Инженерно-строительный журнал

ISSN

научно-прикладное издание

2071-4726

№3(38) апрель 2013



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



Инженерно-строительный факультет Курсы повышения квалификации и профессиональной переподготовки

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, тел/факс: 552-94-60, <u>www.stroikursi.spbstu.ru</u>, <u>stroikursi@mail.ru</u>

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

| Код | Наименование программы |
|--------------|---|
| | Курсы по строительству |
| БС-0104 | «Безопасность и качество выполнения общестроительных работ» |
| БС-01 | «Безопасность и качество выполнения геодезических, подготовительных и земляных работ, |
| | устройства оснований и фундаментов» |
| БС-02 | «Безопасность и качество возведения бетонных и железобетонных конструкций» |
| БС-03 | «Безопасность и качество возведения металлических, каменных и деревянных конструкций» |
| БС-04 | «Безопасность и качество выполнения фасадных работ, устройства кровель, защиты |
| | строительных конструкций, трубопроводов и оборудования» |
| БС-05 | «Безопасность и качество устройства инженерных сетей и систем» |
| БС-06 | «Безопасность и качество устройства электрических сетей и линий связи» |
| БС-08 | «Безопасность и качество выполнения монтажных и пусконаладочных работ» |
| БС-12 | «Безопасность и качество устройства мостов, эстакад и путепроводов» |
| БС-13 | «Безопасность и качество выполнения гидротехнических, водолазных работ» |
| БС-14 | «Безопасность и качество устройства промышленных печей и дымовых труб» |
| БС-15 | «Осуществление строительного контроля» |
| БС-16 | «Организация строительства, реконструкции и капитального ремонта. Выполнение функций |
| B0-10 | заказчика-застройщика и генерального подрядчика» |
| | Курсы по проектированию |
| БП-01 | «Разработка схемы планировочной организации земельного участка, архитектурных решений, |
| | мероприятий по обеспечению доступа маломобильных групп населения» |
| БП-02 | «Разработка конструктивных и объемно-планировочных решений зданий и сооружений» |
| БП-03 | «Проектирование внутренних сетей инженерно-технического обеспечения» |
| БП-04 | «Проектирование наружных сетей инженерно-технического обеспечения» |
| БП-05 | «Разработка технологических решений при проектировании зданий и сооружений» |
| БП-06 | «Разработка специальных разделов проектной документации» |
| БП-07 | «Разработка проектов организации строительства» |
| БП-08 | «Проектные решения по охране окружающей среды» |
| БП-09 | «Проектные решения по обеспечению пожарной безопасности» |
| БП-10 | «Обследование строительных конструкций и грунтов основания зданий и сооружений» |
| БП-11 | «Организация проектных работ. Выполнение функций генерального проектировщика» |
| 14.01 | Курсы по инженерным изысканиям |
| И-01 И-02 | «Инженерно-геодезические изыскания в строительстве» |
| И-02 | «Инженерно-геологические изыскания в строительстве» |
| И-03 И-04 | «Инженерно-гидрометеорологические изыскания в строительстве» |
| ПР-09 | «Инженерно-экологические изыскания в строительстве» «Обследование строительных конструкций и грунтов основания зданий и сооружений» |
| И-05 | «Ооследование строительных конструкции и трунтов основания здании и сооружении» «Организация работ по инженерным изысканиям» |
| F1-U3 | «Организация расст по инженерным изысканиям» |

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

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

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

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

| M |
|------|
| 1/1 |
| 4/ E |
| C |

научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

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

Специализированный научный журнал. Выходит с 09.2008.

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Адрес редакции:

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

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Научный редактор:

Николай Иванович Ватин

Литературный редактор:

Елена Викторовна Соболева

Редакционная коллегия:

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

и другие.

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

Установочный тираж 1000 экз. Подписано в печать 25.04.13 Формат 60х84/8, усл. печ. л. 8. Заказ №1305

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

Тел. +7(812)535-52-47 E-mail: <u>engstroy@inbox.ru</u>

Web: <u>Http://www.engstroy.spb.ru</u>

Содержание

СОБЫТИЯ

| Дефекты и усиление зданий и сооружений | 3 |
|--|---|
| Энергоэффективность инженерных сетей зданий | 5 |
| Экспертиза проектной документации: быть или не | |
| быть | 6 |
| | |

МАТЕРИАЛЫ

| Клюев С.В., Клюев А.В., Сопин Д.М., Нетребенко А.В., | |
|--|----|
| Казлитин С.А. Тяжелонагруженные полы на основе | |
| мелкозернистых фибробетонов | 7 |
| Шмитько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А. | |
| Мультипараметрическая оптимизация структуры | |
| ячеистого силикатного бетона | 15 |

ТЕХНОЛОГИЯ

Сандуляк А.А., Ершов Д.В., Ершова В.А.,
Сандуляк А.В. О характеристиках магнитоконтроля
ферропримесей (подлежащих магнитной сепарации)
сырья строительных материалов
24
Черных Т.Н., Орлов А.А., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я.,
Перминов А.В. Снижение температуры получения
магнезиального вяжущего из бруситов
29

МЕТОДЫ

Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения

36 Абдуллаев Г.И., Величкин В.З., Солдатенко Т.Н. Повышение организационно-технологической надежности строительства линейно-протяженных сооружений методом прогнозирования отказов

43

КОНСТРУКЦИИ

Летова Т.И., Петинов С.В. Оценка усталостной долговечности крестообразных сварных соединений, передающих нагрузку 51 Бабков В.В., Резвов О.А., Гафурова Э.А., Кузнецов Д.В., Синицин Д.А., Кильдибаев Р.С., Вахитов Р.Р., Самойлов А.А. Деформативность штукатурных составов в современных теплоэффективных наружных стенах зданий 59

© ФГБОУ ВПО СПбГПУ, 2013

На обложке: иллюстрации авторов к статьям номера

Дефекты и усиление зданий и сооружений

21 марта 2013 г. в Военном (инженерно-техническом) институте Министерства обороны РФ прошла ежегодная научно-методическая конференция «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций». Конференция традиционно стала местом встречи и обмена мнениями для специалистов по обследованию и усилению зданий.

Сергей Николаевич Савин, д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», постоянный участник конференции, сделал доклад, посвященный динамическому мониторингу уникальных сооружений. С.Н. Савин является ведущим специалистом в России в этом направлении (см., например, Савин С.Н. Динамический мониторинг строительных конструкций на примере пандуса киноконцертного зала «Пушкинский» в г. Москва // Инженерно-строительный журнал. 2012. №7(33). С. 58–62). По его словам, после вступления в силу ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» количество проблем в области проведения динамического мониторинга только увеличилось. В этом документе впервые было указано, что при мониторинге зданий необходимо исследовать его динамические параметры.

Основная проблема состоит в отсутствии базы динамических параметров объектов, подлежащих мониторингу (см.: Савин С. Н., Демишин С. В., Ситников И. В. Мониторинг

уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010 // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7. С. 33—39). В то же время, без нее невозможно оценить существующее состояние объекта, ведь для этого необходимо сравнение существующих параметров с нормой для данного здания. В связи с этим С.Н. Савин и его коллеги пытаются составить такую базу для уникальных объектов. В частности, в его докладе был описан мониторинг офиса РЖД в Москве — высотного здания со сложными формами. Для таких зданий невозможно посчитать нормативные частоты колебаний.



Другая проблема ГОСТ Р, считает С.Н. Савин, состоит в установленной форме представления результатов. По его мнению, она неудобна для большинства обследователей, так как непривычна для них: результаты мониторинга представляются в виде полей (перемещений, деформаций и т.п.). Более привычными для строителей являются результаты в виде форм колебаний на соответствующих собственных частотах. Такой метод, в частности, используется МЧС в их измерительном комплексе «Струна». Еще один вариант — это построение подробной расчетной модели здания и проведение модального анализа. По словам докладчика, для получения обобщенных параметров зданий они обычно используют ПК SCAD или Зенит, а для более сложных сооружений — ANSYS.

Особому виду уникальных сооружений – гидротехническим объектам – был посвящен доклад к.т.н., доцента ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет» Дениса Владимировича Кашарина. Темой его выступления стало расчетное обоснование параметров гибких мобильных дамб. Цель мобильных дамб – защита населенных пунктов и предприятий при временных опасностях, таких как паводки или разливы нефти. Преимущество временных сооружений в том, что, в отличие от постоянных, они не нарушают гидрологический режим водоема. Данный доклад был посвящен водо- и воздухонаполняемым дамбам. Такие дамбы состоят из секций по 500 м и могут быть развернуты в течение 1,5–2 часов без использования тяжелой строительной техники.

Доклады сотрудников ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» были посвящены более стандартным объектам и каждодневной практике обследования. Алексей Владимирович Улыбин, к.т.н., доцент ФГБОУ ВПО СПбГПУ, посвятил свой доклад методам контроля прочности бетона (см.: Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2011. №4(22). С. 10–15). По его оценке, все непрямые (неразрушающие) методы без построения частной

градировочной зависимости дают погрешность до 50%. В то же время, для построения градуировочной зависимости все равно необходимо проводить оценку прочности прямыми методами, причем ГОСТ нормирует довольно большую обязательную выборку — например, 9 образцов для однотипных конструкций (колонн). При этом на реальных объектах по такой выборке очень часто невозможно построить зависимость, т.к. слишком велик разброс значений. Таким образом, применение косвенных методов можно рекомендовать только при физической

невозможности применения прямых методов или при большом количестве измерений при обязательном условии построения градировочной зависимости.

А.В. Улыбиным с коллегами был проведен сравнительный анализ всех известных прямых методов контроля прочности бетона: отрыва, отрыва со скалыванием и скалывания ребра. По своим возможностям и ограничениям метод отрыва со скалыванием был оценен как оптимальный. При лабораторном исследовании, в котором результаты оценки прямыми методами сравнивался с результатами испытания на прессе, наименьшую погрешность показали методы отрыва и



отрыва со скалыванием. Докладчик отметил, что метод отрыва в отечественной практике почти не используется. При этом за рубежом он довольно популярен и более строго нормируется, в частности, контролируется площадь отрыва при помощи выполнения штробы.

Доклад Сергея Викторовича Зубкова, инженера ФГБОУ ВПО СПбГПУ, был посвящен контролю прочности кирпича. Предлагается использовать для этих целей отбор кернов (см.: Улыбин А.В., Зубков С.В. О методах контроля прочности керамического кирпича при обследовании зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2012. №3(29). С. 29—34). Недостатки стандартной методики отбора кирпичей состоят в сложности самого отбора и склеивания кирпичей, а также в том, что кирпичи обычно отбираются из ненагруженных зон, чтобы не снижать значительно прочность кладки. Круглое нарушение сплошности при отборе кернов значительно меньше снижает общую прочность кладки, чем отбор целого кирпича.

Представители ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный



университет» посвятили свои доклады деревянным строительным конструкциям, в частности, их усилению. Обычно такие конструкции усиливаются при помощи металла. Александра В докладах инженеров Владимировича Тихонова и Дмитрия Михайловича рассматривалось Лобова усиление деревянных конструкций углеродным волокном. Были проведены лабораторные испытания деревянной балки, усиленной углеродного тканью ИЗ волокна. Исследовались прочностные и жесткостные характеристики усиленной конструкции.

Не остался без внимания участников конференции такой важный строительный материал, как железобетон. Так, к.т.н., доцент ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный технический университет» Александр Леонидович Балушкин рассказал в своем докладе о новом подходе к расчету нетрещиностойких железобетонных элементов. Подход касается участков, где не выполняется гипотеза Бернулли, например, приопорных зон и участков с наибольшим раскрытием трещин. По результатам исследований В.Т. Гроздова, в сечениях с трещинами гипотеза плоских сечений не выполняется. В предлагаемом подходе нелинейность деформирования и депланация учитываются в виде коэффициентов в системе дифференциальных уравнений. По сравнению с традиционной методикой такой учет дает снижение прочности сечения на 18–30%.

Клара Васильевна Талантова, к.т.н., доцент ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения», рассказала о свойствах сталефибробетона, позволяющих сократить вес конструкции на 50%, при этом увеличивая размеры пролета на необходимую величину. Доклад был посвящен применению сталефибробетона в реконструкции моста. Для предварительного анализа была создана и испытана в прессе физическая модель конструкции.

В.М. Якубсон

Энергоэффективность инженерных сетей зданий

10 апреля 2013 г. в рамках выставки «Интерстройэкспо» в Ленэкспо прошла конференция «Эффективные системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и теплоснабжения».

Уже традиционно одним из ключевых вопросов конференции стало энергосбережение в инженерных сетях зданий. По словам вице-президента АВОК, к.т.н., генерального директора НИЦ «ИНВЕНТ» (Волгоград) Михаила Григорьевича Тарабанова, в России 20% всей вырабатываемой электроэнергии затрачивается на системы вентиляции, кондиционирования воздуха и холодоснабжения; 45% всей вырабатываемой тепловой энергии идет в системы отопления и теплоснабжения. Это объясняет большое внимание, которое необходимо уделять инженерным системам в вопросе энергосбережения.

При этом, по словам М.Г. Тарабанова, на данный момент нормативное регулирование в этой области оставляет желать лучшего. Так, федеральный закон 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» принят уже три года назад, однако реальных действий в соответствии с ним пока нет. В частности, это связано с отсутствием финансирования. Докладчик отметил, что только сейчас планируется принятие поправки к закону, где будет прописано финансирование программы по исполнению закона.



Тем не менее, судя по докладам на конференции, шаги в направлении повышения энергоэффективности сетей делаются и без государственного финансирования. В частности, доклад Дарьи Михайловны Денисихиной, к.т.н., начальника отдела математического ЗАО «БЮРО ТЕХНИКИ ПРОЕКТ», был посвящен энергоэффективному моделирования проектированию. Для такого рода проектирования рекомендуется использовать специализированное программное обеспечение. Оно позволяет как рассчитывать требуемые параметры оборудования для обеспечения энергоэффективности на стадии проектирования, так и оценивать существующее оборудование в здании на предмет его энергоэффективности.

Такое программное обеспечение дает возможность на основании имеющихся данных по любому климатическому оборудованию оценивать общую энергоэффективность здания. Также можно осуществлять параметрическое моделирование на основании данных об ограждающих конструкциях, освещении, инженерных системах, тарифах на электроэнергию и т.п.

Важная роль в обеспечении энергоэффективности инженерных сетей зданий отводится поквартирному учету тепла. Василий Николаевич Карпов, д.т.н., главный специалист технического отдела ОАО «Моспроект», рассказал о различных системах отопления и возможности



осуществления в них такого учета. По его словам, каждая система имеет свои преимущества. Так, например, однотрубная система отопления самая дешевая и простая, поэтому по-прежнему используется при строительстве социальных многоквартирных домов. Вертикальная открытая система актуальна для загородных домов сезонного пребывания, так как, в частности, позволяет легко обнаружить протечку и устранить ее без вскрытия напольного покрытия.

Тем не менее, для экономии энергии оптимальной является именно горизонтальная поквартирная система отопления. Она единственная исключает затраты тепловой энергии в режиме минимума, когда отопление не нужно. Кроме того, это наиболее регулируемая система. В ней проще всего обеспечить поквартирный учет тепла. При этом В.Н. Карпов отметил, что поквартирная система отопления является дорогостоящей, например, она в разы дороже вертикальной однотрубной системы. Таким образом, он рекомендовал выбирать систему отопления в зависимости от ситуации, в частности, от существующей базы.

В.М. Якубсон

Экспертиза проектной документации: быть или не быть

Среди многочисленных изменений законодательно-нормативной практики, происходящих в последнее время, строителей и проектировщиков особенно волнуют вопросы, связанные с согласованием проекта. В августе 2012 г. Правительством Российской Федерации было принято постановление — Дорожная карта по улучшению предпринимательского климата в сфере строительства. Одним из ключевых пунктов этого плана была отмена экспертизы проектной документации. Этот пункт и сейчас вызывает множество вопросов у строительного сообщества. Поэтому круглый стол «Отказ от экспертизы проектной документации: мифы и реальность», прошедший 10 апреля 2013 г., привлек большое количество слушателей. Круглый стол проходил в рамках выставки «Интерстройэкспо» и конгресса IBC.

Мнения большинства участников строительного рынка еще летом сходились на том, что полная отмена экспертизы проектной документации, по крайней мере, преждевременна. По словам заместителя начальника управления государственной экспертизы ГАУ МО «Мособлгосэкспертиза» Олега Геннадьевича Валова, руководство страны также постепенно приходит к такому выводу. В частности, на совещании Министерства экономического развития РФ 1 марта 2013 г. была принята новая редакция Дорожной карты, где отмена экспертизы была заменена на оптимизацию списка объектов, подлежащих ей. В то же время, по мнению большинства участников круглого стола, сокращение этого списка также не нужно, возможно, наоборот, необходимо его расширять.

Владислав Олегович Еремин, директор СПб ГАУ «Центр государственной экспертизы», отметил, что отмена экспертизы проектной документации принципиально не повлияет на общий срок согласования проекта. Максимальный срок проведения экспертизы — это 45–60 дней, чаще всего быстрее. Самые длительные сроки — это согласование документации по планировке территорий и получение технических условий. Эти этапы могут занимать от нескольких месяцев до года. Безусловно, многолетние согласования тормозят развитие строительного комплекса, кроме того, задерживают и решение социальных задач. Тем не менее, проблему нужно решать комплексно, за счет сокращения сроков согласования на разных этапах. Именно это, по словам В.О. Еремина, и подразумевает Дорожная карта.

Самым обсуждаемым вопросом в рамках круглого стола стала ответственность участников строительного процесса в современных условиях. Ирина Владимировна Косова, заместитель директора СПб ГАУ «Центр государственной экспертизы», рассказала о сути поправок в Градостроительный Кодекс РФ, вступающих в силу 1 июля 2013 г. Ранее субсидиарную ответственность за безопасность построенного объекта несли государственная экспертиза, разработчики проекта (ГИП, ГАП), строительная организация и саморегулируемая организация. В соответствии с поправками, к этим субъектам добавляются собственники здания и страховые компании. Собственники здания, например, будут нести гражданскую ответственность перед пострадавшими при обрушении здания. После выплат, которые осуществляют сами собственники или страховая компания, они могут выставить регрессные требования к другим участникам, по вине которых произошло обрушение, т.е. к проектной, строительной организации и т.д.

При отмене экспертизы вся ответственность в части проекта, вплоть до уголовной, ляжет на плечи проектировщиков. Они будут разрабатывать и подписывать декларацию о соответствии проектной документации.

Мнение страховщиков по поводу отмены экспертизы проектной документации высказал заместитель директора филиала ЗАО САО «Гефест» Анатолий Сергеевич Кузнецов: страховые компании готовы разделить ответственность с участниками строительного рынка, но без результатов экспертизы проектной документации ни одна серьезная организация не будет страховать строительные риски.

В.М. Якубсон

Тяжелонагруженные полы на основе мелкозернистых фибробетонов

К.т.н., доцент С.В. Клюев*; к.т.н., старший преподаватель А.В. Клюев; к.т.н., старший преподаватель Д.М. Сопин; студент А.В. Нетребенко; младший научный сотрудник С.А. Казлитин,

ФГБОУ ВПО Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Ключевые слова: мелкозернистый бетон; техногенный песок; фибробетон

В настоящее время возведение промышленных зданий не менее актуально, чем жилищное строительство, и широко распространено в крупных городах России. При строительстве промышленных объектов особое внимание должно уделяться применению новых эффективных строительных материалов, сборных строительных элементов, легких и экономичных крупноразмерных конструкций и изделий повышенного качества с высокой степенью заводской готовности, обеспечивающих индустриальность, снижение материалоемкости и стоимости строительства.

Большое значение в промышленных зданиях имеют полы, на устройство которых тратится до 20% стоимости возведения одноэтажного здания и до 40–50% общего расхода бетона. Поэтому при выборе конструкции пола, помимо удовлетворения технологическим требованиям, следует учитывать положительный экономический эффект от ускорения производства работ, повышения долговечности и возможности беспрепятственной перестановки технологического оборудования [1].

Конструкции из фибробетона широко применяются во многих областях строительства и успешно используются в таких странах как ЮАР, Германия, Япония, США и многих других [2–9]. Однако в нашей стране этому материалу уделяется мало внимания. До сих пор нет единой теории его прочности и деформативности. Опыт исследования, проектирования и устройства позволяет осуществить системный подход при выборе конструкции, материалов и технологий для устройства полов на объектах производственно-складского назначения. Устройство полов из фибробетона является одним из перспективных направлений в строительном комплексе [10–14].

Для получения мелкозернистых фибробетонов с высокими эксплуатационными характеристиками, снижения клинкерной составляющей и оптимизации процессов структурообразования целесообразно применение высокоактивных композиционных вяжущих, таких как тонкомолотый цемент (ТМЦ) и вяжущее низкой водопотребности (ВНВ).

В данном исследовании композиционное вяжущее получали путем домола портландцемента ЦЕМ I 42,5H производства ЗАО «Белгородский цемент» (Белгород) с суперпластификатором «Полипласт СП-1» в вибромельнице до достижения удельной поверхности 500–550 м²/кг. В качестве кремнеземсодержащей добавки выступал отход дробления гранита [15–24].

Из результатов экспериментов отчетливо видно, что помол цемента с пластифицирующей добавкой «Полипласт СП-1» в количестве 0,6% от массы цемента проходит более интенсивно. Следовательно, помимо пластифицирующего, добавка обладает и интенсифицирующим действием при помоле, что объясняется ее расклинивающими свойствами. Также видно, что кинетика размалываемости ТМЦ и ВНВ на отсеве дробления гранита аналогична кинетике образца на ранее изученном техногенном сырье (рис. 1).

По результатам исследования зернового состава вяжущих можно сделать вывод о лучшей размолоспособности ВНВ за счет того, что оно имеет полифракционный состав со смещением в сторону меньших значений. В отличие от портландцемента и ТМЦ, которые имеют один четко выраженный пик, распределение частиц ВНВ полимодальное. Такое распределение частиц будет способствовать уменьшению пористости, снижению кристаллизационного давления при твердении клинкерных минералов, более плотной упаковке частиц. Это, в свою очередь, ведет к снижению микротрещин в цементном камне и мелкозернистом бетоне в целом (рис. 2).

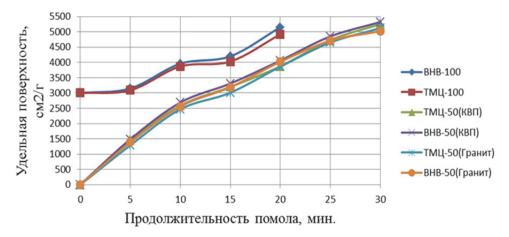


Рисунок 1. Кинетика размалываемости в зависимости от состава вяжущего

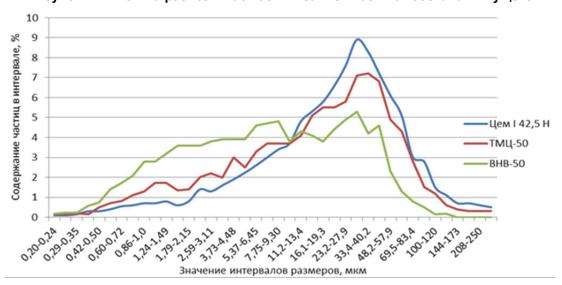


Рисунок 2. Графики распределения частиц вяжущих по размерам

Изучение свойств композиционных вяжущих показало, что у ВНВ-100 активность более чем на 70% выше по сравнению с исходным цементом, также снижаются водоцементное отношение и нормальная густота в сравнении с цементом (табл. 1).

Таблица 1. Физико-механические характеристики композиционного вяжущего

| Вид | Нормальная густота теста, % | Сроки схі | ватывания, час- мин | В/Ц | Активность вяжущего, (МПа) | | |
|------------------------|--------------------------------|-----------|------------------------|------|-------------------------------|------------|--|
| вяжущего | Tychora fecta, % | начало | конец | | при изгибе | при сжатии | |
| ЦЕМ I 42.5H | 26.2 | 2-40 | 4-50 | 0.4 | 7,2 | 48,9 | |
| ТМЦ-50 (на граните) | 26.8 | 2-40 | 4-40 | 0.41 | 5,8 | 41,7 | |
| ТМЦ-50 (на КВП) | 27,1 | 2-30 | 4-40 | 0.43 | 6,5 | 46,3 | |
| ВНВ-50 (на граните) | 23,2 | 2-10 | 4-30 | 0.33 | 5,2 | 47,1 | |
| ВНВ-50 (на КВП) | 24,3 | 2-10 | 4-10 | 0.35 | 8,8 | 52,2 | |
| ТМЦ-100 | 25.3 | 2-20 | 4-10 | 0.44 | 10,2 | 71,3 | |
| BHB-100 | 22.8 | 2-10 | 3-30 | 0.28 | 12,4 | 85,2 | |

Таким образом, при введении суперпластификатора «Полипласт СП-1» в количестве 0,6% возможно получение вяжущего активностью 85,2 МПа.

Структура цементного камня на ВНВ-100 плотнее по сравнению с обычным портландцементом (рис. 3).

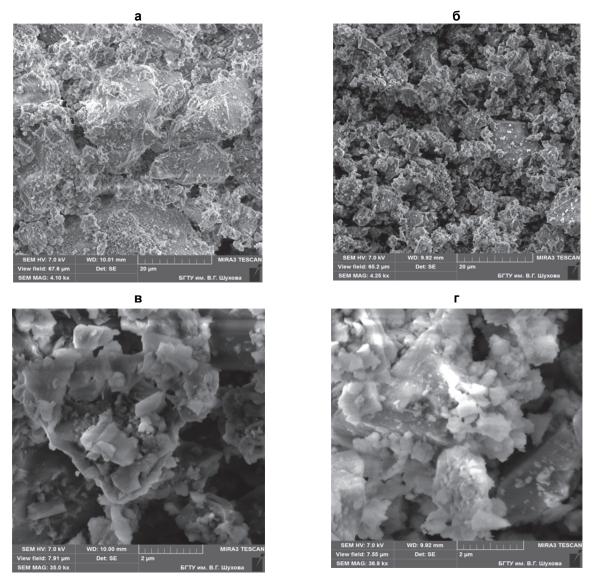
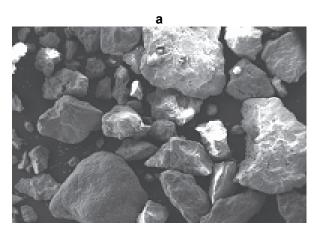


Рисунок 3. Микроструктура в зависимости от свойств вяжущих: а, в – морфология новообразований цементного камня Цем I 42,5H; б, г – морфология новообразований цементного камня ВНВ-100; увеличение а, б – ×4000, в, г – ×35000

Это определяется наличием тончайших пленок воды между зернами вяжущего и образованием в стесненном объеме низкоосновных гидросиликатов кальция и других новообразований.

