



№2(54) март 2015

СОБЫТИЯ

МАТЕРИАЛЫ

КОНСТРУКЦИИ

ТЕХНОЛОГИЯ

МОДЕЛИ

АНАЛИЗ

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

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



**Инженерно-строительный институт
Центр дополнительных профессиональных программ**
195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
тел/факс: 552-94-60, www.stroikursi.spbstu.ru,
stroikursi@mail.ru

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

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

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

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

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

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

Инженерно-строительный журнал

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ISSN 2071-4726

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

Специализированный научный журнал. Выходит с 09.2008.

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Адрес редакции:

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

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Научный редактор:

Николай Иванович Ватин

Литературный редактор:

Елена Викторовна Цветкова

Редакционная коллегия:

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

Установочный тираж 1000 экз.

Подписано в печать 30.03.15.
Формат 60x84/8, усл. печ. л. 13,5.
Заказ №0657.

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

Содержание**СОБЫТИЯ**

Перспективы металла как строительного материала 4

АНАЛИЗ

Черный К.А., Файнбург Г.З. Опыт использования силвинитовых блоков и панелей в комнатах «живого» воздуха и основные параметры качества формируемой воздушной среды 6
Кошкарёв С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита 18

МОДЕЛИ

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий 46

МАТЕРИАЛЫ

Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой Ибрагимов Р.А., Пименов С.И., Изотов В.С. Влияние механохимической активации вяжущего на свойства мелкозернистого бетона 63
Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении 70

КОНСТРУКЦИИ

Карельский А.В., Журавлева Т.П., Лабудин Б.В. Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами, разрушающей нагрузкой 77

ТЕХНОЛОГИЯ

Ульшин А.Н. Экспериментальное обоснование способа повышения комплексной технологичности стальной стержневой конструкции 86
Пенчук В.А., Руднев В.К., Саенко Н.В., Супонев В.Н., Олексин В.И., Балесный С.П., Вивчар С.М. Грунтопрокалывающая установка статического действия с кольцевыми расширителями горизонтальных скважин (англ.) 100

© ФГАОУ ВО СПбПУ, 2015

На обложке: строительная площадка, г. Нетания, Израиль

Контакты:

Тел. +7(812)535-52-47 E-mail: mce@ice.spbstu.ru Web: <http://www.engstroy.spb.ru>

MosBuild

Главная строительная
и интерьерная выставка России

Неделя Дизайна и Декора

31 марта – 3 апреля 2015
Москва, ЦВК «Экспоцентр»

Неделя Строительства и Архитектуры

14 – 17 апреля 2015
Москва, ЦВК «Экспоцентр»

www.mosbuild.com

MosBuild 
Архитектура • Строительство • Дизайн • Декор



doi: 10.5862/MCE.54.1

Перспективы металла как строительного материала



С 18 по 21 марта в Санкт-Петербурге проводилась традиционная выставка «Интерстройэкспо». Впервые мероприятие проходило в новом комплексе «ЭкспоФорум» на Петербургском шоссе.

В рамках деловой программы выставки 18 марта была проведена конференция «Современные практики применения металлоконструкций при строительстве жилья и социальных объектов. Новые возможности для производителей металлоконструкций». Мероприятие было организовано Ассоциацией развития стального строительства и стало, в том

числе, презентацией этого нового органа.

Конференцию открывал генеральный директор АРСС Дмитрий Сергеевич Еремеев. По его словам, строительство на металлическом каркасе в России значительно отстает от Европы и США. Например, в России доля многоэтажных зданий на стальном каркасе составляет 13%; в то же время, в Англии этот показатель 68 %, в США – 65 %. Целью Ассоциации является развитие и популяризация строительства из металлоконструкций в России.

В жилом строительстве в России металлокаркас вообще практически не используется, хотя за рубежом это уже устоявшаяся практика. В качестве главных преимуществ такого решения Д.С. Еремеев назвал:

- вариативность планировок (отсутствие несущих стен),
- снижение затрат рабочей силы,
- меньший вес конструкции,
- высокую скорость строительства.

Тем не менее, пока что в отечественной практике жилые здания на металлическом каркасе представляют собой единичные случаи, в основном уникальные проекты в премиальном секторе. Основные причины, сформулированные Д.С. Еремеевым, можно назвать одним словом «консерватизм»: скептицизм инвесторов, недостаточно развитая нормативная база, отсутствие готовых и стандартных решений. Последнее, в частности, связано с тем, что в СССР проектированием металлоконструкций занимался только один институт в промышленных целях, а проектирование гражданских зданий было запрещено.

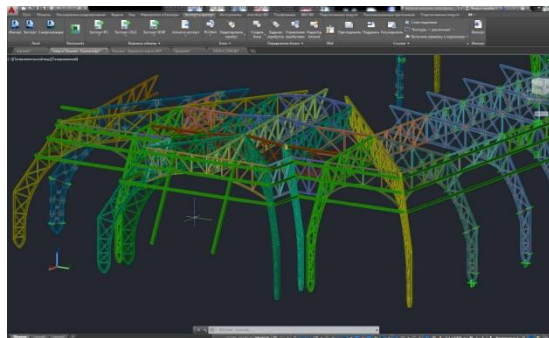
Д.С. Еремеев рассказал также о пилотном проекте «Новомарусино» – микрорайоне в г. Новосибирске. Основными преимуществами решения являются сравнительная дешевизна (стоимость возведения каркаса на 5 % дешевле аналога в монолитном строительстве), гибкость планировок (актуально для заказчика в период кризиса), ранняя высокая степень готовности. Последний пункт, по мнению Д.С. Еремеева, должен особо привлечь девелоперов, поскольку позволяет уже через 3–4 месяца после начала строительства продавать квартиры по полной цене, без «инвестиционной скидки», т.к. дом уже на 95 % готов.

Другие докладчики отмечали, что, несмотря на все эти преимущества, пока продвижение жилого строительства на металлокаркасе идет очень медленно. Так, например, проект многоэтажного жилого дома, разработанный ООО «Руукки Рус», так и не был реализован. В числе основных причин начальник проектного бюро ООО «Руукки Рус» Николай Евгеньевич Клещев назвал, прежде всего, неготовность девелоперов к таким решениям. В процессе создания проекта возникла необходимость в испытаниях различных конструктивных элементов, а также испытаниях на огнестойкость. В целом, именно необходимость конструктивной огнезащиты металлических конструкций является основным препятствием для их широкого использования в строительстве.

Роман Валентинович Твердохлебов, технический директор ГК «Моноракурс», рассказывал об опыте внедрения металлических конструкций в жилом строительстве Республики Беларусь. По его словам, внедрению уже разработанных проектов типового пятиэтажного и девятиэтажного домов также препятствует дороговизна системы огнезащиты. Заложённая система не только «съедает» всю экономию от использования металлокаркаса, но и делает проект убыточным.

Решением этой проблемы, по мнению Р.В. Твердохлебова, может стать повышение заводской готовности конструкций. Это усилит основные преимущества металлокаркаса – низкую стоимость и небольшой вес конструкций.

По мнению Андрея Сопроненко, главного инженера ОАО «КБ ВиПС», еще одним преимуществом строительства из металла является то, что оно идеально подходит для использования технологии BIM. Кроме уже привычных пользователей информационной 3D-модели здания – проектировщиков, добавляются еще заводы металлоконструкций, которые могут использовать либо саму 3D-модель, либо полученную из нее детализовку.



Более традиционным полем использования металлоконструкций являются спортивные сооружения. Так, Иван Анатольевич Симбухов, руководитель проектов ЗАО «Объединенная металлургическая компания», рассказывал о применении сварных труб при строительстве стадионов для Чемпионата мира по футболу 2018. Он отметил недостаточность нормативной документации в этой области. В связи с этим было принято решение о разработке ГОСТ Р на применение электросварных труб в строительстве. Исполнителями являются ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко и ООО ЭО «Инженерная безопасность», в апреле ожидается рабочая версия документа.

Нормотворческой деятельности в целом было уделено большое внимание на конференции. В качестве эксперта по этому вопросу выступил д.т.н., проф., директор ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко Иван Иванович Ведяков. Он рассказал об актуализации СП 16.13330-2011 «Стальные конструкции», о готовящейся актуализации ГОСТ 27772-88 «Прокат для строительных стальных конструкций». Кроме того, идет работа и по другим направлениям в рамках общей программы актуализации нормативной базы в строительстве (Технический комитет по стандартизации №465 «Строительство»). Также И.И. Ведяков отметил, что текущая экономическая ситуация должна положительно повлиять на отечественный рынок металлопроката. Так, политика импортозамещения при строительстве стадионов к Чемпионату мира по футболу привела к тому, что 95 % используемого там металлопроката – отечественный. Закупают за рубежом только специальные тяги, которые в России пока не производят.

В то же время, по мнению Александра Валерьевича Ларионова, генерального директора ООО «Металл-Дон», общее падение экономики не может не повлиять на отрасль. Производство металлоконструкций уже упало в 2013–2014 гг. и, по мнению докладчика, продолжит падение в 2015 г. Именно в этой ситуации нужно прилагать усилия к консолидации отрасли и повышению качества продукции. А.В. Ларионов обозначил основные направления действий:

- развитие нормативной базы;
- пропаганда и развитие новых методов проектирования металлоконструкций;
- развитие коммуникаций между членами отрасли, обмен лучшими практиками;
- создание региональных консорциумов для выполнения крупных проектов;
- модернизация и автоматизация производства.

АРСС | Ассоциация развития стального строительства Мы решили развивать стальное строительство



Материалы



Проектирование



Технологии

= 13 =

Текст: В.М. Якубсон

Иллюстрации: А. Сопроненко, А. Ларионов

doi: 10.5862/MCE.54.2

Опыт использования сильвинитовых блоков и панелей в комнатах «живого» воздуха и основные параметры качества формируемой воздушной среды

*Д.т.н., профессор К.А. Черный;
д.т.н., директор института Г.З. Файнбург,*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Аннотация. В последнее время ввиду существенного прогресса в строительной индустрии создано огромное количество отделочных материалов, применяемых в современных помещениях различного назначения. В силу влияния на человека негативных свойств некоторых искусственных строительных материалов, остро стоит задача обеспечения качества воздушной среды в помещениях. Применение материалов из пиленых, прессованных, формованных конструкций (блоков и плиток) из натуральных сильвинитовых пород является известным способом создания качественной, вплоть до лечебной, воздушной среды помещений. В разнообразных строительных конструкциях на основе указанных материалов воздушная среда модифицируется ввиду влияния природных кристаллов сильвина, галита и карналлита. Облицовка или декорирование ограждающих поверхностей комнат, пола или потолка насыщают воздух помещения легкими аэроионами и частицами высокодисперсного соляного аэрозоля и обеспечивают формирование «живого» воздуха помещений, максимально приближенного к благоприятным природным средам.

Исходя из характеристик ионизирующих излучений природного радиоизотопа ^{40}K анализируются особенности формирования аэроионного состава и проводится расчет эффективной зоны аэроионизации, что позволяет определить основные требования к размещению активных отделочных или декорирующих элементов, выполненных из сильвинитовых панелей или блоков. Представлены экспериментальные данные относительно концентрации легких аэроионов и высокодисперсного аэрозоля, проведен анализ распределения по электрической подвижности аэроионов в естественных природных условиях и в воздухе помещений, облицованных калийной солью. Определены численные значения параметров размерных распределений соляных аэрозольных частиц, аппроксимированных как суперпозиция нескольких логарифмически нормальных распределений. Представлена модификация размерных распределений аэрозольных частиц в зависимости от относительной влажности воздуха.

Результаты исследований наглядно демонстрируют возможность применения сильвинитовых блоков и панелей для формирования в современных помещениях не только качественной, но даже оздоровительной воздушной среды, а также могут стать основой широкого практического использования новых передовых технологий для создания комнат «живого» воздуха.

Ключевые слова: сильвинитовые блоки; соляные плитки; облицовка; легкие аэроионы; соляной аэрозоль

Введение и постановка задачи

Внутренняя воздушная среда жилых, общественных и производственных зданий зависит от качества строительных материалов ограждающих конструкций. С гигиенической точки зрения важно отметить, что по сравнению с наружной средой практически все параметры внутренней среды обитания вследствие влияния ограждающих конструкций претерпевают определенные изменения. Часть этих изменений носит позитивный характер (например, создаются благоприятные микроклиматические условия вне зависимости от наружных метеоусловий), а часть может носить негативный характер (например, происходит загрязнение воздуха помещений).

Комплексное научное представление о причинах воздушного дискомфорта, нередко испытываемого человеком в помещениях или иных замкнутых воздушных объемах, является предметом современных научных исследований [1–3]. Ряд авторов [4–10] одну из причин воздушного дискомфорта в помещениях видит в изменении аэроионного состава воздуха по сравнению с исходным первичным атмосферным воздухом – в помещениях происходит снижение содержания легких аэроионов. Причиной снижения количества легких ионов является поглощение их в процессе дыхания человеком, превращения части легких ионов в тяжелые вследствие оседания на аэрозольных частицах, а также адсорбции поверхностями.

Черный К.А., Файнбург Г.З. Опыт использования сильвинитовых блоков и панелей в комнатах «живого» воздуха и основные параметры качества формируемой воздушной среды

Действующими санитарно-гигиеническими нормами [11] определены минимально необходимые концентрации аэроионов: 600 см^{-3} для отрицательных и 400 см^{-3} для положительных аэроионов. Кроме того, для положительных и отрицательных аэроионов установлены максимально допустимые уровни – $50\,000 \text{ см}^{-3}$.

Указанные нормативные уровни могут быть обеспечены проведением мероприятий по искусственной генерации аэроионов с помощью специального оборудования – коронных аэроионизаторов. Однако их широкое применение ограничено в силу повышения активности протекания негативных ион-индуцированных химических реакций и возможной побочной генерации вредных химических веществ – озона O_3 , а также оксидов азота NO , NO_2 , NO_x [12–14].

Известны естественные природные способы обеспечения нормативных требований к аэроионосодержанию воздуха в помещениях [15–17], основанные на применении специальных строительных конструкций или материалов из природных каменных солей, которыми облицовываются или декорируются ограждающие поверхности комнат, пола или потолка, создавая тем самым комнаты «живого» воздуха [18–20] (рис. 1). В настоящее время накоплен определенный экспериментальный материал о том, что в качестве позитивных факторов воздушной среды в помещениях с применением таких строительных и отделочных материалов выступают высокая объемная концентрация легких аэроионов и высокодисперсный соляной аэрозоль [21–23].

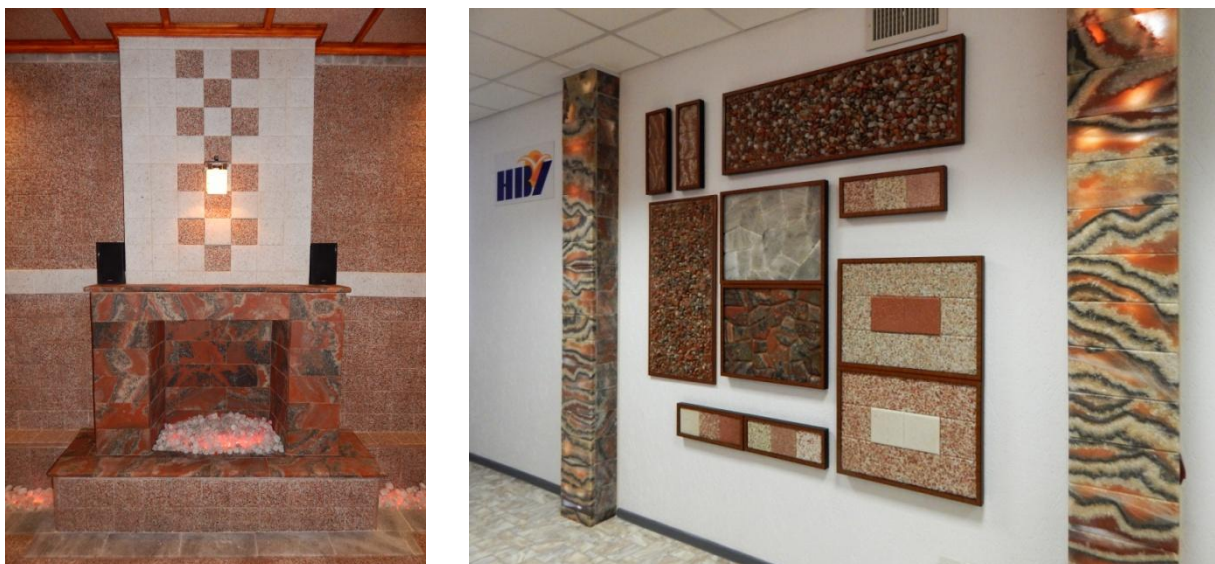


Рисунок 1. Примеры применения сальвинитовых блоков и панелей в комнатах «живого» воздуха

Вместе с тем до настоящего времени не проведено обобщения с единых физических позиций разрозненных теоретических и экспериментальных исследований характеристик указанных специальных отделочных материалов и их влияния на формируемый аэроионный и аэрозольный состав воздуха помещений. Исследования аэроионного и аэрозольного составов ограничиваются, как правило, натурными измерениями без рассмотрения роли факторов, обуславливающих их формирование [22, 23]. Важным остается решение задачи выбора геометрических размеров и мест размещения специальных декоративных отделочных материалов на основе природных солей с целью формирования заданного нормативного уровня ионо- и аэрозольсодержания в воздухе помещений.

Авторами сделана попытка на основе современных представлений об электрических явлениях в воздушных средах и имеющихся в натуральных и модельных экспериментах взаимосвязей путем теоретических построений и расчетов выявить конкретный механизм насыщения легкими аэроионами и соляным аэрозолем воздуха помещений, облицованных сальвинитовыми блоками и панелями. Проведены теоретические расчеты пространственно-количественных параметров ионизирующей способности калийных солей и иных строительных материалов на их основе, практическая проверка достоверности полученных результатов, а также исследования особенностей дисперсного состава аэрозольной компоненты, формируемых в силу влияния природных кристаллов сальвина, галита и карналлита.

Описание и результаты исследования

Оценка пространственно-количественных параметров ионизирующей способности калийных солей и материалов на их основе

Основной вклад в процесс ионообразования в помещениях «живого» воздуха вносит ионизирующее излучение радиоактивного изотопа ^{40}K , который является ведущим излучателем горных пород и входит в химический состав калийной соли (в первую очередь, в сильвинитовую руду). В природе калий состоит из двух стабильных изотопов – ^{39}K (93,26 %), ^{41}K (6,73 %), и одного радиоактивного – ^{40}K (0,0117 %), причем изотопный состав калия различных земных образований практически одинаков. Период полураспада изотопа ^{40}K – $1,31 \cdot 10^9$ лет, тип распада – β и γ . В результате β -распада (89,3 %), верхняя энергия спектра которого составляет $E_\beta = 1,322$ МэВ, а средняя энергия излучения $\bar{E} = 0,541$ МэВ, ^{40}K превращается в стабильный изотоп ^{40}Ca , путем К-захвата (10,7 %) – в ^{40}Ar . [24–26].

Для определения эффективной, значимой в процессах формирования аэроионного состава воздуха толщины рассматриваемых отделочных материалов оценим характерную длину пробега β -частиц h в калийной соли [27]:

$$h = \frac{0,54E_\beta - 0,15}{\rho}, \quad (1)$$

где ρ – плотность вещества, г/см³, для калийной соли $\rho = 1,99$ г/см³;

E_β – максимальная энергия β -частиц, МэВ.

Арифметическое вычисление согласно выражению (1) дает величину порядка 0,3 см, т. е. β -излучение в калийной соли идет лишь от незначительного по толщине внешнего слоя поверхности породы или от генерируемых породой частиц соляного аэрозоля. Таким образом, при условии сохранения биологически активных свойств калийной соли в аспекте формирования повышенной аэроионизации воздуха можно снизить толщину отделочных материалов на основе калийной соли вплоть до технологически достижимых величин. Последнее позволяет максимально снизить вес отделочных материалов и расход активной соляной породы.

Для определения пространственных параметров ионизирующей способности калийных солей оценим характерную длину пробега β -излучения в воздухе помещения, воспользовавшись справочными данными [28]. При средней энергии β -частиц $\bar{E} = 0,541$ МэВ характерная длина пробега β -излучения в воздухе составляет величину $l \approx 1,4$ м. Именно на таких характерных расстояниях от отделочных материалов на основе калийной соли и протекают процессы аэроионизации.

Интенсивность ионообразования в воздушной среде помещений, облицованных специальными материалами на основе калийных солей

Как было показано выше, ^{40}K является источником и β -излучения, и γ -излучения. Таким образом, для описания ионизирующей способности излучений изотопа ^{40}K требуется определение мощности экспозиционной дозы γ -излучения, мкР/ч, и плотности потока β -излучения с поверхности Φ , см⁻²с⁻¹.

Измерения уровней ионизирующих излучений радиоактивного излучения проводились комбинированным прибором РКБ-104, позволяющим регистрировать β -излучение в диапазоне 0,5...3,0 МэВ и γ -излучение в диапазоне 0,06...1,25 МэВ.

Результаты проведенных исследований радиоактивности соляных отделочных строительных материалов на основе сильвинитовой руды разного состава и различного способа подготовки к применению (пиление из горного массива, прессование или заливка и т. п.), а также данные об ионизирующих излучениях в горных выработках калийного рудника (для сравнения) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Бета- и гамма-излучения отделочных материалов на основе калийных солей

Материал	γ-излучение, мкР/ч	β-излучение, см ⁻² с ⁻¹
Горные выработки по сильвинитовым пластам (KCl)	48...56	0,46...0,58
Горные выработки по каменной соли (NaCl)	3...4	0,06...0,07
Пилёный блок красного сильвинита размером 15×20×40 см	37,5	0,489
Пилёный галитовый блок чистой прозрачной соли размером 15×20×20 см	13,0	0,007
Пилёная плита красного крупнозернистого сильвинита размером 4×20×30 см	31,6	0,705
Природный «закол» контакта красного сильвинита с галитом, сторона сильвинита	22,7	0,782
Среднее значение:	26,2	0,496
Плитка потолочная на фанерной основе. Толщина активного слоя 10 мм. Состав – 80 % KCl.	18,65	0,446
Плитка потолочная на фанерной основе. Толщина активного слоя 3...4 мм. Состав – 95 % NaCl и 5 % KCl.	12,57	0,083
Плитка потолочная на фанерной основе. Сверху присыпка сильвинита – 10 % KCl и 90 % NaCl.	13,93	0,143
Плитка облицовочная. Толщина подложки 10 мм, состав – 22 % KCl. Верхний слой: толщина 3–4 мм, состав – 80 % KCl.	13,88	0,349
Плитка облицовочная. Толщина плитки 13 мм. Состав – 22 % KCl.	17,71	0,531
Плитка облицовочная. Толщина подложки 8 мм, состав – 22% KCl. Толщина верхнего слоя 5 мм, состав – 90 % KCl и 10 % NaCl.	18,63	0,572
Плитка половая. Толщина плитки 24 мм. Состав – 22 % KCl.	18,43	0,298
Плитка облицовочная. Подложка – магнезитный цемент, толщина 1...2 мм. Толщина верхнего слоя 11 мм, состав – 70 % KCl.	18,00	0,486
Плитка облицовочная. Толщина плитки 12 мм, состав – 70 % KCl.	19,57	0,489
Плитка заливная. Толщина подложки 15 мм, состав – 50 % KCl. Верхний слой – 95 % KCl.	21,20	0,733
Плитка формованная. Толщина 13 мм, состав – 22 % KCl.	16,07	0,319
Среднее значение:	17,15	0,404

Используя в качестве исходных данных полученные результаты исследования радиационной обстановки, можно теоретически рассчитать интенсивность ионообразования.

Интенсивность ионообразования в помещениях, облицованных материалами на основе калийной соли, обусловлена следующими основными процессами:

- эманациями радиоактивных элементов, содержащихся в самих отделочных материалах, v_1 ;
- ионизирующими процессами, происходящими во внешней атмосфере, в основном космическим излучением ($v_2 \approx 1...3$);
- другими процессами, которые носят специфичный характер, v_3 .

Суммарная интенсивность ионообразования определяется как

$$v = v_1 + v_2 + v_3. \quad (2)$$

Интенсивность ионообразования β-излучения сильвинитовой руды оценим, воспользовавшись соотношением [29]:

$$v_{\beta} = \frac{\bar{E}}{IE_0} \varphi, \quad (3)$$

где $\bar{E}$ – средняя энергия β -излучения;

E_0 – средняя энергия ионизации молекул воздуха, равная 33,85 эВ;

l – характерная длина пробега β -излучения, оцененная ранее как $l \approx 140$ см.

Арифметическое вычисление согласно выражению (3) дает $v_\beta \approx 55 \div 65 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$.

Кроме того, для изотопа ^{40}K с простым β -спектром доза D , рассчитанная на одну β -частицу, падающую на 1 см^2 , зависит только от максимальной энергии E_β и сохраняется постоянной независимо от глубины среды, толщины и размеров источника. Согласно [27] при $E_\beta \approx 1,322 \text{ МэВ}$ доза $D \approx 4 \times 10^{-10}$ Гр. С учетом величины плотности потока β -частиц ϕ (табл. 1) доза, создаваемая β -излучением изотопа ^{40}K , составляет величину порядка 2×10^{-10} Гр. Используя определение мощности экспозиционной дозы (1 Р – такая доза в воздухе, при которой в 1 см^3 сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении создается $2,08 \times 10^9$ пар ионов), получаем интенсивность ионообразования за счет β -излучения $v_\beta \approx 45 \dots 55 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$.

Значения интенсивности ионообразования, полученные в первом и втором случаях, близки. Таким образом, в дальнейшем значения интенсивности ионообразования за счет β -излучения будем принимать $v_\beta \approx 50 \div 60 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$.

Интенсивность ионообразования v_γ за счет γ -излучения изотопа ^{40}K оценим, исходя из мощности экспозиционной дозы P и усредненной температуры в помещении t , согласно известному выражению [25]:

$$v_\gamma = \frac{P}{1 + \frac{t, ^\circ\text{C}}{273}} \approx 10 \dots 15 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}. \quad (4)$$

Таким образом, общая интенсивность ионизации в результате действия ионизирующих излучений отделочных материалов на основе калийной соли составляет величину, равную

$$v_1 = v_\beta + v_\gamma \approx 50 \dots 60 + 10 \dots 15 = 60 \dots 75 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}. \quad (5)$$

Наибольший вклад в интенсивность ионообразования в модельной воздушной среде камер вносит β -излучение изотопа ^{40}K .

Важно отметить, что в помещениях, облицованных материалами из калийной соли, имеется еще один путь обогащения воздуха легкими ионами – в результате их физической десорбции с поверхности жидких аэрозольных частиц ионогенных электролитов. Этот процесс известен [30], однако для описания ионизации в рассматриваемых специальных помещениях ранее не применялся. Согласно [31] процесс десорбции ионов обеспечивает среднюю интенсивность ионообразования в среде, содержащей капли электролита, порядка $v_3 \sim 10 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$, что сравнимо с естественной интенсивностью ионизации в приземном слое атмосферы [32].

Согласно описанным выше расчетам суммарная интенсивность ионообразования в модельной воздушной среде сильвинитовых камер приблизительно равна

$$v = v_1 + v_2 + v_3 \approx 70 \dots 85 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}. \quad (6)$$

Полученная расчетным путем интенсивность ионизации воздуха помещений, облицованных строительными материалами на основе калийных солей, приводит к максимально возможным концентрациям легких аэроионов, значение которых может быть оценено исходя из уравнения аэроионного баланса, записанного в приближении полного отсутствия аэрозольных частиц в воздухе:

$$n = \sqrt{\frac{v}{\alpha}}, \quad (7)$$

где n – концентрация легких аэроионов, см^{-3} ;

α – коэффициент рекомбинации легких аэроионов противоположной полярности, $\alpha \cong 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ [33, 34].

Таким образом, в помещениях, облицованных строительными материалами из калийной соли, максимально возможная концентрация легких аэроионов $n \cong 7\,000 \text{ см}^{-3}$, что согласуется с установленными санитарно-гигиеническими нормами [11].

Содержание аэроионов в воздушной среде помещений, облицованных специальными материалами на основе калийных солей

В воздушной среде помещений, облицованных специальными материалами на основе калийных солей, исследованы соотношения концентраций фракций аэроионов с предельными подвижностями 0,1; 0,01 и 0,00032 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ (группа легких, средних промежуточных и тяжелых аэроионов соответственно).

Исследование значений концентрации аэроионов проводилось с помощью интегрального спектрометра аэроионов УТ-8401, позволяющего регистрировать аэроионы положительной и отрицательной полярности в диапазоне подвижностей 0,00032...2,0 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$.

Усредненные значения концентраций аэроионов при рассматриваемых предельных подвижностях со стандартными отклонениями представлены в таблице 2.

Таблица 2. Концентрации аэроионов различных групп подвижностей в помещениях с отделочными материалами на основе калийной соли

Объект исследований	Объемные концентрации, см^{-3}					
	Легкие аэроионы (более 0,1 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$)		Средние аэроионы (0,01...0,1 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$)		Тяжелые аэроионы (0,00032...0,01 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$)	
	n_+	n_-	n_+	n_-	n_+	n_-
Помещения, облицованные силвинитовыми блоками калийной соли	2400±410	2050±360	230±70	220±90	1980±440	2350±600
Помещения, полностью облицованные прессованной калийной плиткой	1500±440	1170±370	260±100	260±130	2600±620	3010±580
Помещения с декоративными фрагментами из материалов на основе калийной соли (на расстоянии 1,5 м от активной поверхности)	1030±380	1040±360	230±80	170±70	1600±350	1300±240

Во всех измерениях среди аэроионов подвижностью более 0,1 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ (легкие аэроионы) преобладают аэроионы положительной полярности, что характерно для приземной атмосферы вследствие наличия электрического поля Земли. Коэффициент униполярности $Y = n_+ / n_-$ в диапазоне легких аэроионов колеблется в интервале 1,08...1,57.

Объемные концентрации средних промежуточных аэроионов (подвижностью 0,01...0,1 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$) обеих полярностей существенно меньше концентраций как легких, так и тяжелых аэроионов, что также характерно для аэроионного состава воздушной среды с относительно низкой интенсивностью ионизации.

В области тяжелых аэроионов (подвижностью 0,00032...0,01 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$) отмечен следующий экспериментальный факт. Коэффициент униполярности Y в указанном диапазоне изменяет свой знак в зависимости от времени и объекта измерения. В одних случаях (~12 %) концентрация тяжелых положительных аэроионов больше, чем отрицательных, в других случаях (~88 %), наоборот, концентрация тяжелых отрицательных аэроионов больше, чем положительных. Отмечено, что данное различие связано с величиной относительной влажности. При относительной влажности воздуха более 74 % (критическая относительная влажность, при которой все соляные аэрозольные частицы растворяются) концентрация тяжелых отрицательных аэроионов всегда больше концентрации положительных. При относительных влажностях менее 74 % знак коэффициента униполярности тяжелых аэроионов может быть как отрицательным, так и положительным.

Указанная закономерность может быть объяснена специфическими свойствами соляных аэрозольных частиц. Как известно, тяжелые аэроионы образуются путем захвата легких аэроионов аэрозольными частицами. Поскольку в модельной воздушной среде основным является соляной гигроскопичный аэрозоль, то в случае, если в системе «аэроионы – соляной аэрозоль – воздух» протекают процессы обводнения ядер, испарения или конденсации водяного пара, потоки аэроионов разных знаков на аэрозольные частицы будут различаться из-за появления на поверхности частиц упорядоченных слоев молекул водяного пара. Последние создают вблизи поверхности раздела «вода – воздух» локальный электрический потенциал, знак и величина которого определяются скоростью конденсационных процессов, а также способностью вещества аэрозоля специфично ориентировать адсорбированные на поверхности молекулы водяного пара и диссоциировать в воде. Согласно модели, развитой в [35, 36], аэроионы одного знака, попав в зону действия указанного потенциала, беспрепятственно осаждаются на каплю (частицу), а ионы другого знака «выталкиваются» потенциалом, что приводит к снижению потока этих ионов. Согласно экспериментальным данным [37] на стадии обводнения аэрозольной солевой частицы создаются условия преимущественной адсорбции отрицательных аэроионов, на стадии конденсационного роста – положительных ионов.

Соляной аэрозоль, содержащий соли натрия, калия, магния, обладает ярко выраженным гистерезисом в агрегатном состоянии аэрозольных частиц в зависимости от относительной влажности [38]. Полное растворение частиц соли происходит при относительной влажности 73...78 % [39], однако обратная кристаллизация наблюдается лишь при относительной влажности 30...40 %. На наш взгляд, преимущественный знак заряда тяжелых аэроионов определяется именно процессами избирательного осаждения аэроионов разных знаков на соляную аэрозольную частицу, а также явлением гистерезиса. Наблюдаемые в полученных результатах превышения концентраций или положительных, или отрицательных тяжелых аэроионов при относительной влажности воздуха от 34 до 74 % зависят от того, каким образом данная относительная влажность в модельной воздушной среде камеры была достигнута. Если относительная влажность воздуха в прошлом превысила критическое значение, равное 74 %, при котором все аэрозольные солевые частицы превратились в жидкие капли, то при снижении относительной влажности аэрозольные частицы остаются в жидкой фазе и преимущественное осаждение испытывают отрицательные аэроионы. Если же аэрозольные частицы не являются полностью растворенными, т.е. относительная влажность в прошлом не превышала критическое значение в 74 %, то преимущественному осаждению подвергаются положительные аэроионы.

Распределение легких аэроионов по подвижности в воздушной среде помещений, облицованных специальными материалами на основе калийных солей

Типичное спектральное распределение легких аэроионов по подвижности представлено на рисунке 2. С помощью интегрального спектрометра аэроионов UT-8401 регистрировались спектры отрицательных и положительных легких аэроионов в диапазоне от 0,1 до 2,2 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$.

Практически все легкие аэроионы находятся в диапазоне подвижности 1...2 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$. Отмечено, что при подвижности более 2 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ коэффициент униполярности U всегда меньше единицы (среднее значение равно $0,89 \pm 0,09$), в то время как в диапазоне 1...2 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ значение коэффициента униполярности U всегда больше единицы (среднее значение – $2,74 \pm 1,38$). Для обычной атмосферы характерны значения коэффициента униполярности в указанных диапазонах подвижности 0,68 и 1,33 соответственно [40].

Отмеченный выше экспериментальный факт согласуется с ионизационными процессами в чистом воздухе без посторонних химических примесей [40], в котором основными отрицательными аэроионами подвижностью более 2 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ являются ионы вида $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_m$, а устойчивых носителей положительного заряда в диапазоне подвижности 1...2 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ значительно меньше. В то же время в диапазон подвижности 1...2 $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ попадают устойчивые комплексы типа $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_m$ и $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_m$, которые образуются в достаточно больших количествах и являются основными легкими положительными аэроионами.

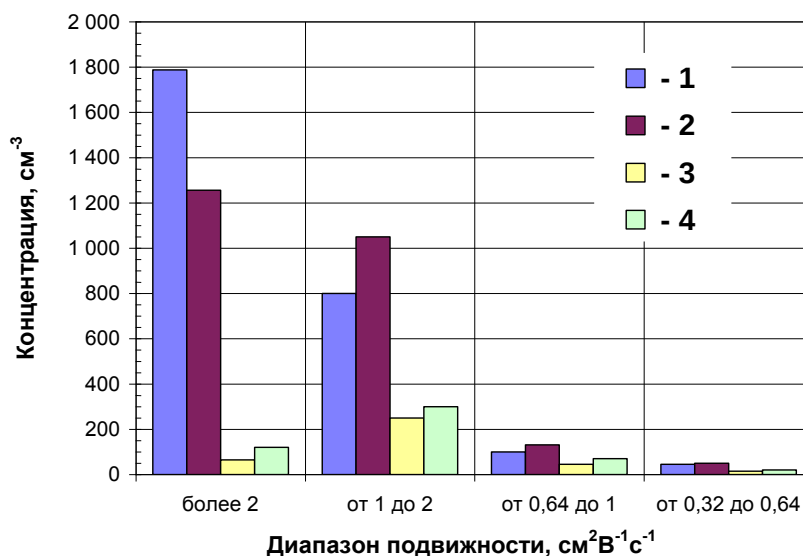


Рисунок 2. Типичные спектральные распределения легких положительных (2, 4) и отрицательных (1, 3) аэроионов в воздушной среде помещений с отделочными материалами на основе калийных солей (1, 2) и в чистом природном воздухе (3, 4) (данные 3 и 4 заимствованы из [40])

Таким образом, эквивалентность параметров аэроионного распределения по подвижности в воздушных средах помещений, облицованных материалами на основе калийных солей, и в чистом атмосферном воздухе доказывает, что химическая природа аэроионов в обеих средах близка. Практически на порядок отличающиеся объемные концентрации аэроионов в воздушных средах помещений и в природном воздухе свидетельствуют о возможности использования новых передовых технологий создания комнат «живого» воздуха для лечебно-профилактических целей.

Распределение аэрозольных частиц по размерам в воздушной среде помещений, облицованных специальными материалами на основе калийных солей

Важными параметрами, определяющими характер воздействия на организм человека вдыхаемых аэрозольных частиц, являются не только их масса, но и размер [41–43]. При высокой дисперсности аэрозоль отличается повышенной химической активностью из-за большой поверхности. Высокодисперсные аэрозольные частицы обладают уникальными физическими и химическими свойствами, так как практически не оседают в воздухе помещений и длительное время находятся во взвешенном состоянии.

Распределение аэрозольных частиц по размерам в воздушной среде помещений, облицованных специальными материалами на основе калийных солей, исследовалось при помощи аэрозольного счетчика марки ПКЗВ-1 с диапазоном размеров исследуемых аэрозольных частиц 0,3...100 мкм и аэрозольного счетчика марки АЗ-6 с диапазоном размеров частиц 0,3...1 мкм.

Известно [44, 45], что в большинстве случаев распределение аэрозольных частиц может быть сведено к суперпозиции нескольких логарифмически нормальных распределений:

$$\frac{\partial N}{\partial D} \frac{D}{D} = \sum_{j=1}^p \frac{N_{0j}}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_j D} \exp \left(-\frac{(\ln D - \ln D_{0j})^2}{2(\ln \sigma_j)^2} \right), \quad (8)$$

где $N(D)$ – число частиц с диаметром D ;

p – число мод в распределении аэрозольных частиц;

N_{0j} – общее число частиц, приходящее на моду с номером j ;

σ_j – стандартное геометрическое отклонение моды с номером j ;

D_{0j} – среднее геометрическое значение диаметра аэрозольных частиц в моде с номером j .

Для достижения поставленной точности моделирования (коэффициент корреляции не менее 0,99) распределение аэрозольных частиц размером более 0,3 мкм следует описывать в виде суперпозиции двух мод логарифмически нормального распределения (Мода-1 и Мода-2). Усредненные значения параметров логарифмически нормальных распределений по модам, полученные в результате измерений в помещениях с соляными отделочными материалами, представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

Представленные результаты показывают, что перспективными облицовочными и декоративными строительными материалами в помещениях «живого» воздуха являются панели и плитки, изготовленные путем прессования, поскольку позволяют генерировать более высокодисперсную фракцию соляных аэрозольных частиц.

Таблица 3. Усредненные результаты аппроксимации распределения аэрозольных частиц по размерам

Объект исследования	Мода-1			Мода-2		
	N_{01}	σ_1	D_{01}	N_{02}	σ_2	D_{02}
Помещения, облицованные блоками из натуральной калийной соли	29 ± 16	$2,45 \pm 0,68$	$0,29 \pm 0,11$	$1,80 \pm 0,20$	$2,20 \pm 0,10$	$2,0 \pm 0,3$
Помещения, облицованные сильвинитовыми панелями и прессованной плиткой	63 ± 29	$1,53 \pm 0,07$	$0,34 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,19$	$2,33 \pm 0,11$	$1,5 \pm 0,2$

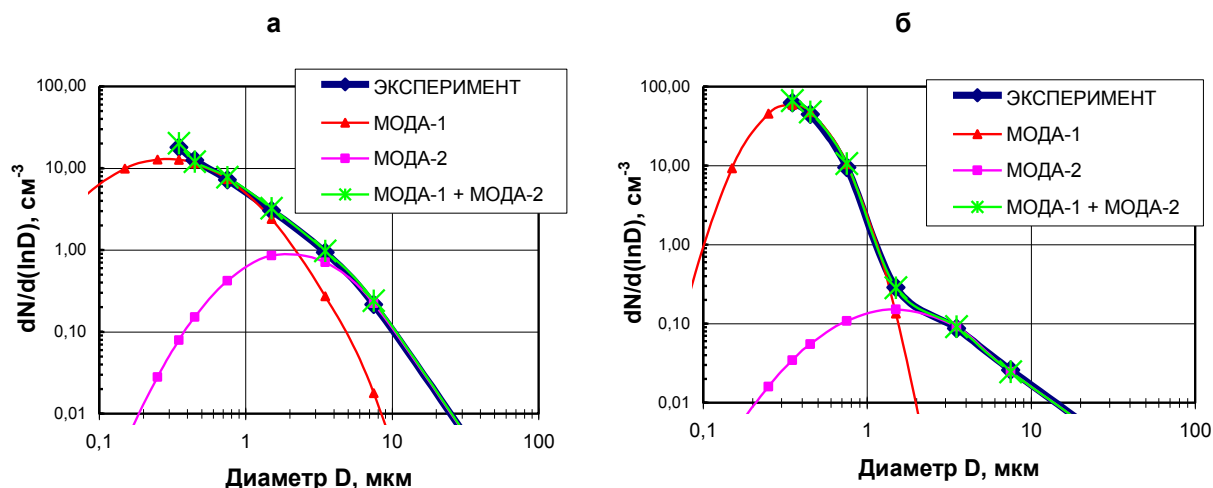


Рисунок 3. Моделирование распределения аэрозольных частиц в комнатах «живого» воздуха: а) помещения, облицованные блоками натуральной калийной соли; б) помещения, облицованные сильвинитовыми панелями и прессованной плиткой

Для подтверждения того, что по своей химической природе генерируемый специальными отделочными материалами высокодисперсный аэрозоль идентичен именно соляным частицам, рассмотрим зависимости распределения частиц по размерам от относительной влажности воздуха. Полученные результаты (рис. 4) показывают, что с увеличением влажности воздуха от 67 до 97 % число аэрозольных частиц средним диаметром порядка 0,35 мкм увеличивается практически на порядок. Последнее подтверждает тот факт, что в воздушной среде помещений, облицованных или декорированных материалами на основе сильвинитовой руды, доминирующее значение имеет соляной аэрозоль [46].

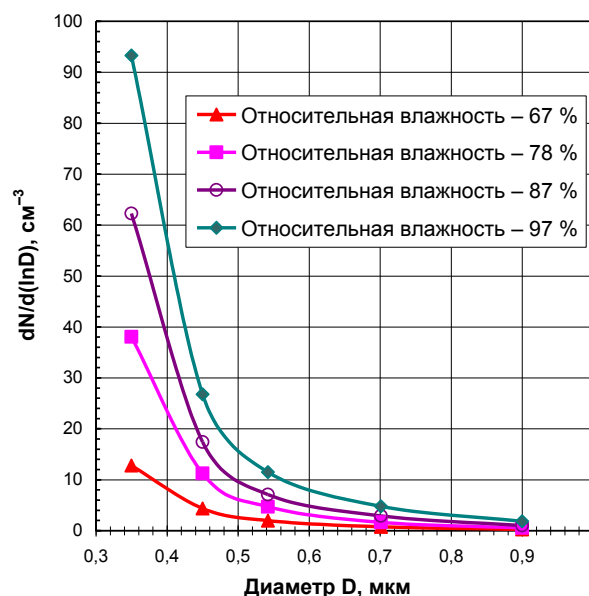


Рисунок 4. Зависимости распределения аэрозольных частиц от влажности

Заклучение

Впервые рассмотрены закономерности влияния специальных строительных материалов на основе калийных солей на аэроионный и аэрозольный режимы помещений. Представленный авторами подход к определению уникальных свойств рассматриваемых специальных строительных отделочных и декоративных материалов позволяет научно обосновать их применение, определить характерные места размещения и варианты использования, а также конкретный состав и способ изготовления таких материалов в зависимости от требуемых параметров аэроионного состава и аэрозольсодержания в воздушной среде с целью формирования качественного «живого» воздуха помещений.

Авторы выражают глубокую признательность и благодарность ООО «Научно-внедренческое управление» (г. Березники, Пермский край) за любезно предоставленные фотоматериалы и длительное сотрудничество, позволившее провести экспериментальные исследования, нашедшие отражение в настоящей работе.

Литература

1. Назаров Ю.П. Строительная наука как фактор обеспечения безопасности среды обитания // Промышленное и гражданское строительство. 2006. №8. С. 8–10.
2. Fransson N., Västfjäll D., Skoog J. In search of the comfortable indoor environment: A comparison of the utility of objective and subjective indicators of indoor comfort // Building and Environment. 2007. Vol. 42. Issue 5. Pp. 1886–1890.
3. Мещеряков А.Ю., Осипов С.Н. Новые технологии управления качеством воздуха на объектах со средой обитания // Информационные технологии и вычислительные системы. 2008. №2. С. 20–26.
4. Krueger A.P. Air Ions and Physiological Function // The Journal of General Physiology. 1962. Vol. 45. Pp. 233–241.
5. Шилкин А.А., Губернский Ю.Д., Миронов А.М. Аэроионный режим в гражданских зданиях. М.: Стройиздат, 1988. 168 с.
6. Черкасова Н.Г. Улучшение качества очистки и оздоровления воздушной среды искусственной ионизацией: дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2002. 286 с.
7. Мещеряков А.Ю., Осипов С.Н., Колерский С.В. Медико-техническое обеспечение контроля аэроионного состояния воздуха на объектах с искусственной средой обитания // Труды ИСА РАН. 2006. Т. 19. С. 182–191.

Черный К.А., Файнбург Г.З. Опыт использования силвинитовых блоков и панелей в комнатах «живого» воздуха и основные параметры качества формируемой воздушной среды

8. Fletcher L.A., Noakes C.J., Sleigh P.A., Beggs C.B., Shepherd S.J. Air ion behavior in ventilated rooms // *Indoor and Built Environment*. 2008. Vol.17 (2). Pp. 173–182.
9. Waring M.S., Siegel J.A. The effect of an ion generator on indoor air quality in a residential room // *Indoor Air*. 2011. Vol. 21. Pp. 267–276.
10. Tan R. The Truth About Air Electricity & Health: A guide on the use of air ionization and other natural approaches for 21st century health issues. Singapore: Trafford Publishing, 2014. 168 p.
11. Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений: СанПиН 2.2.4.1294-03: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы Рос. Федерации.
12. Liu L., Guo J., Sheng L. The effect of wire heating and con-figuration on ozone emission in negative ion generator // *Journal of Electrostatics*. 2000. Vol. 48. Pp. 81–91.
13. Rehbein N., Cooray V. NO_x production in spark and corona discharges // *Journal of Electrostatics*. 2001. Vol. 51–52. Pp. 333–339.
14. Sekimoto K., Takayama M. Influence of needle voltage on the formation of negative core ions using atmospheric pressure corona discharge in air // *International Journal of Mass Spectrometry*. 2007. Vol. 261. Issue 1. Pp. 38–44.
15. Червинская А.В. Галотерапия в профилактике и восстановительном лечении болезней органов дыхания // *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*. 2003. №6. С. 8–15.
16. Chonka J., Simionca Iu., Slavik P. The Development of Speleotherapy in Eastern Europe (Report) // *The XIVth International Symposium of Speleotherapy: Abstracts*: Turda, Romania, 2012, October 4-6. Cluj-Napoca: Casa Cărții de Știință, 2012. Pp. 13–14.
17. Rashleigh R., Smith M.S.S., Roberts J.N. A review of halotherapy for chronic obstructive pulmonary disease // *International Journal of COPD*. 2014. No. 9. Pp. 239–246.
18. Климатическая камера: а. с. 1068126 СССР: А 61 М 16/02. / В.Г. Баранников [и др.]. Оpubл. 23.01.84, Бюл. № 3.
19. Климатическая камера: пат. 2012306 Рос. Федерация / А.Е.Красноштейн [и др.]. № 4913631/14; заявл. 21.02.91; опубл. 15.05.94.
20. Грехова И.А., Кириченко Л.В., Баранников В.Г., Сандакова Е.А., Русанова Е.А. Гигиеническая оценка внутренней среды палаты акушерского стационара, оборудованной соляными сильвинитовыми устройствами для комплексного лечения беременных // *Здоровье семьи – 21 век*. 2011. №4(4). [Электронный ресурс]. Систем. Требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.fh-21.perm.ru/download/2011-4-3.pdf> (дата обращения: 16.02.2015).
21. Торохин М.Д. Спелеотерапия. Киев: Здоров'я, 1987. 126 с.
22. Chonka Y., Sichka M., Buleza B., Sharkan Y., Sakalosh I., Popovich I., Lemko I. Ionic composition of air in the underground department of Ukrainian allergic hospital // *The XIVth International Symposium of Speleotherapy: Abstracts*: Turda, Romania, 2012, October 4-6. Cluj-Napoca: Casa Cărții de Știință, 2012. Pp. 14–15.
23. Chonka Y., Sichka M., Buleza B., Lemko I., Sharkan Y., Sakalosh I., Bachkay S., Popovich I. Aerosol therapeutic environment of Ukrainian allergic speleo hospital and salt aerosol therapy rooms // *The XIVth International Symposium of Speleotherapy: Abstracts*: Turda, Romania, 2012, October 4-6. Cluj-Napoca: Casa Cărții de Știință, 2012. Pp. 16–17.
24. Виноградов А.П. Изотоп 40К и его биологическая роль // *Биохимия*. 1957. № 22. Вып. 1/2. С. 14–20.
25. Моисеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М.: Энергоатомиздат, 1984. 296 с.
26. Леенсон И.А. Радиоактивность внутри нас // *Химия и жизнь*. 2009. №7. С. 36–39.
27. Аглинцев К.К., Кодюков В.М., Лызлов А.Ф., Сивинцев Ю.В. Прикладная дозиметрия. М.: Госатомиздат, 1962. С. 222.
28. Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по химии. Киев: Издательство Академии наук Украинской ССР, 1962. С. 23.
29. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. С. 37–38.
30. Савченко А.В., Свиркунов П.Н., Смирнов В.В. Испарительный перенос ионов примесей из растворов электролитов в воздух // *Проблемы метеорологии*. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 115–125.

