординатой, приравнена соответствующей длине дуги горизонта. На самом деле, согласно работе [17], относительное увеличение длины касательной определяется формулой

$$G = H + \frac{H^3}{3R^2}, \quad (2)$$

где G – абсолютное значение длины отрезка касательной.

Покажем на конкретном примере возникающую от этого погрешность. Для $H = 5$ лет, $L + T = 1$ год, получаем $R = 12$ лет и $G = 5.29$ лет, что соответствует погрешности менее 6%. Таким образом, на основании представленных приближений для вывода искомых формул можно использовать более простую линейную модель, показанную на рисунке 3.

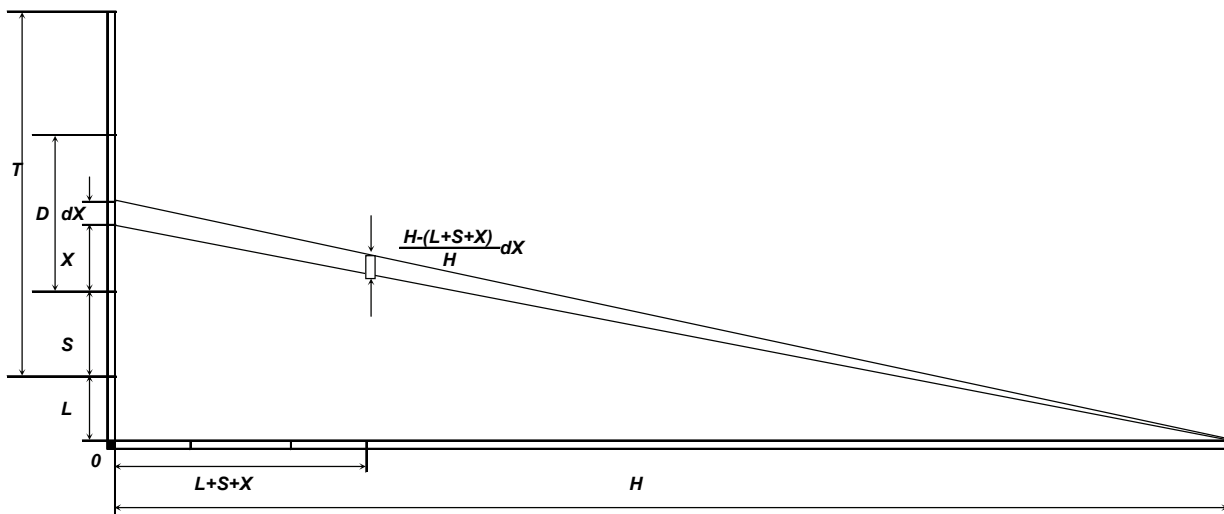


Рисунок 3. Линейная модель перспективы уменьшения продолжительности

Возьмем произвольную работу, начало и продолжительность которой определены литерами S и D соответственно. Определим на данной работе элементарную длину dX , отстоящую от ее начала на расстояние X . Тогда любая элементарная длина (продолжительность) работы в силу ее перспективного уменьшения при приближении к точке горизонта будет определять общее уменьшение в соответствии со следующим определенным интегралом:

$$Z_j = \frac{d}{D} = \int_{L+S}^{L+S+D} \frac{H - L - S - X}{H} dX = \left(1 - \frac{L + S + 0.5D}{H}\right). \quad (3)$$

Выведенная формула показывает, что с удалением работы в сторону горизонта планирования ее видимая продолжительность уменьшается, и именно это относительное уменьшение Z_j и принято в качестве значимости отдельного объекта очереди. Анализируя формулу (3), можно отметить, что значимость объекта будет больше при более раннем начале работы на нем и при меньшей продолжительности. Анализ показал, что формула (3) справедлива при $H \geq T + L$, что является нижней границей задания горизонта планирования. Верхняя же граница горизонта планирования может асимптотически стремиться к бесконечности, и в этом случае отношение Z_j будет стремиться к единице. Действительно, при задании достаточно большого горизонта планирования декларируется сплошная детерминированность, являющаяся, по сути дела, антиподом риска несвоевременного выполнения работ. Естественно, что тогда видимая перспектива изменения продолжительностей работ будет незначительно отличаться от единицы. В практическом же плане горизонт планирования можно определить исходя из нормы дисконта E , которая универсально используется при расчете различных показателей экономической эффективности инвестиционных строительных проектов. С ее помощью в первом приближении горизонт планирования может быть определен как $H \approx 1/E$.

Для дальнейшего придания рассматриваемой задаче оптимизационной направленности используем в качестве критерия чистый дисконтированный доход. В работе [6] на примере рассмотрения энергоресурсосберегающих объектов было показано, что согласно данной целевой функции необходимо найти такую очередность строительства объектов, чтобы суммируемый чистый дисконтированный доход был бы максимален. Эта целевая функция определяется следующим выражением: $NPV = \sum NPV_j \rightarrow \max$, каждый член которого определяется формулой:

$$NPV_j = V_j \frac{1 - \alpha^{-S_j}}{\ln \alpha} - \int_{S_j}^{F_j} \alpha^{-t} c_j(t) dt + R_j \frac{\alpha^{-F_j} - \alpha^{-T}}{\ln \alpha}, \quad (4)$$

где $V_j(t)$ – функция годовых операционных доходов (расходов) до проведения реконструкции на j -м объекте;

$R_j(t)$ – функция годовых операционных доходов (расходов) после проведения реконструкции на j -м объекте;

$C_j(t)$ – функция инвестиционных затрат в реконструируемый объект;

S_j и F_j – сроки начала и окончания реконструкционных работ на объекте;

T – продолжительность выполнения всех реконструкционных работ;

$E = \alpha - 1$ – норма дисконта, включающая безрисковую составляющую (ставку), темп инфляции и премию за риск инвестиций в комплексный проект.

Из формулы (4) следует, что для формирования всех денежных потоков обязательно необходима разработка соответствующих календарных планов, для составления которых также требуется учет трех групп ограничений: топологических, ресурсных и временных, и это обстоятельство дополнительно делает поставленную задачу информационно сложной [18]. Таким образом, представленный пример показывает, что для решения задачи очень трудно использовать точные алгоритмы комбинаторной оптимизации, определяемые методами динамического программирования и методом ветвей и границ [19–21].

Поскольку теоретически доказанных алгоритмов для решения подобного рода сложной задачи не существует, то целесообразно применить оптимизационный метод, получивший название метода наискорейшего спуска (подъема), алгоритм которого изложен в работе [22]. Рассмотрим алгоритм наискорейшего спуска с учетом модели ПВА в вербальной форме.

На первом шаге оптимизации для всех N объектов, входящих в адресную программу реконструкции, формируют денежные потоки при условии, что очередь начинается с каждого объекта. Для каждого j -го объекта, закрепленного на первом месте, по формуле (3) рассчитывается его значимость Z_j , а по формуле (4) – чистый дисконтированный доход NPV_j . В соответствии с максимумом произведения этих величин $Z_j \cdot NPV_j$ определяется объект, который ставится на первое место. Следующим из оставшихся $N-1$ объектов по аналогичной схеме определяется доминирующий объект второй очереди и так далее до окончательного построения искомой последовательности.

Описанная методика получила также название «жадного алгоритма», поскольку для ее реализации требуется расчет всего лишь $N(N-1)/2$ узлов дерева целей, что существенно меньше расчета числа вариантов, определяемых факториальной функцией [23]. Однако точные результаты для методики наискорейшего спуска возможны только для существенно убывающей функции, определяемой моделью ПВА [24]. Анализ этой модели показывает, что максимизация скорости убывания значимости будет соответствовать минимизации принятого горизонта планирования. Вместе с этим следует отметить, что решение рассмотренной задачи в ПОС имеет положительную перспективу и для нового строительства, так как календарное планирование в ПОС опирается на нормативное определение продолжительностей строительства [25].

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- 1) задача поиска оптимальных очередностей освоения объектов является *NP*-трудной вследствие экспоненциального увеличения ее вычислительной трудоемкости в зависимости от линейного увеличения числа объектов в очереди;
- 2) на формирование порядка освоения объектов существенным образом влияет место объекта в очереди: чем позже запланирована реконструкция объекта, тем выше его неопределенность и ниже значимость;
- 3) на основании переноса значений и использования таких физических понятий, как пространственная перспектива и горизонт, можно построить модель пространственно-временной аналогии для определения критерия порядковой значимости каждого объекта и формирования оптимальной очередности их освоения.

