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

Инженерно-строительный журнал
научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

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

Специализированный научный журнал. Выходит с 09.2008.

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Адрес редакции:

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

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Научный редактор:

Николай Иванович Ватин

Литературный редактор:

Елена Викторовна Соболева

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф., зав. каф. ФГБОУ ВПО СПбГПУ Н.В. Арефьев;
д.т.н., проф., ректор ФГБОУ ВПО СГАСУ М.И. 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 18.12.12
Формат 60x84/8, усл. печ. л. 10,5.
Заказ № 2808

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

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

Содержание

СОБЫТИЯ

Энергоэффективность переходит на новый уровень 3

КОНСТРУКЦИИ

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 4

Пашкевич С.А., Пустовгар А.П., Адамцевич А.О. Оценка рисков устройства фасадных теплоизоляционных композиционных систем при суточных колебаниях температуры воздуха ниже +5°С 15

РАСЧЕТЫ

Бабков В.В., Синицын Д.А., Чуйкин А.Е., Кильдибаев Р.С., Резвов О.А. Работа штукатурных покрытий в составе современных теплоэффективных наружных стен зданий 22

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, выполненных из газобетонных блоков 30

МАТЕРИАЛЫ

Логанина В.И., Акжигитова Э.Р., Фадеева Г.Д. Сухие строительные смеси с применением местных материалов Пензенского региона 33

Киски С.С., Агеев И.В., Пономарев А.Н., Козеев А.А., Юдович М.Е. Исследование возможности модификации карбоксилатных пластификаторов в составе модифицированных мелкозернистых бетонных смесей 42

Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей 47

ТЕХНОЛОГИЯ

Байджанов Д.О., Бюнау Е.К., Малышев О.А. Особенности подбора химических модификаторов для экструзионной технологии бетонов 54

Клюев С.В. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства 61

Морозов Н.М., Степанов С.В., Хозин В.Г. Ускоритель твердения бетона на основе гальванического шлама 67

ОПЫТ

Васильев А.С., Барабанщиков Ю.Г. Эффективность добавок – ускорителей схватывания и твердения для торкрет-бетона 72

Янковский Л.В. Применение пленкообразующего препарата для увеличения стойкости бетонных изделий в условиях резкого континентального климата 79

© ФГБОУ ВПО СПбГПУ, 2012.

На обложке: модель ограждающей конструкции, ООО «Арсенал-СТ», г. Смоленск, Россия

Энергоэффективность переходит на новый уровень

21-22 ноября в Санкт-Петербурге проходил IV Международный конгресс «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий». Несмотря на то, что мероприятие проходит в городе уже в четвертый раз, впервые оно приобрело такие масштабы. Программа включала панельную дискуссию, 7 круглых столов, 2 семинара и научно-практическую конференцию.

В панельной дискуссии, проходившей 21 ноября в Ленэкспо, приняли участие руководители ведущих СРО и национальных объединений, а также представители бизнеса. Большинство докладчиков отмечали как важность законодательства об энергосбережении в зданиях, так и сложность его практического осуществления. Так, Алексей Игоревич Белоусов, координатор Национального объединения строителей по Санкт-Петербургу, рассказал, что в существующей ситуации строить энергоэффективные здания невыгодно. По его словам, пока это делают отдельные компании (в Санкт-Петербурге в основном скандинавские), такие проекты будут убыточны. Прибыльным энергосберегающее строительство станет только тогда, когда будет массовым явлением.

Об отдельных проектах, в которых реализуются принципы энергоэффективности, рассказал Евгений Сергеевич Тесля, начальник отдела энергоэффективных и экологичных решений и технологий группы компаний «Бюро техники». Так, в Московском районе Санкт-Петербурга строится жилой комплекс, получивший оценку «4+» в международной системе BREEM (добровольная сертификация зданий по критериям зеленого строительства).

Другая сторона закона об энергоэффективности (№261-ФЗ от от 23.11.2009) – обязательные энергетические обследования объектов энергетики, крупных промышленных предприятий и организаций с государственным участием. Сроки этих обследований по закону ограничивались 31 декабря 2012 г. Николай Олегович Сорокин, директор филиала СРО НП «ЦОС «Сфера-А», отметил невыполнимость этого требования: количество объектов, подлежащих обязательному энергоаудиту, приближается к 1 млн.; в то же время на данный момент в Министерство энергетики Российской Федерации подано около 25 тысяч энергопаспортов, и лишь 10% из них были приняты. По мнению докладчика, требования Минэнерго к энергпаспортам являются завышенными, а процесс их согласования – несовременным и затянутым. В качестве основных проблем в формирующейся сфере энергетического обследования зданий Н.О. Сорокин указал отсутствие профессиональных стандартов, квалификационных требований к специалистам, а также единых принципов ценообразования.

Один из круглых столов, проходивших 21 ноября, был посвящен строительной теплофизике и энергоэффективному проектированию ограждающих конструкций. Основной его тематикой было техническое регулирование в области.

Александр Сергеевич Горшков, руководитель отдела разработки нормативно-технической документации ОАО «КБ ВиПС», выступил с докладом о новом региональном методическом документе «Рекомендации по обеспечению энергетической эффективности жилых и общественных зданий в Санкт-Петербурге».

Новый РМД объединил в себе вопросы, которые ранее были разбросаны по нескольким номативным документам, поэтому получился очень объемным. В том числе, документ содержит:

- нормируемые обобщенные параметры удельного годового расхода энергии;
- требования к энергетическому паспорту здания, методику его заполнения;
- требуемые значения приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций;
- классы энергоэффективности зданий и критерии принадлежности к ним;
- разъяснения по международной системе сертификации и российскому стандарту зеленого строительства.

Статью А.С. Горшкова и соавторов о сравнении отечественных и зарубежных норм по тепловой защите зданий см. на стр. 4 нашего журнала.

Текст: В.М. Якубсон
Фото: http://energoeffekt22.ru.umitest.ru/

Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании

Д.т.н., профессор, декан Н.И. Ватин;
инженер Д.В. Немова,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;
к.ф.-м.н., профессор П.П. Рымкевич,
ФВГОУ ВПО Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского МО РФ;
к.т.н., докторант А.С. Горшков*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна

Ключевые слова: энеросбережение; трансмиссионные потери тепловой энерии; многоквартирный жилой дом

Потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания (так называемые трансмиссионные потери тепловой энергии) являются одним из основных компонентов в структуре затрат тепловой энергии здания на отопление и составляют более 50% всех потерь тепловой энергии, расходуемой на отопление в течение отопительного периода. Для восполнения потерь тепловой энергии к зданию необходимо подвести тепло, т.е. подключить его к системе теплоснабжения. Чем выше уровень теплоизоляции наружных ограждающих конструкций, тем меньше оказываются потери тепловой энергии в здании через оболочку, а значит, меньше энергии требуется подвести к зданию. Соответственно, можно сэкономить большее количество энергетических ресурсов и уменьшить платежи жителей за тепловую энергию.

Таким образом, потери тепловой энергии напрямую зависят от уровня теплоизоляции наружных ограждающих конструкций (стен, окон и балконных дверей, перекрытий над проездами и под эркерами, полов по грунту, покрытия). Во всех странах существуют нормативные требования к уровню теплоизоляции (в терминах стандарта, принятого на территории Российской Федерации, к приведенному сопротивлению теплопередаче) наружных ограждающих конструкций, которые отличаются в зависимости от климатических условий страны и ее государственной политики в области энергосбережения. В связи с постоянным ростом цен на энергетические ресурсы и, соответственно, ростом тарифов на тепловую энергию, а также сокращением запасов невозобновляемых углеводородов (нефти, газа) в большинстве развитых стран мира нормативы потребления зданиями энергии постоянно уменьшаются, а требования к уровню теплоизоляции ограждающих конструкций повышаются.

В Российской Федерации в области нормирования наметился тренд в сторону уменьшения требований к уровню тепловой защиты зданий. Базовые нормативные требования к приведенному сопротивлению теплопередаче для ограждающих конструкций с введением с 2013 года в действие свода правил СП 50.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 23-02-2003) предполагается понизить по сравнению с действующей редакцией норматива по тепловой защите зданий. К каким энергетическим и экономическим последствиям это может привести, рассмотрено ниже.

Целью статьи является анализ влияния уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величины потерь тепловой энергии, эксплуатационных затрат и затрат топливно-энергетических ресурсов в течение отопительного периода (за 10, 30 и 50 лет эксплуатации здания) на примере одного жилого многоквартирного здания.

Расчет потерь тепловой энергии через оболочку здания при различном уровне ее теплоизоляции

В основе анализа лежит расчет трансмиссионных потерь тепловой энергии (теплопотерь через наружные ограждающие конструкции – стены, окна, входные наружные двери, покрытие и т.д.) жилого многоквартирного здания за отопительный период применительно к климатическим условиям города Санкт-Петербурга. Принимаются минимальные требования к уровню тепловой защиты наружных ограждающих конструкций в соответствии со следующими стандартами:

- Свод Правил **СП 50.13330.2012** [1] (актуализированная редакция СНиП 23-02-2003, – проект);
- Стандарт Российской Федерации **СНиП 23-02-2003** [2] (действующая редакция);
- Стандарт Финляндии **National Building Code of Finland, Part D3** [3] (действующая редакция 2012 года).

Допущения

Для расчета, вне зависимости от выбора требований к уровню тепловой защиты наружных ограждающих конструкций, примем следующие допущения:

1) строительный объем и площади проектируемого многоквартирного здания примем одинаковыми;
2) воздухообмен в проектируемом здании примем одинаковым;
3) система вентиляции в проектируемом здании предполагается идентичной по составу и номенклатуре оборудования;
4) ориентацию фасадов по сторонам света примем одинаковой;
5) расчетное количество жителей в здании примем одинаковым.

Согласно принятым допущениям 1, 2 и 3 получим, что инфильтрационные затраты тепловой энергии на отопление проектируемого здания за отопительный период окажутся одинаковыми. Поэтому в сравнительных расчетах тепловой энергии на отопление рассматриваемого здания не станем учитывать инфильтрационные затраты тепловой энергии на отопление.

Согласно принятым допущениям 1, 4 и 5 получим, что бытовые и солнечные теплопоступления рассматриваемого здания за отопительный период также окажутся одинаковыми.

Таким образом, сравнение затрат тепловой энергии на отопление произведем только по показателям трансмиссионных теплопотерь здания (потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции).

Исходные данные для расчета трансмиссионных потерь

Объектом исследования является жилой 25-этажный многоквартирный дом, состоящий из трех отдельно стоящих зданий башенного типа со встроенной подземной автостоянкой (рис. 1), проектируемый в Санкт-Петербурге. Общие сведения об объекте представлены в таблице 1.

Рисунок 1. Жилое многоквартирное 25-этажное здание [5]

Расчетные климатические и теплоэнергетические параметры здания для климатических условий Санкт-Петербурга приняты по СНиП 23-01-99* [4] и представлены в таблице 1.

Площади наружных ограждающих конструкций отапливаемого объема здания представлены в таблице 2.

Таблица 1. Расчетные условия для жилой части здания

Показатель	Обозначение параметра	Единица измерения	Расчетное значение
1.1. Расчетная температура наружного воздуха	$t_н$	°С	- 26
1.2. Средняя температура наружного воздуха за отопительный период	$t_{от}$	°С	- 1,8
1.3. Продолжительность отопительного периода	$z_{от}$	сут/год	220
1.4. Градусо-сутки отопительного периода	ГСОП	°С· сут/год	4796
1.5. Расчетная температура внутреннего воздуха	$t_в$	°С	20
1.6. Расчетная температура чердака	$t_{черд}$	°С	-
1.7. Расчетная температура в помещениях подземной автостоянки	$t_{подз}$	°С	5,0

Таблица 2. Площади наружных ограждающих конструкций здания

Тип наружной ограждающей конструкции	Площадь конструкции A_i, м^2
2.1. Наружные стены – $A_{ст}$	21 813,0
2.2. Окна и балконные двери – $A_{ок}$	5 826,8
2.3. Входные наружные двери – $A_{дв}$	45,3
2.4. Совмещенное покрытие – $A_{покр}$	1 448,5
2.5. Перекрытия над проездами и под эркерами – $A_{перекр}$	22,5
2.6. Цокольное перекрытие над помещениями подземной автостоянки – $A_{ц.перекр}$	1 221,3
Суммарная площадь наружных ограждающих конструкций отапливаемого объема здания – $A_н^{сум}$	**30 377,4**

Требуемые значения приведенного сопротивления теплопередаче $R_0^{тр}$, м^2·°С/Вт наружных ограждающих конструкций здания представлены в таблице 3.

В таблице 3 требуемые значения приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций проектируемого здания $R_0^{тр}$, м^2·°С/Вт, приняты по минимальным требованиям согласно СП 50.13330.2012 [1] ($R_{СП}^{тр}$), СНиП 23-02-2003 [2] ($R_{СНиП}^{тр}$) и National Building Code of Finland, Part D3 [3] ($R_{D3}^{тр}$) соответственно.

Таблица 3. Минимальные требования к уровню тепловой защиты наружных ограждающих конструкций жилого многоквартирного здания согласно нормативным требованиям различных стандартов

Тип наружной ограждающей конструкции	Требуемые значения приведенного сопротивления теплопередаче $R_0^{тр}$, м²·°С/Вт, рассчитанные по стандартам:		
	СП 50.13330.2011, $R_{СП}^{тр}$, м²·°С/Вт	СНиП 23-02-2003, $R_{СНиП}^{тр}$, м²·°С/Вт	National Building Code of Finland, Part D3, $R_{D3}^{тр}$*, м²·°С/Вт
3.1. Наружные стены	1,94	3,08	5,88
3.2. Окна и балконные двери	0,49	0,51	1,0
3.3. Входные наружные двери	0,79	0,79	1,0
3.4. Совмещенное покрытие	3,68	4,60	11,11
3.5. Перекрытия над проездами и под эркерами	3,68	4,60	11,11
3.6. Цокольное перекрытие над помещениями подземной автостоянки	4,06×0,33=1,34**	4,06×0,33=1,34**	3,85***

Примечания.