Черный К.А., Файнбург Г.З. Опыт использования сильвинитовых блоков и панелей в комнатах «живого» воздуха и основные параметры качества формируемой воздушной среды

31. Смирнов В.В. Электрические факторы чистоты воздуха // Труды института экспериментальной метеорологии. 1983. Вып. 30(104). С. 64–106.
32. Красногорская Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 323 с.
33. Hoppel W.A., Frick G.M. The nonequilibrium character of the aerosol charge distribution produced by neutralizers // Aerosol Science and Technology. 1990. Vol. 12. Issue 3. Pp. 471–496.
34. Tammet H., Kulmala M. Simulation tool for atmospheric nucleation bursts // Journal of Aerosol Science. 2005. Vol. 36. Issue 2. Pp. 173–196.
35. Борзилов В.А. Диффузионное заряджение облачных капель: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Обнинск, 1973. 29 с.
36. Савченко А.В. Ионная зарядка при конденсации и испарении водного аэрозоля: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Обнинск, 1981. 22 с.
37. Савченко А.В. Влияние физико-химических свойств поверхности на ионную зарядку капель // Труды Института экспериментальной метеорологии. 1980. Вып. 24(89). С. 38–67.
38. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М.: Мир, 1965. 424 с.
39. Беляшова М.А. Влияние влажности воздуха на концентрацию мелкодисперсных аэрозолей // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 1979. Вып. 418. С. 123–131.
40. Hörrak U., Salm J., Tammet H. Statistical characterization of air ion mobility spectra at Tahkuse Observatory: Classification of air ions // Journal of Geophysical Research, Issues D: Atmospheres. 2000. Issue 105. Pp. 9291–9302.
41. Osunsanya T., Prescott G., Seaton A. Acute respiratory effects of particles: mass or number? // Occupational and Environmental Medicine. 2001. Vol. 58. Issue 3. Pp. 154–159.
42. Buseck P.-R., Adachi K. Nanoparticles in the Atmosphere // ELEMENTS: Nanogeoscience. 2008. Vol. 4. No. 6. Pp. 389–394.
43. Голохваст К.С., Паничев А.М., Мишаков И.В., Ведягин А.А., Мельгунов М.С., Данилова И.Г., Козлова И.Г., Габуда С.П., Мороз Н.К., Мельгунов М.С., Киселев Н.Н., Чайка В.В., Гульков А.Н. Экотоксикология нано- и микрочастиц минералов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1–5. С. 1256–1259.
44. Hussein T., Glytsos T., Ondráček J., Dohányosová P., Ždímal P., Hämeri K., Lazaridis M., Smolík J., Kulmala M. Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house // Atmospheric Environment. 2006. Vol. 40. Issue 23. Pp. 4285–4307.
45. Salma I., Borsos T., Weidinger T., Aalto P., Hussein T., Dal Maso M., Kulmala M. Production, growth and properties of ultrafine atmospheric aerosol particles in an urban environment // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. Vol. 11. No. 3. Pp. 1339–1353.
46. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферная аэрозоль. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 224 с.

*Константин Анатольевич Черный, г. Пермь, Россия
Тел. раб.: +7(342)2198049; эл. почта: chernyy_k@mail.ru*

*Григорий Захарович Файнбург, г. Пермь, Россия
Тел. раб.: +7(342)218042; эл. почта: faynburg@mail.ru*

© Черный К.А., Файнбург Г.З., 2015

doi: 10.5862/MCE.54.3

Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

*К.т.н., доцент С.А. Кошкарев;**д.т.н., заведующий кафедрой В.Н. Азаров,**Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

Аннотация. В статье рассмотрен перспективный способ сокращения выбросов пыли в атмосферу в производстве керамзита высокоэффективным аппаратом мокрой очистки с комбинированной схемой пылеулавливания в обеспыливающих системах аспирации.

Приведена краткая характеристика технологических процессов, аппаратов и связанных с ними основных источников выделений и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при производстве керамзита. В работе представлены данные промышленного обследования репрезентативной выборки систем аспирации и применяемых в них пылеулавливающих устройств ряда предприятий, производящих гранулированный керамзит. Приведены основные результаты дисперсионного анализа керамзитовой пыли, выделяющейся в печах обжига. Обоснована целесообразность разработки новых более эффективных конструкций пылеуловителей для обеспыливающих систем аспирации.

Проведены разработка и испытания пылеуловителя мокрой очистки, обеспечивающего значительное снижение коэффициента проскока улавливаемой пыли керамзита в атмосферу. Выполнена экспериментальная оценка степени проскока частиц пыли в предложенном пылеуловителе. Получена зависимость коэффициента проскока частиц пыли в пылеуловителе регрессионного вида в зависимости от некоторых параметров.

Ключевые слова: пылеулавливание; сепарации; пыль; керамзит; дисперсионный анализ; выбросы; атмосфера; системы обеспыливания; пылеуловитель мокрой очистки

Введение

Строительство энерго- и ресурсоэффективных безопасных зданий и сооружений, в том числе в рамках национального проекта «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» [1], предполагает использование тепло- и энергосберегающих строительных материалов. Одними из таких эффективных строительных материалов являются теплоизоляционные и конструкционные легкие бетоны с использованием керамзита, которые широко применяются в жилищном строительстве, в том числе экономкласса. Керамзит, конструкционные легкие бетоны, керамзитобетоны были и остаются многофункциональными, эффективными и в то же время относительно недорогими материалами, что позволяет применять их при строительстве различных типов зданий и сооружений. В зависимости от свойств исходного сырья и технологических приемов могут быть получены керамзитовый гравий, щебень или песок с различными показателями плотности и прочности, что обуславливает широкий спектр применения – от несущих железобетонных конструкций до облегченных стеновых панелей с низкой теплопроводностью [2].

Важнейшим фактором успешного развития индустриального крупнопанельного домостроения в нашей стране, обеспечивающего выполнение государственных постановлений в области строительства [1], стало развитие производства керамзита и эффективных теплоизоляционных, конструкционно-теплоизоляционных и конструкционных легких бетонов [2].

Производство искусственных пористых заполнителей (керамзитового гравия и песка) для легких бетонов является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей строительной индустрии. Из основного объема производства керамзита в стране наибольший приходится на Центральный, Приволжский и Южный федеральные округа, где сосредоточены основные запасы сырья [3]. Значительная часть промышленного производства керамзита в ЮФО расположена в Волгограде и Волгоградской области.

Особенность производства пористых заполнителей (в частности, керамзитового гравия, песка) состоит в последовательном осуществлении ряда сложных в экологическом отношении операций переработки сыпучих материалов, включая их термическую обработку, перегрузку сырьевых сыпучих компонентов и готовой продукции – керамзитового гравия и песка. В ходе данных технологических операций выделяется значительное количество вредных ингредиентов, Кошкарев С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

полидисперсной пыли. Керамзитовая пыль удаляется от источников выделений системами местной вытяжной вентиляции и составляет наибольшую массу в выбросах в атмосферу, которые производят предприятия данной отрасли. Для снижения негативного техногенного влияния на атмосферный воздух и окружающую среду такие предприятия оснащаются системами местной вытяжной вентиляции с пылеулавливающим оборудованием. В связи с возрастающим объемом выпускаемой предприятиями стройиндустрии продукции для повышения экологической безопасности предприятий по производству керамзита и, следовательно, уменьшения возрастающего негативного техногенного воздействия данной отрасли на атмосферный воздух требуется совершенствование и реконструкция существующих пылеулавливающих установок. Следует отметить, что снижение выбросов в атмосферу позитивно влияет на экологическую ситуацию, экономику региона, способствует устойчивому развитию общества. [4].

Обзор литературы

Анализ многочисленных литературных данных показывает, что в настоящее время проводится разработка различного рода новых пылеулавливающих устройств. Существующие проблемы, возникающие при эксплуатации аппаратов по очистке пылегазовых потоков от пыли, в том числе в стройиндустрии, показывают актуальность проводимых исследований и разработок по их совершенствованию. При этом становятся все более востребованными разработка и внедрение новых, более совершенных устройств по очистке газов от пыли. Это особенно актуально, если учесть, что предприятия отрасли расположены на высокоурбанизированных территориях, в непосредственной близости от жилой застройки.

Основные стадии технологического процесса производства керамзита: добыча сырья в карьере; транспортирование сырья в глинозапасник; переработка сырья, получение сырцовых гранул и их термическая обработка (сушка, обжиг, последующее охлаждение готового продукта); сортировка, частичное дробление полученного продукта; складирование и отгрузка материала [5–7].

При производстве строительного керамзита основной стадией является обжиг глиняных гранул в оптимальном режиме. Для эффективного вспучивания глиняной гранулы необходимо, чтобы переход глины в пиропластическое состояние по времени совпал с периодом активного газовыделения. В обычных условиях при обжиге пиропластическое размягчение глин происходит при более высоких температурах (выше 11000 °С), чем газовыделение (температура диссоциации карбоната магния – до 6000 °С, карбоната кальция – до 9500 °С, дегидратации глинистых минералов – до 8000 °С, реакции восстановления оксидов железа – до 9000 °С). Поэтому при обжиге сырцовых гранул необходим быстрый подъем температуры [5–7].

В ходе этих операций образуется значительное количество вредных выделений (в первую очередь, полидисперсной пыли), локализация и отвод которых от источников выделений осуществляется системами местной вытяжной вентиляции, оснащенными установками пылеулавливания. В большинстве данных установок пылеулавливания наибольшее распространение получил инерционно-гравитационный механизм отделения пыли от очищаемого газопылевого потока. Проведенный анализ показал, что в производстве керамзитового гравия для обеспыливания применяются установки, имеющие две, три и больше ступеней очистки. Причем в качестве первой ступени, как правило, устанавливаются циклоны типа ЦН, СКЦН, ЛИОТ, в качестве последующих ступеней – рукавные фильтры и электрофильтры [8]. На практике вытяжные вентиляционные системы также оборудованы многоступенчатыми системами пылеочистки [8–10]. В таких многоступенчатых системах применяются аппараты сухой (преимущественно инерционной) и мокрой очистки. Однако осуществляемые в них процессы из-за многоступенчатости очистных циклов, последовательной установки нескольких аппаратов и, следовательно, значительного аэродинамического сопротивления, отличаются высокой энергоемкостью. К тому же такие установки являются достаточно дорогими и сложными в эксплуатации [10, 11].

В работе [12] для обоснования выбора наиболее эффективного принципа действия при последующей разработке нового типа пылеуловителя приведены данные анализа и практической оценки эффективности центробежно-инерционных пылеуловителей с жалюзийным отводом воздуха, различающихся по принципам действия и конструктивному исполнению, при очистке воздушных промышленных потоков. Изложенная методика расчетов эффективности новых и усовершенствованных пылеулавливающих систем (центробежно-инерционных с жалюзийным отводом воздуха, мокрых и магнитных) на основе результатов экспериментальных исследований

позволила разработать, создать и успешно ввести в промышленную эксплуатацию три конструкции центробежно-инерционных пылеуловителей с жалюзийным отводом воздуха [12].

Другим перспективным направлением является разработка многоступенчатых очистных систем с последовательной установкой в них центробежно-инерционных пылеуловителей новых конструкций, имеющих высокую эффективность пылеулавливания даже при пониженном аэродинамическом сопротивлении. В работе [13] указаны пути снижения пыли в атмосферу при использовании устройств центробежно-инерционного типа (аппаратов на встречно закрученных потоках (ВЗП), циклонов) в системах обеспыливания, применяющихся в производстве строительных материалов. В статье [14] представлено описание схем систем пылеулавливания с последовательной установкой трех аппаратов ВЗП для очистки пылегазового потока с высокими значениями концентраций пыли. Разработанная и рассмотренная в работе установка с частичной рециркуляцией способствует лучшему отделению частиц пыли, особенно мелкодисперсных, не только в пылеуловителе первой ступени, но и в аппарате второй ступени очистки [14].

Кроме разработки новых конструкций центробежно-инерционных пылеуловителей и многоступенчатых очистных систем с последовательной их установкой (ВЗП, циклонов и т. п.), ведутся работы по совершенствованию и внедрению в промышленность других типов пылеулавливающих устройств, в том числе и рукавных фильтров. Так, в работе [15] приведены основные результаты реконструкции аспирационной установки и внедрения нового пылеулавливающего оборудования – рукавных фильтров на предприятии по переработке щебня. Это, в свою очередь, позволило достичь нормативных значений выбросов и обеспечить повышение экологической безопасности производства. Другой тип пылеуловителей исследован в статье [16]. В НИИ «Охраны труда» на основе результатов исследований разработаны два варианта комбинированных мокрых пылеуловителей, в которых в качестве одной из ступеней очистки воздуха использованы насадки из зернистого материала (шаровые насадки). Установлено, что эффективность очистки исследованных устройств на промышленной пыли со средним по массе размером частиц 20 мкм достигает 99,8 % при приемлемой величине гидравлического сопротивления – 2500 Па [16].

Появление новых конструкций пылеулавливающих устройств требует совершенствования методик их расчетов. Так, например, в работе [17] проведено экспериментальное обоснование метода определения некоторых постоянных параметров, присущих инерционным пылеуловителям, для формирования банка данных универсального метода расчета (УМР) инерционных пылеуловителей с учетом параметров нормального логарифмического распределения частиц пыли по размерам на входе аппаратов. Показано хорошее согласование данных, полученных этим методом, по сравнению с уже известными существующими данными более ранних работ.

Работы [18–27] посвящены также фундаментальному направлению исследований, связанному с изучением и моделированием течений в инерционных пылеуловителях. В статье [18] проведено численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне и представлены результаты численного эксперимента. В статье [19] предложена методика определения эффективности улавливания искр в противоточном циклоне при использовании модели турбулентной диффузии, измерения гидравлической крупности частиц, определяемой экспериментальными измерениями скорости седиментации частиц с использованием компьютерного моделирования траекторий, и представлены результаты исследований. В работе приведены результаты изучения перепада давления и расхода в области стандартных моделей газа циклонов с использованием специальных модельных представлений.

В работе [20] отмечено, что на эффективность очистки воздуха оказывают существенное влияние многочисленные факторы. Это имеет большое значение при выборе системы очистки воздуха во многих отраслях промышленности, обеспечивающих эффективную организацию воздухообмена. Особенно важно уделять внимание производствам, в технологическом процессе которых выделяются, обращаются пыли или производятся горючие и взрывоопасные вещества в пылевидном состоянии и где использовать воду для предотвращения возгорания и тушения пожаров не представляется возможным. В работе исследован циклон с использованием обратного потока воздуха для предварительной очистки газа от искр расплавленного металла, попадание которых на фильтрующие элементы недопустимо для искрогасителей. Данное устройство может стать одним из эффективных способов предотвращения возникновения пожаров и взрывов. Тем самым повышается пожаробезопасность предприятия. Это особенно актуально, если циклон с искрогасителем использовать по каким-то причинам неприемлемо. В статье получены результаты

по эффективности улавливания данного циклона. При этом экспериментально доказана эффективность использования циклона при улавливании искр при сварке металлов.

В статье [21] отмечено, что в последнее время противоточные циклоны продолжают получать все большее распространение и широко применяются в различных отраслях промышленности. В данной статье рассмотрено влияние конической насадки на выхлопной трубе противоточного циклона классической конструкции на газодинамическую картину в циклоне. Результаты сопоставлены с расчетом для случая установки конического сопла на выхлопной трубе. Расчеты проводились с использованием пакета программного обеспечения CosmosFloWorks (численного моделирования динамики газового потока CDF), который использует метод конечных объемов. Движение жидкости моделируется при использовании уравнений Навье – Стокса и осредненных значений числа Рейнольдса. Для обеспечения замкнутости системы в уравнениях переноса и потери (диссипации) кинетической энергии используется $k-\epsilon$ модель турбулентности. Приведены также экспериментально полученные данные по эффективности пылеулавливания исследованного в работе циклона, имеющие приемлемую сходимость с результатами расчета по модели.

В статье [22] приведены результаты исследований влияния формы циклона и пылесборника на пылегазовый поток в аппарате инерционного типа (циклоне) на эффективность работы и производительность устройств. Также приведены результаты экспериментального исследования и численного моделирования изменения и падения аэродинамического давления – одного из важных параметров для характеристики циклонных сепараторов. Применено численное моделирование гидродинамики (CFD) с использованием напряжения Рейнольдса (RSM). Концепция генерации энтропии, используемая в данной работе, позволила установить области значительного влияния трения в завихрениях в нижней части конической области и на поверхности раздела внешнего и основного потоков газа в циклоне.

В статье [23] рассматриваются модели, разработанные для описания поля потока обратного течения внутри циклонов. В первой части рассмотрены традиционные математические модели и приведено их обоснование в общей форме, в том числе выражения для определения тангенциальной скорости и перепада давления. Рассмотрены также зависимости для непосредственного прогнозирования эффективности улавливания. Отмечено, что, хотя проанализированные методы имели значительный успех, необходимо развивать модельные представления для циклонов. В работе выдвинута гипотеза и сформулировано понятие о так называемой «естественной» длине циклона. Выполненные исследования привели к нестабильному режиму работы и образованию вторичных потоков в циклоне. Применение численных методов для описания гидродинамики (CFD) в этом случае весьма затруднено ввиду разнообразия самой природы и структуры течения потоков. В статье проведен обзор работ, посвященных моделированию с использованием численных методов для описания гидродинамики (CFD) одно- и двухфазных потоков, стационарных и нестационарных течений в циклонах, направленных на решение поставленных задач совершенствования пылеуловителей. Отмечены существующие ограничения в применении данных методов и выделены самые современные и перспективные направления в этой области.

В работе [24] представлены результаты численного исследования течения пылегазового потока в одном из распространенных типов циклона. Использование в исследовании модели напряжений Рейнольдса позволило оценить параметры турбулентности течения. Полученные в результате расчетов с использованием стохастической модели Лагранжа поля давления и пылегазового потока сравнивались с экспериментальными данными. Эффективность сепарации и траектории частиц, полученные расчетом при моделировании, имели приемлемую сходимость с результатами экспериментальных данных. Были выявлены некоторые факторы, влияющие на производительность циклона. Отмечено образование дипольной структуры потока в осевом сечении вблизи оси циклона. В исследовании установлено, что частицы, входящие в циклон в различных положениях, имеют различную эффективность улавливания в циклоне. Частицы размером, превышающим величину критического диаметра, задерживаются (оседают) на стенке конуса циклона, что является, по мнению авторов, одной из основных причин адгезии-осаждения на внутренней конической поверхности таких циклонов, используемых, например, в цементной промышленности.

Статья [25] посвящена исследованию индикатора тангенциальной скорости, или параметра крутки потока n , имеющего существенное влияние на поле течения и перепада давления в свободной вихревой зоне внутри циклонного сепаратора. В этой статье приведены значения данного индикатора-параметра n , получаемого расчетом распределения касательной скорости

Кошкарев С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

внутри циклона методом численного моделирования с построением графика в вихревой зоне и использованием метода наименьших квадратов. Результаты эксперимента показали, что изменение скоростей потока во входном патрубке и радиальном направлении в вихревой зоне циклона не оказывают существенного влияния на значения n . В то же самое время увеличение диаметра циклона, диаметра трубы патрубка выхода очищенного газа и уменьшение отрезка выходной трубы внутри аппарата приводят к увеличению значений n .

В работе [26] проведено компьютерное моделирование с математическим описанием движения частиц пыли в закрученных потоках с использованием специальных программных средств. Представленные результаты исследований использовались для организации закрученного пылегазового потока в системах аспирации. Полученные данные были применены, в том числе, для расчета аэродинамических потерь давления в воздуховодах систем аспирации и пылеуловителях ВЗП и предполагаемой эффективности пылеулавливания в ВЗП с учетом фракционного состава частиц пыли.

Теоретическому обоснованию, разработке новых интенсивных центробежно-инерционных процессов очистки пылегазовых потоков и их аппаратного оформления посвящен целый ряд исследований, например, [27–28]. Целью диссертационной работы [27] является создание метода расчета технической эффективности пылеудаления в циклоне. Метод расчета позволяет учитывать влияние геометрических параметров циклона на его эффективность, влияние турбулентности потока газа на процесс удаления мелких частиц, обеспечивать учет характеристик пыли, в том числе их форму и плотность частицы. В работе предложена математическая модель осаждения частиц в циклоне, учитывающая влияние поля тангенциальной скорости и турбулентности на техническую эффективность циклона. Были обобщены численные решения дифференциальных уравнений, описывающих осаждение частиц пыли, и разработаны номограммы для расчета осаждения. На основании проведенного анализа трехмерного поля скорости внутри противоточного циклона было предложено рассчитывать такие устройства с использованием параметра гравитационной гидравлической крупности, как одной из основных характеристик улавливаемых частиц пыли. Данный подход может стать одним из перспективных методов для совершенствования конструкций и параметров циклонов применительно к конкретным условиям производства. При этом отмечено, что имеется хорошее совпадение экспериментальных и теоретических результатов исследования способов интенсификации пылеулавливания в прямоточных циклонах и инерционно-центробежных пылеуловителях на основе численных методов и компьютерного 3D-моделирования механики жидкости и газа.

Обычно влияние турбулентности вращающегося потока на движение частиц не рассматривается в существующих моделях. В работе [28] приведены результаты исследования оседания частиц в циклоне с использованием модели турбулентной диффузии. Для оценки закономерности оседания частиц при разработке и оптимизации циклонного устройства была использована математическая модель, которая учитывала воздействие турбулентности вращающегося потока на движение частиц.

В работе [29] выполнены фундаментальные исследования гидродинамики процессов с неоднородными структурами закрученных гетерогенных потоков в вихревых аппаратах. Предложены модели описания движения гетерогенных закрученных потоков (газ – жидкость – твердое тело) процессов сепарации пыли и методы расчета новых конструкций прямоточных центробежно-инерционных пылеуловителей и прямоточных циклонов.

Также продолжает оставаться популярным и востребованным направление по разработке новых конструкций центробежно-инерционных устройств мокрой очистки газов (циклонов, скрубберов) с применением методов численного моделирования описания и расчета пылеулавливания, например, [30, 31]. Так, в статье [30] представлены результаты исследования численного решения уравнений Эйлера, описывающих гидродинамику течения потоков, в сочетании с дискретной фазовой моделью (DPM) для получения характеристик трехфазного потока (газ – жидкость – твердое тело) и оценки эффективности очистки очищаемого потока газа от пыли в скруббере мокрой очистки. При этом предлагаемый метод расчета, по мнению авторов, может обеспечить фундаментальную основу для оптимизации моделирования улавливания пыли и сероочистки в исследованной конструкции скруббера мокрой очистки.

В работе [31] была изучена сепарация аэрозоля из очищаемого потока устройством, в котором объединены прямоточный циклон и скруббер. Результаты проведенного исследования показали, что вихревой скруббер предложенной конструкции является перспективным устройством, которое при невысоких затратах на монтаж требует относительно незначительных

расходов на обслуживание и эксплуатацию. Авторами выполнен теоретический анализ разработанного вихревого циклона-скруббера. Экспериментально получена зависимость эффективности улавливания частиц при эксплуатации в проектом режиме с использованием теоретически определенного комплекса параметров. Такой подход, по мнению авторов, обеспечивает использование полученных принципов для оптимального проектирования и эффективной эксплуатации устройства. В результате исследования предложены пути создания возможных модификаций вихревых циклонов-скрубберов на основе использования полученного теоретически комплекса параметров.

В статье [32] были определены и представлены характеристики, функциональные зависимости эффективности улавливания частиц из жидкостей с высоким значением коэффициента вязкости и падения давления в гидроциклоне предложенной конструкции. Результаты исследования имеют высокую степень достоверности и могут служить в качестве ориентира для моделирования устройств подобного типа. Было выполнено численное моделирование (CFD) устройства, позволившее на основании описания схем движения потоков и падения давления в гидроциклоне определить интенсивности закрученного потока как функции вязкости жидкости. Модель, приведенная в работе, может быть ценным инструментом при оценке потенциала эффективности технологии очистки, разделения и улавливания частиц в гидроциклонах новых модификаций.

Гидроциклоны широко применяются в качестве технологического и природоохранного оборудования, например, в горнодобывающей промышленности. Можно отметить применение данных устройств для предварительного обезвоживания, концентрирования и классификации шламов. Так, например, авторами работы [33] был разработан и исследован гидроциклон новой конструкции. В этом устройстве конусная секция обычного гидроциклона была заменена конической фильтрующей стенкой. Данному устройству было дано название фильтрующего гидроциклона. В процессе работы такого гидроциклона, кроме нижнего и переливного (верхнего) отводов потоков продукта, образуется и другой поток жидкости – фильтрата. В результате фильтрации потока шлама через коническую пористую стенку устройства и выделяется фильтрат. В данной работе исследовался гидроциклон предложенной конструкции с применением численного моделирования (CFD) и экспериментальных измерений. Было изучено влияние на крутку потока диаметра фильтрующего гидроциклона. Результаты показали, что производительность процесса разделения была значительно улучшена с применением гидроциклона новой конструкции.

В зависимости от функций назначения сепаратора (как классификатора или концентратора) были получены также наиболее приемлемые значения диаметра гидроциклона. Для мокрой очистки газов от частиц пыли мелких фракций применяются и другие устройства, например, адсорбционного типа с использованием жидких реагентов, растворов и воды в качестве рабочих жидкостей. Целью исследования [34] являлась оценка эффективности сепарации частиц летучей золы из пылегазового потока в тарельчатой колонне (типа абсорбера). В устройстве на тарелке-лотке были установлены неподвижные клапаны, служащие для образования рабочего режима улавливания в слое абсорбента – воды. Проведенный эксперимент показал приемлемую эффективность улавливания мелкодисперсных частиц летучей золы из пылегазового потока в исследованном устройстве адсорбционного типа – колонне.

Таким образом, проведенный обзор научно-технической литературы показал, что дальнейшее изучение и интенсификация процесса пылеулавливания, совершенствование и разработка новых конструкций центробежно-инерционных устройств, в том числе скрубберов, пылеуловителей мокрой очистки, ВЗП и других пылеуловителей остаются актуальными. При этом осуществляется внедрение в промышленность новых пылеуловителей и систем обеспыливания выбросов. Результаты теоретических исследований, проводимых в том числе с применением компьютерного моделирования, большей частью направлены на описание фундаментальной картины явления или на решение узкой прикладной задачи. Известно, что получить решение уравнений, описывающих даже однофазный поток газа в трехмерных пространственных координатах, например, системы уравнений Навье – Стокса, в общем случае в виде квадратур не представляется возможным. Как показал проведенный обзор, для решения данной задачи в последнее время все чаще используются методы численного и компьютерного 3D-моделирования. Развиваемые в работах модельные представления применяются для описания улавливания пыли в конкретных устройствах при определенных технических условиях, и, как показывает практика, они не универсальны. Известные весьма существенные проблемы моделирования пылеулавливания – трудности масштабирования исследованных экспериментальных пылеулавливающих установок – также затрудняют использование результатов чисто Кошкарев С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

теоретических и лабораторных исследований. Внедрение в промышленность новых, более совершенных технологий и пылеулавливающего оборудования связано с изменением технологического процесса и со значительными финансовыми затратами. Это, как правило, является существенной проблемой и трудно реализуемо в условиях уже существующего производства. По этой причине внедрение новых пылеуловителей в действующее производство связано с необходимостью учета особенностей технологического процесса. Это определяет подход к разработке пылеулавливающих устройств на основе экспериментальных исследований при специфических методах осуществления масштабного перехода от исследованных экспериментальных установок к промышленным устройствам.

Постановка задачи

Одними из основных источников выделения пыли при производстве керамзита являются печи обжига керамзита, сушильные камеры и посты загрузки транспортных средств. В процессе обжига керамзитового гравия образуются продукты сгорания природного газа и керамзитовая пыль. Проведенные исследования ряда источников выбросов в атмосферу на предприятиях по производству керамзита показывают, что наиболее существенный вклад в загрязнение воздушного бассейна городских и промышленных территорий вносят именно эти вещества. Они содержат пыль, а также значительные объемы продуктов сгорания природного газа.

Эффективная сепарация пыли высокой степени дисперсности и достижение незначительного проскока частиц пыли ε очищаемого пылегазового потока в многоступенчатых системах обеспыливания вентиляционно-технологических выбросов являются существенной проблемой [10, 11, 35]. Результаты исследования предприятий отрасли и печей обжига, оборудованных системами аспирации, показали, что на постах погрузки керамзита в значительном количестве выделяется керамзитовая пыль. При удельном пылевыведении $C_p = 0,5 \dots 0,8 \text{ кг/м}^3$ формируется пылегазовый поток в системах аспирации с величинами концентраций пыли до $10,3 \text{ г/м}^3$ на начальных участках. Максимально-разовые значения массового расхода пыли $M_{\text{мр}}$ на соответствующих начальных участках систем аспирации составляют от 7,0 до 11,0 г/с. Запыленность отходящих газов после холодильных барабанов печей обжига керамзитового гравия достигает значений 15 г/м^3 , а аспирационного воздуха, отсасываемого из транспортирующих механизмов, шнековых дробилок и гравия сортировок, – от 10 до 15 г/м^3 [8, 10]. При этом максимально-разовые значения пыли керамзита на некоторых участках могут достигать величины $M_{\text{мр}} = 30,0 \dots 45,0 \text{ г/с}$ [8, 35].

Для достижения высокой эффективности обеспыливающих систем целесообразно проводить дисперсионный анализ пыли, поступающей с пылегазовым потоком на очистку в пылеулавливающее оборудование, например, с использованием установки [36]. В рамках промышленного обследования был проведен отбор проб пыли керамзита в системах аспирации печей обжига керамзита, устройствах обеспыливания вентиляционно-технологических выбросов. Выполненный по результатам данного исследования анализ показал, что мелкодисперсные фракции с размером частиц $\delta_c = 10 \text{ мкм}$ и менее составляют около 90 % от общей массы пыли керамзита. Значение среднегеометрического диаметра частиц пыли керамзита δ_{50} составляет около 3,5 мкм. Для улавливания проскакивающих частиц мелких фракций пыли керамзита ($\delta_c = 1 \dots 10 \text{ мкм}$) через аппараты инерционного типа первой ступени очистки целесообразно устанавливать в последующих ступенях обеспыливания пылеулавливающие устройства с различными механизмами сепарации пыли (например, фильтры или пылеуловители «мокрой» очистки).

Кроме разработки новых конструкций центробежно-инерционных пылеуловителей и многоступенчатых очистных систем с последовательной их установкой (ВЗП, циклонов и т. п.), известны работы по совершенствованию и внедрению в промышленность и стройиндустрию новых multifunctional газопылеулавливающих устройств [35, 37]. В работе [38] была выполнена теоретическая и экспериментальная оценка характеристик модификации предложенного аппарата с керамической насыпной насадкой при очистке выбросов от паров нефтепродуктов в зависимости от ряда параметров очищаемого газовойздушной смеси (скорости движения паровойздушной смеси, высоты слоя жидкости). Проведенные исследования предложенного аппарата показали его высокую эффективность в улавливании ингридиентов из очищаемого газовойздушной смеси при надежной стабильной работе [38]. Следует отметить, что выполненный комплекс исследований предложенного multifunctional устройства [35, 36, 38] показал, что модификацию устройства можно использовать в качестве пылеуловителя для очистки газов от пыли [36, 37, 39].

Кошкарев С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

При высоких начальных концентрациях пыли в пылегазовых потоках и с учетом проблем, характерных для многоступенчатых систем очистки, с целью надежного улавливания мелких фракций керамзита, других видов пыли, твердых веществ выбросов вентиляционно-технологических и аспирационных систем строительной промышленности становится актуальной разработка новых пылеуловителей. Применение аппаратов мокрой очистки представляется одним из перспективных направлений в пылеулавливании. В разработанной конструкции пылеуловителя практически реализована двухступенчатая система очистки, сочетающая механизмы инерционной и гравитационной сепарации с осаждением, захватом частиц пыли поверхностью, барботированным, пеноподобным слоем или объемом воды рабочей жидкости. Это становится тем более важным для снижения затрат на электроэнергию при сокращения производственных площадей, занимаемых данным оборудованием. Использование предварительно получаемых данных о размерах частиц пыли в результате исследований дисперсионного анализа и экспериментального определения эффективности улавливания пыли такими пылеуловителями должно быть основой конструкторских разработок.

Описание исследования и результаты

С целью решения сложной задачи эффективного улавливания (доулавливания) частиц мелких фракций пыли, проскакивающих через аппараты первой ступени очистки систем обеспыливания, в Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете (ВолгГАСУ) разработано устройство, изображенное на рисунке 1. Данное устройство предназначено для сепарации пыли из очищаемого пылегазового потока выбросов печей обжига керамзита с обеспечением незначительной степени проскока частиц пыли [35, 39]. Для конструктивного упрощения и снижения капитальных и эксплуатационных затрат предлагается использовать устройство, в котором реализуются несколько физических механизмов сепарации пыли [37].

В устройстве с комбинированной схемой сепарации пыли из пылегазового потока осуществляется улавливание пыли инерционно-гравитационным способом с последовательным улавливанием ее остаточных концентраций в барботированном слое воды. При этом фактически в двухступенчатом пылеуловителе для увеличения суммарной эффективности аппарата в качестве второй ступени очистки предусмотрена установка контактных камер, диаметр которых существенно меньше, чем диаметр собственно аппарата, верхняя часть которого представляет модификацию прямооточного циклона (рис. 1) [37].

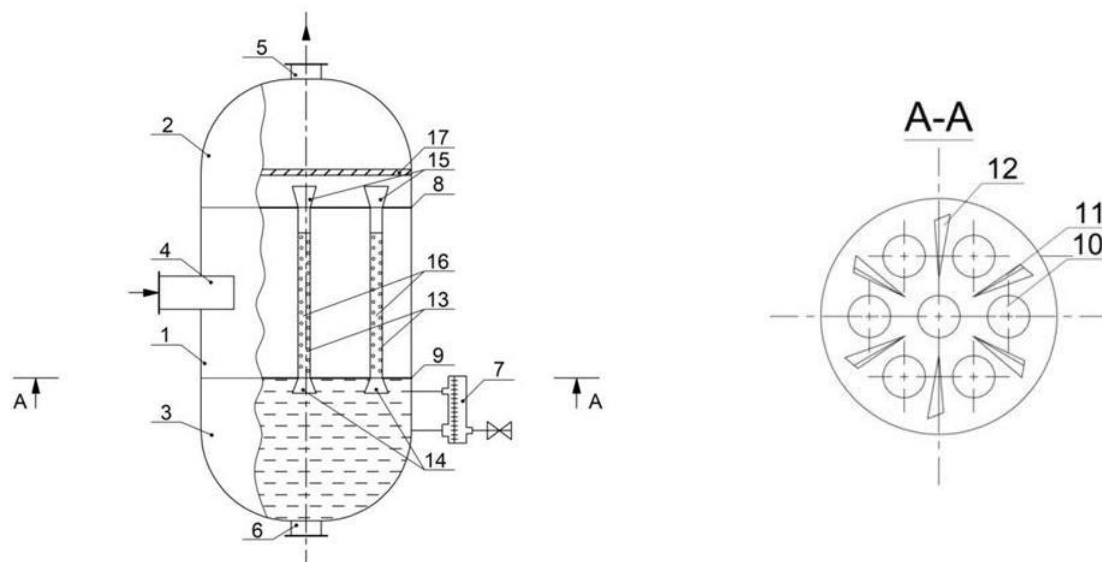


Рисунок. 1. Схема пылеочистного устройства с комбинированной схемой сепарации:
 1 – корпус; 2 – сепарационный блок; 3 – поддон с жидким поглотителем; 4 – входной патрубок потока очищаемого газа в технологический блок; 5 – патрубок выхода очищенного воздуха; 6 – слив пылесодержащего шлама отработанной жидкости; 7 – регулятор уровня жидкости в поддоне; 8 и 9 – горизонтальные перегородки; 10 – отверстия в перегородке для подсоединения контактных камер; 11 – закручивающий элемент в нижней перегородке; 12 – щелевая прорезь; 13 – контактные камеры; 14 – конфузторы; 15 – диффузоры; 16 – насыпная керамзитовая загрузка; 17 – пластинчатый сепаратор

Кошкарев С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

Достижимые при этом суммарные коэффициенты эффективности улавливания пыли способны в значительной степени повысить экологическую безопасность производства. Такие устройства предлагается использовать в системах аспирации и пневмотранспорта на комбинатах строительных материалов (ЖБИ), заводах по производству цемента, кирпича и асфальтобетона, установках по производству растворобетонных смесей и аналогичных производствах.

Устройство работает следующим образом. Подлежащий очистке пылевоздушный поток через тангенциальный входной патрубок поступает в технологический блок устройства в закрученном режиме, равномерно распределяется в межкамерном пространстве и через щелевые прорези в нижней горизонтальной перегородке опускается к поверхности жидкости в поддоне.

Очищаемый пылевоздушный поток получает дополнительное ускорение при проходе между лопатками. Затем газожидкостная смесь поступает в контактные камеры. После отделения капель жидкости в пластинчатом сепараторе очищенный воздух отводится через выходной патрубок [33].

Внутри технологического блока размещены рабочие контактные камеры, которые в нижнем торцевом сечении снабжены опорным решетчатым элементом и конфузорами с углом сужения 15–20 градусов, а в верхнем торцевом сечении – диффузорами с углом расширения 15 градусов.

Сепарационный блок снабжен патрубком выхода очищенного воздуха, а поддон – патрубком слива жидкого шлама и регулятором подачи и поддержания уровня жидкости [38].

Экспериментальные исследования проводились в промышленных условиях на стенде, схема которого показана на рисунке 2. Основу установки составил аппарат предложенной конструкции, изготовленный из оргстекла, в полномасштабном (М 1:1) исполнении с сохранением геометрических размеров, соотношений и форм реального (промышленного) устройства.

Контактные камеры имеют диаметр 80 мм. Через патрубок выхода очищенного воздуха в сепарационном блоке экспериментальный образец подключен к вентилятору, работа которого обеспечивала разрежение в аппарате. В качестве рабочей жидкости при проведении исследований использовалась вода. Для поддержания уровня воды в блоке-поддоне предусмотрен регулятор подачи, уровень воды фиксировался визуально. Высота заполнения контактных камер водой оценивалась по шкале делений, нанесенной на стенки камеры.

Применительно к очистке выбросов от пыли при экспериментальной оценке характеристик аппарата мокрой очистки в качестве определяющих факторов были приняты:

$\bar{h}_{жск} = h_{жск} / h_{k_0}$ – уровень жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жск}$, отсчитываемый от нижней горизонтальной перегородки, отнесенный к высоте конфузора h_{k_n} , изменялся в интервале от –0,16 до 0;

$\bar{h}_k = h_k / d_k$ – высота контактной камеры $\bar{h}_k$, отнесенная к диаметру контактной камеры d_k , изменялась в интервале от 7,5 до 12,5.

Определяющие факторы x_1 и x_2 имели вид, рекомендованный литературой, например, [40]:

$$x_1 = \frac{\bar{h}_{жск} - \bar{h}_{жск0}}{\Delta \bar{h}_{жск}}, \quad x_2 = \frac{\bar{h}_k - \bar{h}_{k0}}{\Delta \bar{h}_k}. \quad (1)$$

В качестве функций отклика были приняты степень проскока пыли в аппарате и приведенный коэффициент местного сопротивления аппарата ξ , характеризующий аэродинамическое сопротивление устройства в рабочем гидродинамическом режиме. Концентрация пыли в реальных условиях на входе в опытно-промышленную установку изменялась незначительно и составляла до 500 мг/м³.

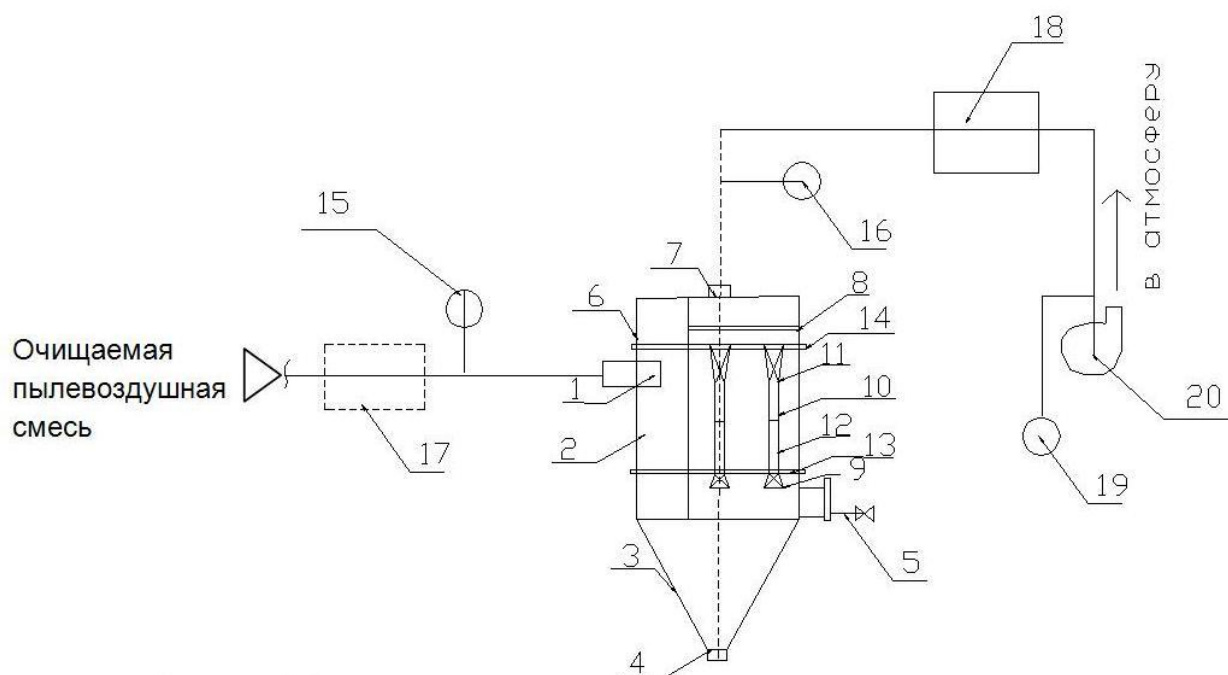


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки:

- 1 – патрубок входа; 2 – технологический блок-модуль; 3 – блок-поддон с водой;
 4 – патрубок слива воды; 5 – регулятор подачи и поддержания уровня жидкости;
 6 – сепарационный блок; 7 – патрубок выхода очищенного потока газа; 8 – пластинчатый сепаратор; 9 – конфузур; 10 – контактные трубчатые камеры; 11 – диффузоры;
 12 – насыпная керамзитовая загрузка; 13, 14 – горизонтальные перегородки;
 15, 16 – измерительный комплекс для определения расхода и давления;
 17, 18 – измерительный комплекс для определения концентрации;
 19 – дистанционно-управляемый шибер; 20 – вентилятор

Результаты экспериментальных исследований по оценке характеристик предложенного аппарата приведены в таблице 1 и на рисунке 3.

На рисунке 3 представлены сводные результаты исследований в виде экспериментально полученных зависимостей в графическом виде, характеризующих изменение степени проскока пыли в аппарате при различных режимных параметрах его работы при использовании воды в качестве рабочей жидкости.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

Уровень жидкости в конфузуре, отнесенный к общей высоте конфузур, $\bar{h}_{жк}$	Высота контактной камеры, отнесенная к диаметру контактной камеры, $\bar{h}_к$	Степень проскока пыли в аппарате, ε , %
1	2	3
-0,16	7,5	24,16
-0,16	10	20,38
-0,16	12,5	15,21
-0,08	7,5	16,40
-0,08	10	12,62
-0,08	12,5	7,45
0	7,5	9,17
0	10	5,39
0	12,5	0,22

В качестве рабочей жидкости в устройстве использовалась вода. По результатам математической обработки экспериментальных данных регрессионная зависимость изменения

степени проскока пыли от общей высоты слоя жидкости $\bar{h}_{жк}$ в контактной камере и высоты контактной камеры, отнесенной к диаметру контактной камеры, $\bar{h}_к$.

$$\varepsilon = 0,898(\bar{h}_{жк} - 5)^2 - 0,001(\bar{h}_к - 2,3)^2 - 2,1267 \quad (2)$$

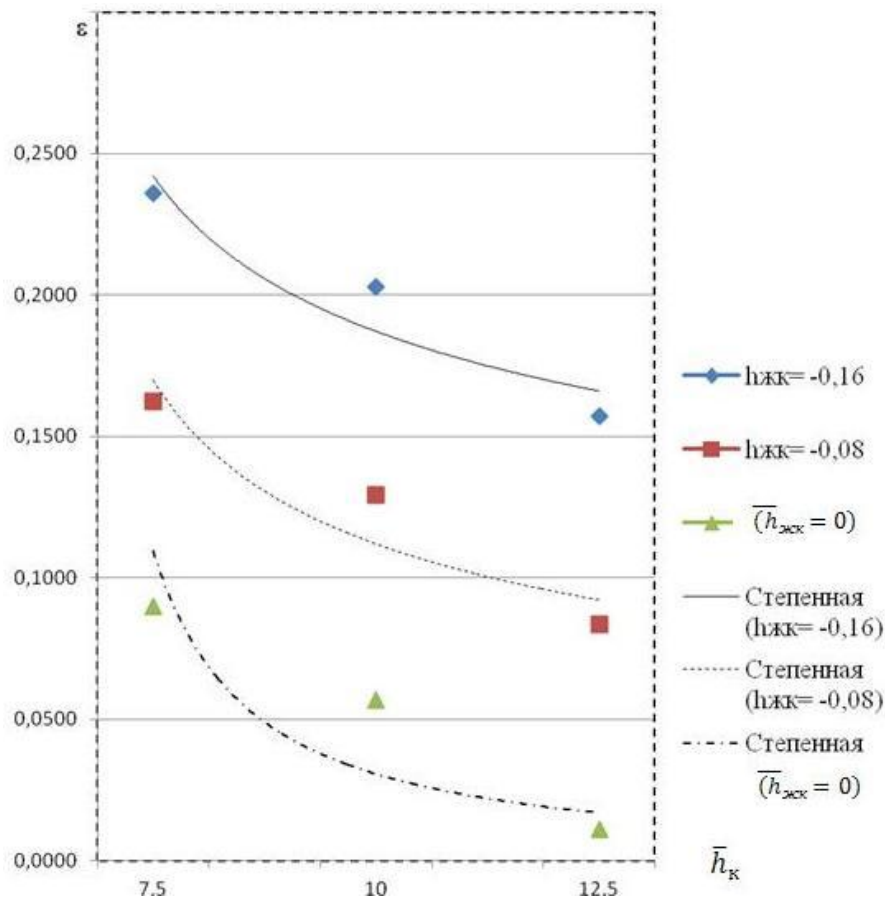


Рисунок 3. Изменение степени проскока пыли ε в зависимости от уровня жидкости в конфузоре, $\bar{h}_{жк}$ ($\bar{h}_{жк}$ изменялась от $-0,16$ до $0,0$), и высоты контактной камеры, отнесенной к диаметру контактной камеры, $\bar{h}_к$ (величина изменялась в интервале от $7,5$ до $12,5$).

Показанные на рисунке 3 зависимости соответствуют режимным параметрам аппарата, при которых достигается минимальное значение степени проскока пыли (наибольшая эффективность пылеулавливания).

На рисунке 4 представлены сводные результаты исследований в виде графических зависимостей, характеризующих изменение приведенного коэффициента местного сопротивления ξ аппарата при различных режимных параметрах его работы:

$$\xi = 2\Delta P / (\rho_{вблх} v_{вблх}^2), \quad (3)$$

где ΔP – потери давления в аппарате (Па); $\rho_{вблх}$ – плотность газа на выходе, $v_{вблх}$ – скорость газа на выходе.

Данные получены в эксперименте при использовании воды в качестве рабочей жидкости – агента.

На рисунке 5 представлены сводные результаты исследований в виде графических зависимостей, характеризующих изменение потерь давления ΔP (Па) в аппарате при различных режимных параметрах его работы. Данные получены в эксперименте при использовании воды как рабочей жидкости.

Кошкарев С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

Наибольшие потери давления отмечаются при высоте воды в конфузоре, отнесенного к общей высоте конфузора, $\bar{h}_{жк} = 0$.

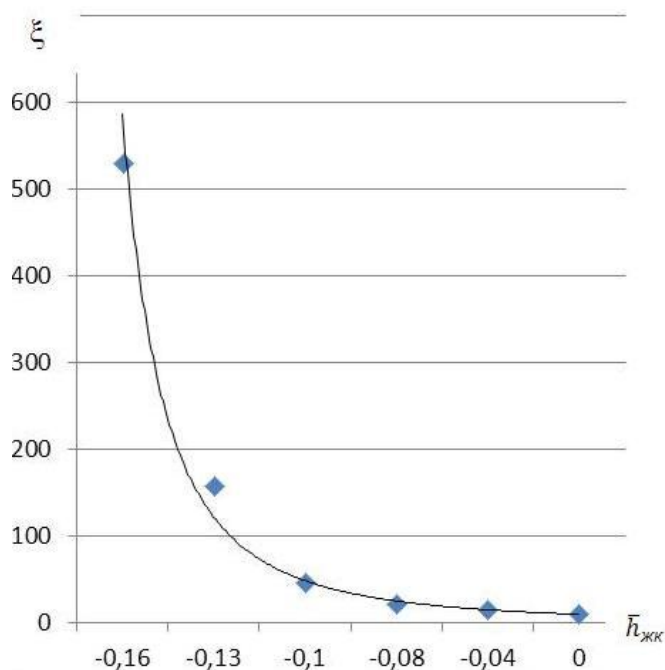


Рисунок 4. Изменение приведенного коэффициента местного сопротивления ξ степени в зависимости от высоты слоя воды $\bar{h}_{жк}$ в рабочем гидродинамическом режиме ($\bar{h}_{жк}$ изменялась от -0,16 до 0,0)

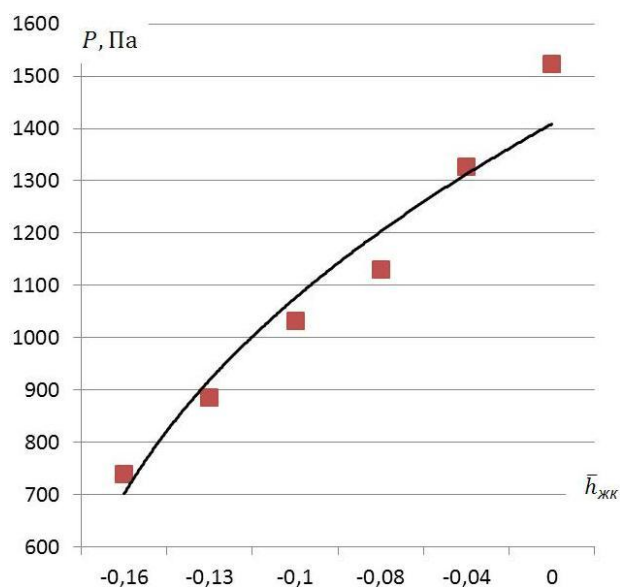


Рисунок 5. Изменение потерь давления ΔP , Па, в аппарате в зависимости от высоты слоя воды в конфузоре $\bar{h}_{жк}$ ($\bar{h}_{жк}$ изменялась от -0,16 до 0,0)

Практическая значимость и внедрение

Для эффективного улавливания мелких фракций пыли керамзита выбросов вентиляционно-технологических и аспирационных систем стройиндустрии целесообразно проектировать многоступенчатые системы очистки. Более эффективным представляется применение в системах обеспыливания аспирационных систем, во второй ступени очистки – аппаратов ВЗП с отсосом из бункерной части или высокоинтенсивных аппаратов мокрой очистки, где реализуются различные по физической природе механизмы пылеулавливания. Такие композиции систем обеспыливания и высокоинтенсивных аппаратов мокрой очистки имеют большое практическое значение и находят применение в стройиндустрии [11, 14, 35]. В настоящей работе приведены результаты исследования опытно-промышленной установки мокрой очистки, испытания которой были успешно проведены на одном из заводов ЖБИ Волгоградской области.