Литература

1. Горбанева Е.П., Мищенко В.Я. Роль реконструкции и модернизации в системе обеспечения сохранности и воспроизводства объектов недвижимости // Научный вестник ВГАСУ. Серия: Дорожно-транспортное строительство. 2004. №3. С.72–76.
2. Афанасьев В. А. Поточная организация строительства. Ленинград: Стройиздат, 1990. 160 с.
3. Gharibian S. Strong *Np*-Hardness of the Quantum Separability Problem // Quantum Information and Computation. 2010. No.3–4. Pp. 0343–0360.
4. Юдин Д.Б., Юдин А.Д. Математики измеряют сложность. М.: Знание, 1985. 192 с.
5. Болотин С.А., Мещанинов И.Ю. Основы постановки частной задачи комбинаторной оптимизации строительства комплекса объектов // Известия вузов. Строительство. 2009. №2(602). С. 38–42.
6. Болотин С.А., Дадар А.Х. Оптимизация последовательности реконструкции энергоресурсосберегающих объектов в условиях роста неопределенности // Недвижимость: экономика, управление. 2011. №2. С. 21–24.
7. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. М.: Наука, 1975. 360 с.
8. Lazarev A.A., Kvaratskheliya A.G. Metrics in Scheduling Problems // Doklady Mathematics. 2010. No.3. Pp. 497–499.
9. De Snoo C., Van Wezel W., Jorna R.J. An Empirical Investigation of Scheduling Performance Criteria // Journal of Operations Management. 2011. No.3. Pp. 181–193.
10. Шестакова И.Г. Анализ современных тенденций научно-технического прогресса и горизонты планирования // Экономика и экологический менеджмент. 2013. №1. С. 67–82.
11. Шамина Л.К., Петров Д.Н. Динамика риска ошибочного выбора инновационного проекта // Альманах современной науки и образования. 2009. №9(28). С. 193–194.
12. Аношкина Е.Л., Карпович Ю.В. Методические аспекты перспективного планирования развития сельских территорий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2010. №7. С. 78–86.
13. Кудряшова Е.В. Понятие «горизонт планирования» в финансовом праве // Финансовое право. 2013. №4. С. 5–8.
14. Харин А.А. Принцип неопределенного будущего, примеры его применения в экономической теории, возможности его применения в теориях сложных систем, в теории множеств, теории вероятностей и логике // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды международной научной школы МАБР. Санкт-Петербург, 2007.

15. Verderame P.M., Floudas C.A. Integration of Operational Planning and Medium-Term Scheduling for Large-Scale Industrial Batch Plants under Demand and Processing Time Uncertainty // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2010. No.10. Pp. 4948–4965.
16. Tang L., Meng Y., Liu J. An Improved Lagrangean Relaxation Algorithm for the Dynamic Batching Decision Problem // International Journal of Production Research. 2011. No.9. Pp. 2501–2517.
17. Кулешов Д.А., Стрельников Г.Е. инженерная геодезия для строителей: Учебник для вузов. М.: Недра, 1990. 256 с.
18. Болотин С.А., Дадар А.Х., Мещанинов И.Ю., Оолакай З.Х. Элиминация последовательности энергоресурсосберегающей реконструкции объектов при учете разнородных ограничений для нахождения оптимума // Вестник СПбГАСУ. 2011. №3(28). С. 60–65.
19. Fomin F.V., Golovach P.A., Kratochvil J., Kratsch D., Liedloff M. Branch and Recharge: Exact Algorithms for Generalized Domination // Algorithmica. 2011. No.2. Pp. 252–273.
20. Skaf J., Boyd S., Zeevi A. Shrinking-Horizon Dynamic Programming // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2010. No.17. Pp. 1993–2002.
21. Paulavičius R., Žilinskas J., Grothey A. Investigation of Selection Strategies in Branch and Bound Algorithm with Simplicial Partitions and Combination of Lipschitz Bounds // Optimization Letters. 2010. No.2. Pp. 173–183.
22. Валетов В.А. Интеллектуальные технологии производства приборов и систем [Электронный ресурс]. URL: <http://le-club.ru/books/va-valetov/371-algorithm-naiskoreis.html> (дата обращения: 26.09.13).
23. Papakonstantinou P.A., Rackoff C.W. Characterizing Sets of Jobs That Admit Optimal Greedy-Like Algorithms // Journal of Scheduling. 2010. No.2. Pp. 163–176.
24. Slevinsky R.M., Safouhi H. A Comparative Study of Numerical Steepest Descent, Extrapolation, and Sequence Transformation Methods in Computing Semi-Infinite Integrals // Numerical Algorithms. 2012. No.2. Pp. 315–337.
25. Болотин С.А., Дадар А.Х., Птухина И.С. Имитация календарного планирования в программах информационного моделирования зданий и регрессионная детализация норм продолжительности строительства // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 20–24.

*Сергей Алексеевич Болотин, Санкт-Петербург, Россия
+7(904)551-80-99; эл. почта: sbolotin@mail.ru*

*Алдын-кыс Хунаевна Дадар, Санкт-Петербург, Россия
+7(913)355-0123; эл. почта: daryi@mail.ru*

*Марина Александровна Котовская, Санкт-Петербург, Россия
+7(905)205-09-63; эл. почта: mkotovskaya@gmail.com*

© Болотин С.А., Дадар А.Х., Котовская М.А., 2013

Организационная подготовка автоматизированного производства и монтажа элементов конструкций светопрозрачных фасадов

К.т.н., доцент М.М. Калюжнюк,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»;

студент А.В. Калюжнюк,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Ключевые слова: рабочие операции; простые технологические процессы; методы календарного планирования; параллельно-поточные методы; техническое нормирование; автоматизация подготовки производства; организационно-технологическое проектирование

В соответствии с научно-технологическим прогнозом развития Российской Федерации до 2030 года, опубликованным РАН в 2008 г. [1], за указанный период Россия должна перейти от сырьевой к высокотехнологичной модели развития, к экономике, основанной на знаниях. В прогнозе учитывается, что в мире происходят процессы перехода экономик наиболее развитых стран от 5-го к 6-му технологическому укладу, который основывается на NBIC-конвергенции (N – nano; B – bio; I – info; C – cogno) [1]. NBIC-конвергенция выражается в том, что инструменты и результаты применения нано-, био-, инфо- и когнитивных технологий сливаются друг с другом, и этот процесс имеет тенденцию к нарастанию [2].

Строительство, как инфраструктурная отрасль экономики, чтобы служить основой для развития всех наукоемких отраслей, должно использовать все доступные методы и средства для инновационного развития [3], в том числе включаемые в NBIC-конвергенцию информационные технологии. На отдельных этапах жизненного цикла строительной продукции, и в первую очередь на стадии проектирования, в наиболее развитых российских строительных организациях, учитывающих зарубежный опыт применения BIM-технологий (строительных информационных моделей) [4, 5 и др.], эти технологии уже используются в качестве средств автоматизации процессов проектирования и управления [6, 7 и др.].

Наиболее уязвимым местом их применения является перенос устаревших к настоящему времени методов и средств проектирования и управления в условия автоматизированного производства. Особенно заметно этот недостаток проявляется в организационно-технологическом проектировании и организационной подготовке строительного производства [8], когда недостаточно эффективные методы технического нормирования [9,10 и др.] и последующего календарного планирования переводятся в режимы автоматизированного проектирования и управления, и даже такие мощные современные средства, как программы управления проектами, сохраняют эти недостатки [11 и др.].

Эти недостатки также присущи и применению BIM-технологий в автоматизации организационно-технологического проектирования и организационной подготовке строительного производства [5, 12 и др.]. Такое положение вещей можно объяснить тем, что изначально основными задачами BIM были координация и визуализация архитектурных, конструктивных и инженерных частей проектов, а обновлению методов организационно-технологического проектирования, связывающего проектирование с организацией и управлением строительством объектов, не уделялось должного внимания [5,12,13]. В этих методах применяются системы микроэлементных нормативов трудовой деятельности, на протяжении многих лет эффективно использовавшихся в проектировании и организации труда в США и других развитых странах [9 и др.]. Этот подход хорошо поддается визуализации, но его применение затруднительно для поиска оптимальных или субоптимальных вариантов затрат труда и времени на выполнение работ вследствие исключительной громоздкости исходных данных, что не дает возможности реализовать BIM-технологии в организационном проектировании в полном объеме. На эту особенность обратили внимание авторы работы [13], в которой они предложили использовать динамические свойства строительных процессов в организационном проектировании с применением BIM-технологий, но не детализировали методы диагностики строительных процессов.

Калюжнюк М.М., Калюжнюк А.В. Организационная подготовка автоматизированного производства и монтажа элементов конструкций светопрозрачных фасадов

Таким образом, из анализа перечисленных источников можно сделать вывод, что всегда, когда это возможно, автоматизации организационного проектирования и организационной подготовке строительного производства должна предшествовать разработка эффективных формализованных методов технического нормирования и календарного планирования строительных процессов [14–16].

В настоящей статье предлагаются методы разрабатываемой авторами теории организации строительных процессов и методологии их структурно-функционального моделирования [15, 16], направленные на устранение указанных выше недостатков в автоматизации организационного проектирования и организационной подготовки строительного производства. При этом предлагаемые методы разрабатываются на уровне рабочих операций и, в отличие от методов, использующих микроэлементные нормативы, не требуют того объема затрат труда и времени, который вкладывался бы в формирование последних.

В статье описывается применение разработанных авторами формализованных методов технического нормирования [16] простых технологических процессов (ПТП) [17], применение норм для определения времени изготовления серий монтажных элементов, а также для синхронизации календарных планов изготовления и монтажа элементов светопрозрачных ограждающих конструкций фасадов зданий.

Методика изложена на частном примере изготовления одного из таких элементов, а именно алюминиевого окна АГС-50. Тем не менее, все, что касается формализованных методов нормирования и календарного планирования, может быть практически без изменений перенесено на нормирование и календарное планирование как изготовления, так и монтажа любых других элементов светопрозрачных конструкций фасадов. Более того, в принципиальной своей основе эти методы применимы для любого как производственного, так и строительного ПТП.

Исходными материалами для разработки и применения этих методов послужили данные о результатах производственной деятельности ООО «Алюмстрой» (Санкт-Петербург), занимающегося проектированием, изготовлением и монтажом элементов светопрозрачных ограждающих конструкций фасадов жилых и общественных зданий (окон, балконных дверей, витражей и др.). Материалы были собраны магистрантом Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Е.Б. Бектемисовым при подготовке магистерской диссертации «Влияние сопутствующих работ на продолжительность устройства светопрозрачных фасадов», в которой рассматриваемые формализованные методы применялись для анализа сопутствующих работ.