В результате проведенных исследований и анализа полученных данных установлено, что наилучшие физико-механические показатели и наибольшую прочность имеют образцы на основе ВНВ-100. Это объясняется низким значением водопотребности смеси, лучшей пространственной упаковкой частиц в полученном композите. Применение тонкомолотых вяжущих с добавкой суперпластификатора позволяет существенно увеличить прочностные характеристики бетона.

Специфическая форма и морфология поверхности рассматриваемого сырья обусловлены генезисом исходной породы и процессом ее дробления. Зерна отсева имеют угловатую форму с высокоразвитой поверхностью, что будет способствовать высокой адгезии к цементному камню. Однако необходимо отметить, что данный показатель у отсевов дробления гранита несколько ниже, чем у кварцитопесчаника. Это объясняется присутствием в его составе до 65% ортоклаза и плагиоклаза, обладающих совершенной спайностью, и 5% слюды, обладающей весьма совершенной спайностью (рис. 4) [1].



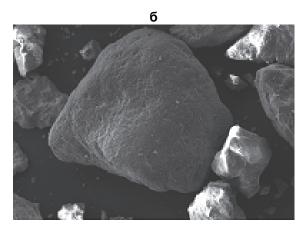


Рисунок 4. Микроструктура отсева дробления гранита; увеличение: $a - \times 200$, $6 - \times 2000$

При определении физико-механических свойств отсева дробления гранита было установлено, что он обладает высокой прочностью и плотностью, не уступая по данным показателям отсеву дробления кварцитопесчаника, а по ряду свойств даже превосходя его (табл. 2).

| Таблица 2. Физико-механические своиства отсева дробления гранит | าล |
|---|----|
|---|----|

| № п/п | Наименование показателя | Наименование показателя Обозначение показателя | |
|-------|---|--|-------------------------|
| 1 | Модуль крупности | M _{κp} | 2,89 |
| 2 | Насыпная плотность в неуплотненном состоянии | Рнас | 1536 кг/м ³ |
| 3 | Насыпная плотность в уплотненном состоянии | Р насупл | 1606 кг/м ³ |
| 4 | Истинная плотность | Рист | 2640 кг/см ³ |
| 5 | Пустотность | V _{м.п.} | 51,2% |
| 6 | Водопотребность | Вотс | 7,8% |
| 7 | Цементопотребность | Цпотр | 0,71 |

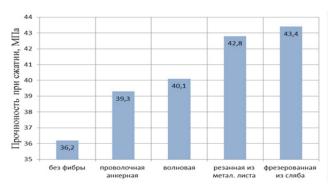
С целью получения высококачественных сталефибробетонов в бетонную матрицу было введено четыре вида фибры (рис. 5).



Рисунок 5. Виды стальной фибры: 1 – фибра проволочная анкерная 50×0,8мм; 2 – фибра волновая 30×0,8мм; 3 – фибра резаная из металлического листа 40×0,8мм; 4 – фибра фрезерованная из сляба 32×3,8 мм

Для оценки возможности применения оптимального вида фибры при производстве высококачественного мелкозернистого сталефибробетона были разработаны составы, в которых в качестве заполнителя применялся отсев дробления гранита и вяжущее ЦЕМ I 42,5 H (рис. 6).

Полученные результаты показывают, что наилучшими прочностными характеристиками обладает мелкозернистый сталефибробетон с использованием фрезерованной фибры из сляба. Применение стальной фрезерованной фибры предпочтительнее по сравнению с другими видами, так как поверхностная площадь ее сцепления с бетоном в 4 раза больше, чем у фибры круглого или квадратного сечения, и при перемешивании фрезерованная фибра не образует «ежей».



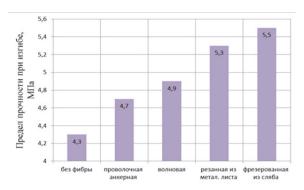
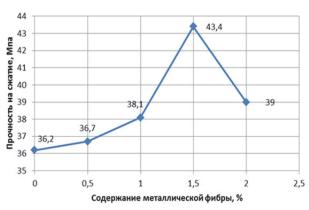


Рисунок 6. Прочностные характеристики мелкозернистого сталефибробетона на различных видах стальной фибры

Для определения оптимального процента армирования мелкозернистого сталефибробетона были заформованы образцы бетона одинакового состава с различным содержанием стальной фибры (рис. 7).



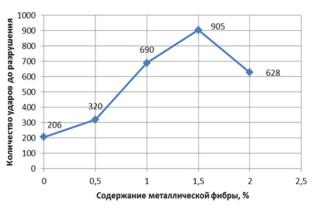


Рисунок 7. Зависимости прочности на сжатие и ударной выносливости сталефибробетона от объемной концентрации стальной фибры

Установлено, что при 1,5%-м армировании по объему удается получить максимальные физико-механические показатели [1].

Для бетонных образцов с высокоплотным составом заполнителя была установлена более высокая прочность бетона по сравнению с аналогичными составами на обычном заполнителе. Бетон с высокоплотным составом заполнителя имеет в 2–3 раза большую прочность, чем обычный мелкозернистый бетон, что объясняется лучшей пространственной упаковкой частиц в полученном композите и особенностями структурообразования.

Для образцов с высокоплотной упаковкой отсева дробления гранита и гиперпластификатором Muraplast FK 68 были получены следующие результаты, представленные в таблице 3.

Таблица 3. Физико-механические характеристики мелкозернистого бетона с высокоплотной упаковкой заполнителя

| | | Pa | асход мат | ериалов, кі | -/м ³ | | | | |
|---------------|---------|-----|-----------|-------------|------------------|------|------|--------------------------------------|--|
| Pur payayuara | | | Отсе | в + песок | | B/B | | Прочность при сжатии, Rсж, МПа | |
| Вид вяжущего | Вяжущее | | Фракция | | | Вода | D/D | | |
| | | 2,5 | 1,25 | 0,63 | 0,315 | | | , | |
| ЦемІ 42,5 Н | 720 | | | 1440 | | 273 | 0,38 | 36,2 | |
| ЦемІ 42,5 Н | 720 | 570 | 442 | 280 | 148 | 259 | 0,36 | 56,4 | |
| BHB-100 | 720 | 570 | 442 | 280 | 148 | 201 | 0.28 | 93,2 | |

Были разработаны составы мелкозернистого бетона с использованием в качестве заполнителя отсева дробления гранита. Для получения более плотной упаковки заполнителя использовался песок Шебекинского месторождения с модулем крупности 1,2. В качестве вяжущего применялись ВНВ-100 и портландцемент Цем I 42,5H; их характеристики приведены в таблице 4.

Таблица 4. Физико-механические характеристики мелкозернистого бетона в зависимости от состава вяжущего

| Вид вяжущего | Расход | асход материалов на 1 м ³ смеси | | | Добавка «Muraplast | Сталь- ная | Плот- ность бетона в | Предел проч- ности образ- | Предел проч- ности образ- |
|-----------------|------------------------------------|---|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|--|---|
| | Вяжу- щее, кг/м ³ | Отсев дробления гранита, кг/м ³ | Песок, кг/м ³ | Вода, л/м ³ | FK 68», кг/м ³ | фибра, кг/м ³ | момент испыта- ния, кг/м ³ | цов при сжатии, R _{сж} , (МПа) | цов при изгибе, R _{изг} , (МПа) |
| ЦЕМ I 42,5H | 720 | 1440 | - | 273 | - | - | 2290 | 36,2 | 4,3 |
| ЦЕМ I 42,5H | 720 | 975 | 465 | 288 | - | - | 2330 | 42,7 | 5,1 |
| ЦЕМ I 42,5H | 720 | 975 | 465 | 259 | 5,76 | 1 | 2320 | 56,4 | 6,9 |
| ЦЕМ I 42,5H | 720 | 975 | 465 | 250 | 5,76 | 36,5 | 2380 | 67,7 | 8,4 |
| ТМЦ-100 | 720 | 1440 | - | 295 | - | - | 2280 | 44,1 | 5,5 |
| ТМЦ-100 | 720 | 975 | 465 | 324 | - | - | 2330 | 57,3 | 7,1 |
| ТМЦ-100 | 720 | 975 | 465 | 266 | 5,76 | - | 2340 | 75,6 | 9,1 |
| ТМЦ-100 | 720 | 975 | 465 | 266 | 5,76 | 36,5 | 2390 | 90,7 | 10,5 |
| BHB-100 | 720 | 1440 | - | 238 | - | - | 2300 | 59 | 7,7 |
| BHB-100 | 720 | 975 | 465 | 252 | - | - | 2355 | 70,6 | 8,6 |
| BHB-100 | 720 | 975 | 465 | 201 | 5,76 | - | 2350 | 93,2 | 11,2 |
| BHB-100 | 720 | 975 | 465 | 201 | 5,76 | 36,5 | 2385 | 118,8 | 14,1 |

Важными характеристиками бетона, используемого при устройстве полов, являются водопоглощение, истираемость и морозостойкость. Эти свойства оказывают существенное влияние на его долговечность, в связи с чем было проведено исследование данных показателей. Результаты исследований подтверждают возможность применения полученных сталефибробетонов (табл. 5) [15–21].

Таблица 5. Водопоглощение, истираемость и морозостойкость в зависимости от состава вяжущего

| Вид вяжущего | Водопоглощение бетона по массе, % | Истираемость, G, г/см² | Морозостойкость |
|---|---|---------------------------|-----------------|
| ЦЕМ I 42,5 H | 4,5 | 0,43 | |
| ЦЕМ I 42,5 H (упаковка) | 4,1 | 0,41 | |
| ЦЕМ I 42,5 H (упаковка + Muraplast FK 68) | 3,6 | 0,39 | F300 |
| ЦЕМ I 42,5 H (упаковка + Muraplast FK 68 + ст. фибра) | 3,6 | 0,33 | |
| ТМЦ-100 | 3,4 | 0,38 | |
| ТМЦ-100 (упаковка) | 3,0 | 0,35 | |
| ТМЦ-100 (упаковка + Muraplast FK 68) | 2,8 | 0,34 | F500 |
| ТМЦ-100 (упаковка + Muraplast FK 68 + ст. фибра) | 2,8 | 0,3 | |
| BHB-100 | 2,5 | 0,29 | |
| ВНВ-100 (упаковка) | 2,2 | 0,27 | |
| BHB-100 (упаковка + Muraplast FK 68) | 2,1 | 0,23 | F700 |
| ВНВ-100 (упаковка + Muraplast FK 68 + ст. фибра) | 2,1 | 0,23 | |

Согласно таблице 5, полученные бетоны характеризуются низкими показателями водопоглощения и истираемости, высокой морозостойкостью. Это объясняется использованием обогащенного песком отсева гранита, что позволило получить оптимальный состав мелкого заполнителя в отличие от традиционно применяемого и улучшить свойства материала за счет уплотненной структуры бетона.

Исследование деформативных свойств бетонов разработанных составов позволяет сделать вывод о том, что на отсеве дробления гранита можно получить мелкозернистые сталефибробетоны для изготовления промышленных полов, соответствующих нормативнотехнической документации для данного вида работ (табл. 6).

Таблица 6. Деформативные характеристики мелкозернистого сталефибробетона

| Вид вяжущего | Призменная прочность, МПа | Модуль упругости <i>Е_b</i> ·10 ⁻³ , МПа | Ударная выносливость, количество ударов |
|---|---------------------------------|--|--|
| ЦЕМ I 42,5 H | 27,3 | 24,8 | 206 |
| ЦЕМ I 42,5 H (упаковка) | 32,8 | 29,8 | 420 |
| ЦЕМ I 42,5 H (упаковка + Muraplast FK 68) | 43,4 | 37,9 | 690 |
| ЦЕМ I 42,5 H (упаковка + Muraplast FK 68 + ст. фибра) | 53,1 | 46,6 | 1030 |
| ТМЦ-100 | 33,7 | 31,4 | 470 |
| ТМЦ-100 (упаковка) | 44,4 | 40,6 | 810 |
| ТМЦ-100 (упаковка + Muraplast FK 68) | 56,6 | 53,4 | 1102 |
| ТМЦ-100 (упаковка + Muraplast FK 68 + ст. фибра) | 67,9 | 62,8 | 1460 |
| BHB-100 | 46,1 | 41,7 | 960 |
| ВНВ-100 (упаковка) | 67,3 | 49,6 | 1208 |
| BHB-100 (упаковка + Muraplast FK 68) | 72,7 | 65,3 | 1620 |
| ВНВ-100 (упаковка + Muraplast FK 68 + ст. фибра) | 87,2 | 78,5 | 2110 |

Выводы

- 1. Предложены принципы повышения эффективности и улучшения эксплуатационных характеристик мелкозернистых бетонов, используемых для строительства тяжелонагруженных полов:
 - оптимизация структуры на нано-, микро- и макроуровнях за счет применения композиционных вяжущих;
 - создание высокоплотной упаковки зерен заполнителя из кварцсодержащих пород;
 - дисперсное армирование.
- 2. Установлен характер влияния двух систем пластификаторов:
 - введение пластифицирующей добавки «Полипласт СП-1» при помоле клинкера способствует дезинтеграции системы за счет расклинивающего действия (так называемого эффекта Ребиндера) и сдерживает образование кватаронов, что увеличивает сроки схватывания цементного камня;
 - Muraplast FK 68, вводимый с водой затворения, существенно снижает водоцементное отношение при заданной подвижности, что оптимизирует процесс структурообразования и создает синергетический эффект за счет использования композиционных вяжущих, создания высокоплотной упаковки заполнителя и введения фибры. Это приводит к снижению микротрещинообразования, оптимизации структуры, увеличению деформационных характеристик в 2–3 раза, а ударной прочности в 10 раз по сравнению с традиционным бетоном [1].

Литература

- 1. Казлитин С.А. Фибробетон для тяжелонагруженных полов: Автореф. дис. канд. техн. наук / Казлитин С.А.; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2012. 19 с.
- 2. Brandt A.M. Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance. London: Spon Press, 2009. 544 p.
- 3. Fernandes G.R. La influenca de alqunas caractericticas de las aridas finos (arenas) en la propiedades des hormogon de cemento portland // Cemento e Hormigon. 1976. Vol. 47. No.506. Pp. 415–428.
- 4. Herr O. Les materiaux autocompactants essorables de structure (MACES). Etude de faisabilite d'une nouvelle gamme de materiaux hydrauliques pour les assises de chaussees // Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussees. 2001. No.232. Pp. 99–103.
- 5. Beudoin J.J., Lemm J.M. Handbook of Fiber-Reinforced Concrete: Principles, Properties, Developments and Applications (Building Materials Science). US: William Andrew Publishing, 1990. 194 p.
- 6. Maidl B. [et al.]. Steel Fibre Reinforced Concrete. Berlin: Ernst & Sohn, 1995. 292 p.
- 7. Piasta J. Rheological Properties of Concretes with Fine Aggregate // Cement and Concrete Researh. 1985. Vol. 15. No.2. Pp. 253–260.
- 8. Steopoe A. Sur la structure des suspensions aqueueses des ciments purs ou mélanges et sur les propriestes techniques de ces suspensions durcies // Revue des Materiaux de Constructions. 1981. No.508. Pp. 1–9.
- 9. Takemura K. Some Properties of Concrete Using Crushed Stone Pust as Fine Aggregate // The Cement Association of Japan. 13-th General Meeting Technical Session. YI Review. Tokyo, 1976. Pp. 95–97.
- 10.Пухаренко Ю.В. Принцип формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2004. №10. С. 47–50.
- 11. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. М.: Стройиздат, 1989. 174 с.
- 12. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: ACB, 2004. 560 с.
- 13.Талантова К.В. Основы создания сталефибробетонных конструкций с заданными свойствами // Бетон и железобетон. 2003. №5. С. 4–8.
- 14.Талантова К.В. Создание элементов конструкций с заданными свойствами на основе сталефибробетона // Известия вузов. Строительство. 2008. №10. С. 4–9.
- 15.Клюев А.В., Клюев С.В., Лесовик Р.В., Михайлова О.Н. Отходы горнодобывающих предприятий как сырье для производства мелкозернистого бетона армированного фибрами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №4. С. 81–84.
- 16.Клюев С.В. Экспериментальные исследования фибробетонных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. №4. С. 71–74.
- 17.Клюев С.В. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства // Инженерно-строительный журнал. 2012. №8(34). С. 61–66.
- 18.Лесовик Р.В., Клюев С.В. Фибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках Курской магнитной аномалии для изгибаемых конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2012. №3(29). С. 41–47.
- 19.Сопин Д.М. Высококачественный мелкозернистый бетон с использованием сырьевых ресурсов КМА: автореф. дис. канд. техн. наук / Д.М. Сопин; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2009. 22 с.

*Сергей Васильевич Клюев, Белгород, Россия Тел. раб.: +7(4722)34-66-18; эл. почта: Klyuyev@yandex.ru

© Клюев С.В., Клюев А.В., Сопин Д.М., Нетребенко А.В., Казлитин С.А., 2013

Мультипараметрическая оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона

Д.т.н., профессор Е.И. Шмитько; к.т.н., доцент А.А. Резанов; аспирант А.А. Бедарев*,

ФГБОУ ВПО Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Ключевые слова: газосиликат; ячеистый бетон; мультипараметрическая модель; оптимизация структуры

Сегодня силикатный ячеистый бетон (газосиликат) занимает ведущие позиции среди стеновых строительных материалов. Это вполне объясняется многочисленными преимуществами данного материала: он негорюч, легок и прочен, экологически чист и экономичен. Благодаря этим свойствам технология ячеистого силикатного бетона широко распространена по всему миру.

В настоящее время активизировались работы по вопросам технического регулирования автоклавных ячеистых бетонов нового поколения [1]. Усиление концепции энергосбережения относительно ограждающих конструкций сформировало необходимость более эффективного использования сырьевых и энергетических ресурсов. Это представляется возможным за счет максимального снижения плотности и теплопроводности стеновых конструкций при заданных показателях их качества [2–5]. Однако современный уровень технологии не позволяет стабильно получать ячеистый бетон совершенной структуры, что особенно характерно для изделий пониженной плотности. Создание совершенных структур возможно лишь на основе эффективного управления процессами структурообразования ячеистого бетона.

Многие исследователи отмечают, что прочность ячеистого бетона снижается с уменьшением плотности по закону, близкому к степенному [4], в связи с нарастанием макроструктурных дефектов в виде рваных слившихся пор и их конгломератов, образующихся вследствие утончения межпоровых перегородок [6–14]. Особенно заметно это проявляется в изделиях плотностью менее 300 кг/м³ [15]. Поэтому решение общей задачи предполагает создание условий, способствующих одновременному формированию в изделиях и качественной ячеистой структуры, и максимально прочной силикатной матрицы.

Для получения газосиликата пониженной средней плотности с требуемым уровнем прочностных свойств необходимо создать условия для формирования как можно менее дефектной ячеистой структуры и как можно более прочной межпоровой перегородки [13]. Поскольку одни и те же факторы одновременно оказывают влияние как на свойства микро-, так и на свойства макроструктуры ячеистого бетона [6, 7], решение такой трудной задачи оказывается возможным лишь на основе эффективного управления процессами структурообразования на всех масштабных уровнях и стадиях процесса.

Решить такую задачу удалось только методами современного компьютерного моделирования, которые все чаще применяются в исследованиях строительных материалов [16–27]. Этому решению и посвящена данная работа.

Задача учета взаимосвязи и влияния определяющих факторов на процессы структурообразования различных масштабных уровней с их последующей оптимизацией потребовала разработки мультипараметрической модели на основе системно-структурного метода.

Наши исследования охватывают самые перспективные марки по плотности ячеистого силикатного бетона: D500, D400, D300 и D100.

В исследованиях использованы: известково-песчаное вяжущее (ИПВ) активностью 30–33% и временем гашения (без применения замедлителя) 2 мин; портландцемент ЦЕМ I 42,5H производства ОАО «Осколцемент»; в качестве замедлителя – гипс полуводный Г-5; в качестве затворителя – вода водопроводная. Исследования ориентированы на литьевую технологию блокмассивов.

Методика компьютерного моделирования предполагает, прежде всего, тщательный анализ факторов, влияющих на ход процесса. При рассмотрении данной задачи учитывалось, что Шмитько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А. Мультипараметрическая оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона

качество микроструктуры определяется, главным образом, составом вяжущего, тонкостью его помола, В/Т-отношением и режимом автоклавной обработки. На процессы макроструктурообразования ячеистого бетона оказывает влияние довольно обширный ряд факторов: дозировка и активность газообразователя, В/Т-отношение, дозировки сырьевых компонентов, их удельные поверхности и температуры, режим перемешивания и характеристики смесителя. При этом очень важно обеспечить согласованность процессов газообразования и нарастания вязко-пластичных свойств смеси.

Такое обилие управляющих факторов потребовало разработки мультипараметрической модели, которая позволяет провести последовательную оптимизацию на всех этапах исследования и масштабных уровнях.

Исследования проводились следующим образом. Вначале осуществлялась оптимизация факторов, влияющих на формирование микроструктуры, а затем, при оптимальных значениях этих факторов, проводились исследования по оптимизации макроструктуры. Это позволило получить ячеистый бетон с максимально высокими качественными показателями. Таким образом, создание мультипараметрической модели проводилось в несколько этапов.

На первом этапе сформирована математическая модель, описывающая влияние состава силикатной матрицы ячеистого бетона на его прочность. Для этого использованы основные положения теории повышения качества микроструктуры ячеистого бетона, развитые в работах Е.М. Чернышова и Е.И. Дьяченко [28, 29]. Полученные ими экспериментальные зависимости представлены в специальной методике оптимизации, суть которой заключается в следующем. На основе задаваемой минимально возможной средней плотности изделий, исходя из принципа максимального использования потенциала сопротивления разрушению микробетона, вычисляется величина средней плотности силикатного микробетона. Данные о плотности ячеистого бетона и силикатного микробетона используются для определения доли ячеистых пор в ячеистом бетоне. Определяется средний диаметр ячеистых пор на основе его взаимосвязи с объемной долей пористости. По экспериментальным зависимостям вычисляется ожидаемый коэффициент плотности упаковки, который, совместно с данными о вероятном среднем диаметре ячеистых пор, используется для вычисления толщины межпоровой перегородки. В соответствии с межпоровой перегородки производится расчет среднего диаметра кремнеземистого компонента из необходимого и достаточного условия обеспечения укладки в межпоровую перегородку 4-5 зерен по ее толщине. На основе найденного значения диаметра зерна кремнеземистого компонента выполняется расчет его требуемой удельной поверхности, а затем – величины массовой доли активного СаО в составе смеси. Исходя из данных об активности извести, осуществляется расчет ее дозировки и дозировки кремнеземистого компонента. В связи с введением портландцемента производится корректировка содержания СаО.

Зависимости, представленные в методике [29], устанавливают однозначную связь между проектируемой средней плотностью газосиликата, дозировками извести, кремнеземистого компонента, их удельными поверхностями, дозировкой портландцемента, его химическим и минералогическим составом, активностью извести и дозировкой газообразователя с позиций получения оптимального количества цементирующего вещества, что позволяет вместо перечисленных независимых управляющих факторов использовать лишь один. Например, принимая дозировку портландцемента за независимый управляющий фактор, для газосиликата любой проектной марки по плотности определяются оптимальные значения других перечисленных факторов.

Применение такого подхода позволило проводить дальнейшую оптимизацию макроструктуры ячеистого бетона на составах, обеспечивающих оптимальное микроструктурообразование, а также исключить из рассмотрения часть управляющих факторов, так как их оптимальные значения уже установлены.

Сокращение числа управляющих факторов проводилось также на втором этапе лабораторных исследований за счет проведения специальных мероприятий. Для этого все сырьевые компоненты предварительно термостатировались и входили в реакцию с постоянной температурой, а перемешивание осуществлялось в теплоизолированном смесителе. Поэтому вместо учета влияния температур всех сырьевых компонентов в качестве температурного фактора рассматривалась только температура воды затворения. Поскольку в производственных условиях температуры компонентов могут быть различны, для учета влияния изменяющихся технологических факторов в окончательную модель включено уравнение энергетического баланса с учетом температуры используемых материалов.

Указанные мероприятия позволили сократить число независимых управляющих факторов до четырех, в качестве них выступали: дозировка портландцемента, дозировка полуводного гипса, В/Т-отношение и температура воды затворения. Другие управляющие факторы представлены как зависимые от названных независимых и включены в структуру мультипараметрической модели через соответствующие расчетные формулы.

Многие исследователи отмечают, что определяющее влияние на согласованность процессов газообразования и нарастания вязко-пластичных свойств силикатной смеси оказывают ее начальные характеристики. В работах [6, 30] указывается, что температура смеси в момент ее заливки в форму должна составлять 38°С. В случае превышения указанной температуры в смесителе начинается реакция газообразования, при этом бетон может не достигнуть расчетной плотности из-за потери газа на этапе перемешивания. Кроме того, завышенная температура способствует более быстрой гидратации извести, и, соответственно, изменению сроков схватывания формовочной массы. Если температура к моменту заливки окажется меньше требуемой, время вспучивания и сроки схватывания увеличатся, также возможны проседание смеси и потеря газа в смеси вследствие недостаточной ее вязкости.

Кроме начальной температуры, на качество ячеистой структуры оказывает влияние и вязкость ячеистобетонной смеси в момент заливки. В «Инструкции по изготовлению изделий из ячеистого бетона» СН 277-80 приводятся рекомендованные значения текучести смеси как величины, обратной вязкости, в виде диаметра расплыва смеси по Суттарду. В наших исследованиях эти рекомендации выполнялись.

На следующем этапе для каждой из исследуемых плотностей были поставлены факторные эксперименты вида 2^4 на основе ротатабельного центрального плана, дополненного звездными точками. Уровни варьирования факторов приведены в таблице 1. За отклик принимались значения начальных реологических характеристик (диаметр расплыва смеси по Суттарду) и температуры смеси. Начальная температура смеси определялась при помощи погружной термопары, подключенной через систему сбора данных к ЭВМ. Это позволило вести непрерывное наблюдение и запись значений температуры в автоматическом режиме.