Выводы

1. Анализ полученных данных о зависимости аэродинамического сопротивления аппарата показал следующее. Значения потерь давления ΔP в аппарате и величины приведенного коэффициента местного сопротивления ξ и высоты уровня жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жск}$ зависят от изменения уровня заполнения аппарата водой. Анализ данных также показывает, что приемлемое значение степени проскока пыли ε и величины аэродинамического сопротивления (потерь давления ΔP) в устройстве наблюдаются в диапазоне значений высоты слоя воды $\bar{h}_{жск}$ в конфузоре от 0,08 до 0,0 (геометрическая высота слоя в интервале от 0,08 до 0,125). Если характеристика применяемого в системе аспирации тягодутьевого устройства позволяет проводить процесс при $\bar{h}_{жск} = 0$, то данную величину $\bar{h}_{жск}$ можно считать предпочтительной. Если располагаемый напор установленного в системе аспирации тягодутьевого устройства позволяет проводить процесс в интервале значений высоты слоя воды $\bar{h}_{жск}$ в конфузоре от 0,08 до 0,0, то данную величину $\bar{h}_{жск}$ можно считать допустимой и приемлемой с точки зрения практического использования.

2. Также экспериментально установлено, что наименьшая степень проскока пыли достигается при уровне жидкости в конфузоре, отнесенного к общей высоте конфузора, $\bar{h}_{жск} = 0$. Потери давления в аппарате при этом максимальны. При уменьшении уровня (высоты) жидкости в конфузоре степень проскока пыли увеличивается, достигая максимального значения при $\bar{h}_{жск} = -0,16$ с минимальным значением потери давления в аппарате.

3. Снижению степени проскока пыли способствует также увеличение высоты контактной камеры. При значении высоты контактной камеры, отнесенной к диаметру, $\bar{h}_к = 12,5$ коэффициент проскока принимает наименьшие значения в исследованном диапазоне гидродинамических режимов. Изменение коэффициента проскока частиц пыли при значении высоты $\bar{h}_к \geq 10$ незначительно. Для обеспечения технически надежной эксплуатации устройства значение относительной высоты контактной камеры целесообразно принять $\bar{h}_к = 10$.

4. Применять такие аппараты для очистки выбросов печей обжига керамзита с высокой эффективностью улавливания пыли можно при значительных начальных концентрациях содержания пыли в очищаемом пылегазовом потоке. Исходя из практического опыта эксплуатации, пылеуловители мокрой очистки целесообразно использовать в многоступенчатых системах обеспыливания вентиляционно-технологических выбросов в качестве второй ступени очистки [11, 14, 35]. При этом обеспечивается более стабильная и надежная работа устройства при относительно меньших концентрациях содержания пыли в очищаемом пылегазовом потоке и достигаются меньшие значения проскока пыли ε [11, 14, 35]. Таким образом, совершенствование систем очистки таких выбросов может быть реализовано на основе применения высокоэффективного инерционно-гравитационного механизма сепарации с последующим барботированием в слое воды в одном устройстве. Результатом внедрения таких устройств в отрасли станет решение актуальной проблемы повышения экологической безопасности стройиндустрии при снижении валового количества пыли, выбрасываемой в атмосферу.

Литература

1. Постановление Правительства РФ «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» от 15 апреля 2014 г. № 323 // Интернет-портал "Российской Газеты". 2014 г. с изм. и допол. в ред. от 02.05.14.
2. Горин В.М. Применение керамзитобетона в строительстве – путь к энерго- и ресурсоэффективности, безопасности зданий и сооружений // Строительные материалы. 2010. №8. С. 8–11.
3. Семенов А.А. Состояние российского рынка керамзита // Строительные материалы. 2010. №8. С. 6–8.
4. Sadovnikova N., Parigyn D., Sanzhapov B., Gnednikova E. Evaluating of sustainability of Volgograd // WIT Transaction on Ecology and the Environment. 2013. Vol. 1. Pp. 279–290.
5. Борщевский А.А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. М.: Высшая школа, 1987. 367 с.
6. Баширов Х.З. Повышение эксплуатационной надежности производственных зданий и сооружений на транспорте: монография. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2010. 341 с.
7. Технология производства керамзита [Электронный ресурс]. URL: <http://www.euravitebsk.org/news/148-expanded-clay.html>. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. (дата обращения: 15.01.2015).
8. Онацкий С.П. Производство керамзита. М.: Стройиздат, 1987. 333 с.
9. Балтеренас П.С. Обеспыливание воздуха на предприятиях строительных материалов. М.: Стройиздат, 1990. 180 с.
10. Азаров В.Н. Сергина, Н. М. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2003. №8. С. 14–15.
11. Сергина Н.М. [и др.] Системы инерционного пылеулавливания в промышленности строительных материалов // Строительные материалы. 2013. №2. С. 66–68.
12. Слободян С.М., Куц В.П. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов // Безопасность жизнедеятельности. 2014. №8. С. 55–59.
13. Сергина Н.М. [и др.] Пути снижения выброса пыли извести в атмосферу при производстве строительных материалов // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №12(134). С. 48–50.
14. Сергина Н.М., Азаров Д.В., Гладков Е.В. Системы инерционного пылеулавливания в промышленности строительных материалов // Стройматериалы. 2013. №2. С. 86–88.
15. Грибова И.Г. Тычкина О.В., Белошейкин В.А. Внедрение аспирационнопылеулавливающей установки на ООО «Саткинский щебзавод» // Стройматериалы. 2010. №8. С. 20–22.
16. Рабинович В.Б. Исследование и разработка мокрых пылеуловителей СИОТ с шаровыми насадками // Безопасность жизнедеятельности. 2010. №1. С. 48–51.
17. Шияев М.И., Пеняевский В.В. Экспериментальное определение констант универсального метода расчета инерционных пылеуловителей // Известия вузов НГАСУ. Строительство. 2013. №8. С. 64–71.
18. Ватин Н.И., Гиргидов А.А., Стрелец К.И. Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне // Инженерно-строительный журнал. 2011. №5. С. 5–9.
19. Ватин Н.И., Стрелец К.И. Определение характеристик сварочных искр для расчета их удаления в циклоне // Инженерно-строительный журнал. 2011. №5. С. 25–30.
20. Strelets K.I., Kitain M.B., Petrochenko M.V. Welding Spark Parameters Determination for Cyclone Removal Calculation // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 941. Pp. 2098–2103.
21. Vatin N.I., Strelets K.I., Kharkov N. Gas Dynamics in a Counter flow Cyclone with Conical Nozzles on the Exhaust Pipe // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 635. Pp. 17–21.
22. Chul-Ho Hong, Ji-Won Han, Byeong-Sam Kim, Cha-Sik Park, Oh Kyung Kwon. The effect of cyclone shape and dust collector on gas-solid flow and performance // International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering. 2012. No. 6. Pp. 37–42.
23. Cortes C., Gil A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators // Progress in energy and combustion Science. 2007. Vol. 33. No. 5. Pp. 409–452.

24. Wang B. [et al]. Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator // Applied Mathematical Modelling. 2006. Vol. 30. No. 11. Pp. 1326–1342.
25. Wu J., Zhang Y., Wang H. Numerical study on tangential velocity indicator of free vortex in the cyclone // Separation and Purification Technology. 2014. Vol. 132. Pp. 541–551.
26. Valery N. Azarov, Dmitri P. Borovkov, Awadh M. Redhwan Application of Swirling Flows in Aspiration Systems // International review of mechanical engineering. 2014. Vol.8. No.4. Pp. 750–753.
27. Стрелец К.И. Гидравлические основы расчета пылеудаления в противоточных циклонах : автореф. дис. ... канд. техн. наук наук: 05.23.16. СПб., 2010. 23 с.
28. Strelets K., Petrochenko M., Girgidov A. Energy Performance of Particle Settling in Cyclones //Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725. Pp. 1363–1371.
29. Белоусов А.С. Гидродинамика процессов с неоднородными структурами закрученных гетерогенных потоков в вихревых аппаратах : автореф. дис. ... докт. техн. наук наук: 05.17.08. М., 2010. 32 с.
30. Lee B.K., Jung K.R., Park S.H. Development and application of a novel swirl cyclone scrubber (1) Experimental // Journal of Aerosol Science. Mcfarland A. R. 2008. Vol. 39. No 12. Pp. 1079–1088.
31. Park S.H., Lee B.K. Development and application of a novel swirl cyclone scrubber:(2) Theoretical // Journal of hazardous materials. 2009. Vol. 164. No. 1. Pp. 315–321.
32. Marthinussen S.A. [et al]. Removal of particles from highly viscous liquids with hydrocyclones // Chemical Engineering Science. 2014. Vol. 108. Pp. 169–175.
33. Vieira L.G.M., Barrozo M.A.S. Effect of vortex finder diameter on the performance of a novel hydrocyclone separator // Minerals Engineering. 2014. Vol. 57. Pp. 50–56.
34. Wang Q., Chen X., Gong X. Theoretical and experimental investigation on the characteristics of fly-ash scrubbing in a fixed valve tray column // AIChE Journal. 2013. Vol. 59. No. 6. Pp. 2168–2178.
35. Кошкарев С.А., Кисленко Т.А. О применении аппарата пылеулавливания с комбинированной схемой сепарации пыли из пылегазового потока в производстве керамзита // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №11. С. 47–49.
36. Патент №135806, Россия, U1 МПК G01N 15/00. Устройство для определения дисперсного состава пыли. Кошкарев С.А., Азаров В. Н. [и др.]. Заявка №2013121082/28. Заявлено 07.05.2013. Опубл. бюллетень № 35 20.12.2013.
37. Патент №139122 Россия, МКИ В 01 Д 47/02. Устройство для очистки газов / Кошкарев С.А., Азаров В. Н., Кисленко Т.А [и др.]. Заявка №2013138200/05. Заявлено 15.08.2013. Опубл. бюллетень №10 10.01.2014.
38. Соколова Е.В. Повышение экологической безопасности городских автозаправочных станций: автореф. дис. ... канд. техн. наук наук. Волгоград, 2013. 20 с.
39. Кисленко Т.А., Кошкарев С.А. [и др.] О значимости параметров инерционных устройств очистки вентиляционных выбросов в производстве керамзита // Современные проблемы науки и образования. 2014. №1. [Электронный ресурс] Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.science-education.ru/115-12003> (дата обращения: 10.01.2015).
40. Ермаков С.М. Математическая теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 2007. 318 с.

*Сергей Аркадьевич Кошкарев, г. Волгоград, Россия
Тел. моб.: +7(961)0702377; эл. почта: cool.koshka12@mail.ru*

*Валерий Николаевич Азаров, г. Волгоград, Россия
Тел. раб.: +7(8442)969907; эл. почта: kaf_bgdvt@mail.ru*

© Кошкарев С.А., Азаров В.Н., 2014

doi: 10.5862/MCE.54.4

Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

*Студент М.О. Дудин;**д.т.н., директор Инженерно-строительного института Н.И. Ватин;**д.т.н., профессор Ю.Г. Барабанщиков,**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

Аннотация. Монолитное строительство в зимнее время сталкивается с проблемами набора прочности бетона при отрицательной температуре окружающей среды. В целях обеспечения необходимых температурных условий для твердения и упрочнения бетона используют различные методы прогрева конструкций. Одним из способов является применение греющего провода.

Актуальность статьи обусловлена климатическими условиями строительства на большей части территории России и отсутствием единой методики расчета требуемой мощности прогрева греющим проводом. В статье рассмотрены различные рекомендации по осуществлению температурного выдерживания железобетонных конструкций.

В программе ELCUT и надстройке WinConcret произведено моделирование прогрева проводом тонкостенного монолитного перекрытия по профлисту между кирпичными стенами. Осуществлены расчет набора прочности бетона и анализ температурных полей в сечении перекрытия. Решена задача о температурных деформациях бетона.

Ключевые слова: зимнее бетонирование; греющий провод; ELCUT; моделирование прогрева; температурные деформации; набор прочности; монолитные конструкции

Введение

Обеспечение температурных условий, необходимых для твердения и набора прочности бетона в зимнее время, является актуальной проблемой современной строительной науки [1–3]. В настоящее время существует множество методик осуществления прогрева бетона. Безусловно, требуется комплексный подход при производстве бетонных работ при отрицательной температуре. Обязательно применение различных противоморозных добавок [4–8].

Под зимним бетонированием понимается производство работ при температуре наружного воздуха ниже 5 °С и минимальной суточной температуре ниже 0 °С [9]. Главным процессом при твердении и наборе прочности бетона является реакция гидратации цемента. Эта реакция экзотермическая, т. е. протекает с выделением тепла [10, 11]. Однако при низких температурах скорость реакции замедляется, бетон перестает набирать прочность, возможно обрушение строительных конструкций.

Обнаружены три группы нарушений, возникающих в материале. Во-первых, при замораживании бетонов вода, не вступившая в реакцию гидратации цемента, переходит из жидкой фазы в твердую, образуя лед и расширяясь в объеме. Это приводит к нарушению структуры и частичному разрушению. Во-вторых, в бетоне происходят процессы массопереноса, которые при отрицательной температуре окружающей среды на начальном этапе выдерживания приводят к образованию дефектных участков. В-третьих, структура бетона перестает быть монолитной [1].

Железобетонные конструкции в монолитном исполнении зимой прогревают различными способами. Существует несколько технологий зимнего бетонирования [1, 12–17]. Все они связаны с термообработкой бетона строительных конструкций. В зависимости от модуля поверхности конструкции (отношения площади остывания к объему бетона) рекомендуют различные методы прогрева. Для тонкостенных конструкций с большим модулем поверхности применяют прогрев проводом.

Суть метода состоит в укладке провода с большим электрическим сопротивлением в конструкцию перед заливкой бетонной смеси. Провода подключаются к станциям прогрева бетона или трансформаторам. Под действием электрического тока провод нагревается и является источником тепла для железобетонных конструкций.

Данный метод, кажущийся простым и действенным, на самом деле связан со сложными электротехническими и термодинамическими расчетами. Не существует единой методики расчета необходимой мощности прогрева строительных конструкций [9, 18, 19].

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Правильный режим термообработки бетона влияет на конечный результат и прочность конструкции. Предварительный расчет и последующий контроль температуры являются важными составляющими зимнего бетонирования [20–25]. Именно предварительный расчет температуры выдерживания и решение задачи термодинамики являются необходимыми условиями получения качественной монолитной строительной конструкции.

Существующие ручные расчеты довольно приблизительны и не учитывают всех факторов, влияющих на температуру. Моделирование с использованием современных программно-вычислительных комплексов способно решить данную проблему [20, 26, 27]. Одним из программно-вычислительных комплексов, призванных решать такие задачи методом конечных элементов, является программный пакет ELCUT. Он вместе с надстройкой WinConcret способен рассчитать температурные поля, построить график набора прочности бетона и рассчитать температурные деформации от прогрева строительных конструкций.

Данная программа рассчитывает температурные поля в плоскости сечения конструкции, решая стационарную задачу в качестве начальных условий, а затем решает нестационарные задачи с построением температурных полей с заданным шагом интегрирования. В ELCUT существует возможность задания различных источников тепла, материалов, условий окружающей среды. В надстройке WinConcret реализована возможность учета тепла от реакции гидратации цемента. Решением задачи является множество температурных полей в разное время прогрева, программа строит график прогрева отдельных участков, а также график набора прочности бетона.

В решении механической задачи рассмотрены деформации от температурных нагрузок на бетон. Решением является деформированная схема строительной конструкции с анализом ее напряженно-деформированного состояния.

В рамках работы выполнено моделирование термодинамической задачи прогрева бетона монолитного перекрытия по профлисту греющим проводом. Построен график набора прочности бетона, произведен анализ температурных деформаций в программе ELCUT.

1. Постановка задачи

В качестве объекта исследования выбрано монолитное перекрытие по профлисту на стальных балках (см. рис. 1). Перекрытие окружено кирпичными стенами, что характерно для объектов реконструкции в Санкт-Петербурге. Наибольшая толщина перекрытия 90 мм. Перекрытие бетонируется при отрицательной температуре окружающей среды ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Прогрев осуществляется проводом, уложенным в плиту, с шагом 100 мм, а также конвективным прогревом снизу с поддерживаемой температурой $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Плита утеплена сверху экструдированным пенополистиролом толщиной 100 мм. Потери тепла в конструкции происходят через кирпичные стены сбоку и алюминиевый профлист снизу.

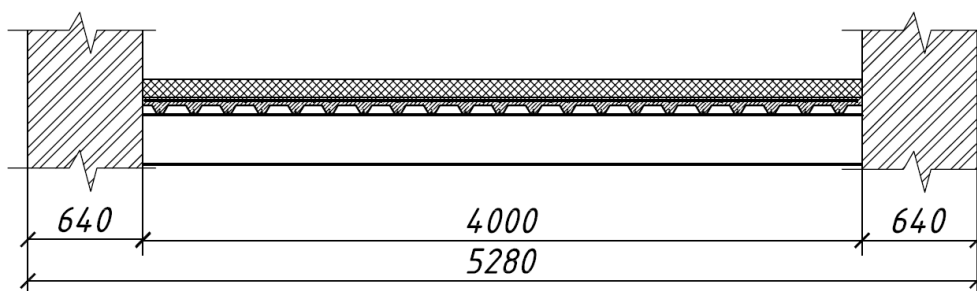


Рисунок 1. Поперечное сечение моделируемого перекрытия между балками

2. Решение задачи термодинамики процесса прогрева конструкции

2.1. Анализ ручного расчета характеристик прогрева

В настоящее время не существует единой методики расчета прогрева и регламентирующих документов в области выбора параметров прогрева конструкции. Руководствуясь МДС 12-48.2009 «Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов» [9] и ТСН 12-336-2007 «Производство бетонных работ при отрицательных температурах среды на территории Республики Саха (Якутия)» [18], можно получить различные параметры прогрева в связи с тем, что используются различные формулы и принципы расчета.

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Основным различием двух методик расчета является вычисление коэффициента теплопередачи, показывающего, какое количество теплоты выделяется при остывании единицы площади поверхности теплоотдачи на 1 °С. Следовательно, меняется требуемая подводимая мощность прогрева. Анализ двух методик показал, что МДС 12-48.2009 выдает некорректные параметры прогрева, так как согласно расчетам при использовании алюминиевого профлиста в качестве несъемной опалубки прогрев вообще не нужен.

МДС 12-48.2009 «Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов» рекомендует в расчетах коэффициента теплопередачи опалубки использовать следующую формулу:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\lambda}} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\kappa}}}, \quad (1)$$

где α_{λ} – коэффициент передачи теплоты от опалубки излучением;

δ_i – толщина слоя теплоизоляционного материала;

λ_i – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала;

α_{κ} – коэффициент передачи теплоты конвекцией.

ТСН 12-336-2007 «Производство бетонных работ при отрицательных температурах среды на территории Республики Саха (Якутия)» регламентирует для расчетов иную формулу:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (2)$$

где α_n – коэффициент передачи теплоты от опалубки конвекцией;

δ_i – толщина слоя теплоизоляционного материала;

λ_i – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала.

Можно заметить, что формулы практически идентичны, но отличаются учетом передачи теплоты от опалубки излучением. Именно этот показатель дает большой запас по необходимому количеству подводимого тепла по расчету согласно МДС 12-48.2009. В то же время данные расчеты являются приблизительными, так как не учитывают изменение ситуации во времени. Учет тепла от гидратации цемента не является функцией от времени. Потери тепла в разных направлениях, а также различная температура на разных гранях конструкции не берутся в расчет. Неравномерность прогрева на начальной стадии процесса не учитывается. В ТСН 12-336-2007 весь процесс прогрева разбит на отдельные составляющие, что делает расчет очень громоздким и также приблизительным.

Весь расчет сводится к определению шага укладки проводов, ориентировочной максимальной температуры прогрева и времени температурного выдерживания. Однако подобный расчет в силу своей приблизительности может быть неверен и поэтому требует компьютерного моделирования и анализа. Кроме того, мало внимания уделяется напряженно-деформированному состоянию прогреваемой конструкции. Напряжения, возникающие вследствие нагревания, могут привести к трещинообразованию, деформациям и короблению поверхности бетона.

В данной работе смоделирован процесс прогрева рассмотренной конструкции перекрытия в программе ELCUT.

2.2. Моделирование прогрева конструкции перекрытия в ELCUT

Программа ELCUT позволяет решать строительные задачи, связанные с прогревом бетона. Данный комплекс основан на методе конечных элементов (МКЭ). Решение задач базируется на принципах термодинамики, процессах теплообмена. Пакет ELCUT выполняет моделирование методом конечных элементов двумерных электромагнитных, тепловых и механических полей.

Реализация решения построена на модификации исходной задачи и решении серии таких модифицированных последовательно связанных задач. При этом твердеющий бетон разбивается прямоугольной сеткой дискретизации на блоки с КЭ сеткой, в которых могут быть заданы различные свойства, постоянные в пределах конкретного блока и на временном шаге, а временной шаг модификации свойств в блоках равняется шагу решения отдельной задачи.

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Надстройка WinConcret позволяет уточнить расчет путем введения новых переменных и уточнения физических и механических свойств материалов в связи с изменением температуры, твердением бетона и течением времени. Серия последовательных задач решается с исходными данными на определенное время прогрева с выбранным интервалом. Исходные данные для каждой задачи меняются, надстройка принимает во внимание данные расчета предыдущей задачи. Начальной задачей является нулевое время прогрева, момент бетонирования конструкции. Последующие задачи решаются с выбранным интервалом в 2 часа, учитывая следующие изменяемые во времени параметры:

а) собственное тепловыделение бетона, происходящее при гидратации цемента, зависящее от двух основных переменных – времени и температуры твердения;

б) температурный коэффициент сопротивления проводов (источников тепла), зависящий от переменной – температуры; сопротивление проводника при нагреве увеличивается до 40 % относительно номинального значения и повышается мощность прогрева, требуется регулировка расположения и мощности источников тепла;

в) регулирование выдерживания бетона на различных технологических переделах, связанное с включением/отключением прогрева, устройством/демонтажем утеплителя или опалубки;

г) прочность бетона наряду с температурой, градиентами, напряжениями и деформациями.

Для решения поставленной задачи была создана расчетная модель в конечных элементах в программном комплексе ELCUT с соблюдением геометрических размеров, физических и механических свойств материалов. В качестве расчетной схемы смоделировано сечение половины перекрытия между балками, т. е. решение задачи разбито на две симметричные части.

Сетка конечных элементов для данной конструкции показана на рисунке 2.

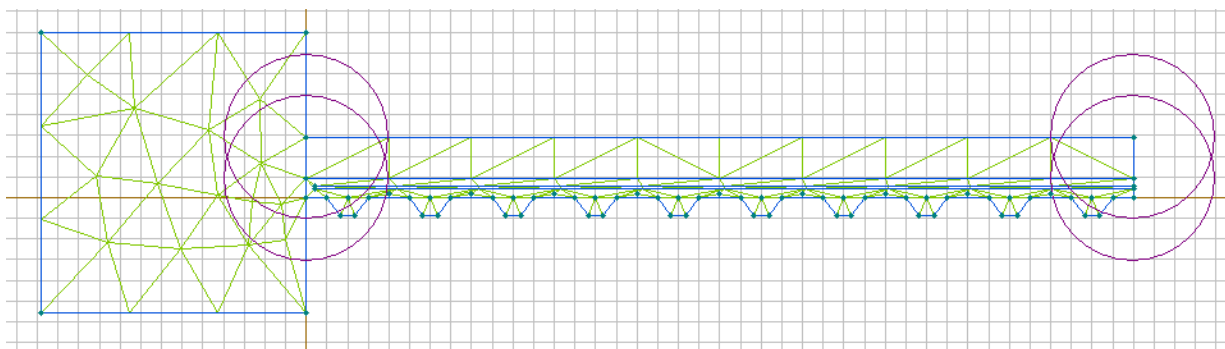


Рисунок 2. Расчетная модель с построением сетки конечных элементов

В созданной модели применены термодинамические характеристики материалов и их физические параметры.

Исходные характеристики:

- класс бетона – В30;
- материал стены – кирпич полнотелый;
- материал профлиста – алюминий;
- источник тепла – провод ПНСВ;
- утеплитель – экструдированный пенополистирол 100 мм.

Начальные условия:

- температура бетонной смеси +10 °С;
- температура арматуры –5 °С;
- температура под перекрытием +10 °С с конвективным подогревом (коэффициент передачи теплоты конвекцией 9,5 Вт/К·м²;
- температура окружающей среды –10 °С;
- скорость ветра 5 м/с (коэффициент передачи теплоты конвекцией со стороны окружающей среды 24 Вт/К·м²;
- мощность прогрева 35 Вт/п.м. провода (при последующем расчете принимается во внимание температурный коэффициент сопротивления 0,0046 град⁻¹).

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Характеристики материалов

Арматура:

- теплопроводность – 58 Вт/К·м;
- удельная теплоемкость – 470 Дж/кг·К;
- плотность – 7850 кг/м³.

Бетон:

- теплопроводность – 2,07 Вт/К·м;
- объемная плотность тепловыделения переменная, показатели излучения и тепловыделения рассчитывается в WinConcret автоматически в зависимости от температуры и времени;
- начальная удельная теплоемкость – 1050 Дж/кг·К;
- плотность – 2500 кг/м³.

Кирпичная кладка:

- теплопроводность – 0,68 Вт/К·м;
- удельная теплоемкость – 1580 Дж/кг·К;
- плотность – 1800 кг/м³;

Алюминиевый профлист

- теплопроводность – 237 Вт/К·м;
- удельная теплоемкость – 903 Дж/кг·К;
- плотность – 2700 кг/м³.

Утеплитель:

- теплопроводность – 0,032 Вт/К·м;
- удельная теплоемкость – 1320 Дж/кг·К;
- плотность – 40 кг/м³.

Показатели теплоемкости, теплопроводности, плотности материалов взяты из справочника программы. Греющие провода заданы вершинами с определенной мощностью тепловыделения. На основании введенных данных получено температурное поле перед началом прогрева, изображенное на рисунке 3.

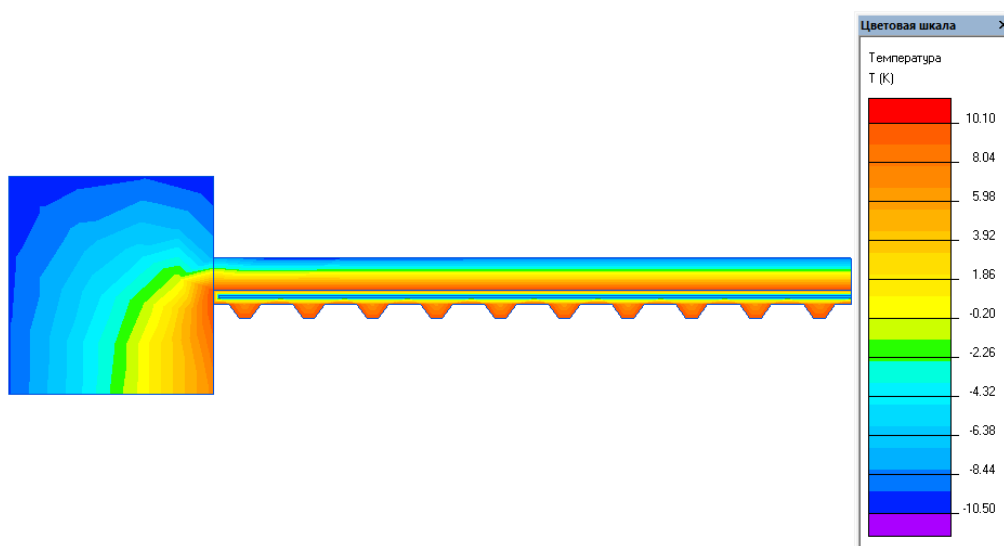


Рисунок 3. Температурное поле конструкции перед началом прогрева

Выбраны параметры и время прогрева – 2 суток. Затем проводится температурное выдерживание с остыванием бетона в течение 24 часов. Прогрев конструкции осуществляется греющим проводом. Запускается решение задачи – так называемый «прикидочный расчет». Расчет осуществляется непосредственно в программе ELCUT. Шаг решения задачи выбирается

пользователем. В данной работе выбран шаг решения – 2 часа. Программный комплекс осуществляет решение задачи с учетом теплоемкости и теплопроводности всех материалов конструкции в расчетной схеме. Принимается во внимание конвективный теплообмен с окружающей средой и конвективный прогрев конструкции снизу.

Спустя 2 часа после начала прогрева наблюдаются характерные точки прогрева и потери тепла через кирпичные стены. Полученные данные показаны на рисунке 4.

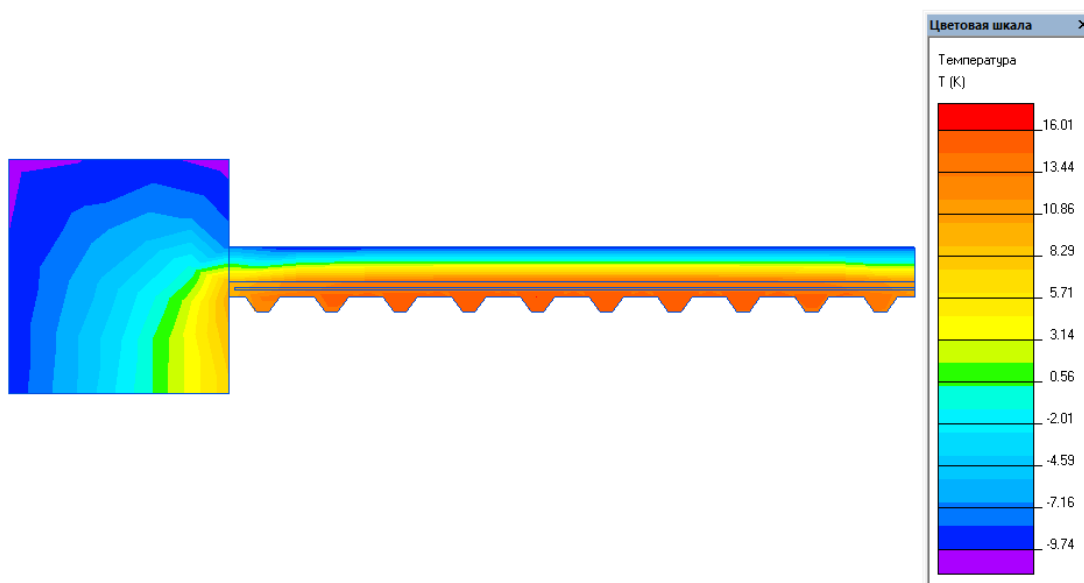


Рисунок 4. Температурное поле конструкции через 2 часа прогрева

Для большей точности решения рассмотрен малый участок перекрытия (см. рис. 5).

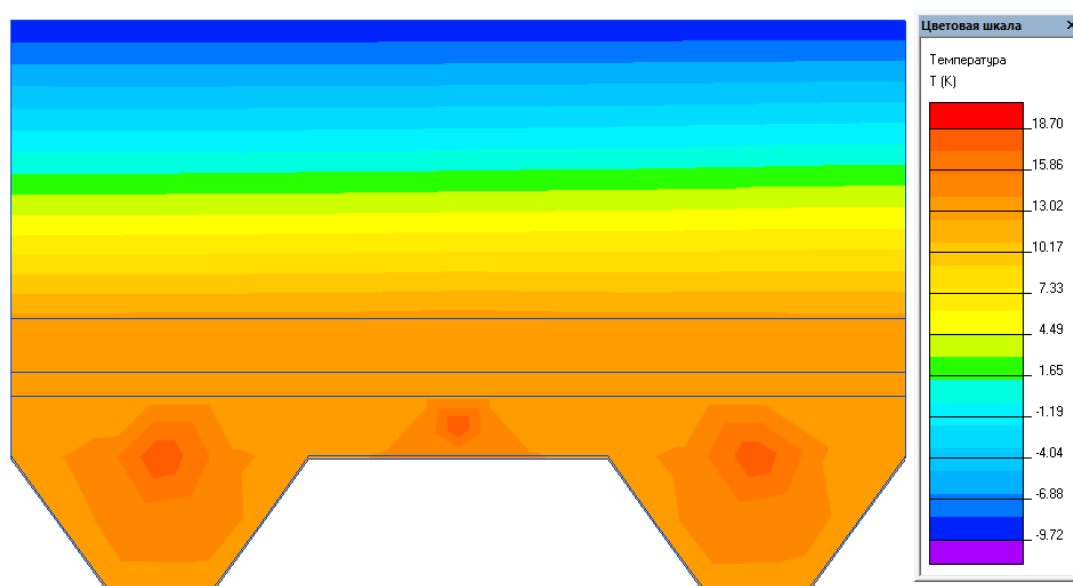


Рисунок 5. Температурное поле конструкции через 2 часа прогрева (фрагмент)

Как видно из температурных полей, замерзания бетона в первые часы не происходит, конструкция перекрытия надежно утеплена сверху, а снизу ребристая поверхность профлиста прогревается с целью недопущения промерзания бетона и больших потерь тепла.

Анимированная графика показывает распространение тепла в бетоне, можно наглядно увидеть места теплопотерь, а также корректировать параметры прогрева в зависимости от полученных данных. Исходя из полученных температурных полей, можно сделать вывод, что прогрев осуществляется неравномерно, стабилизация температуры происходит позднее. Локальные участки возле проводовгреваются быстрее, а в местах теплопотерь температуры ниже.

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Конечные решения «прикладного расчета» показаны на рисунках 6, 7. По зонам повышенной температуры можно определить расположение сечения греющих проводов.

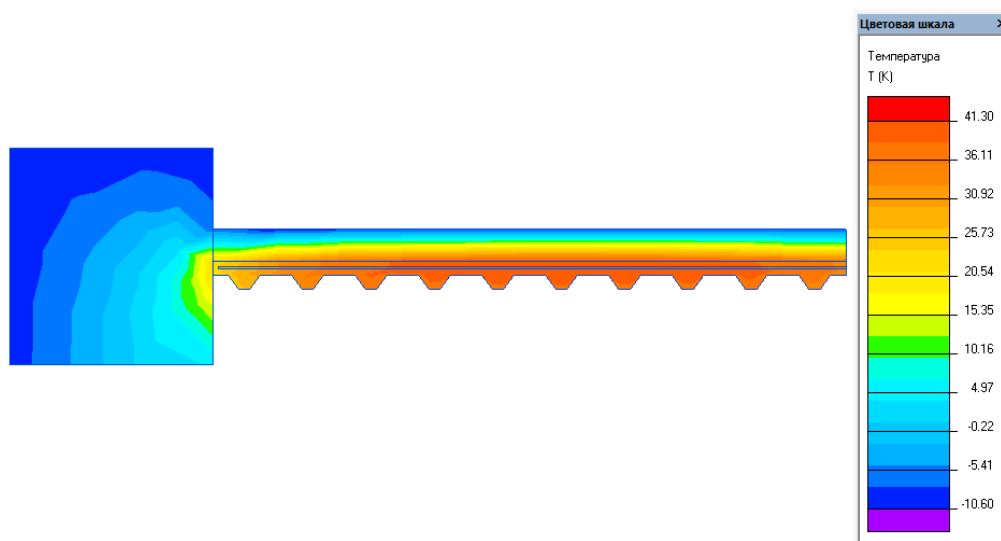


Рисунок 6. Температурное поле конструкции через 48 часов прогрева

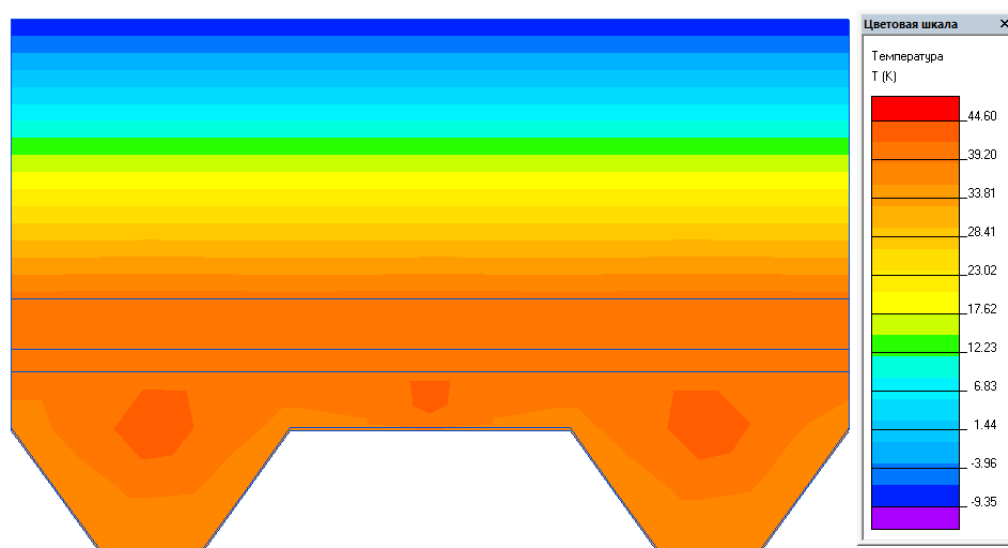


Рисунок 7. Температурное поле конструкции через 48 часов прогрева (фрагмент)

Бетон прогревается до температуры 44°C , то есть температурное превышение относительно окружающей среды составляет 54°C . Данный расчет является прикладным, он не учитывает экзотермию реакции гидратации. После запуска надстройки WinConcret можно уточнить расчет и получить интегральный график распределения температуры, а также график набора прочности бетона. Количество тепла, выделяемого бетоном при твердении, зависит от содержания цемента в смеси. Кроме того, программа делит все перекрытие на отдельные блоки и пользователь получает возможность определить прочность бетона в различных участках конструкции в разные моменты времени. По полученным графикам можно определить моменты прогрева с наибольшим градиентом температуры. При неравномерном прогреве возникают температурные деформации и напряжения. Зная прочность бетона в данный момент времени, можно определить, насколько опасны возникающие напряжения из-за разных температур конструкции.

Также в программе реализована возможность выбора момента снятия утеплителя, расчета набора прочности бетона после отключения прогрева на остаточном тепле. Трещиностойкость конструкции обеспечивается плавным понижением температуры бетона и снятием утеплителя только спустя сутки после окончания прогрева, когда бетон набрал прочность около 70 % от марочной прочности бетона.

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Рассматриваемая конструкция была автоматически поделена на 15 температурных блоков с разбиением по сетке конечных элементов. Каждому блоку присвоен номер от 1 до 15 так, что участки №1, 15 оказались возле стены, а блоки №7, 8 – в центре перекрытия. Блок №16 – это совокупность всех участков, данные по этому блоку являются усредненными характеристиками для перекрытия. Надстройка WinConcret позволяет получить интегральные графики распределения температуры по блокам и график набора прочности бетона на различных участках. Данные выдаются в графическом и табличном режимах. На рисунках 8, 9 представлены графики температуры и набора прочности бетона для температурных блоков №16, 1, 7. В таблицах 1, 2 показаны численные значения температуры и прочности бетона на различных участках в разные моменты времени.

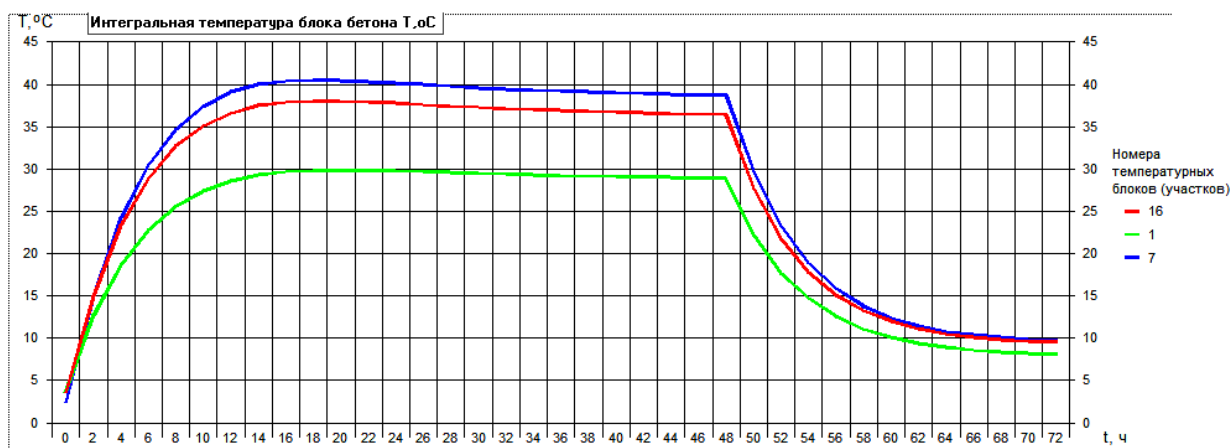


Рисунок 8. График температуры бетона на различных участках конструкции

Таблица 1. Изменение температуры бетона на различных участках при температурной обработке бетона

Номер блока	Распределение температуры бетона на участках перекрытия во времени, °C																		
	Время температурной обработки бетона, ч																		
	Время прогрева, ч													Время остывания, ч					
	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72
1	3,70	18,7	25,6	28,6	29,7	29,9	29,8	29,6	29,4	29,2	29,1	29,0	28,9	17,7	12,6	10,1	8,90	8,40	8,10
2	4,40	23,7	32,2	35,7	36,8	36,9	36,6	36,4	36,1	35,9	35,7	35,6	35,4	20,5	14,3	11,5	10,2	9,50	9,20
3	4,20	24,7	34,6	38,7	39,9	40,0	39,7	39,3	39,0	38,7	38,5	38,4	38,2	22,7	15,6	12,3	10,8	10,1	9,80
4	2,50	23,1	32,3	36,0	37,2	37,3	37,1	36,8	36,5	36,2	36,1	35,9	35,8	21,2	14,6	11,5	10,1	9,50	9,20
5	2,50	24,1	34,3	38,4	39,7	39,8	39,5	39,1	38,8	38,5	38,3	38,2	38,0	22,7	15,4	12,1	10,6	9,90	9,60
6	4,20	22,0	31,4	35,5	36,8	37,0	36,7	36,4	36,1	35,8	35,6	35,4	35,3	22,0	15,5	12,4	10,9	10,2	9,90
7	2,50	24,2	34,7	39,1	40,4	40,5	40,2	39,8	39,4	39,2	39,0	38,8	38,7	23,3	15,9	12,4	10,8	10,1	9,70
8	4,40	24,7	34,6	38,7	40,0	40,1	39,8	39,4	39,1	38,8	38,6	38,5	38,3	22,8	15,7	12,4	10,9	10,2	9,90
9	2,50	24,2	34,8	39,2	40,6	40,7	40,4	40,0	39,6	39,3	39,1	39,0	38,8	23,5	16,0	12,5	10,9	10,1	9,80
10	4,20	24,7	34,7	38,8	40,1	40,1	39,8	39,5	39,1	38,9	38,7	38,5	38,4	22,8	15,7	12,4	10,9	10,2	9,80
11	4,40	24,6	34,2	38,1	39,2	39,3	39,0	38,7	38,4	38,1	37,9	37,8	37,7	22,1	15,2	12,1	10,6	9,90	9,60
12	2,50	24,2	34,7	39,1	40,5	40,6	40,3	39,9	39,6	39,3	39,1	38,9	38,8	23,5	16,0	12,5	10,9	10,2	9,80
13	2,50	23,6	33,9	38,2	39,7	39,8	39,5	39,1	38,8	38,5	38,3	38,1	38,0	23,1	15,9	12,5	10,9	10,2	9,80
14	4,40	24,2	33,8	37,8	39,2	39,3	39,0	38,7	38,3	38,1	37,9	37,7	37,6	22,4	15,6	12,4	10,9	10,2	9,90
15	2,50	21,5	31,5	35,9	37,3	37,5	37,2	36,9	36,5	36,2	36,0	35,9	35,7	22,7	15,8	12,5	10,9	10,2	9,80
16 = Σ	3,70	23,3	32,7	36,6	37,9	38,0	37,8	37,4	37,1	36,9	36,7	36,5	36,4	21,8	15,1	12,0	10,5	9,80	9,50

Полученные графики температуры бетона образуют температурно-временную историю по каждому выделенному блоку и по всей конструкции в целом. На основе этой информации и существующих эмпирических данных о кинетике твердения бетона при различной температуре выдерживания программа анализирует прочность бетона в процессе прогрева. В программе содержатся графики твердения, набора прочности разных по составу бетонов при определенных неизменных температурах выдерживания. Также существуют графические данные о кинетике тепловыделения при экзотермии бетона. Сопоставляя графики существующей температуры прогрева и эмпирических данных о наборе прочности при температурном выдерживании, программа выдает график набора прочности бетона в процентах от марочной прочности.

Марочная прочность бетона (R_m) – прочность на сжатие, наступающая через 28 суток с обеспеченностью 0,95, для бетонного образца стандартной формы, твердеющего в нормальных условиях. Данная прочность зависит от класса бетона: чем выше класс, тем большую прочность может набрать бетон. Благодаря прогреву бетона происходит интенсификация набора прочности. На рисунке 9 показан график набора прочности бетона в разных блоках в процентном соотношении от марочной прочности ($\%R_m$).

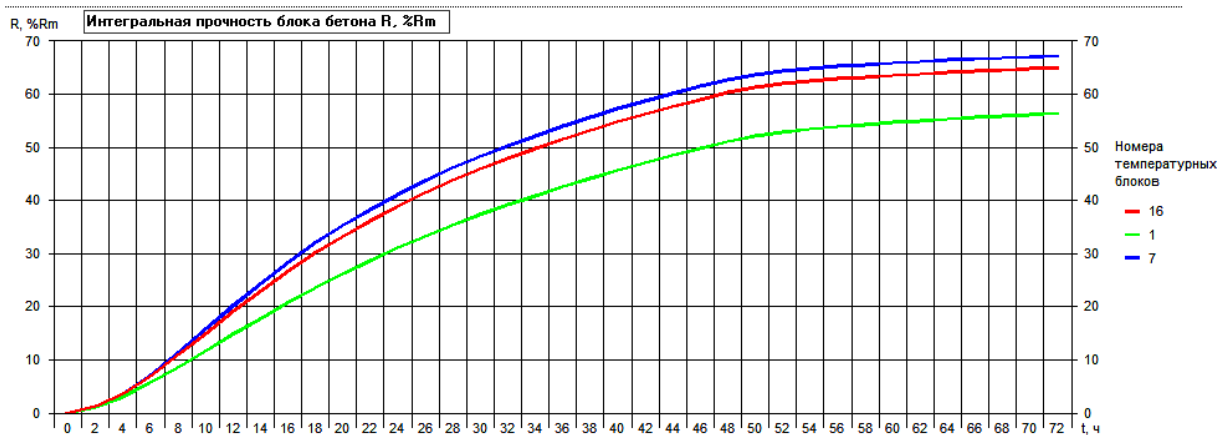


Рисунок 9. График набора прочности бетона на различных участках конструкции в процентном соотношении от марочной прочности бетона

Данные графики показывают скорость набора прочности бетона в некоторых блоках перекрытия. Проанализировав результаты компьютерного просчета, можно сделать вывод, что выбранный метод прогрева в целом является эффективным. Однако следует обратить внимание на некоторую неравномерность: график зеленого цвета показывает характер прогрева в области возле стены с большими теплопотерями. Итоговая прочность бетона в этой зоне меньше на 10–15 %, а температура прогрева ниже на 10 °С. Наибольшую опасность вызывает ситуация после 12 часов прогрева: в это время устанавливается максимальный градиент температуры, равный 10 °С, в то же время бетон успевает набрать только 15 % марочной прочности в самой холодной зоне. То есть для данной конструкции в области примыкания к холодным стенам бетон имеет прочность на сжатие $R = 5$ МПа после 12 часов прогрева. Следует решить задачу о температурных деформациях и напряжениях в данный момент времени. Неравномерность прогрева и увеличение объема при нагревании являются отрицательными факторами в данном случае.

В целом в зонах предполагаемых больших теплопотерь рекомендуется увеличение мощности прогрева для компенсации количества теплоты, уходящего в окружающую среду. То есть в зонах прилегания конструкции к неутепленной опалубке, наружным стенам, выпускам арматуры требуется уменьшить шаг укладки греющего провода. Данные меры позволяют выравнивать температуру прогрева по всей площади конструкции, избежать зон с низкими температурами, уменьшить напряжения от неравномерности прогрева.