Для изучения выбранного в качестве примера ПТП был применен метод формализованного упорядочения рабочих операций ПТП, включающий методы экспертного оценивания [16, 18], построения графа вида «вершины – работы» и разбиения последнего на слои [19]. В результате их применения была сформирована сетевая модель вида «вершины – работы», в которой вершинами являлись технологически упорядоченные рабочие операции. Для этой модели в работе [16] было введено понятие организационно-технологического модуля (ОТМ) для любого изучаемого ПТП (организационно-технологическим модулем был назван циклический повторяемый структурный элемент ПТП). По этой же методике в настоящей работе был сформирован ОТМ ПТП изготовления изучаемого окна. На сетевой модели ОТМ была определена продолжительность изготовления этого окна, которая в терминологии производственного и операционного менеджмента [20, 21] называется производственным циклом изготовления изделия.

В данной статье разработан подход к определению вариантов норм затрат труда и времени на изготовление одного элемента при рассмотрении метода параллельно-поточной организации работ на сформированной модели ОТМ. В ней предлагается использовать производственный цикл изготовления окна и с помощью метода комбинированных потоков [22] определять продолжительности изготовления серий монтажных элементов в зависимости от заданных генподрядной организацией сроков монтажа светопрозрачных конструкций фасадов зданий.

Формирование организационно-технологических модулей процессов изготовления монтажных элементов светопрозрачных конструкций фасадов зданий

Как отмечено во введении, в статье использована ранее разработанная авторами методика формирования ОТМ ПТП [16] для технологического процесса устройства сварных соединений сборных железобетонных конструкций. Эта методика была применена для формирования ОТМ ПТП изготовления алюминиевого окна АГС-50. В случае формирования ОТМ ПТП изготовления любого другого светопрозрачного элемента достаточно лишь уточнить перечень и содержание рабочих операций ПТП и провести хронометражные наблюдения длительности их выполнения. В остальном методика должна выполняться в соответствии с описанными в работе [16] и примененными ниже процедурами.

Таблица 1. Перечень и характеристики рабочих операций ОТМ ПТП изготовления окна АГС-50

Наименование операций	Продолжительность, мин	Условные обозначения операций до упорядочения	Условные обозначения операций после упорядочения	№ слоя
Нарезка элементов створки окна	1,2	a_1	b_1	1
Разметка мест сверления	5	a_2	b_4	2
Пробивка дренажных отверстий в раме	1,5	a_3	b_7	3
Пробивка отверстий под ручку в створке	4	a_4	b_8	3
Сборка рам	1,5	a_5	b_{10}	4
Сборка створок и проверка диагоналей створки	2	a_6	b_{11}	4
Сверление отверстий под клей и закачка клея	6	a_7	b_{17}	7
Сверление дренажных отверстий в створке	4	a_8	b_{13}	5
Обжим рам	1	a_9	b_{12}	5
Обжим створок	1	a_{10}	b_{15}	6
Установка резины g-007d, y005 в створку	3	a_{11}	b_{20}	9
Установка резины g012d в раму	3	a_{12}	b_{16}	7
Пиление импоста	1,5	a_{13}	b_2	1
Фрезерование импоста	3,8	a_{14}	b_5	2
Сверление импоста 6856 под установку nt03, nt04	1,9	a_{15}	b_9	3
Установка импоста nt04 6856	3	a_{16}	b_{14}	6
Обработка тяг на окна - сверление	2	a_{17}	b_3	1
Установка тяг	4,3	a_{18}	b_{19}	8
Сборка ручек	4	a_{19}	b_6	2
Установка петель на раму	2,2	a_{20}	b_{18}	8
Окончательная сборка поворотно-откидных окон	12	a_{21}	b_{21}	10
Контрольная проверка и упаковка	3	a_{22}	b_{22}	11
	$\Sigma = 70,6$			

Калюжнюк М.М., Калюжнюк А.В. Организационная подготовка автоматизированного производства и монтажа элементов конструкций светопрозрачных фасадов

Для формирования ОТМ ПТП изготовления рассматриваемого окна были определены перечень из 22 входящих в него рабочих операций, продолжительности выполнения каждой операции, а также суммарная их продолжительность, которая составила 70,6 мин. В таблице 1 приведены эти данные, а также необходимые для дальнейшего анализа условные обозначения a_i , присвоенные операциям в порядке их перечисления в таблице, новые условные обозначения b_i , введенные по результатам анализа технологической упорядоченности, и номера слоев в сетевом графике (см. рис. 1), к которым относятся соответствующие операции.

Таблица 2. Данные анализа технологических связей между рабочими операциями ОТМ ПТП

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{20}	a_{21}	a_{22}
a_1	x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
a_2	0	x	#	1	1	1	1	#	#	#	#	#	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1
a_3	0	#	x	#	1	1	#	1	#	1	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1	1	1
a_4	0	0	#	x	#	1	1	1	1	1	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1	1	1
a_5	0	0	0	0	x	*	1	1	1	1	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1	1	1
a_6	0	#	#	#	*	x	1	1	#	#	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1	1	1
a_7	0	0	0	0	0	#	x	1	1	1	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1	1	1
a_8	0	0	0	0	0	#	0	x	1	1	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1	1	1
a_9	0	0	0	0	0	0	0	0	x	#	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1	1	1
a_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	#	x	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1	1	1
a_{11}	0	#	#	#	#	#	#	#	#	#	x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
a_{12}	0	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
a_{13}	0	#	#	#	#	#	#	#	#	#	0	0	x	*	#	#	#	1	1	1	1	1
a_{14}	0	#	#	#	#	#	#	#	#	0	0	0	*	x	#	#	#	1	1	1	1	1
a_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	#	#	#	#	x	#	1	1	1	1	1	1
a_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	#	#	#	#	#	x	#	1	1	1	1	1
a_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	#	#	#	#	#	0	x	1	1	1	1	1
a_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	#	0	0	0	0	0	0	0	0	x	1	1	1	1
a_{19}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	x	1	1	1
a_{20}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	x	1	1
a_{21}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	1
a_{22}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x

Примечание. В таблице введены следующие условные обозначения элементов a_{ij} :

1, если a_i предшествует a_j ;

0, если a_j предшествует a_i .

Кроме того, для описания неопределенности при экспертном оценивании введены также:

#, если операции не зависят друг от друга;

*, если одна из операций является составной частью другой.

Данные анализа технологической упорядоченности рабочих операций в ОТМ, которая определялась экспертным методом парных сравнений предшествования – последования операций, приведены в таблице 2. В таблице на пересечении a_i -й строки и a_j -го столбца приведены значения элементов a_{ij} , характеризующие эту упорядоченность. При этом для сравниваемых операций рассматривались 4 типа их технологических взаимосвязей (см. приложение табл. 2).

По данным анализа технологических связей (табл. 2) была сформирована сетевая модель ОТМ ПТП вида «вершины – работы», представленная на рисунке 1. В ней работами являются рабочие операции, а связями – технологические связи между ними. Для определения технологически независимых операций вершины графа были разбиты на слои [19], в которых содержались эти независимые операции. В вершинах графа (рис. 1) указаны длительности рабочих операций, рассчитанные по ним ранние и поздние сроки их выполнения, а также выделен критический путь, в операциях которого ранние и поздние сроки их выполнения совпадают. Суммарная продолжительность операций критического пути, равная 45,5 мин., определяет продолжительность всех рабочих операций, включенных в организационно-технологический

модуль ПТП изготовления рассматриваемого окна и является нормой затрат труда и времени на изготовление окна.

По представленной методике может быть сформирован ОТМ ПТП изготовления (монтажа) любого другого элемента светопрозрачных конструкций фасадов зданий и для каждого из них определены нормы затрат труда и времени. Совокупность всех определенных таким образом норм позволяет создать базу внутриорганизационных норм затрат труда и времени на производство и монтаж изготавливаемых фирмой элементов светопрозрачных конструкций фасадов зданий.

При эксплуатации и совершенствовании созданной базы данных, анализируя топологию сетевой модели, пространственные (фронты-модули) и ресурсные (ресурсы-модули) характеристики ОТМ ПТП [16] для каждого светопрозрачного элемента, можно найти параметрический ряд нескольких нормативных значений затрат труда и времени каждого ОТМ. Подробности формирования приведены в следующем разделе.