Таблица 1. Уровни варьирования факторов для идентификации модели начальных реологических и температурных характеристик

| Наименование | Марка по | | Ур | овни фактор | ОВ | |
|--------------------|-----------|------|------|-------------|------|------|
| фактора | плотности | -α | -1 | 0 | +1 | +α |
| | D500 | 0.50 | 0.54 | 0.58 | 0.62 | 0.66 |
| D/T | D400 | 0.57 | 0.61 | 0.65 | 0.69 | 0.73 |
| В/Т-отношение | D300 | 0.62 | 0.68 | 0.74 | 0.80 | 0.86 |
| | D100 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.90 | 0.94 |
| | D500 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| Дозировка | D400 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| портландцемента, % | D300 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| | D100 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| | D500 | 0 | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 |
| D | D400 | 0 | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 |
| Дозировка гипса, % | D300 | 0 | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 |
| | D100 | 0 | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 |
| | D500 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 |
| Температура воды | D400 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 |
| затворения, °С | D300 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 |
| | D100 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 |

В результате проведенных экспериментов получены математические модели, позволяющие оптимизировать начальные реологические (D) и температурные (T) характеристики смеси. Например, для ячеистого бетона марки по плотности D500 они имеют вид:

$$D = -162.2530 + 386.1257 \cdot B / T + 3.8535 \cdot U - 4.6099 \cdot \Gamma + 1.0381 \cdot T_6 - 4.3938 \cdot B / T \cdot U + 8.4625 \cdot B / T \cdot \Gamma + 0.0418 \cdot U \cdot \Gamma - 0.0355 \cdot U \cdot T_6 - 0.0963 \cdot \Gamma \cdot T_6 - 185.9561 \cdot B / T^2;$$
(1)

$$T = 326.7609 - 713.1882 \cdot B / T - 7.4005 \cdot II + 2.5122 \cdot \Gamma + 0.5448 \cdot T_6 + 9.4063 \cdot B / T \cdot II - 4.3125 \cdot B / T \cdot \Gamma + 420.85193 \cdot B / T^2 + 0.02093 \cdot II^2 + 0.04774 \cdot \Gamma^2.$$
 (2)

где D — диаметр расплыва смеси по Суттарду, см; B/T — B/T-отношение; \mathcal{U} — дозировка портландцемента, % по массе в составе сухих компонентов; Γ — дозировка гипса, % по массе в составе сухих компонентов; $T_{\mathcal{S}}$ — температура воды затворения, $^{\circ}$ C; T — температура смеси в момент заливки, $^{\circ}$ C.

Проверка факторов на значимость осуществлялась по критерию Стьюдента. Адекватность моделей подтверждена их проверкой по критерию Фишера.

Следует заметить, что зависимости (1) и (2) получены для фиксированной температуры сырьевых компонентов. Если же температура сырьевых компонентов перед перемешиванием иная, то необходимо модели (1) и (2) дополнить уравнением энергетического баланса системы компонентов.

На практике такая система обладает инерционностью, связанной с особенностями теплообменных процессов. Однако продолжительность выравнивания температур достаточно мала по сравнению с продолжительностью перемешивания и вспучивания формовочной смеси, а в силу того, что компоненты тонко размолоты, частицы обладают большой удельной поверхностью и подвергаются интенсивному перемешиванию, скорость теплообменных процессов системы значительно увеличивается. Поэтому в работе для упрощения расчетов было сделано допущение, что температуры компонентов при их перемешивании выравниваются мгновенно, и этот идеализированный момент времени назван условным нулевым моментом.

Уравнение энергетического состояния системы компонентов газосиликатной смеси при перемешивании в условный нулевой момент времени для замкнутой системы без теплообмена с внешней средой и без учета тепловыделения от химических реакций имеет вид:

$$C_{B} \cdot m_{B} \cdot (T_{CM} - T_{B}) + C_{\mathcal{U}} \cdot m_{\mathcal{U}} \cdot (T_{CM} - T_{\mathcal{U}}) + C_{\mathcal{U}} \cdot (T_{CM} - T_{\mathcal{U}}$$

где $C_{\rm B}$, $C_{\rm u}$, $C_{\rm r}$, $C_{\rm q}$, $C_{\rm r}$, $C_{\rm a}$ и $C_{\rm c}$ – удельные теплоемкости соответственно воды, извести, песка, цемента, гипса, алюминиевой пудры и смесителя, кДж/(кг·К);

 $T_{\text{см}}$, $T_{\text{в}}$, T_{u} , $T_{\text{п}}$, $T_{\text{ц}}$, $T_{\text{г}}$, T_{a} , T_{c} — температуры в условный нулевой момент времени при перемешивании соответственно силикатной смеси, воды, извести, песка, цемента, гипса, алюминиевой пудры и смесителя, °C;

 $m_{\rm B},~m_{\rm N},~m_{\rm H},~m_{\rm C},~m_{\rm A},~m_{\rm C}$ — массы соответственно воды, извести, песка, цемента, гипса, алюминиевой пудры и смесителя, кг.

Уравнение (3) позволяет рассчитывать температуру силикатной смеси при известных температурах всех сырьевых компонентов, включив их как управляющие факторы в общую структуру разрабатываемой мультипараметрической модели.

На основе уравнений (1)—(3) и функциональных зависимостей, представленных в методике оптимизации количества цементирующего вещества [17], получены системы уравнений, которые описывают влияние управляющих параметров на температурное и реологическое состояния силикатной смеси в момент ее заливки в форму. Эти уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{cases}
T_{CM} = F_{1}\left(B / T, \mathcal{U}, \Gamma, T_{6}, T_{u}, T_{n}, T_{u}, T_{c}, T_{c}, M_{c}, C_{c}, A_{u}, K_{och, u}\right), \\
D = F_{2}\left(B / T, \mathcal{U}, \Gamma, T_{6}, T_{cM}, A_{u}, K_{och, u}\right), \\
T = F_{3}\left(B / T, \mathcal{U}, \Gamma, T_{6}, T_{cM}, A_{u}, K_{och, u}\right),
\end{cases} \tag{4}$$

где $M_{\rm c}$ и $C_{\rm c}$ – величина массы смесителя по отношению к массе компонентов, % и удельная теплоемкость смесителя соответственно, кДж/кг·К; $A_{\rm u}$ – активность извести, %; $K_{\rm осн. u}$ – коэффициент основности цемента.

Из-за большого объема уравнений их конкретный вид не представлен.

Блок-схема мультипараметрической модели для оптимизации структуры ячеистого бетона приведена на рис. 1.

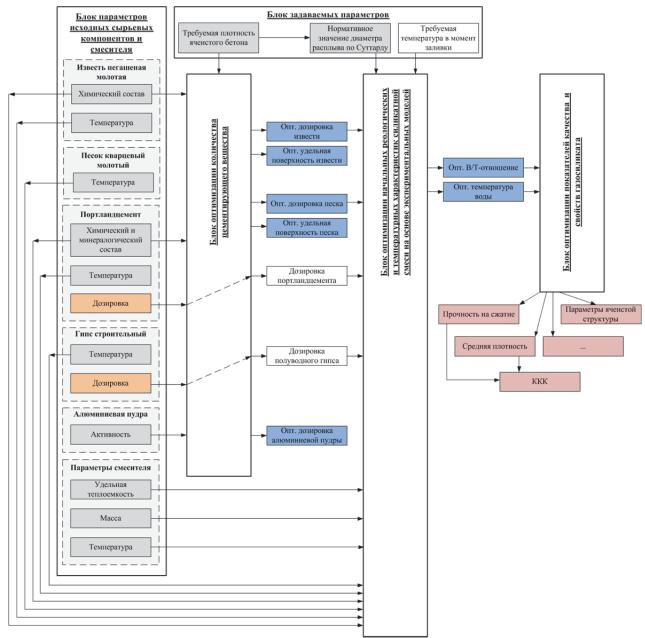


Рисунок 1. Блок-схема мультипараметрической модели для оптимизации структуры ячеистого бетона

Сущность представленной блок-схемы сводится к следующему. На основе данных о химическом составе компонентов по методике [29] определяются активность извести и коэффициент основности портландцемента, которые затем совместно с данными о дозировках портландцемента и гипса используются в оптимизационном блоке расчета количества цементирующего вещества.

На основе экспериментальных зависимостей и данных о требуемой плотности ячеистого бетона вычисляются оптимальные, с точки зрения получения максимально прочной межпоровой перегородки, дозировки и параметры сырьевых компонентов. Затем данные первого блока оптимизации совместно с информацией о температурах сырьевых компонентов, активности извести, коэффициенте основности портландцемента и общей исходной теплоемкости смесителя используются в блоке оптимизации начальных реологических и температурных характеристик силикатной смеси (4). Блок реализует решение систем уравнений вида (4) с определением оптимальных значений В/Т-отношения и температуры воды затворения. На этом оптимизация начальных характеристик силикатной смеси заканчивается.

На следующем этапе получены математические модели, описывающие влияние дозировок портландцемента и полуводного гипса на процесс формирования ячеистой структуры. Поставлены факторные эксперименты вида 2^2 на основе ротатабельного центрального плана, дополненного звездными точками. Уровни варьирования факторов приведены в таблице 2. В качестве выходной характеристики рассматривалась прочность на сжатие бетона. Для этого из одного отформованного массива вырезались 6 образцов-кубов со стороной 7 см, которые подвергались автоклавной обработке при давлении 0.8 МПа по режиму 1.5 ч (подъем давления) + 8 ч (выдержка) + естественное остывание.

Таблица 2. Уровни варьирования факторов для проведения экспериментов для получения математических моделей процесса формирования ячеистой структуры

| Наименование | Марка по | Уровни факторов | | | | | |
|--------------------|-----------|-----------------|------|-----|------|------|--|
| фактора | плотности | -α -1 | | 0 | +1 | +α | |
| | D500 | 10 | 12.9 | 20 | 27.1 | 30 | |
| Дозировка | D400 | 10 | 12.9 | 20 | 27.1 | 30 | |
| портландцемента, % | D300 | 10 | 12.9 | 20 | 27.1 | 30 | |
| | D100 | 12.2 | 13 | 15 | 17 | 17.8 | |
| Дозировка гипса, % | D500 | 0 | 1.5 | 5 | 8.5 | 10 | |
| | D400 | 0 | 1.5 | 5 | 8.5 | 10 | |
| | D300 | 0 | 1.5 | 5 | 8.5 | 10 | |
| | D100 | 1.8 | 2 | 2.5 | 3 | 3.2 | |

Получены полиномиальные модели влияния добавок портландцемента и полуводного гипса на прочностные характеристики ячеистого бетона в виде коэффициента конструктивного качества (ККК), равного отношению прочности на сжатие образцов к квадрату их средней плотности:

для ячеистого бетона марки по плотности D500:

$$KKK_{D500} = 0.000008031 + 1.9902 \cdot 10^{-7} \cdot U + 0.000001095 \cdot \Gamma + 1.1097 \cdot 10^{-8} \cdot U \cdot \Gamma - 6.5055 \cdot 10^{-9} \cdot U^2 - 1.0320 \cdot 10^{-7} \cdot \Gamma^2;$$
(5)

для ячеистого бетона марки по плотности D400:

$$KKK_{D400} = 0.000002120 + 4.9058 \cdot 10^{-7} \cdot U + 0.000002276 \cdot \Gamma - 4.2487 \cdot 10^{-8} \cdot U \cdot \Gamma - 5.3009 \cdot 10^{-9} \cdot U^2 - 8.6384 \cdot 10^{-8} \cdot \Gamma^2;$$
(6)

• для ячеистого бетона марки по плотности D300:

$$KKK_{D300} = -0.000005983 + 0.000001112 \cdot \mathcal{U} + 0.000001794 \cdot \Gamma - 4.0589 \cdot 10^{-8} \cdot \mathcal{U} \cdot \Gamma - 1.8742 \cdot 10^{-8} \cdot \mathcal{U}^2 - 6.6770 \cdot 10^{-8} \cdot \Gamma^2;$$
(7)

• для ячеистого бетона марки по плотности D100:

$$KKK_{D100} = 0.00002264 - 9.4416 \cdot 10^{-7} \cdot U - 0.00000781 \cdot \Gamma + 2.275 \cdot 10^{-7} \cdot U \cdot \Gamma + 9.5 \cdot 10^{-9} \cdot U^2 + 7.62 \cdot 10^{-7} \cdot \Gamma^2;$$
(8)

где Ц — дозировка портландцемента, % по массе в составе сухих компонентов; Γ — дозировка гипса, % по массе в составе сухих компонентов.

Анализ зависимостей (5)–(8) позволяет установить оптимальные дозировки гипса и портландцемента.

В таблице 3 представлены значения прочности на сжатие образцов-кубов и обеспечивающие их оптимальные дозировки и параметры сырьевых компонентов, которые рассчитаны при помощи разработанной мультипараметрической модели.

| Таблиц | a 3. | Прочно | сть на | а сжатие | образцов-кубов | и | оптимальны | ые дозировки и |
|------------|------|----------|---------|-------------|----------------|-----|------------|----------------|
| параметры | сыр | ревых | компо | нентов, | рассчитанные | при | и помощи | разработанной |
| мультипара | метр | оической | і модел | и (на 1 м³) | | | | |

| Марка | негац | молотая ценая с тью 85.6% | Песок мо | олотый | Портлан- дцемент | | | Алюми- ниевая пудра | Проч- |
|----------------------|--|---------------------------------|--|--------------------|---------------------|------------------|-------|---------------------------|----------------------------|
| по плот- ности | Удель- ная поверх- ность, м ² /кг | Дози- ровка, кг | Удель-ная поверх- ность, м ² /кг | Дози- ровка, кг | Дозировка, кг | Дозировка, кг | В/Т | Дози- ровка, кг | ность на сжатие, МПа |
| D500 | 560 | 76.64 | 290 | 269.16 | 98.80 | 30.40 | 0.617 | 0.480 | 4.2 |
| D400 | 560 | 102.88 | 310 | 201.13 | 38.00 | 38.00 | 0.762 | 0.541 | 3.5 |
| D300 | 560 | 43.95 | 320 | 158.12 | 64.13 | 18.81 | 0.704 | 0.608 | 1.6 |
| D100 | 560 | 24.33 | 340 | 56.42 | 12.35 | 1.90 | 0.844 | 0.759 | 0.2 |

Полученные высокие показатели физико-механических характеристик подтверждены исследованиями макроструктуры (рис. 2). Все образцы имеют совершенную ячеистую структуру с минимальным количеством дефектов и высоким коэффициентом сферичности.

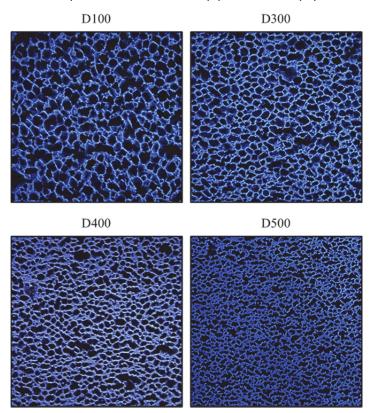


Рисунок 2. Фотографии шлифов ячеистого бетона, полученного на основе оптимизации с использованием мультипараметрической модели (показаны области 40 x 40 мм, масштаб 1:1)

Таким образом, разработка и применение мультипараметрической модели позволили согласованно провести оптимизацию на всех масштабных уровнях формирования структуры ячеистого бетона. Особенно наглядно это реализуется при получении ячеистого бетона марки по плотности D400, для которого средняя прочность на сжатие составила 3.5 МПа, что соответствует классу по прочности на сжатие B2.5 (по ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые. Технические условия» этот показатель не превышает значений, соответствующих классу по прочности на сжатие B1.5). Выполненные исследования представляют собой один из этапов большой работы, ориентированной на создание программно-вычислительного комплекса, позволяющего осуществлять комплексную оптимизацию состава ячеистого силикатного бетона пониженной плотности.

Следует отметить, что полученная модель обладает большим потенциалом для реализации систем программного расчета оптимального состава. Разработка и применение таких систем крайне необходимы в заводской практике для нейтрализации негативного влияния нестабильного качества сырьевых материалов на технологию и свойства ячеистого бетона [5, 31, 32]. В ходе разработки одной из таких систем и успешной апробации в лабораторных условиях была доказана высокая эффективность оптимизации с использованием предложенной мультипараметрической модели [33, 34]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы «Cellular Concrete» для ЭВМ №2012613270.

Литература

- 1. Чернышов Е.М., Федин А.А., Потамошнева Н.Д., Кухтин Ю.А. Газосиликат: современная гибкая технология материала и изделий // Строительные материалы. 2007. №4. С. 1–10.
- 2. Чернышов Е.М., Неупокоев Ю.А., Потамошнева Н.Д. Высокопоризованные ячеистые бетоны для эффективных теплоизоляционных плит // Вестник ТГАСУ. 2007. №1. С. 184–190.
- 3. Drochytka R., Zach J., Korjenic A., Hroudova J. Improving the energy efficiency in buildings while reducing the waste using autoclaved aerated concrete made from power industry waste // Energy and Buildings. 2013. Vol. 58. Pp. 319–323.
- 4. Liana C., Zhugeb Y., Beechama S. The relationship between porosity and strength for porous concrete // Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. Issue 11. Pp. 4294–4298.
- 5. Сахаров Г.П. Ячеистые бетоны в посткризисный период // Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование». 2011. №1. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.nso-journal.ru/images/stories/NSO/2011/01_8.pdf (Дата обращения: 25.03.2013).
- 6. Федин А.А. Научно-технические основы производства и применения силикатного ячеистого бетона. М.: ГАСИС, 2002. 264 с.
- 7. Бонеманн К., Дашнер П. Новые разработки в сфере производства автоклавного ячеистого бетона // Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве: сб. науч. тр. Вып. 2. Днепропетровск: ПГАСА, 2005. С. 124–134.
- 8. Горяйнов К.Э., Горяйнова С.К. Технология теплоизоляционных материалов и изделий. М.: Стройиздат, 1982. 376 с.
- 9. Горлов Ю.П., Меркин А.П.,Устенко А.А. Технология теплоизоляционных материалов. М.: Стройиздат, 1980. 399 с.
- 10. Попов В.А. Условия управления кинетическими параметрами синтеза цементирующих веществ силикатных автоклавных материалов: Дисс. на соискание ученой степени кандидата техн. наук. Воронеж, 1991. 248 с.
- 11. Шмитько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А. Изучение процесса структурообразования ячеистого силикатного бетона автоклавного твердения и роль внешнего давления окружающей среды в формировании бездефектных структур // Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии. Материалы XV академических чтений РААСН международной научно-технической конференции. Казань, 2010. Т. 1. С. 369—373.
- 12. Шмитько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А. Управление процессом порообразования ячеистого силикатного бетона за счет фактора давления внешней газовой фазы // Научный вестник ВГАСУ. Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2012. №5. С. 110–115.
- 13. Narayanan N., Ramamurthy K. Microstructural investigations on aerated concrete // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. Issue 3. Pp. 457–464.
- 14. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review // Cement and Concrete Composites. 2000. Vol. 22. Issue 5. Pp. 321–329.
- 15. Чернов А.Н. Ячеистый бетон переменной плотности. М.: Издательство литературы по строительству, 1972. 128 с.
- 16. Вознесенский В.А. Статистические решения в технологических задачах. Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1969. 232 с.
- 17. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. Киев: Выща школа. Головное изд-во, 1989. 328 с.

- 18. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Иванов Я.П., Николов И.И. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов. Киев: Будивэльник, 1989. 240 с.
- 19. Шуйский А.И. Оптимизация процессов структурообразования и повышения качества газобетонных изделий: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1983. 22 с.
- 20. Шинкевич Е.С. Оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона по комплексу критериев качества на основе изопараметрического анализа: Дисс. ... канд. техн. наук. Красково, 1985. 235 с.
- 21. Amani J., Moeini R. Prediction of shear strength of reinforced concrete beams using adaptive neuro-fuzzy inference system and artificial neural network // Scientia Iranica. 2012. Vol. 19. Issue 2. Pp. 242–248.
- 22. Kadashevich I., Schneider H.-J., Stoyan D. Statistical modeling of the geometrical structure of the system of artificial air pores in autoclaved aerated concrete // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35. Issue 8. Pp. 1495–1502.
- 23. Kadashevich I., Stoyan D. A beam-network model for autoclaved aerated concrete and its use for the investigation of relationships between Young's modulus and microstructure // Computational Materials Science. 2008. Vol. 43. Issue 2. Pp. 293–300.
- 24. Галицков С.Я., Галицков К.С. Параметрическая идентификация гашения извести при производстве ячеисто-бетонной смеси // Современные проблемы науки и образования. 2009. №6–1. с. 22.
- 25. Шинкевич Е.С., Луцкин Е.С., Тымняк А.Б., Чернышов Е.М. Многокритериальная оптимизация состава и свойств активированных известково-кремнеземистых композитов // Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов: Сб. докладов VI международной конференции. СПбГАСУ. СПб., 2012. С. 71–79.
- 26. Бедарев А.А. Улучшение свойств газосиликата за счет оптимизации структуры межпоровых перегородок // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2012. №3. С. 75–85.
- 27. Coz Diaza J., Rabanala F., Nietob P., Hernandezc J., Soriac B., Perez-Bella J. Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 40. Pp. 543–555.
- 28. Чернышов Е.М. Управление процессами структурообразования и качеством силикатных автоклавных материалов (вопросы методологии, структурное материаловедение, инженернотехнологические задачи): Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Л., 1988. 45 с.
- 29. Дьяченко Е.И. Структурные факторы управления вязкостью разрушения и прочностью силикатных автоклавных материалов: Дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1994. 107 с.
- 30. Лаукайтис А.А. Влияние температуры воды на разогрев формовочной смеси // Строительные материалы. 2002. №3. С. 37–39.
- 31. Yeh I-C. Computer-aided design for optimum concrete mixtures // Cement and Concrete Composites. 2007. Vol. 29. Issue 3. Pp. 193–202.
- 32. Галицков К.С., Галицков С.Я., Шломов С.В. Алгоритм и система автоматической коррекции рецептуры ячеисто-бетонной смеси // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. 2011. №4. С. 219–221.
- 33. Бедарев А.А. Системы моделирования и оптимизации структуры ячеистого силикатного бетона «Cellular Concrete» и «Cellular MOD Concrete» // Сборник материалов IV Всероссийской заочной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодежь в современном мире: гражданский, творческий и инновационный потенциал». Старый Оскол, 2012. С. 327–334.
- 34. Бедарев А.А. Программный комплекс для оптимизации и управления технологией изготовления газосиликатных изделий // Материалы Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области информатики и информационных технологий: сб. науч. работ: в 3 т. Белгород: ИД «Белгород», 2012. Т. 1. С. 124–130.

*Анатолий Андреевич Бедарев, г. Воронеж, Россия Тел. раб.: +7(473)249-53-05; эл. почта: bedarev@ogent.net

© Шмитько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А., 2013

О характеристиках магнитоконтроля ферропримесей (подлежащих магнитной сепарации) сырья строительных материалов

К.т.н., доцент А.А. Сандуляк*; аспирант Д.В. Ершов; к.т.н., доцент В.А. Ершова; д.т.н., профессор А.В. Сандуляк,

ФГБОУ ВПО Московский государственный строительный университет

Ключевые слова: ферропримеси; магнитоконтроль; опытно-расчетная модель

Для объективной диагностики результативности работы магнитных очистных устройств (в частности, получающих широкое распространение магнитных сепараторов [1]), ответственных за удаление магнитоактивных железистых примесей (ферропримесей), все более актуальной становится потребность в тех методах их контроля, которые основаны на том же принципе магнитного выделения (разумеется, при контроле — максимально полного) таких примесей. Этот принцип, т.е. принцип магнитоконтроля, широко используется для различных сред [1—19].

Что касается сырья строительных материалов, то для магнитоконтроля ферропримесей предусматриваются соответствующие стандартные методы [2–5] (вяжущие гипсовые материалы, тальк и талькомагнезит, доломит и др.). Однако к этим методам имеется достаточно много обоснованных претензий [20–22], начиная с того, что результаты операций магнитоконтроля отдельно не фиксируются (а осуществляется аддитивное накопление операционных масс выделяемых примесей), число этих операций постулируется из субъективных соображений «достаточности», выделенные примеси не идентифицируются. Из-за этого стандартные методы [2–5] приходится квалифицировать как обладающие существенной погрешностью, недопустимой на практике, что одновременно ставит актуальную задачу совершенствования магнитоконтроля.

В работах [20-22] в качестве альтернативы стандартным методам магнитоконтроля [2-5] приведены развернутые массово-операционные характеристики магнитоконтроля ферропримесей (кварцевого песка и полевого шпата), а именно данные масс m ферропримесей, выделенных в каждой из n стандартных операций такого контроля. Они позволили установить, что после выполнения даже повышенного числа n операций (до n=7-10 вместо оговоренных в работах [2-5] значений n=3-6) анализируемые среды полностью не освобождаются от ферропримесей; остаточная масса выделенных примесей, хотя и уменьшается по мере выполнения каждой последующей операции, продолжает оставаться заметной (особенно при относительно высокой дисперсности ферропримесей [21]). А это существенным образом сказывается на точности такого И определить связанную С этим обстоятельством погрешность непредсказуемую), основываясь только на результатах опытов, не представляется возможным изза отсутствия информации об истинном и являющимся искомым содержании ферропримесей.

Тем самым, можно вполне определенно заметить, что недостаток существующих стандартных методов магнитоконтроля, осуществляемых обычно при нормативно ограниченном числе операций контроля [2–5], к тому же «слепых», не предполагающих необходимую детализацию пооперационных масс, является принципиальным.

Кроме того, в работе [23] показано, что упомянутым стандартным методам магнитоконтроля [2–5] присущ также недостаток, заключающийся в полном отсутствии анализа роли, которую играет вовлечение частиц контролируемой среды (наряду с выделяемыми из нее феррочастицами), всегда имеющее место при осуществлении магнитоконтроля. Альтернативой рекомендациям этих стандартов [3, 5] о дополнительном магнитном разделении (к сожалению, не получившим должного обоснования — как показывает практика, их эффективность весьма низка) стала количественная оценка самого этого фактора [23]. Так, посредством прямой статобработки выделяемых частиц, подвергаемых для этого микроскопии, исходя из оцениваемого среднего размера частиц, в работе [23] получена соответствующая информация. Это весьма показательные и достаточно информативные гистограммы распределения количества, объема и, главное, массы частиц по размерам δ : как феррочастиц, так и попутно вовлеченных частиц контролируемой среды.