* В стандартах европейских стран нормируется не сопротивление теплопередаче *R*, а обратная ей величина – так называемая величина *U*-value, принимаемая равной *U*=1/*R*. Например, в стандарте National Building Code of Finland, Part D3 [3], норми́руемое значение величины *U* для стен составляет 0,17 Вт/м²·°С. Соответственно, обратная ему величина – *R*=1/*U*=1/0,17=5,88 м²·°С/Вт, что и отражено в таблице 3. Аналогичным образом рассчитаны сопротивления теплопередаче для других типов ограждающих конструкций (окон, покрытия, дверей и т.д.).

** Требуемое значение сопротивления теплопередаче цокольного перекрытия над неотапливаемым техническим подвалом (подпольем) рассчитано с учетом вычисленного по уравнению теплового баланса значения температуры воздуха в подполье $t_{подз}$=5,0°С по формуле (5) СНиП 23-02 [2], по формуле (5.3) СП 50.13330.2012 [1].

*** Численное значение сопротивления теплопередаче принято по стандарту National Building Code of Finland, Part D3 как для перекрытия, контактирующего с наполовину отапливаемым помещением (*U*−value=0,26 Вт/м²·°С).

Потери тепловой энергии через оболочку здания

Расчет трансмиссионных потерь тепловой энергии на отопление $Q_{огр}^{г}$, кВт·ч/год, рассматриваемого многоквартирного жилого здания за отопительный период произведем по формуле:

$$Q_{огр}^{г} = 0{,}024 \cdot ГСОП \cdot \sum_{(i)} \frac{A_i}{R_i} \cdot n, \qquad (1)$$

где 0,024 – переводной коэффициент потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции из Вт·сут в кВт·ч (1 сут = 24 ч, 1 Вт = 0,001 кВт, 1 Вт·сут = 0,024 кВт·ч);

ГСОП – градусо-сутки отопительного периода, принятые для жилого здания, расположенного в Санкт-Петербурге, равные 4796 °С· сут/год (см. данные табл. 1);

A_i – площадь *i*-го типа наружной ограждающей конструкции (стены, окна, покрытия и т.д.), принимаемая для рассматриваемого здания по таблице 2;

R_i – приведенное сопротивление теплопередаче *i*-го типа наружной ограждающей конструкции, принятого равным требуемому – $R_0^{тр}$, м²·°С/Вт, из таблицы 3 в зависимости от группы требований по различным нормативам к уровню тепловой защиты, – по СП 50.13330.2012 ($R_{СП}^{тр}$), СНиП 23-02-2003 ($R_{СНиП}^{тр}$), National Building Code of Finland, Part D3 ($R_{D3}^{тр}$) соответственно;

n – коэффициент, учитывающий зависимость положения наружной поверхности ограждающих конструкций (стен, окон, покрытия и т.п.) по отношению к наружному воздуху и уменьшающий разность температур для отдельного ограждения, которое не соприкасается с наружным воздухом; для наружных стен, окон и балконных дверей, совмещенного покрытия, перекрытий над проездами и под эркерами n принимается равным 1, для цокольного перекрытия над помещениями подземной автостоянки, с учетом температуры воздуха в них $t_{подз}$ = 5°С, коэффициент n рассчитан по формуле:

$$n = \frac{(t_в - t_{подз})}{(t_в - t_н)} = \frac{(20-5)}{(20-(-26))} = 0{,}33\,, \qquad (2)$$

где $t_в$ – расчетная средняя температура внутреннего воздуха здания, °С, принимаемая по ГОСТ 30494 [6] для теплотехнического расчета ограждающих конструкций жилых зданий равной 20°С;

$t_{подз}$ – расчетная температура внутреннего воздуха в помещениях подземной автостоянки, принятая для рассматриваемого здания равной ($t_{подз}$ = 5,0°С);

$t_н$ – расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, °С, принимаемая по СНиП 23-01 [4] равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92; для климатических условий Санкт-Петербурга принимаемая равной −26°С.

Рассчитаем по формуле (1) для рассматриваемого многоквартирного жилого здания потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции за отопительный период, используя минимальные требования к уровню тепловой защиты ограждающих конструкций, принятые из таблицы 3 по различным нормативным документам – СП 50.13330.2012 ($Q^г_{огр(СП)}$), СНиП 23-02-2003 ($Q^г_{огр(СНиП)}$), National Building Code of Finland, Part D3 ($Q^г_{огр(D3)}$) соответственно.

Получим:

- по СП 50.13330.2012 – $Q^г_{огр(СП)}$, кВт·ч/год

$$Q^г_{огр(СП)} = 0{,}024 \cdot ГСОП \cdot \sum_{(i)} \frac{A_i}{R^{тр}_i} \cdot n =$$

$$= 0{,}024 \cdot 4796 \cdot \left(\frac{A_{ст}}{R^{тр}_{ст(СП)}} + \frac{A_{ок}}{R^{тр}_{ок(СП)}} + \frac{A_{дв}}{R^{тр}_{дв(СП)}} + \frac{A_{покр}}{R^{тр}_{покр(СП)}} + \frac{A_{перекр}}{R^{тр}_{перекр(СП)}} + n \cdot \frac{A_{ц.перекр}}{R^{тр}_{ц.перекр(СП)}} \right) =$$

$$= 0{,}024 \cdot 4796 \cdot \left(\frac{21\,813{,}0}{1{,}94} + \frac{5\,862{,}8}{0{,}49} + \frac{45{,}3}{0{,}79} + \frac{1\,448{,}5}{3{,}68} + \frac{22{,}5}{3{,}68} + 0{,}33 \cdot \frac{1\,221{,}3}{1{,}34} \right) =$$

$$= 2\,750\,189\ (кВт \cdot ч/год);$$

- по СНиП 23-02-2003 – $Q^г_{огр(СНиП)}$, кВт·ч/год

$$Q^г_{огр(СНиП)} = 0{,}024 \cdot ГСОП \cdot \sum_{(i)} \frac{A_i}{R^{тр}_i} \cdot n =$$

$$= 0{,}024 \cdot 4796 \cdot \left(\frac{A_{ст}}{R^{тр}_{ст(СНиП)}} + \frac{A_{ок}}{R^{тр}_{ок(СНиП)}} + \frac{A_{дв}}{R^{тр}_{дв(СНиП)}} + \frac{A_{покр}}{R^{тр}_{покр(СНиП)}} + \frac{A_{перекр}}{R^{тр}_{перекр(СНиП)}} + n \cdot \frac{A_{ц.перекр}}{R^{тр}_{ц.перекр(СНиП)}} \right) =$$

$$= 0{,}024 \cdot 4796 \cdot \left(\frac{21\,813{,}0}{3{,}08} + \frac{5\,862{,}8}{0{,}51} + \frac{45{,}3}{0{,}79} + \frac{1\,448{,}5}{4{,}60} + \frac{22{,}5}{4{,}60} + 0{,}33 \cdot \frac{1\,221{,}3}{1{,}34} \right) =$$

$$= 2\,208\,286\ (кВт \cdot ч/год);$$

- по стандарту National Building Code of Finland, Part D3 – $Q^{г}_{огр(D3)}$, кВт·ч/год

$$Q^{г}_{огр(D3)} = 0{,}024 \cdot ГСОП \cdot \sum_{(i)} \frac{A_i}{R_i^{тр}} \cdot n =$$

$$= 0{,}024 \cdot 4796 \cdot \left(\frac{A_{ст}}{R^{тр}_{ст(D3)}} + \frac{A_{ок}}{R^{тр}_{ок(D3)}} + \frac{A_{дв}}{R^{тр}_{дв(D3)}} + \frac{A_{покр}}{R^{тр}_{покр(D3)}} + \frac{A_{перекр}}{R^{тр}_{перекр(D3)}} + n \cdot \frac{A_{ц.перекр}}{R^{тр}_{ц.перекр(D3)}} \right) =$$

$$= 0{,}024 \cdot 4796 \cdot \left(\frac{21\,813{,}0}{5{,}88} + \frac{5\,862{,}8}{1{,}0} + \frac{45{,}3}{1{,}0} + \frac{1\,448{,}5}{11{,}11} + \frac{22{,}5}{11{,}11} + \frac{1\,221{,}3}{3{,}85} \right) =$$

$$= 1\,154\,656\ (кВт \cdot ч/год).$$

Результаты расчета трансмиссионных потерь тепловой энергии в здании в течение отопительного периода приведены в таблице 4.

Таблица 4. Годовой расход потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания за отопительный период в зависимости от минимальных требований к уровню тепловой защиты ограждающих конструкций

Результаты расчета по стандарту	Годовой расход тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции (трансмиссионные потери тепловой энергии)		
	кВт·ч/год	МДж/год*	Гкал/год**
СП 50.13330.2012	2 750 189	9 900 680	2 365
СНиП 23-02-2003	2 208 286	7 949 830	1 899
National Building Code of Finland, Part D3	1 154 656	4 156 762	993

В таблице 4 приняты следующие коэффициенты пересчета величин тепловой энергии:
1 кВт·ч/год=3600 кДж/год = 3,6 МДж/год;
1 кВт·ч/год=3600 кДж/год =$3{,}6 \cdot 10^6$ Дж/год = $3{,}6 \cdot 10^6$/4,187 кал/год =$3{,}6 \cdot 10^{-3}$/4,187 Гкал/год =$86 \cdot 10^{-5}$ Гкал/год.

Как видно из данных, представленных в таблице 4, наибольшие потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции за отопительный период (2 365 Гкал/год) наблюдаются для здания, спроектированного по своду правил СП 50.13330.2012 (актуализированной редакции СНиП 23-02-2003), наименьшие – по стандарту Финляндии (993 Гкал). Потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания, спроектированного по минимальным требованиям СНиП 23-02-2003 (1 899 Гкал), окажутся на 20% меньше потерь в здании, спроектированном по своду правил СП 50.13330.2012 (2 365 Гкал), введение в действие которого планируется в следующем году.

Для сравнения подходов разных стран к вопросам энергосбережения, потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания, построенного по нормам Финляндии (993 Гкал), окажутся на 58% (более чем в два раза) меньше, чем в здании, построенном по требованиям СП 50.13330.2012 (2 365 Гкал).

Следует отметить, что во всех европейских странах нормативы потребления тепловой энергии постоянно уменьшаются, а требования к уровню тепловой защиты ограждающих конструкций, соответственно, возрастают [7]. В России, как видно из приведенного примера, противоположная ситуация.

Экономическое сопоставление затрат на отопление

Рассмотрим эту задачу с экономической точки зрения. Стоимость 1 Гкал для Санкт-Петербурга примем равной 1 175 руб. Умножим величину стоимости тепловой энергии (1 175 руб./Гкал) на годовые потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции, рассчитанные в течение одного отопительного периода при различном уровне теплоизоляции наружных ограждений (см. данные табл. 4). Результаты сравнительного экономического расчета для рассматриваемого многоквартирного жилого здания сведены в таблицу 5.

Таблица 5. Годовая стоимость тепловой энергии на отопление здания при учете только потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции

Результаты расчета по стандарту	Годовой расход тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции, Гкал/год	Годовая стоимость тепловой энергии на отопление здания при учете только трансмиссионных потерь, руб./год
СП 50.13330.2012	2 365	2 778 875
СНиП 23-02-2003	1 899	2 231 325
National Building Code of Finland, Part D3	993	1 166 775

Как следует из данных, представленных в таблице 5, с предполагаемым введением новых норм к уровню тепловой защиты (СП 50.13330.2012) жители рассматриваемого многоквартирного здания будут платить на 547 550 рублей больше, т.е. примерно по «лишней» тысяче рублей на квартиру. Но это только в первый год эксплуатации здания. Как известно, тарифы не стоят на месте. Среднегодовой рост тарифов на тепловую энергию в Санкт-Петербурге за последние 10 лет составил 15%. Это означает, что при сохранении динамики роста тарифов на тепловую энергию через пять лет тарифы вырастут в два раза, через 10 лет – в четыре раза, через 20 лет – в восемь раз, т.е. составят уже примерно 8 000 рублей на квартиру. И это с учетом того, что рост тарифов в год не превысит 15%. Такие расходы могут быть не под силу многим горожанам.

Из таблицы 5 также следует, что если уже сегодня мы примем требования к уровню тепловой защиты, равные требованиям стандарта по теплоизоляции Финляндии, то уже в первый год эксплуатации жильцы (в лице управляющей домом компании) сэкономят 1 612 100 рублей (в год) по сравнению с затратами, обусловленными требованиями СП 50.13330.2012. При росте тарифов 15% в год через 5 лет эта разница будет составлять уже 3 224 200 рублей (в год), через 10 лет – 6 448 400 рублей (в год).

Произведем расчет стоимости тепловой энергии на отопление рассматриваемого здания только при учете трансмиссионных потерь тепловой энергии за 10, 30 и 50 лет эксплуатации при различном уровне тепловой защиты ограждающих конструкций (по стандартам СП 50.13330.2012, СНиП 23-02-2003, National Building Code of Finland, Part D3 соответственно) и с учетом динамики роста тарифов 15% в год. Результаты последовательного суммирования расходов жителей рассматриваемого здания на тепловую энергию при учете только трансмиссионных потерь тепловой энергии представлены в таблице 6.

Таблица 6. Результаты последовательного суммирования расходов управляющей компании 25-этажного многоквартирного здания за тепловую энергию при учете только трансмиссионных потерь тепловой энергии (через наружную оболочку здания – стены, покрытие, окна и т.п.) с учетом среднегодового роста тарифов 15% в год

Расчет по стандарту	Общие расходы жильцов многоквартирного здания за тепловую энергию, руб.			
	За первый год эксплуатации	*За 10 лет эксплуатации*	*За 30 лет эксплуатации*	*За 50 лет эксплуатации*
СП 50.13330.2012	2 778 875	56 421 495	1 208 102 419	20 057 131 320
СНиП 23-02-2003	2 231 325	45 304 194	970 057 714	16 105 070 772
National Building Code of Finland, Part D3	1 166 775	23 689 871	507 249 768	8 421 450 909

Примечание. Расходы жильцов здания на тепловую энергию за 10, 30, 50 лет эксплуатации, представленные в таблице 6, произведены по формуле геометрической прогрессии:

$$S_n = \left(a_1 - a_1 \cdot q^m\right) / (1 - q), \qquad (3)$$

где a_1 – расходы жильцов на тепловую энергию в первый год эксплуатации (2 778 875 руб., 2 231 325 руб., 1 166 775 руб. по различным нормативам, принятым для сравнения);

q – среднегодовая норма роста тарифов на тепловую энергию для рассматриваемого примера q =1,15 (15%);

m – рассматриваемый период эксплуатации здания (10, 30 и 50 лет).