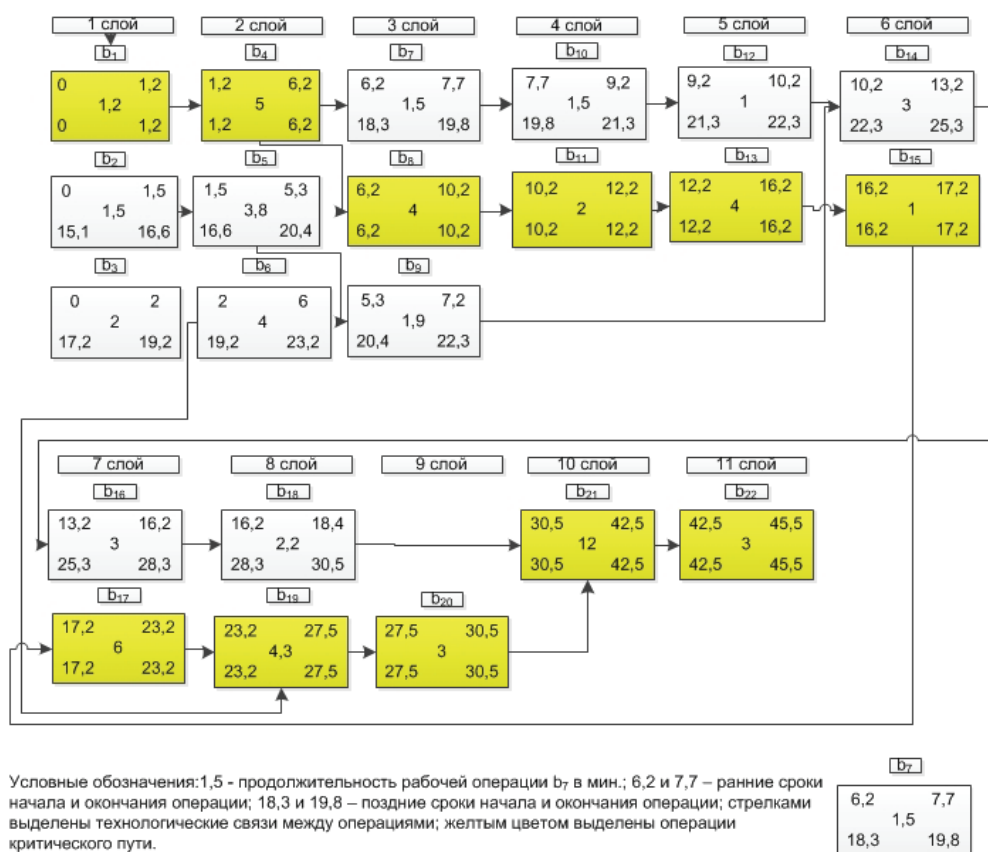


Рисунок 1. Сетевая модель ОТМ ПТП изготовления алюминиевого окна АГС-50

Для дальнейшего (вплоть до полной автоматизации) совершенствования формализованного технического нормирования ОТМ рассматриваемого и любого другого ПТП в будущем должны разрабатываться и внедряться:

- алгоритмы и программы автоматической видеофиксации ОТМ ПТП, распознавания фиксажных точек между операциями и определения длительностей последних;
- экспертные системы автоматического распознавания рабочих операций и их технологических, пространственных и ресурсных упорядоченностей;
- алгоритмы и программы автоматизированной оценки и выбора наилучших вариантов нормативных решений.

Следует отметить, что в методе определения параметрических значений организационно-технологических модулей усматривается некоторая отдаленная аналогия с методом поточно-расчлененной организации работ [23], а также с параллельно-поточными методами их организации [24].

Определение продолжительности изготовления комплектно-монтажной серии из m изделий

При определении времени изготовления серии из m изделий предлагается рассматривать комплексы операций (производственные циклы) критического пути ОТМ ПТП изготовления каждого такого изделия (см. рис. 1) и сводить расчет продолжительности изготовления этой серии к расчету продолжительности комбинированного потока [22, 24], m фронтов работ которого представляют собой производственные циклы m изделий, включенных в изготавливаемую серию. Поскольку в производственном цикле изготовления одного изделия рабочие операции выполняются непрерывно (без простоев), применен метод непрерывного освоения фронтов работ. В этом случае определяются периоды развертывания – интервалы времени между началами комплексов рабочих операций, выполняемых на последующем и предыдущем фронтах работ соответственно.

Если серия состоит из m одинаковых изделий, например, из выбранных в качестве примера окон АГС-50, то, во-первых, продолжительности комплексов операций критического пути для каждого изделия будут равны (см. рис. 1.), а во-вторых, периоды развертывания комплексов операций каждого последующего изделия по отношению к предыдущему будут также равны. Следовательно, общая продолжительность работ окажется суммой периодов развертывания комплексов рабочих операций каждого последующего изделия по отношению к предыдущему и продолжительности изготовления последнего изделия (см. формулу (3)). То есть для одинаковых изделий их поточное производство представляет собой разноритмичный поток, в котором продолжительности выполнения одной и той же операции на разных изделиях (фронтах работ, [16]) одинаковы, а продолжительности разных операций, последовательно выполняемых в производственном цикле одного изделия, различаются.

Пример определения периода развертывания комплексов рабочих операций последующего окна по отношению к предыдущему в разноритмичном потоке при применении метода непрерывного освоения фронтов работ [22] приведен в таблице 3. В первых двух строках таблицы выписаны продолжительности рабочих операций критического пути ОТМ ПТП изготовления i -го и $i+1$ -го окон, а в третьей – значения периода развертывания $\Delta t_{i,j}$ комплекса рабочих операций по изготовлению $i+1$ -го изделия по отношению к i -му, полученные из условия, что критическая операция j выполняется без простоя при переходе от изделия i к изделию $i+1$. Для удобства определения периода развертывания комплексы операций i -го и $i+1$ -го изделия рассчитываются с нулевого момента времени. Период развертывания $\Delta t_{i,j}$ определяется по формуле:

$$\Delta t_{i,j} = t_{i,j}^o - t_{i+1,j}^n, \text{ для } \forall i = 1, \dots, m; \forall j = 1, \dots, 11, \quad (1)$$

где j соответствует операциям критического пути b_j ;

$t_{i,j}^o$ и $t_{i+1,j}^n$ – соответственно моменты времени окончания операции j на i -м изделии и начала операции j на $i+1$ -м изделии.

Искомый период развертывания $T_{i,i+1}^{разв}$ находится по формуле:

$$T_{i,i+1}^{разв} = \max_j (\Delta t_{i,j}). \quad (2)$$

Найденное значение обеспечивает непрерывное выполнение операции с максимальной продолжительностью (продолжительностями для неритмичных потоков) и соответствующие простои при выполнении всех остальных операций на переходах от одного изделия к другому.

Отсюда следует, что в приведенном примере продолжительность партии однотипных изделий в количестве m штук будет равна:

$$T_{\text{кп}}(m) = (m-1)T_{i,i+1}^{разв} + \sum_{j=1}^{11} t_{i,j}^{кр}, \quad (3)$$

где t_{ij} – продолжительность критической операции i , а последнее слагаемое является продолжительностью изготовления одного окна.

Таблица 3. Значение периодов развертывания комплексов рабочих операций $i+1$ -го изделия по отношению к i -му

	Условные обозначения рабочих операций критического пути, их продолжительности, начала и окончания в минутах										
	b_1	b_4	b_8	b_{11}	b_{13}	b_{15}	b_{17}	b_{19}	b_{20}	b_{21}	b_{22}
Окно i	0 1,2 1,2	1,2 6,2 5	6,2 10,2 4	10,2 12,2 2	12,2 16,2 4	16,2 17,2 1	17,2 23,2 6	23,2 27,5 4,3	27,5 30,5 3	30,5 42,5 12	42,5 45,5 3
Окно $i+1$	0 1,2 1,2	1,2 6,2 5	6,2 10,2 4	10,2 12,2 2	12,2 16,2 4	16,2 17,2 1	17,2 23,2 6	23,2 27,5 4,3	27,5 30,5 3	30,5 42,5 12	42,5 45,5 3
Δt_{ij}	1,2	5	4	2	4	1	6	4,3	3	12	3

Синхронизация календарных планов работ по изготовлению монтажных элементов и монтажу из них светопрозрачных конструкций фасадов

Предположим, что требуется изготовить и смонтировать светопрозрачные конструкции фасадов в сроки, заданные генподрядчиком, т. е. T_M^H и T_M^O – моменты начала и окончания монтажных работ соответственно. Рассмотрим случай, когда все монтируемые изделия (например, окна АГС-50) однотипны и производственные циклы их изготовления одинаковы. Продолжительность монтажных работ составляет $T_M^O - T_M^H$, отсюда следует, что за это же время требуется подготовить к монтажу m однотипных изделий, в процесс изготовления каждого из которых входит n операций критического пути (в рассматриваемом примере $n = 11$). Чтобы это условие было выполнено, требуется по формуле (3) определить период развертывания, обеспечивающий изготовление m монтажных элементов в заданные сроки:

$$T_{i,i+1}^{раз} = \max_j(\Delta t_{i,j}) = \frac{1}{(m-1)}(T_M^O - T_M^H - \sum_{j=1}^n t_{i,j}^{кр}). \quad (4)$$

Основное значение норм затрат труда и времени изготовления одного изделия в нашем примере составляет 45,5 мин. Значение основного периода развертывания $T_{i,i+1}^{раз} = 12$ мин., оно определяется временем выполнения операции критического пути с максимальной продолжительностью. Упорядочим операции критического пути по невозрастанию времени их выполнения (числами указаны продолжительности их выполнения в минутах):

$$\{b_{21}(12), b_{17}(6), b_4(5), b_{19}(4,3), b_8(4), b_{13}(4), b_{20}(3), b_{22}(3), b_{11}(2), b_1(1,2), b_{15}(1)\}.$$

Предположим для определенности, что требуемый для выполнения монтажных работ в срок период развертывания, найденный по формуле (4), равен 4 мин. Тогда все операции с продолжительностью более 4 минут, а именно b_{21} , b_{17} , b_4 , b_{19} , должны выполняться на дополнительных рабочих местах, обеспечивая продолжительность выполнения соответствующих операций на параллельных изделиях не более 4 минут. Таким образом, операция b_{21} должна выполняться на трех рабочих местах, что соответствует выполнению этой операции на одном изделии за 4 мин., а рабочие операции b_{17} , b_4 и b_{19} – на двух рабочих местах соответственно за 3; 2,5 и 2,15 мин. После этого требуется переопределить ранние и поздние сроки комплекса рабочих операций на сетевой модели ОТМ ПТП изготовления окна и выяснить, не перешли ли какие-либо операции в группу критических, для которых также может потребоваться развертывание дополнительных рабочих мест.