Таблица 2. Изменение прочности бетона во время прогрева

Номер участка	Прочность бетона на различных участках прогрева во время температурного выдерживания, %Rm																		
	Время температурного выдерживания, ч																		
	Время прогрева, ч													Время остывания, ч					
	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72
1	0	3,10	8,60	14,8	20,8	26,2	31,1	35,4	39,2	42,6	45,7	48,5	51,1	52,8	53,9	54,7	55,3	55,9	56,5
2	0	3,80	11,0	18,9	26,3	32,7	38,2	42,9	47,0	50,6	53,8	56,7	59,3	60,9	61,8	62,5	63,0	63,5	64,0
3	0	4,00	11,7	20,3	28,3	35,1	40,9	45,8	50,0	53,7	56,9	59,8	62,3	64,0	64,9	65,5	66,0	66,4	66,9
4	0	3,60	10,7	18,7	26,2	32,7	38,3	43,1	47,2	50,9	54,1	57,0	59,6	61,3	62,2	62,8	63,3	63,8	64,3
5	0	3,70	11,3	20,0	27,9	34,8	40,6	45,5	49,7	53,4	56,6	59,5	62,0	63,7	64,6	65,2	65,7	66,2	66,6
6	0	3,50	10,3	18,2	25,7	32,2	37,8	42,5	46,7	50,3	53,6	56,4	59,0	60,8	61,7	62,4	63,0	63,5	64,0
7	0	3,70	11,4	20,2	28,3	35,3	41,1	46,1	50,3	54,0	57,3	60,1	62,7	64,4	65,3	65,9	66,4	66,8	67,3
8	0	4,00	11,7	20,3	28,3	35,2	41,0	45,9	50,1	53,8	57,0	59,9	62,4	64,1	65,0	65,6	66,1	66,5	67,0
9	0	3,70	11,4	20,3	28,4	35,4	41,3	46,2	50,5	54,2	57,4	60,3	62,9	64,5	65,4	66,0	66,5	67,0	67,4
10	0	4,00	11,7	20,4	28,4	35,3	41,0	45,9	50,2	53,8	57,1	59,9	62,5	64,1	65,0	65,6	66,1	66,6	67,0
11	0	4,00	11,6	20,1	28,0	34,7	40,4	45,2	49,4	53,1	56,3	59,2	61,7	63,4	64,3	64,9	65,4	65,8	66,3
12	0	3,70	11,4	20,2	28,3	35,3	41,2	46,1	50,4	54,1	57,3	60,2	62,8	64,5	65,4	66,0	66,5	66,9	67,4
13	0	3,60	11,1	19,7	27,7	34,6	40,4	45,3	49,6	53,2	56,5	59,4	62,0	63,6	64,6	65,2	65,7	66,2	66,6
14	0	3,90	11,4	19,9	27,7	34,5	40,2	45,1	49,3	52,9	56,2	59,0	61,6	63,3	64,2	64,8	65,3	65,8	66,2
15	0	3,30	10,1	18,1	25,7	32,3	38,0	42,8	47,0	50,7	53,9	56,8	59,4	61,2	62,2	62,9	63,4	64,0	64,4
16 = Σ	0	3,70	10,9	19,1	26,7	33,3	38,9	43,8	47,9	51,6	54,8	57,7	60,3	62,0	62,9	63,5	64,1	64,5	65,0

3. Решение задачи о деформациях и перемещениях при прогреве конструкции перекрытия

Для решения задачи о температурных деформациях взята стационарная задача термодинамики в момент времени 12 часов. Расчет температурных деформаций производится с учетом деформационных характеристик материалов. Учтены модуль упругости, коэффициент Пуассона, модули упругости стали, бетона, кирпичной кладки и алюминия. Также приняты нагрузки от собственного веса конструкций и условия закрепления.

В качестве неподвижного основания взяты обреза кирпичных стен, принята гипотеза о невозможности горизонтального и вертикального смещений массива кирпичной кладки нижележащих этажей здания. Еще одним ограничением в модели является ограничение горизонтальных перемещений оси симметрии конструкции перекрытия.

Расчет деформаций ведется от начальных условий после заливки бетона перекрытия до заданного момента времени. Решением задачи является поле напряжений и характерная форма напряженно-деформированного состояния в масштабе.

Анализ распределения главных напряжений в массиве конструкции перекрытия изображен на рисунке 10.

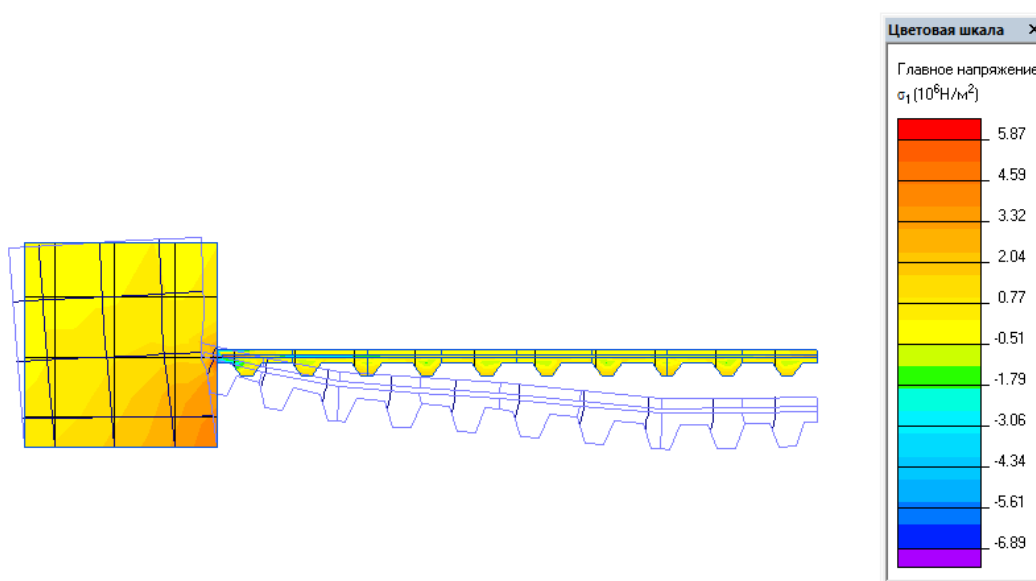


Рисунок 10. Распределение главных напряжений в конструкции после 12 часов прогрева и деформированная схема

Расчет показал, что в процессе нагрева бетон и арматура стремятся к увеличению в объеме. В связи с ограничениями и невозможностью смещения основания стен конструкция перекрытия не имеет резерва для расширения, поэтому прогибается вниз, теряет свою прямолинейность. Результаты расчета показывают незначительность вертикальных деформаций, наибольший прогиб конструкции в середине перекрытия равен 0,12 мм. Программа выдает характер перемещений, изображая деформации в увеличенном масштабе.

На рисунке 10 показаны распределения главных напряжений. Оценив полученные данные, можно сделать вывод, что наиболее напряженным участком перекрытия является зона перекрытия в месте примыкания к кирпичной стене. Именно этот локальный участок концентрирует на себе все напряжение сжатия из-за температурного расширения строительной конструкции. Как видно из данного рисунка, напряжения достигают 6 МПа.

Однако предыдущий расчет показал, что бетон к 12 часам успевает набрать прочность только 5 МПа. То есть при таком методе прогрева и выбранной схеме конструкции возможно трещинообразование по краям перекрытия в зонах примыкания бетона к кирпичным стенам. Результатом решения двух смежных задач в области термодинамики и сопротивления материалов является определение риска деформаций и повреждений бетонируемой конструкций на протяжении всего процесса прогрева бетона проводом.

В данной работе показан риск возможного трещинообразования через 12 часов после начала прогрева. Следует отметить, что в рамках статьи рассмотрена ситуация, когда перекрытие ограничено кирпичными стенами. Безусловно, в новом строительстве, когда перекрытие ограждено только опалубочной системой, способной деформироваться и воспринимать расширения и усадки бетона от температурных воздействий, таких проблем может не возникнуть. Но когда конструкции перекрытия ограждены кирпичными стенами, не воспринимающими деформации бетона, данная проблема становится актуальной. Такая ситуация складывается при реконструкции исторических зданий, когда старые деревянные перекрытия заменяются на новые монолитные. При бетонировании реконструируемых перекрытий в зимнее время с интенсивным прогревом и увеличенной температурой выдерживания возникает проблема трещинообразования на поверхности бетона и в зонах примыкания перекрытия к стенам.

Решением данной проблемы может быть использование демпферных лент, закрепленных по периметру бетонируемых конструкций перекрытия. Демпферные ленты, выполненные из вспененного полиэтилена, используются для компенсации расширения бетонных и цементных стяжек. Аналогичное их использование при бетонировании перекрытий в условиях реконструкции с прогревом бетона выглядит в некоторых случаях необходимым элементом для создания качественных строительных конструкций.

Заключение

В рамках работы произведены следующие расчеты и сделаны выводы.

1. Произведен анализ существующей нормативной документации и методик прогрева бетона греющим проводом. Методики приводят к различным результатам, расчеты приблизительны и не дают полной картины процесса прогрева и набора прочности бетона.

2. Решена задача о наборе прочности бетона и о распределении температурных полей по сечению конструкции монолитного перекрытия. Сделан вывод о некоторой неравномерности прогрева и наличии температурных градиентов. Оценены наиболее опасные моменты прогрева.

3. В самом неблагоприятном периоде прогрева решена задача о температурных деформациях и напряжениях в конструкции перекрытия. В качестве вывода отмечено, что существует риск трещинообразования, так как напряжения от температурного расширения превышают набранную прочность бетона в локальных участках.

4. Найден один из путей решения данной проблемы. Для снижения риска трещинообразования предложено использование демпферных лент, обеспечивающих компенсацию расширения бетона.

Таким образом, решена новая научная задача. В то же время моделирование выполнено с определенными начальными граничными условиями, а решение задачи является теоретическим с применением программного комплекса ELCUT и рассматривает только одну конкретную ситуацию. Для доказательства и обоснования полученных результатов требуются дальнейшие исследования и натурные испытания.

Литература

1. Крылов Б.А. Монолитное строительство, его состояние и перспективы совершенствования // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. № 4(159). С. 35–38.
2. Головнев С.Г. Зимнее бетонирование: этапы становления и развития // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. С. 529–534.
3. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. М.: Стройиздат, 1975. 700 с.
4. Невелева Н.И., Шатов А.Н. Противоморозные добавки для бетонов // Гидротехника. 2009. №1. С. 84–86.
5. Толкынбаев Т.А., Головнев С.Г., Торпищев Ш.К. Добавка для зимнего бетонирования монолитных сооружений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Т. 13. №2. С. 34–37.
6. Yilmaz U.S., Turken H. The effects of various curing materials on the compressive strength characteristic of the concretes produced with multiple chemical admixtures // Scientia Iranica. 2012. Vol.19. No.1. Pp.77–83.
7. Demirboga R., Karagöl F., Polat R., Kaygusuz M.A. The effects of urea on strength gaining of fresh concrete under the cold weather // Construction and Building Materials. 2014. No.64. Pp. 114–120.
8. Karagöl F., Demirboga R., Kaygusuz M.A., Yadollahi M.M., Polat R. The influence of calcium nitrate as antifreeze admixture on the compressive strength of concrete exposed to low temperatures // Cold Regions Science and Technology. 2013. No.89. Pp. 30–35.
9. МДС 12-48.2009 «Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов»
10. Kishar E.A., Ahmed D.A., Mohammed M. R., Noury R. Effect of calcium chloride on the hydration characteristics of ground clay bricks cement pastes // Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences. 2013. Vol. 2. No.2. Pp. 20–30.
11. Zach J., Sedlmajer M., Hroudova J., Nevařil A. Technology of concrete with low generation of hydration heat // Procedia Engineering. 2013. No.65. Pp. 296–301.
12. Вальт А.Б., Овчинников А.А. Способы термообработки бетона при возведении монолитных конструкций // Известия Калининградского государственного технического университета. 2008. №13. С. 109–112.
13. Арбенев А.С. Зимнее бетонирование с электроразогревом смеси. М.: Стройиздат, 1970. 103 с.

14. Fedorova G., Mestnikov V., Matveeva O., Nikolayev E. Features of High-Strength Concrete Creation for Concreting of Monolithic Constructions in the Far North Conditions // Procedia Engineering. 2013. No.57. Pp. 264–269.
15. Корытов Ю.А. Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов // Механизация строительства. 2010. №3. С. 14–20.
16. Сысоев А.К. Технология зимнего бетонирования с помощью гибких нагревательных элементов // Инженерный вестник Дона. 2013. Т. 27. №4. С. 279.
17. Золотухин С.Н., Горюшкин А.Н. Бетонирование при отрицательных температурах // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. 2012. №1. С. 81–85.
18. ТСН 12-336-2007 Производство бетонных работ при отрицательных температурах среды на территории Республики Саха (Якутия)
19. СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87».
20. Зиневич Л.В. Применение численного моделирования при проектировании технологии обогрева и выдерживания бетона монолитных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2. С. 24–28.
21. Журов Н.Н., Комиссаров С.В. Система температурно-прочностного контроля бетона в раннем возрасте // Вестник МГСУ. 2010. Вып.5. №4. С. 296–301.
22. Семенов К.В., Барабанщиков Ю.Г. Термическая трещиностойкость массивных бетонных фундаментных плит и ее обеспечение в строительный период зимой // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №2(17). С. 125–135.
23. Bofang Z. Construction of Mass Concrete in Winter. In: Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete. Butterworth-Heinemann: Tshingua University Press, 2014. Pp. 425–430.
24. Bofang Z. Temperature Control of Concrete Dam in Cold Region. In: Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete. Butterworth-Heinemann: Tshingua University Press, 2014. Pp. 431–438.
25. Nassif A.Y., Petrou M.F. Influence of cold weather during casting and curing on the stiffness and strength of concrete // Construction and Building Materials. 2013. No.44. Pp. 161–167.
26. Головнев С.Г., Пикус Г.А., Мозгалёв К.М., Савинов С.А. Компьютерный контроль и регулирование процессов выдерживания бетона в зимних условиях // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2010. Вып. 2. С. 75–78.
27. Доладов М.Ю. Доладов Ю.И. Программа для расчета обогрева бетона при зимнем бетонировании // Строительный вестник Российской инженерной академии. 2006. Выпуск 7. С. 52–56.

*Максим Олегович Дудин, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(931)2649496; эл. почта: maxim6892@yandex.ru*

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

*Юрий Германович Барабанщиков, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +(812)5341286; эл. почта: ugb@mail.ru*

© Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г., 2015

doi: 10.5862/MCE.54.5

Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

*Заведующий лабораторией теплофизических исследований А.Б. Крутилин;
заведующий отделом ограждающих конструкций Ю.А. Рыхленок,
РУП «Институт БелНИИС»;
младший научный сотрудник В.В. Лешкевич,
Белорусский национальный технический университет*

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик автоклавных ячеистых бетонов плотностью 400 и 500 кг/м³.

Определены зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры и влажности. Установлены граничные влажности, при которых при отрицательных температурах в порах материалов лед не образуется или его количество незначительно. Предложен новый способ определения коэффициентов термовлагопроводности. Установлено, что при отрицательных температурах образцов ячеистого бетона с влажностью более 30 % по массе одним из основных механизмов перемещения влаги является термовлагопроводность.

По результатам испытаний ячеистого бетона на морозостойкость выполнена приблизительная оценка влияния влажности на долговечность наружных стен.

Ключевые слова: ячеистый бетон; теплопроводность; термовлагопроводность, долговечность

Введение

Для эффективного использования теплозащитного потенциала строительных материалов необходимо такое конструктивное исполнение наружных стен, при котором они в течение каждого годового отопительного периода будут иметь минимальные влажности и, соответственно, минимальные коэффициенты теплопроводности. Однако сокращение сроков строительства зданий приводит к возведению наружных стен с материалами, имеющими технологическую и строительную влажность. Во многих случаях данные влажности значительно превышают расчетные массовые отношения влаги этих материалов, принимаемые при теплотехнических расчетах.

Подобные проблемы выявлены и при эксплуатации наружных стен из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения низкой плотности ($\rho = 400$ и 500 кг/м³). Сегодня в Республике Беларусь в первые годы эксплуатации в зданиях наблюдаются дефекты, вызванные исчерпанием ресурса морозостойкости вследствие повышенной влажности ячеистого бетона. С целью определения долговечности (здесь и далее по тексту под термином «долговечность» принят срок службы ограждающей конструкции до разрушения или повреждения ее части вследствие исчерпания ресурса морозостойкости) необходимы данные как по показателям морозостойкости, так и по теплофизическим характеристикам материалов, с помощью которых возможно прогнозирование влажностного режима наружных стен зданий.

Исследования для прогнозирования долговечности наружных ограждающих конструкций выполнены во многих работах, начиная с середины прошлого века, и ведутся по настоящее время [1–7 и др.]. Многочисленные исследования направлены на изучение долговечности теплоизоляционных материалов в условиях эксплуатации ограждающих конструкций.

По оценке долговечности используемые подходы можно условно разделить на три группы:

- на основании результатов натурных обследований и испытаний;
- по результатам испытаний в климатических камерах;
- на основании расчетов по известным характеристикам материалов с учетом прогнозируемого тепловлажностного состояния ограждающей конструкции за многолетний период эксплуатации.

Несмотря на несомненную ценность и актуальность натурных обследований и испытаний ограждающих конструкций в климатических камерах, полученные данные не всегда можно

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

распространять на схожие конструкции, имеющие отличия в используемых материалах. Нет единого подхода при переходе от результатов, полученных в климатических камерах, к реальным срокам долговечности. Проводимые эксперименты в климатических камерах зачастую выполняются с определенными влажностями материалов, что не может охватить весь необходимый диапазон их возможных значений, например, при оценке влияния технологической (строительной) влаги на долговечность.

В связи с вышеизложенным для оценки долговечности наружных стен зданий из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения низкой плотности ($\rho = 400$ и 500 кг/м^3) в настоящей работе за основу была принята методика С.В. Александровского [3] с некоторыми незначительными отклонениями.

Для определения долговечности наружных стен по данной методике необходимы не только данные по морозостойкости материалов, но и прогнозирование влажностного режима с определением массовых влажностей материалов в зоне промерзания конструкций. Для этого нужны теплофизические характеристики материалов, основные из которых:

- зависимость коэффициента теплопроводности от влажности в области положительных и отрицательных температур;
- коэффициенты паропроницаемости;
- показатели, определяющие движение жидкой влаги в изотермических и неизотермических условиях;
- изотермы сорбции материалов.

В настоящей работе приведена часть экспериментальных данных для ячеистого бетона низкой плотности ($\rho = 400$ и 500 кг/м^3).

Влияние влажности на коэффициент теплопроводности ячеистого бетона

Несмотря на то, что вопрос зависимости теплопроводности от влажности считается достаточно изученным [8–15], данные для ячеистого бетона низкой плотности ($\rho = 400$ и 500 кг/м^3) в области отрицательных температур ограничены. Некоторые данные приведены в работах [8] и [14].

Экспериментальные исследования выполнены на образцах, предоставленных ОАО «Управляющая компания холдинга «Забудова» (далее – тип 3), в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ) на установке для измерения теплопроводности типа NETZSCH HFM 436 Lambda. Экспериментальные данные приведены на рисунках 1 и 2. Следует отметить, что при больших влажностях материалов вид графиков в области отрицательных температур может иметь отличия (иметь скачок при возникновении льда в порах).

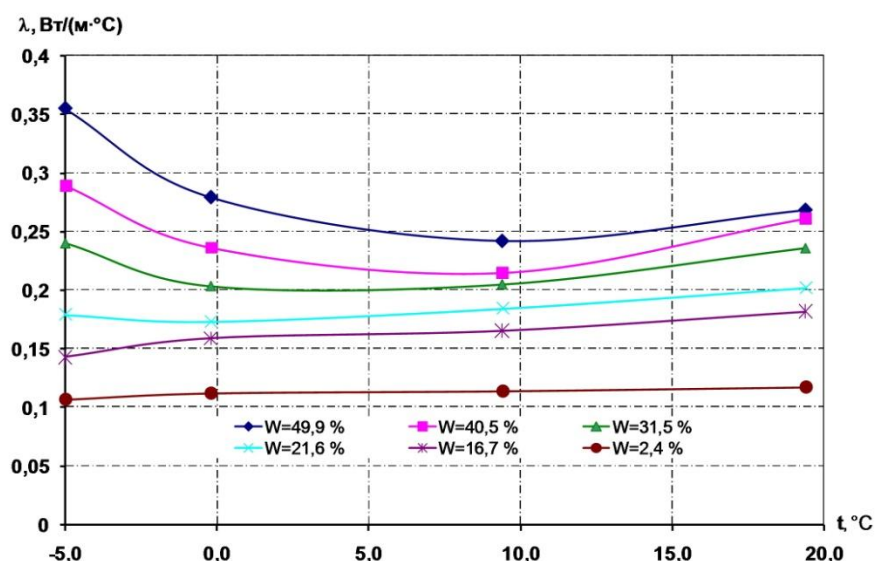


Рисунок 1. Зависимость коэффициента теплопроводности ячеистого бетона ($\rho = 400 \text{ кг/м}^3$) от температуры и массовой влажности

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

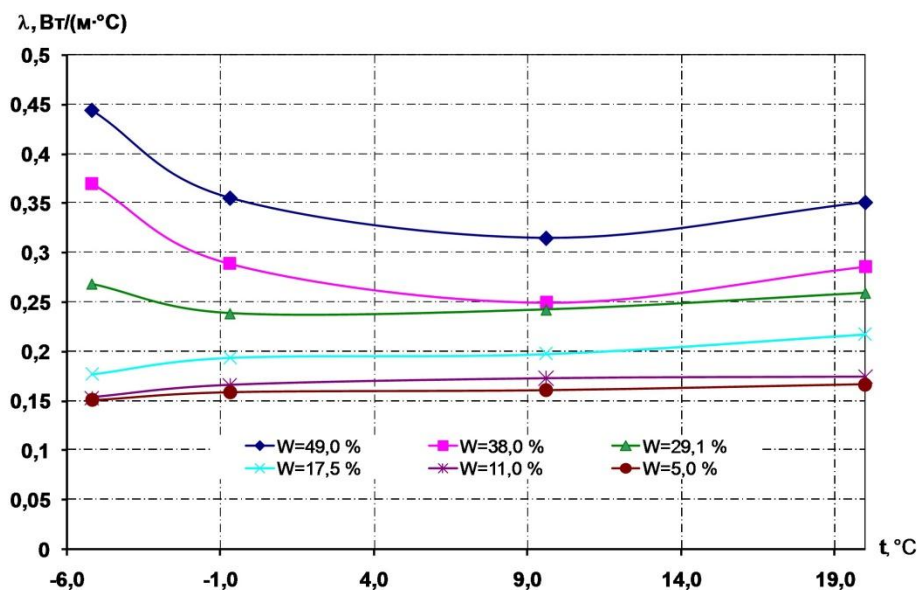


Рисунок 2. Зависимость коэффициента теплопроводности ячеистого бетона ($\rho = 500 \text{ кг/м}^3$) от температуры и массовой влажности

Для отрицательных температур увеличение коэффициента теплопроводности происходит при массовой влажности ячеистого бетона $W \approx 20 \%$ для плотности $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ и более; $W = 17,5 \%$ для плотности $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$, что связано с началом образования льда в порах материалов.

С понижением температуры коэффициенты теплопроводности ячеистого бетона в зависимости от влажности могут как увеличиваться, так и уменьшаться. Это позволяет определить граничные влажности, при которых при отрицательных температурах в порах материалов лед не образуется или его количество незначительно.

Коэффициенты изотермической влагопроводности ячеистого бетона при положительных и отрицательных температурах

Исследования влияния влажности на коэффициент изотермической влагопроводности ячеистого бетона выполняли на образцах типа 3 плотностью $\rho = 400$ и 500 кг/м^3 .

Образцы увлажнялись водой до влажности, близкой к 20, 35, 45 и 60 % по массе, и упаковывались со всех сторон в полиэтиленовую пленку. В таком состоянии образцы выдерживались в условиях, близких к изотермическим, для равномерного перераспределения жидкой влаги по их толще. Температуры образцов для проведения эксперимента приняты $t = +20 \text{ °С}$ и $t = -5 \text{ °С}$.

После выдержки в изотермических условиях образцы с влажностью, близкой по показателям, стыковались методом разрезной колонки друг с другом и со всех сторон влагоизолировались полиэтиленовой пленкой. После определенной временной выдержки в изотермических условиях для принятых температур образцов колонки периодически разбирали, образцы взвешивали и собирали заново. Коэффициенты изотермической влагопроводности для различных температур определяли по формуле:

$$\beta_W = \frac{G_W}{\frac{dw}{dx}}, \quad (1)$$

где G_W – количество влаги, проходящей через 1 м^2 площади в 1 час, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; dw/dx – перепад массовой влажности по длине образца, $\%/м$.

Зависимости коэффициентов изотермической влагопроводности в зависимости от влажности для различных температур приведены на рисунках 3 и 4.

Результаты экспериментальных исследований изотермической влажопроводности ячеистого бетона показали, что при отрицательных температурах также имеется перемещение влаги из-за наличия незамерзшей воды в порах материалов. Для области положительных температур перемещение воды в образцах наблюдается при влажностях $W > 17\%$ по массе для ячеистого бетона плотности $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ и при $W > 20\%$ по массе для ячеистого бетона плотности $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$. Для области отрицательных температур перемещение воды в образцах наблюдается при влажности $W > 37\%$ по массе для ячеистого бетона плотности $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ и $W > 45\%$ по массе для ячеистого бетона плотности $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$. Результаты показывают значительное влияние температуры и плотности материала на коэффициент изотермической влажопроводности.

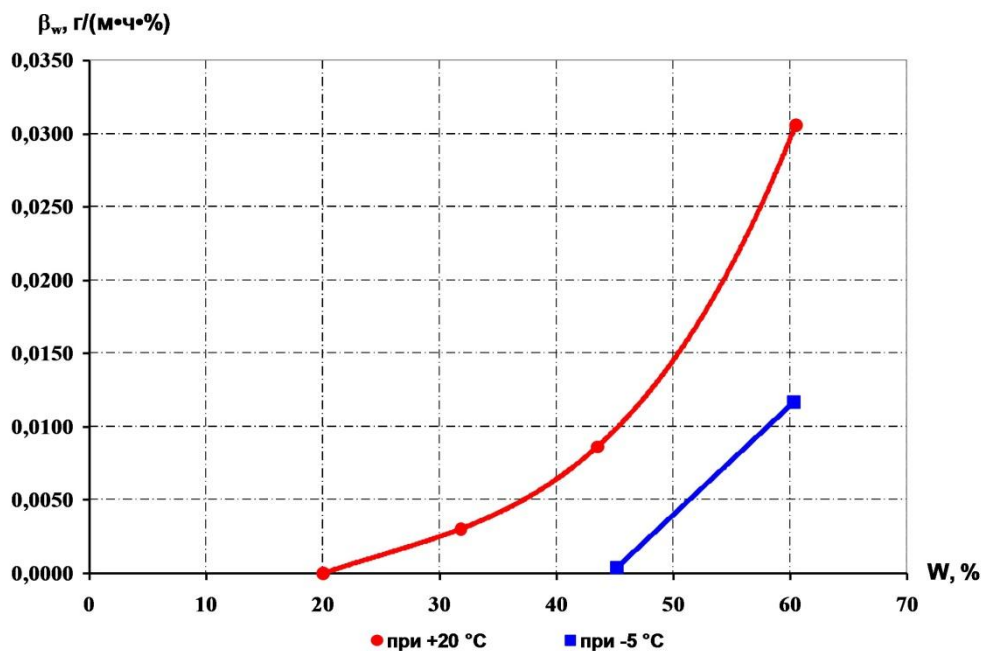


Рисунок 3. Коэффициенты изотермической влажопроводности ячеистого бетона ($\rho = 400 \text{ кг/м}^3$) в зависимости от влажности

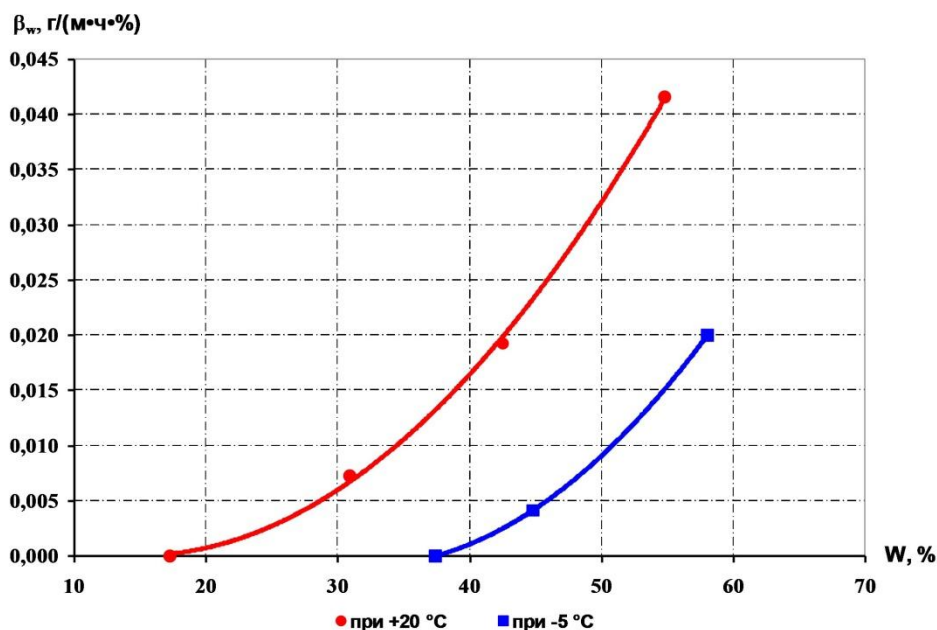


Рисунок 4. Коэффициенты изотермической влажопроводности ячеистого бетона ($\rho = 500 \text{ кг/м}^3$) в зависимости от влажности

Определение коэффициентов термовлагопроводности в образцах ячеистого бетона

При эксплуатации наружных стен с повышенной влажностью ячеистого бетона при наличии градиента температуры возможно также движение влаги по сечению стены за счет механизма термовлагопроводности.

Впервые данный механизм движения влаги установил А.В. Лыков [16] в середине прошлого века. Исследования по изучению этого механизма велись преимущественно в области сушки материалов вследствие наличия при протекании данных процессов значительных градиентов температуры. Определение термоградиентных коэффициентов строительных материалов производилось преимущественно советскими учеными до конца 1990-х годов. Данные по их величинам, а также исследования их зависимостей для ячеистых бетонов низких плотностей ограничены, а для отрицательных температур образцов не найдены.

Определение термоградиентных коэффициентов предлагалось различными способами, обзор которых приведен в работе [17]. Выделяют стационарные методы, заключающиеся в выдержке влагоизолированного образца между двумя термостатами до установления момента стационарного температурного и влажностного состояния, после чего по кривым распределения влагосодержания и температуры по длине образца рассчитывают термоградиентный коэффициент. Недостаток стационарных методов – длительность проведения испытаний, при которых постоянно необходимо производить монтаж и демонтаж образцов. Нестационарные методы определения термоградиентного коэффициента, как правило, требуют специально разработанного оборудования, но проводятся значительно быстрее. Разработанные методы использовались преимущественно в области положительных температур образцов.

Зарубежными исследователями за последние 20 лет выполнены исследования по влиянию градиентов температуры на перенос влаги через материалы [18, 19] преимущественно в области их сорбционного увлажнения. Работы вызвали неоднозначную реакцию по корректности выполненных экспериментальных исследований и необходимости учета градиента температуры на перенос влаги через (в) материалы при прогнозировании влажностного режима наружных ограждающих конструкций [20, 21].

Результаты исследований зарубежных авторов [16–25], а также работы К.Ф. Фокина, В.Н. Богословского, В.И. Лукьянова, В.Г. Гагарина и других исследователей предполагают различные модели для прогнозирования влажностного режима ограждающих конструкций и, соответственно, различные способы для определения коэффициентов переноса влаги через (в) капиллярно-пористые тела.

При раздельном учете основных механизмов переноса влаги в модели прогнозирования влажностного режима наружных ограждающих конструкций предлагается вместо термоградиентного коэффициента определять коэффициент термовлагопроводности (по аналогии с коэффициентом влагопроводности):

$$\beta_t = \frac{G_t}{\frac{dt}{dx}}, \quad (2)$$

где G_t – количество влаги, проходящей через 1 м^2 площади за 1 час за счет термовлагопроводности, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; dt/dx – перепад температуры по длине образца, $^\circ\text{C}/\text{м}$.

Проведены эксперименты на состыкованных образцах (разрезная колонка) с разными, но близкими по величине массовыми влажностями. Для создания «теплой» и «холодной» поверхностей использована установка для измерения теплопроводности типа "NETZSCH HFM 436 Lambda" в БНТУ.

Перед стыковкой образцы ячеистого бетона с различными влажностями упаковывали в полиэтиленовую пленку и выдерживали не менее двух недель в условиях, близких к изотермическим. После выдержки составляли колонки, которые со всех сторон влагоизолировали полиэтиленовой пленкой и устанавливали в обойму из экструзионного полистирола.

Колонки выдерживали при перепаде температуры между плитами установки $\Delta t \approx 15 \text{ }^\circ\text{C}$. При проведении эксперимента колонки периодически разбирали, образцы взвешивали и колонки собирали заново для определения установившегося потока влаги между образцами. Время между взвешиваниями составляло не менее суток, а общее время эксперимента – не менее трех суток.

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

Определение перепадов температур по длине разрезной колонки выполнялось методом последовательного приближения по известным массовым влажностям образцов и известным температурам на «теплой» и «холодной» плитах прибора. Коэффициенты теплопроводности образцов ячеистого бетона колонки рассчитывали в зависимости от их средней температуры и влажности (см. рис. 1 и 2). Количество влаги за счет термовлагопроводности определяли, выделяя из общего потока влаги потоки за счет влагопроводности и паропроницаемости.

Результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициентов термовлагопроводности ячеистого бетона от влажности при средней температуре образцов $t \approx -5^\circ\text{C}$ приведены на рисунках 5 и 6.

Из экспериментальных зависимостей видно, что для разных значений плотности материала значительное увеличение коэффициентов термовлагопроводности происходит при влажности, превышающей 30 % по массе. При влажности менее 20 % поток влаги через единицу площади материала сопоставим с потоком водяного пара для условий выполнения эксперимента. При влажности материала более 40 % по массе и средней температуре образцов $t \approx -5^\circ\text{C}$ коэффициенты термовлагопроводности на порядок превышают коэффициенты изотермической влагопроводности.

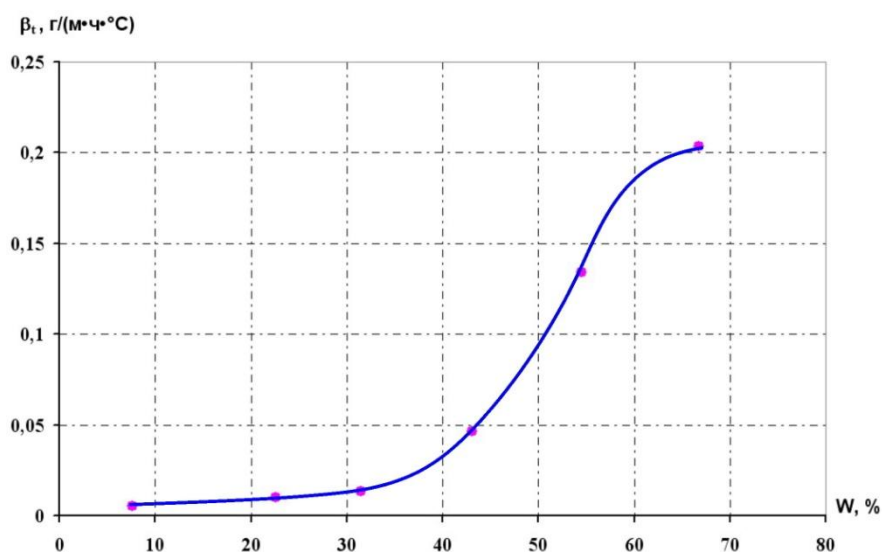


Рисунок 5. Коэффициенты термовлагопроводности ячеистого бетона ($\rho = 400 \text{ кг/м}^3$) в зависимости от влажности при средней температуре образцов $t \approx -5^\circ\text{C}$

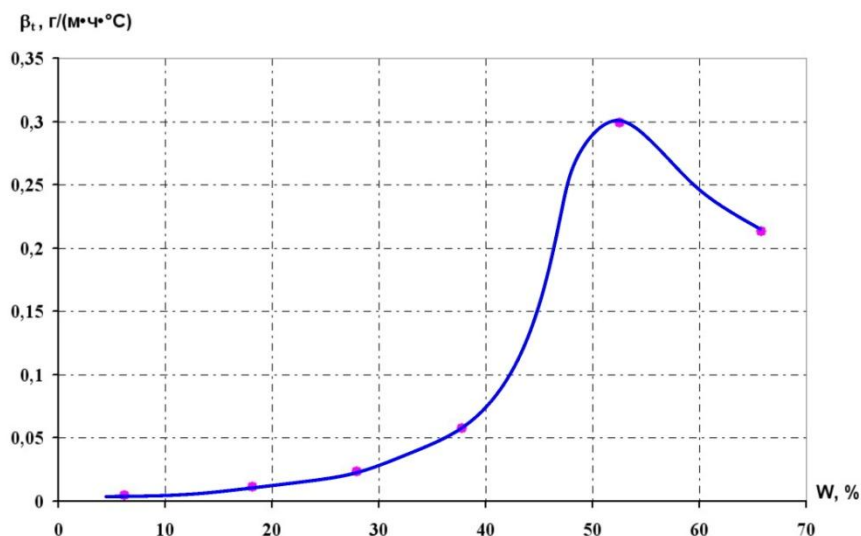


Рисунок 6. Коэффициенты термовлагопроводности ячеистого бетона ($\rho = 500 \text{ кг/м}^3$) в зависимости от влажности при средней температуре образцов $t \approx -5^\circ\text{C}$

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

Влияние влажности на долговечность ячеистых бетонов

Для оценки долговечности ограждающих конструкций из ячеистых бетонов принято использовать понятие «марка по морозостойкости», которое определяется испытанием предварительно водонасыщенных образцов циклами попеременного замораживания и оттаивания. При этом циклы попеременного замораживания и оттаивания образцов ячеистого бетона происходят при определенной влажности ячеистого бетона, которая при измерении его марки по морозостойкости, как правило, неважна. В то же время остается открытым вопрос о возможности исчерпания циклов морозостойкости ячеистого бетона при эксплуатации стен, возведенных из ячеистобетонных блоков с меньшей влажностью.

Для исследований выбраны образцы двух типов: типа З и типа Г. Образцы изготовлены в виде кубов размерами 100х100х100 мм с плотностью $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ и $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$.

Зависимости циклов морозостойкости от влажности для образцов ячеистого бетона типа Г показаны на рисунке 7, для образцов ячеистого бетона типа З – на рисунке 8. Следует отметить, что на рисунке 8 точки, обведенные красными кружками, получены не на основании опытов (по результатам двухлетнего эксперимента они не потеряли прочности и массы), а экстраполяцией с учетом результатов опытов по образцам типа Г. Вертикальными пунктирными линиями показаны граничные влажности материалов, при которых при отрицательных температурах в порах лед не образуется или его количество незначительно (из эксперимента по определению коэффициентов теплопроводности в зависимости от влажности и температуры).

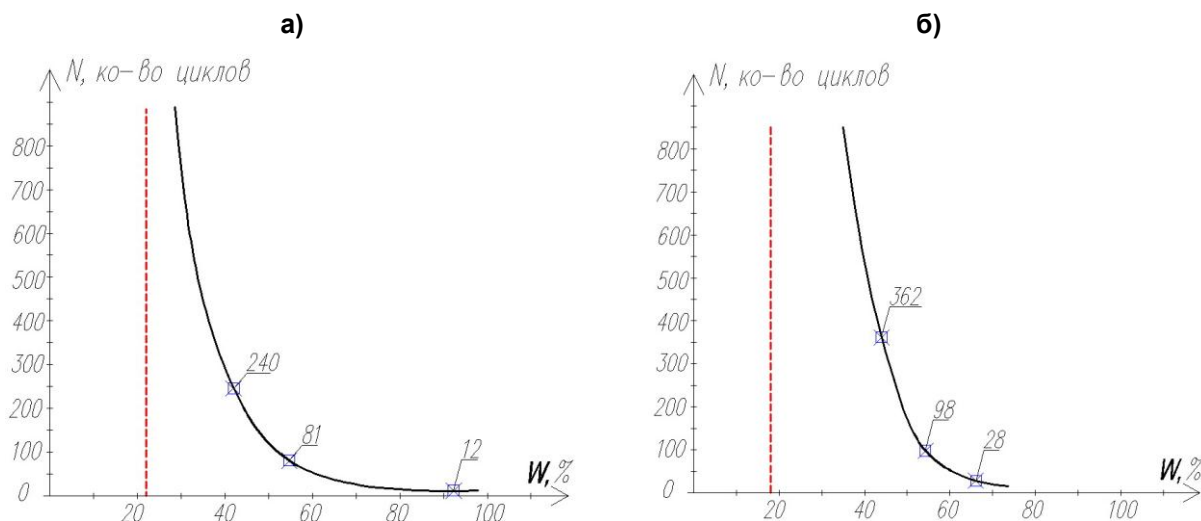


Рисунок 7. Зависимость количества циклов морозостойкости от весовой влажности образцов ячеистого бетона типа Г: а) $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$; б) $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$

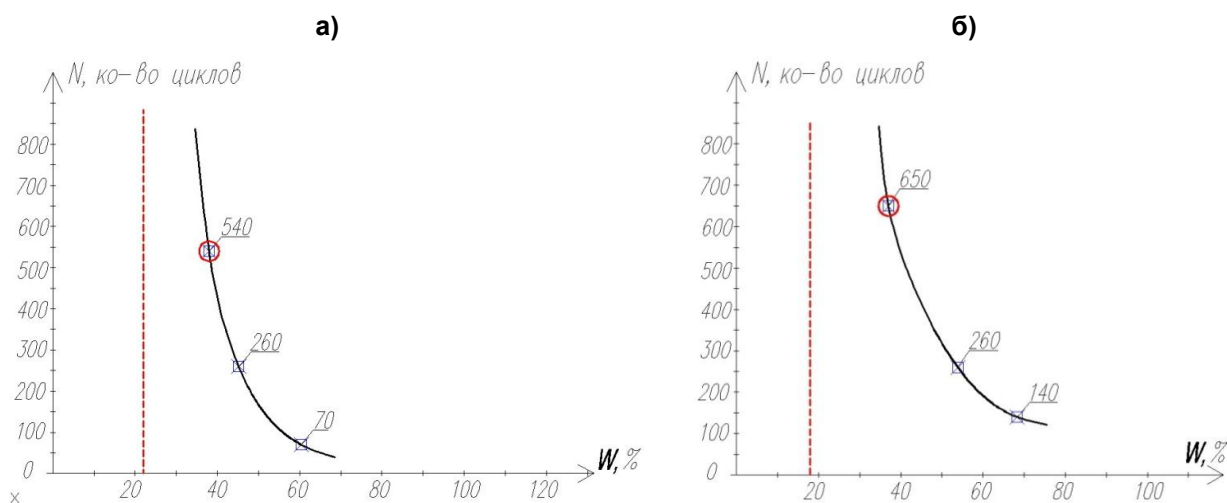


Рисунок 8. Зависимость количества циклов морозостойкости от весовой влажности образцов ячеистого бетона типа З: а) $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$; б) $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

Сравнение образцов типа 3 и Г показало значительное различие в показателях морозостойкости материалов одинаковой плотности. Образцы обоих типов плотностью $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ имеют более высокие показатели морозостойкости в сравнении с образцами плотностью $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$.

По результатам испытаний в зависимости от массовой влажности определена долговечность для климатических условий Республики Беларусь в условных годах эксплуатации (см. рис. 9, 10). При этом приняты определенные (близкие к худшим) условия эксплуатации ячеистого бетона:

- ячеистый бетон в процессе эксплуатации стен зданий не изменяет влажность (в реальных конструкциях влажность изменяется с разной интенсивностью);
- коэффициенты льдистости приняты равными $\xi(t) = 1,0$;
- отделка кладки снаружи выполнена тонкослойными штукатурными покрытиями с низким термическим сопротивлением ($R < 0,2 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$);
- количество переходов через 0°C как максимальное из областей для климатических условий Республики Беларусь.

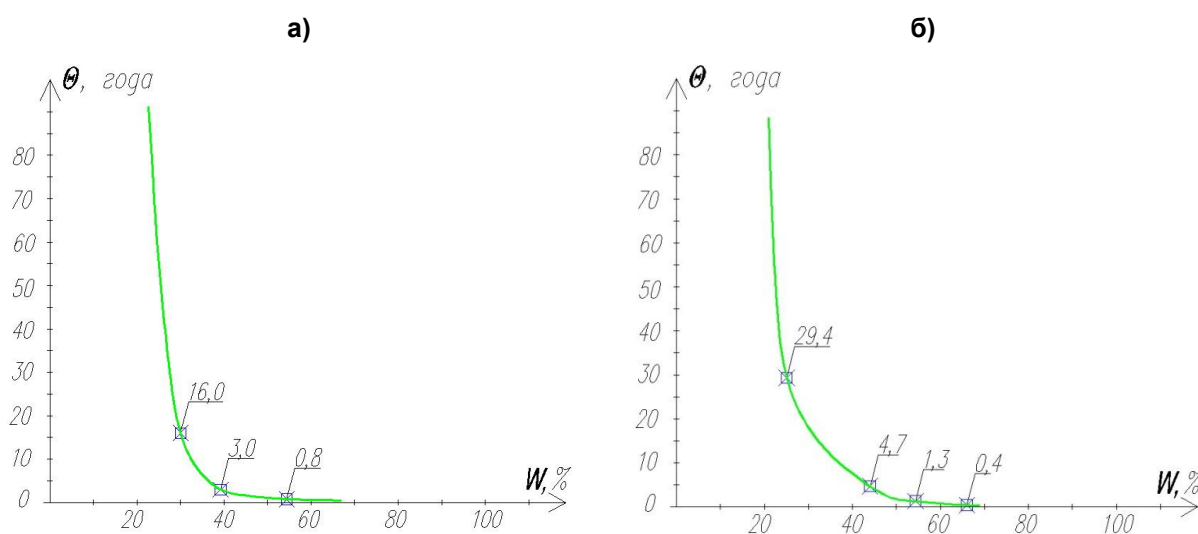


Рисунок 9. Ориентировочное количество лет эксплуатации стен из ячеистого бетона типа Г в зависимости от весовой влажности: а) $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$; б) $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$

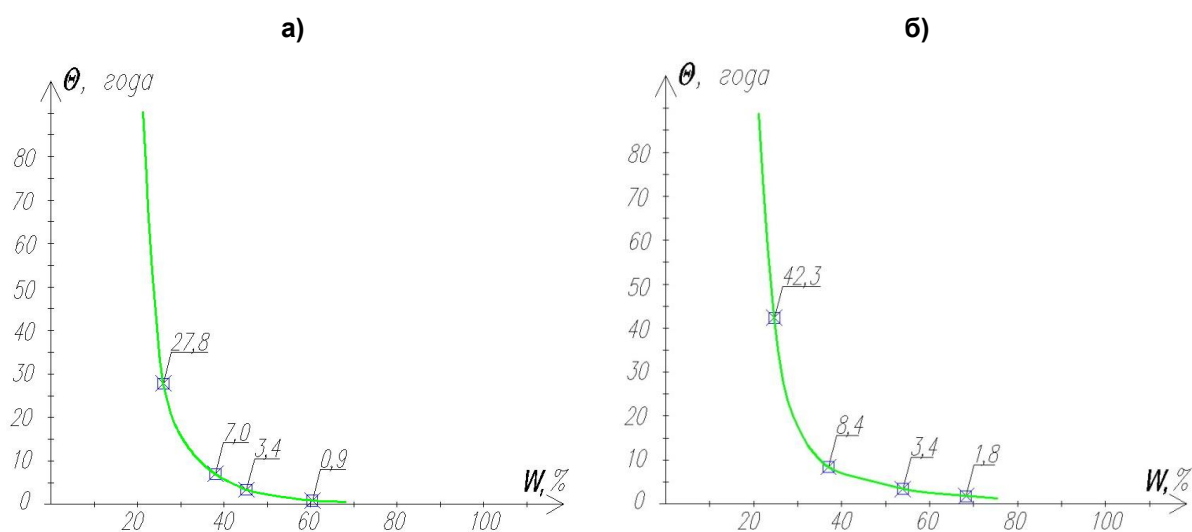


Рисунок 10. Ориентировочное количество лет эксплуатации стен из ячеистого бетона типа 3 в зависимости от весовой влажности: а) $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$; б) $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$

Из графиков видно, что при массовой влажности менее 25 % по массе идет резкое увеличение долговечности наружных стен из ячеистого бетона независимо от его марки по морозостойкости. Образцы с лучшей маркой по морозостойкости (образцы типа 3) имеют лучшие показатели в пределах массовой влажности 30 ... 35 %.

При больших влажностях (более 50 %) долговечность ячеистого бетона резко снижается. Определяющим фактором в таком случае становится марка по морозостойкости. Так, например, при влажности более 50 % по массе ячеистый бетон типа Г разрушается менее чем за 2 года эксплуатации, ячеистый бетон типа 3 – менее чем за 4 года эксплуатации стен. Следует отметить, что в зависимости от вида наружной отделки стены из ячеистого бетона будут иметь различный тепловлажностный режим [26, 27] и, соответственно, отличные от приведенных в данной работе показатели долговечности.

Заключение

1. Экспериментальными исследованиями установлено влияние температуры и влажности на коэффициент теплопроводности ячеистого бетона типа 3 плотностью 400 и 500 кг/м³. На основании полученных данных предлагается определять граничные значения влажности, при которых при отрицательных температурах лед в порах материалов не образуется или его количество незначительно.

2. Установлено, что при отрицательных температурах образцов ячеистого бетона с влажностью более 30 % по массе одним из основных механизмов перемещения влаги является термовлагопроводность. В реальных условиях эксплуатации наружных стен здания, выполненных кладкой из ячеистобетонных блоков с влажностью более 30 %, в зимний период года возможно значительное увеличение влажности материалов наружных защитно-отделочных слоев и снижение долговечности за счет более интенсивного истощения ресурса морозостойкости.

3. Результаты исследований морозостойкости ячеистого бетона показали, что количество циклов замораживания – оттаивания зависит от плотности и влажности образцов. При больших влажностях (более 50 % по массе) долговечность стен из ячеистого бетона резко снижается. Определяющим фактором для данных влажностей материала становится марка по морозостойкости ячеистого бетона. При массовых влажностях менее 25 % по массе идет резкое увеличение долговечности наружных стен из ячеистого бетона независимо от его марки по морозостойкости.