Таким образом, мы получаем, что за 10 лет эксплуатации управляющая зданием компания (ТСЖ, ЖСК и т.п.) при переходе на требования к уровню тепловой защиты согласно СП 50.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 23-02-2003) по сравнению с требованиями «устаревшего» стандарта (СНиП 23-02-2003) потратит дополнительно 10,1 млн. рублей за тепловую энергию, за 30 лет эксплуатации – 238 млн. рублей, за 50 лет – почти 4 млрд. рублей. Полагаем, любое ТСЖ предпочтет потратить эти средства на более полезные мероприятия, например, на реконструкцию здания, текущий ремонт кровли и фасадов, замену вышедшего из строя оборудования, а не на то, чтобы отапливать пространство вокруг здания.

Напомним, что расчеты, представленные в таблице 6, выполнены для одного 25-этажного жилого многоквартирного здания.

Сравнение расходов жильцов здания на тепловую энергию за 10, 30 и тем более 50 лет эксплуатации при проектировании здания по российским (СНиП 23-02-2003, СП 50.13330.2012) и по финским (National Building Code of Finland, Part D3) нормативам представляется неуместным. Данные, представленные в таблице 6, отчетливо показывают различия двух стран в подходе к вопросам энергосбережения. Безусловно, Финляндия не обладает таким количеством природных ресурсов как Россия. Поэтому энергосбережение для Финляндии, как и для большинства других европейских стран, особенно с учетом постоянного (в долгосрочной перспективе) роста цен на энергоносители, является более актуальной проблемой и задачей. Стремясь понизить зависимость от поставщиков энергоресурсов, они развивают свой рынок инновационными продуктами, материалами и технологиями в области энергосбережения, все чаще используют для энергоснабжения зданий возобновляемые источники энергии (такие как солнечные коллекторы, ветроэнергетические установки, грунтовые насосы и т.д.). Европейские страны повышают требования к уровню теплоизоляции ограждающих конструкций, тем самым снижая энергопотребление зданий.

Рассмотрим выбранное нами типовое проектируемое здание в отношении затрачиваемых на его отопление топливно-энергетических ресурсов (далее по тексту – ТЭР).

Расход топливно-энергетических ресурсов при различных уровнях тепловой защиты

Определим годовой расход ТЭР при различных требованиях к уровню тепловой защиты на примере того же 25-этажного жилого многоквартирного здания.

Годовой расход топливно-энергетических ресурсов в здании $Q^{г}_{ТЭР}$, килограмм условного топлива в год (далее по тексту, – кг.у.т./год), при учете только трансмиссионных потерь тепловой энергии, определим по формуле:

$$Q^{г}_{ТЭР} = \left(Q^{г}_{огр} \cdot 10^6\right) / Q_{усл.т}, \quad (4)$$

где $Q^{г}_{огр}$ – годовой расход тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания за отопительный период, Гкал/(год), принимается по данным таблицы 4;
10^6 – коэффициент пересчета годового расхода тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания за отопительный период из Гкал/год в ккал/год;
$Q_{усл.т}$ – теплота сгорания условного топлива, принимаемая равной 7000 ккал/кг.у.т.

По формуле (4) произведем расчет годового расхода ТЭР при учете потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания за отопительный период при различных требованиях к минимальному уровню тепловой защиты ограждающих конструкций.

Получим:

- по СП 50.13330.2012 – $Q^{г}_{ТЭР(СП)}$, кг.у.т./год

$$Q^{г}_{ТЭР(СП)} = \left(Q^{г}_{огр(СП)} \cdot 10^6\right) / Q_{усл.т} = 2\,365 \cdot 10^6 / 7\,000 = 337\,857 \left(кг\ у.т./год\right);$$

- по СНиП 23-02-2003 – $Q^{г}_{ТЭР(СНиП)}$, кг.у.т./год

$$Q^{г}_{ТЭР(СНиП)} = \left(Q^{г}_{огр(СНиП)} \cdot 10^6\right) / Q_{усл.т} = 1\,899 \cdot 10^6 / 7\,000 = 271\,286 \left(кг\ у.т./год\right);$$

- по National Building Code of Finland, Part D3 – $Q^{г}_{ТЭР(D3)}$, кг.у.т./год

$$Q^{г}_{ТЭР(D3)} = \left(Q^{г}_{огр(D3)} \cdot 10^6\right) / Q_{усл.т} = 993 \cdot 10^6 / 7\,000 = 141\,857 \left(кг\ у.т./год\right).$$

Необходимо отметить, что расчет ТЭР по формуле (4) учитывает только потери при отоплении непосредственно в здании. С учетом того, что, дополнительно к трансмиссионным затратам, значительная часть тепловой энергии расходуется на транспортировку теплоносителя от котельной к зданию, а также на производство тепловой энергии в котельной, то реально суммарные затраты ТЭР будут для рассматриваемого здания в 2-2,5 раза выше рассчитанных по формуле (4). Результаты расчета представлены в таблице 7.

Таблица 7. Годовые затраты ТЭР на обеспечение эксплуатационных расходов по тепловой энергии для 25-этажного многоквартирного жилого здания при учете только трансмиссионных потерь тепловой энергии, кг.у.т./год

Результаты расчета по стандарту	Годовой расход тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции, Гкал/год	Годовой расход ТЭР на отопление здания при учете только трансмиссионных потерь тепловой энергии, кг.у.т./год
СП 50.13330.2012	2 365	337 857
СНиП 23-02-2003	1 899	271 286
National Building Code of Finland, Part D3	993	141 857

В таблице 7 представлены результаты расчета ТЭР, расходуемых непосредственно в здании. С учетом потерь тепловой энергии при производстве и транспортировке ТЭР затраты первичных ресурсов (нефти, газа и т.п.) будут в несколько раз выше по сравнению с данными, представленными в таблице.

Произведем расчет ТЭР на отопление рассматриваемого здания только при учете трансмиссионных потерь тепловой энергии за 10, 30 и 50 лет эксплуатации здания при различном уровне тепловой защиты ограждающих конструкций (по стандартам СП 50.13330.2012, СНиП 23-02-2003, National Building Code of Finland, Part D3 соответственно). Результаты последовательного суммирования затрат ТЭР представлены в таблице 8.

Таблица 8. Результаты последовательного суммирования затрат ТЭР на отопление 25-этажного многоквартирного жилого здания при учете только трансмиссионных потерь тепловой энергии за 10, 30 и 50 лет эксплуатации здания

Расчет по стандарту	Затраты ТЭР на отопление рассматриваемого здания, кг.у.т.			
	За первый год эксплуатации	*За 10 лет эксплуатации*	*За 30 лет эксплуатации*	*За 50 лет эксплуатации*
СП 50.13330.2012	337 857	3 378 570	10 135 710	16 892 850
СНиП 23-02-2003	271 286	2 712 860	8 138 580	13 564 300
National Building Code of Finland, Part D3	141 857	1 418 570	4 255 710	7 092 850

Из данных, представленных в таблице 8, следует, что за 10 лет эксплуатации при переходе на стандарт СП 50.13330 в рассматриваемом здании будет дополнительно затрачено (3 378 570 – 2 712 860) = 665 710 кг.у.т. ≈ 665,7 тонн условного топлива (далее по тексту – т.у.т.), а с учетом затрат на производство и транспортировку ТЭР – минимум 1 331,4 т.у.т. За 50 лет эксплуатации при новых, «облегченных» стандартах дополнительные потери ТЭР в рассматриваемом здании через наружные ограждения составят примерно 3 280 т.у.т., а с учетом их транспортировки и производства – более 6 560 т.у.т. И это результаты в отношении только одного многоквартирного жилого здания.

Заключение

В европейских странах тренд на проектирование и строительство зданий с низким потреблением энергии является в настоящее время определяющим вектором развития строительной отрасли [6-8]. Во всех странах мира с целью снижения потребления зданиями тепловой энергии требования к уровню теплоизоляции наружных ограждающих конструкций (стен, окон, покрытий и др.) постоянно повышаются, что стимулирует разработку инновационных энергоэффективных инженерных технологий и строительных материалов.

В настоящее время в нашей стране уже появляется интерес к проектированию и строительству зданий с низким и нулевым потреблением энергии. Появляются монографии и публикации на эту тему [10-14]. Многие понимают, что запасы нефтяных и газовых ресурсов не бесконечны. Это означает, что стоимость энергоресурсов в долгосрочной перспективе будет только возрастать [15-20]. Соответственно, будут возрастать затраты на эксплуатацию зданий, увеличиваться энергетическая составляющая производимых товаров и предоставляемых услуг. В Российской Федерации уже реализуются программы по энергосбережению в зданиях не только в мегаполисах, но и на региональном уровне.[21, 22].

В данной статье для различных уровней тепловой защиты многоквартирного жилого здания расчетным методом был произведен анализ потерь тепловой энергии через оболочку здания, оценен расход топливно-энергетических ресурсов, экономически сопоставлены затраты на отопление зданий с различным уровнем теплоизоляции ограждающих конструкций. По итогам исследования получены следующие результаты.

1. Чем выше уровень теплоизоляции ограждающих конструкций здания, тем меньше оказываются потери тепловой энергии на его отопление в течение отопительного периода. Из этого следует, что меньше тепла требуется подвести к отопительным приборам здания, и расходы жильцов за отопление, особенно в случае установки приборов учета тепловой энергии (общедомовых или поквартирных) могут оказаться значительно ниже.
2. Потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания, построенного по минимальным требованиям свода правил СП 50.13330.2012, введение в действие которого планируется с 2013 года, окажутся на 20% больше по сравнению с аналогичным зданием, при проектировании которого приняты минимальные требования из действующего стандарта по тепловой защите СНиП 23-02-2003.
3. Потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания, построенного по минимальным требованиям к уровню тепловой защиты согласно свода правил СП 50.13330.2012, окажутся на 58% (более чем в два раза) больше по сравнению со зданием, построенным согласно минимальным требованиям стандарта Финляндии (National Building Code of Finland, Part D3), – страны близкой к северо-западу России по климатическим условиям (продолжительности отопительного периода и средней температуры наружного воздуха за отопительный период).
4. С предполагаемым введением новых норм к уровню тепловой защиты для ограждающих конструкций (СП 50.13330.2012) жители рассматриваемого в статье 25-этажного многоквартирного здания в первый год эксплуатации будут платить на 547 550 рублей больше по сравнению с жителями здания, построенного по минимальным требованиям СНиП 23-02-2003, и на 1 612 100 рубля больше по сравнению с жителями здания, построенного по минимальным требованиям к уровню тепловой защиты (теплоизоляции) из стандарта Финляндии (National Building Code of Finland, Part D3).
5. За 10 лет эксплуатации управляющая зданием компания (ТСЖ, ЖКС и т.п.) при переходе на требования к уровню тепловой защиты согласно СП 50.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 23-02-2003) по сравнению с требованиями действующего стандарта (СНиП 23-02-2003) потратит дополнительно 10,1 млн. рублей за тепловую энергию, за 30 лет эксплуатации – 238 млн. рублей, за 50 лет – почти 4 млрд. рублей с учетом среднегодового роста тарифов на тепловую энергию не более 15%.
6. За 10 лет эксплуатации при переходе на требования стандарта СП 50.13330 в рассматриваемом многоквартирном жилом здании будет дополнительно затрачено 665,7 т.у.т., а с учетом затрат на производство и транспортировку ТЭР к зданию – минимум 1 331,4 т.у.т. За 50 лет эксплуатации при новых, «облегченных» стандартах к уровню тепловой защиты дополнительные потери ТЭР в здании через наружные ограждения составят примерно 3 280 т.у.т., а с учетом их транспортировки к зданию и производства – более 6 560 т.у.т. (6,56 млн кг.у.т.). Эти бесполезные потери ТЭР будут затрачены на нагрев температуры наружного воздуха вблизи эксплуатируемого здания, помещения котельной, теплотрасс (проталины на земле в месте прокладки трубопроводов), т.е. будут «выброшены» на улицу.

Литература

1. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий (актуализированная редакция СНиП 23-02-2003, – предполагается к введению в действие с 2013 года).
2. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий (действующая редакция).
3. National Building Code of Finland, Part D3.
4. СНиП 23-01-99*Строительная климатология (действующая редакция).
5. Токио. Информация об объекте [Электронный ресурс] / Инвестиционно-строительная компания SeltCity. URL: http://setlcity.ru/projects/builds/live/id58/ (дата обращения: 03.12.12).
6. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
7. Сормунен П. Энергоэффективность зданий. Ситуация в Финляндии // Инженерно-строительный журнал. 2010. №1. С. 7-8.
8. Jormalainen J., Käkelä P. Sustainability of Polyurethane Thermal Insulation // 9-th Nordic Symposium on Building Physics. 2011. Tempere, Finland.
9. Life cycle environmental and economic analysis of polyurethane insulation in low energy buildings. BRE Global 2010 Client report number 254–665. Brussels, Belgium. 121 p.
10. Шилкин Н. В. «Пассивные» здания: возможности современного строительства // Энергосбережение. 2011. №4. С. 34–40.
11. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М., Шилкин Н. В. Энергоэффективные здания. М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. 100 с.
12. Дмитриев А. Н. Пассивные здания. Перспективы проектирования и строительства зданий с низким уровнем энергопотребления // СтройПРОФИль. 2005. №2-1. С. 23-24.
13. Ehhort H., Reiss J., Hellwig R. Энергоэффективные здания. Анализ современного состояния и перспектив развития на основе реализованных проектов // АВОК. 2006. №2. С. 36–49.
14. Орлов О., Следь И., Петров К., Рысь И., Урустимов А. Конкурс «Архитектурная концепция здания с нулевым потреблением энергии» // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №1. С. 53-60.
15. Кононов Ю. Д., Кононов Д. Ю. Долгосрочное прогнозирование динамики цен на российских энергетических рынках // Проблемы прогнозирования. 2005. №6. С. 53-60.
16. Азарова А. И. Изменение спроса и цены на энергоносители // Проблемы учета и финансов. 2012. №2. С. 65-74.
17. Кононов Ю. Д. Прогноз цен и спроса на энергоносители в предпринимательской деятельности // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2011. №6. С. 33-33.
18. Суслов Н. И., Черная Н. В. Тенденции соотношения цен на энергоносители: ретроспективный анализ // Регион: Экономика и Социология. 2010. №4. С. 264-274.
19. Воронина Н. В. Прогноз динамики мировых цен на нефть // Российский внешнеэкономический вестник. 2006. №4. С. 27-41.
20. Ильенко И. В., Кислова Л. П. Динамика цен на нефть и ее влияние на экономику России // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. №3. С. 22-23.
21. Аверьянов В. К. [и др.] Региональная концепция обеспечения энергетической эффективности жилых и общественных зданий // Жилищное строительство. 2012. №3. С. 2-4.
22. Горшков А. С., Байкова С. А., Крянев А. С. Нормативное и законодательное обеспечение государственной программы об энергосбережении и повышении энергетической эффективности зданий и пример ее реализации на региональном уровне // Инженерные системы. АВОК Северо-Запад. 2012. №3. С. 24-32.