Таким образом, можно синхронизировать календарные планы работ по изготовлению монтажных элементов и их монтажу в заданные генподрядчиком сроки. Для оценки целесообразности синхронизированного производства работ следует, используя полученные результаты, разработать функциональную модель [16] совмещения процессов изготовления и монтажа элементов конструкций светопрозрачных фасадов.

Выводы

1. Для автоматизации организационной подготовки производства монтажных элементов светопрозрачных конструкций рекомендуется использовать методы теории организации и методологии структурно-функционального моделирования строительных процессов, начиная с разработки и применения эффективных формализованных методов технического нормирования и календарного планирования этих процессов.

2. Формализованная методика определения норм затрат труда и времени, разработанная для процесса изготовления окна АГС-50, применима для процессов изготовления и монтажа любых других элементов светопрозрачных конструкций фасадов. Отмечены особенности ее применения в этих случаях.

3. Для определения продолжительности изготовления серии из m однотипных элементов, предназначенных для монтажа на конкретном объекте, разработан метод комбинированных потоков и предложены соответствующие формулы. Показано, что с их помощью можно синхронизировать календарные планы изготовления и монтажа конструкций фасадов на любом конкретном объекте.

4. Приведен пример определения вариантов норм затрат времени (параметрического ряда) на изготовление одного элемента при рассмотрении метода параллельно-поточной организации работ на сформированной рассматриваемой модели организационно-технологического модуля простого технологического процесса.

5. Формализованные методы разработки ОТМ и оценки организационной эффективности ПТП открывают возможности для совершенствования структуры и работы ресурсов-модулей ОТМ, повышения их производительности, поиска и внедрения инновационных разработок и перехода к автоматизации технического нормирования и календарного планирования. Определены направления разработки алгоритмов и программ для автоматизации формализованного технического нормирования и календарного планирования ОТМ ПТП.

Литература

1. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на долгосрочную перспективу (до 2030 г.). М., 2008.
2. Турчин А.В., Батин М.А. Футурология. XXI век. Бессмертие или глобальная катастрофа. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. 263 с.
3. Калюжнюк М.М., Сандан Р.Н. О концептуальных основах инновационного развития строительной отрасли России: системно-синергетический подход // Вестник гражданских инженеров. 2010. №3. С. 38–45.
4. Carfrae T. Integrated multidisciplinary design and construction of the Beijing National Aquatic Centre // Structural Engineering International Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering. 2011. No.21(2). Pp. 217–223.
5. Bynum P., Issa R., Olbina S. Building information modeling in support of sustainable design and construction // Journal of Construction Engineering and Management. 2013. Vol. 139(1). Pp. 24–34.
6. Талапов В.В. Информационное моделирование зданий — современное понимание // CADmaster. 2010. №4. С.114–121.
7. Талапов В.В. Что влияет на внедрение BIM в России // CADmaster. 2011. №1. С.30–38.
8. Сафонов К.А. Система поддержки принятия решений при автоматизации проектирования организационно-технологической подготовки строительного производства: автореф. дис. канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2002. 209 С.
9. Ralph M. Barnes. Motion and Time Study, Design and Measurement of Work. New York: John Wiley & Sons, 1980. 704 p.

10. Балова Е.Ф., Бакерман Р.С. [и др.] Нормирование труда рабочих в строительстве. М.: Стройиздат, 1985. 440 с.
11. Fewings P. Construction Project Management: An Integrated Approach. Routledge, 2012. 624 p.
12. Zhang L., Zhang X., Ma T. Management of construction schedules based on building information modeling technology // International Conference on Emerging Technologies for Information Systems, Computing and Management. Hangzhou, 2012. No.236. Pp. 81–88.
13. Ting W., Ying Y., Xiao L. The impact of BIM application to the project organizational process // 3rd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials. Jinan, 2013. No.357. Pp. 2524–2528.
14. Kjell Zandin. Most Work Measurement Systems. Marcel Dekker. New York, 1990. 552 p.
15. Калюжнюк М.М., Сандан Р.Н., Калюжнюк А.В. Влияние специфических особенностей строительного производства на формирование структурно-функциональных моделей объектных строительных процессов // Вестник гражданских инженеров. 2012. №5(34). С. 125–133.
16. Калюжнюк М.М., Калюжнюк А.В. Упорядочение рабочих операций простых технологических процессов строительного производства // Инженерно-строительный журнал. №7(25). 2011. С. 87–99.
17. Калюжнюк М.М., Р.Н. Сандан. Структурная классификация элементов строительных процессов // Вестник гражданских инженеров. 2008. №1(14). С. 46–52.
18. Литвак Б.Г. Экспертные технологии в управлении. М.: Дело, 2004. 400 с.
19. Kaufmann A., Desbazeille G. La Methode du chemin critique. Paris: Ed. Dunod, 1966. 188 p.
20. Грачева К.А., Некрасов Л.А., Скворцов Ю.В. Организация и планирование машиностроительного производства. М.: Высшая школа, 2003. 470 с.
21. Aquilano N., Chase R., Jacobs R. Production and Operations Management. New York: McGraw-Hill College, 1998. 612 p.
22. Калюжнюк М.М. Формирование комбинированного потока из неритмичных объектных потоков // Организация, планирование и управление строительством. Межвуз. тематич. сб. трудов. Л.: Изд-во ЛИСИ, 1983. С. 43–48.
23. Барановский А.В. Организация и планирование строительного производства. М.: Стройиздат, 1948. 364 с.
24. Афанасьев В. А. Поточная организация строительства. Л.: Стройиздат, 1990. 302 с.

*Михаил Модестович Калюжнюк, Санкт-Петербург, Россия
+7(812)662-50-11; эл. почта: gamma5105@yandex.ru*

*Александр Всеволодович Калюжнюк, Санкт-Петербург, Россия
+7(981)171-40-43; эл. почта: iom96@inbox.ru*

© Калюжнюк М.М., Калюжнюк А.В., 2013

Эффективность свай различных форм поперечного сечения

*К.т.н., доцент Г.Я. Булатов;
доцент Н.Б. Колосова,*

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Ключевые слова: эффективность свай; свайные фундаменты; типы свай; поперечное сечение свай; забивные свай

Санкт-Петербург расположен на территории, известной своими сложными инженерно-геологическими условиями, и сегодня это обстоятельство оказывает существенное влияние на выбор типа фундамента проектируемых сооружений. В городе и области существует значительное количество компаний, специализирующихся на проектировании и возведении фундаментов различных типов. Многие из них занимаются устройством свайных фундаментов. Зачастую перед ними стоит нелегкий выбор оптимальной конструкции свай, который невозможен без численной оценки ее эффективности.

В данной статье предлагаем методику определения эффективности работы забивной свайной конструкции различной формы поперечного сечения.

Обзор литературы

Анализ литературы показывает, что в настоящее время выбор основных параметров и конструирование свайных фундаментов основываются, как правило, на инженерном опыте либо на экспериментальных данных [1–14]. В основном, описываются различные исследования несущей способности в зависимости от вида и величины нагрузки [1, 2, 4, 7, 9, 10, 16, 13–28], а также от вида материала и технологии изготовления свай [2, 7, 8, 11–14, 17, 19, 25, 27, 29–31]. Кроме перечисленных исследований, в литературе встречаются публикации об эффективности применения свай различных конструкций либо для усиления грунтового основания [1, 6, 12], либо для преодоления сил трения грунта в процессе погружения [8, 11, 17].

Практически отсутствуют работы, в которых описываются теоретические основы и количественные оценки, определяющие эффективность работы свай. Единственная попытка количественно определить эффективность работы свай была выполнена в работе [7]. Здесь для количественной оценки эффективности стальной трубчатой свай диаметром 1,02 м было введено первичное понятие коэффициента эффективности свай.

Как показывает опыт общения с производителями строительных работ, в строительных организациях присутствует большой интерес к зависимости эффективности работы свай от формы ее поперечного сечения.

Постановка задачи

По мнению авторов, отсутствие теоретической базы по оценке эффективности работы непосредственно свай приводит к значительному перерасходу строительного материала и, как следствие, к удорожанию фундамента и удлинению сроков работ по его возведению.

Учитывая явную недостаточность материалов по описанию такой важной, на наш взгляд, задачи как оптимизация выбора параметров свай на основе оценки ее эффективности, авторами впервые в данной статье предпринята попытка представить ряд критериев и методов такой оценки.

Критерии оценки эффективности работы свай

В качестве критериев оценки эффективности работы свай приняты следующие.

1. Критерий **V-1** оценки эффективности свай по **несущей способности свай по грунту**:

$$\mathfrak{E}_{sp} = \frac{F_d}{G}, \quad (1)$$

где F_d – несущая способность свай по грунту, G – вес свай.

2. Критерий **V-2** – оценка эффективности свай по **несущей способности по материалу свай**:

$$\mathfrak{E}_m = \frac{F_{dm}}{G}, \quad (2)$$

где F_{dm} – несущая способность свай по прочности ее материала.

3. Критерий **V-3** – оценка эффективности свай по **коэффициенту использования материала свай** (в данном случае по критерию равнопрочности изделия – свай):

$$K_{эм} = \frac{F_d}{F_{dm}}. \quad (3)$$

4. Критерий **IV-1** – оценка эффективности свай по **удельной трудоемкости погружения свай** (трудоемкость погружения свай, отнесенная к одной тонне ее несущей способности):

$$t_{y\partial} = \frac{Tp}{F_d}, \quad (4)$$

где Tp – трудоемкость погружения свай.