Литература

1. Власов О.Е. Долговечность ограждающих и строительных конструкций (физические основы). М.: Госстройиздат, 1963. 115 с.
2. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
3. Александровский С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций. М.: НИИСФ РААСН, 2003. 332 с.
4. Колотилкин Б.М., Долговечность жилых зданий. М.: Издательство литературы по строительству, 1965. 250 с.
5. Горшков А.С. Оценка долговечности стеновой конструкции на основании лабораторных и натурных испытаний // Строительные материалы. 2008. №8. С. 12–16.
6. Лобов О.И., Ананьев А.И. Долговечность облицовочных слоев наружных стен многоэтажных зданий с повышенным уровнем теплоизоляции // Строительные материалы. 2008. №4. С. 56–59.
7. Ананьев А.А., Козлов В.В., Дуденкова Г.Я., Ананьев А.И. Долговечность лицевого керамического кирпича и камня в наружных стенах зданий // Строительные материалы. 2007. №2. С. 56–58.
8. Низовцев М.И. Тепло- и массообмен в энергоэффективных ограждающих конструкциях и климатическом оборудовании зданий. Автореф. дисс.... докт. техн. наук. Новосибирск, 2011. 39 с.
9. Бове Г. [и др.] Автоклавный ячеистый бетон. Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1981. 87 с.
10. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов. М.: Государственное изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1955. 161 с.
11. Кривицкий М.Я., Левин Н.И., Макаричев В.В. Ячеистые бетоны. Технология, свойства и конструкции. М.: Издательство литературы по строительству, 1972. 137 с.

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

12. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: Научно-исследовательский институт строительной физики Госстроя СССР, 1969. 142 с.
13. Виноградский В.М., Репьев Э.Н., Свейда Я.В. Теплопроводность силикатных ячеистых бетонов при низких отрицательных температурах // Труды института. Выпуск 22. Строительная теплофизика. / НИИСФ Госстроя СССР. М., 1979. С. 103–107.
14. Abid M. Thermophysical Properties of a Moist Porous Material: doctoral dissertation. Von der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig [Электронный ресурс]. URL: http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00022493/Dissertation_Abid.pdf;jsessionid=8FCCAF02C37AFB4231357C0B8B004F32. (дата обращения: 29.12.2014).
15. Hugo H. Applied Building Physics. Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2011. 308 p.
16. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. Минск: Изд-во АН БССР, 1961. 519 с.
17. Дмитриевич А.Д. Теплозащитные свойства строительных материалов и конструкций. Минск: Беларусь, 1963. 212 с.
18. Trabelsi A., Belarbi R., Abahri K., Qin M. Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient. // Building Simulation. 2012. No.3. Pp. 107–115.
19. Ruut P. Moisture Dynamics in Building Envelopes. PhD Thesis Report R-071. 2003. 239 p.
20. Janssen H. A comment to "Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient" // Building Simulation. 2013. No.6. Pp. 103–108.
21. Janssen H. Thermal Diffusion of Water Vapour in Porous Materials: a Critical Review // International Conference on Durability of Building Materials and Components [Электронный ресурс]. Porto, Portugal, April 12-15, 2011. URL: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22318.pdf>. (дата обращения: 28.01.2015).
22. Künzle H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters: doctoral dissertation Universität Stuttgart. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Dissertationen/hk_dissertation_etcm45-30731.pdf. (дата обращения: 25.02.2015).
23. Krus M. Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials - Theoretical Principles and New Test Methods: doctoral dissertation. Universität Stuttgart. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Dissertationen/mk_dissertation_etcm45-30730.pdf. (дата обращения: 25.02.2015).
24. Descamps F. Continuum and discrete modelling of isothermal water and air flow in porous media: doctoral dissertation. KU Leuven/ [Электронный ресурс]. URL: <http://bwk.kuleuven.be/bwf/PhDs/PhDDescamps>. (дата обращения: 25.02.2015).
25. Janssen H. The Influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground: doctoral dissertation. KU Leuven. [Электронный ресурс]. URL: <http://bwk.kuleuven.be/bwf/PhDs/PhDJanssen>. (дата обращения: 25.02.2015).
26. Гринфельд Г.И., Инженерные решения обеспечения энергоэффективности зданий. Отделка кладки из автоклавного газобетона: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 130 с.
27. Гринфельд Г.И., Морозов С.А., Согомонян И.А., Зырянов П.С. Влажностное состояние современных конструкций из автоклавного газобетона в условиях эксплуатации // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2. С. 33–38.

*Антон Борисович Крутилин, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. моб.: +375297540567; эл. почта: ankr@tut.by*

*Юлия Анатольевна Рыхленок, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. моб.: +375291558602; эл. почта: office_3.1@tut.by*

*Владимир Владимирович Лешкевич, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. моб.: +375295772657; эл. почта: leszkiewiczvv@gmail.com*

© Крутилин А.Б., Рыхленок Ю.А., Лешкевич В.В., 2015

doi: 10.5862/MCE.54.6

Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой

*Аспирант А.Б. Стешенко;**д.т.н., заведующий кафедрой А.И. Кудяков,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния модифицирующих добавок на усадочные деформации цементного пенобетона естественного твердения. Цементный пенобетон естественного твердения обладает повышенной усадкой пенобетонной смеси в форме (опалубке) и усадочной деформацией при высушивании. Существенный эффект снижения усадки достигается преимущественно путем управления микроструктурой композита, а именно изменения (ускорения) структурообразования и микроармирования цементного камня.

Для снижения усадки пенобетонной смеси и ускорения структурообразования пенобетонной смеси применялись глиоксаль кристаллический и хризотил-асбестовые волокна. Для приготовления пенобетонной смеси использовался одностадийный способ. Показатели пластической усадки и пластической прочности определяли в течение трех часов с момента заливки пенобетонной смеси в металлический сосуд.

Приведены результаты электронной микроскопии модифицированного пенобетона. В образцах с хризотил-асбестовыми волокнами и глиоксальной добавкой ячеистая структура однородна, поры равномерно заполняют все пространство. При введении в состав пенобетонной смеси хризотил-асбестовых волокон в количестве 2 % от массы цемента и глиоксала кристаллического в количестве 0,01 % от массы цемента пластическая прочность пенобетонной смеси увеличивается на 63 и 45 % соответственно, пластическая усадка снижается до 29 и 40 %, а усадка при высыхании – до 44 и 50 % соответственно.

Ключевые слова: пенобетон; усадочные деформации; хризотил-асбест; глиоксаль кристаллический; прочность.

Введение

При изготовлении бетонных изделий после перемешивания компонентов и уплотнения смеси в результате физико-химического взаимодействия частиц цемента с водой в течение длительного времени (до нескольких месяцев и даже лет) наблюдаются объемные изменения бетона – расширение или усадка. В технологии бетонов этими явлениями стремятся управлять в зависимости от требуемых свойств конечной продукции путем введения добавок, изменяя режимы твердения и т. д. В большинстве случаев на практике процессы расширения и усадки бетона должны быть минимизированы. Особенно это актуально при необходимости обеспечения номинальных геометрических размеров изделий при их заводском изготовлении и конструкций при монолитном строительстве зданий. Существует множество теоретических моделей процессов, объясняющих объемные изменения цементного бетона при твердении. Однако механизм усадки цементных строительных композиций в первые часы естественного твердения пока еще не раскрыт [1–6].

Проблема получения безусадочных ячеистых бетонов естественного твердения до сих пор не решена. Цементный пенобетон естественного твердения обладает повышенной усадкой пенобетонной смеси в форме (опалубке) и усадочной деформацией при высушивании. Согласно ГОСТ 25485-89 усадка при высыхании пенобетонов естественного твердения не должна превышать 3 мм/м. По результатам систематических многолетних натурных обследований конструкций эксплуатируемых зданий ширина раскрытия трещин пенобетонов может достигать 3–5 мм/м [7]. При таких значениях усадки образуются трещины в изделиях и конструкциях стен и создаются аварийные ситуации.

Технология изготовления пенобетона постоянно совершенствуется, вносятся предложения по использованию новых и эффективных добавок, модернизации технологических процессов, что позволяет повысить уровень и стабильность качества стенового материала [8–12]. В настоящее время решением проблемы повышения качества поризованных бетонов занимается много научных коллективов [9, 11, 13–15]. Основная идея этих исследований заключается в поисках эффективных добавок (пластифицирующих, микроармирующих и ускоряющих начальное структурообразование) и способов их селективного введения для модификации пенобетонной смеси. Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой

смеси с целью уменьшения усадочных деформаций и повышения прочности, водостойкости, паропроницаемости пенобетона, а также для повышения теплозащиты и трещиностойкости ограждающих пенобетонных конструкций.

Одной из новых модифицирующих добавок, рекомендуемых в строительном материаловедении для регулирования структурообразования цементных строительных смесей, является кристаллический глиоксаль. Глиоксаль кристаллический обладает высокой химической активностью по отношению к портландцементу. При дозировках глиоксаля более 0.5 % от массы цемента процесс структурообразования цементного теста начинается практически мгновенно, при этом сроки схватывания существенно сокращаются. Ранее проведенными исследованиями была показана целесообразность использования глиоксаля кристаллического при изготовлении цементного пенобетона естественного твердения в количестве 0.01 % от массы цемента. В данной работе исследуется возможность использования глиоксаля кристаллического при изготовлении цементного пенобетона для снижения его усадочных деформаций.

Эффективными инструментами уменьшения усадочных деформаций цементного пенобетона являются введение в пенобетонную смесь микроармирующих добавок и совершенствование технологических процессов их равномерного распределения по объему [9, 16, 17]. В качестве армирующих добавок в производстве строительных материалов используются различные органические и неорганические волокна (фибры). Однако, учитывая толщину стенок пор пенобетона, достичь эффективного армирования можно, только используя микротрубчатые материалы, размеры которых меньше диаметра стенки пор. Таким требованиям соответствуют природный материал хризотил-асбест, который может быть использован в качестве микродисперсной арматуры [15].

Из результатов ранее выполненных исследований строительных смесей с модифицирующими добавками [18–21] известно, что существенный эффект снижения усадки достигается преимущественно путем управления микроструктурой композита, а именно изменением (ускорением) структурообразования и микроармирования цементного камня. В качестве основных критериев оценки положительного эффекта хризотил-асбестовых волокон и глиоксаля кристаллического в пенобетонных смесях были выбраны: пластическая прочность пенобетонной смеси, пластическая усадка пенобетонной смеси и усадка при высыхании пенобетона.

Цель работы – установление закономерностей влияния хризотил-асбестового волокна и глиоксаля кристаллического на усадочные деформации цементного пенобетона естественного твердения. Объектами исследований являлись пенобетонная смесь и затвердевший пенобетон естественного твердения с добавками. Предмет исследований – технологические процессы получения и свойства пенобетона, модифицированного добавками.

Материалы и методы

При проведении исследований использовались следующие материалы:

- портландцемент Топкинского завода ЦЕМ I 42.5Н с нормальной густотой 27 %, началом и концом схватывания 2 часа 30 мин. и 3 часа 10 мин. соответственно (ГОСТ 30515-2013);
- песок кварцевый Кудровского месторождения Томской области с модулем крупности 1.86, истинная и насыпная плотность 2580 и 1540 кг/м³, содержание пылеватых и глинистых примесей 1.4 % (ГОСТ 8736-93);
- синтетический пенообразователь ПБ-Люкс, представляющий собой жидкий раствор поверхностно-активных веществ со стабилизирующими добавками, устойчивость пены не менее 360 с, кратность пены рабочего раствора с объемной долей пенообразователя 4 % не менее 7 (ТУ 2481-004-59586231-2005);
- вода водопроводная (ГОСТ 23732-79);
- хризотил-асбестовое волокно марки А-6К-30 Баженовского месторождения, химический состав асбестовых волокон приведен в [18];
- глиоксаль кристаллический, крупнозернистый порошок, растворимый в воде.

Содержание глиоксаля кристаллического в добавке – 84.4 %, сорт А. Глиоксаль кристаллический изготовлен ООО «Новохим» (Россия, г. Томск) и соответствует требованиям ТУ 2633-004-67017122-2011.

Для исследования влияния добавок на параметры усадки пенобетона был использован ранее разработанный базовый состав пенобетона с маркой по средней плотности D500. По критерию достижения максимальной прочности пенобетона было установлено оптимальное содержание добавок в пенобетонной смеси. Составы пенобетонных смесей с кристаллическим глиоксалем и хризотил-асбестовым волокном, используемые при проведении исследований, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Состав пенобетона D 500 с добавками на 1 м³

Вид добавок	Цемент, кг	Песок, кг	Вода, л	Пенообразователь, л	Добавка, кг
Глиоксаль кристаллический	266	133	200	1,6	0,026
Хризотил-асбестовые волокна	265	133	199	1,6	5,3

Приготовление пенобетонной смеси проводилось одностадийным способом на лабораторном пенобетоносмесителе. В смеситель заливалась отдозированная вода, затем загружалась добавка (хризотил-асбестовые волокна или глиоксаль кристаллический) в необходимом количестве. Перемешивание добавки с водой осуществлялось в течение 1 мин. Далее в смеситель загружались песок и цемент, смесь перемешивалась в течение 2 мин. до получения однородной пластичной массы. После этого в полученную смесь вводился водный раствор пенообразователя, и все компоненты дополнительно перемешивались еще 4,5 мин.

Для определения усадочных деформаций пенобетона при высыхании готовились образцы 40x40x160 мм путем заливки готовой пенобетонной смеси в металлические формы. Отформованные образцы пенобетона до проведения испытаний выдерживались в стандартных влажных условиях в камере естественного твердения в течение 28 суток. Испытание и оценка качества пенобетона проводились по ГОСТ 25485–89.

Для определения пластической прочности приготовленную пенобетонную смесь укладывали в металлический сосуд высотой 200 мм и диаметром 200 мм. Согласно данной методике [22] сосуд наполняется смесью на высоту 170 мм и встряхивается 5–7 раз для выравнивания поверхности уложенной смеси. Сосуд со смесью устанавливают на площадку штатива, в котором с помощью стопорного винта закреплен конус с углом при вершине 30° и высотой 25 мм. Масса конуса с закрепленным на нем скользящим стержнем равна 0,3 кг. Штатив имеет шкалу с ценой деления 1 мм. Острие конуса подводят к поверхности пенобетонной смеси, по шкале штатива фиксируют начальный отсчет (h_n). Затем отпускают стопорный винт и после погружения конуса в смесь под действием собственной массы фиксируют положение острия конуса (h_k). Глубина погружения конуса (H_i) определяется разницей показаний $H_i = h_k - h_n$. За величину глубины погружения принимается среднее арифметическое трех испытаний, полученных в результате погружения конуса при последовательном повороте сосуда на 120° вокруг своей оси. Измерение пластической усадки продолжалось в течение 3 часов, т. е. времени, которое необходимо для перехода из пластичного в структурированное состояние (формирование начальной структуры пенобетона).

Пластическая прочность рассчитывалась по формуле:

$$T_i = K \cdot P / H_i^2,$$

где P – масса конуса со скользящим стержнем, кг;

K – коэффициент, зависящий от угла конуса. При угле, равном 30°, $K = 0,4446$.

Для определения пластической усадки пенобетонной смеси готовую смесь укладывали в металлический сосуд, имеющий внутри форму конуса для достоверного измерения усадки, и форму цилиндра снаружи для надежного расположения сосуда на столе. Применение сосуда подобной конструкции позволяет получить более достоверную величину пластической усадки в сравнении с сосудом цилиндрической формы [23]. Отличия усадки при использовании конусных и цилиндрических сосудов изображены на рисунке 1. Согласно данной методике измерения пластической усадки пенобетонной смеси сосуд со смесью устанавливается на площадку штатива, в котором с помощью стопорного винта закреплен индикатор часового типа. Поверхность пенобетонной смеси накрывается полиэтиленовой пленкой для устранения испарения влаги, поверх которой располагается металлическая пластинка, в соприкосновении с которой начинается отсчет по индикатору. Измерение пластической усадки продолжалось также в течение 3 часов.

Стещенко А.Б., Кудяков А.И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой

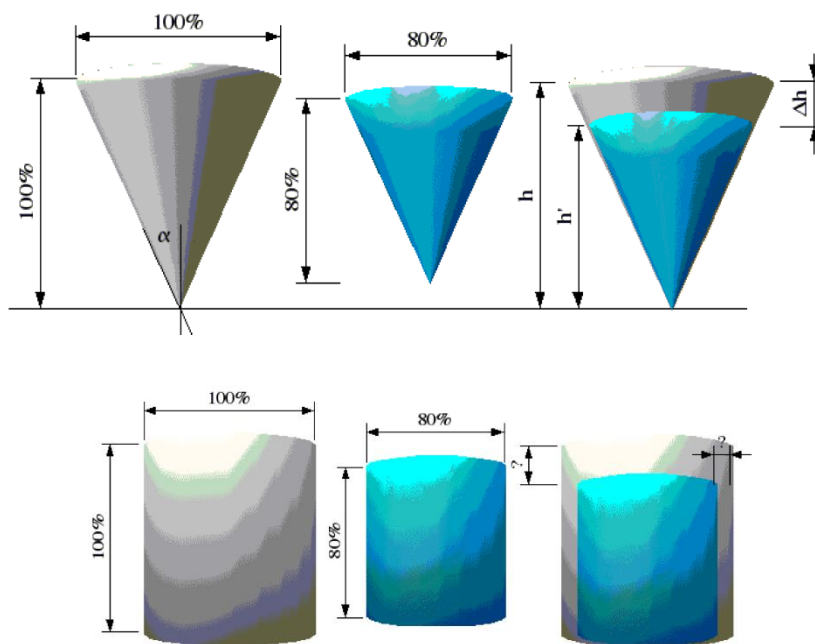


Рисунок 1. Исследование микроструктуры образцов пенобетона, выполнено на растровом электронном микроскопе Quanta 200 3D

Результаты и обсуждение

Как показывают результаты, приведенные на рисунке 2, пенобетонные смеси с добавками в начальные сроки твердения имеют более высокие показатели пластической прочности, чем смеси без добавок. После 3 часов твердения пластическая прочность пенобетонных смесей с глиоксалем кристаллическим и хризотил-асбестовыми волокнами по сравнению с контрольным составом больше на 45 и 63 % соответственно. Таким образом, введение в пенобетонную смесь глиоксала и хризотил-асбестовых волокон позволяет ускорить процесс начального структурообразования пенобетона, осуществить быструю распалубку готового изделия [12].

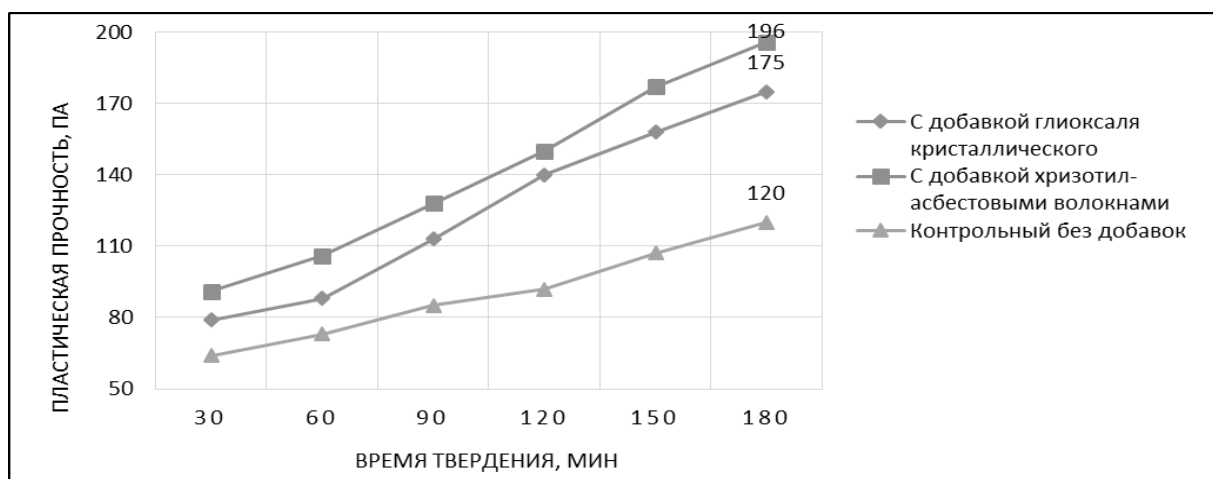


Рисунок 2. Пластическая прочность пенобетонных смесей

Установлено, что при введении в пенобетонную смесь глиоксала кристаллического и хризотил-асбестовых волокон усадка пластическая уменьшается на 29 и 40 % соответственно (рис. 3), а усадка при высыхании пенобетона естественного твердения уменьшается на 44 и 50 % (рис. 4).

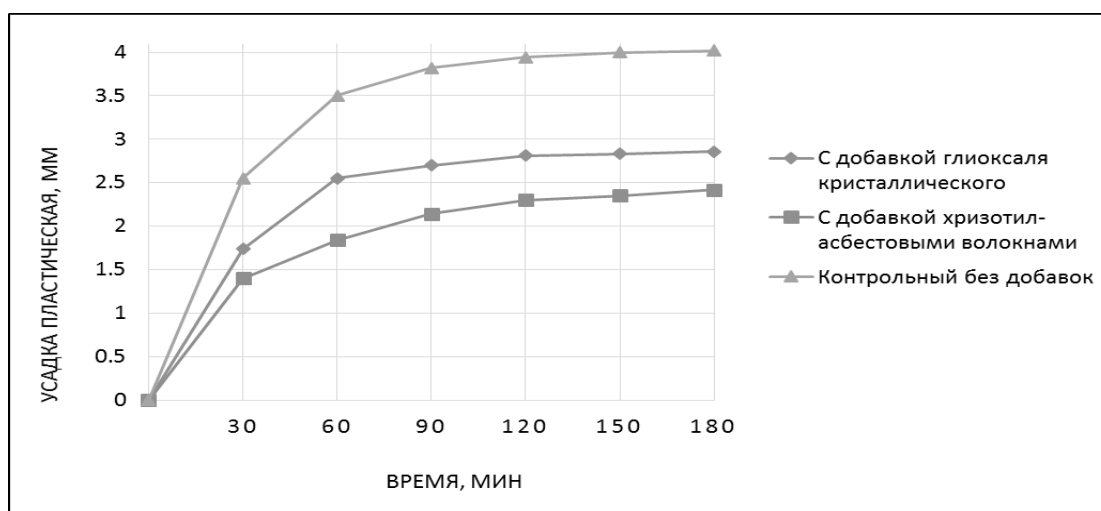


Рисунок 3. Пластическая усадка пенобетонных смесей

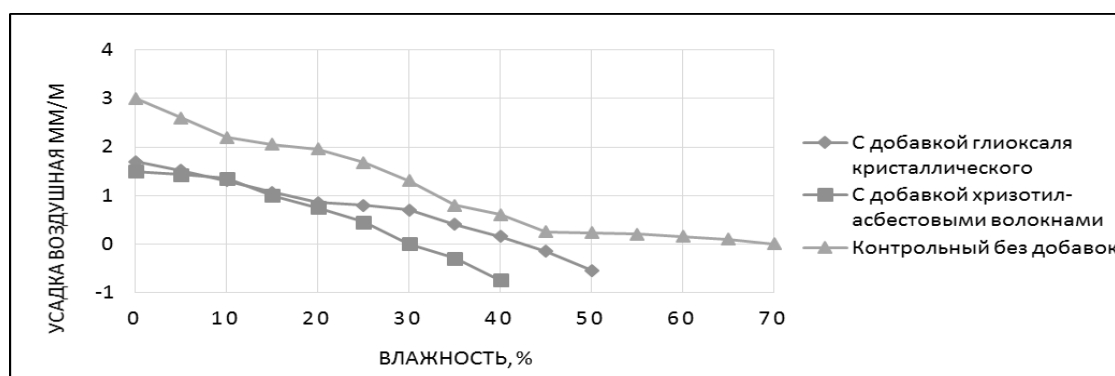


Рисунок 4. Кривые усадки при высыхании образцов цементного пенобетона

Для объяснения причин снижения усадочных деформаций пенобетонов с добавками были проведены исследования микроструктуры образцов (рис. 5). Анализ микроснимков сколов пенобетона показывает, что снижение усадочных деформаций пенобетона при введении хризотил-асбестовых волокон и глиоксала кристаллического в количестве 2 и 0,01 % от массы цемента соответственно объясняется более однородной структурой. В контрольных образцах наблюдаются перфорация и интенсивные разрушения стенок пор, а также их объединение (рис. 5, а), что способствует развитию процесса седиментации, снижению однородности микроструктуры. В образцах с хризотил-асбестовыми волокнами (рис. 5, б) и глиоксальной добавкой (рис. 5, в) ячеистая структура однородна, поры равномерно заполняют все пространство.

Результаты исследования микроструктуры образцов пенобетона показали, что присутствие хризотил-асбестовых волокон и глиоксала кристаллического в пенобетоне стабилизирует его структуру (рис. 5, б, в) и обеспечивает отсутствие протекания жидкости в стенках пор, которое происходит в контрольных образцах пенобетона без добавок (рис. 5, а).

Распределенные хризотил-асбестовые волокна в цементном пенобетоне играют роль центров кристаллизации. Это, с одной стороны, приводит к развитию фибриллярной структуры на стенках пор, что, в свою очередь, обеспечивает ее непрерывность и равномерность (рис. 5, б), а с другой стороны, обеспечивает упорядоченную структуру, ориентированную над молекулярной оболочкой волокна. Это приводит к снижению усадки пенобетона [15].

При введении модифицирующей глиоксальной добавки повышается воздухововлечение и образуются замкнутые поры меньших размеров (рис. 5, в).

Существенное снижение усадочных деформаций при естественном твердении пенобетона позволяет прогнозировать пониженный уровень формирования напряжений при структурообразовании в объеме пенобетона и, как следствие, повышенную эксплуатационную надежность изделий (конструкций), изготовленных из этого материала [22, 24].

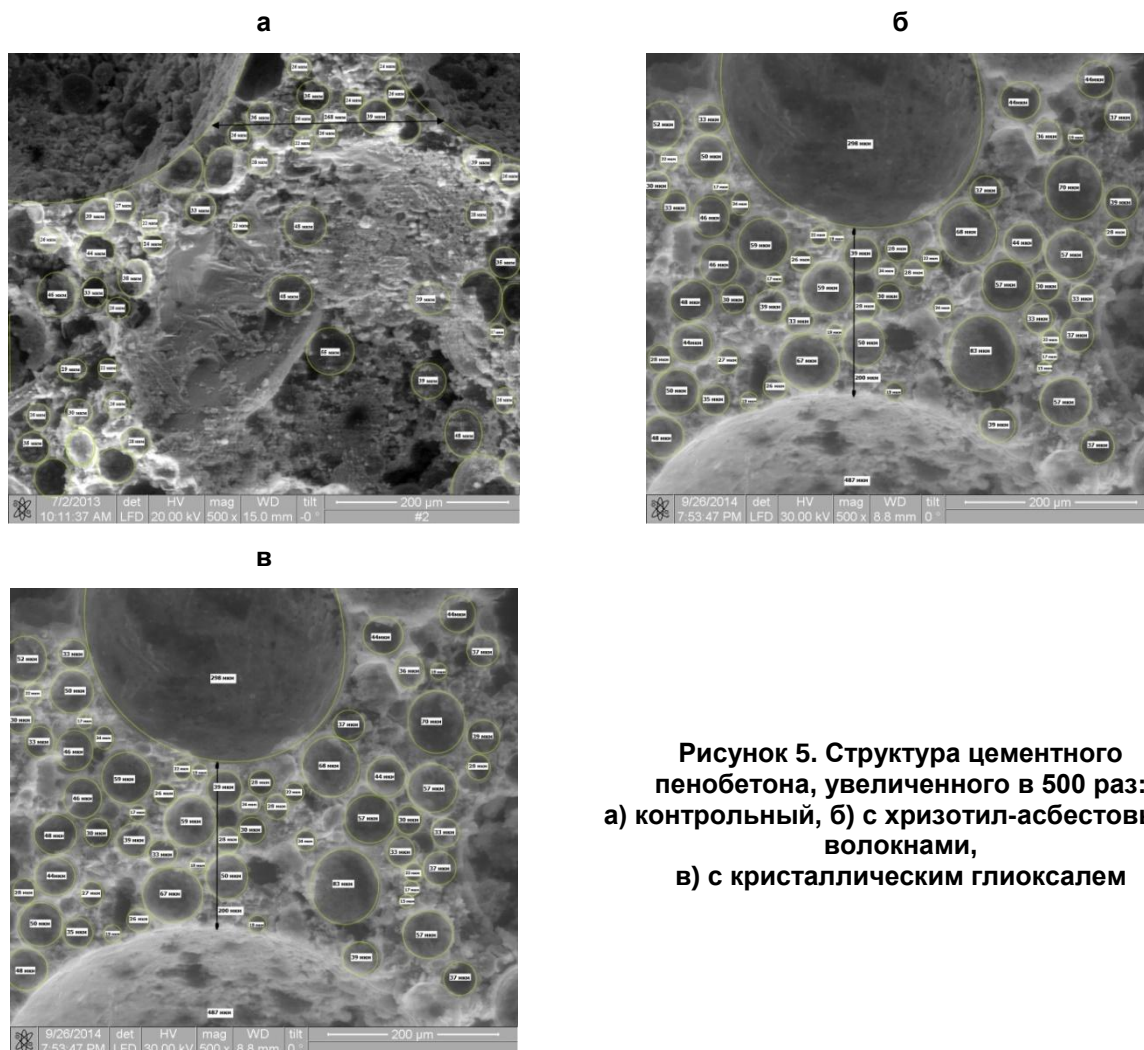


Рисунок 5. Структура цементного пенобетона, увеличенного в 500 раз:
а) контрольный, б) с хризотил-асбестовыми волокнами,
в) с кристаллическим глиоксалем

Выводы

1. Для ускорения процесса начального структурообразования цементного пенобетона естественного твердения и снижения усадочных деформаций необходимо при приготовлении пенобетонной смеси вводить микроармирующие добавки (хризотил-асбестовые волокна) и модифицирующие добавки (глиоксаль кристаллический) в соответствии с установленным регламентом.

2. При введении в состав пенобетонной смеси хризотил-асбестовых волокон в количестве 2 % от массы цемента и глиоксала кристаллического в количестве 0,01 % от массы цемента увеличивается пластическая прочность пенобетонной смеси на 63 и 45 %, снижается пластическая усадка до 29 и 40 % и усадка при высыхании до 44 и 50 % соответственно.

3. Структура пенобетона с хризотил-асбестовым волокном и глиоксалем кристаллическим мелкопористая, увеличивается количество замкнутых пор, равномерно распределенных по объему.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках гранта № 119-12/НИОКТР от 03.11.2012 «Разработка и запуск в производство технологии строительства энергоресурсосберегающего жилья экономического класса на основе универсальной полносборной каркасной конструктивной системы».

Литература

1. Markus G. Measuring the Early Shrinkage of Mortars Drymix Mortar Yearbook 2011 Editor: Ferdinand Leopolder, 2011. Pp. 1–11.

Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой

2. Bentur A., Igarashi S., Kovler K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates // *Cement and Concrete Research*. 2001. No. 11. Pp. 1587–1591.
3. Shah H.R., Weiss J. Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test // *Materials and Structures*. 2006. Vol. 39. No. 9. Pp. 887–899.
4. Bouasker M., Mounanga P., Turcry P., Loukili A., Khelidj A. Chemical Shrinkage of Cement Pastes and Mortars at Very Early Age: Effect of Limestone Filler and Granular Inclusions // *Cement and Concrete Composites*. 2008. Vol. 30. Issue 1. Pp. 13–22.
5. Henkensiefken R., Briatka P., Bentz D., Nantung T., J. Weiss. Plastic Shrinkage Cracking in Internally Cured Mixtures Made with Pre-wetted Lightweight Aggregate // *Concrete International*. 2010. Vol. 32. Issue 2. Pp. 49–54.
6. Saliba J., Rozière E., Grondin F., Loukili A. Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Plastic and Long-Term Shrinkage // *Cement and Concrete Composites*. 2011. Vol. 33. Issue 2. Pp. 209–217.
7. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистого бетона. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
8. Пименова Л.Н., Кудяков А.И. Пенобетон, модифицированный силикагелем // *Вестник ТГАСУ*. 2013. №2. С. 229–233.
9. Васильевская Н.Г., Енджиевская И.Г., Калугин И.Г. Управление структурой ячеистых фибробетонов // *Известия вузов. Строительство*. 2010. No. 11–12. Pp. 12–13.
10. Girnienė I., Laukaitis A. The effect of the hardening conditions on foam cement concrete strength and phase composition of new formations // *Materials Science*. 2002. No.1. Pp. 77–82.
11. Kahmer H. Fibrous concrete successfully used in structural precast component production // *Concrete Plant + Precast Technology*. 2001. No. 8. Pp. 26–31.
12. Kudyakov A. [et al] Foam concrete with porous mineral and organic additives // *IOP Conf. Series: Materials Science Engineering*. 2015. Vol. 71. №012016.
13. Рахимбаев Ш.М., Дегтев И.А., Тарасенко В.Н., Аниканова Т.В. К вопросу снижения усадочных деформаций изделий из пенобетона // *Известия вузов. Строительство*. 2007. №12. С. 41–44.
14. Zuhua Z., John L. Provisb, Andrew R., Hao W. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56. Pp. 113–127.
15. Kudyakov A. I., Steshenko A. B. Shrinkage deformation of cement foam concrete // *IOP Conf. Series: Materials Science Engineering*. 2015. Vol. 71. №012019.
16. Кудяков А.И., Киселев Д.А. Проектирование неавтоклавного пенобетона // *Строительные материалы*. 2006. №11. С. 8–9.
17. Комохов П. Г. Современные пенобетоны. М.: Наука, 1997. 284 с.
18. Кудяков А.И., Стешенко А.Б. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения // *Вестник ТГАСУ*. 2014. №2. С. 128.
19. Tagnit-Hamou A., Vanhove Y., Petrov N. Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes // *Cement Concrete Research*. 2005. Vol. 32. No. 2. Pp. 364–370.
20. Yakovlev G., Keriene J., Gailius A., Girniene I. Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes // *Materials Science*. 2006. Vol. 12. No. 2. Pp. 147–151.
21. Lura P., Durand F., Jensen O., Kovler K. Autogenous strain of cement pastes with superabsorbent polymers // *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*. RILEM Publications SARL. 2006. Pp. 97–106.
22. Моргун Л.В., Моргун В.Н. Влияние дисперсного армирования на агрегативную устойчивость пенобетонных смесей // *Строительные материалы*. 2003. №1. С. 33–35.
23. Jensen O.M., Christensen S.L., Dela B.F., Hansen J.H., Hansen P.F., Nielsen A., HETEK – control of early age cracking in concrete – Phase 2: Shrinkage of mortar and concrete. Report № 110. Road Directorate. Denmark Ministry of Transport. 1997.
24. Kudyakov A.I., Steshenko A.B. Cement Foam Concrete with Low Shrinkage // *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1085. Pp. 245–249.

*Алексей Борисович Стешенко, г. Томск, Россия
Тел. моб.: +7(909)5396643; эл. почта: steshenko.alexey@gmail.com*

*Александр Иванович Кудяков, г. Томск, Россия
Тел. моб.: +7(913)8208554; эл. почта: kudyakow@mail.tomsknet.ru*

© Стешенко А.Б., Кудяков А.И., 2015

Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой

doi: 10.5862/MCE.54.7

Влияние механохимической активации вяжущего на свойства мелкозернистого бетона

*К.т.н., доцент Р.А. Ибрагимов;
ассистент С.И. Пименов;*

*д.т.н., заведующий кафедрой В.С. Изотов,
Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Аннотация. В данной статье представлены результаты влияния механохимической активации цементной суспензии на физико-механические свойства мелкозернистого бетона. Определено оптимальное время механохимической активации цементной суспензии, при котором достигается максимальное повышение прочности на сжатие мелкозернистого бетона.

Экспериментально установлено количество активированного портландцемента от его общей массы в составе мелкозернистого бетона. Изучено влияние суперпластифицирующей добавки Реламикс Т-2 на свойства мелкозернистого бетона, полученного на активированном вяжущем, на тепловыделение цементного теста. Показано изменение гранулометрического состава портландцемента, подвергнутого механохимической активации.

Результаты экспериментальных исследований показали, что, применяя механохимическую активацию вяжущего, можно значительно повысить прочность бетона в ранние сроки твердения при изгибе (на 71 %), при сжатии (на 64 %), а также сохранить ее в проектном возрасте, что особенно актуально для монолитного строительства. Значительно изменяется дисперсный состав активированного вяжущего, что обуславливает высокие физико-механические показатели исследуемых бетонов и скорость их твердения.

Ключевые слова: механохимическая активация; роторно-пульсационный аппарат; суперпластификатор; цементная суспензия; мелкозернистый бетон

Физико-механические характеристики цементных композитов зависят от того, как используются свойства вяжущего [1–4]. Добиться наиболее полного их использования можно, активируя вяжущее различными способами [5, 6]. За счет тонкого измельчения цементного порошка ускоряется процесс гидратации, повышается активность вяжущего и, соответственно, прочность бетона [7–11]. Авторы работ [12, 13] отмечают, что у цементов тонкого помола с удельной поверхностью более 500 м²/кг прочностные характеристики мало отличаются на разных сроках твердения (на вторые сутки твердения прочность на сжатие увеличивается на 5–10 %, на 28-е сутки прочность одинакова, несмотря на увеличение удельной поверхности). Принимая во внимание экономическую и технологическую целесообразность, принято считать оптимальной удельную поверхность в пределах 400–500 м²/кг.

В настоящее время активно развиваются различные технологии диспергирования и активации цементных вяжущих композиций в жидкой среде. С возникновением роторно-пульсационных аппаратов (РПА) появилась возможность активировать цементно-водную суспензию непосредственно в РПА [14]. Но технология, предусматривающая активацию цементно-водной суспензии, не получила широкого распространения в связи с недостаточно изученными вопросами влияния механоактивации на реологию и структурообразование цементных систем.

Авторами [15–17] отмечается, что механоактивация цементной суспензии в начальный период гидратации и структурообразования способствует увеличению объема химически активной коагуляционной среды и ее уплотнению, что приводит к увеличению прочности до 30 %. В статье [18] отмечается, что при активации цементной суспензии в РПА суточная прочность цементного раствора увеличивается на 70 %. Также отмечается [19], что активацию вяжущего рационально производить в процессе приготовления бетонной смеси, так как при традиционном процессе зёрна цемента размером 40–60 мкм и более остаются негидратированными.

Процесс диспергации вяжущего в водной среде можно интенсифицировать за счет дополнительного введения ПАВ. Такой процесс диспергации можно назвать механохимической активацией (МХА).

В настоящее время отсутствуют данные о влиянии параметров МХА на прочность цементных композитов, в том числе неизвестно, какую долю цемента следует активировать. Неоднозначны данные по влиянию МХА цементной суспензии на кинетику тепловыделения цементного теста, на гранулометрический состав цементного порошка после активации. Не изучена роль высокоактивных суперпластификаторов на отмеченные выше свойства.

Нами проведены исследования по определению основных параметров механохимической активации цементных суспензий для получения мелкозернистых бетонов в РПА 0.8-55А-2.2У3, производимого по ТУ 5132-001-70447062.

Эксперимент проводился следующим образом: расчетное количество цемента предварительно перемешивалось с расчетным количеством воды затворения и затем загружалось в бункер РПА для активации.

Для определения оптимального времени механохимической активации (МХА) цементной суспензии эксперимент проводили на мелкозернистом бетоне состава 1:3 с использованием портландцемента ЦЕМ III/A 32,5Н Ульяновского завода, отвечающего требованиям ГОСТ 31108-2003 и обогащенного песка Камского месторождения с модулем крупности 2.7 в присутствии нафталинформальдегидного суперпластификатора Реламикс Т-2. Определение оптимальной дозировки добавки Реламикс Т-2 производилось по изменению нормальной густоты цементного теста. Выявлено, что наибольшее снижение нормальной густоты цементного теста при введении добавки от 0,6 и до 1,2 % от массы цемента наблюдается при дозировке 1 % и составляет 0,205, что на 24 % ниже нормальной густоты цементного теста без добавки. Дальнейшее увеличение дозировки суперпластификатора не приводит к снижению нормальной густоты. Поэтому для дальнейших исследований в качестве оптимальной принята дозировка добавки 1 % от массы цемента.

Расход цемента во всех составах бетона принят постоянным и составил 500 кг/м³, а заполнителя – 1500 кг/м³. Водоцементное отношение (В/Ц) во всех составах 0,355. В качестве контрольного образца принят состав с исследуемой добавкой, но без механохимической активации. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние времени механохимической активации на физико-механические свойства мелкозернистого бетона

Продолжительность МХА, мин	Средняя плотность мелкозернистого бетона, кг/м ³	Предел прочности при изгибе, МПа, в возрасте:		Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте:	
		1 сут.	28 сут.	1 сут.	28 сут.
-	2328	<u>1,42*</u> 100%	<u>5,86*</u> 100%	<u>6,12*</u> 100%	<u>40,04*</u> 100%
1	2347	<u>2,35</u> 165%	<u>6,25</u> 107%	<u>9,76</u> 159%	<u>41,76</u> 104%
2	2358	<u>2,96</u> 208%	<u>6,48</u> 111%	<u>11,88</u> 194%	<u>43,76</u> 109%
3	2364	<u>3,15</u> 222%	<u>6,52</u> 112%	<u>12,42</u> 203%	<u>44,82</u> 112%
3,5	2368	<u>3,22</u> 227%	<u>6,5</u> 111%	<u>13,02</u> 212%	<u>45,62</u> 114%
4	2370	<u>3,1</u> 218%	<u>6,37</u> 109%	<u>12,76</u> 208%	<u>44,87</u> 112%

Примечание: над чертой приведено среднее значение показателя, под чертой – относительное значение показателя в % от контрольного.

По данным таблицы 1 видно, что с увеличением продолжительности МХА цементной суспензии повышается плотность мелкозернистого бетона, повышается его прочность. При активации цементной суспензии от 1 до 4 минут предел прочности при изгибе мелкозернистого бетона повышается на 65–127 % в первые сутки твердения, на 7–12 % в возрасте 28 суток; предел прочности при сжатии повышается на 59–112 % в первые сутки твердения и на 4–14 % в проектном возрасте. Оптимальное время МХА как с точки зрения повышения физико-механических показателей мелкозернистого бетона, так и с точки зрения снижения износа рабочих органов РПА составляет 2 минуты.

С целью снижения уровня износа рабочих органов РПА проведен специальный эксперимент, в котором активации подвергалась цементная суспензия, где расход воды принят постоянным, а доля цемента изменялась от 25 до 100 % от расчетного количества (500 кг/м^3). Время активации во всех опытах составило 2 минуты.

Контрольные образцы – балочки размерами $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$, так же как и в первом случае, изготавливались из состава 1:3 по ГОСТ 310.4 и испытывались в возрасте 1, 3 и 28 суток нормально-влажностного твердения. Расход цемента во всех составах был постоянным (500 кг/м^3). Водоцементное отношение также не менялось и составило 0,355.

Результаты испытания образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Влияние доли активированного портландцемента на физико-механические свойства мелкозернистого бетона

Доля активированного цемента, кг/м^3 (%)	В/Ц суспензии	Предел прочности при изгибе, МПа, в возрасте:			Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте:		
		1 сут.	3 сут.	28 сут.	1 сут.	3 сут.	28 сут.
-	-	<u>1,47*</u> 100%	<u>4,2*</u> 100%	<u>5,93*</u> 100%	<u>6,04*</u> 100%	<u>19,67*</u> 100%	<u>40,32*</u> 100%
125 (25)	1,42	<u>1,88</u> 128%	<u>4,56</u> 109%	<u>6,05</u> 102%	<u>8,21</u> 136%	<u>21,82</u> 111%	<u>42,15</u> 104%
250 (50)	0,71	<u>2,52</u> 171%	<u>4,81</u> 120%	<u>6,17</u> 104%	<u>9,91</u> 164%	<u>23,44</u> 119%	<u>43,47</u> 108%
375 (75)	0,473	<u>2,74</u> 186%	<u>5,13</u> 122%	<u>6,23</u> 105%	<u>10,2</u> 169%	<u>24,21</u> 123%	<u>43,94</u> 109%
500 (100)	0,355	<u>2,92</u> 198%	<u>5,24</u> 124%	<u>6,25</u> 105%	<u>11,02</u> 182%	<u>24,57</u> 125%	<u>44,33</u> 110%

Примечание: над чертой приведено среднее значение показателя, под чертой – относительное значение показателя в % от контрольного

Анализ результатов испытаний образцов, приведенных в таблице 2, показывает, что с повышением доли активированного цемента происходит повышение предела прочности мелкозернистого бетона как при изгибе, так и при сжатии. Особенно существенное повышение прочности бетона достигается в ранние сроки твердения. Так, в возрасте 1 суток предел прочности при изгибе в зависимости от доли активированного вяжущего повышается на 28–98 %, в возрасте 3 суток прирост прочности меньше и составляет от 9 до 24 %.

Аналогичная зависимость наблюдается и при определении предела прочности при сжатии.

В проектном возрасте прирост прочности замедляется и составляет от 2 до 10 % и мало зависит от доли активированного цемента.

Поэтому для дальнейших исследований активации подвергались 50 % расчетного количества цемента. В этом случае прирост прочности мелкозернистого бетона в суточном возрасте составляет при изгибе 71 %, а при сжатии 64 %.

Оценка влияния МХА на процесс гидратации цемента производилась методом термосной калориметрии. Исследованию подвергались составы, содержащие только суперпластификатор, с использованием и без использования МХА. Результаты сравнивались с контрольным составом без добавки и без активации.

Результаты эксперимента приведены на рисунке 1.

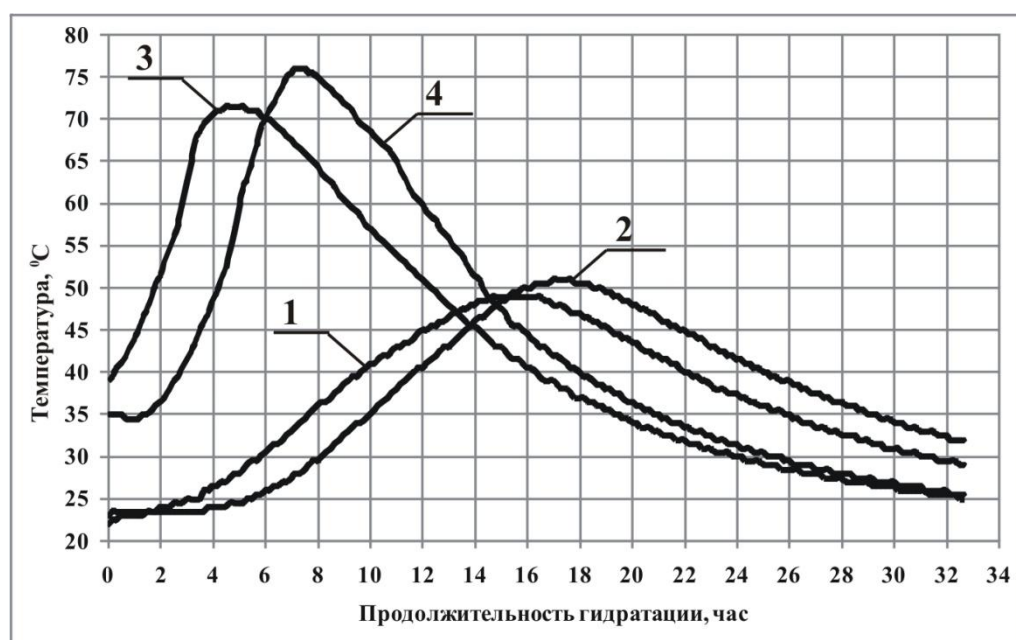


Рисунок 1. Кинетика тепловыделения цементного теста: 1 – контрольный состав; 2 – состав, модифицированный добавкой Реламикс Т-2; 3 – состав без добавок после механоактивации; 4 – состав с добавкой Реламикс Т-2 после МХА

Из рисунка 1 видно, что механоактивация вяжущего в отсутствие добавки суперпластификатора приводит к повышению скорости гидратации цемента, о чем свидетельствует повышение температуры гидратации от 49 °С (контрольный состав) до 72 °С при одновременном сдвиге температурного максимума на 11 часов в сторону начала процесса.

Обычное введение в цементное тесто добавки суперпластификатора без механоактивации вяжущего приводит к незначительному замедлению процесса гидратации вяжущего.

В случае, когда вяжущее активируется в присутствии добавки Реламикс Т-2, обеспечивается самое высокое значение температуры гидратации цемента, а также и существенное ускорение этого процесса.

Ускорение процесса гидратации цемента, вероятно, связано с диспергацией частиц вяжущего при МХА. Для оценки степени диспергации цемента при МХА определен дисперсный состав проб цементного порошка на лазерном анализаторе крупности частиц «Horiba La-950V2», полученного после гидратации портландцемента с использованием и без использования МХА цементного теста. Обезвоживание активного в водной среде цемента и клинкерных минералов производилось на воронке Бюхнера, соединенной с водоструйным насосом. Сразу же после отделения жидкой фазы проба на фильтре заливалась чистым спиртом, а затем подвергалась консервации в ацетоне, при этом количество ацетона бралось не менее пятикратного объема отобранной пробы. Далее материал высушивался в сушильном шкафу при температуре + 105 °С. Измерение удельной поверхности предварительно обезвоженного и высушенного цемента по вышеуказанной методике проводилось методом воздухопроницаемости (прибор ПСХ-9).

Дисперсный состав проб цементного камня: 1 – исходный портландцемент; 2 – состав без добавок и без механоактивации; 3 – состав без добавок после механоактивации; 4 – состав с добавкой Реламикс Т-2 и без МХА; 5 – состав с добавкой Реламикс Т-2 после МХА. Результаты эксперимента приведены в таблице 3.

Из приведенных в таблице 3 данных видно, что удельная поверхность цементного порошка, подвергнутого механоактивации (состав №3) повышается на 10 % по сравнению с составом без механоактивации (состав №2). При введении добавки Реламикс Т-2 в цементную суспензию, подвергнутую МХА, удельная поверхность цементного порошка (состав №5) повышается на 29 % по сравнению с составом, модифицированным добавкой Реламикс Т-2 без активации (состав №4).

Средний размер частиц исходного портландцемента (состав №1) крупнее частиц цементного порошка, подвергнутого механоактивации (состав №3), в 1,26 раза и крупнее частиц, подвергнутых МХА в присутствии добавки (состав №5), в 2,8 раза.