Из сказанного следует, что магнитоконтроль ферропримесей сырья стройматериалов нуждается в дальнейшем развитии, направленном на устранение отмеченных выше недостатков.

Постановка задач

В данной работе, прежде всего, ставилась задача получения уточненных массовооперационных характеристик магнитоконтроля ферропримесей (на примере кварцевого песка и полевого шпата). В число задач, решение которых позволило бы совершенствовать магнитоконтроль, входили также обработка и анализ этих характеристик, в том числе с позиций общепринятого лимитирования числа операций контроля (для оценки соответствующей погрешности).

Массово-операционные характеристики магнитоконтроля и их анализ

Для получения данных магнитоконтроля ферропримесей кварцевого песка и полевого шпата использовались стандартные методы [2-5], но с существенным дополнением [20-23]. В отличие от аддитивного накопления выделяемых масс, содержащих ферропримеси [2-5], осуществлялась пооперационная идентификация выделяемых масс именно ферропримесей [20-23] последующим С ИХ представлением в виде соответствующих массовооперационных характеристик. Эти характеристики, т.е. убывающие зависимости операционных масс выделяемых феррочастиц от порядкового номера nоперации, показаны на рис. 1, 2. Асимптотически приближаясь к своему предельному (нулевому) значению, они явно свидетельствуют о наличии остаточной (и при выполнении даже повышенного числа операций магнитоконтроля – неучтенной) массы ферропримесей.

Получение таких характеристик является важным шагом в совершенствовании магнитоконтроля, позволяющим одновременно указать и на погрешность, вызванную неполным выделением ферропримесей. Столь же важным шагом является создание опытнорасчетной модели, которая выводила бы на решения задачи определения текущих операционных масс за пределами фактически выполненных операций магнитоконтроля.

Для решения вопроса определения всех возможных операционных масс m, не прибегая при этом неоправданно большому (заметим, всегда недостаточному для «полного выделения» ферропримесей из пробы анализируемой среды) числу операций магнитоконтроля, можно воспользоваться предложенной [20-22] расчетной В объективной легализации и прогнозной экстраполяции характеристик магнитоконтроля, адаптированной к уточненным характеристикам.

Явные признаки этой модели уже прослеживаются из самого вида опытных зависимостей операционных масс m выделяемых ферропримесей от порядкового номера операции n (рис.1, 2). Так, эти зависимости, как и в [20–22], близки к экспоненциальным:

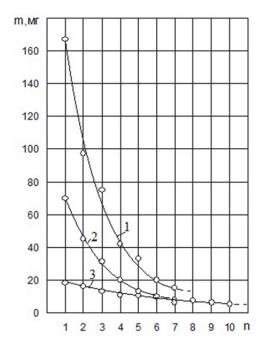


Рисунок 1. Данные по массам ферропримесей, выделенным из кварцевого песка в каждой из операций магнитоконтроля; 1, 2, 3 – пробы №1, 2, 3

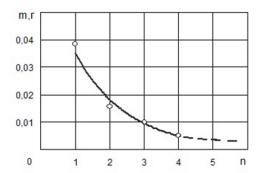
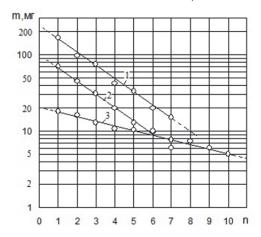


Рисунок 2. Данные по массам ферропримесей, выделенным из полевого шпата в каждой из операций магнитоконтроля

$$m = A \cdot \exp(-k \cdot n),\tag{1}$$

что находит свое наглядное подтверждение, если их представить в полулогарифмических координатах (рис. 3, 4); в таких координатах они хорошо поддаются линеаризации, подтверждая тем самым сказанное.

При этом входящие в формулу (1) параметры A и k (они являются параметрами, необходимыми и для последующих расчетов) легко определяются, как и в [20–22], на основании результатов экспериментов (рис. 1, 2). В частности (табл. 1), для кварцевого песка: A = 230 M R и R = 0,39 (проба №1), R = 102R и R = 0,3 (проба №2), R = 20,2 R и R = 0,14 (проба №3); для полевого шпата: R = 68 R и R = 0,66.



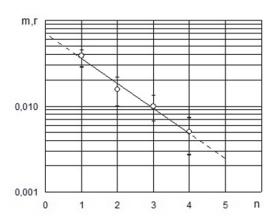


Рисунок 3. Иллюстрация показательного вида массово-операционных характеристик магнитоконтроля ферропримесей, выделенных из кварцевого песка – по данным рис. 1

Рисунок 4. Иллюстрация показательного вида массово-операционной характеристики магнитоконтроля ферропримесей, выделенной из полевого шпата – по данным рис. 2

Дальнейшим шагом в совершенствовании магнитоконтроля является получение необходимых расчетных формул для определения суммарных масс ферропримесей, присутствующих в пробе среды, подвергаемой магнитоконтролю. Такая задача также становится решаемой, если обратить внимание на примечательную особенность показательной функции (1). Так, будучи дискретной, справедливой для натурального ряда чисел 1, 2, 3...n, эта функция, если ее записать почленно, дает количественный ряд, который представляет собой бесконечно убывающую геометрическую прогрессию [20–22]. Следовательно, при известном первом члене этой прогрессии $m_1 = A \cdot \exp(-k \cdot 1)$ и ее знаменателе $q = \exp(-k)$ может быть определена полная сумма членов этой прогрессии, в данном случае это суммарная потенциальная масса осадка $m_{1...\infty}$, которая могла бы быть получена при теоретически неограниченном числе операций магнитоконтроля $(n \rightarrow \infty)$, т.е.

$$m_{1...\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} m_n = \frac{m_1}{1-q} = \frac{A}{\exp k - 1}$$
 (2)

Именно это получаемое значение $m_{1\dots^\infty}$ при известных значениях объема V и массы M пробы той или иной контролируемой среды следует использовать для определения истинных значений объемной $c_V=m_{1\dots^\infty}/V$ и/или массовой $c_M=m_{1\dots^\infty}/M(\times 100\%)$ концентрации (массовой доли) ферропримесей в этой среде.

Тем самым, проблемная ранее задача достоверного контроля содержания ферропримесей в пробе того или иного сырья строительных материалов и изделий становится вполне решаемой. В частности, для кварцевого песка: $m_{1...∞}$ = 482 me (проба №1), $m_{1...∞}$ = 203 me (проба №2), $m_{1...∞}$ = 134 me (проба №3); для полевого шпата: $m_{1...∞}$ = 73 me (табл.1).

Одновременно решаемой становится и задача определения погрешности магнитоконтроля

$$\varepsilon_{1...n} = \frac{m_{1...\infty} - m_{1...n}}{m_{1...\infty}} = 1 - \frac{m_{1...n}}{m_{1...\infty}} (\times 100\%),$$
(3)

осуществляемого при том или ином лимитировании числа n операций. Соответствующие данные о погрешностях $\varepsilon_{1...n}$ магнитоконтроля ферропримесей кварцевого песка и полевого шпата приведены в табл. 1. Так, например, при выполнении трех стандартных операций магнитоконтроля ферропримесей погрешность такого контроля составляет для кварцевого песка (проба №1 и №2) и полевого шпата 12–30%, а при выполнении одной операции - 47–65%. Для кварцевого песка, характеризующегося повышенной дисперсностью ферропримесей (проба №3), эти показатели составляют соответственно 65% и 87%.

Таблица 1. Сводные данные о параметрах магнитоконтроля ферропримесей кварцевого песка и полевого шпата

| Анализируемая среда | 2VCTD2EQEMDVQMQEQ) | | Сравнительные значения результата магнитоконтроля, выполняемого ограниченным числом операций | | | | | НЫМ | |
|--|--------------------|------|--|--|------------------------|------------------------------|------------------------|---------------------------|-------|
| | А, мг | k | т _{1∞} , мг | $\frac{m_{1\dots 6}}{m_{1\dots \infty}}$ | ε ₁₆ , % | $\frac{m_{13}}{m_{1\infty}}$ | ε ₁₃ , % | $\frac{m_1}{m_{1\infty}}$ | ε1, % |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Кварцевый песок, проба №1, <i>n</i> =7 | 230 | 0,39 | 482 | 0,9 | 10 | 0,7 | 30 | 0,35 | 65 |
| Кварцевый песок, проба №2, <i>n</i> =7 | 102 | 0,3 | 203 | 0,93 | 7 | 0,7 | 30 | 0,34 | 64 |
| Полевой шпат, <i>n</i> =4 | 68 | 0,66 | 73 | - | - | 0,88 | 12 | 0,53 | 47 |
| Кварцевый песок, проба №3, <i>n</i> =10 | 20,2 | 0,14 | 134 | 0,58 | 42 | 0,35 | 65 | 0,13 | 87 |

Величину погрешности можно вычислять и по-иному, если после выполнения экспериментальной части магнитоконтроля и описанной выше обработки полученных опытных данных становится известным входящий в базовое выражение (1) параметр k. Так, с учетом выражения (2), а также аналогичного ему выражения, только получаемого для ограниченного числа операций, т.е.

$$m_{1...n} = \sum_{i=1}^{n} m_n = \frac{m_1 - m_n \cdot q}{1 - q} = A \frac{1 - \exp(-k \cdot n)}{\exp k - 1},$$
 (4)

определение (3) принимает такой функциональный вид:

$$\varepsilon_{1...n} = \exp(-k \cdot n)(\times 100\%). \tag{5}$$

Используя это выражение, можно решать и не рассматривавшуюся ранее обратную задачу, а именно находить, какое число операций n магнитоконтроля

$$n = \frac{\ln \varepsilon_{1...n}}{k} \tag{6}$$

необходимо выполнить, соблюдая определенную (допустимую) погрешность такого контроля $\varepsilon_{1...n}$. Так, для кварцевого песка, проба №3, (таблица 1) при условии допускаемой погрешности $\varepsilon_{1...n}$ = 5% (0,05) необходимо выполнить n = 21,4 \approx 22 операции магнитоконтроля, что вряд ли возможно на практике. К тому же, эта информация становится доступной лишь после (или в процессе) выполнения опытов по контролю.

Выводы

1. Получены уточненные массово-операционные характеристики магнитоконтроля ферропримесей кварцевого песка и полевого шпата. Будучи экспоненциальной убывающей, каждая из таких дискретных характеристик, представляющая собой убывающую геометрическую прогрессию, позволяет получить расчетные значения общей (выделенной и остаточной) массы ферропримесей в пробе контролируемой среды.

2. Показано, что погрешность магнитоконтроля (убывающая по экспоненте при увеличении числа операций такого контроля) для ограниченного стандартного числа операций весьма существенна – до 12–30%.

Литература

- 1. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Ершов Д.В. [и др.] Магнитная сепарация сырья для производства стекла и керамики. Проблемы контроля железистых примесей (обзор) // Стекло и керамика. 2012. №6. С. 29–34.
- 2. ГОСТ 23789-79. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний.
- 3. ГОСТ 25216-82. Тальк и талькомагнезит. Метод определения железа.
- 4. ГОСТ 23672-79. Доломит для стекольной промышленности. Технические условия.
- 5. ГОСТ 8253-79. Мел химически осажденный. Технические условия.
- 6. Macián V., Payri R, Tormos B., Montoro L. Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in Diesel engine fuel injection systems // Wear. 2006. No.260. Pp. 562–566.
- 7. Roylance B.J. Ferrography then and now // Tribology International. 2005. No.38. Pp. 857-862.
- 8. Yuan C.Q., Peng Z., Zhou X.C., Yan X.P. The characterization of wear transitions in sliding wear process contaminated with silica and iron powder // Tribology International. 2005. No.38. Pp. 129–143.
- 9. Chen G., Xie Y., Jiang L. Application Study of Color Feature Extraction on Ferrographic Image Clas-sifying and Particle Recognition // Zhongguo Jixie Gongcheng (China Mechanical Engineering). 2006. No.17(15). Pp. 1576–1580.
- 10. Lukas M., Yurko R.J., Anderson D.P. Retrode filter spectroscopy: A recently improved method to direct and analyze large wear and contaminant particles in fluids // Journal of ASTM International. 2005. No.2(3). Pp. 187–198.
- 11. Levy O., Elianz N. Failure Analysis and Condition Monitoring of an Open-Loop Oil System Using Ferrography // Tribology Letters. 2009. Pp. 1–13.
- 12. Johnson M., Spurlock M. Best practices: Strategic oil analysis: Setting the test slate // Tribology and Lubrication Technology. 2009. No.65(5). Pp. 20–27.
- 13. Eliaz N., Latanision R.M. Preventative maintenance and failure analysis of aircraft components // Corrosion Reviews. 2007. No.25(1–2). Pp. 107–144.
- 14. Wakeline G. Operations engineering. Maintenance. In order to continue running as lubricated. Wear particle analyses help in condition oriented maintenance // CIT Plus. 2007. No.10(1–2). Pp. 36–37.
- 15. Stodola J. The results of ferrography tests and their evaluation // Tribo Test. 2001. No.8(1). Pp. 73-83.
- 16. Krethe R. Possibilities and limits of ferrography // Tribologie und Schmierungstechnik. 2001. No.48(4). Pp. 48–54.
- 17. Morovek L. Ferrography modern maintenance tool // Rock Products. 2000. No.103(6). Pp. 24.
- 18. Пинчук Е.Л., Маркова Л.В. Магнитные методы и устройства оперативной диагностики трибосопряжений (обзор) // Трение и износ. 2000. Т. 21. №2. С. 197–204.
- 19. Малышев В.С., Коновалова И.Н., Берестова Г.И. [и др.] Анализ частиц износа в системах смазки дизельных двигателей методом феррографии // Двигателестроение. 2002. №1. С. 42–43.
- 20. Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Ершов Д.В. [и др.] Функциональная экстраполяция массовооперационной характеристики магнитофореза как основа прецизионного метода контроля феррочастиц // Измерительная техника. 2010. №8. С. 57–60.
- 21. Сандуляк А.В., Орешкин Д.В., Сандуляк А.А., Ершов Д.В. [и др.] Результаты нелимитированного сканирующего магнитоконтроля ферропримесей кварцевого песка // Строительные материалы. 2012. №4. С. 80–83.
- 22. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Ершов Д.В. [и др.] О новых принципах актуализации регламентов магнитоконтроля ферропримесей сырья стройматериалов (на примере кварцевого песка) // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №2. С. 68–72.
- 23. Сандуляк А.В., Ершов Д.В., Сандуляк А.А. [и др.] Роль фактора вовлечения частиц песка при реализации метода магнитоконтроля ферропримесей // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. №1. С. 31–35.

*Анна Александровна Сандуляк, Москва, Россия Тел. раб.: +7(499)188-63-50; эл. почта: a.sandulyak@mail.ru

© Сандуляк А.А., Ершов Д.В., Ершова В.А., Сандуляк А.В., 2013

Снижение температуры получения магнезиального вяжущего из бруситов

К.т.н., доцент Т.Н. Черных*; к.т.н., доцент А.А. Орлов; д.т.н., профессор Л.Я. Крамар; д.т.н., профессор Б.Я. Трофимов, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет); к.ф.-м.н., доцент А.В. Перминов, ФГБОУ ВПО Челябинский государственный университет

Ключевые слова: брусит; серпентин; обжиг; магнезиальное вяжущее вещество; температура; добавки-интенсификаторы; энергоэффективность

Благодаря развитию строительного материаловедения, во всем мире наблюдается рост интереса к магнезиальным строительным материалам [1, 2]. Расширяется номенклатура магнезиальных вяжущих веществ: перспективным является переработка бруситов [3, 4], в России начался промышленный выпуск магнезиального вяжущего из бруситового сырья 3-го и 4-го сортов, некондиционных с точки зрения получения огнеупоров. Известно, что бруситовая порода под воздействием окружающей среды накапливает продукты выветривания — серпентины и серпентиноподобные минералы (продукты неполной серпентинизации), разлагающиеся с потерей воды при 560–900°С [5, 6]. В процессе обжига пары воды, удаляющиеся из серпентинов и им подобных минералов, сдерживают полную дегидратацию брусита и, вследствие этого, периклаз образуется и кристаллизуется при температурах выше температуры полной дегидратации всех минералов породы [7, 8]. В результате этого процесса для получения магнезиального вяжущего из бруситовой породы 3—4 сортов необходим повышенный расход энергии, требуется обжиг при температурах 1100—1200°С, что увеличивает себестоимость вяжущего и делает его производство малорентабельным [7, 9, 10].

Наиболее эффективным способом снижения энергозатрат на обжиг является использование добавок-интенсификаторов, позволяющих получать продукт заданного качества при экономии энергетических ресурсов [11, 12]. Такие разработки существуют в областях, смежных с технологией магнезиального вяжущего из бруситовых пород, например, для получения извести с пониженным тепловыделением при гашении карбонатные породы перед обжигом обрабатывают раствором хлорида натрия [13]. При термической обработке карбонатных минералов для их разложения при более низкой температуре вводят воду и растворы некоторых солей [14–17]. Ускоряющее действие интенсификаторов на процесс формирования цементного клинкера, по мнению многих авторов [14, 18, 19, 20], предопределяется сочетанием анионов и катионов, входящих в состав интенсификатора. Установлено, что эффективность действия катионов при производстве клинкера убывает в ряду $\text{Be}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Li}^+ \rightarrow \text{Na}^+ \rightarrow \text{K}^+$ с увеличением их электроотрицательности. В то же время интенсивность минерализующего действия анионов, наоборот, убывает с уменьшением их электроотрицательности в ряду $\text{SiF}_6^{2-} \rightarrow \text{F}^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$ [19]. Таким образом, правильный выбор и использование подобных добавок при обжиге бруситовой породы для строительного магнезиального вяжущего приведут к снижению энергозатрат и повышению эффективности производства вяжущего.

Цель настоящей работы — снижение температуры обжига серпентинизированного бруситового сырья с помощью добавок-интенсификаторов при получении магнезиального вяжущего.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- установить особенности воздействия различных добавок-интенсификаторов на процесс дегидратации брусита и серпентинов;
- выявить наиболее эффективные добавки-интенсификаторы, способные снижать температуру обжига бруситового сырья;
- определить свойства вяжущего, полученного обжигом при пониженных температурах.

Для проведения исследований применяли бруситовую породу 3-го сорта Кульдурского месторождения следующего минералогического состава (табл. 1).

| Таблица 1. Мине | ралогический состае | в исследуемой бы | оуситовой породы |
|-----------------|---------------------|------------------|------------------|
| | | | |

| Минералы | Брусит | Доломит и кальцит | Серпентины | Другие |
|---------------|-----------|--------------------|-----------------|---------|
| | Мg(OH)₂ | CaMg(CO₃)₂ и CaCO₃ | 3MgOʻ2SiO₂ʻ2H₂O | примеси |
| Содержание, % | 82,0-96,0 | 2,7-3,9 | 9,7-12,0 | до 5,6 |

В качестве добавок-интенсификаторов использовали ацетат цинка, хлорид натрия, хлористый магний шестиводный (бишофит), карналлит, хлорид калия, сульфат железа. Выбор добавок основан на их распространенности и достаточном объеме промышленного производства. Кроме того, он обусловлен видами катионов и анионов, а также возможностью образования добавкой расплава при низких температурах обжига (выбор был сделан таким образом, чтобы электроотрицательность ионов добавки значительно отличалась, при этом присутствовали как плавящиеся, так и неплавящиеся добавки). Интенсифицирующее действие исследовали с помощью термогравиметрического метода анализа материалов на дериватографе системы «Luxx STA 409» фирмы «Netsch».

Контроль вяжущего проводили в соответствии с ГОСТ 1216 «Порошки магнезиальные каустические. Технические условия» и ТУ 5744-001-60779432-2009 «Магнезиальное вяжущее строительного назначения. Технические условия».

Для выявления особенностей воздействия добавок-интенсификаторов на процесс дегидратации составляющих бруситовой породы был проведен анализ процессов разложения породы без добавок и при их наличии. Для проведения эксперимента бруситовую породу предварительно измельчали в лабораторной мельнице до полного прохода через сито 02, полученный порошок смешивали с водными растворами добавок-интенсификаторов, количество сухих добавок от массы бруситовой породы составляло 2%, влажность шихты — 15%. Полученную смесь высушивали при температуре 105±5°C, снова измельчали и помещали в печь дериватографа.

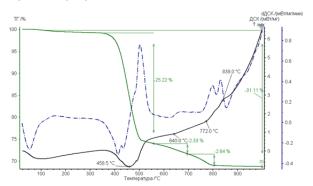


Рисунок 1. Дериватограмма бруситовой породы без добавок

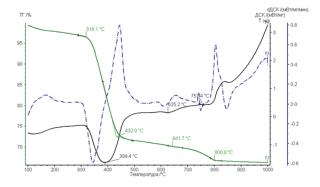


Рисунок 2. Дериватограмма разложения бруситовой породы с добавкой ацетата цинка

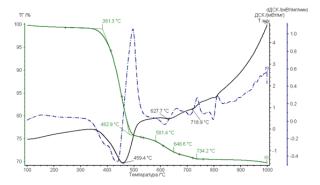


Рисунок 3. Дериватограмма разложения бруситовой породы с добавкой хлорида натрия

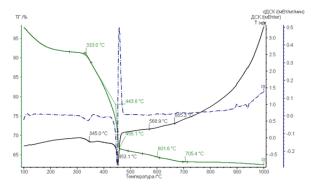


Рисунок 4. Дериватограмма разложения бруситовой породы с добавкой хлорида магния

Черных Т.Н., Орлов А.А., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Перминов А.В. Снижение температуры получения магнезиального вяжущего из бруситов

При обжиге породы без добавок (рис. 1) процесс удаления воды из пробы непрерывен в диапазоне температур от 380°С до 810°С и включает в основном дегидратацию брусита и серпентина. Непрерывное присутствие паров воды в разлагающейся породе приводит к тому, что для получения магнезиального вяжущего обжиг нужно вести при температуре не менее 820°С. В промышленных условиях, из-за большого объема обжигаемого материала и других особенностей обжига, требуемая температура достигает 1100–1200°С. По результатам анализа термограмм разложения бруситовой породы с интенсификаторами добавки разделили на три вида по механизму действия.

Проследим воздействие добавки-интенсификатора первого вида на примере ацетата цинка (рис. 2) (к этой группе относится также сульфат железа и др.). Из дериватограммы следует, что плавление добавки смещает температуру дегидратации брусита с 450°C до 318°C, но при температуре 454°C ацетат цинка прекращает свое воздействие на обжигаемую шихту, так как продукты его разложения находятся в твердом состоянии. В результате температура дегидратации серпентинов остается практически такой же, как и в шихте без добавок — 810°C (рис. 1). Способность добавки образовывать жидкую фазу при невысоких температурах играет немаловажную роль в процессе разложения исходных минералов, так как жидкая фаза при обжиге способствует расклиниванию микротрещин в частицах материала, диспергирует реагирующие компоненты, улучшает тепло- и массообмен. Но такая особенность действия добавок не решает проблем, создаваемых в породе серпентином или другими минералами, теряющими химически связанную воду при высоких температурах.

Добавки-интенсификаторы второго вида способны ускорять разложение минералов бруситовой породы за счет «ионного воздействия» без образования расплава. Характер разложения серпентинизированной бруситовой породы с добавкой-интенсификатором второго вида (хлоридом натрия) представлен на рис. 3. Из термограмм следует, что введение в сырьевую смесь такой добавки снижает температуру окончания дегидратации минерала брусита на 80°С, а серпентинов – на 70°С. Добавка плавится при 833°С после разложения серпентинов, а значит, ее интенсифицирующее действие объясняется не воздействием расплава, а тем, что ионы интенсификатора при повышенных температурах обладают высокой активностью, что дестабилизирует кристаллическую решетку минералов породы и разрушает ее. Активность ионов выражается в их подвижности. С повышением температуры расстояния между ионами добавки увеличиваются, и когда они приближаются к решетке брусита, между соседними ионами магния в породе возникают неуравновешенные силы. Это приводит к увеличению интенсивности их колебаний и ускорению разрыва кристаллических связей. Похожим действием обладает добавка хлорида калия.

Третий вид добавок интенсификаторов объединяет оба способа воздействия на обжигаемый материал. Из дериватограммы на рис. 4 следует, что добавка шестиводного хлорида магния смещает дегидратацию брусита до 333°C, а серпентинов – до 705°C, понижая температуру полного разложения бруситовой породы на 105°C. В породе при нагревании до 150–350°C происходит удаление воды из добавки и перестройка ее кристаллической решетки. Это приводит к разрыву химических связей, повышению активности добавки и способствует сдвигу начала дегидратации брусита в низкотемпературную область (333–456°C), далее при 444°C дегидратация брусита значительно ускоряется, о чем свидетельствует изменение вида кривой ТГ. Этот эффект можно объяснить диссоциацией добавки, начинающейся при 420°C, с образованием активных ионов, что ускоряет дегидратацию серпентина и продуктов серпентинизации брусита. Плавление добавки при 716°C способствует дополнительной интенсификации удаления паров воды из обжигаемой массы. Похожий эффект воздействия на обжигаемый материал наблюдается также при использовании добавки карналлита.

Третий вид добавок является наиболее эффективным, так как совмещает в себе разные механизмы воздействия на обжигаемый материал.

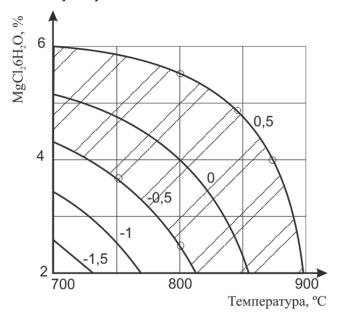
Таким образом, на основе результатов проведенных исследований и с учетом современных взглядов на данный вопрос [4, 14, 15, 16, 18] добавки-интенсификаторы можно разделить на три вида: первый вид интенсифицирует обжиг за счет образования расплава, второй — за счет «ионного воздействия», третий — за счет образования расплава и «ионного воздействия».