**Александр Сергеевич Горшков, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(921) 388-43-15; эл. почта: alsgor@yandex.ru

© Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С., 2012

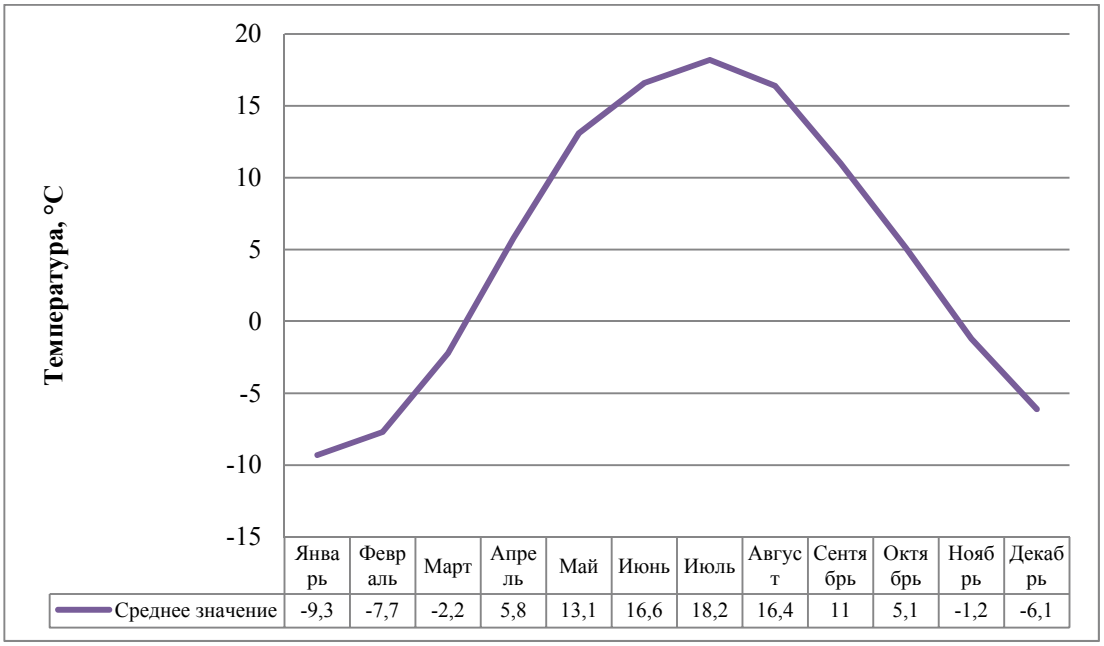
Оценка рисков устройства фасадных теплоизоляционных композиционных систем при суточных колебаниях температуры воздуха ниже +5°С

К.т.н., заведующий НИИЛ Климатических испытаний С.А. Пашкевич*;
к.т.н., директор НИИ СМИТ А.П. Пустовгар;
м.н.с. А.О. Адамцевич,
ФГБОУ ВПО Московский государственный строительный университет

Ключевые слова: гидратация; температура; модель; система; испытание

Правильный выбор технологии производства работ по устройству систем фасадных теплоизоляционных композиционных (далее по тексту – СФТК) является одним из основополагающих факторов обеспечения высоких эксплуатационных характеристик конечного продукта. Существенную роль при проведении работ по устройству СФТК играет температурный режим [1]. По данным [2], допустимые температурные условия протекания процессов гидратации большинства гидравлических вяжущих находятся в интервале (+5…+30)°С, производители СФТК не рекомендуют проводить работы по устройству штукатурных слоев при среднесуточных температурах ниже отметки +5°С. Это связано с повышенным риском замерзания свежеуложенного штукатурного раствора, приводящему к деструктивными изменениям поровой структуры материала и снижением его эксплуатационных характеристик, что показано в работах [3-6].

Для решения данной проблемы ряд производителей СФТК предлагает линейку «зимних» продуктов, содержащих в своем составе модифицирующие добавки, позволяющие проводить работы по устройству штукатурных слоев при среднесуточных колебаниях температуры ниже +5°С. Обоснованность такого решения подтверждается результатами исследований [7-17]. Несмотря на это, большинство отечественных компаний завершают штукатурные работы до начала периода преобладания пониженной температуры ввиду технологических и экономических аспектов. Эти аспекты связаны как с высокой по отношению к базовому продукту стоимостью «зимних» материалов, так и с технологическими особенностями производства штукатурных работ при пониженных температурах.

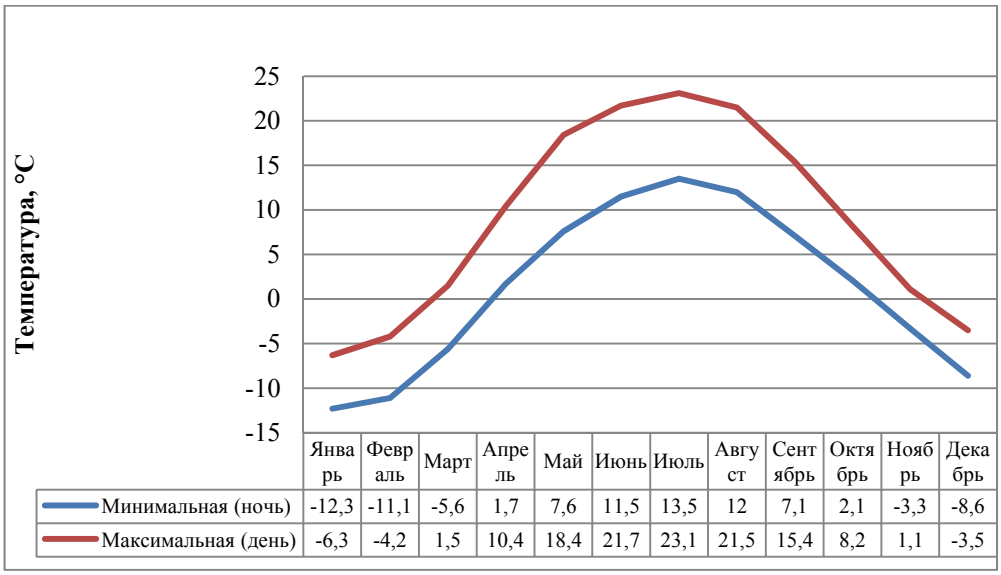


	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Среднее значение	-9,3	-7,7	-2,2	5,8	13,1	16,6	18,2	16,4	11	5,1	-1,2	-6,1

Рисунок 1. Значения среднесуточной температуры для Москвы

Стоит отметить, что период со среднесуточной температурой +5°С является весьма условным и зачастую при производстве штукатурных работ принимает фактическое значение, зафиксированное на момент монтажа. На рис. 1 отображены данные о среднесуточной температуре воздуха для Москвы (по данным Гидрометцентра России).

Падение температуры ниже предельно допустимого значения в ночное время, а также непрогнозируемые заморозки повышают риск снижения эксплуатационных характеристик штукатурных слоев за счет замедления (или прекращения) процессов гидратации гидравлических вяжущих в составе свежеуложенных штукатурных растворов. На рис. 2 приведены данные о суточных колебаниях температуры для г. Москвы (по данным Гидрометцентра России).



	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Минимальная (ночь)	-12,3	-11,1	-5,6	1,7	7,6	11,5	13,5	12	7,1	2,1	-3,3	-8,6
Максимальная (день)	-6,3	-4,2	1,5	10,4	18,4	21,7	23,1	21,5	15,4	8,2	1,1	-3,5

Рисунок 2. Суточные колебания температуры воздуха для Москвы

Для оценки рисков снижения эксплуатационных характеристик штукатурных слоев было проведено полномасштабное лабораторное моделирование процесса производства работ по устройству штукатурных слоев СФТК при нестабильных суточных колебаниях температуры воздуха.

В качестве экспериментальной установки использовался мобильный стенд для испытаний фасадных покрытий WK’10/40-90* (рис. 3) с достаточным количеством места для размещения в нем небольшой группы рабочих.

Рисунок 3. Мобильный стенд для испытаний фасадных покрытий WK’10/40-90*

Для построения модели климатических испытаний были проанализированы данные Гидрометцентра России о значениях среднесуточной температуры (рис. 1) и суточных колебаниях температуры воздуха (рис. 2). По результатам анализа были выбраны схожие температурные условия апреля и октября. Ежесуточные нормы средней температуры воздуха для данных месяцев приведены на рис. 4-5.

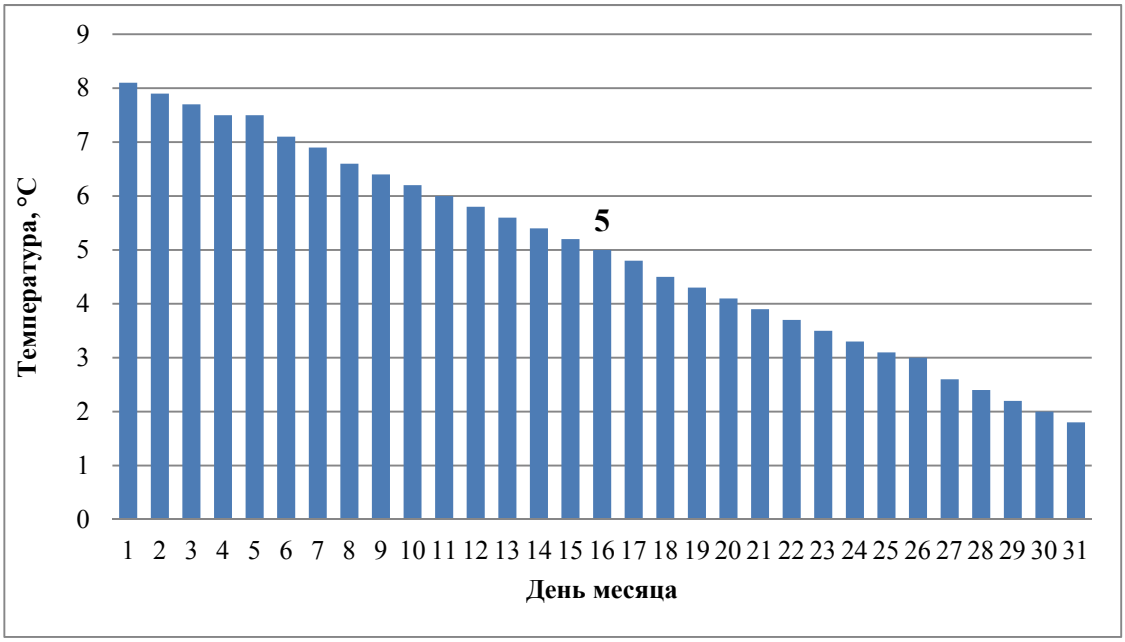


Рисунок 4. Ежесуточные нормы средней температуры воздуха октября для Москвы

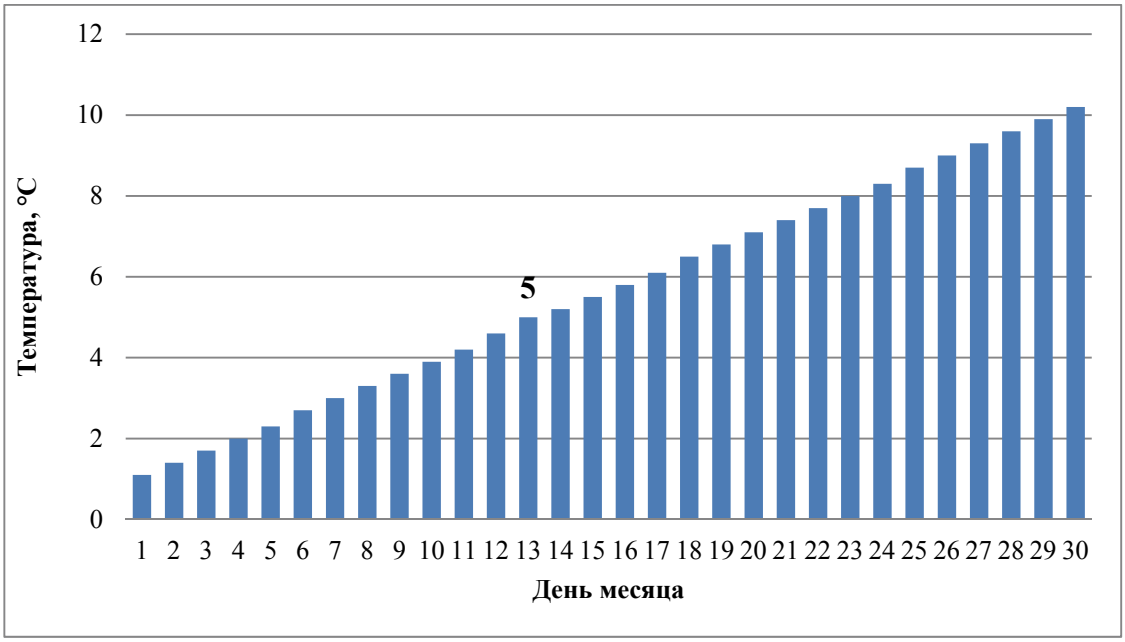


Рисунок 5. Ежесуточные нормы средней температуры воздуха апреля для Москвы

Сводная детализация изменения температуры воздуха в течение суток в дни месяцев с условно стабильным преобладанием температуры +5°С (15 октября и 13 апреля) представлена на рис. 6.

Как видно из рис. 6, несмотря на преобладание в дневные часы температуры выше +5°С, сохраняется риск снижения температуры в утреннее и вечернее время, что может приводить к замедлению процессов гидратации гидравлического вяжущего вещества в составе штукатурного раствора при производстве работ в данный временной интервал и негативно влиять на эксплуатационные характеристики конечного продукта.