Таблица 3. Удельная поверхность и гранулометрический состав исследуемых составов

№ п/п	Средний размер, мкм	Удельная поверхность, м ² /кг	Выход фракций, %:				
			размером, мкм:				
			≤20	20-40	40-60	60-80	>80
1	48,47	298,33	40,27	18,43	13,95	7,21	20,14
2	45,87	324,66	40,79	18,31	14,06	7,6	19,24
3	38,35	356,35	54,01	21,12	10,41	8,74	5,72
4	42,25	331,62	42,28	19,28	12,86	7,76	17,82
5	17,10	427,84	73,68	24,45	1,87	-	-

При механоактивации цемента выход фракций менее 20 мкм увеличивается в 1,34 раза по сравнению с исходным портландцементом. При МХА вяжущего выход фракций менее 20 мкм увеличивается в 1,82 раза по сравнению с исходным портландцементом. При определении дисперсного состава цементного порошка с использованием МХА частицы крупнее 60 мкм не обнаружены.

Изучена структура цементного камня с помощью электронного микроскопа, оснащенного спектрометром энергетической дисперсии AZtec X-MAX. Разрешение спектрометра 127 эВ. Съемка морфологии поверхности проводилась при ускоряющем напряжении 5 кВ. Элементный анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ и рабочем отрезке 9 мм, глубина зондирования составила менее 1 микрона.

Проводился скол цементного камня, который напылялся сплавом Au/Pd в соотношении 80/20 на высоковакуумной установке Quorum T150 ES. Электронно-микроскопические снимки представлены на рисунке 2.

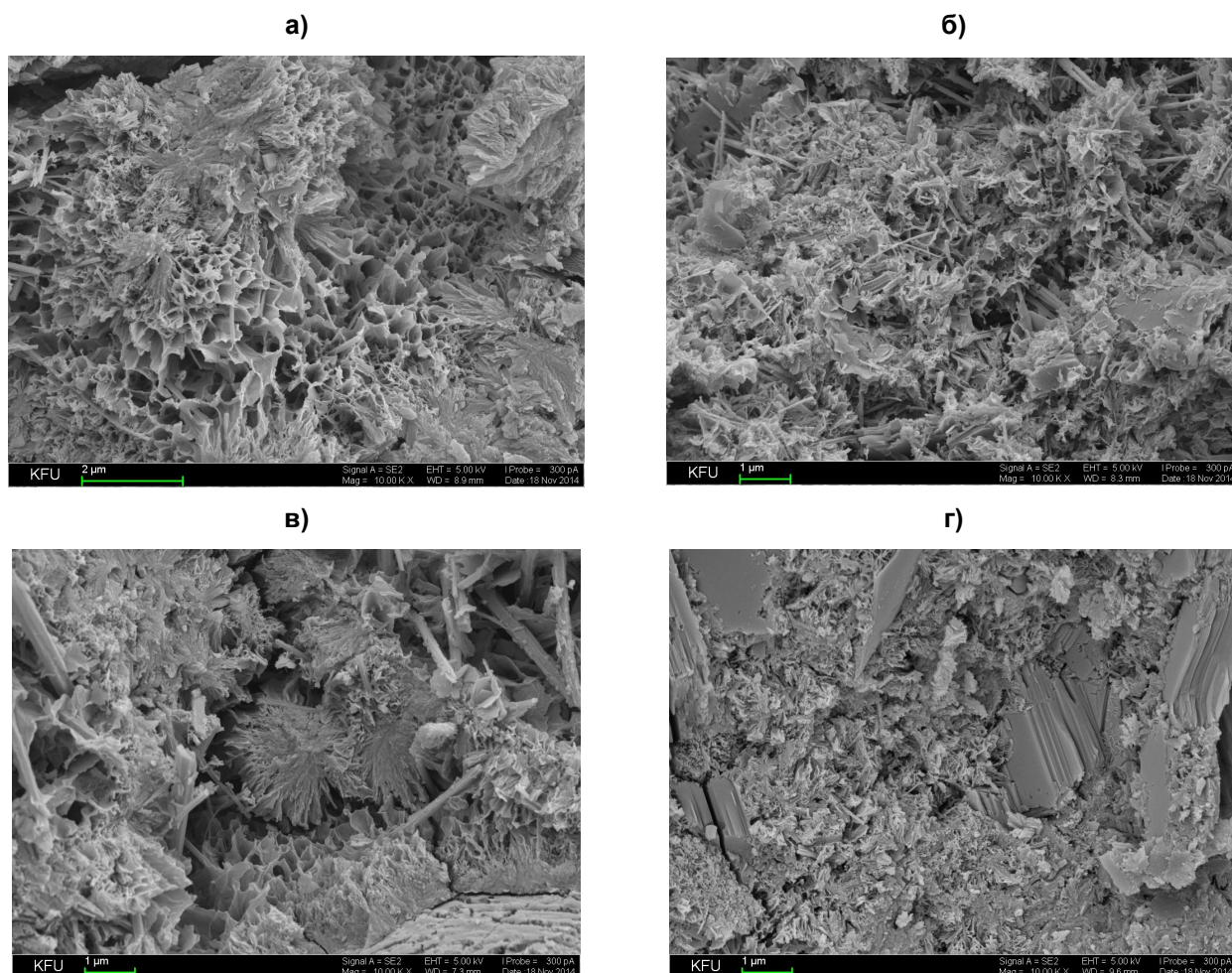


Рисунок 2. Электронно-микроскопические снимки исследуемых образцов, увеличение 10000X

Ибрагимов Р.А., Пименов С.И., Изотов В.С. Влияние механохимической активации вяжущего на свойства мелкозернистого бетона

Снимки исследуемых образцов: а) состав без добавок и без механоактивации; б) состав без добавок после механоактивации; в) состав с добавкой Реламикс Т-2 и без МХА; г) состав с добавкой Реламикс Т-2 после МХА.

Как видно из рисунка 2, МХА вяжущего (состав г) приводит к формированию плотной и мелкокристаллической структуры гидратных новообразований, что является одной из причин повышения прочности мелкозернистого бетона, особенно в ранние сроки твердения [20, 21].

Выводы

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований установлено положительное влияние МХА вяжущего на физико-механические свойства мелкозернистого бетона.

Установлена оптимальная доля цемента для МХА вяжущего (50 %), при которой обеспечивается повышение предела прочности на 64 % при сжатии и на 71 % при изгибе в суточном возрасте по сравнению с составом с добавкой, но без механоактивации. Повышение прочности бетона при МХА вяжущего обусловлено повышением степени и скорости гидратации цемента, уменьшением среднего размера частиц в 2,8 раза, увеличением количества частиц менее 20 мкм на 82 % и полным отсутствием зерен от 60 мкм и более.

В проектном возрасте прочность мелкозернистого бетона практически не отличается от контрольного состава, но необходимость в механоактивации вяжущего возникает при решении вопросов сокращения сроков распалубки или снижении энергозатрат на тепловлажностную обработку железобетонных изделий. Повышение предела прочности при сжатии на 59–112 % в ранние сроки твердения, как это следует из таблицы 1, может оказаться решающим при выборе технологических параметров изготовления железобетонных конструкций и изделий.

Работа выполнена в рамках Государственного договора №10–50 т/Г 2014, финансируемого Академией наук республики Татарстан, поддержана стипендией президента РФ для молодых ученых для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (2015–2017 гг.).

Литература

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2002. 500 с.
2. Poole J.L., Riding K.A., Juenger M.C.G., Folliard K.J., Schindler A.K. Effects of supplementary cementitious materials on apparent activation energy // Journal of ASTM International. 2010. Vol. 7. No.9.
3. Пирадов К.А., Мамаев Т.Л., Кожобеков Т.А., Марченко С.М. Физико-механические, силовые, энергетические и структуроформирующие параметры бетона // Бетон и железобетон. 2002. №2. С. 10–12.
4. Bezzubtseva M.M., Ruzhev V.A., Yuldashev R.Z. Electromagnetik mechanoactivation of dry construction mixes // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2013. No 2. Pp. 241–245.
5. Морозов Н.М., Степанов С.В., Хозин В.Г. Ускоритель твердения бетона на основе гальванического шлама // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8(34). С. 67–71.
6. Intini G., Liberti L., Notarnicola M., Di Canio F. Mechanochemical activation of coal fly ash for production of high strength cement conglomerates // Химия в интересах устойчивого развития. 2009. Т. 17. №6. С. 567–571.
7. Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А. Физико-химические процессы при активации цементно-песчаной смеси в центробежном смесителе // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54. №11/3. С. 346–349.
8. Плотников В.В., Кривобородов Ю.Р. Эффективность домолла цемента в устройстве для диспергирования смесей // Цемент. 1988. №12. С. 16–17.
9. Нагорняк И.Н. Влияние гидромеханической активации цементных вяжущих на долговечность бетонов. Автореф. дис.канд. техн. наук. Саранск, 2006. С. 19.

10. Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A., Alex T.C., Ravi Kumar B., Das S.K., Mehrotra S.P. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement // *Cement and Concrete Composites*. 2008. Vol. 30. No. 8. Pp. 679–685.
11. Сулименко Л.М., Шалуненко Н.И., Урханова Л.А. Механохимическая активация вяжущих композиций // *Известия вузов. Строительство*. 1995. №11. С. 63–67.
12. Sajedi F., Abdul Razak H. Thermal activation of ordinary portland cement-slag mortars // *Materials and Design*. 2010. Vol. 31. No. 9. Pp. 4522–4527.
13. Qian J., Shi C., Wang Z. Activation of blended cements containing fly ash // *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31. No. 8. Pp. 1121–1127.
14. Родионов Р.Б. Инновационные разработки роторно-пульсационной техники для производства строительных материалов // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2006. №4. С. 24–25.
15. Андреева А.В., Давыдова Н.Н., Буренина О.Н., Петухова Е.С. Улучшение качества мелкозернистого бетона путем механоактивации цемента // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2013. № 94. С. 451–460.
16. Машкин Н.А., Гутарева Н.А., Зибницкая Н.Е., Урусова Т.А., Шарыпов П.Ю. Влияние активирования цементно-песчаных суспензий на физико-механические свойства мелкозернистых бетонов // *Известия вузов. Строительство*. 2012. №11–12. С. 26–33.
17. Kumar S., Bandopadhyay A., Rajinikanth V., Alex T.C., Kumar R. Improved processing of blended slag cement through mechanical activation // *Journal of Materials Science*. 2004. Vol. 39. No.10. Pp. 3449–3452.
18. Овчаренко Г.И., Хижинкова Е.Ю., Горн К.С. Влияние активации цементно-зольных композиций на прочность камня // *Известия вузов. Строительство*. 2010. №6. С. 9–13.
19. Прокопец В.С. Влияние механоактивационного воздействия на активность вяжущих веществ // *Строительные материалы*. 2003. №9. С. 28–29.
20. Sajedi F. Effect of curing regime and temperature on the compressive strength of cement-slag mortars // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 36. Pp. 549–556.
21. Соловьев В.И., Ткач Е.В., Серова Р.Ф., Ткач С.А., Тоимбаева Б.М., Сейдинова Г.А. Исследование пористости цементного камня, модифицированного комплексными органоминеральными модификаторами // *Фундаментальные исследования*. 2014. №8. С. 590–595.

*Руслан Абдирашитович Ибрагимов, г. Казань, Россия
Тел. моб.: +7(929)7223248; эл. почта: rusmag007@yandex.ru*

*Сергей Иванович Пименов, г. Казань, Россия
Тел. моб.: +7(937)0056711; эл. почта: 3.14manon@mail.ru*

*Владимир Сергеевич Изотов, г. Казань, Россия
Тел. раб.: +7(843)5104731; эл. почта: v_s_izotov@mail.ru*

© Ибрагимов Р.А., Пименов С.И., Изотов В.С., 2015

doi: 10.5862/MCE.54.8

Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении

*К.ф.-м.н., доцент А.М. Кириллов;
д.т.н., профессор М.А. Завьялов,
Сочинский государственный университет*

Аннотация. Начиная с тридцатых годов прошлого века деформационные и силовые критерии были определяющими в методах расчета нежестких дорожных одежд (модуль деформации, калифорнийское число, модуль упругости). За почти столетнюю историю были накоплены значительные статистические данные изменений указанных показателей в слоях дорожных конструкций. Однако физическая сущность этих изменений и их закономерности до сих пор остаются нераскрытыми. Последнее десятилетие показало, что использование в отрасли автомобильных дорог энергетических критериев по сравнению с силовыми и деформационными более универсально, несет в себе прогностическую функцию, позволяет не только интегрально и комплексно оценить функциональное состояние дорожного покрытия, но и управлять этим состоянием в процессе эксплуатации. Несмотря на это, в современных нормативных документах до сих пор одной из главных характеристик асфальтобетона является деформационный показатель – модуль упругости.

Однако и сейчас нет надежного подхода, позволяющего определить изменение модуля упругости асфальтобетона при эксплуатации. До сих пор отсутствуют четкие зависимости изменения соотношений между статическими и динамическими модулями упругости асфальтобетона в процессе эксплуатации дорожного покрытия. Изменение модуля упругости как частного показателя может быть использовано при расчете вариации энергетических функций; модуль упругости является эквивалентом величине давления и таким образом использован в методике назначения научно обоснованных сроков ремонтных работ.

В данной публикации авторы попытались смоделировать изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении, анализируя предложенную вязкоупругую модель. Получены результаты, в частности аналитические зависимости, которые могут лечь в основу новых нормативных документов по проектированию дорожных асфальтобетонных покрытий.

Ключевые слова: асфальтобетон; модуль упругости; дорожное покрытие; эксплуатационное состояние; динамическое воздействие

Введение

Современный подход к конструированию нежестких дорожных одежд предусматривает их расчет на прочность по трем критериям: допускаемому упругому прогибу, сдвигоустойчивости грунта и конструктивных слоев, сопротивлению монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе. На начальном этапе толщины конструктивных слоев назначают по первому критерию. Эмпиризм такого подхода связан с известными зависимостями требуемого общего модуля упругости конструкции от суммарного расчетного числа приложенных нагрузок за срок службы дорожной одежды. Эти зависимости были получены на основе статистической обработки результатов многократных испытаний на дорогах. Недостаточная прочность асфальтобетона на растяжение при изгибе является одной из причин образования трещин в покрытии. Поэтому при расчетах на прочность важной характеристикой асфальтобетона является его модуль упругости.

Обзор литературы

На стадии проектирования модуль упругости асфальтобетона назначают по таблице [1, табл. П. 3.2], но в дальнейшем при строительстве соответствие выбранных значений фактическим модулям упругости асфальтобетона, укладываемого в дорожное покрытие, не контролируется. Возможный диапазон колебаний модуля упругости асфальтобетона в зависимости от свойств битума, природных условий и гранулометрического состава минеральной части смеси может быть весьма значителен даже в смеси одного типа [2]. Кроме того, упругие вертикальные деформации от кратковременных динамических нагрузок всегда меньше, чем упругие деформации от тех же нагрузок, действующих статически, соответственно, динамические модули упругости всегда выше статических. Согласно нормативным документам теория расчета

Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении

предусматривает, что требуемый общий модуль упругости покрытия увеличивается с ростом интенсивности движения в соответствии с известной логарифмической зависимостью [3]. Это означает, что упругий прогиб покрытия по мере увеличения числа приложения нагрузки увеличивается также по логарифмическому закону. Указанный процесс в существующей методике расчета рассматривается как результат развития усталостных явлений при многократном нагружении. Однако физическая сущность этого процесса применительно к дорожным асфальтобетонным покрытиям до конца не раскрыта, в связи с чем трудно оценить степень развития усталостных процессов в реальных условиях эксплуатации, относительно которых предполагается принимать решения о ремонте и назначении его сроков.

За рубежом уже более сорока лет упругие свойства асфальтобетонов характеризуют комплексным динамическим модулем, который изначально был предложен в виде корреляционной зависимости модуля упругости асфальтобетона от гранулометрического состава заполнителя, содержания вяжущего, пор и времени нагружения [4]. Затем эта корреляционная зависимость, которую в последнее время в дорожной литературе называют моделью М. Витчака (M.W. Witczak), была несколько раз скорректирована [5, 6], но ее эмпирическая природа, а также громоздкость аналитического выражения в стремлении суммировать как можно больше параметров и коэффициентов различной природы оставались неизменными.

Многочисленные зарубежные исследования динамического модуля асфальтобетонов в основном сводились к определению экспериментальным путем значений модулей упругости и их сравнению со значениями, вычисленными по эмпирической модели М. Витчака [7–9]. Одной из основных целей таких работ являлась возможность предсказания степени колеблениобразовани [10]. К сожалению, анализ результатов проведенных исследований давал большой разброс полученных значений для асфальтобетонов одного вида из соответствующих слоев покрытия [11, 12]. Например, недавние репрезентативные данные, опубликованные в статьях [13, 14], посвященных определению и оценке динамического модуля асфальтобетонов, показывают, что для всех рассмотренных асфальтобетонов из смесей различных составов отношение измеренного динамического модуля к вычисленному (предсказанному) находится в пределах от 0,49 до 1,9.

Все это вызывает затруднения при интерпретации результатов оценки несущей способности дорожных одежд по величине их общего модуля упругости, определяемого при диагностике состояния дорог, – задачи в настоящее время актуальной [15]. Сложность заключается в том, что по зафиксированной величине общего модуля упругости эксплуатируемой дорожной одежды трудно судить о реальной степени ее деградации и об интенсивности разрушения. Решением данной проблемы может стать построение и анализ модели, описывающей поведение модуля упругости асфальтобетона в течение жизненного цикла дорожного покрытия. Таким образом, из вышесказанного следует, что задача установления изменения соотношений между статическими и динамическими модулями упругости в процессе эксплуатации дорожного покрытия является актуальной. Анализ полученных зависимостей будет ключом к пониманию закономерностей изменения модуля упругости асфальтобетона во времени и позволит осуществить научно обоснованное прогнозирование долговечности покрытия. Одной из важных задач при решении поставленной проблемы является необходимость определения изменений модуля упругости асфальтобетона при циклических динамических воздействиях.

Постановка задачи

Поведение модуля упругости асфальтобетона, т. е. его уменьшение с увеличением времени воздействия [16], можно на элементарном уровне объяснить следующим образом. При кратковременном воздействии модуль упругости близок к модулю упругости минерального заполнителя (т. к. его доля более 90 %), проявляющего себя в этом случае в большей степени (например, для мрамора или гранита это 35000–50000 МПа). При долговременном же воздействии начинают сказываться вязкостные свойства битума (~ 100 МПа).

Если исследования проводить в области линейной вязкоупругости, то модуль упругости E , определяемый в этой области, не зависит от уровня силового воздействия, но зависит от времени воздействия нагрузки или скорости (частоты) деформирования.

В работе [17] предложена реологическая модель асфальтобетона для описания его деформационного поведения под действием постоянного напряжения. Было получено уравнение для функции податливости в виде:

$$I(t) = \frac{I_0 + At^p}{1 + E_\infty I_0 + E_\infty At^p}, \quad (1)$$

где I_0 – мгновенная податливость; E_∞ – статический (длительный или равновесный) модуль упругости; A – параметр, учитывающий свойства упругости и вязкости; p – коэффициент пластичности; t – время развития деформации ε под действием напряжения σ .

Так как $E = 1/I$, то из выражения (1) можно получить выражение для зависимости модуля упругости от времени воздействия:

$$E(t) = E_\infty + \frac{1}{I_0 + At^p}. \quad (2)$$

График, построенный по данным [17, 18], представлен на рисунке 1.

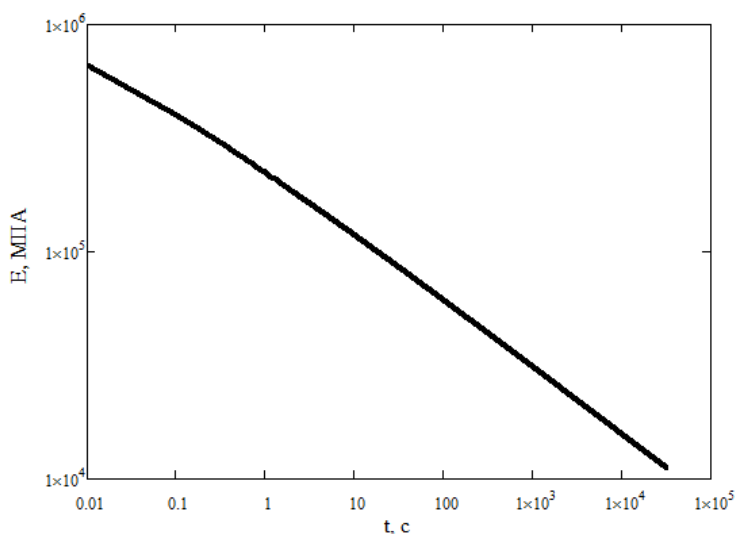


Рисунок 1. Модуль упругости асфальтобетона в зависимости от времени воздействия: битум I структурного типа, $t = 10^\circ\text{C}$, $E_\infty = 50$ МПа, $I_0 = 5 \cdot 10^{-7}$ МПа $^{-1}$, $p = 0.31$, $A = 10^{-5.4}$ МПа $^{-1}$

График модуля упругости (рис. 1) качественно совпадает с графиками, представленными в работе [16]. Однако количественно значения модуля упругости, рассчитанные по формуле (2), превышают представленные в работе [16] приблизительно на один-два порядка (для одинакового времени воздействия).

С учетом этого построим альтернативную модель, описывающую поведение модуля упругости асфальтобетона в зависимости от времени воздействия на него.

Описание исследования

Асфальтобетон можно представить как набор тел (гранул минерального заполнителя), находящихся в вязкой среде битумного вяжущего. В этом случае уравнение движения гранулы массой m под действием нагрузки F от движущегося транспорта с учетом вязкого сопротивления можно записать в виде:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -b \frac{dx}{dt} - kx + F(t), \quad (3)$$

где x – смещение гранулы; b – коэффициент, учитывающий вязкие свойства среды (модуль вязкости, Н·с/м); k – коэффициент, характеризующий упругие свойства среды (модуль жесткости, Н/м).

Если в спектре $F(t)$ учесть только первую гармонику с амплитудой F_0 и частотой Ω , а также считать коэффициенты b и k постоянными, то решение уравнения (3) будет представлять собой гармоническую функцию времени с амплитудой

Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{\left(k - m\Omega^2\right)^2 + b^2\Omega^2}}. \quad (4)$$

Закон Гука в дифференциальной форме позволяет определить модуль упругости:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Т. к. $\varepsilon \sim A$, а продолжительность действия нагрузки можно оценить в четверть периода $t \sim \pi/(2\Omega)$, то с учетом соотношений (4) и (5) для модуля упругости можно получить выражение вида (с точностью до коэффициента c , зависящего от геометрии взаимодействующих объектов и имеющего размерность м^{-1}):

$$E(t) = c \cdot \sqrt{\left(k - \frac{\pi^2 m}{4t^2}\right)^2 + b^2 \frac{\pi^2}{4t^2}}. \quad (6)$$

При статическом воздействии ($t \rightarrow \infty$) модуль упругости $E(t) \rightarrow E_\infty$. Таким образом, из выражения (6) следует, что произведение $c \cdot k = E_\infty$. Учитывая последнее обстоятельство, соотношение (6) можно привести к виду:

$$E(t) = E_\infty \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\pi^2 m}{4kt^2}\right)^2 + \left(\frac{\pi b}{2kt}\right)^2}. \quad (7)$$

С помощью выражения (7) можно объяснить уменьшение модуля упругости с повышением температуры. Как известно, вязкость $\eta \sim e^{1/T}$. В свою очередь, коэффициент сопротивления среды $b \sim \eta$. Таким образом, при повышении температуры вязкость битума уменьшается, что приводит к уменьшению коэффициента сопротивления среды b . А это, согласно выражению (7), приведет к уменьшению модуля упругости.

Известно, что модуль упругости для крупнозернистого асфальтобетона меньше, чем для мелкозернистого. Такое поведение модуля упругости также можно объяснить с помощью выражения (7), из которого видно, что с увеличением массы m зерна асфальтобетона модуль упругости должен уменьшаться.

Основные недостатки представленной модели: во-первых, отсутствие учета взаимосвязи между телами (гранулами) при их движении под действием внешней нагрузки (считается, что их движения независимы друг от друга); во-вторых, учет в спектре силы $F(t)$ только первой гармоники. Однако асфальтобетон представляет собой систему связанных тел и необходим учет их взаимодействия, а частотный спектр силового воздействия непрерывный. В этом усматривается перспектива для дальнейшего развития предложенной модели. Кроме того, замеряемый при синусоидальном нагружении [19] модуль упругости можно представить комплексной величиной E^* , состоящей из действительной E' и мнимой E'' частей:

$$E^* = E' + i \cdot E'', \quad (8)$$

где E^* – комплексный модуль упругости асфальтобетона; E' – упругий модуль или модуль эластичности; E'' – модуль потерь или вязкий модуль.

Кривая комплексного модуля упругости позволяет установить расчетный модуль упругости асфальтобетона в зависимости от температурно-временных условий деформирования, имеющих место при эксплуатации дорожного покрытия. Вязкоупругие свойства битума являются определяющими для реологических свойств асфальтобетона. Так как модуль $|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2}$, то, сравнив его с (7), можно предположить, что выражение (7) определяет абсолютную величину комплексного модуля упругости, а первое и второе слагаемые в (7) – упругий и вязкий модули соответственно.

Численные расчеты, выполненные по выражению (7), показали, что при временах воздействия $t > 10^{-5}$ с, что имеет место в реальном режиме эксплуатации, модуль упругости можно выразить как

$$E(t) = E_{\infty} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi b}{2 k t} \right)^2}. \quad (9)$$

Анализ выражения (9) и дальнейшие расчеты позволяют сделать вывод о том, что динамический модуль упругости $E(t)$ зависит не отдельно от значений модуля жесткости k и модуля вязкости b , а от их отношения b/k . Таким образом, при одинаковом отношении b/k и других прочих равных условиях модуль упругости будет принимать идентичное значение.

На рисунке 2 представлен график зависимости мгновенного модуля упругости от времени силового воздействия. Кривая 1 построена по реологической модели (2), кривая 2 – по вязкоупругой модели, представленной выражением (7). Отметим, что рассмотренная в [17] реологическая модель является эвристической (феноменологической), а предложенная в данной работе модель – теоретическая.

Выше было сказано о превышении значений модуля упругости, рассчитанных по реологической модели, над значениями, представленными в работе [16]. Из рисунка 2 можно видеть, что значения $E(0,1) \sim 10000$ Па и $E(1) \sim 1000$ Па и они по порядку величины совпадают с представленными в [16, рис. 2]. Кроме того, реологическая модель предсказывает выход модуля упругости на стационар ($E(t) = E_{\infty}$) при значениях времени силового воздействия, значительно превышающих время эксплуатации дорожного покрытия. Предложенная вязкоупругая модель, напротив, предсказывает достижение стационарного значения модулем упругости при значениях времени воздействия порядка $10 \div 100$ с, что является более адекватным в условиях реального режима эксплуатации дорожного покрытия.

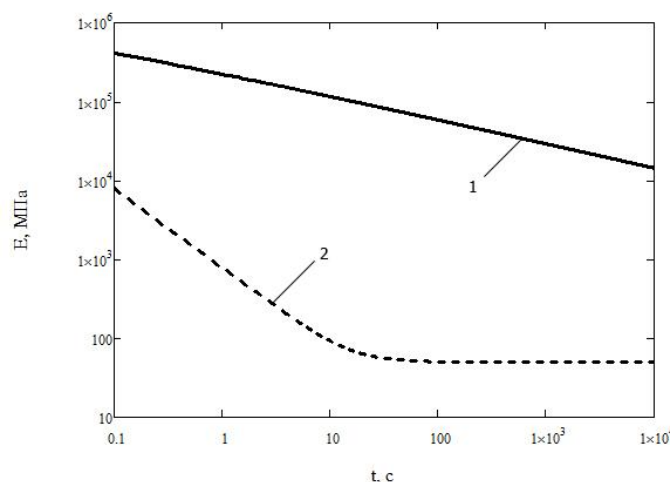


Рисунок 2. Зависимость мгновенного (динамического) модуля упругости от времени воздействия нагрузки: 1 – реологическая модель ($E_{\infty}=50$ МПа, $I_0=5 \cdot 10^{-7}$ МПа $^{-1}$, $p=0.31$, $A=10^{-5.4}$ МПа $^{-1}$); 2 – вязкоупругая модель ($E_{\infty}=50$ МПа, $m=0.1$ кг, $k=10^{11}$ Н/м, $b=10^{12}$ Н·с/м)

В процессе эксплуатации из-за изменения значений модулей жесткости k и вязкости b , а точнее из-за изменения их соотношения, будет изменяться время выхода модуля упругости на стационар (обозначим как t_{∞}) при динамическом нагружении асфальтобетона. Например, при соотношении $b/k = 10$ с время выхода на стационар порядка 10 с (рис. 2), а при $b/k = 100$ с – порядка 100 с. То есть можно видеть, что время выхода на стационар $t_{\infty} \approx b/k$. Это следует непосредственно из формулы (9), т. к. если принять $t = b/k$, то $E \approx 1.86 \cdot E_{\infty}$. Таким образом, параметр t_{∞} можно использовать для оценки текущего состояния покрытия и прогнозирования его остаточной долговечности.

В работе [20] рассмотрен процесс релаксации напряжений после снятия внешней нагрузки с использованием реологической модели Максвелла (твердое тело рассматривается как последовательное соединение двух элементов: упругого и вязкого). Время релаксации в этой работе определено как $\theta = \eta/E$, где η – коэффициент вязкости, E – модуль упругости. В качестве примера рассмотрен песчаный асфальтобетон, имеющий при температуре +20 °С коэффициент

Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении

вязкости $\eta = 10^6 \text{ Н·с/мм}^2$, модуль упругости $E = 1500 \text{ Н/мм}^2$ и, следовательно, время релаксации $\theta = 10^6/1500 \approx 667 \text{ с}$.

При заданных значениях $\eta = 10^6 \text{ Н·с/мм}^2$ и $E=1500 \text{ Н/мм}^2$ модуль вязкости b и модуль жесткости k можно оценить значениями 10^{12} Н·с/м и $1.5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}$, соответственно. Тогда время выхода на стационар $t_\infty \approx b/k = 10^{12}/(1.5 \cdot 10^9) \approx 667 \text{ с}$.

Подобное совпадение времен релаксации θ и выхода на стационар t_∞ не может быть случайным и является аргументом в пользу предложенной в данной статье вязкоупругой модели. Однако не стоит преувеличивать значение подобного совпадения, т. к. время релаксации и время выхода на стационар – величины в известной степени условные. Поэтому здесь речь идет не о полном совпадении (цифра в цифру), а о совпадении порядков этих величин.

Время силового воздействия на асфальтобетон в процессе его эксплуатации зависит от скорости транспортного средства v и величины его колесной базы B . Тогда время воздействия можно приближенно оценить как $t = B/v$. В этом случае выражение (9) можно записать в виде:

$$E(v) = E_\infty \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi b}{2 k B} \right)^2 \cdot v^2} . \quad (10)$$

Из графической интерпретации формулы (10) следует, что значение модуля упругости быстро растет от своего статического значения ($E_\infty = 50 \text{ МПа}$) в интервале скоростей от 0 до порядка 10 м/с (рис. 3). При дальнейшем же увеличении скорости относительный рост модуля упругости невелик, и модуль упругости имеет значение порядка 10^4 МПа . Данное поведение модуля упругости необходимо учитывать при проектировании дорог, т. к. для перегонных участков с высокой скоростью транспорта и на перекрестках, примыканиях и других участках с низкой скоростью движения условия с точки зрения модуля упругости существенно различаются.

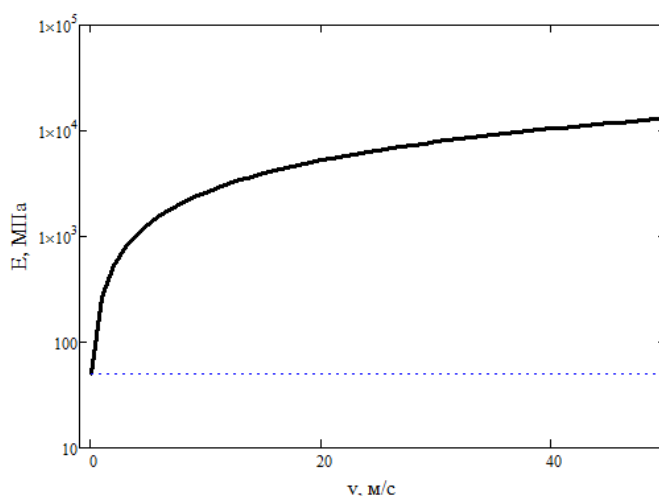


Рисунок 3. Зависимость динамического модуля упругости от скорости движения транспортного средства с колесной базой 3 м ($E_\infty = 50 \text{ МПа}$, $m = 0.1 \text{ кг}$, $k = 10^{11} \text{ Н/м}$, $b = 10^{12} \text{ Н·с/м}$)

Заключение

1. Построены графики зависимости динамического модуля упругости от времени силового воздействия и от скорости движения транспортного средства.
2. Получены аналитические выражения (9) и (10) для вычисления значения модуля упругости асфальтобетона в реальном времени процесса эксплуатации.
3. Выявлено, что время воздействия, при котором модуль упругости выходит на стационар, зависит от соотношения модулей вязкости и жесткости.
4. Высказано предположение о возможности использования значения времени выхода модуля упругости на стационар в качестве параметра для оценки текущего состояния покрытия и прогнозирования его остаточной прочности.
5. Полученные результаты, в частности зависимости (9), (10), могут лечь в основу новых нормативных документов по проектированию дорожных асфальтобетонных покрытий.

Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении

Литература

1. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд (взамен ВСН 46-83). М.: Информавтодор, 2001. 145 с.
2. Руденский А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия. М.: Транспорт, 1992. 253 с.
3. ОДН 218.1.052-02. Оценка прочности нежестких дорожных одежд (взамен ВСН 52-89). М.: Информавтодор, 2002. 65 с.
4. Shook J.F., Kallas B.F. Factors Influencing Dynamic Modulus of Asphalt Concrete // Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. 1969. Vol. 38. Pp. 140–178.
5. El-Basyouny M.M., Witczak M.W., Zapata C.E. Development of Asphalt Concrete Rutting Model Using Permanent Strain Database // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 2005. Vol. 74. Pp. 381–442.
6. Bari J., Witczak M.W. Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures // Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. 2006. Vol. 75. Pp. 381–423.
7. Dongre R., Myers L., D'Angelo J., Paugh C., Cudimetta J. Field Evaluation of Witczak and Hirsch Models for Predicting Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 2005. Vol. 74. Pp. 381–442.
8. Azari H., Al-Khateeb G., Shenoy A., Gibson N. Comparison Simple Performance Test IE*I of Accelerated Loading Facility Mixtures and Prediction IE*I Use of NCHRP 1-37A Model and Witczak's New Equations // Journal of Transportation Research Board. 1998. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC. 2007. Pp. 1–9.
9. Carvalho R., Schwartz C.W. Comparisons of Flexible Pavement Designs: AASHTO Empirical Versus NCHRP Project 1-37A Mechanistic-Empirical // Transportation Research Record 1947, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2006. Pp. 167–174.
10. Le A.T., Lee H.J., Park H.M., Lee S.Y. Development of a Permanent Deformation Model of Asphalt Mixtures for South Korean Pavement Design Guide // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, № 2095, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2009. Pp. 45–52.
11. Garba R. Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures. Department of Road and Railway Engineering Norwegian University of Science and Technology NTNU. 2002. 201 p.
12. Schram, S., Abdelrahman M. Improving Prediction Accuracy in Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide // Transportation Research Record 1947, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2006. Pp. 59–68.
13. Flintsch G.W., Loulizi A., Diefenderfer S.D., Diefenderfer B.K., Galal K.A. Asphalt Material Characterization in Support of Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide Implementation in Virginia // Journal of the Transportation Research Board. 2008. No. 2057. Pp. 114–125.
14. Katicha S., Flintsch G.W., Loulizi A., Wang L. Conversion of Testing Frequency to Loading Time Applied to the Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide // Journal of the Transportation Research Board. 2008. No. 2087. Pp. 99–108.
15. Казарновский В.Д. Современные тенденции и проблемы в развитии конструкций и методов расчета дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. 2001. №3. С. 7–8.
16. Телтаев Б.Б. Анализ расчетных значений модуля упругости асфальтобетонов // Дорожная техника. 2010. С. 130–137.
17. Золотарев В.А., Маляр В.В., Ткачук Ю.П. Реологическая модель асфальтобетона // Современное промышленное и гражданское строительство. 2006. №2. С. 103–107.
18. Золотарев В.А., Маляр В.В., Лапченко А.С. Реологические свойства асфальтополимербетонов при динамическом режиме деформирования // Наука и техника в дорожной отрасли. 2008. №1. С. 10–13.
19. Кондрашов Н.А., Шестопалов А.А. Использование модуля деформации в реологической модели уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий // Инженерно-строительный журнал. 2014. №7. С. 55–65.
20. Богуславский А.М., Богуславский Л.А. Основы реологии асфальтобетона. М.: Высшая школа, 1972. 200 с.

Андрей Михайлович Кириллов, г. Сочи, Россия
Тел. моб.: +7(918)1302257; эл. почта: kirill806@gmail.com

Михаил Александрович Завьялов, г. Сочи, Россия
Тел. моб.: +7(967)6468875; эл. почта: zavyalov.m.a@gmail.com

© Кириллов А.М., Завьялов М.А., 2015

doi: 10.5862/MCE.54.9

Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами, разрушающей нагрузкой

*Старший преподаватель А.В. Карельский;
ассистент Т.П. Журавлева;
д.т.н., профессор Б.В. Лабудин,*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова

Аннотация. В статье рассматриваются результаты испытаний деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами (МЗП), разрушающей нагрузкой. Установлены два типа разрушения составных деревянных балок: хрупкое и пластичное.

Построена математическая модель составных деревянных балок с МЗП и проведен анализ результатов численных исследований. В математической модели составных балок учтена податливость соединения «МЗП-древесина» введением в расчетную схему элементов, имитирующих соединение, в виде стержней с приведенным модулем упругости.

Выполнено сравнение полученных теоретических и экспериментальных результатов напряженно-деформируемого состояния (НДС) в составной балке с МЗП. Сделан вывод об эффективности применения МЗП для повышения сдвигоустойчивости соединения составных деревянных конструкций как при усилении, так и при изготовлении новых балочных конструкций.

Ключевые слова: металлические зубчатые пластины; составные деревянные балки; изгиб; сдвиг; краевые деформации волокон; усиление.

Металлические зубчатые пластины (МЗП) – один из видов нагельных соединений. Первые упоминания об этих пластинах появились в 1950 году в США (автор Джон Джуреит). В 1953 году им основана компания по производству МЗП Gang-Nail Systems Inc. В СССР стальные пластины были разработаны ЦНИИСК им. Кучеренко в 1970-х гг. Большой вклад в развитие сквозных конструкций с узлами на МЗП внесли профессора В.Г. Леннов, А.К. Наумов, В.Г. Миронов, В.А. Цапаев, В.В. Стоянов и др. В работах [1–9] была разработана и усовершенствована методика расчета соединений на МЗП, в том числе с учетом длительной прочности и деформативности. В.Г. Котлов [10, 11] уточнил методики расчета, введя понятие коэффициента единичной податливости и разработав формулу для определения приведенного модуля упругости соединения. В работе [12] А.В. Крицыным подробно проработаны вопросы смятия древесины под зубьями МЗП вдоль и поперек волокон. Выведены пределы прочности и коэффициент постели для соединений на МЗП. В.В. Ермолаевым [13–16] рассмотрены вопросы влияния влажности на длительную прочность и ползучесть составных деревянных конструкций на МЗП. В работах [17–21] Д.В. Лоскутовой детально рассмотрено напряженно-деформированное состояние древесины в зоне контакта с нагелем. Сделаны выводы, что свойства древесины в зоне контакта меняются и это следует учитывать при проектировании стыков на МЗП. Зарубежный опыт разработки соединений на МЗП представлен в работах [22–31]. В работе [22] рассматривается усиление деревянных полов МЗП и углеволокном. Соединения деревянных элементов встык при помощи МЗП описаны в работе [23]. Сравнение работы соединений на МЗП и болтах проведено в трудах [24]. Конструкции стыков элементов каркаса между собой рассматриваются в работе [25]. Вопросы усиления несущих клееных деревянных и составных конструкций при помощи МЗП практически не решались.

Предлагается рассмотреть усиление клееных деревянных балок и составных деревянных балок при помощи МЗП. Наиболее распространенные повреждения клееных деревянных балок – это продольные трещины в клеевых швах. Появление таких трещин ослабляет сечение балок и при дальнейшем развитии трещин приводит к их разрушению. Запрессовав МЗП в зону с трещиной и в зону возможного развития трещины, можно восстановить несущую способность сечения (рис. 1). Это особенно характерно для высоких клееных балок при отношении $h/b \geq 6$, то есть балок, на которые совместное действие касательных и нормальных напряжений оказывает наибольшее влияние [32, 33]. Кроме того, при помощи МЗП можно увеличивать высоту сечения, наращивая дополнительное сечение, а также препятствовать развитию трещин в деревянных балках цельного сечения.

Карельский А.В., Журавлева Т.П., Лабудин Б.В. Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами, разрушающей нагрузкой

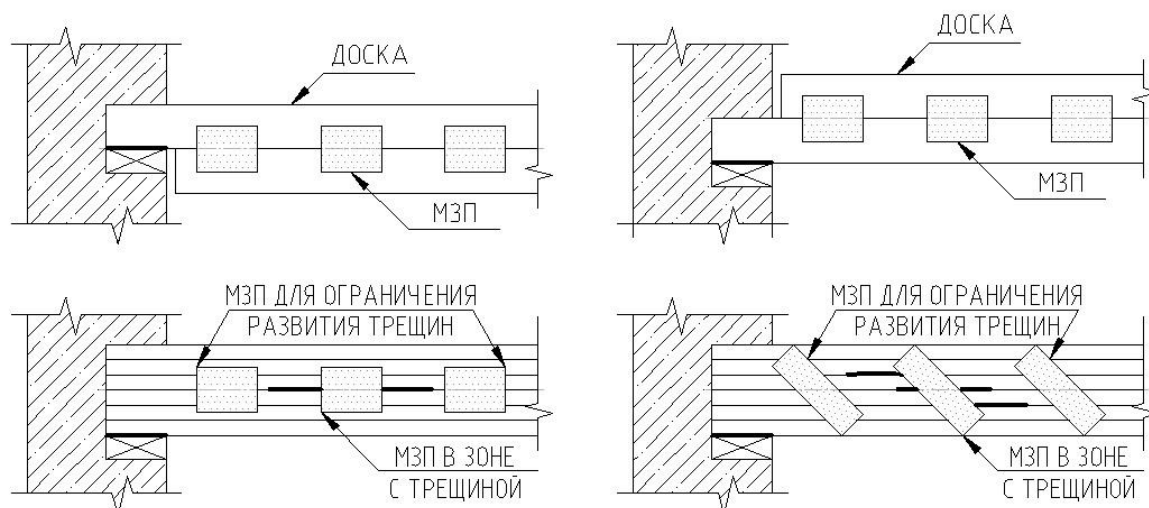


Рисунок 1. Усиление балок с трещинами сплачиванием и наращиванием дополнительного сечения при помощи МЗП

Для исследования данного вопроса проведены испытания деревянных балочных конструкций, усиленных МЗП. При моделировании клееной балки со сквозной трещиной считаем, что трещина рассекает балку на 2 части по всей ее длине, то есть проклеенный участок шва уже разрушен, что позволит учесть полную работу элемента усиления МЗП. Таким образом, основной задачей проведения испытаний является определение эффективности усиления шва составного элемента и повышение его сдвигоустойчивости при статическом нагружении. Для испытаний выбраны элементы пиломатериалов хвойных пород (сосна) с одним швом, состоящим из двух стержней. Пролет балок $l = 3$ м, высота сечения $h = 300$ мм, ширина принимается равной $1/6$ высоты сечения составной балки, или $b = 45$ мм. Шов, имитирующий трещину, образуется посередине высоты сечения балки (рис. 1, 3).

Для исследований были выбраны МЗП марки GNA20-MIT фирмы Mitek. В соответствии с предварительным расчетом по методикам [34] и [35] размер МЗП составляет 200×140 мм с шагом 400 мм.

Расчетная несущая способность соединения определялась по результатам экспериментальных исследований соединения на сдвиг, выполненных предварительно на натурных образцах. Программа испытаний была разработана на основании планирования эксперимента.

Испытательная установка принималась для одновременного нагружения двух составных балок (рис. 2). Балки раскреплялись из плоскости изгиба диафрагмами в четырех точках. Опираие балок – шарнирное.

Влажность древесины, определенная с помощью измерителя влажности «Влагомер-МГ4», составляла 10–12 %. Сплоченные по высоте балки были выдержаны в течение 2 месяцев при температуре окружающей среды 18°C и влажности 60 %, а затем смонтированы на экспериментальном стенде.

Для получения данных использовались прогибомеры ЗОКИО, тензометры Гугенбергера, индикаторы часового типа ИЧ-10. Прогибомеры устанавливались посередине пролета балок, тензометры – в зонах максимальных краевых напряжений. Измерение взаимного сдвига балок между собой осуществлялось индикаторами часового типа, установленными по торцам балок. Схема расположения средств измерений представлена на рисунке 3.



Рисунок 2. Общий вид экспериментальной установки

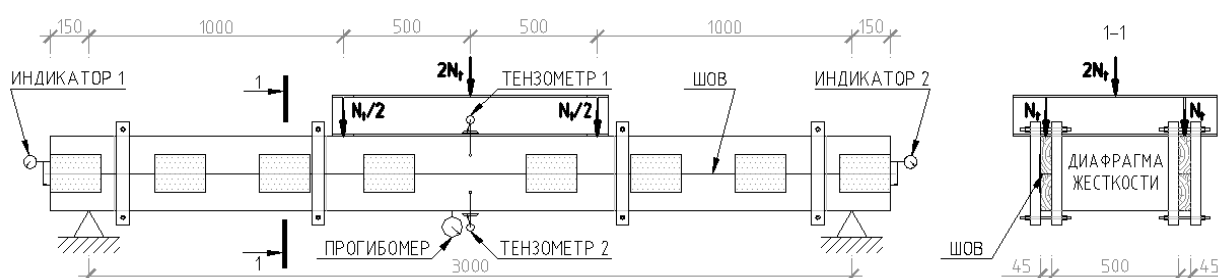


Рисунок 3. Схема расположения средств измерения

Нагружение конструкций производилось гидравлическим домкратом ДГИ20М135В-М грузоподъемностью 20 т. Значение нагрузки рассчитано по показаниям манометра и распределялось на четыре точки приложения нагрузки (в третях, по две для каждой балки). Распределение нагрузки показано на расчетной схеме (рис. 4).

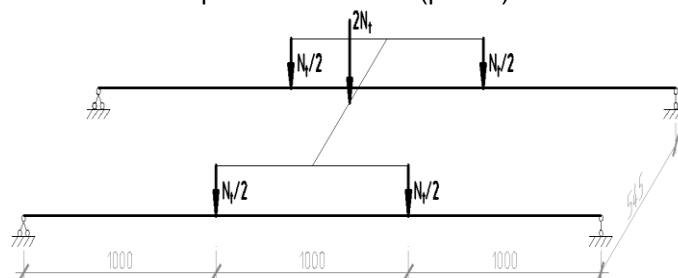


Рисунок 4. Расчетная схема нагружения балок

Нагружение деревянных составных балок с соединением на МЗП осуществлялось ступенями до разрушения.

По результатам испытаний установлено разрушение двух типов:

- I тип – пластичное разрушение от сдвигающих усилий при образовании продольной трещины под МЗП (разрушающая нагрузка 58 кН) (рис. 5);
- II тип – хрупкое разрушение от нормальных напряжений в середине длины балки в местах ослабления от сучков (разрушающая нагрузка 34 кН) (рис. 6).

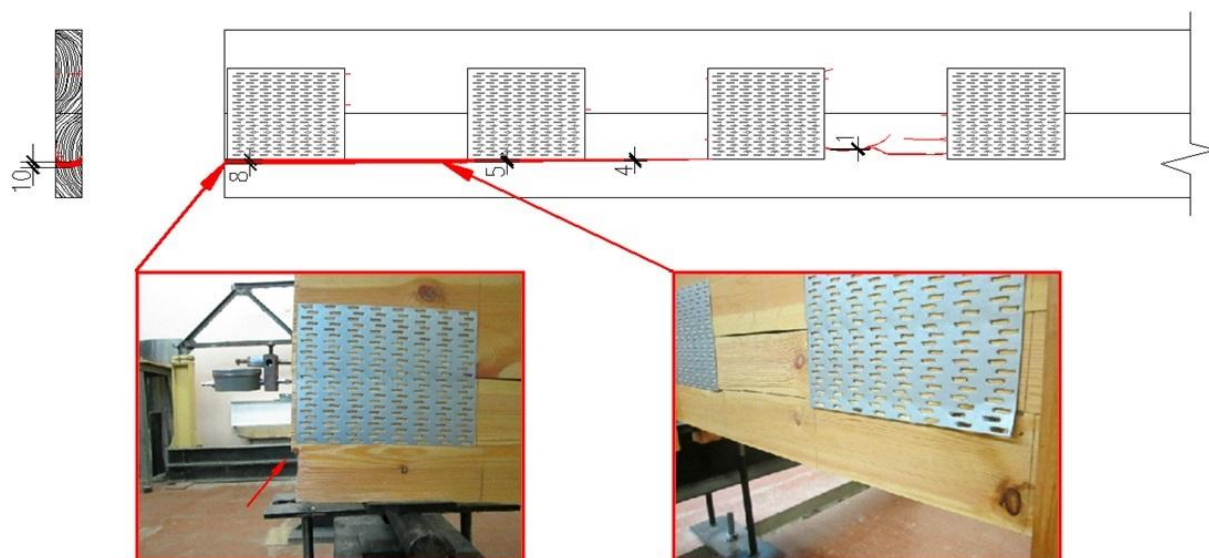


Рисунок 5. Характер разрушения балки (I тип разрушения)

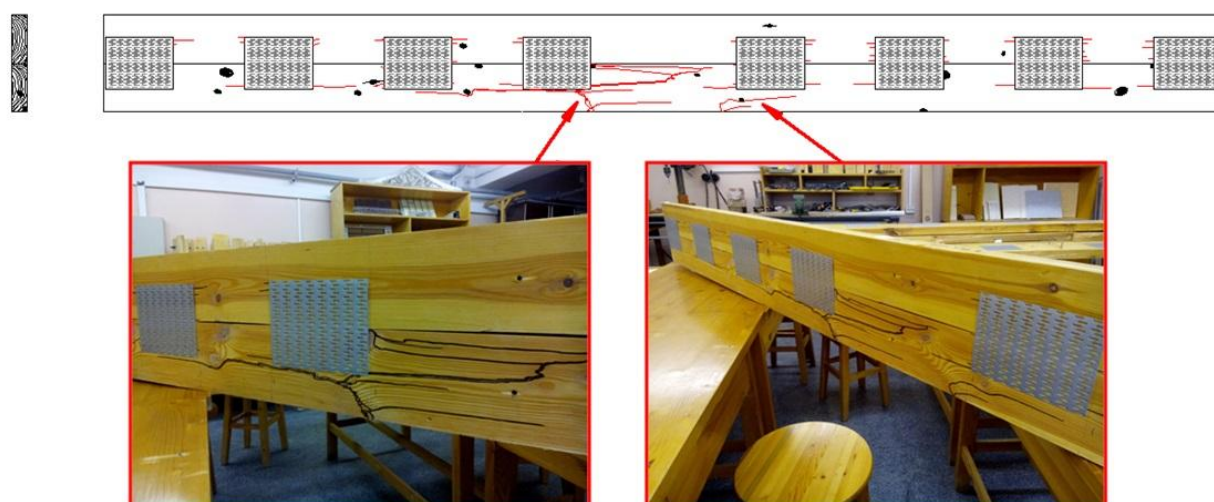


Рисунок 6. Характер разрушения балки (II тип разрушения)

Анализ результатов выполнен по зависимости $N-f$. В соответствии с исследованиями [9] коэффициенты надежности определялись из соотношений:

$$\begin{aligned} k_{nl} &= 1,54 \cdot (1,61 - 0,094 \cdot \lg t) \\ k_{xp} &= 1,82 \cdot (1,61 - 0,094 \cdot \lg t) \\ t &= \frac{t'_1}{38,2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где t – приведенная продолжительность, с;

t'_1 – продолжительность испытания, с.