Исходя из вышесказанного, магнезиальное вяжущее из серпентинизированной бруситовой породы 3-го сорта можно получить при температуре более чем на 100°С ниже той, которая применяется в традиционной технологии (без добавок).

С целью определения влияния добавок-интенсификаторов на основные физикомеханические характеристики магнезиального вяжущего был спланирован и реализован двухфакторный эксперимент. В качестве варьируемых факторов были выбраны: температура обжига (700°C, 800°C, 900°C) и количество добавки-интенсификатора обжига MgCl $_2$ ·6H $_2$ O (2%, 4%, 6%). Добавка бишофита выбрана как наиболее эффективная. Откликами приняты предел прочности при сжатии в возрасте 1 и 28 суток и равномерность изменения объема.

Для проведения эксперимента исходную бруситовую породу измельчали в лабораторной мельнице до остатка на сите 02 не более 15%, смешивали с раствором добавки-интенсификатора $MgCl_2\cdot 6H_2O$, затем гранулировали. Полученные гранулы диаметром 10...15 мм сразу после изготовления помещали в камерную печь ПКЛ-1,2 и выдерживали при требуемых температурах в течение 2 часов, после чего охлаждали на воздухе. Обожженные гранулы измельчали в лабораторной мельнице до остатка на сите 008 не более 15%. Магнезиальное вяжущее затворяли водным раствором хлорида магния (бишофитом) плотностью 1,2 г/см 3 , согласно ГОСТ 1216-87 «Порошки магнезитовые. Технические условия».

Наиболее полную информацию о пригодности вяжущего для использования в строительстве дает показатель равномерности изменения объема твердеющего магнезиального камня. Из зависимости на рис. 5 видно, что образцы камня вяжущего, полученного при температуре 750–850°C с 3–5% шестиводного хлорида магния, характеризуются равномерностью изменения объема, т.е. трещины на них отсутствуют.

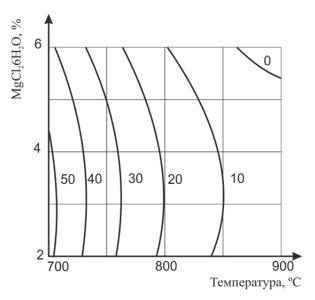


 $PMO(x,y) = 0.67 x + 0.67y - 0.5xy (F_0=3.7)^{1}$

Рисунок 5. Зависимость равномерности изменения объема от температуры получения вяжущего и количества добавки («-2» – разрушение на отдельные блоки, «-1» – сеть трещин, «0» – нет трещин, «1» – единичные сквозные или радиальные трещины, «2» – много сквозных трещин, «-0,5» и «0,5» - условные границы равномерного изменения объема)

Введение в обжигаемую шихту добавки бишофита менее 3% или снижение температуры обжига ниже 750°С приводит к образованию на образцах трещин, характерных для излишне активного вяжущего. Повышение дозировки добавки бишофита сверх 5% или температуры выше 850°С также приводит к образованию трещин, но радиальных – характерных для вяжущего с сильно закристаллизованным периклазом. Диапазон оптимальных значений равномерности изменения объема проверен экспериментально, путем испытания на равномерность изменения объема 5 проб, параметры получения которых лежат на условных границах равномерного изменения объема (на рис. 5 обозначены кружками).

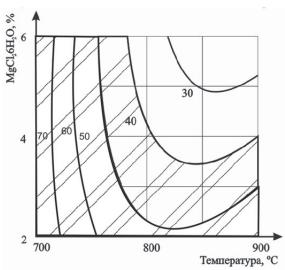
Другим значимым фактором для вяжущего является предел прочности при сжатии. В первые сутки твердения (рис. 6) на набор прочности оказывает существенное влияние только температура обжига вяжущего, добавка-интенсификатор практически не влияет на прочность камня.



 $R_1(x,y) = 19,143 - 23,514x - 3,957y + 8,864x^2 - 4,565y^2 + 0,744xy$ (F_o =4,1) Рисунок 6. Зависимость предела прочности при сжатии в возрасте 1 суток от температуры обжига и количества добавки

Низкую раннюю прочность вяжущего, полученного с 6% добавки-интесификатора и при температуре более 800°С, можно объяснить значительным увеличением среднего размера кристаллов MgO и получением пережога, что снижает активность вяжущего. Это подтверждается результатами определения среднего размера кристаллов оксида магния по области когерентного рассеивания: при дозировке 6% и температуре 800...900°С по отражению в плоскости 2-2-0 размер составляет 60,5...77,34 нм. При этом оптимальный размер кристаллов для магнезиального вяжущего из бруситов по данному направлению должен находиться в диапазоне 50...55 нм [7, 10]. Увеличение температуры обжига бруситовой породы приводит к снижению активности вяжущего и его прочности при любых дозировках добавки.

Прочность магнезиального камня при сжатии в возрасте 28 суток в зависимости от температуры обжига и количества добавки приведена на рис. 7.



 $R_{28}(x,y)$ = 25,294 – 12,464x –10,141y + 21,087x 2 + 14,491y 2 – 9,823xy (F $_{\rm o}$ =2,9) Рисунок 7. Зависимость предела прочности при сжатии образцов в возрасте 28 суток от температуры обжига и количества добавки

В 28 сутки, так же как в раннем возрасте, при температурах ниже 750°С добавкаинтенсификатор не оказывает существенного влияния на прочность. Это связано с незначительным изменением среднего размера кристаллов в данном диапазоне температур, т.к. только при 700°С заканчивается дегидратация серпентинов и возможна кристаллизация периклаза. Обжиг брусита при 900°С приводит к росту прочности с увеличением дозировки добавки вследствие увеличения плотности затворителя, в связи с присутствием в вяжущем после обжига некоторого количества безводного хлорида магния. Повышение плотности затворителя способствует активизации «пережога», что и вызывает увеличение прочности. В данном случае плотность раствора бишофита повышается с 1,2 до 1,23 г/см³. Оптимальная область факторов выделена на рис. 7 штриховкой.

Таким образом, обжиг шихты, включающей бруситовую породу и 3-5% MgCl $_2$ · $6H_2O$, при температуре $800\pm50^{\circ}$ C позволяет получить вяжущее нормальной активности, характеризующееся равномерностью изменения объема и стабильным набором прочности при твердении, которая достигает к 28 суткам не менее 40 МПа (табл. 2).

| Показатель | Норма по ТУ | Вяжущее, полученное при пониженной температуре | |
|--------------------------------|-----------------------------|---|--|
| Сроки схватывания | | | |
| начало | не ранее 40 мин. | 50 мин. | |
| конец | не позднее 6 ч. | 5 ч. 10 мин. | |
| Равномерность изменения объема | не должно появляться трещин | трещин нет | |
| Прочность | | | |
| при сжатии через 1 сут., МПа | не менее 10 | 18,9 | |
| при сжатии через 28 сут., МПа | не менее 40 | 39,5 | |
| при изгибе через 28 сут МПа | не менее 7 | 8.1 | |

Таблица 2. Требования ТУ и основные свойства разработанного вяжущего

Выводы

- 1. Показано, что для снижения температуры получения магнезиального вяжущего из серпентинизированных бруситовых пород целесообразно использовать добавки-интенсификаторы, способные к образованию расплава в температурном интервале разложения минералов бруситовой породы или способные к дестабилизации кристаллической решетки этих минералов.
- 2. Выявлено, что наиболее эффективными являются добавки, дестабилизирующие кристаллическую решетку минералов обжигаемой породы и одновременно образующие расплав в период их дегидратации, т.е. добавки-интенсификаторы третьего вида.

Заключение

Некондиционное бруситовое сырье можно использовать для получения качественного магнезиального вяжущего при пониженных на 100–300°С температурах обжига при введении в шихту добавок-интенсификаторов. Это позволяет уменьшить расход теплоносителя, использовать более дешевую футеровку тепловых агрегатов и снизить эмиссию углекислого газа в атмосферу.

Литература

- 1. Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. Best Available Techniques (BAT). Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. [Электронный ресурс]. URL: http://eippcb.jrc.es/reference/cl.html (Дата обращения: 20.02.2013).
- 2. Li G., Yu Y., Li J., Wang Y., Liu H. Experimental study on urban refuse/magnesium oxychloride cement compound floor tile // Cement and Concrete Research. 2003. No.33. Pp. 1663–1668.
- 3. De Silva P., Bucea L., Sirivivatnanon V. Chemical, microstructural and strength development of calcium and magnesium carbonate binders // Cement and Concrete Research. 2009. No.39. Pp. 460–466.

- 4. Bearat H., McKelvy M.J., Chizmeshya A.V.G., Sharma R., Carpenter R.W. Magnesium hydroxide dehydroxylation/carbonation reaction process: implications for carbon dioxide mineral sequestration // Journal of the American Ceramic Society. 2002. No.85(4). Pp. 742–748.
- 5. Nahdi K., Rouquerol F., Ayadi M.T. Mg(OH)2 dehydroxylation: A kinetic study by controlled rate thermal analysis (CRTA) // Solid State Sciences. 2009. No.11. Pp. 1028–1034.
- 6. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.
- 7. Крамар Л.Я., Черных Т.Н. Обжиг бруситовой породы для получения магнезиального вяжущего строительного назначения // Популярное бетоноведение. 2009. №5. С. 47–53.
- 8. Harper F.C. Effect of calcinations temperature on the properties of magnesium oxide for use in magnesium oxychloride cements Journal of Applied Chemistry. 1967. Vol. 17. Issue 1. Pp. 5–10.
- 9. Черных Т.Н., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я. Свойства магнезиального вяжущего из бруситовой породы и их взаимосвязь с размерами кристаллов периклаза // Строительные материалы. 2006. №1. С. 52–53.
- 10. Черных Т.Н. Магнезиальные вяжущие из бруситовой породы Кульдурского месторождения: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. 24 с.
- 11. Орлов А.А., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я. Энергосбережение при получении магнезиального вяжущего строительного назначения // Строительные материалы. 2011. №8(680). С. 58–61.
- 12. Орлов А.А. Магнезиальное вяжущее низкотемпературного обжига из бруситовых пород и материалы на его основе: Автореф. дисс. канд. технических наук. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2012. 23 с.
- 13. Пат. 2380334 МПК С 04 В 2/10. Способ получения извести / Якутский научно-исследовательский и проектный институт алмазодобывающей промышленности Акционерной компании «Алмазы России Саха».
- Paulik J., Paulik F., Wieczorek-Ciurowa K. Influence of foreign materials upon the thermal decomposition of dolomite, calcite and magnesite part II. Influence of the presence of water // Thermochimica Acta. 1980. No.38/2. Pp. 165–172.
- 15. Wieczorek-Ciurowa K., Paulik J., Paulik F. Influence of foreign materials upon the thermal decomposition of dolomite, calcite and magnesite part I. Influence of sodium chloride // Thermochimica Acta. 1980. No.38/2. Pp. 157–164.
- 16. Wieczorek-Ciurowa K., Paulik J., Paulik F. Influence of foreign materials upon the thermal decomposition of dolomite, calcite and magnesite. Part III. The effect of the thermal dissociation and sulphation conditions on the capture of sulphur dioxide // Thermochimica Acta. 1981. No.46/1. Pp. 1–8.
- 17. Hrabě Z., Svetík Š. The influence of water vapour on decomposition of magnesite and brucite // Thermochimica Acta. 1985. No.92. Pp. 653–656.
- 18. Волконский Б.В., Коновалов П.Ф., Макашев С.Д. Минерализаторы в цементной промышленности. М.: Стройиздат, 1963. 192 с.
- 19. Пономарев И.Ф., Грачьян А.Н., Зубехин А.П. Влияние минерализаторов на процесс клинкерообразования // Цемент. 1964. №4. С. 3–5.
- 20. Розов М.Н., Нудельман Б.И., Уварова И.Т. Интенсификация производства клинкера во вращающихся печах // Цемент. 1961. №5. С. 14–15.

*Тамара Николаевна Черных, г. Челябинск, Россия Тел. раб.: +7(351)267-94-72; эл. почта: chernyhtn@gmail.com

© Черных Т.Н., Орлов А.А., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Перминов А.В., 2013

Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения

М.н.с. А.О. Адамцевич*; к.т.н., заведующий НИИЛ Климатических испытаний С.А. Пашкевич; к.т.н., доцент, директор НИИ СМиТ А.П. Пустовгар, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»

Ключевые слова: калориметрия; гидратация; цемент; ускоряющая добавка; бетон; прочность; кинетика твердения

Для приготовления современных строительных смесей широко используются неорганические вяжущие вещества, которые при смешивании с водой способны твердеть, переходя из тестообразного или жидкого состояния в камневидное. Наиболее широкое применение при производстве как бетонов, так и других смесей различного назначения получил портландцемент – гидравлическое вяжущее вещество, твердеющее в воде или на воздухе.

Ключевой характеристикой строительных материалов и изделий на основе цемента является проектная прочность в возрасте 28 суток твердения при нормальных условиях. Однако в настоящее время все больше внимания уделяется разработке составов ускоренного твердения, которые в течение первых трех суток набирают 70% и более от проектной прочности, что позволяет обеспечить интенсификацию работ в монолитном строительстве, ускорить оборачиваемость опалубочных форм при производстве сборного железобетона, а также исключить необходимость тепловой обработки строительных изделий. Это привело к тому, что сегодня необходимо не только знать прочность в проектном возрасте для проектируемого состава, но и иметь возможность анализа кинетики его твердения на ранних сроках [1–5].

Постановка задачи и актуальность исследования

Одним из способов разработки составов ускоренного твердения является введение в их структуру модифицирующих химических добавок, которые интенсифицируют гидратацию клинкерных минералов и ускоряют кристаллизацию новообразований [1–4]. Важным параметром при использовании таких добавок является эффективность их воздействия на цемент или смесь в целом, которая оценивается по величине максимального технического эффекта, достигаемого при введении добавки. Согласно ГОСТ 30459-2008 эффективность действия добавок, регулирующих кинетику твердения бетонов и растворов, оценивают по изменению прочности Δ Rt модифицированных составов по сравнению с контрольным составом в различные моменты времени. Однако расчет эффективности добавки и ее оптимальной дозировки при проектировании состава смеси путем определения прочностных характеристик каждой рецептуры на разных сроках твердения является весьма трудоемкой задачей. В связи с этим актуальными научнопрактическими задачами являются разработка и внедрение новых способов оперативного прогнозирования роста прочности цементных систем, а также обоснование новых методов определения эффективности добавок, изменяющих кинетику твердения материалов на основе цементных вяжущих без использования стандартных способов контроля прочности.

Известно, что процесс развития физических свойств цементной системы, включая прочностные характеристики, определяется кинетикой гидратации цемента, которая устанавливает связь между степенью гидратации α и возрастом t [1]. Так как цемент является смесью клинкерных фаз, реагирующих с различными скоростями, существует определенная сложность точного определения значения α. Обычно под этим параметром подразумевают массовую долю прореагировавшего цемента без учета отдельных фаз. В настоящее время предложены разные способы определения данного параметра, например, суммированием количества отдельных прореагировавших фаз с использованием рентгено-фазового анализа [1]; определением химической усадки [6]; определением количества неиспаряемой влаги [2] и т.д. Отдельно в данном перечне можно выделить способ определения степени гидратации портландцемента с использованием метода калориметрии [7–12], основанного на учете и анализе количества тепла, выделяющегося в процессе экзотермической реакции гидратации цемента.

Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения

В связи с тем, что тепловыделение при гидратации цемента дает общую информацию о степени завершенности процесса твердения [13–16], логично предположить, что этот параметр можно использовать для косвенного сравнения прочностных характеристик цементных систем при условии, что их минералогический состав и В/Ц будут идентичными. В экспериментальной части текущей работы была поставлена задача обоснования взаимосвязи тепловыделения при гидратации цемента и прочности материала на его основе путем сопоставления характеристик, полученных для контрольного состава и состава, модифицированного ускоряющей добавкой.

Экспериментальная часть

Экспериментальное исследование основано на полученных ранее данных о пропорциональности графика суммарного тепловыделения цемента и графика роста прочности на сжатие системы, в которой данный цемент используется в качестве вяжущего [1, 2, 7]. В настоящей работе анализируется возможность использования полученных зависимостей для прогнозирования роста прочности цементно-песчаной смеси при введении в ее состав ускоряющей добавки.

В качестве исследуемого цемента был взят портландцемент ПЦ 500 Д0 (ОАО «Вольскцемент»). В качестве ускорителя твердения использовалась добавка «Релаксол» на основе тиосульфата и роданида натрия (Na2S203 и NaSCH). Данная система ускорителей широко применяется при производстве железобетона в связи с тем, что роданиды и тиосульфаты не вызывают коррозии арматуры и по своему воздействию часто превосходят сульфаты и нитраты, также применяемые в технологии бетона [17–18]. В данном исследовании добавка применялась в дозировке 1% сухого вещества по массе от цемента.

В первой части работы определялась разница между тепловыделением контрольного состава (чистый цемент) и состава, модифицированного ускоряющей добавкой. Тепловыделение образцов определялось по ГОСТ 310.5-88 с использованием 8-канального изотермического калориметра ТАМ AIR при В/Ц 0,5 и постоянной температуре внутри измерительного канала, равной 20°С. Графики изменения теплового потока для исследуемых образцов представлены на рисунке 1. Показатели текущей мощности теплового потока в ходе измерения фиксировались каждые 30 секунд.

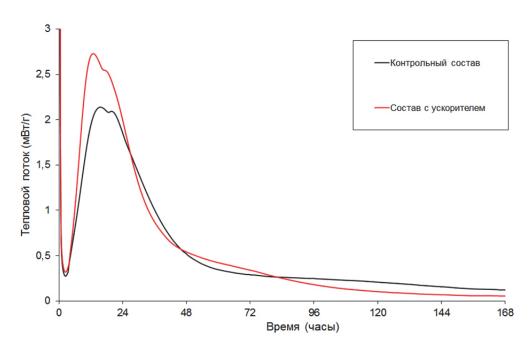


Рисунок 1. Графики теплового потока при гидратации исследуемых образцов

Анализ графиков теплового потока показывает повышенную интенсивность тепловыделения на ранней стадии гидратации состава с ускорителем по отношению к контрольному составу, что свидетельствует о реальном ускорении процесса гидратации цемента при введении модифицирующей добавки. На рисунке 2 представлены графики зависимости суммарной тепловой энергии от времени для обоих образцов, полученные интегрированием графиков теплового потока (рисунок 1).

Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения

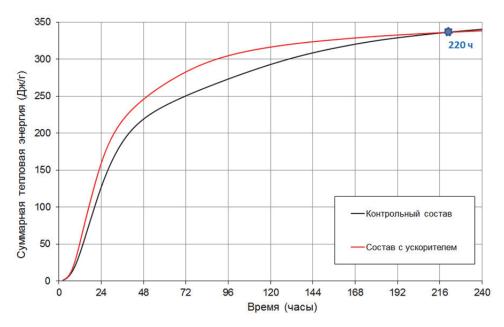


Рисунок 2. Интегральные графики тепловыделения при гидратации исследуемых образцов

Установлено, что в любой момент времени в интервале 0–220 часов суммарное тепловыделение при гидратации состава с ускорителем превышает аналогичный параметр для контрольного образца. К моменту времени 220 часов от начала замешивания графики суммарной тепловой энергии обоих образцов пересекаются. Из полученных ранее данных о пропорциональности суммарного тепловыделения набранной прочности [7] можно сделать вывод, что прочность на сжатие образца, модифицированного ускорителем, должна превышать аналогичный показатель для контрольного образца, а к моменту времени 220 часов прочность обоих составов должна быть примерно равной. Для проверки данного утверждения во второй части исследования была проведена серия испытаний на прочность образцов, изготовленных из цементно-песчаной смеси разрушающим методом по ГОСТ 30744-2001.

Твердение образцов происходило в климатической камере WEIS S WT3-180/70, поддерживающей постоянный тепловлажностный режим, аналогичный режиму, созданному в измерительных каналах калориметра. Испытания прочности образцов производились в прессе многофункциональной сервогидравлической системы Advantest 9 через 12, 18, 24, 48, 72, 168 и 220 часов твердения. Полученные графики, представленные на рисунке 3, показывают динамику набора прочности на сжатие исследуемых образцов.

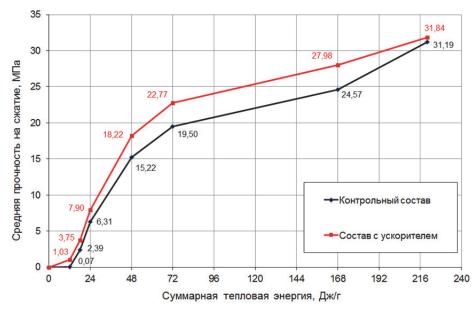


Рисунок 3. Графики роста прочности на сжатие исследуемых образцов

Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения

Установлено, что полученные в ходе испытаний результаты соответствуют ожидаемым. В таблице 1 приведены сводные результаты определения суммарной тепловой энергии и прочности на сжатие обоих составов в ключевые моменты времени.

| | Средняя прочнос | ть на сжатие, МПа | Суммарное тепловыделение, Дж/г | | |
|----------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|--|
| Время, ч | Контрольный состав | Состав с ускорителем | Контрольный состав | Состав с ускорителем | |
| 12 | 0,07 | 1,03 | 38,12 | 52,64 | |
| 18 | 2,39 | 3,75 | 83,37 | 109,55 | |
| 24 | 6,31 | 7,90 | 127,10 | 159,25 | |
| 48 | 15,22 | 18,22 | 219,06 | 245,86 | |
| 72 | 19,50 | 22,77 | 250,45 | 282,84 | |
| 168 | 24,57 | 27,98 | 320,35 | 328,81 | |
| 220 | 31,19 | 31,84 | 336,36 | 336,35 | |

Таблица 1. Сводные результаты экспериментальных исследований

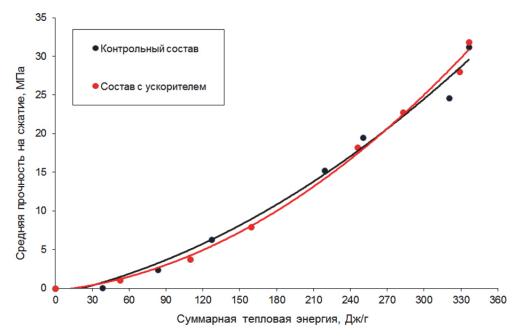


Рисунок 4. Усредненные графики зависимости средней прочности на сжатие от суммарной тепловой энергии

Путем сопоставления значений прочности на сжатие с показателями суммарной тепловой энергии исследуемых образцов были построены графики зависимости этих параметров друг от друга (рисунок 4). Данные графики построены по точкам из таблицы 1 с использованием полиномиальных линий тренда второй степени для сглаживания полученных кривых — это связано с тем, что испытания разрушающим методом сопровождаются ощутимым разбросом значений разрушающих нагрузок. При этом стоит отметить, что воспроизводимость измерений тепловыделения при использовании метода изотермической калориметрии значительно выше (рисунок 5).

Полученные графики зависимости средней прочности на сжатие от суммарной тепловой энергии подтверждают, что рост прочности рассматриваемой системы прямо пропорционален увеличению общего тепловыделения при гидратации цемента вне зависимости от наличия в составе ускоряющей добавки. Полученные кривые практически совпадают, что свидетельствует о возможности сравнительного определения эффективности введения ускоряющих добавок подобного типа в рассматриваемом интервале твердения без необходимости проведения испытаний на прочность разрушающими методами.

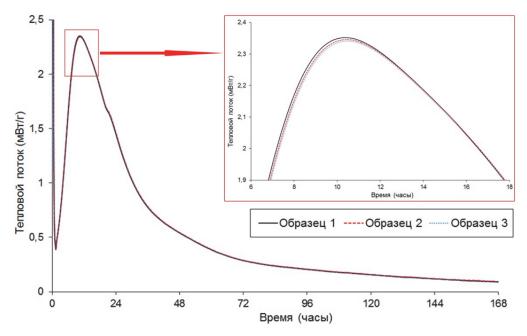


Рисунок 5. Воспроизводимость измерений при использовании метода изотермической калориметрии (3 разных замеса)

Согласно графикам суммарной тепловой энергии на рисунке 1, наибольшая эффективность ускорения от введения рассматриваемой добавки достигается в промежутке времени 48–168 часов, что соответствует данным, полученным в результате физико-механических испытаний образцов (рисунок 3). Возможная форма графического определения эффективности используемой добавки по кривым суммарной тепловой энергии к различным моментам времени представлена на рисунке 6.

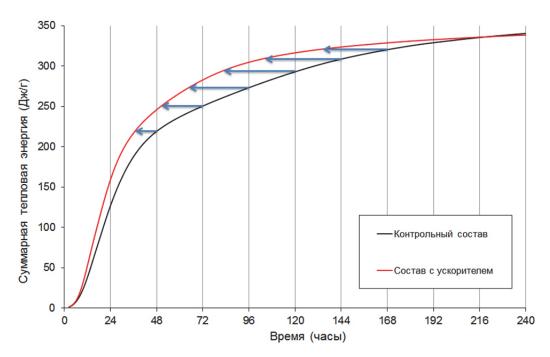


Рисунок 6. Графическая форма определения эффективности ускоряющей добавки к различным моментам времени

Ускоряющий эффект действия добавки может быть рассчитан путем определения экономии времени, требуемого на выделение определенного количества тепловой энергии Q при гидратации, по следующей формуле:

$$E(Q) = \frac{T_k(Q) - T_y(Q)}{T_k(Q)} \times 100\%$$
,

где E(Q) — ускоряющий эффект, $T_k(Q)$ — момент времени, когда достигается заданное тепловыделение Q для контрольного образца, $T_y(Q)$ — момент времени, когда достигается заданное тепловыделение Q для образца, модифицированного ускоряющей добавкой. Количественный ускоряющий эффект для точек, выбранных графически на рисунке 6, рассчитан в таблице 2.