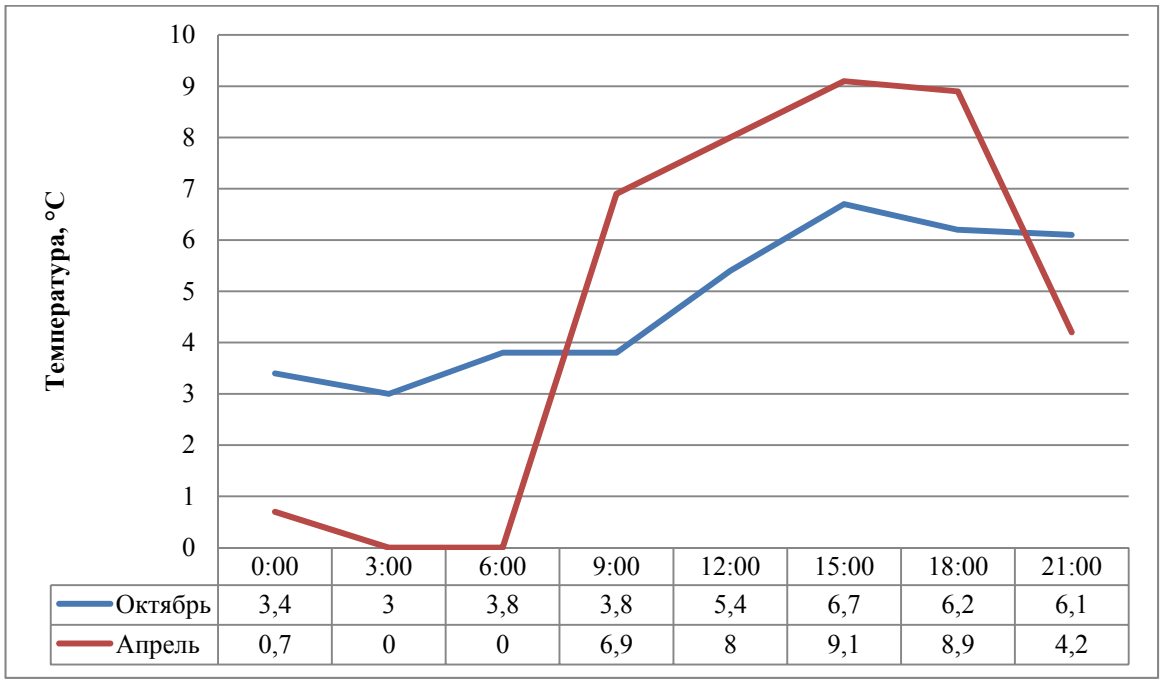


Рисунок 6. Сводная детализация изменения температуры в течение суток (15 октября и 13 апреля) для Москвы

На основании проведенного климатологического анализа производства работ по устройству штукатурных слоев СФТК и данных о существующих методах испытаний штукатурных покрытий, твердеющих при отрицательной температуре [18], была построена оптимальная модель проведения климатических испытаний при суточных колебаниях температуры воздуха ниже +5°С – рис. 7.

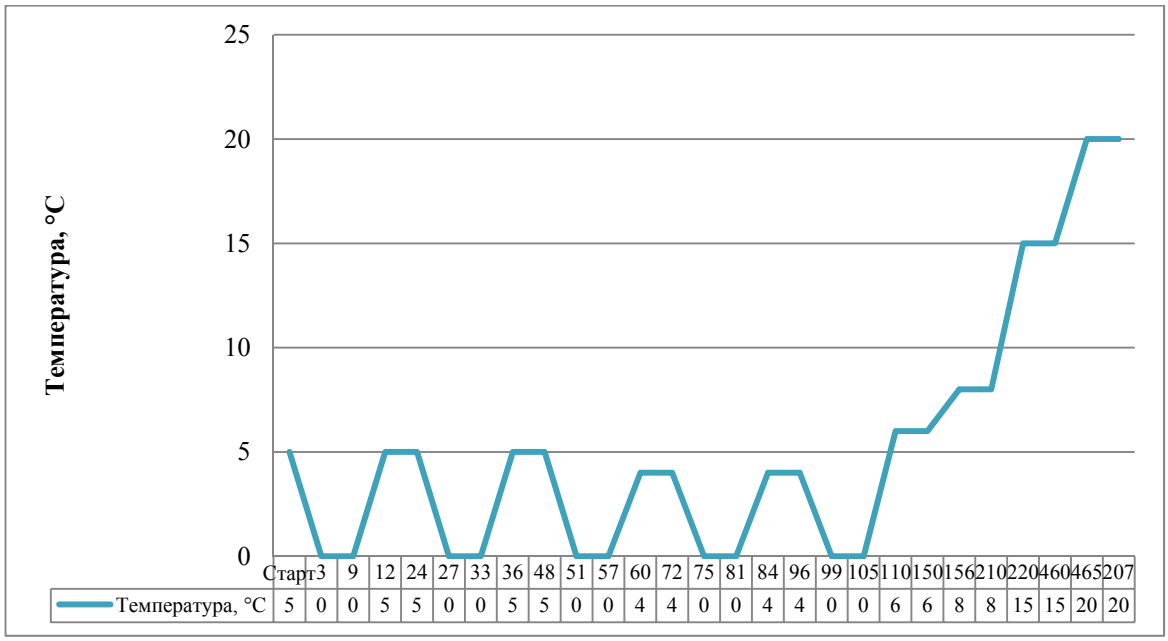


Рисунок 7. Графическая модель климатических испытаний

С учетом сравнительно небольших размеров опытного образца и необходимости получения выходных данных об эксплуатационной надежности СФТК цикл климатических испытаний был условно разбит на 2 части. В первой части производились работы по устройству штукатурных слоев с последующим циклическим температурным нагружением, во второй части – повышение температуры до значения +20°С, выдержка до достижения 28-суточного возраста и подготовка к проведению лабораторных испытаний.

Проведение лабораторных исследований по представленной методике климатических испытаний осуществлялось следующим образом: в первую очередь оценивались риски проведения работ по устройству базового штукатурного слоя, затем – по устройству защитно-декоративного штукатурного слоя СФТК. В обоих случаях устройство соответствующего штукатурного слоя осуществлялось на заранее установленное при нормальных температурно-влажностных условиях основание (теплоизоляционный и базовый штукатурный слои). Таким образом, была определена вариативная модель проведения работ на строительной площадке.

Оценка состояния штукатурных слоев по окончании климатических испытаний производилась визуальным и инструментальным методами. При визуальном контроле оценивалось наличие видимых разрушений базового штукатурного и защитно-декоративного слоев [19]. Инструментальному контролю подлежала оценка показателей адгезии базового штукатурного слоя к теплоизоляционному слою, ударная прочность базового штукатурного слоя и сопротивление пробою (по ETAG 004) защитно-декоративного штукатурного слоя.

По результатам визуального контроля не было обнаружено видимых повреждений, однако инструментальный контроль выявил значительное снижение эксплуатационных характеристик системы.

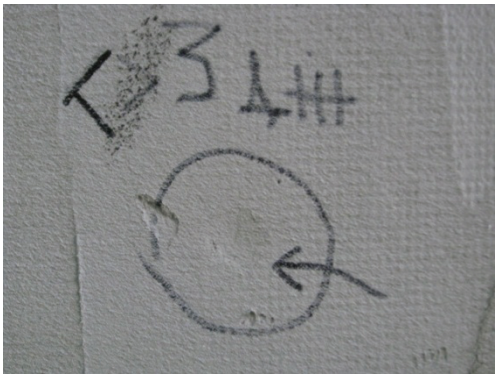
1. Среднее значение адгезионной прочности к теплоизоляционному слою составило 0,09 МПа, что ниже минимально допустимого значения в 0,1 МПа – рис. 8 (а-б).

а) Адгезионная прочность 0,09 МПа. Отрыв по границе

б) Адгезионная прочность 0,09 МПа. Отрыв по границе

Рисунок 8. Адгезия базового штукатурного слоя после проведения климатических испытаний

2. Ударная прочность на некоторых участках составила ≤ 3 Дж, при рекомендуемом значении > 3 Дж – рис. 9 (в-г).



а) Ударная прочность < 3 Дж. Трещина в месте удара

б) Ударная прочность = 3 Дж. Вмятина в месте удара

Рисунок 9. Ударная прочность базового штукатурного слоя после проведения климатических испытаний

Оценка состояния защитно-декоративного слоя по окончании климатических испытаний выявила нарушения структуры поверхности, характеризуемые растрескиванием и частичным разрушением защитно-декоративного слоя – рис. 10.

а) частичное разрушение **б) трещина**

Рисунок 10. Состояние защитно-декоративного слоя после проведения климатических испытаний

Пробой защитно-декоративного слоя был зафиксирован для максимального диаметра бойка 20 мм (по ETAG 004), что является недопустимым при эксплуатации системы скрепленной теплоизоляции – рис. 11.

а) сквозной пробой при ударе бойка Ø20 мм **б) сквозной пробой при ударе бойка Ø20 мм**

Рисунок 11. Сопротивление пробою защитно-декоративного слоя после проведения климатических испытаний

Выводы

В результате проведенных исследований было показано, что падение температуры воздуха ниже значения +5°С на начальном этапе твердения штукатурных слоев приводит к снижению базовых показателей СФТК: адгезионной и ударной прочности. Кроме того, на поверхности исследуемого образца были обнаружены трещины, что указывает на появление гидравлических напряжений в цементной системе штукатурного слоя при снижении температуры твердения с последующим деструктивным изменением поровой структуры материала.

Таким образом, при проведении работ по устройству штукатурных слоев СФТК при прогнозируемых суточных колебаниях температуры воздуха ниже +5°С следует строго руководствоваться требованиями производителя СФТК в части применения «зимних» продуктов, содержащих в своем составе специальные модифицирующие добавки.

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

Литература

1. Ortiz J., Aguado A., Agulló L., García T., Zermeño M. Influence of environmental temperature and moisture content of aggregates on the workability of cement mortar // Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23. Issue 5. Pp. 1808-1814.
2. Hewlett P. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Oxford, United Kingdom, 2004. 1066 p.
3. Matschei T., Glasser F. P. Temperature dependence, 0 to 40°C, of the mineralogy of Portland cement paste in the presence of calcium carbonate // Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40. Issue 5. Pp. 763-777.
4. Пашкевич С. А., Адамцевич А. О., Пустовгар А. П., Голунов С. А., Шишияну Н. Н. Исследование формирования поровой структуры цементных систем, твердеющих при пониженных и отрицательных температурах // Вестник МГСУ. 2012. №3. С. 115-120.
5. Пашкевич С. А., Адамцевич А. О., Пустовгар А. П., Соловьев В. Г. Взаимосвязь прочности и пористости штукатурных растворов СФТК, твердеющих при пониженной положительной и малой отрицательной температуре // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: научное издание. М., 2012. С. 439-444.
6. Ушеров-Маршак А. В., Сопов В. П., Златковский О. А. Физико-химические основы влияния мороза на твердение бетона. Науково-практичні проблеми сучасного залізобстона. Киев: НДІБК, 1999. Вип. 50. С. 391-394.
7. Cheung J., Jeknavorian A., Roberts L., Silva D. Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. Issue 12. Pp. 1289-1309.
8. Ramachandran V.S. Concrete Admixtures Handbook New York: William Andrew, 1996. Pp. 740–799.
9. Пашкевич С. А., Нормантович А. С., Голунов С. А., Пустовгар А. П. Сухие строительные смеси для монтажа СФТК при пониженных и отрицательных температурах // Российский ежегодник ССС. 2012. С. 18-26.
10. Пашкевич С. А., Пустовгар А. П., Голунов С. А., Адамцевич А. О. Применение противоморозных добавок в базовых штукатурных составах систем фасадной скрепленной теплоизоляции // Строительные материалы. 2011. №8. С. 44-46.
11. Розенберг Т. И. [и др.]. Исследование процессов льдообразования в «холодных» бетонах // Вопросы строительства. Рига: Звайгзне, 1974. Вып. 3. С. 89-96.
12. Миронов С. А. Теория и методы зимнего бетонирования. М.: Стройиздат, 1975. 701 с.
13. Миронов С. А., Лагойда А. В. Бетоны, твердеющие на морозе. М.: Стройиздат, 1975. 265 с.
14. Розенберг Т. И., Мамедов А. А. О влиянии комплексных добавок на процессы гидратации и свойство бетона, замороженного на ранних стадиях твердения // Труды ВНИИСТ. М., 1978. С. 89-96.
15. Розенберг Т. И. [и др.]. Исследование процессов твердения бетонов с комплексными добавками при температуре ниже 0°С // Труды Международного симпозиума по зимнему бетонированию. М.: Стройиздат, 1975. С. 152-162.
16. Саввина Ю. А., Лейтрих В. Э., Серб-Сербина Н. Н. Процессы твердения и свойства «холодного» бетона. Куйбышев: Оргэнергострой, 1957. 180 с.
17. Умань Н. И., Сватовская Л. Б., Овчинникова В. П. Твердение цементных минералов при пониженных температурах // Цемент. 1998. №5-6. С. 26-28.
18. Пашкевич С. А., Пустовгар А. П., Голунов С. А. Методы испытаний штукатурных фасадных покрытий, твердеющих при отрицательных температурах // Вестник МГСУ. 2011. Т. 2. №3. С. 180-185.
19. Roland N., Harmuth H. Mechanical and fracture mechanical characterization of building materials used for external thermal insulation composite systems // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35. Issue 8. Pp. 1641-1645.

** Станислав Александрович Пашкевич, Москва, Россия*

Тел. моб.: +7(926)656-4966; эл. почта: pashkevich86@mail.ru

© Пашкевич С.А., Пустовгар А.П., Адамцевич А.О., 2012

Работа штукатурных покрытий в составе современных теплоэффективных наружных стен зданий

Д.т.н., профессор В.В. Бабков;
к.т.н., старший преподаватель Д.А. Синицын;
к.т.н., доцент А.Е. Чуйкин;
аспирант Р.С. Кильдибаев*;
аспирант О.А. Резвов,
ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет

Ключевые слова: штукатурка; напряжения в штукатурном слое; модуль упругопластичности

В последние годы в связи с появлением конструктивных решений многослойных теплоэффективных стен в практике проектирования и строительства зданий возросло применение защитно-декоративных штукатурных составов, включающих комплекс химических добавок, улучшающих технологические и эксплуатационные свойства штукатурных покрытий. Комплексные защитные штукатурные системы сегодня применяются в системах фасадной теплоизоляции в виде защитного слоя на поверхности пенополистирольных или минераловатных плит, формирующих теплоизоляционный слой, для наружной отделки стен из газобетонных блоков, для оштукатуривания кирпичной кладки при санации эксплуатирующихся зданий, в частности, жилых домов старых массовых серий [1-4].