5. Критерий **X-1** – оценка эффективности свай по **удельной стоимости свай** (стоимость, отнесенная к 1 т ее несущей способности):

$$c_{y\partial} = \frac{C_c}{F_d}, \quad (5)$$

где C_c – стоимость устройства одной свай.

6. Критерий **X-2** – оценка **удельной эффективности свайного поля**, которую представим в виде:

$$\mathfrak{E}_{y\partial} = \frac{F_d}{A_p}, \quad (6)$$

где A_p – площадь ростверка в плане, отнесенная к одной свае и определяемая по формуле:

$$A_p = a \cdot b, \quad (7)$$

где a и b представляют собой шаги расстановки свай в поле по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Их минимальное значение составляют $3d$ (d – диаметр свай или сторона поперечного сечения).

7. Критерий **X-3** – оценка **полезного использования свай в течение эксплуатационного периода**, представленная в виде формулы:

$$\eta_{экс} = \frac{N_{экс}}{[N]}, \quad (8)$$

где $N_{экс}$ – максимальная нагрузка на сваю во время эксплуатации, $[N]$ – допустимая нагрузка на сваю, определяемая по формуле:

$$[N] = \frac{F_p}{\gamma_n}, \quad (9)$$

где F_p – расчетная несущая способность сваи, определяемая по формуле:

$$F_p = \min\{F_d; F_m\}; \quad (10)$$

γ_n – коэффициент надежности.

Исследование данной проблемы проходило по двум направлениям. Первое – по критерию **V-1**, второе – по критериям **V-1** и **V-3**.

Исследование по критерию V-1

Эффективность работы сваи здесь определяли критерием оценки по несущей способности сваи по грунту.

В качестве объекта исследования были приняты сваи одинаковой длины L , равной 16 м, но с различной формой поперечного сечения. Грунт – песок среднезернистый.

Для изучения были выбраны пять форм поперечного сечения свай:

- 1) круглое (I);
- 2) квадратное (II);
- 3) крестообразное (III);
- 4) тавровое (IV);
- 5) двутавровое (V).

Для всех типов поперечных сечений при расчетах несущей способности по грунту были приняты одинаковые габариты параметра a , равного 0,4 метра по ширине и высоте поперечного сечения сваи (таблица 1).

Для каждого типа поперечного сечения были определены:

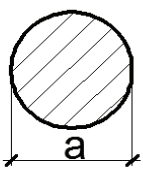
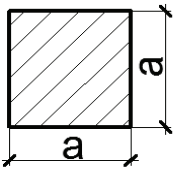
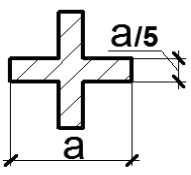
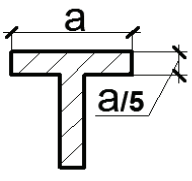
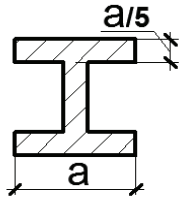
- 1) периметр поперечного сечения – U ;
- 2) площадь поперечного сечения – A ;
- 3) коэффициент развитости (ветвистости) сечения – K_c , определяемый по формуле:

$$K_c = \frac{U}{A}; \quad (11)$$

- 4) показатель геометрии сваи – K_z , определяемый по формуле:

$$K_z = K_c L. \quad (12)$$

Таблица 1. Типы поперечных сечений

I	II	III	IV	V
				

Результаты расчетов периметров поперечных сечений и других геометрических характеристик представлены в таблице 2.

Таблица 2. Геометрические характеристики свай

Номер сечения Характеристики	I	II	III	IV	V
U , м	1,257	1,6	1,6	1,6	2,24
A , м ²	0,126	0,16	0,058	0,058	0,083
K_c	9,98	10,0	27,59	27,59	26,99
K_z	159,7	160,0	441,4	441,4	431,8

Несущую способность сваи по грунту предлагаем записать в виде:

$$F_d = F_{df} + F_{dR}, \quad (13)$$

где F_{df} – несущая способность на боковой поверхности сваи, F_{dR} – несущая способность под концом сваи.

В свою очередь,

$$F_{df} = u \sum \gamma_{cf} \cdot f_i \cdot h_i, \quad (14)$$

$$F_{dr} = \gamma_{cR} \cdot R \cdot A, \quad (15)$$

где γ_{cR} , γ_{cf} – коэффициенты условий работы грунта соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи, учитывающие влияние способа погружения свай на расчетные сопротивления грунта;

u – наружный периметр поперечного сечения сваи, м;

f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи, принимаемое по [33], кПа;

h_i – мощность i -го слоя грунта основания, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м;

R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, принимаемое по [32], кПа;

A – площадь опирания сваи на грунт, принимается по площади поперечного сечения брутто или по наибольшему диаметру, м².

Все необходимые расчеты выполнены по методикам нормативных документов [22, 32–35]. По полученным результатам построены графические зависимости эффективности работы сваи $\mathcal{E}_{гр}$ от глубины ее погружения h_n (рис. 1).

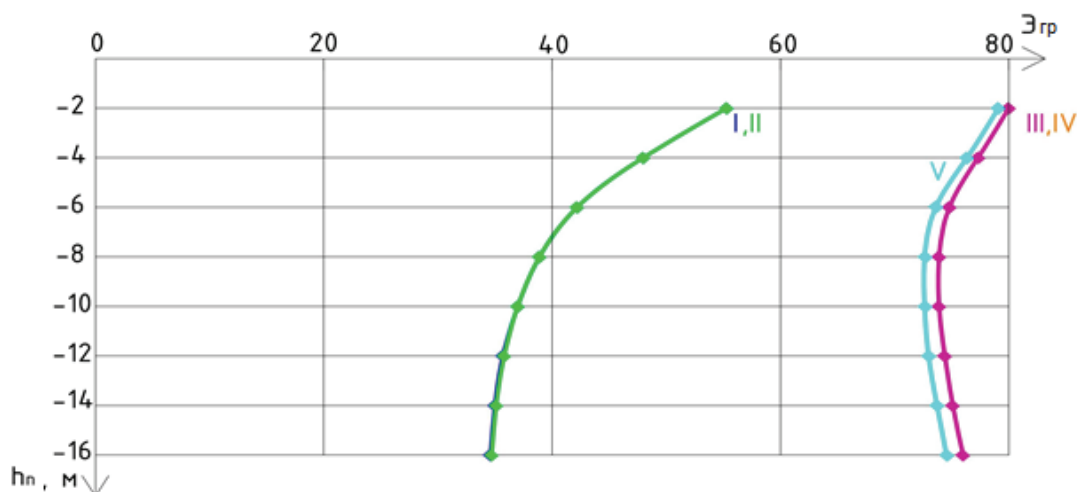


Рисунок 1. Зависимость эффективности сваи $\mathcal{E}_{гр}$ от глубины погружения h_n

Пример расчета эффективности свай по несущей способности по грунту $\mathcal{E}_{гр}$ представлен в таблице 3.

Таблица 3. Определение эффективности свай $\mathcal{E}_{гр}$ круглого поперечного сечения (I)

№	h_i , м	Отметка подошвы слоя, м	h_n , м	$h_{ср}$, м	Характеристика грунта	f_i , кН/м ²	$f_i \cdot h_i$, кН/м	$\sum f_i \cdot h_i$, кН/м	R , кПа	F_{df} , кН	F_{dR} , кН	F_d , кН	G , кН	$\mathcal{E}_{гр}$
1	2	-2	2	1	песок средней круп- ности	35	70	70	2067	88	260	348	6,3	55,3
2	2	-4	4	3		48	96	166	3200	209	403	612	12,6	48,6
3	2	-6	6	5		56	112	278	3550	349	447	797	18,9	42,2
4	2	-8	8	7		60	120	398	3800	500	479	979	25,2	38,9
5	2	-10	10	9		64	127	525	4000	660	504	1164	31,5	37,0
6	2	-12	12	11		66	133	658	4160	827	524	1351	37,8	35,7
7	2	-14	14	13		69	138	796	4320	1001	544	1545	44,1	35,0
8	2	-16	16	15		72	144	940	4480	1182	564	1746	50,4	34,6

Выводы по критерию V-1:

- 1) наибольшая эффективность соответствует минимальным глубинам погружения, а сечения III, IV и V дают слабовыраженный минимум;
- 2) сечения III, IV и V дают наибольшие значения эффективности;
- 3) эффективность сечений I и II примерно в два раза ниже эффективности сечений III и IV.

Исследование по критериям V-1 и V-3

Здесь объектом исследования были выбраны забивные железобетонные сваи квадратного (с размером стороны 0,35 м, 0,40 м и 0,45 м) и круглого (диаметром 0,35 м, 0,45 м) сечений. Длина свай составляла 14 м. Грунтовое основание – многослойное.

Эффективность работы свай определяли по двум критериям: эффективность работы свай по несущей способности по грунту и коэффициент использования материала свай.

Расчеты несущей способности свай приведены выше, а также в работе [16].

В качестве примера для свай квадратного сечения со стороной 0,4 метра приведем таблицу полученных результатов эффективности работы свай по грунту и коэффициента использования материала свай (таблица 4).