Таблица 2. Результаты количественного определения ускоряющего эффекта от введения добавки

| Суммарная тепловая | Вре | мя, ч | V |
|--------------------|--------------------|----------------------|--------------|
| энергия, Дж/г | Контрольный состав | Состав с ускорителем | Ускорение, % |
| 219,0 | 48,0 | 36,7 | 23,5 |
| 250,4 | 72,0 | 50,4 | 30,0 |
| 273,2 | 96,0 | 64,6 | 32,7 |
| 292,9 | 120,0 | 81,2 | 32,3 |
| 308,6 | 144,0 | 102,5 | 28,8 |
| 320,4 | 168,0 | 131,9 | 21,5 |

Выводы и заключение

В ходе проведенной работы эмпирически доказано, что для двух составов, отличающихся лишь наличием монофункционального ускорителя, сравнение динамики роста прочности может быть осуществлено косвенно через интегральную кривую тепловыделения при гидратации вяжущего с использованием метода изотермической калориметрии. Данный метод обладает рядом преимуществ перед стандартными способами определения эффективности ускоряющих добавок путем определения прочности, таких как:

- снижение трудозатрат на подготовку образцов;
- лучшая повторяемость и воспроизводимость измерений по сравнению с разрушающими методами контроля (рисунок 5);
- возможность определения кинетики твердения в любой момент времени с использованием одного образца.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности значительного сокращения времени, затрачиваемого на выбор оптимальной ускоряющей добавки при разработке состава бетона или другой смеси на основе цементного вяжущего, а также в возможности снижения себестоимости конечной рецептуры путем оптимизации дозировок ускоряющих добавок. Актуальность данного вывода подтверждается тем, что добавки одного класса могут заметно различаться по эффективности [1], а также тем, что при использовании с различными цементами одних и тех же добавок эффективность их использования в некоторых случаях может сильно отличаться [1, 3].

Работа выполнена в соответствии с Государственным контрактом № 16.552.11.7064 от 13.07.2012 г.

Литература

- 1. Тейлор Х. Химия цемента. Пер. с англ. М.: Мир, 1996, 560 с.
- 2. Баженов Ю.М. Технология бетона. 4-е издание. М.: Изд-во АСВ, 2007. 528 с.
- 3. Черкасов Г.И. Введение в технологию бетона. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное издательство, 1974. 311 с.
- 4. Адамцевич А.О., Пустовгар А.П. Применение методов калориметрии для производства полифункциональных модифицирующих добавок повышенной эффективности // Устойчивость, безопасность и энергоресурсосбережение: Сборник тезисов. М.: МГСУ, 2012. С. 9–13.
- 5. Shtakelberg D.I. Prediction of cement and concrete strength // Бетон и железобетон пути развития: сб. науч. тр. II-ой Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону. НИИЖБ. М.: Дипак, 2005. Том 3. С. 215–220.
- 6. Knudsen T., Geiker M. Cement Research progress. USA, 1984. 213 p.
- 7. Адамцевич А.О. [и др.] Актуальные аспекты практического применения методов калориметрии при изучении кинетики гидратации вяжущих в строительном материаловедении // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. М.: МГСУ, 2012. С. 354–360.
- 8. Мчедлов-Петросян О.П. [и др.] Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов. М.: Стройиздат, 1984. 224 с.
- Young J.K. Hydration of Portland cement // Instructional modulus in cement science. ed. D.M. Roy, Materials education Council. Material Research Laboratory, University Park, PA. USA, 1985. Pp. 1087–1088.
- 10. Wadso L. The Study of Cement Hydration by Isothermal Calorimetry [Электронный ресурс] // Building Materials, Lund University, Sweden, 1995. URL: www.tainstruments.com/pdf/literature/M100.pdf.
- 11. Bensed J. Some applications of conduction calorimetry 10 cement hydration // Advances in Cement Research. 1987. Vol. I. Pp. 35–44.
- Copeland L.E., Kantro D.L., Verbeck G. Chemistry of hydration of Portland cement // Bull. 153, Res. Lab. of Portland Cement Association, Skokie, IL, U.S., reprinted from Proc. 4th ISCC. 1960. Vol. 1. Pp. 429–465.
- 13. Руководство по зимнему бетонированию с применением метода термоса / НИИЖБ Госстроя СССР. М., 1975. 192 с.
- 14. Крылов Б.А., Амбарцумян С.А., Звездов А.И. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях. М.: РААСН, НИИЖБ, 2005. 275 с.
- 15. Миронов С.А. Температурный фактор в твердении бетона. М.: Стройиздат, 1948. 46 с.
- 16. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. Изд. 3-е. М.: Стройиздат, 1975. 700 с.
- 17. Nmai C.K. Cold Weather ConcretingAdmixtures // Cement and Concrete Composites. 1998. Vol. 20. No.2-3. Pp. 121–128.
- 18. Башлыков Н. Ф., Вайнер А. Я., Серых Р. Л., Фаликман В. Р. Комплексные пластифицирующие ускоряющие добавки на основе суперпластификатора С-3 и промышленных смесей тиосульфата и роданида натрия // Бетон и железобетон. 2004. №6. С. 13–16.
- 19. Зиневич Л.В. Некоторые организационно-технологические вопросы выдерживания монолитных конструкций различной массивности с применением ранней распалубки // Технологии бетонов. 2009. №3. С. 67–68.
- 20. ГОСТ 310.5-88 «Цементы. Метод определения тепловыделения».
- 21. ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка».

* Алексей Олегович Адамцевич, Москва, Россия Тел. моб.: +7(926)463-72-55; эл. почта: MnSpecter@gmail.com

© Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П., 2013

Повышение организационно-технологической надежности строительства линейно-протяженных сооружений методом прогнозирования отказов

К.т.н., докторант Г.И. Абдуллаев; д.т.н., профессор В.З. Величкин*; старший преподаватель Т.Н. Солдатенко, ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: календарный план; резервы ресурсов; уровень надежности; организационно-технологическая надежность; показатель вероятности; сбои и отклонения; отказы.

Статья посвящена одному из важнейших вопросов проектирования и строительства сложных и трудоемких сооружений, в частности, тоннелей метрополитена, — надежности конструкций в процессе строительства и эксплуатации [1, 2]. Теоретической и методологической основой при решении этих вопросов выступает общая теория надежности, которая детализируется в плоскости организации и технологии строительства и в плоскости функционирования ведущих строительных конструкций тоннелей и станций метро. Основой надежного функционирования строительных конструкций является высокий уровень организации и технологии выполнения работ, сохраняемый в течение всего срока строительства.

В последние годы проведено достаточно много исследований на эту тему: разработана необходимая теоретическая база надежности в области строительства, а также проанализировано влияние качества выполняемых работ и конструкций на надежность [2–6 и др.]. Рассматриваются вопросы влияния управляющих воздействий [2, 7–9], а также эффективности работы техники и эффективности инвестирования на надежность [1, 10–14]. Параллельно с вопросами надежности в строительстве прорабатываются оценка рисков, вероятности возникновения отказов и их корреляция с уровнем надежности [15–18]. Исследуются и методы прогнозирования рисков, отказов и уровня надежности [19, 20]. В совокупности все перечисленные исследования и разработки относятся к теории организационно-технологической надежности, сформулированной д.т.н., проф. А.А. Гусаковым [21].

В подавляющем большинстве работ по организационно-технологической надежности календарных планов теоретической основой оценки является теория вероятности в приложении к сетевым методам планирования и управления [22–25]. Однако поточная организация работ, по структуре приближающаяся к конвейерному производству, имеет свои особенности, которые нужно учитывать при оценке уровня надежности разработанного календарного плана. Здесь необходимо обратить внимание на прогноз возможности возникновения отказов в потоке и расширенную возможность компенсировать задержки из-за возникших отказов в течение выполнения других работ потока (как при конвейерном производстве). В связи с этим ниже предлагается возможный подход для оценки уровня надежности строительных потоков.

В соответствии с государственным стандартом [26] надежность включает в себя безотказность, ремонтопригодность, долговечность и сохраняемость. Применительно к строительству безотказность можно понимать как время реализации плана без сбоев и отклонений. Ремонтопригодность можно оценивать временем, необходимым для сбора информации, ее обработки, выработки решения по корректировке плана при допустимом уменьшении показателя эффективности и доведения решения до исполнения. Долговечность применительно к организационно-технологической надежности календарного плана можно рассматривать как время функционирования плана до полной перестройки или до полной замены на вновь разработанный план. Сохраняемость можно понимать как время, в течение которого разработанный план сохраняет свою актуальность и эффективность, а при его корректировке не требуется привлечение дополнительных ресурсов, изменения очередности и последовательности возведения сооружений и выполнения этапов работ.

Весь процесс строительства линейно-протяженных сооружений и реализации плановых решений можно рассматривать как состоящий из ряда этапов:

- этапы безотказной работы без сбоев и отклонений;
- этапы корректировки интенсивности, последовательности и очередности строительства сооружений;
- этапы полного перестроения планов по срокам и очередности строительства сооружений с привлечением дополнительных ресурсов в различные периоды производственного процесса. При этом по ходу строительства в большинстве случаев происходит снижение уровня эффективности строительного производства, запланированного на начальном этапе разработки проекта возведения сооружений.

Все эти составляющие надежности, имеющие размерность времени, являются случайными величинами. Данные случайные величины задаются распределением вероятностей и являются достаточными характеристиками составляющих надежности. Вместе с тем многие исследователи [8, 14, 22, 27, 28] полагают, что для строительства целесообразно рассматривать надежность с позиций завершения строительства в установленные сроки. При этом надежность понимается как вероятность достижения необходимых результатов за требуемое время. Если строительство завершается в утвержденные сроки без сбоев и нарушений, то достигается ранее рассчитанное значение эффективности. Если происходит срыв установленных сроков строительства на значимых этапах или при завершении, то значение планируемого показателя эффективности снижается. В связи с этим возникает проблема сочетания надежности реализации планов и эффективности управления [7, 8, 11, 22, 28].

Сбои и нарушения запланированного хода строительства могут рассматриваться как отказы. Отказ является одним из важнейших понятий в теории надежности. В соответствии с ГОСТ 27.004-85 отказ представляет собой событие, отмечающее нарушение исправного состояния плана или графика, ставшего с этого момента неработоспособным, т.е. невозможным к дальнейшему исполнению.

Отказы при реализации календарных планов строительства линейно-протяженных сооружений могут происходить в следующих случаях:

- неточность исходных данных при расчете производительности строительных машин и выработки на единицу трудовых ресурсов;
- сбои по объемам и срокам поставки на объект трудовых и технических ресурсов;
- сбои по объемам и срокам поставок строительных материалов и конструкций на объект;
- сбои в работе строительных машин и механизмов;
- возникновение аварийных ситуаций при возведении строительных конструкций;
- срыв в сроках и объемах инвестирования объекта.

Повышение надежности планов способствует повышению эффективности процессов строительства. В общем виде можно выделить следующие методы повышения надежности:

- построение планов строительства объектов с максимально возможным уровнем надежности за счет применения наработанных технологических процессов, имеющихся исправных машин и технических устройств, гарантированно поступающих на строительную площадку, подбора обученных и технически грамотных работников;
- введение в планы структурной и временной избыточности за счет предусмотренных альтернативных и равнозначных технологий, альтернативной последовательности и очередности цепей работ, за счет назначения наиболее вероятной продолжительности работ с запасом времени на их выполнение;
- организация достаточно интенсивных циклов контроля над ходом строительства и соответствием его параметров параметрам принятого плана. При опасных отклонениях от плановых показателей цикл контроля переходит в цикл управления;
- улучшение внешних условий для качественного выполнения принятого плана (эффективная организация строительной площадки, улучшение условий выполнения работ в шахтах и тоннелях, своевременная поставка материалов и конструкций и др.).

При оценке надежности разработанных календарных планов и графиков необходимо учитывать, прежде всего, вероятность срыва сроков выполнения критических работ или работ, определяющих общий срок завершения строительства. Для сетевых моделей срыв срока выполнения работы, принадлежащей критическому пути, приводит к срыву срока выполнения всего комплекса работ и в ряде случаев к образованию нового, более длинного критического пути. Резервы времени у некритических работ, связанных с критическими работами только топологией сети, не способствуют повышению организационно-технологической надежности графика.

Рассмотрение структуры графика поточной организации работ показывает, что критический путь проходит по работам частных потоков [22, 27]. Ряду частных потоков могут принадлежать две и более критические работы. Для потока, описанного простой матрицей NxM, число частных потоков равно M, а минимальное число критических работ (N + M - 1). Тогда частные потоки, содержащие две и более критических работы, находятся в более напряженном состоянии при выполнении работ, чем частные потоки с одной критической работой. При этом компенсировать напряжение или отставание за счет резервов некритических работ этого частного потока значительно сложнее, чем потока с одной критической работой. Здесь следует учитывать, что все работы одного частного потока выполняются одним и тем же составом бригады и комплектом машин.

Наиболее распространенный вероятностный подход при расчете сроков выполнения комплексов работ предполагает применение бета-распределения для назначения продолжительности выполнения работ [8]. Соответственно, вероятность окончания работ в рассчитанный срок устанавливается на основе этого распределения. Например, достаточно часто применяется следующая разновидность бета-распределения, вполне корректно описывающая вероятность выполнения строительно-монтажных работ:

$$\varphi(\chi) = \frac{12(\chi - \alpha)(\beta - \chi)^2}{(\beta - \alpha)^4} \,. \tag{1}$$

Для данной функции (1) математическое ожидание вычисляется по следующей формуле

$$T_{\rm M} = \frac{\left(2\beta + 3\alpha\right)}{5},\tag{2}$$

где α и β – минимально и максимально возможная продолжительность выполнения работы (комплекса работ) соответственно.

Принимая продолжительность работ потока как математическое ожидание, рассчитываем ранние и поздние сроки выполнения работ и устанавливаем работы критического пути. Устанавливая значения α и β , определяем вероятность выполнения комплекса работ по выражению

$$P_{K,\Pi} = \sigma^2 (3\sigma^2 - 8\sigma + 6), \tag{3}$$

где

$$\sigma = \frac{\left(T_{K,\Pi_{-}} - \alpha\right)}{\left(\beta - \alpha\right)}.$$
 (4)

Для сетевых графиков строительства сооружений полученное по выражению (3) значение может приниматься как значение показателя организационно-технологической надежности завершения работ в расчетные сроки. Для потока значение вероятности, полученное по выражению (3), не полностью отражает уровень организационно-технологической надежности. Так как напряженное состояние по соблюдению срока окончания критической работы, принадлежащей конкретному частному потоку, можно ослабить или компенсировать за счет резервов по другим работам данного частного потока или ближайшего частного потока, то уровень надежности должен быть несколько выше значения вероятности.

Проведенные исследования показали, что для конкретного потока можно оценить надежность с учетом возможного использования резервов времени на основе следующего полученного эмпирического выражения:

$$H_{\Pi} = \frac{(\zeta + P_{K,\Pi})}{[2 - P_{K,\Pi}(1 - \zeta)]},$$
(5)

где ζ – характеристика уровня критичности работ всего потока, $\zeta = \frac{PP}{N \times M}$; PP – количество некритических работ, имеющих резервы времени; N×M – общее количество работ потока.

Из выражения (5) видно, что показатель организационно-технологической надежности несколько выше, чем значение вероятности Рк.п.

Эти исследования на основе статистического моделирования показывают возрастание вероятности отказов по частным потокам с концентрацией критических работ или по частным потокам, определяющим продолжительность строительства при непрерывном использовании трудовых и технических ресурсов. Так, при появлении отказов с частотой по распределению Пуассона вероятность безотказной работы с 0.368 для частного потока с одной критической работой уменьшается до 0,073 при включении четырех работ в состав критического пути (например, шестой поток в таблице 1).

Вычисление коэффициента надежности потока можно производить по формуле:

$$H_{\Pi} = 1 - \min P_{i} \left\langle \frac{m}{i = 1} \right\rangle$$
 или $H_{\Pi} = 1 - P_{OT}$, (6)

где Hп – надежность реализации графика потока; Pi – показатель вероятности возникновения сбоя (отказа) по i-му частного потока; Poт – вероятность отказа календарного графика всего потока; m – количество частных потоков технических и трудовых ресурсов.

По условиям устойчивости календарных графиков его надежность должна превышать установленный норматив (0,9):

$$H_{\Pi} \ge H_{HOPM}$$
 (7)

Расчет вероятности и надежности реализации разработанного графика поточной организации работ и его оптимизация по рассматриваемой методике проиллюстрированы следующим примером.

Таблица 1. Расчет сроков выполнения работ при непрерывном использовании ресурсов

| Захватки (участки) | Укладка бетона в стыки | Затирка поверх- ности | Гидро- изоляционные работы | Устройство защитного слоя М-100 | Изоляция стен | Облицо- вочные работы | Малярные работы |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|
| Nº1 | 0 - 7 | 10 - 14 | 16 - 20* | 20 - 27 | 28 - 34 * | 34 - 43 | 50 - 55 |
| Nº2 | 7 - 12 | 14 - 20* | 20 - 26 | 27 - 34* | 34 - 41 | 43 - 49 | 55 - 64 |
| Nº3 | 12 - 15 | 20 - 25 | 26 - 29 | 34 - 37 | 41 - 42 | 49 - 60 | 64 - 69 |
| Nº4 | 15 - 20 | 25 - 27 | 29 - 31 | 37 - 39 | 42 - 46 | 60 - 64 | 69 - 71 |
| Nº5 | 20 - 26 | 27 - 30 | 31 - 35 | 39 - 43 | 46 - 49 | 64 - 70 | 71 - 74 |
| Nº6 | 26 - 30* | 30 - 35 | 35 - 39 | 43 - 45 | 49 - 55 | 70 - 74* | 74 - 75 |

В таблице 1 выделены работы, определяющие общий срок завершения всех работ. Оценка показателя вероятности выполнения данного графика с окончанием работ в 75 дней по выражениям (3) и (4) показывает невыполнение условий (7).

$$P_{K\Pi} = \sigma^2 (3\sigma^2 - 8\sigma + 6) = 0.548$$

$$\sigma = \frac{(T_{K.\Pi.} - \alpha)}{(\beta - \alpha)} = \frac{(75 - 56)}{(102 - 56)} = 0,413$$

Оценку вероятности завершения всех работ потока в расчетные сроки производим с учетом принятого бета-распределения вероятности для графиков выполнения строительных работ. Принимаем « α » применительно к возможной организации ритмичного потока (α = 56), а β применительно к двойному увеличению 25% наиболее продолжительных работ, определяющих общий срок выполнения всех работ (β =75+11+9+7=.102).

Для приведенного примера по выражению (5) оцениваем надежность всего потока с учетом общего числа работ, имеющих резервы времени и не определяющих значение конечного срока:

$$H_{\Pi} = \frac{\left(\frac{18}{42} + 0.548\right)}{2 - 0.548\left(1 - \frac{18}{42}\right)} = 0.579 .$$

Так как 0,579 << 0,9, то, не перестраивая потоки, не меняя принятое количество исполнителей и техники, рассчитываем сроки выполнения работ того же потока для ускорения строительства методом формирования критического пути (таблица 2).

| | - | - | • | | • • | - | |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|
| Захватки (участки) | Укладка бетона в стыки | Затирка поверх- ности | Гидро- изоляционные работы | Устройство защитного слоя М-100 | Изоляция стен | Облицо- вочные работы | Малярные работы |
| Nº1 | 0 - 7 | 7 - 11 | 11 - 15 | 15 - 22 | 22 - 28 | 28 - 37 | 37 - 42 |
| Nº2 | 7 - 12 | 12 - 18 | 18 - 24 | 24 - 31 | 31 - 38 | 38 - 44 | 44 - 53 |
| Nº3 | 12 - 15 | 18 - 23 | 24 - 27 | 31 - 34 | 38 - 39 | 44 - 55 | 55 - 60 |
| Nº4 | 15 - 20 | 23 - 25 | 27 - 29 | 34 - 36 | 39 - 43 | 55 - 59 | 60 - 62 |
| Nº5 | 20 - 26 | 26 - 29 | 29 - 33 | 36 - 40 | 43 - 46 | 59 - 65 | 65 - 68 |
| Nº6 | 26 - 30 | 30 - 35 | 35 - 39 | 40 - 42 | 46 - 52 | 65 - 69 | 69 - 70 |

Таблица 2. Расчет сроков выполнения работ по методу критического пути

Как было показано выше, для поточной организации работ концентрация критических работ на одном частном потоке резко увеличивает вероятность отказа для всего календарного плана. В таблице 2 (обустройство станции) наиболее напряженным является шестой частный поток (чистовая облицовка). Наибольшей вероятностью отказа для данного графика обладает шестой частный поток, так как резерв времени у него минимальный.

Оценку показателя вероятности завершения всех работ потока (в расчетные сроки по таблице 2, принимая в качестве директивного срока 75 дн. по таблице 1) также производим по выражениям (3) и (4). Принимаем α применительно к возможной организации ритмичного потока (α = 56), а β применительно к двойному увеличению 25% наиболее продолжительных работ критического пути (β = 70 + 11 + 7 + 7 = 95). Тогда вероятность выполнения расчетного срока 75 дн. составит величину:

$$P_{K.\Pi.} = \sigma^2 (3\sigma^2 - 8\sigma + 6) = 0,667,$$

$$\sigma = \frac{(T_{K.\Pi.} - \alpha)}{(\beta - \alpha)} = \frac{75 - 56}{95 - 56} = 0,487.$$

Для приведенного примера (таблица 2) по выражению (5) оцениваем надежность всего потока с учетом общего числа некритических работ:

$$H_{\Pi} = \frac{\left[\frac{30}{42} + 0,667\right]}{\left[2 - 0,667\left(1 - \frac{30}{42}\right)\right]} = 0,763.$$

Надежность частных потоков по выражению (5) определяется следующими значениями:

- для первого частного потока Нп1 = 0,750;
- для шестого частного потока Нп6 = 0,577;
- для остальных работ критического пути Нп2-7 = 0,794.

Полученные значения свидетельствуют о большой вероятности возникновения отказов именно на шестом частном потоке, который и снижает общее значение уровня надежности. Рассчитанный уровень надежности рассматриваемого потока не удовлетворяет требованиям установленных нормативов (0,763 < 0,9), и график производства работ должен быть улучшен. Так как вероятность отказа наиболее высока на напряженных частных потоках, лежащих на критическом пути, то необходимо в максимальной степени использовать имеющиеся резервы времени у некритических работ. Для оптимизации рассмотренного плана с целью достижения требуемого уровня надежности (0,9) необходимо проанализировать напряженность каждого частного потока с позиций их трудоемкости. При этом сохранение принятой технологии и ее трудоемкости по каждому частному потоку обеспечивает неснижение общей эффективности построенного плана [11, 26, 28].

В таблице 3, в которой сроки выполнения работ определены по таблице 1 и таблице 2, выделены наиболее трудоемкие частные потоки по виду работ и по фронту работ. Критический путь при любой очередности выполнения работ должен проходить в значительной части по этим частным потокам. В связи с этим для уменьшения вероятности возникновения отказов целесообразно начинать первыми наименьшие по продолжительности работы по первому потоку (см. таблицу 2), а по последнему – ставить в конец плана. Критических работ в частном потоке должно быть как можно меньше. С учетом данных положений определяем рациональную очередность освоения частных фронтов работ (таблица 4).

| | | | | - | | | | |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|-------|
| Захватки (участки) | Укладка бетона в стыки | Затирка поверх- ности | Гидро- изоляционные работы | Устройство защитного слоя М-100 | Изоляция стен | Облицо- вочные работы | Малярные работы | Итого |
| Nº1 | 7 | 4 | 4 | 7 | 6 | 9 | 5 | ∑42 |
| Nº2 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 6 | 9 | ∑46 |
| Nº3 | 3 | 5 | 3 | 3 | 1 | 11 | 5 | ∑31 |
| Nº4 | 5 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 2 | ∑21 |
| Nº5 | 6 | 3 | 4 | 4 | 3 | 6 | 3 | ∑29 |
| Nº6 | 4 | 5 | 4 | 2 | 6 | 4 | 1 | ∑26 |
| Итого | ∑30 | ∑25 | ∑23 | ∑25 | ∑27 | ∑40 | ∑25 | ∑195 |

Таблица 3. Продолжительность выполнения работ по частным потокам

Таблица 4. Расчет сроков выполнения работ при оптимизации очередности освоения фронтов работ

| Захватки (участки) | Укладка бетона в стыки | Затирка поверх- ности | изолиционные | Устройство защитного слоя М-100 | Изоляция стен | Облицо- вочные работы | Малярные работы | Итого | |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|---------------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|-------|--|
| Nº3 | 0 - 3 | 3 - 8 | 8 - 11 | 11 - 14 | 14 - 15 | 15 - 26 | 26 - 31 | ∑31 | |
| Nº1 | 3 - 10 | 10 - 14 | 14 - 18 | 18 - 25 | 25 - 31 | 31 - 40 | 40 - 45 | ∑42 | |
| Nº2 | 10 - 15 | 15 - 21 | 21 - 27 | 27 - 34 | 34 - 41 | 41 - 47 | 47 - 56 | ∑46 | |
| Nº5 | 15 - 21 | 21 - 24 | 27 - 31 | 34 - 38 | 41 - 44 | 47 - 53 | 56 - 59 | ∑29 | |
| Nº4 | 21 - 26 | 26 - 30 | 31 - 33 | 38 - 40 | 44 - 48 | 53 - 57 | 59 - 61 | ∑21 | |
| Nº6 | 26 - 30 | 30 - 35 | 35 - 39 | 40 - 42 | 48 - 54 | 57 - 61 | 61 - 62 | ∑26 | |
| Итого | ∑30 | ∑25 | Σ23 | ∑25 | ∑27 | ∑40 | ∑25 | ∑195 | |

За счет прогнозирования возможных отказов [19] и использования резервов времени у некритических работ удалось на конкретном примере сократить общую продолжительность выполнения комплекса работ по плану таблицы 2 на восемь дней (Тк.п. = 62 вместо Тк.п. = 70). При этом очередность освоения частных фронтов работ несколько изменилась, и общий объем резервов и простой фронтов работ сократился. Для такого плана расчет значения показателя вероятности также производим по выражениям (3) и (4). Принимаем α применительно к

возможной организации ритмичного потока (α = 56), а β применительно к двойному увеличению 25% наиболее продолжительных работ критического пути (β = 62 + 9 + 7 + 7 = 85). Тогда показатель вероятности выполнения расчетного срока 75 дн. составит величину

$$P_{K.\Pi.} = \sigma^2 (3\sigma^2 - 8\sigma + 6) = 0.878$$
,

где

$$\sigma = \frac{(T_{K.\Pi.} - \alpha)}{(\beta - \alpha)} = \frac{75 - 56}{85 - 56} = 0,655.$$

Для полученного плана (таблица 4) по выражению (5) оцениваем надежность всего потока с учетом общего числа некритических работ:

$$H_{\Pi} = \frac{\left[\frac{27}{42} + 0,878\right]}{\left[2 - 0,878\left(1 - \frac{27}{42}\right)\right]} = 0,902.$$

Полученный показатель вероятности завершения работ потока и уровень надежности календарного плана (таблица 4) удовлетворяет требованиям установленных нормативов (0,902 > 0,9), следовательно, план может быть реализован с незначительной вероятностью отказа. Также следует отметить, что в целях достижения требуемого уровня надежности календарного плана строительство осуществлялось за счет создания временной избыточности и использования временных резервов у частных потоков. При этом принятая по технико-экономическим расчетам технология, оснащение трудовыми и техническими ресурсами не изменялись, что позволило не снижать экономическую эффективность выполнения комплекса работ.