В ГОСТ 31357-2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем» нормируемыми показателями для затвердевшего защитного раствора являются предел прочности на сжатие, водопоглощение, водонепроницаемость, прочность сцепления с основанием (адгезия), морозостойкость. Вместе с тем очевидно, что штукатурное покрытие на поверхности наружной стены под действием усадки и перепадов температур работает преимущественно на растяжение, при этом в действующих нормативах совершенно отсутствует такой показатель, как предельная растяжимость штукатурок. В литературе имеются данные по предельной растяжимости бездобавочных цементно-песчаных растворов [5]. Однако современные штукатурные смеси имеют в своем составе добавки, которые значительно повышают предельную растяжимость штукатурных составов, что способствует повышению их трещиностойкости [6-10]. Кроме того, в нормативных документах не нормируется усадка штукатурных растворов, хотя именно усадочные напряжения являются одним из главных факторов, обусловливающих растрескивание штукатурок. Нормируемые значения адгезии указываются только в зависимости от назначения штукатурного раствора, в то же время не учитывается прочность основы, на которую он наносится.

Целью данной работы является исследование физико-механических характеристик, наиболее значимых для штукатурных растворов с учетом особенностей их работы в качестве покрытия на фасадах зданий, и определение оптимальных параметров штукатурных растворов, обеспечивающих их работоспособность в составе наружных теплоэффективных стен.

Как уже говорилось, одним из главных факторов, приводящих к образованию трещин в штукатурном покрытии на цементной основе и потере сцепления раствора с основанием, является усадка. Усадка раствора происходит в условиях стесненности деформаций, что приводит к развитию в штукатурном слое напряжений растяжения. Величина свободной (нестесненной) усадки штукатурного раствора для цементных растворов, по данным авторов [11, 12], составляет в среднем около $40 \cdot 10^{-5}$, этот уровень усадочных деформаций используется в последующих расчетах. Помимо деформаций усадки, штукатурное покрытие подвергается также и температурным деформациям. В значительной степени эти деформации повторяет основа, однако в силу определенной разницы коэффициентов линейного расширения основы и штукатурки в штукатурном покрытии также развиваются термомеханические напряжения. Температурные деформации суммируются с усадочными, при этом их суммарное значение может достигать $80\text{-}100 \cdot 10^{-5}$. В том случае, когда суммарные температурно-усадочные растягивающие напряжения превысят прочность раствора на растяжение, в штукатурном покрытии образуются трещины [13-15].

В связи с вышеизложенным представляет интерес количественная оценка напряжений растяжения в штукатурных слоях, касательных напряжений и напряжений отрыва на границе штукатурного слоя и основы в условиях стесненной усадки и перепада температур.

В работе [16] рассмотрен случай однослойной штукатурки толщиной δ, нанесенной на жесткую основу в виде стеновой кладки или бетонной конструкции (см. рисунок 1). Штукатурка работает совместно с основой за счет сцепления по границе двух фаз. Учитывая, что $\delta << l_x$, l_y, где l_x, l_y – линейные размеры штукатурного покрытия в направлениях 0x, 0y, можно считать, что напряжения в пределах слоя в направлении 0z практически равны нулю и штукатурный слой находится в условиях плоского напряженного состояния.

Для случая плоского напряженного состояния связь между нормальными напряжениями и деформациями в направлении 0x описывается уравнением:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \mu \frac{\sigma_y}{E}, \quad (1)$$

где E и μ – значения модуля упругости и коэффициента Пуассона материала покрытия.

В рассматриваемом случае в зоне, достаточно удаленной от края элемента (на расстоянии > 4…5 δ), $\sigma_x = \sigma_y$. Поэтому для напряжений растяжения в покрытии применительно к любой разнице свободных деформаций покрытия и основы $\Delta\varepsilon_x$, формирующей растяжение слоя покрытия (в силу разности деформаций усадки, разности температурных деформаций основы и покрытия), будем считать:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\Delta\varepsilon_x \cdot E}{1-\mu}. \quad (2)$$

С учетом упругопластического поведения материала штукатурки в стадии ее работы перед образованием трещин будем иметь:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\Delta\varepsilon_x \cdot \nu_t \cdot E}{1-\mu}, \quad (3)$$

где vt < 1 – коэффициент упругопластических деформаций раствора при растяжении.

Выполним количественную оценку растягивающих напряжений, возникающих в условиях проявления усадки штукатурного слоя на основе бездобавочного цементно-песчаного раствора. Рассмотрим случай, когда усадочные проявления основы, на которую нанесена штукатурка, практически полностью завершены, т.е. $\Delta\varepsilon_x = \varepsilon_{sh}$, где ε_{sh} – усадочная деформация штукатурки, а жесткость основы абсолютна. Применительно к цементно-песчаному раствору марки 50 по прочности на сжатие принимаем значение начального модуля упругости $E \approx 6 \cdot 10^3$ МПа (по аналогии с мелкозернистым бетоном естественного твердения группы Б согласно СНиП 2.03.01-84*). Считая для цементно-песчаного раствора состава 1:2, что $\Delta\varepsilon_x = \varepsilon_{sh,lim} \approx 40 \cdot 10^{-5}$ [11], $\mu \approx 0{,}3$, $v_t \approx 0{,}5$ [17], будем иметь:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{40 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}5 \cdot 6 \cdot 10^3}{0{,}7} = 1{,}71 \text{ МПа},$$

что существенно выше расчетного сопротивления на растяжение для расчета по образованию трещин данного бетона согласно [17] ($R_{bt,ser} \approx 0{,}3 – 0{,}35$ МПа) и разрушающего напряжения растяжения $\sigma_{ubt} \approx 0{,}5$ МПа.

Для высокопрочной штукатурки на цементной основе марки 150 по прочности на сжатие состава 1:3 при $E \approx 14 \cdot 10^3$ МПа, $\Delta\varepsilon_x = \varepsilon_{sh,lim} \approx 40 \cdot 10^{-5}$, $R_{bt,ser} \approx 0{,}7$ МПа значения напряжений растяжения от усадки составят

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{40 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}5 \cdot 14 \cdot 10^3}{0{,}7} = 4{,}0 \text{ МПа},$$

что также выше возможностей раствора по прочности на растяжение и соответствует реально наблюдаемой картине усадочного растрескивания, характерной для бездобавочных цементно-песчаных растворов, используемых в качестве штукатурок.

Анализ уравнения (3) показывает, что повышению трещиностойкости штукатурок на цементной основе по отношению к усадочным и термомеханическим напряжениям будет содействовать повышение упругопластических характеристик раствора и его предельной деформативности (снижение параметров v_t и E), а также снижение усадки раствора.

Отметим, что полученные напряжения относятся к штукатурным слоям, нанесенным на абсолютно жесткую основу, что предполагает их завышенные значения по отношению к реальным основам конечной жесткости и не в полной мере отражает напряженно-деформированное состояние, возникающее в штукатурном слое. В существующей отечественной литературе отсутствуют данные решения НДС в тонких слоях на основе с разножесткими характеристиками этих двух элементов системы, исключение составляет работа [18], выполненная методом фотоупругости. Из зарубежных работ в этом направлении следует отметить [19, 20], в которых приведены результаты моделирования усадки растворной стяжки различного состава, нанесенной на бетонное основание. Для более точного представления о напряженно-деформированном состоянии в штукатурных покрытиях при воздействии, в частности, усадки, для частного случая соотношения модулей основы и покрытия необходимо выполнить расчеты на ЭВМ с использованием конечно-элементной модели и с применением сертифицированных программ.

Для постановки и решения задач работы штукатурных покрытий на основах конечной жесткости был выбран программный модуль ANSYS 13.0. Для оценки достоверности полученных данных рассчитанная выше методами теории упругости задача о НДС в штукатурном покрытии на абсолютно жесткой основе была решена на ЭВМ. Графические результаты расчетов для раствора марки 50 приведены на рисунке 1. На графике видно, что напряжения «в поле» $\sigma_{x50} = \sigma_{y50} = 1{,}7$ МПа и $\sigma_{x150} = \sigma_{y150} = 4{,}0$ МПа, и они полностью совпадают с численными решениями, полученными по формуле (3), при этом погрешность составляет не более 1%. Это свидетельствует о реальной возможности применения данной методики для решения задач применительно к основам конечной жесткости.

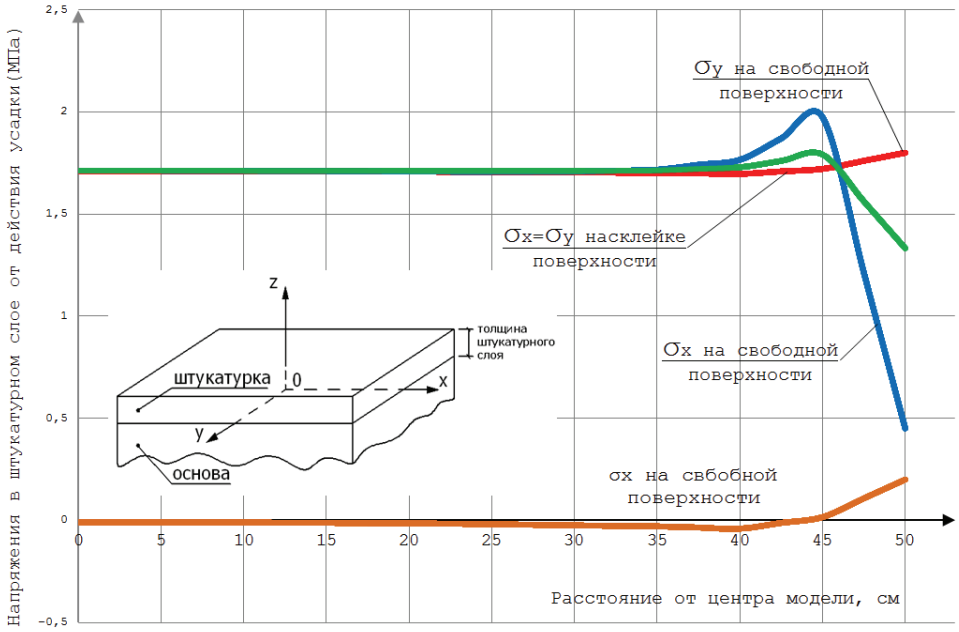


Рисунок 1. Напряженное состояние в штукатурном покрытии марки 50 на абсолютно жесткой основе от действия фактора усадки

При решении задач напряженно-деформированного состояния в штукатурном покрытии от воздействия стесненной усадки были рассмотрены следующие материалы основ и покрытия (табл. 1).

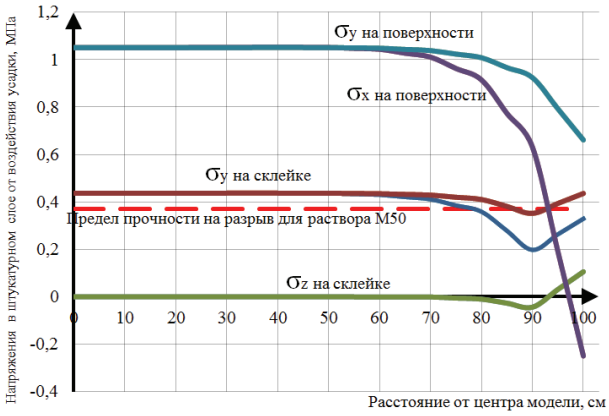
Таблица 1. Свойства материалов, использованных при расчетах напряженно-деформированного состояния в слоях штукатурных покрытий

	Плотность, кг/м^3	Температурный коэффициент линейного расширения α	Нач. модуль упругости / модуль упругопластичности, МПа	Коэффициент теплопроводности для условий эксплуатации А λ_A, Вт/(м·°С)
А) Штукатурный слой				
1. Бездобавочный штукатурный раствор марки М50	1800	$1\cdot10^{-5}$	$\frac{6\cdot10^3}{3\cdot10^3}$	0,76
2. Бездобавочный штукатурный раствор марки М150	1800	$1\cdot10^{-5}$	$\frac{14\cdot10^3}{7\cdot10^3}$	0,76
3. Модифицированный штукатурный раствор марки М50	1800	$1\cdot10^{-5}$	$\frac{6\cdot10^3}{0{,}6\cdot10^3}$	0,76
4. Модифицированный штукатурный раствор марки М150	1800	$1\cdot10^{-5}$	$\frac{14\cdot10^3}{1{,}4\cdot10^3}$	0,76
Б) Основа				
5. Тяжелый бетон класса В15	2500	$1\cdot10^{-5}$	$\frac{23\cdot10^3}{-}$	1,92
6. Кладка из силикатного кирпича М100 на растворе М50	1800	$1\cdot10^{-5}$	$\frac{2{,}25\cdot10^3}{-}$	0,76
7. Кладка из автоклавного газобетона плотностью 500 кг/м^3 (класс В 2,5) на клею	500	$0{,}8\cdot10^{-5}$	$\frac{1{,}69\cdot10^3}{-}$	0,15
8. Экструдированный пенополистирол марки по плотности 45	45	$6\cdot10^{-5}$	$\frac{20}{-}$	0,032
9. Беспрессовый пенополистирол марки по плотности 25	25	$6\cdot10^{-5}$	$\frac{10}{-}$	0,041

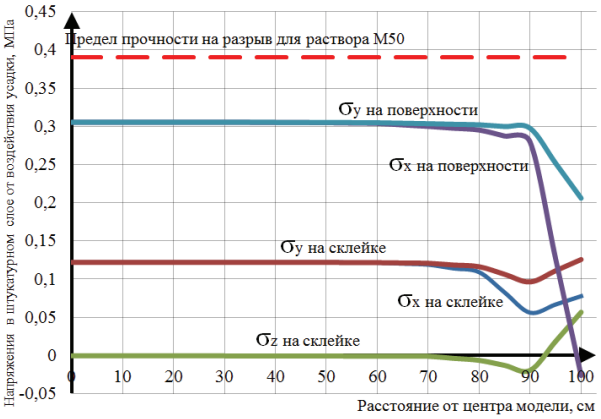
Для штукатурного раствора, работа которого рассматривается при растягивающих напряжениях, близких к разрушающим, в расчетах принимаем модуль упругопластичности, получаемый умножением начального модуля упругости Е на коэффициент упругопластичности $v_t = 0{,}5$ (коэффициент упругопластических деформаций раствора при растяжении) для бездобавочных растворов и $v_t = 0{,}1$ – для модифицированных. Для материалов несущего слоя стены, воспринимающих сжимающие напряжения, которые по величине значительно меньше разрушающих, в расчетах принимаем начальный модуль упругости Е.