Таблица 4. Определение эффективности сваи квадратного сечения со стороной 0,4 м

№ слоя	h_n , м	F_d , тс	F_{dm} , тс	G , тс	критерий V-1 $\mathcal{E}_{гр}$	критерий V-3 $K_{эм}$
1	1	51,53	560	0,4	128,81	0,092
2	2	57,0		0,8	71,27	0,102
3	3	59,25		1,2	49,38	0,106
4	4	71,33		1,6	44,58	0,127
5	5	83,35		2,0	41,68	0,149
6	6	95,73		2,4	39,89	0,171
7	7	116,61		2,8	41,65	0,208
8	8	129,89		3,2	40,59	0,232
9	9	158,94		3,6	44,15	0,284
10	10	181,24		4,0	45,31	0,324
11	11	191,04		4,4	43,42	0,341
12	12	225,26		4,8	46,93	0,402
13	13	255,25		5,2	49,09	0,456
14	14	322,01		5,6	57,50	0,575

По результатам расчетов также были построены следующие графические зависимости, в которых по оси абсцисс отложены значения коэффициента использования материала сваи ($K_{эм}$) и эффективности сваи по несущей способности сваи по грунту ($\mathcal{E}_{гр}$); по оси ординат отложена глубина погружения сваи (h_n).

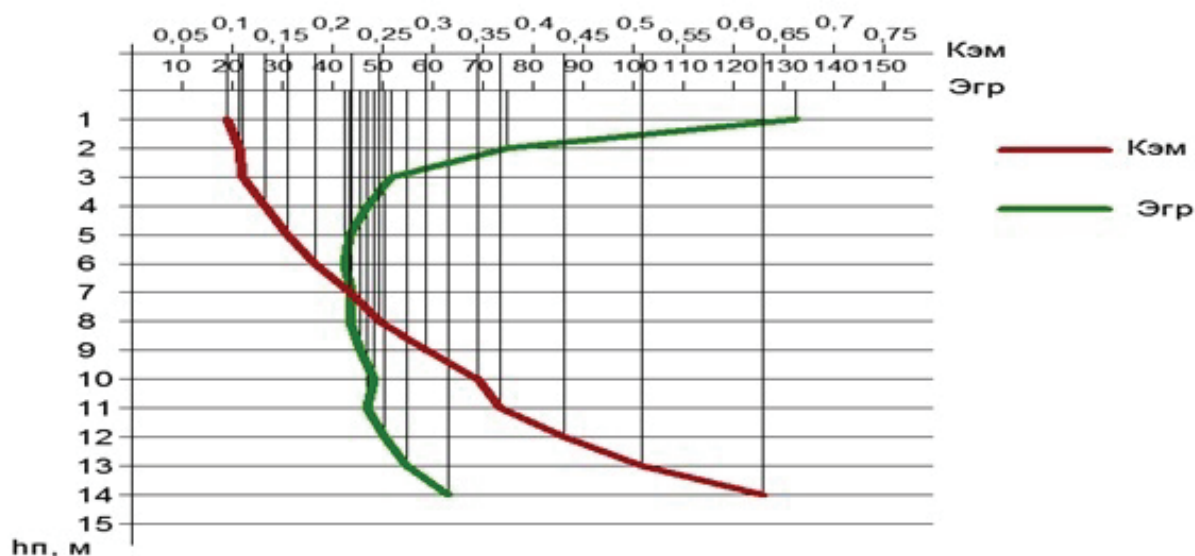


Рисунок 2. Зависимости эффективности сваи по несущей способности по грунту и коэффициента использования материала сваи от глубины погружения (квадратное сечение с размером 0,35 м)

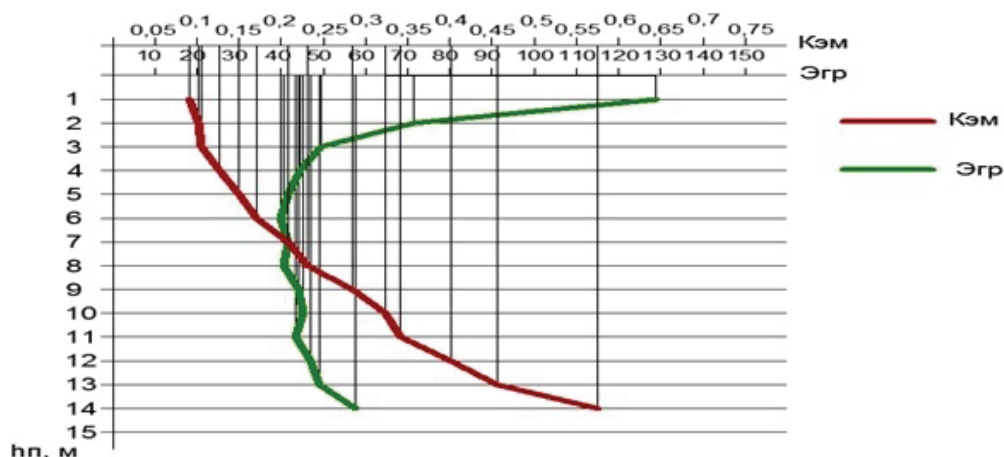


Рисунок 3. Зависимости эффективности сваи по несущей способности по грунту и коэффициента использования материала сваи от глубины погружения (квадратное сечение с размером 0,4 м)

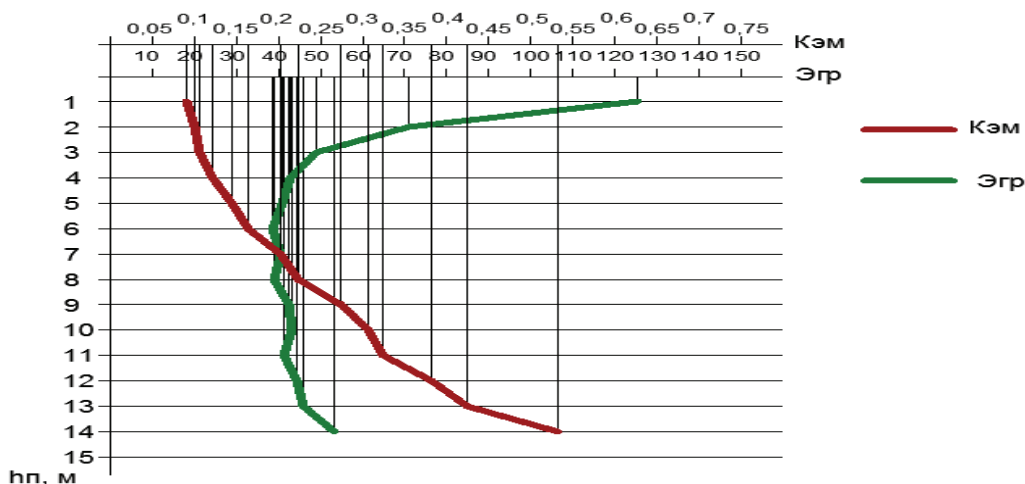


Рисунок 4. Зависимости эффективности сваи по несущей способности по грунту и коэффициента использования материала сваи от глубины погружения (квадратное сечение с размером 0,45 м)

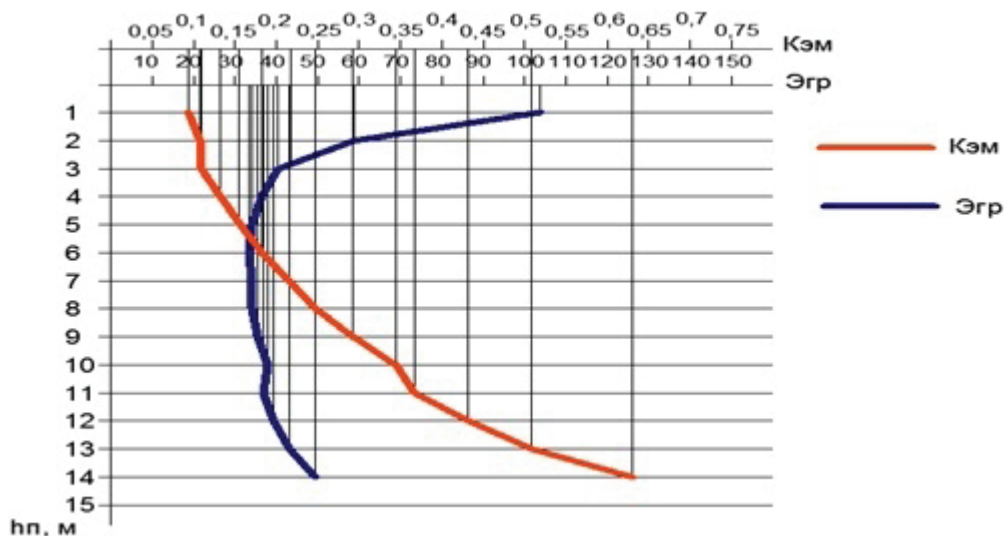


Рисунок 5. Зависимости эффективности сваи по несущей способности по грунту и коэффициента использования материала сваи от глубины погружения (круглое сечение диаметром 0,35 м)