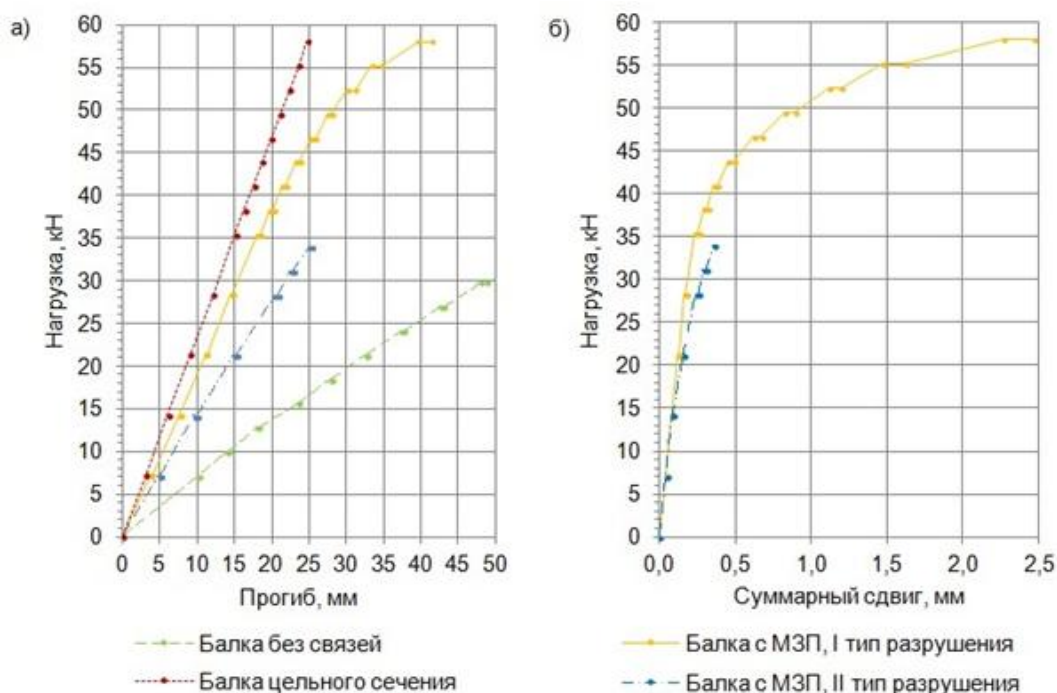


Рисунок 7. Экспериментальные зависимости:
а – максимального прогиба балок от нагрузки; б – суммарного сдвига от нагрузки

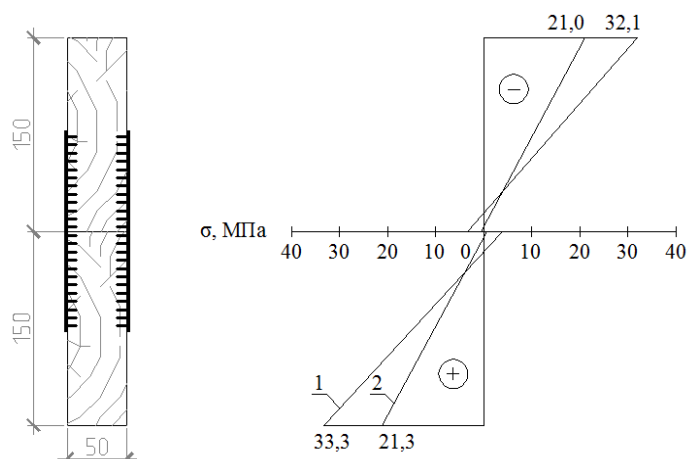


Рисунок 8. Эпюры максимальных нормальных напряжений в балке, соединенной МЗП:
1 – I тип разрушения; 2 – II тип разрушения

На основании статистической обработки результатов испытаний восьми экспериментальных балок в таблице 1 приведены основные значения полученных параметров.

Для сравнения полученных результатов испытаний с теоретическими в расчетном комплексе SCAD Office построена математическая модель балки только I типа разрушения с конечным элементом «оболочка» №44. Размеры каждого конечного элемента принимались 50х50 мм, то есть балка разбивалась на 6 рядов по высоте и на 66 по длине (рис. 9). Для древесины принимались следующие параметры конечных элементов: толщина 0,05 м, модуль упругости 10000 МПа, коэффициент Пуассона 0,49. Для моделирования шва между составными балками узлы конечных элементов в зоне шва не объединялись, а для совместной работы составных балок у этих узлов объединялись перемещения по направлению оси Z.

При моделировании принимались следующие гипотезы и допущения:

- древесину считаем транстропным, гомогенным (однородным) материалом без учета допускаемых пороков;
- основной работой МЗП в соединении является восприятие сдвигающих усилий;
- податливость соединения «МЗП – древесина» определялась из предварительных экспериментальных исследований соединения и учитывалась через приведенный модуль упругости по формуле [20]:

$$E_{np} = E' / \left[1 + \frac{E' \cdot F \cdot \Delta_{eo} \cdot A}{l} \right] \quad (2)$$

где $E' = 300 \cdot R_c$ – касательный модуль упругости древесины, МПа;

R_c – сопротивление сжатию, МПа;

Δ_{eo} – податливость на единицу площади соединения, 1/кНм;

F – площадь сечения элемента с соединением, м²;

A – площадь соединения, м²;

l – длина соединения, м.

Таблица 1. Результаты испытаний составных балок

Показатель	Ед. изм.	Балка с МЗП, I тип разрушения	Балка с МЗП, II тип разрушения
Разрушающая нагрузка, N_t	кН	58,00	34,00
Расчетная нагрузка, N_{I-II} (в упругой стадии)	кН	35,40	34,00
Коэффициент надежности, $K_{пл}$		2,24	-
Коэффициент надежности, $K_{хр}$		-	2,76
Прогиб f при N_{I-II}	мм	18,00	24,93
Расчетный прогиб f цельной балки при N_{I-II} по СНиП II-25-80	мм	15,06	14,46
Нормальные напряжения, $\sigma_{верх}$	при N_t	32,10	21,00
	при N_{I-II}	23,20	
Нормальные напряжения, $\sigma_{ниж}$	при N_t	33,30	21,30
	при N_{I-II}	23,80	
Сум. сдвиг S при N_t	мм	2,46	0,36
Сум. сдвиг S при N_{I-II}	мм	0,23	0,36

При загрузке составной конструкции сопротивление сдвигу воспринимается участком соединения «МЗП – древесина». Для рассматриваемой конструкции с конкретным типом и размерами МЗП сопротивление соединения «МЗП – древесина» будет меньше, чем сопротивление стальной пластины срезу (установлено на основании натурных экспериментальных исследований на сдвиг соединения «МЗП – древесина» и обосновано расчетом). Поэтому конечные элементы, имитирующие МЗП, с некоторой долей допущения принимались с жесткостью, соответствующей жесткости соединения «МЗП – древесина», с учетом податливости соединения.

В зоне соединения принимаем стержневые конечные элементы площадью сечения F (200х50 мм) с модулем упругости 2298 МПа.



Рисунок 9. Расчетная схема составной балки

Карельский А.В., Журавлева Т.П., Лабудин Б.В. Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами, разрушающей нагрузкой

Результаты расчета приведены в таблице 2 и на рисунке 10.

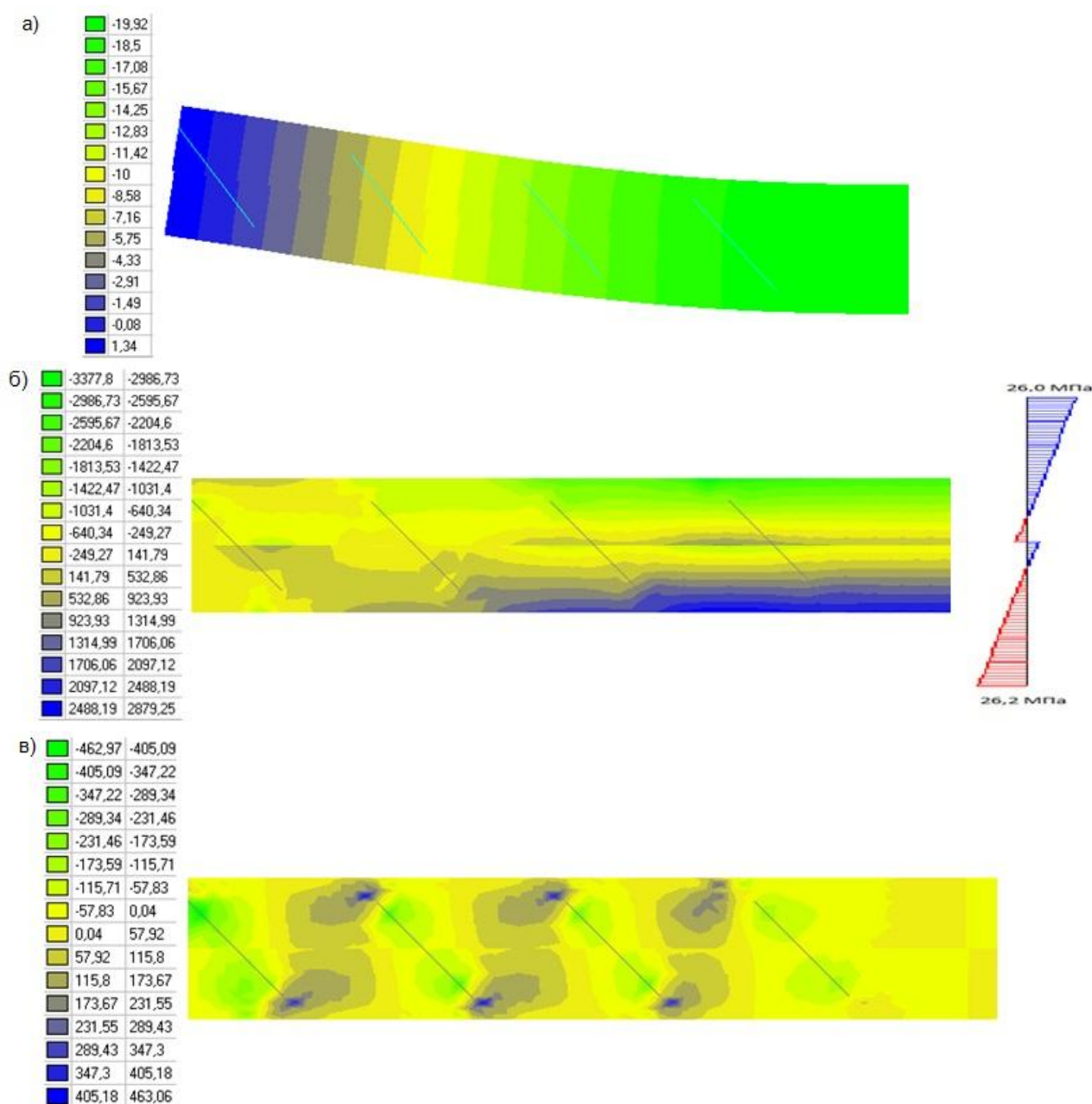


Рисунок 10. Мозаика НДС в составной балке (на полупролете):

а – перемещения, мм; б – нормальные напряжения, σ_x , тс/м²;

в – касательные напряжения, τ_x , тс/м²

Таблица 2. Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований

Показатель	Ед. изм.	Экспериментальные исследования	Теоретические исследования
Разрушающая нагрузка N_t	кН	58,00	58,00
Расчетная нагрузка N_{I-II} в упругой стадии	кН	35,40	35,40
Прогиб f при N_{I-II}	мм	18,0	19,92
Нормальные напряжения $\sigma_{\text{верх}}$ при N_{I-II}	МПа	23,20	26,00
Нормальные напряжения $\sigma_{\text{ниж}}$ при N_{I-II}	МПа	23,80	26,20

Сравнивая характер разрушения балки на рисунке 5 и эпюры на рисунках 10, можно увидеть, что балка разрушилась на участках с максимальными напряжениями, которые получены по результатам численных исследований. Разрушение балок произошло по древесине в зонах без МЗП, а не от потери несущей способности самого МЗП или соединения «МЗП – древесина».

Хорошая сходимость результатов экспериментальных и численных исследований деформативности балки говорит о корректности учета податливости соединения «МЗП – древесина» в математической модели.

Выводы

1. Составная балка на МЗП выдержала нагрузки, сопоставимые с предельными кратковременными нагрузками для цельной балки аналогичного сечения.
2. Разрушение балок при экспериментальных исследованиях происходило в зонах с максимальными нормальными напряжениями и от совместного действия нормальных и касательных напряжений.
3. Расхождение результатов численных и экспериментальных исследований составляет для нормальных напряжений от 9,2 до 10,8 %.
4. Вследствие податливости соединения «МЗП – древесина» деформативность (вертикальные перемещения) составной балки больше, чем цельной, на 16,3 %.
5. Выполненные исследования показали эффективность применения МЗП для повышения сдвигоустойчивости соединения составных деревянных конструкций как при усилении, так и при изготовлении новых конструкций.

Литература

1. Наумов А.К. Изготовление деревянных конструкций, соединенных металлическими зубчатыми пластинами // Механическая обработка древесины. 1976. №7. С. 8–10.
2. Наумов А.К. Исследование несущей способности нагеля-зуба в соединениях деревянных элементов // Вторая научная конференция молодых ученых Волго-Вятского региона. Йошкар-Ола, 1973. С. 16–17.
3. Наумов А.К. Исследование соединений легких деревянных несущих конструкций на металлических зубчатых пластинах. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Москва, 1975. 143 с.
4. Цапаев В.А. Длительная прочность соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах // Механическая обработка древесины. 1980. №9. С. 10.
5. Цапаев В.А. Исследование длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах. Дисс....канд. техн. наук. Москва, 1982. 180 с.
6. Цапаев В.А. Прогнозирование деформативности соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах для заданного срока службы конструкций // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1985. №6. С. 18–21.
7. Цапаев В.А. Расчет соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах по деформациям с учетом фактора времени // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1984. №8. С. 9–13.
8. Цапаев В.А., Котлов В.Г. Учет деформативности соединений на МЗП при расчете строительных конструкций // Исследование облегченных конструкций из древесины, фанеры и пластмасс: Межвузовский сборник. Ленинград, 1986. С. 76–79.
9. Цапаев В.А., Колобов М.В. Коэффициенты надежности соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах // Жилищное строительство. 2008. №5. С. 26–27.
10. Котлов В.Г. Пространственные конструкции из деревянных ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах. Автореф. дисс....канд. техн. наук. Казань, 1992. 17 с.
11. Котлов В.Г. Определение податливости, узловых соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах // Расчет и испытание металлических и деревянных конструкций: Межвузовский сборник. Казань, 1986. С. 95–97.
12. Крицин А.В. Расчет сквозных деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах с учетом упруго-вязких и пластических деформаций. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2004. 24 с.

13. Ермолаев В.В. Автоматизация расчета соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах (МЗП) по деформациям // Технические науки: Сборник трудов аспирантов и магистрантов. Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2005. С. 17–20.
14. Ермолаев В.В., Цепяев В.А. О расчете деформаций соединений деревянных конструкций // Жилищное строительство. 2006. №6. С. 21–23.
15. Ермолаев В.В., Цепяев В.А. Расчётные характеристики древесины в соединениях строительных конструкций на металлических зубчатых пластинах // Жилищное строительство. 2006. №2. С. 14–15.
16. Ермолаев В.В. Экспериментальные исследования ползучести соединений деревянных элементов под углом на металлических зубчатых пластинах // Технические науки: Сборник трудов аспирантов и магистрантов. Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2006. С. 21–25.
17. Лоскутова Д.В. Прочность и деформативность узловых соединений на металлических зубчатых пластинах в сквозных деревянных конструкциях. Автореф....канд. техн. наук. Томск, 2009. 24 с.
18. Лоскутова Д.В. Расчет напряженно-деформированного состояния древесины в зоне контакта с металлической зубчатой пластиной // Вестник ТГАСУ. 2008. №3. С. 149–156.
19. Лоскутова Д.В. Частотно-временной анализ деревянной фермы с соединениями на МЗП // Актуальные проблемы современного строительства: Сборник материалов 60-й международной научно-технической конференции. СПб: Изд-во СПбГАСУ, 2007. С. 114–118.
20. Лоскутова Д.В. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния древесины в зоне контакта с нагелем // Вестник ТГАСУ. 2008. №1. С. 92–96.
21. Лоскутова Д.В. Экспериментальные исследования узловых соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах при изгибе // Вестник ТГАСУ. 2008. №4. С. 74–80.
22. Gattesco N., Macorinib L. In-plane stiffening techniques with nail plates or CFRP strips for timber floors in historical masonry buildings // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 58. Pp. 64–76.
23. Karadelis J., Brown P. Punched metal plate timber fasteners under fatigue loading // Construction and Building Materials. 2000. Vol. 14. Pp. 99–108.
24. Blaß H.J., Schädle P. Ductility aspects of reinforced and non-reinforced timber joints // Engineering Structures. 2011. Vol. 33. Pp. 3018–3026.
25. Humbert J., Boudaud C., Baroth J., Hameury S., Daudeville L. Joints and wood shear walls modelling I: Constitutive law, experimental tests and FE model under quasi-static loading // Engineering Structures. 2014. Vol. 65. Pp. 52–61.
26. Tomoyuki H., Hikaru S., Minoru M. Rotating bending fatigue properties of timber built-joints with metal plate connectors // Journal of the society of materials science. 1979. No. 28. Pp. 623–628.
27. Berenyi B. Gang-Nail típusu szeglemezés fa taratoszerke // Magyar Építőipar. 1979. No. 5. Pp. 286–291.
28. BSR/TPI 1-199x. National Design standard for metal plate connected wood truss construction. Truss Plate Institute. 1992. 112 p.
29. Connectors and metal plate fasteners for structural timber // Timber Research and Development Association. 1996. P. 53.
30. Rysavy E. Racsos faczerkezetek Gang-Nail szeglemezés kapcsolatainak teherbírása // Magyar Építőipar. 1979. No. 8. Pp. 484–486.
31. Beineke L., Suddarth S. Modeling joints made with light-gage metal connector plates // Forest products journal. 1979. Vol. 29. No. 8. Pp. 39–45.
32. Светозарова Е.И. О напряжениях в клеющих балках увеличенной высоты // Межвузовский тематический сборник трудов №2 (140). Ленинград: Изд-во ЛИСИ, 1978. С. 10–15.
33. Попов В.Д., Серов Е.Н. Упрочнение приопорных зон клеющих балок // Межвузовский тематический сборник трудов №2 (140). Ленинград: Изд-во ЛИСИ, 1978. С. 15–21.
34. Рекомендации по проектированию и изготовлению дощатых конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах // ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Москва: Стройиздат, 1983. 40 с.
35. СНиП 11-25-80. Деревянные конструкции.

*Александр Викторович Карельский, г. Архангельск, Россия
Тел. моб.: +7(911)5814688; эл. почта: kaw_79@mail.ru*

*Татьяна Павловна Журавлева, г. Архангельск, Россия
Тел. моб.: +7(931)4032331; эл. почта: t.zhuravleva@narfu.ru*

*Борис Васильевич Лабудин, г. Архангельск, Россия
Тел. моб.: +7(911)5540999; эл. почта: labudin@hotmail.ru*

© Карельский А.В., Журавлева Т.П., Лабудин Б.В., 2015

Карельский А.В., Журавлева Т.П., Лабудин Б.В. Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами, разрушающей нагрузкой

doi: 10.5862/MCE.54.10

Экспериментальное обоснование способа повышения комплексной технологичности стальной стержневой конструкции

*Аспирант А.Н. Ульшин,**Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

Аннотация. В статье проанализированы современные технологии и оборудование, используемые для изготовления и монтажа металлоконструкций, а также типы производимых конструкций. В результате определены дополнительные резервы повышения комплексной технологичности за счет подбора оптимального варианта геометрической формы конструкции, совершенствования отдельных частей конструкции, значений отдельных конструктивных параметров при определенной технологии изготовления и монтажа.

В основе гипотезы о совершенствовании конструктивно-технологического решения лежит комплекс оценки технологичности, который состоит из двух обобщенных показателей: технологичности и качества. Основным назначением этих показателей является оценка затрат всех ресурсов в технологических процессах изготовления и монтажа стальных конструкций, а также качества, приобретаемого в этих процессах. Комплекс оценки технологичности используется организациями, изготавливающими и монтирующими стальные конструкции, для оценки конструктивно-технологических решений и их совершенствования.

Задачи эксперимента: 1) дать обоснование методике определения комплексного показателя технологичности и предположениям, сделанным при формировании данной методики, (путем сравнения теоретических и фактических значений); 2) доказать, что совершенствование конструктивно-технологического решения приводит к увеличению комплексного показателя технологичности по сравнению с проектным вариантом. На основании проведенного эксперимента сделан вывод о том, что предложенный автором метод определения значений комплексных показателей технологичности отражает фактическое их значение с высокой точностью. Подтверждена гипотеза о том, что совершенствование конструктивно-технологического решения, выраженное в замене проектной конструкции или отдельной его части, позволяет получить больший комплексный показатель технологичности, чем для конструкций, заложенных в проекте.

Ключевые слова: стальные стержневые конструкции; комплексная технологичность; показатель технологичности

Введение

Для оценки актуальности проблемы повышения технологичности стальных конструкций были проанализированы современные технологии и оборудование, используемые для изготовления и монтажа металлоконструкций, а также типы конструкций, производимых в различных странах. По данным маркетинговых исследований рынков металлоконструкций анализировался российский рынок производимых конструкций [1–2]. Современные технологии и оборудование для изготовления стальных конструкций описаны в научно-производственных журналах США [3–6]. Новые типы производимых конструкций представлены в журналах, издаваемых Английской ассоциацией стальных строительных конструкций [7–11].

В результате анализа публикаций автором были выявлены обстоятельства, которые и определили актуальность исследования:

- проектируемые конструкции часто оказываются нетехнологичными, так как при проектировании не могут быть учтены все параметры процессов изготовления и монтажа;
- значительное влияние на технологичность изготовления всей конструкции оказывает трудоемкость изготовления узлов металлоконструкций, а на технологичность монтажа – трудоемкость выполнения вспомогательных операций;
- необходимо снижение стоимости работ по изготовлению и монтажу стальных конструкций, а также уменьшение сроков их изготовления;
- проектирование металлоконструкций должно проводиться с учетом особенностей предприятий, изготавливающих и монтирующих эти конструкции, то есть важен системный подход.

Ульшин А.Н. Экспериментальное обоснование способа повышения комплексной технологичности стальной стержневой конструкции

Новый способ повышения технологичности на основе комплекса оценки технологичности

Автором были проанализированы и распределены по группам существующие методы повышения комплексной технологичности строительных конструкций.

Группа №1. Исследования российских авторов по повышению комплексной технологичности, применяемые для стальных конструкций [12–15].

Группа №2. Исследования зарубежных авторов по повышению комплексной технологичности, применяемые для стальных конструкций [16–20].

Группа №3. Исследования российских авторов по повышению комплексной технологичности, применяемые в рамках отдельных частей одного типа стальных конструкций [21–23].

Группа №4. Исследования российских авторов по повышению комплексной технологичности, применяемые для не стальных конструкций (ж/б, алюминиевые) [24–26].

В таблице 1 приведено сравнение существующих способов повышения комплексной технологичности на трех стадиях производства. Оценка способов повышения комплексной технологичности производится с позиции интересов организации, изготавливающей и монтирующей стальные стержневые конструкции. Основным требованием здесь является высокая точность определения показателей технологичности. Для ее достижения в комплексный показатель должно включаться оптимальное количество параметров технологичности изготовления и монтажа и параметров конструкции с учетом различий в технологии.

Таблица 1. Оценка влияния способа повышения комплексной технологичности на технологичность отдельных процессов производства стальных конструкций

№ [ссылка]	Технологичность монтажа	Технологичность изготовления	Конструктивная технологичность
1 [12–20]	Технологичность монтажа определяется одним параметром – трудоемкостью монтажа, получаемой двумя способами: - по нормам ЕНиР; - по формуле зависимости от массы и длины. По нормам ЕНиР и формуле зависимости от массы и длины не учитываются различия в технологии монтажа конструкций, тем не менее, приблизительно значения трудоемкости монтажа могут быть близки к фактическим при рассмотрении конструкций до 12 м. В случае монтажа конструкций свыше 12 м значительное влияние оказывают операции укрупнения, которые зависят от параметра укрупняемого узла, используемых вспомогательных средств, что не может быть учтено ЕНиРом и формулой зависимости от массы и длины.	Технологичность изготовления определяется одним параметром – трудоемкостью изготовления, получаемой двумя способами: - по нормам ЕНиР; - по формуле зависимости от массы и длины. Прогнозирование повышения технологичности изготовления возможно при одной устаревшей технологии изготовления на заводе. В случае изготовления по современной технологии или на монтажном участке изменение технологичности изготовления не прогнозируется.	Конструктивная технологичность повышается за счет вариантного проектирования схем здания (поиска оптимального шага колонн, пролета).
2 [21]	Влияния на показатель технологичности монтажа нет, так как изменение положения промежуточных узлов не влияет на трудоемкость монтажа.	Технологичность изготовления повышается при любых технологиях изготовления. Оптимизация изготовления частичная, так как повышение технологичности изготовления происходит за счет уменьшения трудоемкости лишь некоторых операций изготовления: сварки, резки пластин, за счет изменения	Конструктивная технологичность практически не меняется по причине того, что оптимизация происходит в рамках одной конструкции за счет изменения

Ульшин А.Н. Экспериментальное обоснование способа повышения комплексной технологичности стальной стержневой конструкции

№ [ссылка]	Технологичность монтажа	Технологичность изготовления	Конструктивная технологичность
		углов между стержнями и, как следствие, изменения длины сварных швов и периметра пластин.	положения промежуточных узлов.
3 [22, 23]	Оптимизация технологичности монтажа частичная, так как уменьшение трудоемкости монтажа происходит только за счет трудоемкости операции постоянного закрепления, которая имеет одинаковые значения при любых технологиях.	Оптимизация технологичности изготовления частичная, так как повышение технологичности изготовления происходит только за счет уменьшения трудоемкости операций сварки и сборки которая имеет одинаковые значения при любых технологиях.	Конструктивная технологичность не меняется, так как рассматриваются одинаковые по форме конструкции, оптимизация идет внутри одного типа конструкций.
4 [24–26]	Технологичность монтажа не имеет в исследовании высокой значимости, данное обстоятельство никак не учитывает интересы монтирующей организации.	Технологичность изготовления не имеет в данном исследовании высокой значимости, это обстоятельство никак не учитывает интересы изготавливающей организации.	Применительно к стальным стержневым конструкциям конструктивная технологичность имеет первостепенное значение, эксплуатационную технологичность можно вообще не учитывать.

В ходе анализа существующих способов повышения комплексной технологичности была выявлена дополнительная возможность оптимизации технологичности изготовления и монтажа. Это совершенствование конструктивно-технологического решения в организации, изготавливающей и монтирующей данные конструкции (на стадии, когда известна технология изготовления и монтажа).

Выявленные оптимизационные задачи.

1. Подбор оптимального варианта геометрической формы происходит путем оценки параметров вариантных типов конструкций на основании их конструктивной технологичности, технологичности изготовления, технологичности монтажа и далее комплексной технологичности в условиях конкретной технологии изготовления и монтажа.

2. Оптимизация отдельных частей (узел, стержень) конструкции происходит за счет изменения параметров этих частей, имеющих наибольшее влияние на комплексную технологичность.

На основании выявленных возможностей оптимизации предлагается комплекс показателей для модели оптимизации (комплекс оценки технологичности), лежащий в основе нового метода совершенствования комплексной технологичности.

Комплекс оценки технологичности – комплекс из двух обобщенных показателей: технологичности и качества. Основным назначением этих показателей является оценка затрат всех ресурсов в технологических процессах изготовления и монтажа стальных конструкций, а также качества, приобретаемого в этих процессах. Данный комплекс используется организацией, изготавливающей и монтирующей стальные конструкции, для оценки конструктивно-технологических решений и их совершенствования.

Для четкого обозначения резервов оптимизации были систематизированы основные положения классического вариантного проектирования и совершенствования конструктивно-технологического решения с использованием комплекса оценки технологичности.

Прежде всего, введем понятие альтернативных конструкций. Альтернативные конструкции – конструкции, которые могут быть заменены друг на друга в условиях определенной нагрузки без потери несущей способности и величины полезного эффекта.

Конструкции считаются альтернативными, если они имеют равные:

S, V – площадь или объем, обеспеченные несущей способностью конструкции, $\text{м}^2, \text{м}^3$;

L – длины конструкций, м;

F – нагрузки на м^2 площади покрытия или м^3 объема, кН.

Классическое вариантное проектирование.

На стадии проекта определяется конструкция с максимальным значением K_K и качеством, регламентируемым СП 16.13330.2011:

$$K_{техн.п.} = f(\max K_K, K_u, K_M), \quad (1)$$

где $K_{техн.п.}$ – показатель комплексной технологичности стальной конструкции;

K_K – показатель технологичности конструирования, определяемый путем расчета по предельным состояниям согласно СП 16.13330.2011;

K_u – показатель технологичности изготовления – не определяется, так как на стадии проектирования не известны условия изготовления;

K_M – показатель технологичности монтажа – не определяется, так как на стадии проектирования не всегда известны все условия монтажа.

$$K_{кач} = f(K_{надпо.нагр}, K_{функц.}), \quad (2)$$

где $K_{кач}$ – прогнозируемый комплексный показатель качества стальной конструкции;

$K_{надпо.нагр}$ – показатель надежности по нагрузке, значения регламентируются при помощи коэффициентов надежности по нагрузке СП 16.13330.2011;

$K_{функц.}$ – показатель функционального качества, значения регламентируются расчетом по предельным состояниям в соответствии с СП 16.13330.2011.

Совершенствование конструктивно-технологического решения с использованием комплекса оценки технологичности

На стадии получения проекта организацией изготовления и монтажа определяются альтернативные конструкции с близкими значениями K_K (относительно проектных) и максимальными значениями K_u, K_M и качеством, большим или равным тому, что регламентировано СП 16.13330.2011:

$$K_{техн.} = f(\approx \max K_K, \max K_u, \max K_M). \quad (3)$$

Здесь $\approx \max K_K$ – величина, приближенно равная максимальному проектному значению конструктивной технологичности для альтернативных конструкций;

K_K – показатель технологичности конструирования, определяемый на основании уравнений регрессии в зависимости от типа альтернативных конструкций и параметров расчетной схемы без расчета по несущей способности;

K_u – показатель технологичности изготовления, определяемый на основании уравнений регрессии в зависимости от типа технологии изготовления и параметров конструкции;

K_M – показатель технологичности монтажа, определяемый на основании уравнений регрессии в зависимости от типа технологии монтажа и параметров конструкции.

$$K_{кач} = f(K_{надпо.нагр}, K_{функц.}, K_{изг}, K_{монт}), \quad (4)$$

где $K_{изг}$ – прогнозируемый комплексный показатель качества изготовления, зависит от точности технологии производства (оборудование);

$K_{монт}$ – прогнозируемый комплексный показатель качества монтажа, зависит от точности технологии выверки при монтаже.

Ульшин А.Н. Экспериментальное обоснование способа повышения комплексной технологичности стальной стержневой конструкции

За счет того, что становится известна технология изготовления и монтажа, появляется возможность более точного вычисления показателей качества и технологичности изготовления и монтажа стальной стержневой конструкции. Для получения точных значений показателей технологичности изготовления и монтажа необходимо разработать уравнения регрессии основных параметров технологичности (трудоемкости изготовления, трудоемкости монтажа) при различных технологиях изготовления и монтажа в зависимости от параметров конструкции.

Используя данные исследований о возможностях оптимизации и ее механизмах, можно сформировать следующую гипотезу: совершенствование конструктивно-технологического решения стальных стержневых конструкций путем подбора оптимального варианта геометрической формы конструкции при определенной технологии изготовления и монтажа позволяет увеличить комплексную технологичность по сравнению с проектным вариантным проектированием.

Для подтверждения данной гипотезы поставлен эксперимент по применению комплекса оценки технологичности для альтернативных конструкций, монтируемых одним и тем же методом в одних и тех же условиях изготовления. Эксперимент должен доказать возможность повышения технологичности путем решения выявленных оптимизационных задач и подтвердить адекватность отражения значений отдельных показателей технологичности изготовления и монтажа по сравнению с фактическими.

Постановка задач экспериментального исследования

Комплексный показатель технологичности, предложенный в исследовании [27]:

$$K = \alpha_n \times K_k + \beta_n \times K_u + \gamma_n \times K_m + \lambda_n \times K_{mp}, \quad (5)$$

где K – комплексный показатель оценки технологичности: конструирования, изготовления, транспортировки и монтажа стальных стержневых конструкций;

$\alpha_n, \beta_n, \gamma_n, \lambda_n$ – долевые коэффициенты, метод определения описан в [27];

K_k, K_u, K_m, K_{mp} – показатели технологичности, определены на основании уравнений регрессии в исследованиях [28–30].

Необходимые условия эксперимента:

- сравниваемые стальные стержневые конструкции должны находиться в одних и тех же технологических условиях при изготовлении и монтаже;
- сравниваемые конструкции должны иметь одну и ту же S или V , исходя из определения технологичности конструкции изделия, где S – эксплуатируемая часть площади здания, обеспеченная несущей конструкцией, m^2 ; V – эксплуатируемый объем, обеспеченный несущей конструкцией, m^3 ;
- сравниваемые конструкции должны воспринимать одну и ту же нагрузку.

Конструкции, удовлетворяющие этим условиям, будем считать альтернативными.

Задачи эксперимента.

1. В ходе эксперимента необходимо дать обоснование методике определения комплексного показателя технологичности и предположениям, сделанным при формировании данной методики, путем сравнения теоретических и фактических значений. Выразим это в следующем равенстве для всех типов альтернативных конструкций:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{K_2}{K_1}, \quad (6)$$

где C_1 – себестоимость изготовления, транспортировки и монтажа стальной стержневой конструкции №1;

K_1 – комплексный показатель технологичности изготовления, транспортировки и монтажа стальной стержневой конструкции №1;

C_2 – себестоимость изготовления, транспортировки и монтажа стальной стержневой конструкции №2;

Ульшин А.Н. Экспериментальное обоснование способа повышения комплексной технологичности стальной стержневой конструкции

K_2 — комплексный показатель технологичности изготовления, транспортировки и монтажа стальной стержневой конструкции №2.

В этом случае формула для определения комплексного показателя технологичности K справедлива для всех типов конструкций.

Отношение $\frac{C_1}{C_2}$ отражает некоторую степень совершенства в эффективности расхода ресурсов (в изготовлении, транспортировке, монтаже) одной конструкции по сравнению с другой.

Отношение $\frac{K_2}{K_1}$ должно также отражать некую степень совершенства в эффективности расхода ресурсов (в изготовлении, транспортировке, монтаже) одной конструкции по сравнению с другой.

Эта степень совершенства должна быть одинакова для всех возможных комплексных показателей технологичности, так как отношения $\frac{K_2}{K_1}$, $\frac{C_1}{C_2}$ выражают перерасход или экономичность расхода основных ресурсов конструкции №1 по сравнению с конструкцией №2 в относительной форме.

Проверим данное равенство в условиях конкретного производства на различных повторяющихся в одном заказе типовых стальных стержневых конструкциях на пролетах 3, 6, 9, 12, 15, 18 м. Под повторяющимися в одном заказе типовыми конструкциями подразумеваются стальные стержневые конструкции с одинаковыми стержнями (тип проката, длина) и различными вспомогательными элементами (узлами).

2. В ходе эксперимента необходимо доказать, что совершенствование конструктивно-технологического решения приводит к увеличению комплексного показателя технологичности по сравнению с проектным вариантом.

Для доказательства данного обстоятельства необходимо построить графики зависимостей комплексных показателей технологичности альтернативных конструкций от длины и масс альтернативных конструкций от длины. На данных графиках будут показаны участки, на которых конструкции с большей массой имеют больший комплексный показатель технологичности. Этот факт и означает увеличение комплексного показателя технологичности по сравнению с проектным вариантом, выбираемым только по массе.

Описание экспериментального исследования

Последовательность проведения эксперимента.

I Этап. Получение исходных данных, необходимых для расчета себестоимости, путем экономического анализа в конкретной организации, изготавливающей и монтирующей стальные конструкции.

II Этап. Определение параметров технологичности изготовления и монтажа на тонну для различных типов конструкций на конкретном заводе.

III Этап. Определение себестоимости и комплексного показателя технологичности изготовления альтернативных конструкций при различных длинах.

IV Этап. Определение себестоимости и комплексного показателя технологичности монтажа альтернативных конструкций при различных длинах и высотах здания.

V Этап. Определение себестоимости и комплексного показателя технологичности изготовления и монтажа альтернативных конструкций при различных длинах.

VI Этап. Заключение о зависимостях между C и K и равенстве $\frac{C_1}{C_2} = \frac{K_2}{K_1}$ на примере стоечных и пролетных альтернативных конструкций.

VII Этап. Подтверждение гипотезы об увеличении комплексного показателя технологичности при совершенствовании конструктивно-технологического решения по сравнению с проектным вариантом конструкции.

По результатам этапов III–V построены графики зависимостей показателей технологичности (изготовление – рис. 1, 2; монтаж – рис. 3, 4; комплексная технологичность – рис. 5, 6) от длины для нескольких типов альтернативных конструкций.

Графики комплексного показателя технологичности конструирования и изготовления, себестоимости материала и изготовления для альтернативных конструкций

На рисунке 1 приведен график (комплексный показатель технологичности конструирования и изготовления и себестоимость материала и изготовления) для альтернативных конструкций:

- прокатные балки;
- фермы из гнутосварной трубы.

Использованы следующие обозначения:

$\sum_{i=1}^n (C_{\text{мат}i} \times M_i)_1$ – график стоимости проката для балок 14Б1-80Б1 по СТО АСЧМ 20-93;

$\sum_{i=1}^n (C_{\text{мат}i} \times M_i)_2$ – график стоимости проката для ферм из гнутосварной трубы;

C_1^u, K_1^u – график себестоимости материала и изготовления и комплексного показателя технологичности конструирования и изготовления для прокатных балок;

C_2^u, K_2^u – график себестоимости материала и изготовления и комплексного показателя технологичности конструирования и изготовления для ферм из гнутосварной трубы.

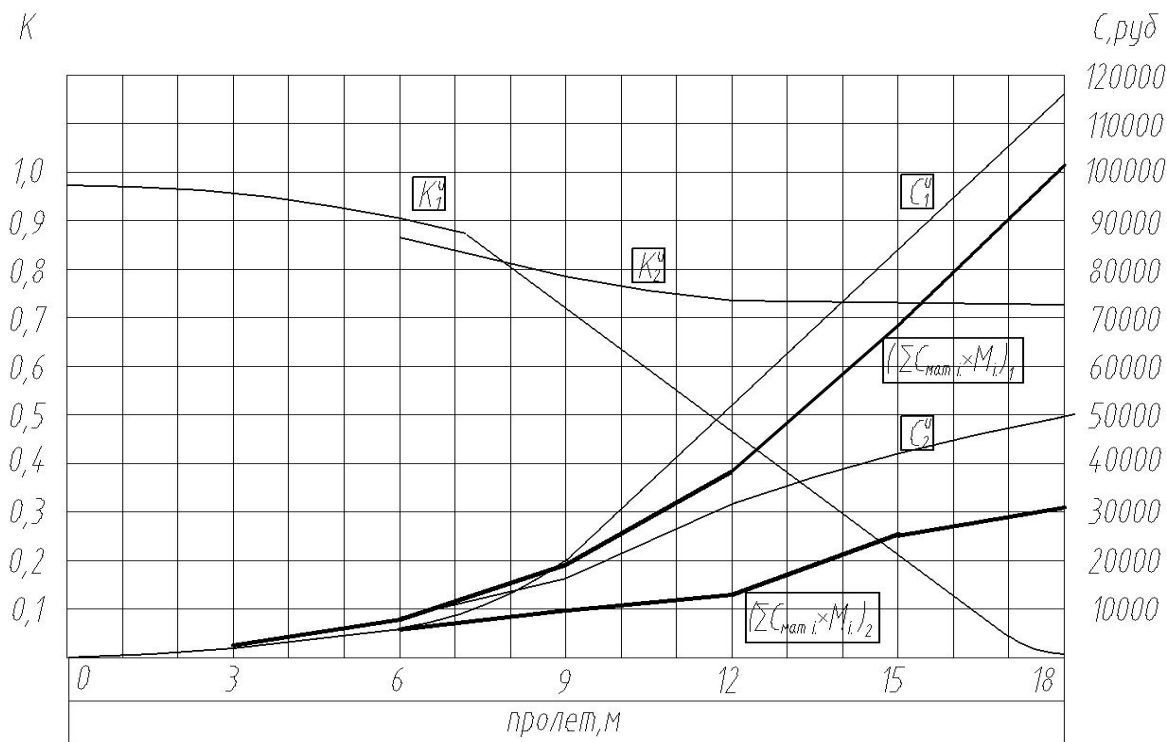


Рисунок 1. Зависимость комплексного показателя технологичности конструирования и изготовления (K) и себестоимости материала и изготовления (C) от длины конструкции

На рисунке 2 приведен график (комплексный показатель технологичности конструирования и изготовления и себестоимость материала и изготовления) для альтернативных конструкций:

- сплошные колонны;
- составные сечения колонн из двух швеллеров.

Использованы следующие обозначения:

$\sum_{i=1}^n (C_{\text{мат}i} \times M_i)_1$ – график стоимости проката колонн 20 К1-40К1 по СТО АСЧМ 20-93.

$\sum_{i=1}^n (C_{\text{мат}i} \times M_i)_2$ – график стоимости проката для составных сечений колонн из двух швеллеров;

C_1'', K_1'' – график себестоимости материала и изготовления и комплексного показателя технологичности конструирования и изготовления для колонн;

C_2'', K_2'' – график себестоимости материала и изготовления и комплексного показателя технологичности конструирования и изготовления для составных сечений колонн из двух швеллеров.

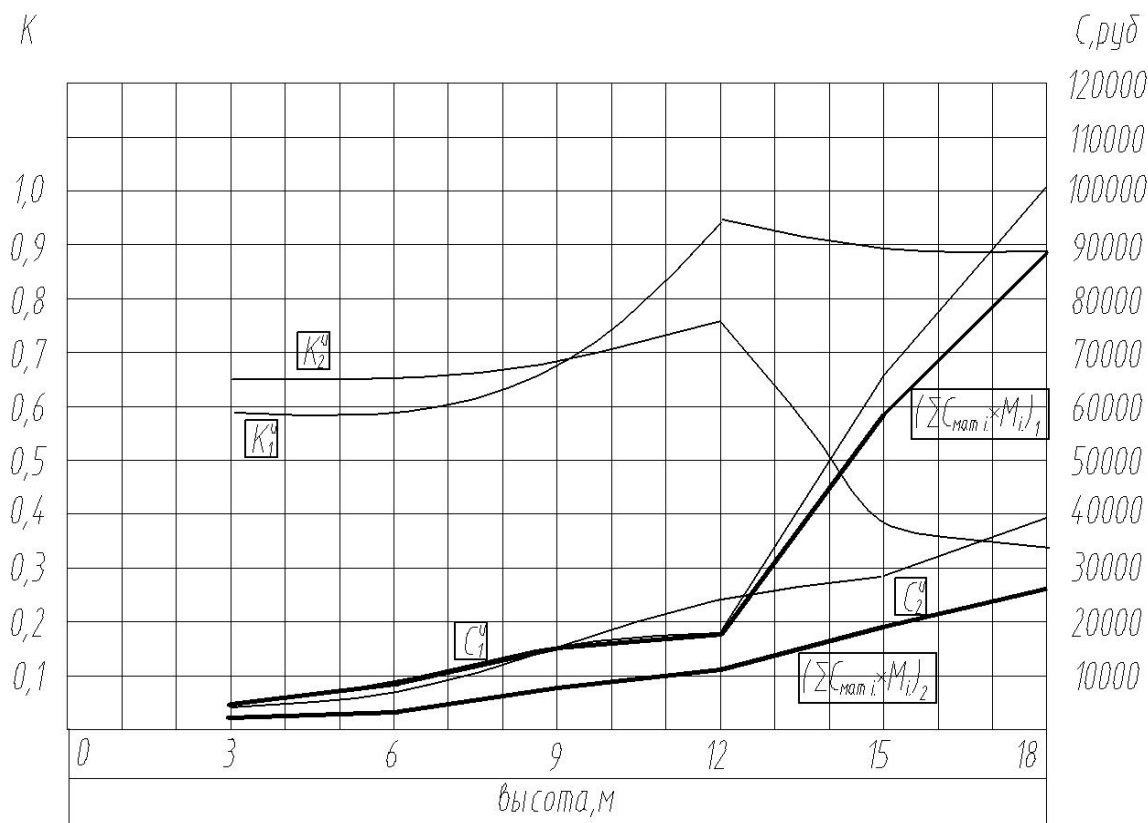


Рисунок 2. Зависимость показателя комплексного технологичности конструирования и изготовления (K) и себестоимости материала и изготовления (C) от длины конструкции

В результате анализа графиков, представленных на рисунках 1, 2, сделаны следующие выводы:

- повышение технологичности изготовления стальной стержневой конструкции способно значительно повлиять на комплексный показатель технологичности;
- степенная форма зависимости для параметров технологичности полностью подтверждается.

Графики показателя технологичности монтажа и себестоимости монтажа для альтернативных конструкций

На рисунке 3 приведен график для альтернативных стоечных конструкций:

- сплошные колонны;
- составные сечения колонн.

Использованы следующие обозначения:

C_1^u, K_1^u – график себестоимости монтажа и показателя технологичности монтажа для колонн 20 К1-40К1 по СТО АСЧМ 20-93;

C_2^u, K_2^u – график себестоимости монтажа и показателя технологичности монтажа для составных сечений колонн из двух швеллеров 12 П-22 П по ГОСТ 8240-97.

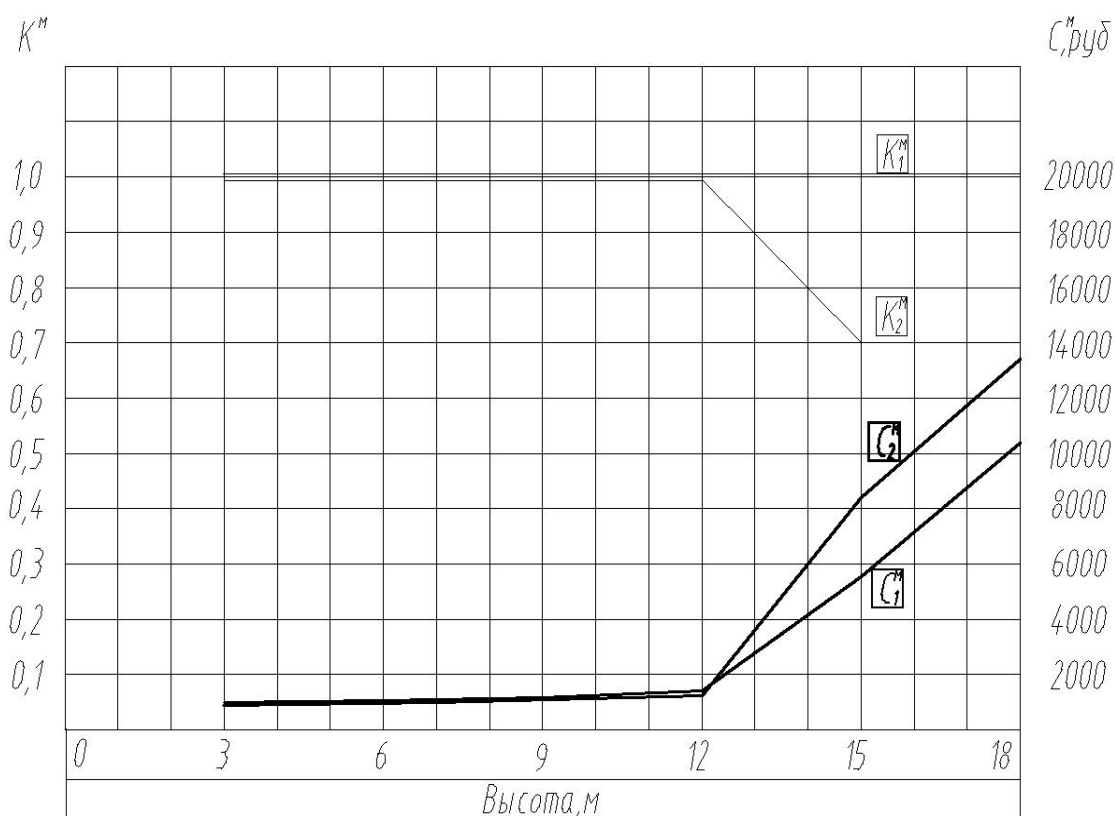


Рисунок 3. Зависимость комплексного показателя технологичности монтажа (K) и себестоимости монтажа (C) от высоты колонн

На основе графика (рис. 3) было установлено, что в случае поэлементного свободного кранового монтажа будут верны следующие положения.