В заключении следует отметить целесообразность построения поточной организации работ при строительстве линейно-протяженных сооружений, так как поток, как организационная структура, обладает более высоким уровнем надежности, чем любая другая неструктурированная организация работ [3–6, 15]. На основе проведенных исследований предложена зависимость, позволяющая заблаговременно оценить уровень надежности поточной организации с учетом имеющихся основ теории вероятности и надежности строительных процессов.

Кроме того, поточная организация работ позволяет производить структурные перестроения для достижения более высоких значений эффективности и надежности на базе применения современных высоких технологий. Повышение достоверной надежности строительных потоков обеспечивает более широкое применение поточной организации работ, что имеет большое практическое значение для повышения производительности труда.

Литература

- 1. Clarc-Hugnes J., Mawdesley M.J. Avoiding construction disputes through active Project Management. UK // World congress on Projece Management. Saint-Petersburg, 1995. Pp. 34–62.
- 2. Абсалямов Д.Р. Повышение надежности инженерных систем методом формализации поиска отказов // Инженерно-строительный журнал. 2012. №2. С. 39–47.
- 3. Bayburin A.Kh., Golovnev S.G. Implementation of pile foundation quality and serviceability // Proceedings of the International Geotechnical Symposium "Geotechnical Aspects of Natural and Man-Made Disasters". Astana, Kazakhstan Geotechnical Society, 2005. Pp. 144–147.
- 4. Байбурин, А.Х., Головнев С.Г. Оценка качества строительно-монтажных работ на основе показателей надежности // Известия вузов. Строительство. 1998. №2. С. 67–70.
- 5. Байбурин А.Х., Головнев С.Г. Формирование системы показателей качества в строительстве // Известия вузов. Строительство. 1999. №8. С. 57–60.
- 6. Байбурин А.Х. Надежность как критерий для классификации дефектов в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. №10. 2000. С. 25–26.

- 7. Рогонский В.А., Костриц А.И., Шеряков В.Ф. Эксплуатационная надежность зданий и сооружений. СПб.: Стройиздат, 2004. 272 с.
- Engineering manual of automatic control for commercial buildings. SI Edition / Honeywell Inc. USA, 1997.
 p.
- 9. Томаев Б.М. Надежность строительного потока. М.: Стройиздат, 1983. 129 с.
- 10. Ансофф И.А. Стратегическое управление. М.: Экономика, 1989. 519 с.
- 11. Bayar T. Associate Editor. Better Renewables Risk Management Solutions Emerge // Renewable Energy World. 2012. №3. Pp. 22–24.
- 12. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика. М.: Дело, 2001. 832 с.
- Nazari M., Akbari Foroud A. Optimal strategy planning for a retailer considering medium and short-term decisions // International journal of Electrical power & Energy systems. 2013. Vol. 45. Issue 1. Pp. 107–116.
- 14. Крылов Э.И. Основные принципы оценки эффективности инвестиционного проекта. СПб.: СПбГУАП, 2003. 47 с.
- 15. Крылов Э.И. Технико-экономический анализ влияния интенсивных факторов на повышение эффективности труда. СПб.: СПбГУАП, 2004. 17 с.
- 16. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. М.: Советское радио, 1975. 400 с.
- 17. Averkin A.N., Titova N.V., Agrafonova T.V. Synthesis of distributed fuzzy hierarchical model in decision support systems in fuzzy environment // Proceeding of the 5th EUSFLAT Conference. Ostrava, Czech Republic. 2007. Vol. 1. Pp. 377–379.
- 18. Афанасьев В.А. Поточная организация строительства. Л.: Стройиздат, 1990. 303 с.
- 19. Ocheana L., Popescku D., Florea C. Risk and hazard prevention using remote intervention // Scientific bulletin. 2012. Issue 3. Pp.18–25.
- 20. Абдуллаев Г.И. Основные направления повышения надежности строительных процессов // Инженерно-строительный журнал. 2010. №4(14). С. 59–60.
- 21. Гусаков А.А. Организационно-технологическая надежность строительного производства в условиях автоматизированных систем проектирования. М.: Стройиздат, 1974. 252 с.
- 22. Liu K.F.R. A Possibilistic Petri Net Model for Diagnosing Cracks in RC Structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2003. Vol. 18. Issue 6. Pp. 426–439.
- 23. Абдуллаев Г.И., Величкин В.З. Особенности оценки надежности строительных потоков // Инженерно-строительный журнал. 2009. №4(6). С. 53–54.
- 24. Абдуллаев Г.И. Оценка уровня надежности с учетом организационно-технологических параметров строительства линейно-протяженных сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2009. №8(10). С. 62–64.
- 25. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения. М., 1989.
- 26. Гусева М.Н. Надежность и эффективность систем управления в строительном бизнесе. М.: Государственный университет управления, 2004. 38 с.
- 27. Шульман Г.С., Романов М.В. Надежность инженерных сооружений. СПб.: СПбГТУ, 1997. 48 с.
- 28. Хибухин В.П., Величкин В.З., Втюрин В.И. Математические методы планирования и управления строительством. Л.: Стройиздат, Ленингр. Отделение, 1990. 140 с.

*Виктор Захарович Величкин, Санкт-Петербург, Россия Тел. раб.: +7(812)297-59-49; эл. почта: V.Velichkin2011@yandex.ru

© Абдуллаев Г.И., Величкин В.З., Солдатенко Т.Н., 2013

Оценка усталостной долговечности крестообразных сварных соединений, передающих нагрузку

К.т.н., доцент Т.И. Летова*; д.т.н., профессор С.В. Петинов,

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: сварные соединения с непроваром; усталость сварных соединений; МКЭ моделирование напряженности соединений с трещинами; коэффициенты интенсивности напряжений по траектории трещины; кривые усталости сварных соединений с непроваром

В последние десятилетия оценка ресурса сварных соединений становится важным элементом как проектирования, так и определения состояния металлических сварных конструкций в условиях эксплуатации в разных отраслях техники [1–10].

Одни из самых распространенных в сварных конструкциях типов соединений – тавровые и крестообразные соединения, в которых «поток» усилий передается наплавленным металлом. Особое место в этой группе занимают соединения с неполным проплавлением, которые широко применяются по экономическим и технологическим соображениям. Вместе с тем, такие соединения оказываются и наименее надежными в конструкциях, подвергающихся интенсивному переменному нагружению [11–16].

Эти противоречивые обстоятельства на протяжении многих десятилетий, начиная с 1960-х годов, побуждают проводить комплексные исследования сопротивления усталости соединений с неполным проплавлением. Особенность усталости этих соединений определяется конкуренцией «слабых», наиболее напряженных областей на внешней поверхности у перехода от «основного» к наплавленному металлу и у кончика (фронта) внутренней полости – непровара – в наплавленном металле. Современные нормативные документы, по которым рассчитывают ресурс сварных соединений, основаны преимущественно на использовании номинального напряжения как параметра, определяющего повреждение. Согласно этому принципу, сопротивление усталости соединений с неполным проплавлением (как и соединений других типов) характеризуется «расчетными» S-N кривыми, например, класса FAT36 [5, 17].

Использование номинальных напряжений в правилах сопряжено с неопределенностью оценок долговечности, обусловленной множественностью соотношений размера непровара и геометрии соединения. С начала 1970-х годов использовались возможности моделирования трещин техникой конечных элементов и расчета подрастания трещин [18–21]. Однако на данный момент не существует полноценной методики для расчетов усталости соединений с неполным проплавлением.

Метод определения коэффициентов интенсивности напряжений

В настоящей работе описывается возможный подход к расчетной оценке долговечности крестообразных сварных соединений, в которых распространение трещины происходит от внутренней полости. Для описания кинетики усталостной трещины в предположении ее устойчивого подрастания от внутренней полости в соединении используется известное соотношение, «формула Пэриса» [22]:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\Delta K(S, a) \right)^m, \tag{1}$$

где N – число циклов нагружения; C и m – эмпирические параметры, зависящие от свойств материала; $\Delta\!K(S,a)$ – размах коэффициентов интенсивности напряжений (либо размах эффективных коэффициентов интенсивности при учете сжатия в фазе циклического нагружения); S – символ, используемый для обозначения циклического напряжения.

Рост трещины в предположении макроупругого напряженного состояния наплавленного металла соединения при циклическом нагружении определяется коэффициентами интенсивности напряжений. В общем случае при наличии современных программных средств, основанных на применении методов конечных и граничных элементов, имеются широкие возможности для расчета коэффициентов интенсивности напряжений [2, 3, 23, 24]. Однако при реализации инженерных расчетов усталости конструкций для решения различных практических задач (прогнозирование остаточного ресурса, определение периодичности оценок состояния конструкций и пр.) удобнее использовать аналитические зависимости для оценки коэффициентов интенсивности напряжений.

Для определения коэффициентов интенсивности напряжений в месте зарождения разрушения в вершине непровара с помощью МКЭ решалась задача об упругом деформировании плоской модели – крестообразного сварного соединения с начальной трещиной, равной толщине свариваемой детали. Материал – малоуглеродистая сталь. Нагрузка прикладывалась перпендикулярно траектории внутренней полости, при этом предусматривалась симметрия не только соединения и непровара, но и распространяющихся от него усталостных трещин. Схема четверти расчетной модели сварного соединения показана на рисунке 1.

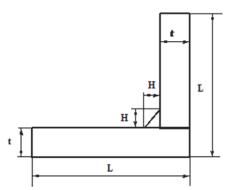


Рисунок 1. Расчетная модель сварного соединения

Ожидаемая траектория трещины была установлена по результатам анализа напряженнодеформированного состояния (НДС) сварного узла без трещины (рисунок 2) в предположении, что для расчетной оценки траектории превалирует мода смещения поверхностей трещины, отвечающая нормальному отрыву. Разбиение области на конечные изопараметрические элементы в месте ожидаемой траектории трещины представлено на рисунке 3. Пошаговый рост трещины моделировался последовательным освобождением связей в узлах сетки элементов.

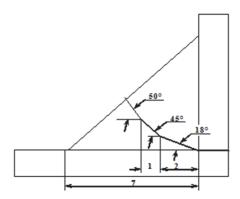


Рисунок 2. Ожидаемая траектория трещины, растущей из непровара

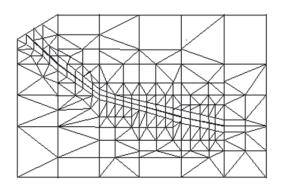


Рисунок 3. Конечно-элементная модель в месте ожидаемой траектории трещины

Коэффициенты интенсивности напряжений определялись экстраполяцией к вершине трещины. Численный эксперимент производился для восьми значений толщины свариваемых деталей, при этом катет сварного шва H оставался постоянным и равным 7 мм, а отношение t/H, где t – половина толщины свариваемой детали, принималось следующим: 0.590, 0.707, 0.786, 0.883, 1.180, 1.770, 2.360, 3.540. Продвижение трещины ограничивалось глубиной, составляющей порядка 0.70 толщины наплавленного металла по направлению к внешней

поверхности сварного шва. В расчетах толщина наплавленного металла t_w , измеренная по направлению перпендикуляра к гипотенузе сварного шва, равнялась 4.95 мм.

При дальнейшем подрастании трещины в реальных условиях развивается пластическая зона, протяженность которой увеличивается, особенность вида $1/\sqrt{r}$ исчезает в лигаменте, соответственно, становится затруднительным определить коэффициенты интенсивности напряжений перед вершиной трещины [25].

Анализ коэффициентов интенсивности напряжений, полученных по результатам численного эксперимента, позволил вывести инженерную формулу для их расчета. Предложенная зависимость имеет преимущества перед экстраполяцией к вершине трещины, требующей многократного вычисления напряженного состояния при ее подрастании. Структура формулы представляется в виде произведения коэффициента интенсивности напряжений для бесконечной пластины [26] на поправочные коэффициенты, которые включают параметры, влияющие на рост трещины в сварном соединении (длину трещины, толщину свариваемых деталей, характерные размеры сварного шва):

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F(\frac{a}{t}) \Phi(\frac{t}{H}), \tag{2}$$

где $F(\frac{a}{t})$ и $\Phi(\frac{t}{H})$ – поправочные коэффициенты; σ – номинальное напряжение, МПа; a – длина трещины, измеренная от оси симметрии, мм; t – половина толщины стенки сварного узла, мм; H – катет сварного шва, мм.

Зная коэффициенты интенсивности напряжений, полученные по результатам численного эксперимента, а также длину трещины a и номинальное напряжение σ , можно определить величину некоторого поправочного коэффициента $F(\frac{a}{t})$, который для выбранных соотношений t/H (8 вариантов) представляется в виде серии кривых, имеющих различные точки начала отсчета. Следующий шаг состоит в приведении кривых к единому началу отсчета, в данном случае — к единице, для этого каждое значение, принадлежащее рассматриваемой кривой, следует разделить на значение, соответствующее ее началу. Таким образом, для выбранных соотношений t/H были получены нормированные поправочные коэффициенты, которые представлены на рисунке 4 в координатах $\frac{a}{t} - F(\frac{a}{t})$.

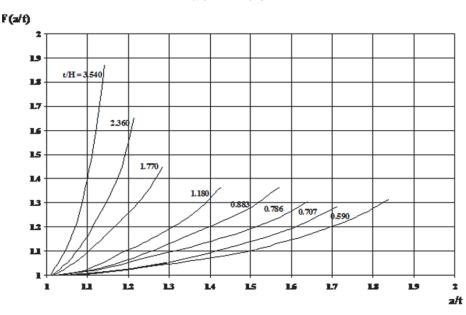


Рисунок 4. Поправочные коэффициенты, используемые для расчета коэффициентов интенсивности напряжений по формуле (2)

Второй поправочный коэффициент $\Phi(t/H)$, входящий в формулу (2), аналитически описывает кривую, построенную в координатах t/H – значение начала отсчета. Получена формула для определения коэффициента $\Phi(t/H)$:

$$\Phi(t/H) = 0.5676 \left[\ln(t/H) + 1.6665 \right]. \tag{3}$$

Для расчетов, выполняемых согласно формуле (2), кроме параметров, характеризующих рассматриваемый объект, необходимо наличие кривых, показанных на рисунке 4. Так как они визуально напоминают одну из ветвей восходящей параболы, то была предпринята попытка их аналитического описания:

$$F\left(\frac{t}{H}, \frac{a}{t}\right) = A\left(\frac{t}{H}\right)\left(\frac{a}{t} - 1\right)^{2} + 1. \tag{4}$$

В предлагаемой зависимости (4) наиболее трудоемкой оказалась процедура подбора коэффициента $A\binom{t}{H}$:

$$A\binom{t}{H} = -0.0591 \left(\binom{t}{H} \right)^5 + 0.0824 \left(\binom{t}{H} \right)^4 + 2.1418 \left(\binom{t}{H} \right)^3 - 3.6826 \left(\binom{t}{H} \right)^2 + 4.1218 \left(\binom{t}{H} \right) - 1.1815 .$$

Таким образом, для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений может использоваться формула, в которой все поправочные коэффициенты определяются аналитически:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F(t/H, t/t) \Phi(t/H). \tag{5}$$

Результаты расчета коэффициентов интенсивности напряжений согласно приведенным выше зависимостям (2) и (5) сопоставлялись со значениями аналогичных коэффициентов, полученными по предложенной Франком и Фишером формуле [11]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a \sec(\frac{\pi a}{2W})} \frac{A_1 + A_2 a/W}{1 + 2H/t_n},$$
 (6)

где $t_p = 2\,t\,$ – толщина стенки сварного узла;

$$W = H + t_p / 2$$
; $H / t_p = 0.2...1.2$; $a / W = 0.0...0.7$;

$$A_1 = 0.528 + 3.287 \left(\frac{H}{t_p}\right) - 4.361 \left(\frac{H}{t_p}\right)^2 + 3.696 \left(\frac{H}{t_p}\right)^3 - 1.875 \left(\frac{H}{t_p}\right)^4 + 0.415 \left(\frac{H}{t_p}\right)^5;$$

$$A_2 = 0.218 + 2.717 \left(\frac{H}{t_p}\right) - 10.171 \left(\frac{H}{t_p}\right)^2 + 13.122 \left(\frac{H}{t_p}\right)^3 - 7.755 \left(\frac{H}{t_p}\right)^4 + 1.783 \left(\frac{H}{t_p}\right)^5.$$

В таблице 1 представлены коэффициенты интенсивности напряжений, рассчитанные для восьми значений толщин свариваемых деталей при номинальном напряжении, равном 10 МПа, и при условии равенства катетов швов 7 мм с использованием метода экстраполяции к вершине трещины и приближенных способов согласно формулам (2), (5) и (6).

Таблица 1. Коэффициенты интенсивности напряжений, рассчитанные методом экстраполяции к вершине трещины и приближенными способами

| | К _I , Н/мм ^{3/2} | | | | К _I , Н/мм ^{3/2} | | | | | К _I , Н/мм ^{3/2} | | | |
|--------------------|---|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|--------|---|--|--|--|
| a , мм | МКЭ | 2 | 5 | 6 | а, мм | МКЭ | 2 | 5 | 6 | | | | |
| <i>t/H</i> = 0.590 | | | | | | | t/H = | 0.707 | | | | | |
| 4.340 | 24.514 | 23.869 | 24.248 | 24.816 | 5.159 | 30.246 | 30.158 | 30.640 | 30.481 | | | | |
| 4.970 | 26.536 | 26.207 | 26.365 | 27.466 | 5.789 | 32.532 | 32.521 | 33.034 | 33.559 | | | | |
| 5.600 | 28.701 | 28.713 | 28.958 | 30.360 | 6.419 | 35.467 | 35.456 | 36.122 | 36.970 | | | | |
| 6.250 | 31.685 | 31.680 | 32.239 | 33.725 | 7.069 | 38.991 | 39.008 | 40.156 | 40.981 | | | | |
| 7.100 | 36.998 | 37.001 | 37.616 | 39.014 | 7.919 | 44.564 | 44.575 | 46.915 | 47.344 | | | | |
| 7.600 | 41.470 | 41.472 | 41.423 | 43.337 | 8.479 | 49.764 | 49.758 | 52.387 | 52.576 | | | | |

| | | t/H = | 0.786 | | | | t/H = | 0.883 | |
|--------|---------|--------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 5.712 | 34.141 | 34.280 | 34.830 | 34.336 | 6.391 | 38.928 | 39.220 | 39.850 | 39.093 |
| 6.342 | 37.288 | 37.276 | 37.371 | 37.708 | 7.021 | 42.396 | 42.381 | 42.548 | 42.825 |
| 6.972 | 40.987 | 40.978 | 40.729 | 41.472 | 7.651 | 46.638 | 46.645 | 46.207 | 47.018 |
| 7.622 | 44.820 | 44.825 | 45.178 | 45.921 | 8.301 | 51.942 | 51.938 | 51.121 | 52.001 |
| 8.472 | 50.827 | 50.807 | 52.698 | 53.012 | 9.151 | 59.221 | 59.226 | 59.497 | 59.974 |
| 9.032 | 56.219 | 56.210 | 58.813 | 58.858 | 9.711 | 66.043 | 66.039 | 66.338 | 66.566 |
| | | <i>t/H</i> = | 1.180 | | | | t/H = | 1.770 | |
| 8.470 | 52.652 | 53.640 | 54.508 | 53.589 | 12.600 | 79.900 | 79.902 | 81.230 | 80.952 |
| 9.100 | 57.000 | 56.989 | 57.646 | 58.376 | 13.230 | 86.058 | 86.051 | 85.469 | 87.514 |
| 9.730 | 62.540 | 62.550 | 62.219 | 63.817 | 13.860 | 94.155 | 94.194 | 92.508 | 95.034 |
| 10.380 | 68.300 | 68.287 | 68.588 | 70.339 | 14.510 | 103.638 | 103.665 | 102.900 | 104.110 |
| 11.230 | 77.422 | 77.452 | 79.681 | 80.856 | 15.360 | 117.450 | 117.422 | 121.605 | 118.837 |
| 11.790 | 86.439 | 86.447 | 88.832 | 89.594 | 15.920 | 130.415 | 130.410 | 137.278 | 131.129 |
| | | <i>t/H</i> = | 2.360 | | | | t/H = | 3.540 | |
| 16.730 | 103.852 | 103.909 | 105.693 | 106.027 | 24.990 | 148.190 | 147.387 | 150.023 | 151.124 |
| 17.360 | 111.600 | 111.563 | 111.418 | 114.027 | 25.620 | 158.906 | 158.933 | 158.814 | 161.479 |
| 17.990 | 122.140 | 122.189 | 121.828 | 123.226 | 26.250 | 174.189 | 174.169 | 176.144 | 173.421 |
| 18.640 | 136.801 | 136.771 | 137.730 | 134.360 | 26.900 | 197.500 | 197.567 | 203.292 | 187.921 |
| 19.490 | 159.812 | 159.818 | 166.849 | 152.480 | 27.750 | 246.880 | 246.948 | 253.520 | 211.604 |
| 20.050 | 188.302 | 188.261 | 191.426 | 167.645 | 28.310 | 293.872 | 293.822 | 296.040 | 231.490 |

На рисунках 5 и 6 показаны графики изменения коэффициентов интенсивности напряжений по мере подрастания трещины, построенные по данным таблицы 1:

- кривые в виде сплошных линий соответствуют коэффициентам, полученным методом экстраполяции к вершине трещины;
- кривые в виде точечных линий соответствуют коэффициентам, рассчитанным приближенными способами согласно предлагаемой формуле (5) (рисунок 5) и согласно формуле Франка Фишера (6) (рисунок 6).

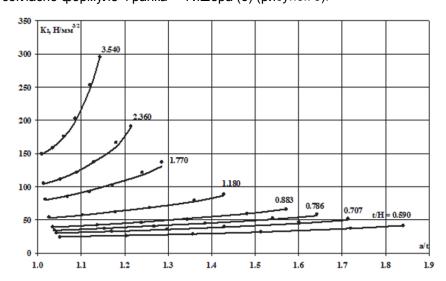


Рисунок 5. Коэффициенты интенсивности напряжений по МКЭ (сплошные линии) и по предлагаемой формуле (5) (точечные линии)

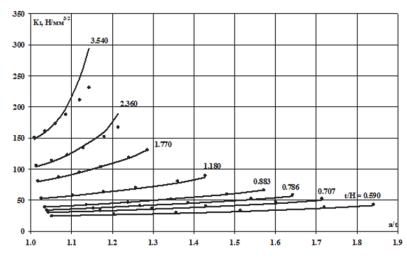


Рисунок 6. Коэффициенты интенсивности напряжений по МКЭ (сплошные линии) и по формуле Франка – Фишера (6) (точечные линии)

Как видно из рисунков 5 и 6, при использовании метода конечных элементов и приближенных аналитических способов для расчета коэффициентов интенсивности напряжений достигается вполне удовлетворительное согласование полученных результатов. Однако в случае увеличенных значений соотношения t/H (2.360 и 3.540) зависимость Франка — Фишера (6) дает заниженные значения коэффициентов интенсивности напряжений, что обусловливается принятым в ней ограничением $a/W=0.0\dots0.7$.

Оценка долговечности на стадии роста трещины из непровара

Кривые усталости S-N для крестообразного сварного соединения с непроваром строились в логарифмических координатах при расчетных нагрузках, равных S=50 МПа ($\lg S=1.70$) и S=60 МПа ($\lg S=1.78$), с применением формулы (1), в которой $C=10^{-10}$ и m=3. В расчетах числа циклов до разрушения материала коэффициенты интенсивности напряжений вычислялись для восьми значений толщины свариваемых деталей по приближенной зависимости (5):

- для трещины, которая соответствует предельной нагрузке $S t = q (t_w a_c)$, где q предел текучести материала, МПа (в расчетной модели 355 МПа); a_c длина трещины для предельного состояния, мм:
- для трещины, которая прорастает на глубину, составляющую порядка 0.70 толщины наплавленного металла по направлению перпендикуляра к гипотенузе сварного шва.

Результаты расчетов числа циклов до разрушения материала крестообразного сварного соединения с непроваром применительно к двум рассматриваемым типам трещин приведены в таблице 2 (для трещины, соответствующей предельной нагрузке) и в таблице 3 (для трещины, прорастающей на глубину порядка 0.70 толщины наплавленного металла по направлению перпендикуляра к гипотенузе сварного шва).

Таблица 2. Число циклов до разрушения материала для трещины, соответствующей предельной нагрузке

| t/H | 0.590 | 0.707 | 0.786 | 0.883 | 1.180 | 1.770 | 2.360 | 3.540 | | |
|--------------------|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|--------|--|--|
| а, м | 0.0076 | 0.0085 | 0.0090 | 0.0097 | 0.0118 | 0.0159 | 0.0201 | 0.0283 | | |
| | Ig S = 1.70 | | | | | | | | | |
| а _с , м | 0.0085 | 0.0092 | 0.0097 | 0.0103 | 0.0120 | 0.0156 | 0.0191 | 0.0262 | | |
| lg N | 5.526 | 5.257 | 5.080 | 4.898 | 4.511 | 3.939 | 3.543 | 2.894 | | |
| | | | | Ig S = 1.78 | | | | | | |
| а _с , м | 0.0084 | 0.0091 | 0.0095 | 0.0101 | 0.0118 | 0.0147 | 0.0187 | 0.0256 | | |
| lg N | 5.284 | 5.015 | 4.835 | 4.654 | 4.263 | 3.614 | 3.254 | 2.410 | | |

| 5519 5 511 | <i>y</i> | •• | | | | | | |
|------------|----------|--------|------------|--------------|-------------|---------------------|--------|--------|
| t/H | 0.590 | 0.707 | 0.786 | 0.883 | 1.180 | 1.770 | 2.360 | 3.540 |
| а, м | 0.0076 | 0.0085 | 0.0090 | 0.0097 | 0.0118 | 0.0159 | 0.0201 | 0.0283 |
| lg S | | | число цикл | ов до разруц | цения матер | иала (Ig N) | | |
| 1.70 | 5.492 | 5.229 | 5.053 | 4.875 | 4.500 | 3.960 | 3.605 | 3.102 |
| 1.78 | 5.254 | 4.991 | 4.815 | 4.637 | 4.262 | 3.723 | 3.368 | 2.865 |

Таблица 3. Число циклов до разрушения материала для трещины, прорастающей на глубину порядка 0.70 толщины наплавленного металла

На рисунке 7 показаны кривые усталости S-N , соответствующие вышеуказанным табличным данным.