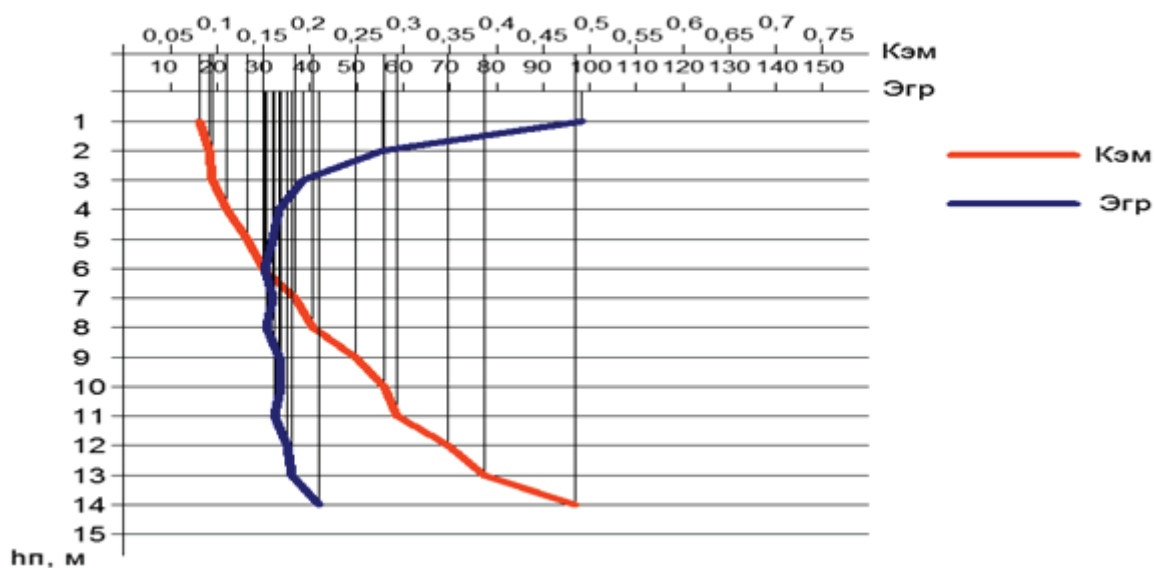


Рисунок 6. Зависимости эффективности свай по несущей способности по грунту и коэффициента использования материала свай от глубины погружения (круглое сечение диаметром 0,45 м)

Выводы по критериям V-1 и V-3:

- 1) графики эффективности свай по несущей способности по грунту для свай квадратных и круглых сечений аналогичны по форме и близки по содержанию;
- 2) значения коэффициента использования материала свай возрастают с глубиной погружения с некоторым ускорением;
- 3) неплавность кривых, а также их перегибы объясняем многослойностью грунтовой толщи свайного основания.

Заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Впервые представлены аналитические зависимости и количественные оценки эффективности свай забивного типа.
2. Введение критериев оценки работы свай, таких как критерий оценки эффективности свай по несущей способности свай по грунту и критерий эффективности свай по коэффициенту использования материала свай, по мнению авторов, существенно облегчает проблему решения задач оптимизации выбора длины свай и формы ее поперечного сечения.
3. Анализ полученных результатов с точки зрения критерия эффективности работы свай по несущей способности по грунту показал:
 - а) оптимальными являются поперечные сечения в виде двутавра и близкие к нему тавровое и крестообразное сечения,
 - б) для исследованных условий оптимальной глубиной погружения является минимальная глубина. Однако следование этому выводу приводит к снижению несущей способности свайного основания, что не всегда приемлемо в строительстве. Возможно, при других грунтовых условиях и других поперечных сечениях графические зависимости изменятся.
4. Анализ полученных результатов с точки зрения критерия коэффициента использования материала свай показал существенное возрастание коэффициента использования материала свай с глубиной погружения свай, причем с некоторым ускорением. Таким образом, следует выбирать свай с максимальным отношением периметра поперечного сечения к его площади и с максимальной длиной.
5. Для дальнейшего уточнения оптимальной формы поперечного сечения свай целесообразно проведение дополнительных исследований в лабораторных условиях.

Авторы выражают искреннюю благодарность выпускнице инженерно-строительного института СПбГПУ А.В. Тимофеевой и студенту 3 курса ИСИ СПбГПУ А.Б. Теплому, принявшим активное участие в подготовке данной статьи.

Литература

1. Булатов Г.Я., Костюкова А.Ю. Новая технология – «фундамент на трубогрунте» // Инженерно-строительный журнал. 2008. №2. С. 32–37.
2. Булатов Г.Я., Колосова Н.Б. Критерии выбора вибропогружателя // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 32–39.
3. Баданин А.Н., Колосов Е.С. Определение несущей способности армированного георешеткой грунтового основания // Инженерно-строительный журнал. 2012. №4(30). С. 25–32.
4. Голубков В.Н. Несущая способность свайных оснований. М.: Машстройиздат, 1950. С. 77–143.
5. Калачук Т.Г. Модульные сваи таврового сечения и составные на их основе в глинистых грунтах: дисс. ... кан. тех. наук. Белгород, 2004. 136 с.
6. Накопия М.С. Свайные фундаменты в условиях слабых грунтов в сейсмических районах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. №2. С. 40–43.
7. Булатов Г. Я., Ножнов А. П. Численное моделирование влияния грунтового ядра на несущую способность трубосваи // Инженерно-строительный журнал. 2010. №2(12). С. 27–35.
8. Нуждин Л.В., Полинкевич Д.А. Прогнозирование колебаний и оптимизация конструкции свайных фундаментов, эксплуатируемых при динамическом нагружении // Свайные фундаменты. Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. №8. С. 113–118.
9. Проектирование свайных полей [Электронный ресурс]. URL: <http://revvork.ru/proektirovanie-svajnyix-polej1.html> (дата обращения: 25.10.13).
10. Проектирование фундаментов зданий и подземных сооружений. Учебное пособие / Под ред. Далматова Б.И. СПб.: Изд-во АСВ, 2006. 428 с.
11. Румянцев С.А., Астанков К.Ю. Повышение эффективности преодоления лобового сопротивления связных грунтов при вибропогружении свай // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2012. №4. С. 82–90.
12. Шенкман Р.И., Пономарёв А.Б. Исследование эффективности применения грунтовых свай для улучшения свайных грунтов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2011. №1. С. 89–94.
13. Rajapakse R. Pile Design and Construction Rules of Thumb. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2008. 444 p.
14. Dheerendra Babu M.R., Sitaram Nayak, Shivashanka R. A Critical Review of Construction, Analysis and Behaviour of Stone Columns // Geotechnical and Geological Engineering. 2013. Vol.31. Issue 1. Pp. 1–22.
15. Бахолдин Б.В., Игонькин Н. Т. К вопросу о сопротивлении грунта по боковой поверхности сваи // Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: Стройиздат, 1969. №58. С. 9–13.
16. Булатов Г.Я., Колосова Н. Б., Теплов А.Б. Несущая способность забивных свай различных форм поперечного сечения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №1(6). С. 22–27.
17. Верстов В.В., Фрейдман Б.Г., Гайдо А.Н. Критерии сравнительной эффективности технологии устройства свайных фундаментов // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2004. №8/2204. URL: <http://stroim.mos.ru/nauka/d26dr2665m5.html> (дата обращения: 25.10.13).
18. Вертынский О.С. Определение несущей способности набивных конических свай // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. Т. 4. №1. С. 78–82.
19. Гуткин Ю.М. Определение коэффициента постели свайного основания подкрановых балок // Транспортное строительство. 1981. №2. С. 49.
20. Колосова Н.Б. Проблемы современного бетона и железобетона // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8. С. 4.
21. Сафонов А. П. Несущая способность свай в глинистых грунтах при действии горизонтальной нагрузки: дисс. ... канд. тех. наук: 05. 23. 02. Свердловск, 1984. 167 с.

22. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов.
23. FOREVER (Fondation REnforcees VERTicalement). Synthese des rezultates et recommandation du Projet national sur les MICROPIEUX. Paris: Ponts et chaussées, 2004. 347 p.
24. Philipponnat G., Hubert B. Fondation et ouvrages en terre. Paris: Eyrolles, 2008. 548 p.
25. Van Impe W.F. Deformations of deep foundations // Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Florence, Italy, 26–30 May 1991. Florence, 1991. London: Taylor & Francis, 1991. Pp. 2638–2640.
26. Van Impe W.F. Developments in pile design // Deep Foundation Institute. 4th International Conference on Piling and Deep Foundations.. Stresa, Italy, 7–12 April 1991. Pp. 2217–2234.
27. Castro J., Sagaseta C. Deformation and consolidation around encased stone columns // Geotextiles and Geomembranes. 2011. Vol. 29. No.3. Pp. 268–276.
28. Sayed S.M., Sunna H.N., Moore P.R. Load rating of pile-supported bridges susceptible to scour // Journal of Bridge Engineering. 2013. Vol. 18. No.5. Pp. 439–449.
29. Tsinker G.P. Port engineering: planning, construction, maintenance and security. New Jersey: Harbors. Design and Construction, 2004. 881 p.
30. Joergensen H.B., Hoang L.C. Tests and limit analysis of loop connections between precast concrete elements loaded in tension // Engineering Structures. 2013. Vol. 52. Pp. 558–569.
31. Chudley R., Greeno R. Building construction handbook. Amsterdam; London: Butterworth-Heinemann, 2008. Pp. 212–229.
32. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85.
33. ГОСТ 27751-88. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчёту.
34. СНиП 3.02.01-87. Земляные сооружения, основания и фундаменты.
35. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений.

*Георгий Яковлевич Булатов, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)736-44-55; эл. почта: bulatov.spbgpu@gmail.com*

*Наталья Борисовна Колосова, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)932-33-51; эл. почта: po.isf@cef.spbstu.ru*

© Булатов Г.Я., Колосова Н.Б., 2013



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



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

Что такое магистратура?

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



Условия поступления и обучения

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



Особенности обучения

на инженерно-строительном факультете:

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

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

Контакты

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.
29, Гидрокорпус-2

552-79-03, 535-25-09
dekanat@cef.spbstu.ru; www.cef.spbstu.ru



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