Размеры расчетной модели в плане были приняты равными 2,0×2,0 м, что позволяет при толщине штукатурного слоя 8мм получить точные значения напряжений «в поле». Боковые грани модели были приняты свободными, что в наибольшей степени соответствует реальной работе штукатурного покрытия на поверхности стены (например, простенок между двумя смежными оконными проемами). В качестве силового и деформационного фактора для расчетов принято значение полной усадки штукатурного раствора, равное $40\cdot10^{-5}$.

По результатам расчетов в программе ANSYS 13.0 были построены графики распределения напряжений в штукатурных слоях, примеры которых для штукатурного слоя на поверхности кладки из автоклавных газобетонных блоков плотностью 500кг/м^3 для растворов марок по прочности 50 и 150 приведены на рисунках 3 и 4. Напряженно-деформированное состояние в слое штукатурки является совокупностью нормальных, касательных, главных и эквивалентных напряжений. Однако, как видно из графиков, основными напряжениями, определяющими стойкость покрытия от воздействия усадки, являются нормальные напряжения растяжения σ_x, σ_y и отрывные напряжения σ_z. При этом представляют интерес величины напряжений как по склейке, так и на свободной поверхности покрытия.

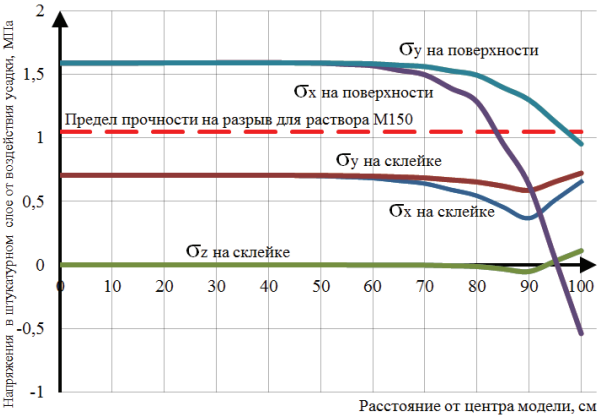


а) бездобавочный раствор

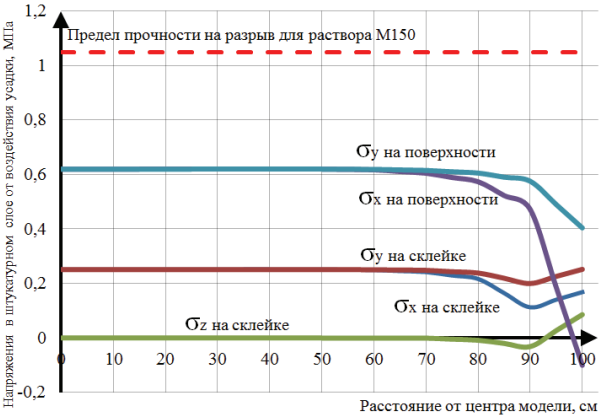


б) модифицированный раствор

Рисунок 2. Напряженное состояние в штукатурном растворе марки 50 на поверхности кладки из ячеистобетонных блоков плотностью 500 кг/м^3



а) бездобавочный раствор



б) модифицированный раствор

Рисунок 3. Напряженное состояние в штукатурном растворе марки 150 на поверхности кладки из ячеистобетонных блоков плотностью 500 кг/м^3

Как видно из графиков, максимальные растягивающие напряжения в штукатурном слое на поверхности стены из автоклавных газобетонных блоков для бездобавочного раствора марки 50 составляют приблизительно 1,0 МПа, для раствора марки 150 приблизительно 1,6 МПа. Полученные уровни напряжений примерно в 2 раза ниже тех же напряжений в штукатурке на абсолютно жесткой основе, однако выше разрушающих напряжений, равных $1{,}5R_{btn}$. Максимальные растягивающие напряжения в штукатурном покрытии для модифицированного раствора марки 50 составляют приблизительно 0,3 МПа, для раствора марки 150 приблизительно 0,6 МПа, что ниже разрушающего напряжения $1{,}5R_{btn}$, равного 0,39 МПа для раствора марки 50 и 1,05 МПа для раствора марки 150 и обеспечивает трещиностойкость данных растворов против действия фактора усадки.

Значения отрывных напряжений σ_z на склейке от воздействия усадки для штукатурных растворов марок 50 и 150 находятся в пределах разрушающего напряжения растяжения основы – ячеистобетонного блока класса В2,5, составляющего $1{,}5R_{btn}$ = 0,46 МПа [17].

По результатам анализа напряжений в штукатурном покрытии на различных по жесткости основах (см. таблицу 1) от действия усадки был построен сводный график, на котором показан рост максимальных растягивающих напряжений в штукатурном покрытии при увеличении жесткости основы (см. рис. 4). По этому графику можно определить возможную область применения каждого из рассматриваемых штукатурных составов.

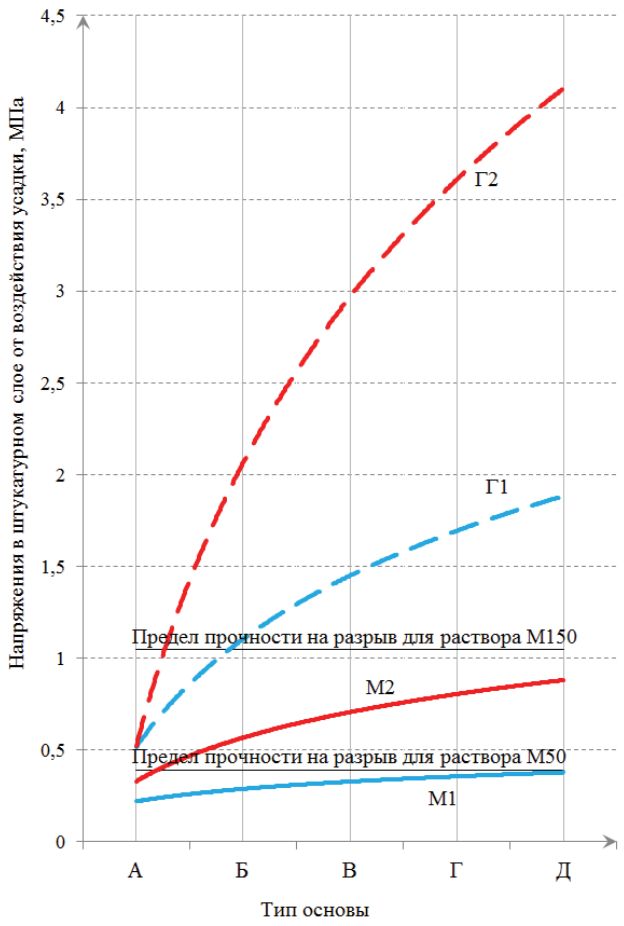


Рисунок 4. Максимальные растягивающие напряжения от действия усадки в штукатурных покрытиях, выполненных из бездобавочных и модифицированных растворов марок М50 и М150 на различных типах основы:

А – беспрессовый пенополистирол марки по плотности М25;
Б – экструдированный пенополистирол марки по плотности 45;
В – кладка из автоклавного газобетона плотностью 500кг/м^3 (класс по прочности В2,5);
Г – кладка из силикатного кирпича марки 100 на растворе марки 50;
Д – абсолютно жесткая основа;
Б1 – бездобавочный штукатурный раствор (гарцовка) марки М50;
Б2 – бездобавочный штукатурный раствор (гарцовка) марки М150;
М1 – модифицированный штукатурный раствор марки М50;
М2 – модифицированный штукатурный раствор марки М150

Результатом решения задач по исследованию работы штукатурного покрытия на основах различной конечной жесткости явилось выявление ряда факторов, определяющих закономерности формирования напряженно-деформированного состояния.

- Механическая прочность штукатурного покрытия вносит существенный вклад в формирование напряженно-деформируемого состояния, так как с ростом прочности происходит рост модуля упругости и соответствующий пропорциональный рост напряжений.
- Модуль упругости основы в значительной степени влияет на картину развития напряжений. Так, при снижении модуля упругости основы наблюдается спад напряжений вследствие снижения влияния стесненности деформаций.
- С увеличением предельной растяжимости штукатурного покрытия при равной прочности происходит снижение коэффициента упругопластичности v_t, обусловливающего спад напряжений.
- Толщина штукатурного покрытия вносит незначительный вклад в формирование напряжений вследствие ее малости относительно толщины основы. Так, при увеличении толщины покрытия с 6 до 12 мм наблюдается спад напряжений в пределах до 5% вследствие неполной реализации стесненной усадки.
- Толщина основы также вносит незначительный вклад в формирование напряжений. Так, при увеличении толщины основы в виде кладки из керамического кирпича с 510 до 640 мм наблюдается небольшой рост напряжений в пределах 7%, что объясняется незначительным изменением соотношений продольных и изгибных жесткостей штукатурного слоя и основы.

Используемые в расчетах параметры являются известными величинами, за исключением модуля упругопластичности, который напрямую зависит от предельной растяжимости основы. Авторами разработана методика определения предельной растяжимости штукатурных составов, позволившая определить значения коэффициентов упругопластичности бездобавочных растворов и растворов, соответствующих базовым слоям из систем «Баумит» и «Быстрой». Так, экспериментально установлено, что предельная растяжимость модифицированных штукатурных составов из системы «Баумит» в 4-5 раз выше, а коэффициент упругопластичности в 4-5 раз ниже значений соответствующих параметров для бездобавочного цементно-песчаного раствора. Результаты данных испытаний предполагается опубликовать в следующей статье.

Температурные напряжения в слоях штукатурного покрытия даже при более высоком деформационном потенциале существенно ниже усадочных напряжений. Данный факт объясняется условиями изменения температуры по толщине стены. Наружный слой штукатурного покрытия и поверхность основы, имеющие, как правило, близкие коэффициенты линейного расширения, деформируются синхронно, тем самым снижая фактор стесненности деформаций в штукатурном слое. Расчет на температурные напряжения в слоях штукатурного покрытия в рамках данной статьи не рассматривается, но требует дальнейшего изучения. Частично он изложен в статье авторов [21].

Выводы

1. Растягивающие напряжения в штукатурном покрытии на поверхности основы с высокой жесткостью (кирпичная кладка или кладка из автоклавных газобетонных блоков) от действия усадки для бездобавочных растворов превышают разрушающее напряжение растяжения, что приводит к образованию усадочных трещин в штукатурном покрытии. Повышение механической прочности штукатурного покрытия не обеспечивает стойкости к воздействию усадки, так как с увеличением прочности раствора напряжения в штукатурном слое возрастают пропорционально увеличению его модуля упругости.

2. Установлено снижение в 5-10 раз напряжений в штукатурном покрытии на поверхности маложесткого пенополистирольного утеплителя в составе стены по системе фасадной теплоизоляции по сравнению со штукатурным покрытием на основе большой жесткости (кирпичной кладки), поэтому растрескивания штукатурного покрытия в данных условиях не происходит. Это предопределяется значительным снижением степени стесненности деформаций штукатурного слоя на маложестком утеплителе.

3. Основными характеристиками, обеспечивающими работоспособность штукатурного покрытия, являются его предельная растяжимость (которая обеспечивает трещиностойкость покрытия) и адгезия (сцепление с основанием). При этом главным фактором, устанавливающим предельную растяжимость штукатурного раствора, является значение его модуля упругопластичности, в то время как рост прочности раствора приводит к увеличению напряжений в нем.

4. Экспериментально определена предельная растяжимость модифицированных штукатурных растворов, составляющая $100\text{-}120 \cdot 10^{-5}$, что существенно превышает значение усадки штукатурного раствора, а также сумму факторов усадки и перепадов температур.

Полученные результаты позволяют сформулировать требования к штукатурным составам по их деформативности, усадке, жесткости, адгезии.

Литература

1. Бутовский И. Н., Матросов П. Ю. Наружная теплоизоляция – эффективное средство повышения теплозащиты стен зданий // Жилищное строительство. 1996. №9. С. 7-10.
2. Аникин В. А., Гурьев В. В. Проблемы реконструкции и санации жилых домов первого и второго периодов массового индустриального домостроения // Промышленное и гражданское строительство. 2003. №11. С. 10-13.
3. Голунов С. А. Системы скрепленной теплоизоляции – эффективная технология энергосбережения // Строительные материалы. 2005. №9. С. 11-13.
4. Мамлеев Р. Ф. [и др]. Опыт реализации новых российских нормативов по теплозащите ограждающих конструкций зданий в Республике Башкортостан // Строительные материалы. 2003. №10. С. 6-9.

5. Стольников В. В., Литвинова Р. Е. Трещиностойкость бетона. М.: Энергия, 1972. 113 с.
6. Безбородов В. А. [и др.] Сухие смеси в современном строительстве / Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет. Новосибирск, 1998. 94 с.
7. Козлов В. В. Сухие строительные смеси. М.: АСВ, 2000. 96 с.
8. Корнеев В. И., Зозуля П. В. Словарь «Что» есть «что» в сухих строительных смесях / НП «Союз производителей сухих строительных смесей». СПб., 2004. 312 с.
9. Палиев А. И., Лукоянов А. П. Модифицированные сухие смеси КНАУФ: качество и долговечность // Строительные материалы. 2005. №9. С. 20-23.
10. Bern D. L., Grant F. F. High-Performance Cement Plaster (Stucco) Systems // AEI 2008: Building Integration Solutions. Denver, Colorado, US, 2008. http://dx.doi.org/10.1061/41002(328)14.
11. Невилль А. М. Свойства бетона. М.: Стройиздат, 1972. 344 с.
12. Рамачадран В., Фельдман Р., Бодуэн Дж. Наука о бетоне: Пер. с англ. / Под ред. В.Б.Ратинова. М.: Стройиздат, 1986. 278 с.
13. Василик П. Г., Голубев И. В. Трещины в штукатурках // Строительные материалы. 2003. №4. С. 14-16.
14. Chew M. Y. L., Nayanthara de Silva. Factorial Method for Performance Assessment of Building Facades // Journal of Construction Engineering and Management. 2004. Vol. 130. №4. Pp. 525-533.
15. Edward G.Kub, Lawrence G. Cartwright, Irving J. Oppenheim. Cracking in Exterior Insulation and Finish Systems // Journal of Performance of Constructed Facilities. 1993. Vol. 7. №1. Pp. 60-66.
16. Синицин Д. А. Стойкость штукатурных покрытий в системах фасадной теплоизоляции: Дисс …канд. техн. наук. Уфа, 2006. 198 с.
17. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. М., 1989.
18. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с.
19. 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.
20. Meschke G., Grasberger S. Numerical Modeling of Coupled Hygromechanical Degradation of Cementitious Materials // Journal of Engineering Mechanics. 2003. Vol. 129. №4. Pp. 383-392.
21. Бабков В. В. [и др.] Эксплуатационная надежность систем фасадной теплоизоляции // Строительные материалы. 2008. №2. С. 20-27.