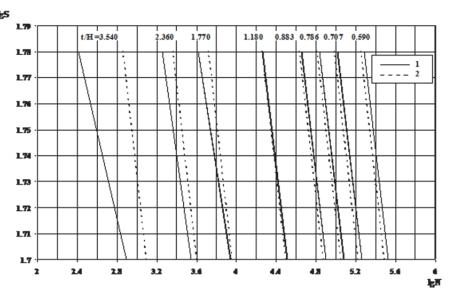


Рисунок 7. Кривые усталости S-N: 1 – для трещины, соответствующей предельной нагрузке (сплошные линии); 2 – для трещины, прорастающей на глубину порядка 0.70 толщины наплавленного металла (пунктирные линии)

Заключение

- 1. Результаты расчетного исследования и оценки коэффициентов интенсивности напряжений дополняют имеющиеся в технической литературе данные.
- 2. Расчетным путем получены кривые усталости для Т-образных и крестообразных сварных соединений с непроваром при разных соотношениях ширины полости к катету сварного шва.
- 3. Основные результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при решении инженерных задач, связанных с оценкой усталостной прочности сварных крестообразных соединений с непроваром.

Литература

- Elber W. The Significance of Fatigue Crack Closure // Damage Tolerance in Aircraft Structures. ASTM STP 486. 1971. Pp. 230—242.
- 2. Петинов С.В. Основы инженерных расчетов усталости судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1990. 224 с.
- 3. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.
- 4. Jones J., Bennett C., Matamoros A., Rolfe S., Roddis K. Fighting Fatigue in Steel Bridges // TR News, Transportation Research Board (TRB). November-December 2008. Iss. 259. Pp. 25–26.
- 5. Hobbacher A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components / International Institute of Welding. IIW Document XIII-2151r1-07 / XV-1254r1-07. Cambridge, Abington, 2007. 149 p.

- 6. Det Norske Veritas. Fatigue Assessment of Offshore Steel Structures. Recommended Practice (RP-C203). Hovik, Norway. 2006.
- Fricke W. Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structure / International Institute of Welding. IIW-Document XIII-2240r1-08/XV-1289r1-08. Cambridge, Abington, 2008. 38 p.
- 8. Леонов В.П., Васильев А.К. Разработка подходов к нормированию технологической дефектности сварных соединений конструкций различного назначения // Вопросы материаловедения. 2007. №3. С. 187–203.
- 9. Ильин А.В., Садкин К.Е. Определение конструктивной и технологической концентрации напряжений в сварных узлах при оценках усталостной прочности оболочечных конструкций // Вопросы материаловедения. 2012. №2. С. 161–176.
- 10. Петинов С.В., Афанасьева И.М. Расчеты усталости судовых конструкций: Техника и проблемы // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. №53. С. 103–108.
- 11. Frank K.H., Fisher J.W. Fatigue Strength of Fillet Welded Cruciform Joints // Journal of the Structural Division ASCE. 1979. Vol. 105. №ST9. Pp. 1727–1741.
- 12. Хвостов А.Е., Манжула К.П. Ресурс крестового соединения с трещинообразным непроваром // Сборник «Труды СПбГПУ» №494. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. С. 107–113.
- Kim W.S., Kim D.H., Lee S.G., Lee Y.K. Fatigue Strength of Load-Carrying Box Fillet Weldment in Ship Structure // Proceedings 8th International Symposium PRADS-2001, Shanghai. September 2001. Vol. 2. Pp. 1161–1167.
- 14. Шлепетинский А.Ю., Манжула К.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в крестовом сварном соединении с непроваром // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2010. №4. С. 137–146.
- 15. Шлепетинский А.Ю., Манжула К.П. Коэффициенты интенсивности напряжений при росте трещины от непровара в тавровом сварном соединении, нагруженном поперечной силой // Научнотехнические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. №3. С. 122–129.
- 16. Petinov S.V., Kim W.S., Paik Y.M. Assessment of Fatigue Strength of Weld Root in Ship Structure: An Approximate Procedure // Ship and Offshore Structures Journal. Woodhead Publishing. 2006. Vol. 1. №1. Pp. 55–60.
- 17. EUROCODE 3: Design of Steel Structures. Part 1-9: Fatigue. BS EN 1993-1-9. 2005.
- 18. Watwood V.B. The Finite Element Method of Prediction of Crack Behavior // Nuclear Engineering and Design. 1969. Vol. 11. №2. Pp. 323–332.
- 19. Byskov E. The Calculation of Stress Intensity Element Method with Cracked Elements // International Journal of Fracture. 1970. Vol. 6. №2. Pp. 159–167.
- 20. Anderson G.P., Ruggles V.L., Stibor G.S. Use of Finite Element Computer Programs in Fracture Mechanics // International Journal of Fracture. 1971. Vol. 7. №1. Pp. 63–76.
- Radaj D., Berto F., Lazzarin P. Local Fatigue Strength Parameters for Welded Joints Based on Strain Energy Density with Inclusion of Small-Size Notches // Engineering Fracture Mechanics. 2009. Vol. 76. Pp. 1109–1130.
- 22. Броек Д. Основы механики разрушения: Пер. с англ. М.: Высшая школа, 1980. 367 с.
- 23. Бреев В.Л., Кархин В.А. Оценка влияния формы сварного шва на траекторию трещины и параметры разрушения методом граничных элементов // Автоматическая сварка. 1989. №1. С. 12–18.
- 24. Перельмутер М.Н. Анализ напряженного состояния в концевой области трещины на границе раздела материалов методом граничных элементов // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5. №4. С. 415-426.
- 25. Романив О.Н., Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н., Махутов Н.А., Стадник М.М. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов: Справ. пособие. В 4-х т. Т. 4. Киев: Наукова думка, 1990. 680 с.
- 26. Хеллан К. Введение в механику разрушения: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 364 с.

* Татьяна Ивановна Летова, Санкт-Петербург, Россия Тел. раб.: +7(812)552-63-03; эл. почта: cool.letova@yandex.ru

© Летова Т.И., Петинов С.В., 2013

Деформативность штукатурных составов в современных теплоэффективных наружных стенах зданий

Д.т.н., профессор В.В. Бабков; аспирант О.А. Резвов*; аспирант Э.А. Гафурова; к.т.н., доцент Д.В. Кузнецов; к.т.н., старший преподаватель Д.А. Синицин; аспирант Р.С. Кильдибаев; аспирант Р.Р. Вахитов, ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет; к.т.н. А.А. Самойлов,

Ключевые слова: теплоэффективные наружные стены зданий; фасадные штукатурные системы; деформативность штукатурных составов

В связи с повышением требований к теплозащите ограждающих конструкций зданий и освоением в строительстве теплоэффективных конструкций наружных стен в последние годы актуальной становится проблема защиты от внешних воздействий стен этой категории и обеспечения их долговечности [1–4]. В проектировании и строительстве жилых домов и зданий другого назначения в России и, в частности, в Республике Башкортостан как один из вариантов теплоэффективных стен широкое распространение получила фасадная теплоизоляция с оштукатуриванием по сетке. Данный тип теплоэффективной стены может применяться как в строительстве новых сооружений, так и при реконструкции и санации существующих эксплуатируемых зданий [5–9].

Состояние вопроса

Система фасадной теплоизоляции, включающая слой эффективного утеплителя в виде пенополистирола или минераловатной изоляции высокой средней плотности, защищается в стандартных решениях оштукатуриванием по сетке. Защитная штукатурка используется также для наружной отделки стен, выполненных из автоклавных газобетонных блоков [10]. Система предполагает, при условии применения кондиционных утеплителей и элементов штукатурной системы, сохранение первоначальных теплозащитных и гидрозащитных свойств наружной стены на длительный эксплуатационный период. Большинство разработчиков систем фасадной теплоизоляции определяют безремонтный срок службы для своих систем в пределах 30—40 лет, однако в реальных условиях при использовании некондиционных материалов наблюдаются примеры отказов системы уже через несколько лет эксплуатации.

Основную роль в обеспечении долговечности теплоэффективных наружных стен с применением защитно-декоративных штукатурных систем играет стойкость фасадных штукатурок к воздействию внешних факторов в процессе эксплуатации [11–15]. Важнейший показатель для фасадных штукатурок — способность воспринимать развивающиеся в них усадочные и термомеханические напряжения без образования трещин и отслоения от основы. Трещиностойкость штукатурного раствора обеспечивает эстетичный вид фасада и ограничивает попадание влаги под штукатурку, что может вызвать отслоение штукатурного слоя и отразиться на долговечности стены. Основной характеристикой штукатурных покрытий, определяющей их трещиностойкость и влияющей на долговечность, является предельная растяжимость штукатурного раствора, количественные значения которой не представлены в паспортных характеристиках ни одним производителем сухих штукатурных смесей и разработчиком систем фасадной теплоизоляции. В литературе имеются данные по предельной растяжимости бездобавочных цементно-песчаных растворов [3]. Однако современные штукатурные смеси имеют в своем составе добавки, которые значительно повышают предельную растяжимость штукатурных составов, что способствует повышению их трещиностойкости. Кроме того, в нормативных

документах не нормируется усадка штукатурных растворов, хотя именно усадочные напряжения являются одним из главных факторов, обусловливающих растрескивание штукатурок.

Следует признать, что методики определения такой важной для штукатурных растворов характеристики, как предельная растяжимость, в России не существует, а это приводит к тому, что технические свидетельства о пригодности систем утепления наружных стен к применению в строительстве на территории РФ оформляются без полных испытаний всех элементов защитнодекоративных систем, определяющих долговечность стены в целом.

Существующие методы определения деформативности штукатурных растворов

В настоящей статье предлагается методика определения предельной растяжимости штукатурных растворов, используемых в структуре наружных стен.

Существуют способы определения условной деформативности цементных бетонов на растяжение ϵ_{ult} [15]. По одному из способов эта характеристика рассчитывается как отношение прочности образцов при растяжении, получаемой раскалыванием кубов или цилиндров $R_{\text{раск}}$, к динамическому модулю упругости $E_{\text{дин}}$, определяемому на образцах из бетона того же состава физическими методами. Еще один способ предполагает определение деформативности путем измерения деформаций с помощью тензодатчиков омического сопротивления, приклеенных на образцы-восьмерки в ходе испытания этих образцов на прочность при растяжении.

Однако перечисленные выше способы не могут быть использованы для испытания штукатурок. Способ, по которому предельная растяжимость бетона вычисляется как отношение $\epsilon_{\text{ult}} = R_{\text{раск}}/E_{\text{дин}}$, является косвенным. Кроме того, при определении деформации путем измерения прочности при растяжении раскалыванием и динамического модуля упругости, прочность при раскалывании $R_{\text{раск}}$ обычно на 10–15% выше прочности при растяжении R_{p} , определяемой при прямом испытании образцов-восьмерок материала на осевое растяжение. Динамический модуль упругости, кроме того, больше статического модуля упругости примерно на 20–25%. Таким образом, каждая из измеряемых характеристик определяется с погрешностями. Это приводит к тому, что получаемая деформация фактически существенно больше предельной растяжимости ϵ_{ult} .

При измерении предельной растяжимости с помощью тензодатчиков возникает трудность синхронизации данных измерения деформаций и разрушающей нагрузки, приводимой далее к напряжению.

Наиболее существенным недостатком обоих методов является то обстоятельство, что в них реализуется испытание образцов с размерами, существенно отличающимися от толщины реального штукатурного слоя.

Предлагаемая методика определения предельной растяжимости цементных штукатурных составов

Чтобы исключить необходимость применения средств тензометрии, повысить точность искомых параметров, а также успешно провести испытания на слоях штукатурки, учитывая ее характерно малую толщину – от нескольких миллиметров до 2–3 см, был разработан специальный способ определения предельной растяжимости цементных штукатурных составов. В предлагаемом способе величину предельной растяжимости штукатурного раствора определяют испытанием на растяжение при изгибе стальных балочек с нанесенным на их нижнюю плоскость штукатурным составом. Испытание производится по схеме двухточечного изгиба с плавным нагружением малыми ступенями и фиксацией степени нагружения, соответствующей моменту трещинообразования, а значение предельной растяжимости рассчитывают по формуле:

$$\varepsilon_{ult}^{u.p.} = \frac{3\text{Pa}}{E_s bh^2},$$

где $\epsilon_{ult}^{\text{ш.р.}}$ – предельная растяжимость штукатурного раствора; P – прикладываемая нагрузка, равная двум равностоящим от опор сосредоточенным силам P/2, kH; a – расстояние от опоры балочки до точки приложения сосредоточенной силы P/2, cm; E_s – модуль упругости стали, $2\cdot10^5$ МПа; b – ширина стальной балочки, cm; b – высота балочки, cm.

Равномерное нагружение штукатурного слоя на цементной основе обеспечивается центрированным положением испытуемого образца, что обеспечивает однородное напряженное состояние в его сечении. Таким образом, достигается технологическая простота проведения испытаний и повышается точность определения величины предельной растяжимости.

На рисунке 1 представлена методика испытания по схеме двухточечного изгиба с плавным нагружением испытуемого образца малыми ступенями нагрузки.

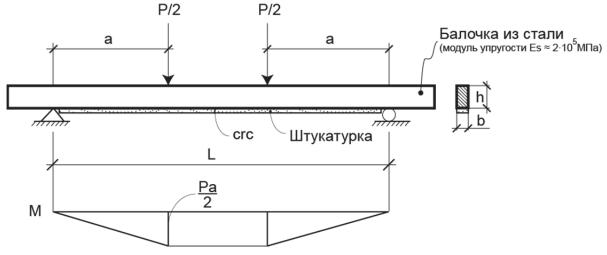


Рисунок 1. Методика испытания

Применительно к нагружению по схеме двухточечного изгиба стальной балочки сечением bxh и длиной (пролетом) I изгибающий момент в зоне чистого изгиба составит:

$$M = \frac{P}{2} \cdot a,\tag{1}$$

$$W_s = \frac{b \cdot h^2}{6},\tag{2}$$

где W_s – момент сопротивления сечения балочки, см³.

Нормальное напряжение в крайнем растянутом волокне балочки

$$\sigma_s = \frac{M}{W_s} = \frac{6Pa}{2bh^2} = \frac{3Pa}{bh^2},$$
 (3)

при этом σ_s – предельно допустимое напряжение, принимаемое пониженным относительно предела текучести стали σ_v на 10–20%, МПа.

Из условия совместности деформаций, при допущении об отсутствии влияния слоя раствора на напряженно-деформированное состояние стальной балочки, получим:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{3\text{Pa}}{E_s b h^2} = \varepsilon_{ult}^{u.p.} , \tag{4}$$

где $\epsilon_{\text{ult}}^{\text{ш.р.}}$ – предельная растяжимость штукатурного раствора, равная

$$\varepsilon_{ult}^{u.p.} \le 0.8 \frac{\sigma_y}{E_s}. \tag{5}$$

Экспериментальное исследование эффективности предлагаемой методики. Результаты испытаний

Эффективность разработанного способа исследовалась экспериментально. Лабораторные испытания проводились для различных штукатурных составов: бездобавочный цементнопесчаный раствор, Быстрой ОК Теплоизоляция, Baumit StartContact, Baumit Artoplast. Для
испытаний подготавливались предварительно ошкуренные обезжиренные стальные балочки
(марки стали C230, C440) с размерами 7х10х200мм, на нижнюю поверхность которых наносился
штукатурный слой постоянной толщины. Далее эти образцы выдерживались в нормальных
условиях (температура (20±2) °С, влажность (90±5)%) необходимое количество суток. По
истечении срока хранения в нормальных условиях балочки помещались в естественные условия
(температура (20±2) °С, влажность (55±5)%) на сутки для удаления поверхностной влаги и в целях
исключения влияния усадочных деформаций на результаты испытания. Далее образцы
устанавливали на опоры пресса с механической системой нагружения (пресс механический, 5кН
УП-8) и после 14 и 28 суток хранения в нормально-влажностных условиях подвергали испытанию с
плавным нагружением малыми ступенями (рисунок 2).



Рисунок 2. Трещинообразование штукатурного раствора Baumit StarContact после достижения предельной растяжимости по разработанной методике

В таблице 1 представлены результаты испытания нескольких видов штукатурных составов на предельную растяжимость по авторской методике.

Таблица 1. Результаты испытаний штукатурных составов на цементной основе на предельную растяжимость

| № серии | Наименование испытуемого состава штукатурного раствора | Возраст испытуемого штукатурного раствора, сут | Предельная растяжимость, ε _{ult} |
|------------|---|--|---|
| 1 | Цементно-песчаный раствор (Ц/П=1/3) | 14 | 13,9·10 ⁻⁵ |
| 2 | Цементно-песчаный раствор, Ц/П=1/3; М _{кр} =1,25 | 28 | 15,0·10 ⁻⁵ |
| 3 | Цементно-песчаный раствор, Ц/П=1/3; В/Ц=0,4; M_{Kp} =1,25 | 28 | 15,0·10 ⁻⁵ |
| 4 | Baumit StartContact (B/B=0,25) | 14 | >92·10 ⁻⁵ |
| 5 | Baumit StartContact (B/B=0,25) | 14 | >92·10 ⁻⁵ |
| 6 | Baumit StarContact (B/B = 0,25) | 28 | >92,0·10 ⁻⁵ |
| 7 | Baumit Artoplast (B/B=0,25) | 14 | >92·10 ⁻⁵ |
| 8 | Baumit Artoplast (B/B = 0,25) | 28 | >92,0·10 ⁻⁵ |
| 9 | Baumit Artoplast (B/B=0,25) | 28 | 110·10 ⁻⁵ |
| 10 | Baumit Artoplast (B/B=0,25) | 28 | >180·10 ⁻⁵ |
| 11 | Быстрой ОК Теплоизоляция (В/В=0,25) | 14 | >92·10 ⁻⁵ |
| 12 | Быстрой ОК Теплоизоляция (В/В=0,25) | 14 | 140·10 ⁻⁵ |

Примечание: знаком ">" помечены результаты на стальных балочках с низким пределом текучести 230 МПа; так как испытание проводилось на стальных балочках с пределом текучести 230 МПа (образцы №1–8), то значения предельной растяжимости для штукатурных растворов Baumit StarContact, Baumit Artoplast составили >92,0·10⁻⁵ (согласно методике, нагружение образца находится в пределах 0,8–0,9 от уровня нагрузки, соответствующей пределу упруго-пластичного состояния стальной балочки). Образцы 9–10 испытывались на более прочных стальных балочках с маркой стали С440.

Заключение

- 1. В статье обозначены проблемы обеспечения долговечности теплоэффективных наружных стен с применением защитно-декоративных штукатурных систем. Рассмотрены факторы, влияющие на стойкость фасадных штукатурок в процессе эксплуатации к воздействию внешних условий. Выявлены недостатки в предоставлении необходимых характеристик о качестве материала производителями штукатурных смесей.
- 2. Проведен мониторинг существующих способов определения условной деформативности цементных бетонов на растяжение. Показано, что эти способы имеют ряд недостатков, из-за чего не могут быть использованы для испытания штукатурных систем.
- 3. Предложена авторская методика определения предельной растяжимости штукатурных составов, исключающая необходимость применения средств тензометрии и позволяющая проводить испытания на слоях штукатурки с ее характерно малой толщиной от нескольких миллиметров до 2–3 см.
- 4. Проведена апробация разработанного авторами способа. В статье представлены результаты испытаний различных штукатурных составов, подтверждающие эффективность предлагаемой методики.

Таким образом, предлагаемый способ может использоваться как при оценке предельной растяжимости штукатурных составов, так и в исследованиях по оптимизации составов штукатурок с целью повышения их трещиностойкости. Кроме того, этот способ может дополнить комплекс испытаний всех элементов защитно-декоративных систем при техническом освидетельствовании систем утепления наружных стен зданий.

Литература

- 1. Александровский С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций. М.: НИИСФ РААСН, 2003. 332 с.
- 2. Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании // Инженерностроительный журнал. 2012. №8. с.4.
- 3. Бутовский И.Н., Матросов А.Ю. Теплозащита зданий: Обзорный доклад о мировом уровне и тенденциях развития строительной науки и техники. М.: ВНИИНТПИ, 1990. 48 с.
- 4. Савин В.К. Долговечность и эффективность зданий // Стены и фасады. 2004. №3–4. С. 21–26.
- 5. Бабков В.В., Колесник Г.С., Гайсин А.М. и др. Несущие наружные трёхслойные стены зданий с повышенной теплозащитой // Строительные материалы. 1998. №6. С. 16–18.
- 6. Бедов А.И., Бабков В.В., Гайсин А.М., Габитов А.И. Опыт эксплуатации жилых и гражданских зданий с теплоэффективными наружными стенами в климатических условиях Республики Башкортостан // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. №2. С. 89–94.
- 7. Граник Ю.Г. Теплоэффективные ограждающие конструкции жилых и гражданских зданий // Строительные материалы. 1999. №2. С. 4–6.
- 8. Зубарев В.В. Системы наружного утепления зданий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2003. №4. С. 24–25.
- 9. Резниченко Ю.Ю. Наружная теплоизоляция фасадов с применением пенополистирола и тонкослойных штукатурок «Синтеко» и «Драйвит» // Строительные материалы. 2003. №3. С. 13.

- 10. Ватин Н.И., Глумов А.В., Горшков А.С. Влияние физико-технических и геометрических характеристик штукатурных покрытий на влажностный режим однородных стен из газобетонных блоков // Инженерно-строительный журнал. 2011. №1. с. 28.
- 11. Бабков В.В., Резвов О.А., Кузнецов Д.В., Гайсин А.М., Самофеев Н.С., Морозова Е.В. Проблемы эксплуатационной надежности наружных стен зданий на основе автоклавных газобетонных блоков и возможности их защиты стен от увлажнения // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С. 28-31.
- 12. Василик П.Г., Голубев И.В. Трещины в штукатурках // Строительные материалы. 2003. №4. С. 14-16.
- 13. Калинин А.В., Барабанов А.Н. Наружные штукатурные системы утепления фасадов // Строительные материалы. 2009. №6. С. 28–31.
- 14. Парута В.А., Саевский А.А., Семина Ю.А., Столяр Е.А., Устенко А.В., Брынзин Е.В. // Теоретические предпосылки оптимизации рецептурно-технологических параметров штукатурных растворов для стен, выполненых из газобетонных блоков // Инженерно-строительный журнал. 2012. №8. С. 30—36.
- 15. Лутц Г. Системы наружной теплоизоляции с сухими смесями // Строительные материалы. 1999. №3. С. 36–38.
- 16. Стольников В.В., Литвинова Р.Е. Трещиностойкость бетона. М.: Энергия, 1972. С. 57–59.
- 17. Силаенков Е.С., Сальникова М.Е. Методика определения долговечности системы утепления наружных стен с эффективным утеплителем // Строительные материалы. 2001. №1. С. 15–17.
- 18. Системы утепления и отделки фасадов // Застройщик. 2003. №5. С. 10-14.
- 19. Сокова С.Д., Штейман Б.И. Об утеплении наружных стен // Жилищное строительство. 2002. №11. С. 12–15.
- 20. Qiang Li, Fujian Ni, Zaixin Li. Experimental Tests and Finite Element Modeling of Shrinkage Behavior in Cement Stabilized Aggregate Base // Critical Issues in Transportation Systems Planning, Development, and Management. Ninth International Conference Chinese Transportation Professionals. 2009, Harbin. China. Pp. 2754–2760.
- 21. Meschke G., Grasberger S. Numerical Modeling of Coupled Hygromechanical Degradation of Cementitious Materials // Journal of Engineering Mechanics. 2003. No.129(4). Pp. 383–392.
- 22. Bochen J. Study on the microstructure of thin-layer facade plasters of thermal insulating system during artificial weathering // Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23. Issue 7. Pp. 2559–2566.
- 23. Langmans J., Klein R., Roels S. Hygrothermal risks of using exterior air barrier systems for highly insulated light weight walls: A laboratory investigation // Building and Environment. 2012. Vol. 56. Pp. 192-202.
- 24. Tittarelli F., Moriconi G., Bonazza A. Atmospheric deterioration of cement plaster in a building exposed to a urban environment // Journal of Cultural Heritage. 2008. Vol. 9. Issue 2. Pp. 203–206.
- 25. Groot C., Van Hees R., Wijffels T. Selection of plasters and renders for salt laden masonry substrates // Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23. Issue 5. Pp. 1743–1750.

* Олег Александрович Резвов, г. Уфа, Россия

Тел. моб.: +7(927)637-45-77; эл. почта: ufaoleg@bk.ru

© Бабков В.В., Резвов О.А., Гафурова Э.А., Кузнецов Д.В., Синицин Д.А., Кильдибаев Р.С., Вахитов Р.Р., Самойлов А.А., 2013



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



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

Что такое магистратура?

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



Условия поступления и обучения

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



Особенности обучения на инженерно-строительном факультете:

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

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

Контакты

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



Инженерно-строительный факультет Курсы повышения квалификации и профессиональной переподготовки

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, тел/факс: 552-94-60, <u>www.stroikursi.spbstu.ru</u>, <u>stroikursi@mail.ru</u>

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 заказчиказастройщика

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 заказчиказастройщика и генерального подрядчика
- Управление строительной организацией
- Экономика и ценообразование в строительстве
- Управление строительной организацией
- Организация, управление и планирование в строительстве
- Автоматизация сметного дела в строительстве

П-03 «Инженерные системы зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

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

П-04 «Проектирование и конструирование зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

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

П-05 «Контроль качества строительства»

Программа включает учебные разделы:

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

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