1. При сравнении альтернативных стоечных стальных стержневых конструкций до 12 м себестоимость их монтажа близка друг к другу, а значит, технологичность монтажа также одинакова и не оказывает негативного влияния на общую технологичность. Это связано с близкими трудоемкостями операций подготовки монтажа и монтажных операций. Себестоимости монтажа конструкций близки друг к другу и не могут значительно изменить разницу в полных себестоимостях изготовления, транспортировки и монтажа данных альтернативных стальных стержневых конструкций.

2. На пролетах 12–18 м разница в себестоимости монтажа стоечных конструкций оказывает незначительное влияние на общую себестоимость изготовления, транспортировки и монтажа. Учитывая, что себестоимость монтажа составных колонн больше, чем себестоимость монтажа сплошных колонн, данное обстоятельство может изменить соотношение общих себестоимостей изготовления, транспортировки и монтажа для альтернативных конструкций.

На рисунке 4 приведен график для альтернативных пролетных конструкций:

- балки сплошные, перфорированные, гофрированные;
- составные сечения ферм из гнutosварной трубы.

На графике построены три кривые себестоимости для сплошных сечений и три – для составных, а именно:

- для зданий высотой до 12 м;
- для зданий высотой 12–15 м;
- для зданий высотой до 25 м.

Использованы следующие обозначения:

C_1'', K_1'' – график себестоимости монтажа и показателя технологичности монтажа для балок сплошных, перфорированных, гофрированных;

C_2'', K_2'' – график себестоимости монтажа и показателя технологичности монтажа для ферм из гнutosварной трубы.

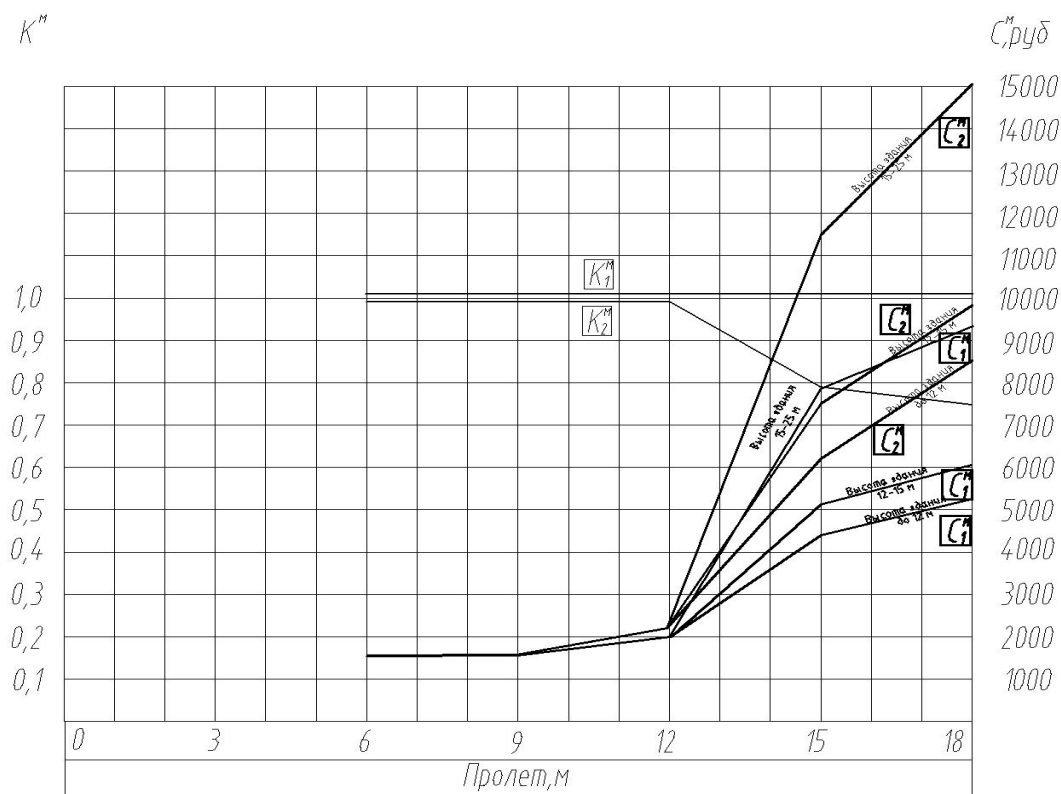


Рисунок 4. Зависимость комплексного показателя технологичности монтажа (K) и себестоимости монтажа (C) от длины пролетных конструкций

На основе графика (рис. 4) установлено, что в случае поэлементного свободного кранового монтажа методом наращивания будут верны следующие положения.

1. При сравнении альтернативных пролетных стальных стержневых конструкций до 12 м себестоимость их монтажа близка друг к другу, значит, технологичность монтажа также одинакова и не оказывает негативного влияния на общую технологичность. Это связано с близкими трудоемкостями операций подготовки монтажа и монтажных операций. Себестоимости монтажа конструкций близки друг к другу и не могут значительно изменить разницу в полных себестоимостях изготовления, транспортировки и монтажа данных конструкций.

2. При высоте здания 12–18 м стоимость монтажа фермы оказывается значительно больше стоимости монтажа балки, а значит, может оказать влияние на полную себестоимость изготовления, транспортировки и монтажа.

Ульшин А.Н. Экспериментальное обоснование способа повышения комплексной технологичности стальной стержневой конструкции

Зависимости между C и K и равенство $\frac{C_1}{C_2} = \frac{K_2}{K_1}$ на примере стоечных и пролетных альтернативных конструкций

На рисунке 5 приведены графики комплексной технологичности: конструирования, изготовления и монтажа – для альтернативных конструкций:

- прокатные сплошные балки;
- ферма из гнутосварной трубы.

Приняты следующие обозначения:

C_1'' , K_1'' – график полной себестоимости и комплексного показателя технологичности для балок сплошных 14Б1-80Б1 по СТО АСЧМ 20-93;

C_2'' , K_2'' – график полной себестоимости и комплексного показателя технологичности для ферм из гнутосварной трубы.

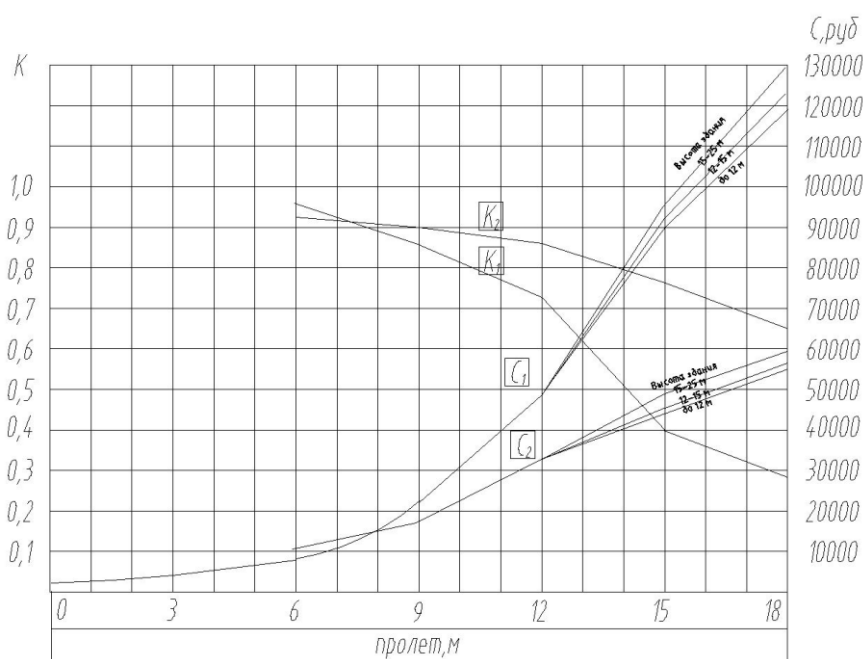


Рисунок 5. Зависимость комплексного показателя технологичности (K) и полной себестоимости (C) от длины пролетных конструкций

На рисунке 5 построены три кривые себестоимости для балки и три – для фермы, а именно:

- для зданий высотой до 12 м;
- для зданий высотой 12–15 м;
- для зданий высотой 15–25 м.

В результате анализа графика на рисунке 5 сделаны следующие выводы:

- на пролетах до 12 м определяющим параметром в составе комплексного показателя технологичности изготовления, транспортировки и монтажа является технологичность изготовления стальной стержневой конструкции;
- на пролетах 12–15 м определяющими параметрами в составе комплексного показателя технологичности являются технологичность монтажа и технологичность изготовления стальной стержневой конструкции при любых высотах здания;
- при пролетах свыше 15 м расчет комплексного показателя технологичности не требуется, так как применим только один тип конструкции – фермы, и повышение технологичности возможно лишь путем совершенствования технологичности данной конструкции, а именно изменения типа узлов или типа проката стержней конструкции.

Ульшин А.Н. Экспериментальное обоснование способа повышения комплексной технологичности стальной стержневой конструкции

Для обоснования получаемых значений комплексного показателя технологичности проведем сравнение K_1, K_2 и C_1, C_2 для пары конструкций ферма – балка на конкретных пролетах (см. табл. 2).

Сравнив себестоимость и комплексный показатель технологичности для пролетных конструкций, можно сделать вывод о подтверждении теоретически выведенного комплексного показателя оценки технологичности через фактическую себестоимость.

На рисунке 6 приведен график для альтернативных конструкций:

- сплошные колонны;
- составные сечения колонн из двух швеллеров.

Использованы следующие обозначения:

C_1^u, K_1^u – график полной себестоимости и комплексного показателя технологичности для колонн сплошных 20 К1-40К1 по СТО АСЧМ 20-93;

C_2^u, K_2^u – график полной себестоимости и комплексного показателя технологичности для составных сечений колонн из двух швеллеров по ГОСТ 8240-97.

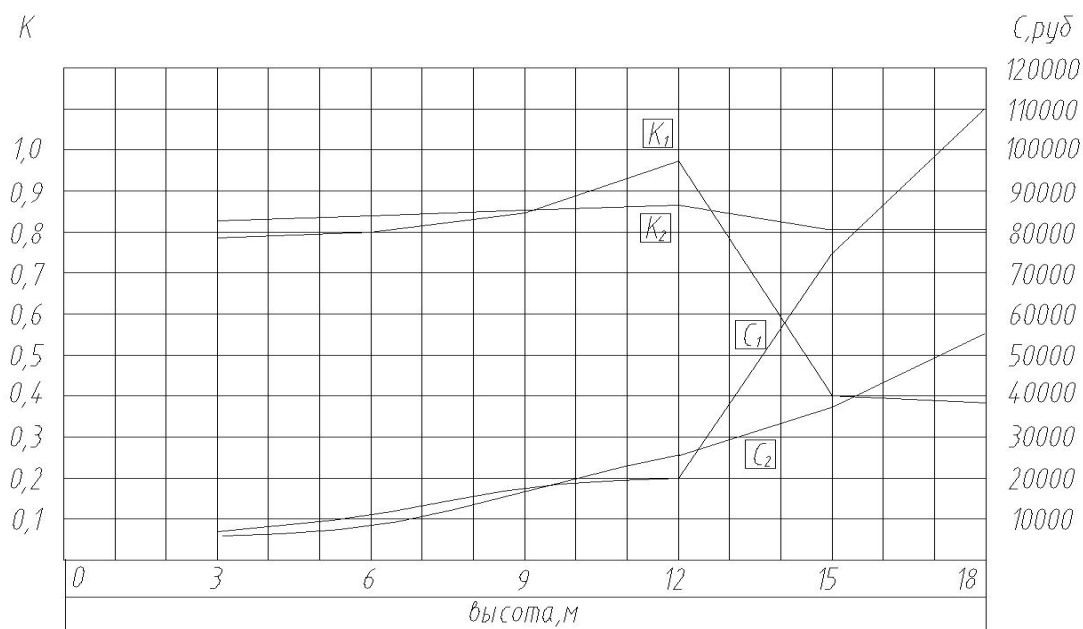


Рисунок 6. Зависимость комплексного показателя технологичности (K) и полной себестоимости (C) от высоты колонны

На основе графика (рис. 6) автором сделаны следующие выводы:

- при высотах до 12 м определяющим параметром в составе комплексного показателя оценки технологичности изготовления, транспортировки и монтажа является технологичность изготовления стальной стержневой конструкции;
- при высотах 12–15 м определяющими параметрами в составе комплексного показателя технологичности являются технологичность монтажа и технологичность изготовления стальной стержневой конструкции при любых высотах здания;
- при высотах свыше 15 м расчет комплексного показателя технологичности не требуется, так как применим только один тип конструкции – колонны составного сечения, и повышение технологичности возможно лишь путем совершенствования технологичности данной конструкции, а именно изменения типа узлов или типа проката стержневой конструкции.

Для обоснования получаемых значений комплексного показателя технологичности проведем сравнение K_2 и C_2 на конкретных пролетах для пары конструкций сплошная колонна – решетчатая колонна (см. табл. 2).

Сравнив себестоимость и комплексный показатель технологичности для стоечных конструкций, можно сделать вывод о подтверждении теоретически выведенного комплексного показателя оценки технологичности через фактическую себестоимость.

Сводная таблица определения комплексных показателей оценки технологичности и себестоимости для альтернативных пролетных и стоечных конструкций представлена ниже.

Таблица 2. Результат эксперимента сравнения полных себестоимостей и комплексных показателей оценки технологичности конструирования, изготовления, транспортировки и монтажа конструкций

Номер сравнения	C_1	C_2	K_1	K_2	$\frac{C_1}{C_2}$	$\frac{K_2}{K_1}$	Соблюдение равенства отношений
1	20961	17579	0,84	0,89	1,19	1,06	да
2	49246	33210	0,74	0,86	1,48	1,16	да
3	91542	49264	0,4	0,76	1,86	1,9	да
4	133848	56688	0,28	0,65	2,36	2,36	да
5	5947	5377	0,79	0,83	1,11	1,05	да
6	10973	9833	0,8	0,84	1,12	1,05	да
7	15999	16292	0,84	0,85	0,98	1,04	да
8	21200	24756	0,97	0,87	0,86	0,89	да
9	72098	336566	0,4	0,8	1,97	1,97	да
10	110521	53159	0,38	0,8	2,08	2,08	да

Исходя из проведенных экспериментов, можно сделать вывод, что формула для определения основного комплексного показателя оценки технологичности, выведенная автором, может быть использована для оценки технологичности стальных стержневых конструкций.

Заключение

На основании проведенного эксперимента сделаны следующие выводы.

1. Характер зависимости в предложенных уравнениях регрессии определения трудоемкости изготовления стальных стержневых конструкций подтверждается характером зависимостей из графиков показателей технологичности изготовления (рис. 1, 2), построенных по экспериментальным данным.

2. Характер зависимости в предложенных уравнениях регрессии определения трудоемкости монтажа стальных стержневых конструкций подтверждается характером зависимостей из графиков показателей технологичности монтажа (рис. 3, 4), построенных по экспериментальным данным.

3. Предложенный автором метод определения значений комплексных показателей технологичности (5) отражает их фактическое значение с высокой точностью.

4. Подтверждено, что совершенствование конструктивно-технологического решения, выраженное в замене проектной конструкции или отдельной его части, позволяет получить больший комплексный показатель технологичности, чем для конструкций, заложенных в проекте.

Литература

1. Рынок строительных металлоконструкций. Маркетинговое исследование / IndexBox. М., 2013. 176 с.
2. Шиповских И.Ю., Иванченко И.Г. Исследование рынка строительных металлоконструкций // Стройпрофиль. 2008. №2(40). С. 9–12.
3. Modern Steel Construction / American institute of steel construction. Chicago, May 2002. 32 p.
4. Modern Steel Construction / American institute of steel construction. Chicago, January 2004. 34 p.
5. Modern Steel Construction / American institute of steel construction. Chicago, April 2005. 25 p.
6. Modern Steel Construction / American institute of steel construction. Chicago, November 2006. 11 p.
7. Pfeiffer E, Kern A. Modern production of heavy plates for construction applications – controlling production processes and quality // Steel Construction. 2014. Vol. 7.No. 2. Pp. 147–153.
8. Bedair O. Modern steel design and construction in Canada's oil sands industry // Steel Construction. 2014. Vol. 7. No. 1. Pp. 32–40.
9. New Steel Construction / British Constructional Steelwork Association. Vol. 23 (№2), 2015.
10. New Steel Construction / British Constructional Steelwork Association. Vol. 20 (№11), 2014.
11. Azimi R., Abourizk S.M., Alvanchi A., Lee S. A framework for an automated and integrated project monitoring and control system for steel fabrication projects // Automation in Construction. 2011. Vol. 20. No. 1. Pp. 88–97.
12. Коклюгина Л. А. Оценка и выбор конструктивного решения металлических конструкций для реализации инвестиционного проекта. Дисс... канд.техн.наук. Казань, 2000. 125 с.
13. Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Гимранов Л.Р. Новые конструктивные решения стальных каркасов легких многопролетных зданий // Известия КГАСУ. 2011. № 1(15). С. 88–92.
14. Салахутдинов М.А., Кузнецов И.Л. Оптимизация параметров нового конструктивного решения стального каркаса многопролетного здания // Известия КГАСУ. 2012. №2(20). С. 94–98.
15. Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Гимранов Л.Р. Новые конструктивные решения стальных каркасов легких многопролетных зданий // Известия КГАСУ. 2011. № 1(15). С. 88–92.
16. Bijlaard F. High strength still in building and civil engineering structures: design of connections Coelho A.M.G. // Advances in Structural Engineering. 2010. Vol. 13. No. 3. Pp. 413–429.
17. Dong S.L., Zhao Y. The application and development of pretensioned long-span steel space structures in China // Advances in Steel Structures (ICASS '02). Proceedings of the Third International Conference on Advances in Steel Structures 9–11 December 2002, Hong Kong, China. 2002. Pp. 15–26.
18. Aveni M. Steel connector could reduce assembly time // Civil Engineering. 2001. Vol. 71. No. 10. Pp. 24.
19. Abspoel R., Bijlaard F. Optimization of plate girders // Steel construction. 2014. Vol. 7. No. 2. Pp. 116–125.
20. Nozhova E. Between geometry and craft: the setting-out of the NiGRES Tower // Steel Construction. 2014. Vol. 7. No. 1. Pp. 48–55.
21. Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5. С. 28–37.
22. Исаев А.В., Кузнецов И.Л. Вариантность критериев оптимальности при синтезе рационального конструктивного решения на примере стропильных ферм // Известия КазГАСУ. 2009. №1(11). С. 92–98.
23. Еремеев П.Г. Научно-техническое сопровождение при проектировании, изготовлении и монтаже металлоконструкций // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2007. №3. С. 28–42.
24. Шаленный В.Т., Папирный Р.Б. Повышение технологичности проектных решений монолитных и сборно-монолитных зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2010. №2. С.19–21.
25. Рябов С.А., Лугачева Н.А. Технологичность конструкций. Кемерово: КузГТУ, 2006. 65 с.
26. Колганов И.М., Дубровский П.В., Архипов А.Н. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Ульяновск: УоГТУ, 2003. 20 с.
27. Ульшин А.Н. Методика определения обобщенного показателя технологичности конструирования, изготовления, транспортировки и монтажа стальной стержневой конструкции // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. №2-1(33). С. 95–98.

*Алексей Николаевич Ульшин, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(981)725-45-99; эл. почта: lesha.ul@mail.ru*

© Ульшин А.Н., 2015

Ульшин А.Н. Экспериментальное обоснование способа повышения комплексной технологичности стальной стержневой конструкции

doi: 10.5862/MCE.54.11

Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells

V.A. Penchuk,*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture;***V.K. Rudnev,****N.V. Saenko,****V.N. Suponev,****V.I. Oleksyn,****S.P. Balesniy,****S.M. Vivchar,***Kharkiv National Automobile and Highway University*

Abstract. The combined method of horizontal wells development by a soil thrust boring plant of static action with cutting rings has been proposed.

The ratio between the diameters of the cutting ring and horizontal well has been determined. The regression equation was received to determine a minimum depth of a horizontal well laying depending on the diameter of the bore hole and soil porosity. The dependencies for determining emerging forces while developing a horizontal well with a cutting ring and its cleaning with a disk with account of geometric parameters of the working equipment and soil condition have been established.

The general view of the soil thrust boring plant and its working equipment for developing horizontal wells has been presented.

Key words: trenchless technologies; communication; horizontal well; thrust boring method; jacking; combined method; soil

Introduction

The constrained conditions of cities require small and easily mounted equipment for effective laying and repairing underground communications. These requirements are met by the plants for thrust boring and pipe jacking of horizontal wells with their subsequent expansion to the desired diameter by means of soil radial compaction to the wellbore wall or removing it to the surface from the hole of the developed well.

Thus, the increase in the efficiency of formation of horizontal wells is a topical issue. It has become particularly important in connection with the intensive development of underground communications and the urgent problem of the existing infrastructure reconstruction.

Analysis of publications

Fundamentals of the thrust boring and pipe jacking theory are thoroughly studied in [1–7]. The results of the application of these methods in combination with each other or with other methods, e.g. auger boring are given in papers [8–11]. Possibilities of working processes intensification due to hydraulic, pneumatic and vibrodynamic impact on operating equipment and developed environment have been explored.

Objective of work

On the basis of existing theoretical fundamentals concerning horizontal wells development with the help of thrust boring and analysis of research on improving its operating processes it is intended to substantiate the possible efficiency increase when using the method of static thrust boring by its combination with the method of jacking.

The objective of this work is to establish regularities of the process of thrust boring in combination with the method of jacking by a ring operating device.

Methods and Results

Today, trenchless laying of engineering services under various conditions is carried out with the help of various technologies and technical devices for their implementation [12–15].

The process of traditional boring of horizontal wells by compact thrust boring plants of static action comprises the interrelated steps: for the thrust boring method it is the initial thrust boring of the pilot hole and its expansion to the desired diameter with the help of conic expanders.

A significant limitation for the application of this method is the probability of damaging the road base and its pavement, as well as adjacent communications due to elastoplastic deformation of soil around the developed well [16, 17]. On the basis of experimental studies a regression equation was received which takes into account soil porosity and the diameter of the horizontal well for determining the minimum depth of its laying $H_{\min}$ which eliminates soil swelling [17]:

$$H_{\min} = \left(4.4 + \frac{1}{(0.01 \cdot n_0)^{2.25}} \right) \cdot d, \quad (1)$$

where n_0 is soil porosity, %; d is well diameter, m.

Dependencies of the minimum depth of the well laying on its diameter and soil porosity are shown in Fig. 1.

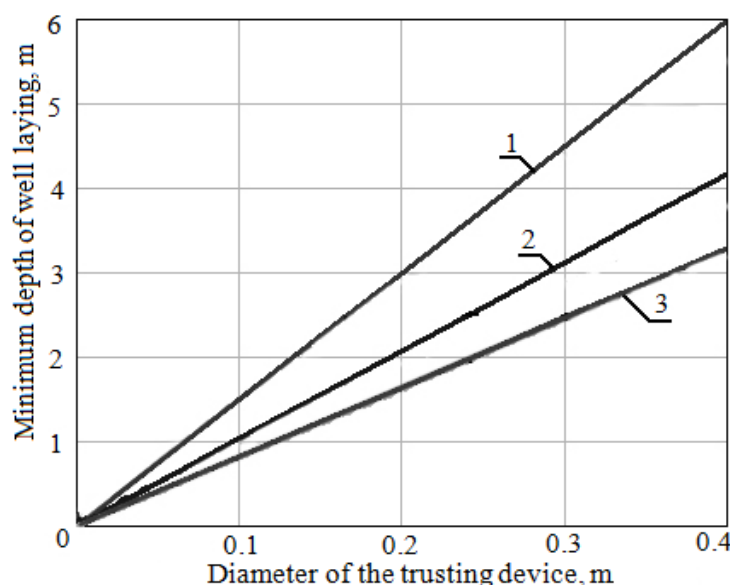


Figure 1. Dependency of the minimum depth of the well laying on the diameter of the thrust head and soil porosity: 1 – for solid clay with $n_0 = 38\%$; 2 – for loam with $n_0 = 45\%$; 3 – for loamy sand with $n_0 = 53\%$

There is no disadvantage like this when forming the well by the method of pipe jacking. However, significant sizes of the plant and a big volume of excavation connected with digging pits of appropriate dimensions, removing soil from the sunk pipe, also impose restrictions on the application of the method.

To receive greater efficiency in development of horizontal wells, the authors [19, 20] proposed a combined method which has advantages of each of the analyzed technologies, namely: the development of big diameter wells using a small size plant.

The possibility of developing big diameter wells is provided by the use of cutting rings, which excludes the further development of deformation around the well.

The combined method is implemented by the combination of the following equipment: a thrust head, a cone expander and cutting rings. Fig. 2 shows the implementation of the proposed method.

In Fig. 2a и 2b the well is developed with the help of thrust boring. The well depth should not exceed the allowable value of $H_{\min}$ that eliminates the destruction of the road base and the damage of adjacent communications from compacted soil which is calculated according to Equation 1.

Penchuk V.A., Rudnev V.K., Saenko N.V., Suponev V.N., Oleksyn V.I., Balesniy S.P., Vivchar S.M. Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells

The well can be further expanded by the method of jacking. The method of jacking (Fig. 2c) is realized by sequential drawing of special cutting rings when the diameter of the following cutting ring is bigger than that of the previous one. After cleaning the well with, e.g., a scraper working body (Fig. 2d), a protective case is drawn in its cavity (Fig. 2e).

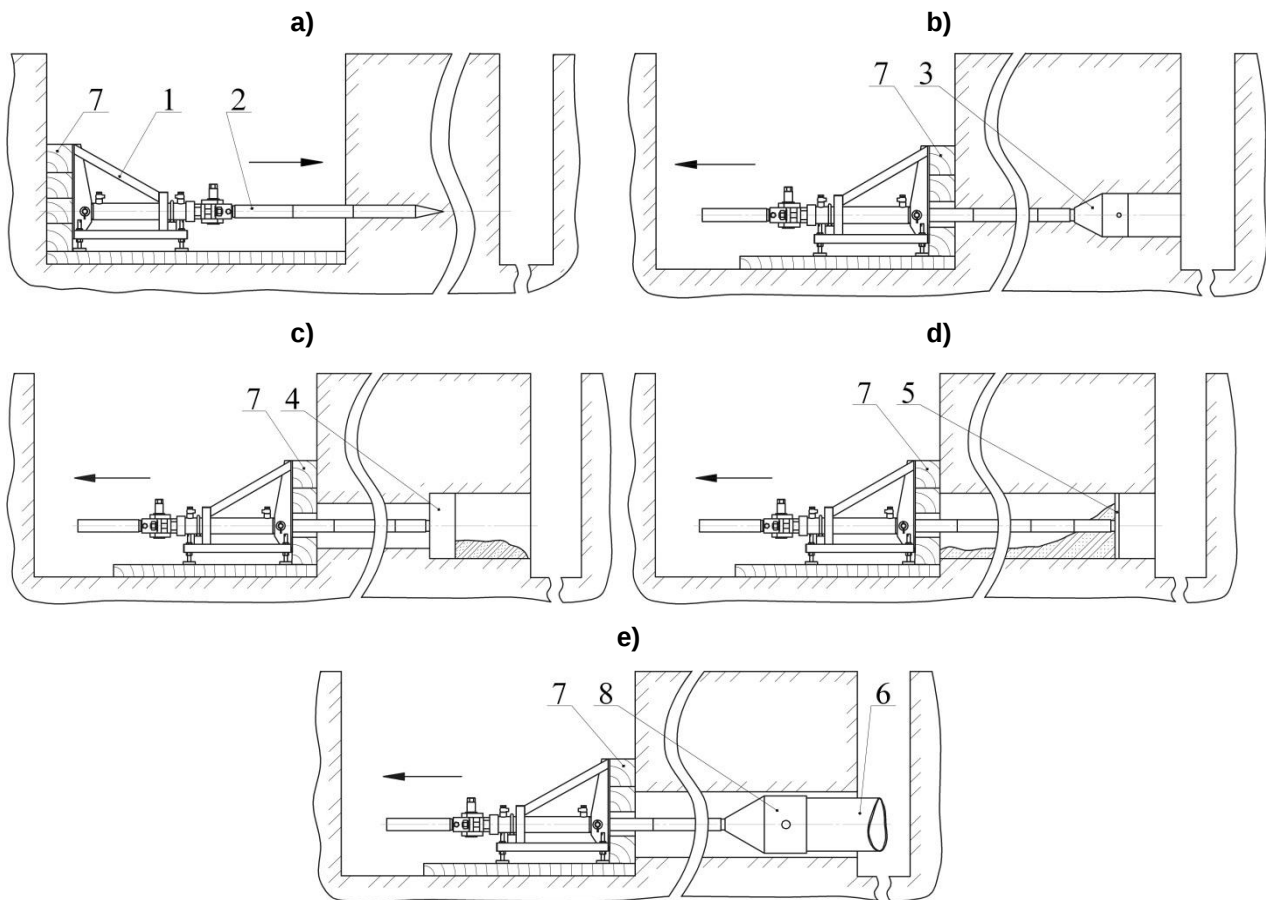


Figure 2. The well development by the combined method: a – pilot thrust boring; b – well expansion with the expander; c – well expansion with the cutting ring; d – well cleaning; e – drawing the protective case in the well; 1 – thrust boring plant; 2 – rod; 3 – conic expander; 4 – cutting ring; 5 – cleaning disk; 6 – protective case; 7 – resistant bars; 8 – pipe holder

Calculations showed that between the diameters of the cutting ring d and d_1 a certain ratio must be kept because of the necessity of the cut soil free passing through the cutting ring:

$$\frac{d_1}{d} \approx 1.25 \dots 1.35. \quad (2)$$

The scheme of interaction of the cutting ring with soil in the well is given in Fig. 3.



**Figure 3. Scheme of the well expansion with a cutting ring: a – pilot thrust boring; b – well expansion with a cutting ring
1 – cutting ring; 2 – cut soil**

The prism of the cut soil is formed in front of the cutting ring when it moves. Its pressure facilitates the passage of the cut soil through the holes in the ring. Force P_1 (Fig. 4) causes the thrust force P_r , which creates additional loading on the soil element cut by the ring. When moving the cutting ring the following forces should be overcome: force P_1 , friction between the cutting ring and the well T_1 , head resistance of soil to the edges of the ring P' and resistance to cutting soil with the cutting ring P_G .

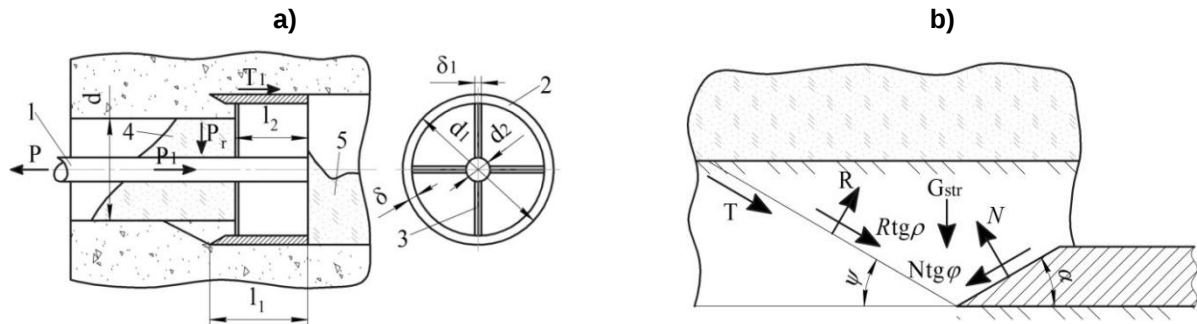


Figure 4. Scheme of interaction between the cutting ring and the well soil:

a – construction scheme; b – calculation scheme;

1 – rod; 2 – cutting ring; 3 – edge; 4 – prism of soil; 5 – soil passed through the ring holes;
 α – wedge angle of the ring; ρ – angle of soil internal friction; φ – angle of soil external friction;
 T – resistance of shear of the cut element to soil; N – normal pressure of the head facet of sharp edge of the ring on the soil; ψ – angle of soil displacement; G_{str} – weight of the soil cut element

The dependency for determining resistance of the cutting ring movement during the well expansion can be calculated like this:

$$P = 2\xi \operatorname{tg} \varphi \frac{l_2^2}{\alpha_1} E_p \left[\frac{(d_1 - 2\delta - d_2)(0.5n\pi + \pi^2) - 2\delta}{\pi(d_1 - 2\delta - d_2)} + p\pi d_1 l_1 \operatorname{tg} \varphi + \frac{n}{\alpha_1} \delta_1 l_2 E_p + \right. \\ \left. + \frac{\sin(\alpha + \varphi)}{\sin(\alpha + \varphi + \psi + \rho)} \left[\left\{ 2\xi^2 \frac{l_2^2}{\alpha_1} E_p \frac{(d_1 - 2\delta - d_2)(0.5n\pi + \pi^2) - 2\delta}{\pi(d_1 - 2\delta - d_2)} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + \delta \frac{\pi}{8} d_1 (d_1 - d)^2 (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \psi) \right\} \sin(\rho + \psi) + c \frac{\pi}{4} \frac{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 \psi - 1}}{\operatorname{ctg} \psi} (d_1^2 - d^2) \cos \rho \right] \right] \quad (3)$$

where α_1 – correction factor;

E_p – module of loose soil deformation;

ξ – coefficient of soil lateral pressure;

p – soil resistance to crumpling;

n – number of ring edges;

c – soil adhesion in the well wall;

γ – volume weight of soil.

Graphs of dependencies of forces applied to the cutting ring in relation to the diameter of the ring and the soil category are given in Fig. 5.

There is some cut loose soil inside the well along its entire length after expanding it with the cutting ring. This soil can be removed by pushing it out with a cleaning disc. Let us consider the concurrent processes (Fig. 6).

At the first stage, as the disk moves, some soil is accumulated in front of it until the prism of dragging is formed. Upon further movement of the disc the whole section of the well is filled with soil, and the soil begins to thicken.

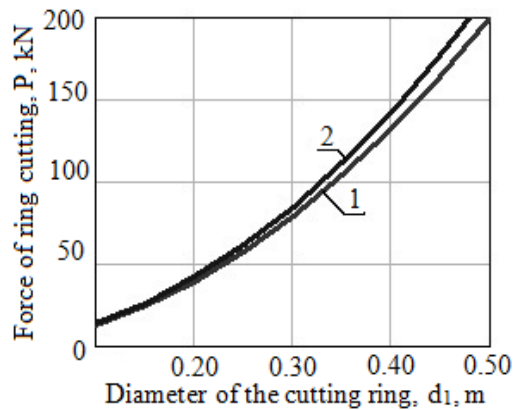


Figure 5. Dependency of the force of well expanding with the cutting ring:
1 – loam; 2 – clay

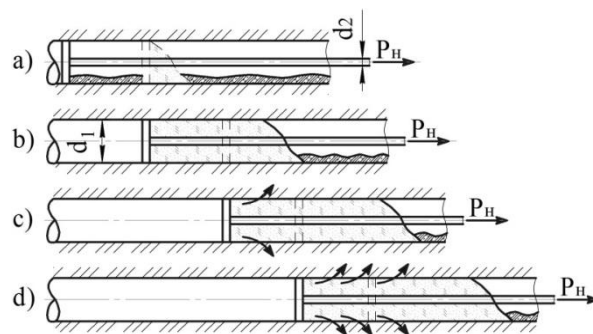


Figure 6. Well cleaning from the cut soil:
a – formation of the prism of dragging in front of the disk; b – soil deformation with the disk;
c – soil compaction with its partial displacement in the well walls; d – soil compaction with its complete displacement in the well walls

Let us select the element of soil at the distance x from the disk which will be acted upon from its both sides by normal pressure, respectively σ and $\sigma + d\sigma$; normal pressure σ_n will act on the perimeter of the selected element, and shear stress τ will act with the displacement of the selected element on its perimeter (Fig. 7).

The equilibrium equation for the selected element of soil (soil weight G_{gr} is neglected) can be given like this:

$$\frac{\pi}{4} d_1^2 \sigma = \frac{\pi}{4} d_1^2 (\sigma + d\sigma) + \xi \operatorname{tg} \rho \pi d_1 \sigma dx + \xi \operatorname{tg} \phi \pi d_2 \sigma dx. \quad (4)$$

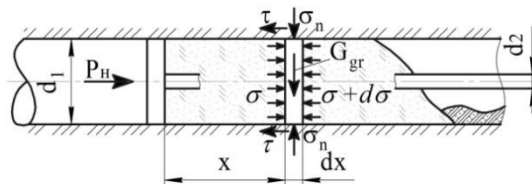


Figure 7. Diagram for determining the value of pressure of the cleaning disc on the pressed out soil

At the third and fourth stages of the disk movement (Fig. 6) the part of soil starts getting pressed in the walls of the well, so for its cleaning some force should be applied to the disk:

$$P_H = \frac{\pi P_d}{4\xi} (d_1^2 - d_2^2), \quad (5)$$

where P_d is the resistance of soil to pressing.

When choosing value P_d , it should be taken into account that pressing occurs in the compacted soil, the strength of which can be increased 1.5–2 times.

The dependency of the force of cleaning the well with the cleaning disk on the diameter and the type of soil is given in Fig. 8.

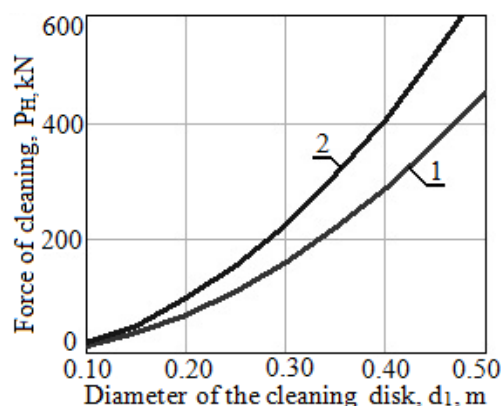


Figure 8. Dependency of the force of cleaning the well with the cleaning disk on the diameter and the type of soil: 1 – loam; 2 – clay

From the graphs shown in Fig. 5 and 8, it can be seen that the decisive parameter for choosing the plant is the force P_H , needed for cleaning the well.

Calculations based on these dependencies show that the application of the cutting rings allows us to obtain wells with the diameter up to 0.400 m and more, depending on the category of soil with thrust boring plants that are available.

The obtained results of the research have been confirmed by field trials on the basis of the plant for static soil thrust boring MP-250, produced by NPP "Gaztehnika". Under the conditions of scientific and research testing ground of Kharkiv National Automobile and Highway University the efficiency of the suggested combined method for the development of horizontal wells was proved (Fig. 9).

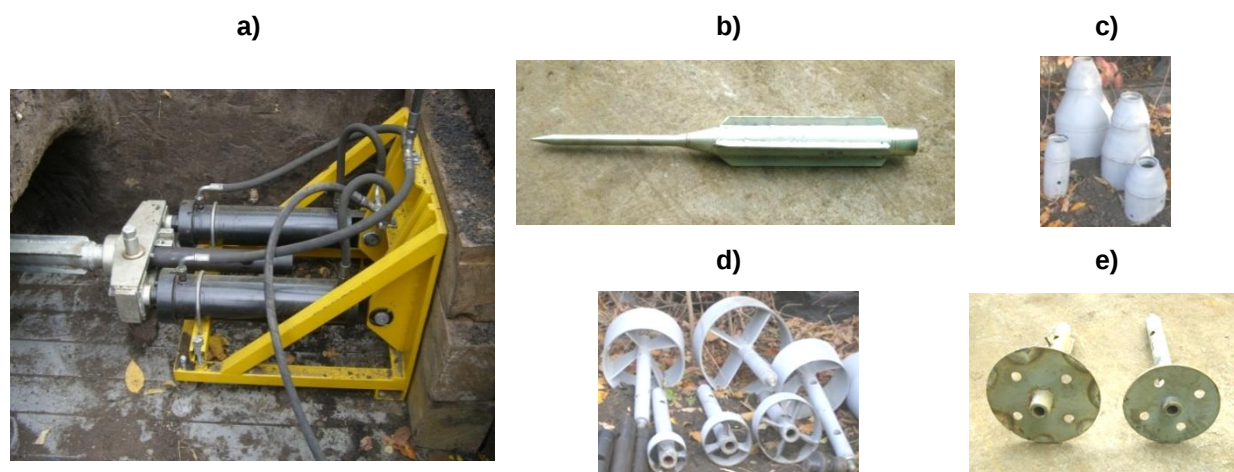


Figure 9. General view of the soil thrust boring plant and its working equipment: a – general view of a soil thrust boring plant; b – thrust boring head; c – conic expanders; d – cutting rings; e – cleaning discs

The hypothesis of the processes of digging soil with cutting rings and removing it from wells using the cleaning disc was confirmed. Convergence of theoretical calculations and actual values of resistance forces of wells development was in the range of 10–15 % that can be considered quite sufficient. By the results of the research a flow chart for developing a horizontal well with a soil thrust boring plant by the combined method was worked out. The effectiveness of the method was supported by its practical application at the objects of trenchless laying of protective cases with a diameter up to 0.325 m inclusively, for water and gas pipelines under roads (with a length of sections up to 10 m) at a depth of 1.5 m from the surface. In all cases, first the well was developed by the method of thrust boring up to a diameter of 0.159 m, and then it was brought to the project diameter with the help of cutting rings.

Conclusions

1. The dependency for determining the minimum depth of horizontal wells laying with account of the diameter of the communication and soil porosity has been studied.
2. The combined method of forming horizontal wells with the use of cutting rings has been developed.
3. The regularities for developing wells with cutting rings in various types of soil and cleaning the bottom hole from the cut soil have been established.

References

1. Kovanko V.V. Keruvannya kursom pidzemno rukhomogo pristroyu v rezhimi pryamoliniynogo peremishchennya [Course management of underground moving device under rectilinear displacement]. *Visnik NUVGP: zb. nauk. prats* [Bulletin of National University of Water Management and Nature Resources Use]. 2008. No. 4(44). Pp. 187–192. (ua)
2. Kovanko V. V., Kovanko O. V. Prokladannya liniyno-protyazhnykh ob'ektiv na noviy tekhnichniy osnovi [Laying linearly extended objects on a new technical basis]. *Bulletin of Engineering Academy of Ukraine*. 2008. No. 3-4. Pp. 158–162. (ua)
3. Zemskov V.M., Sudakov A.V. Analiz issledovaniya lobovogo soprotivleniya pri bestransheyroy prokladke truboprovodov metodom prokola [Analysis of head resistance at trenchless pipeline by method of thrust boring]. *Izvestiya TulGU. Seriya Podyemno-transportnyye mashiny i oborudovaniye*. 2005. No.6. Pp. 35-38. (rus)
4. Romakin N.Ye., Malkova N.V. Usiliye vnedreniya i optimalnyy ugol zaostreniya rabocheho nakonechnika pri staticheskom prokole grunta grunta [Force of penetration and optimal wedge angle of the working head at static thrust boring]. *Construction and Road Building Machinery*. 2006. No. 10. Pp. 35–37. (rus)
5. Romakin N.Ye., Malkova N.V. Parametry rabocheho instrumenta dlya staticheskogo prokola grunta [Parameters of working tool for static thrust boring]. *Construction and Road Building Machinery*. 2007. No. 11. Pp. 31–33. (rus)
6. Kantovich L.I., Ruzhitskiy V.P., Grigoryev S.M., Grigoryev A.S. Rezultaty issledovaniya prodavlivayushchikh ustanovok dlya bestransheyroy tekhnologii stroitelstva podzemnykh inzhenernykh kommunikatsiy [Results of research of pipe jacking plants for trenchless laying of underground communications]. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2008. No.2. Pp. 2–7. (rus)
7. Grigoryev A.S. Obosnovaniye i vybor parametrov prodavlivayushchikh ustanovok dlya bestransheyroy tekhnologii stroitelstva podzemnykh inzhenernykh kommunikatsiy [Substantiation and selection of parameters of jacking plants for trenchless laying of underground communications]. PhD dissertation. Moscow: Moscow State Mining University, 2005. 112 p.
8. Gileta V.P., Smolyanskiy B.N. Prokhodka skvazhin s chastichnoy eskavatsiyey r'runta [Development of wells with partial excavation of soil]. *Construction and Road Building Machinery*. 2001. No.4. Pp. 7–9. (rus)
9. Zwierzchowska, A. Beztransheyne prokladannya truboprovodiv za dopomogoyu gidravlichnykh agregativ dlya prodavlyuvannya iz pilotnim burinnyam [Trenchless underground pipelines made with hydraulic units for earth piercing with pilot boring]. *Rinok instalyatsiy*. 2009. No. 9. Pp. 6–12. (ua)
10. Jung Y., Sinha S. Evaluation of trenchless technology methods for municipal infrastructure system. *Journal of infrastructure systems*. 2007. No. 13(2). Pp. 144–156.
11. Matsumiya Y. *Pipe jacking*. Japan Sewage Works Association. Japan, 2013. 17 p.
12. Mohammad Najafi P.E., Brett Gunnick P.E., George Davis R.G. *Preparation of construction specifications, contract documents, field testing, educational materials, and course offerings for trenchless construction Final report*. University of Missouri-Columbia, 2005. 55 p.
13. Dayal U., J. Ward N., Joyal N., Boyce G., Nigam S., Gautam R. *Trenchless technology – an overreview*. Paul C. Rizzo Associates, Inc., 2011. 10 p.
14. Hunt D.V.L., Nash D., Rogers C.D.F. Sustainable utility placement via multi-utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014. No. 39. Pp. 15–26.
15. Posmityukha O.P., Glavatskiy K.Ts. Obr'runtuvannya poperechnogo pererizu beztransheyroy utvorenikh tekhnologichnykh porozhnin u r'runti dlya komunikatsiy [Methods of trenchless formation of technological cavities in soil for communication pipes]. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2012. No. 57. Pp. 214–221. (ua)

16. Marshall A.M., Haji T. An analytical study of tunnel-pile interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. No. 45. Pp. 43–51.
17. Fernando V., Moore I. Use of Cavity Expansion Theory to Predict Ground Displacement during Pipe Bursting. *Pipelines 2002: Beneath Our Feet: Challenges and Solutions*. 2002. Pp. 1-11.
18. Suponev V.N., Oleksin V.I., Vivchar S.M. Trebovaniya, vydvigayemye k parametram gorizontalnykh skvazhin, i effektivnost bestransheynykh metodov ikh razrobotki [The Requirements to Parameters of Horizontal Wells and Effectiveness of Trenchless Method of Their Development]. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2014. No. 65-66. Pp. 101–106. (rus)
19. Oleksin V.I., Suponev V.M., Kaslin M.D., Rudnev V.K. *Method for reaming a horizontal well* [Sposib rozshirennya gorizontальної sverdlovini: patent na korisnu model]. Utility patent UA 72790 27.08.2012. (ua)
20. Rudnev V.K., Suponev V.N., Oleksin V.I. Rasshireniye gorizontalnykh skvazhin koltsevyimi nozhami [Expansion of horizontal wells with the cutting rings]. *Energy saving, Power engineering, Energy*. 2013. No. 4. Pp. 72–77. (rus)

Valentin Penchuk, Makiivka, Donetsk region, Ukraine
+380505614627; e-mail: penshyk@rambler.ru

Viacheslav Rudnev, Kharkiv, Ukraine
+380507925658; e-mail: rudnev_vyacheslav@mail.ua

Natalie Saenko, Kharkiv, Ukraine
+380662709245; e-mail: sayenkonv@mail.ru

Vladimir Suponev, Kharkiv, Ukraine
+3(096)0580965; e-mail: v-suponev@mail.ru

Vladimir Oleksyn, Kharkiv, Ukraine
+30680029580; e-mail: vladimirumm@ukr.net

Sergey Balesniy, Kharkiv, Ukraine
+380956012543; e-mail: sergey.balesnyy@mail.ru

Stanislav Vivchar, Kharkiv, Ukraine
+30967307200; e-mail: vivchar.stanislav@gmail.com

© Penchuk V.A., Rudnev V.K., Saenko N.V., Suponev V.N., Oleksyn V.I., Balesniy S.P.,
Vivchar S.M., 2015

Требования к материалам, представляемым к публикации

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

Этические нормы и авторские права

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

Тематика статей

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

№	Дата выхода	Срок подачи материалов	Тема номера
3(55)	30.04.2015	16.03.2015	Гидротехническое строительство. Основания и фундаменты
4(56)	26.06.2015	11.05.2015	Соппротивление материалов. Строительная механика
5(57)	24.08.2015	10.07.2015	Строительные конструкции и сооружения. Промышленное и транспортное строительство
6(58)	12.10.2015	04.09.2015	Теплогазоснабжение и вентиляция. Водоснабжение и канализация. Гидравлика.

Структура и содержание статей

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

Технические требования к статьям

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

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

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

Аннотация к статье

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

Подробные требования к статьям см. на сайте журнала:

<http://www.engstroy.spb.ru/authors.html>



Федеральное бюджетное автономное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
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 ФГАОУ ВО «СПбПУ»
- ✓ Зачисление проходит на конкурсной основе по результатам междисциплинарного экзамена в объеме требований ФГОС ВПО по направлению подготовки
- ✓ Обучение проходит в течение 2 лет
- ✓ Обучение проходит на бюджетной или контрактной основе
- ✓ Обучение проходит по очной или заочной форме



Особенности обучения

в инженерно-строительном институте:

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

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

Контакты

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
Центр дополнительных профессиональных программ

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

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

П-01 «Промышленное и гражданское строительство»

Программа включает учебные разделы:

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

П-02 «Экономика и управление в строительстве»

Программа включает учебные разделы:

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

П-03 «Инженерные системы зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

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

П-04 «Проектирование и конструирование зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

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

П-05 «Контроль качества строительства»

Программа включает учебные разделы:

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

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