** Ринат Салаватович Кильдибаев, г. Уфа, Россия*

Тел. моб.: +7(919)600-3057; эл. почта: rbstroi@mail.ru

© Бабков В.В., Синицин Д.А., Кильдибаев Р.С., Резвов О.А., Чуйкин А.Е., 2012

Теоретические предпосылки оптимизации рецептурно-технологических параметров штукатурных растворов для стен, выполненных из газобетонных блоков

К.т.н., доцент В. А. Парута*;
аспирант А. А. Саевский;
студент Ю. А. Семина;
студент Е. А. Столяр;
студент А. В. Устенко,
Одесская государственная академия строительства и архитектуры;
к.т.н., начальник отдела маркетинга Е. В. Брынзин,
ООО «UDK GAZBETON»

Ключевые слова: автоклавный ячеистый бетон; штукатурки для газобетона; подбор состава штукатурных растворов

Повсеместное применение автоклавного газобетона требует разработки эффективных технологий его отделки. Оштукатуривание стен из автоклавного газобетона с последующей отделкой (декоративные штукатурки, фасадные краски) является одним из наиболее эффективных технико-экономических решений. Однако часто приходится наблюдать значительное трещинообразование в штукатурном покрытии, а также в зоне контакта покрытия и газобетонной кладки. Разрушение штукатурного слоя приводит к ухудшению теплоизоляционных параметров ограждающей конструкции и понижению ее долговечности.

Происходит это из-за того, что при проектировании состава штукатурки и ее свойств не в полной мере учитывается совместность ее работы с газобетонным основанием. Не учитывают этот фактор и нормативные документы. Так, в СТО 501-52-01-2007 [9] указаны допустимые значения следующих свойств штукатурных покрытий: сопротивление паропроницанию, водонепроницаемость спустя 24 часа, адгезия к ячеистому бетону, морозостойкость, устойчивость к разрыву по трещине в ячеистом бетоне, стойкость к переменному увлажнению и высушиванию. Европейский стандарт EN 998-1:2003 [10] дополнительно к вышеперечисленным свойствам требует декларирования плотности раствора, класса по прочности на сжатие, теплопроводности и огнестойкости.

Этого недостаточно для того, чтобы обеспечить совместность работы газобетонной кладки и штукатурного покрытия, а, следовательно, и высокую долговечность ограждающей конструкции. Необходимо учитывать соотношение не только параметров их паропроницаемости, но и параметров прочности при сжатии и растяжении, модуля упругости, деформаций (температурных, влажностных, карбонизационных). Нельзя назначать один и тот же состав раствора для газобетонных блоков с разной средней плотностью: 300 и 700 кг/м^3.

На то, что разница между модулями упругости основания и штукатурного покрытия влияет на прочность сцепления между ними, указывали в своих работах Я. Паплавскис, А. Фрош, Э. Гранау [5,11]. Однако синхронизации только этого показателя тоже недостаточно. Стеновую конструкцию следует рассматривать как многослойную систему, в которой, в зависимости от свойств материала кладки, необходимо модифицировать штукатурку, создавать условия для формирования качественной контактной зоны между слоями.

В связи с этим важным моментом является рассмотрение процессов, протекающих при нанесении раствора и его твердении. Необходимо разработать методику определения характера и механизма трещинообразования в системе, а также начать создание математического аппарата для вычисления напряжений, возникающих в ней. С учетом вышесказанного, необходимо проектировать составы штукатурных покрытий с заданными свойствами, которые позволят сформировать качественную контактную зону, обеспечат релаксацию напряжений, возникающих в стеновой системе.

Важно проектировать состав штукатурного раствора, исходя также из процессов, протекающих при нанесении штукатурной смеси, ее твердении и эксплуатации ограждающей конструкции. Понимание механизма процессов, протекающих в системе «кладка – штукатурное покрытие», позволит разработать теоретические предпосылки для улучшения работы системы, сформулировать критерии и требования к штукатурному покрытию и растворной смеси, заложить эти предпосылки при проектировании состава раствора.

При нанесении растворной смеси на кладку из-за высокого капиллярного потенциала газобетона происходит отсос влаги из твердеющего раствора, испарение ее под воздействием солнечных лучей и воздушных потоков. Это приводит к усадке раствора и образованию трещин в нем и в контактной зоне с газобетонным основанием. Причиной трещин в штукатурном растворе являются напряжения (δ), возникающие из-за его усадки и разницы деформаций кладки и штукатурного покрытия (Δε):

$$\delta = \frac{\Delta\varepsilon * E}{1-\mu}, \tag{1}$$

где E и μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона штукатурного покрытия; Δε – разность деформаций штукатурки и газобетонного основания.

При эксплуатации происходит деформация стеновой конструкции. Деформация кладки происходит под воздействием постоянных и временных нагрузок, из-за усадки кладочного раствора, карбонизации газобетона, увлажнения парообразной влагой, мигрирующей из помещения и конденсирующейся внутри конструкции, температуры. Деформации штукатурного покрытия происходят из-за увлажнения атмосферной влагой, воздействия плюсовых и минусовых температур, деформации кладки (рис. 1,2).

$$\Delta L_p = \alpha \Delta T^p L; \Delta L_c = \alpha \Delta T^c L; \tag{2}$$

$$\Delta L_{тв} = \left(\alpha \Delta T L F_m\right) + \left(\Delta L_q L\right), \tag{3}$$

где ΔL_p, ΔL_c – деформации растяжения и сжатия; α – коэффициент температурного удлинения материала; ΔT – разность температур; L – длина стенового элемента; $\Delta L_{тв}$ – тепло-влажностные деформации; F_m – показатель материальных дефектов; ΔL_q – влажностные деформации.

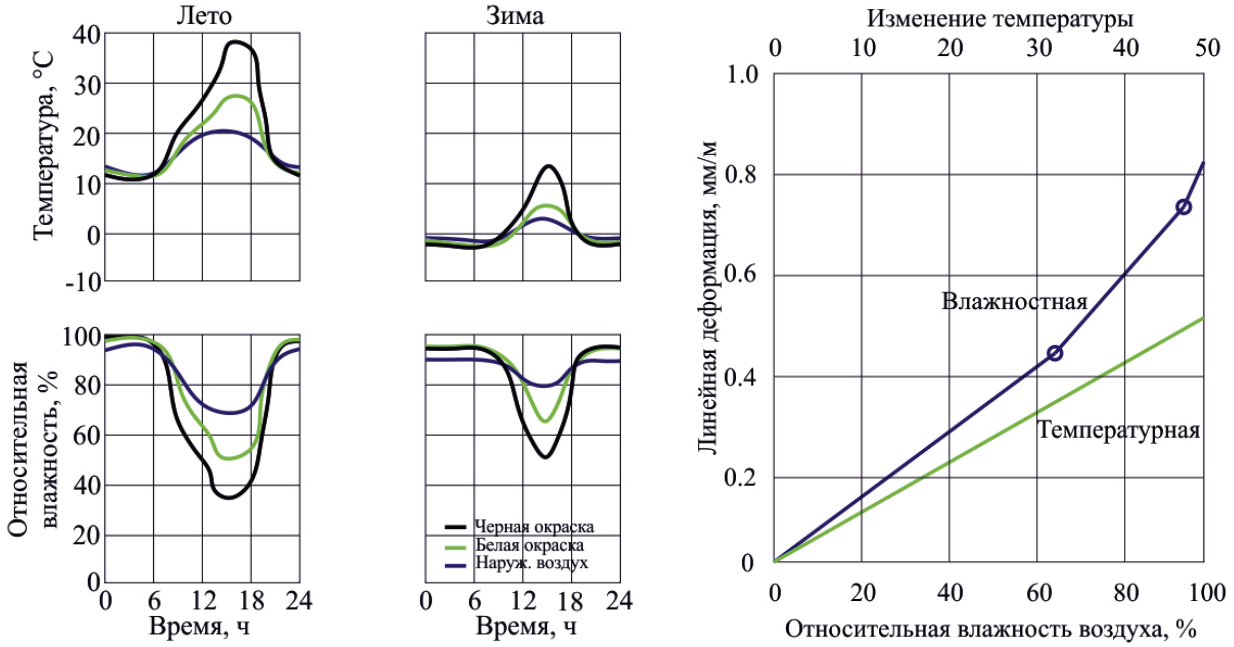


Рисунок 1. Графики изменения температур и влажности

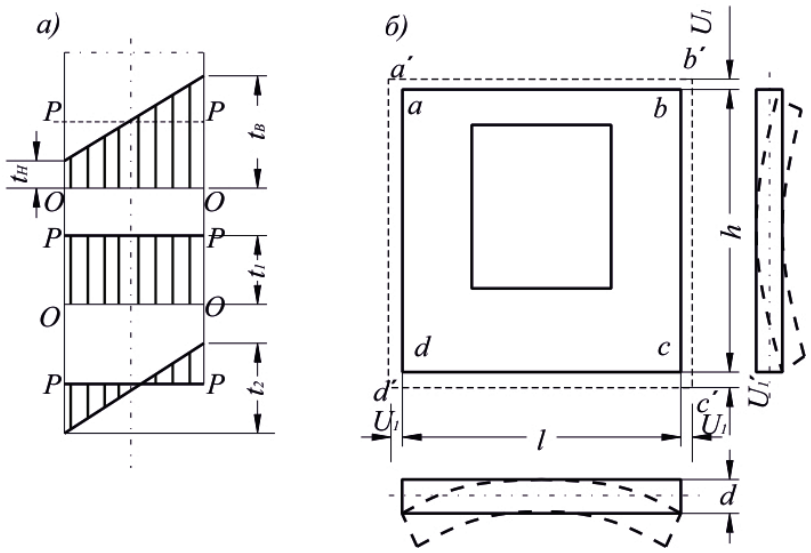
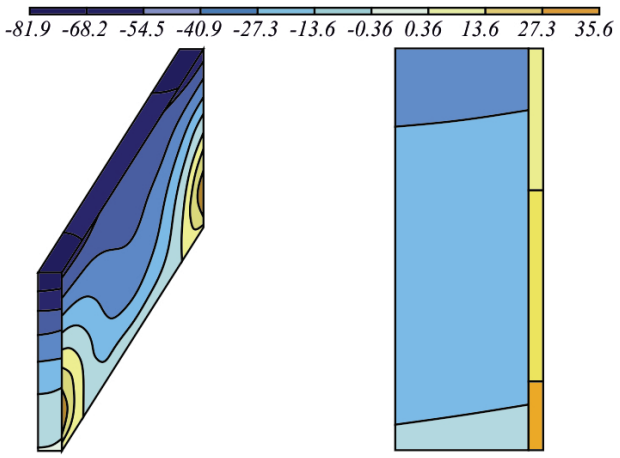


Рисунок 2. Температурные деформации стеновой конструкции: а – распределение температур в ограждающей конструкции; б – температурные деформации [1]

Из-за разности коэффициентов температурного расширения, модуля упругости газобетона и штукатурного покрытия возникают напряжения сдвига в контактной зоне :

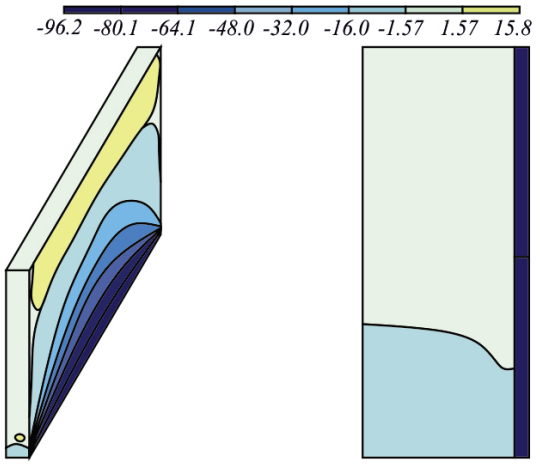
$$\tau = \left[\Delta T_1 \alpha_1 - \Delta T_2 \alpha_2\right] / \left[{}^{1}\!/_{E_1} + {}^{1}\!/_{E_2} \right], \qquad (4)$$

где τ – напряжение сдвига от температурных деформаций, кгс/см^2; ΔT_1, ΔT_2 – разность температур штукатурного покрытия и кладки; ºС; α_1, α_2 – коэффициент термического расширения кладки и штукатурного покрытия; E_1, E_2 – модули упругости кладки и штукатурного покрытия, кгс/см^2.



а) в ограждающей конструкции **б) в контактной зоне**

Рисунок 3. Температурные деформации



а) в ограждающей конструкции **б) в контактной зоне**

Рисунок 4. Напряжения

Эти напряжения и являются основной причиной развития магистральной трещины со скоростью (dl/dN) в контактной зоне между штукатуркой и кладкой (рис. 5):

$$ {}^{dl}\!/_{dN} = A(\Delta K^{n}), \qquad (5)$$

где A и n – эмпирические коэффициенты, n = 2–7, с увеличением хрупкости материала n увеличивается; $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ – перепад коэффициента интенсивности напряжений за один цикл; N – число циклов.

$$dl/dN = C_0 (K_{\max} - K_{th}/K_c - K_{\max}{}^q), \quad (6)$$

где C_o, q – эмпирические величины; K_{th} – пороговый коэффициент интенсивности напряжений; K_c – вязкость разрушения.

Для такой системы характерно усталостное разрушение при относительно низком уровне напряжений и частой их цикличности.

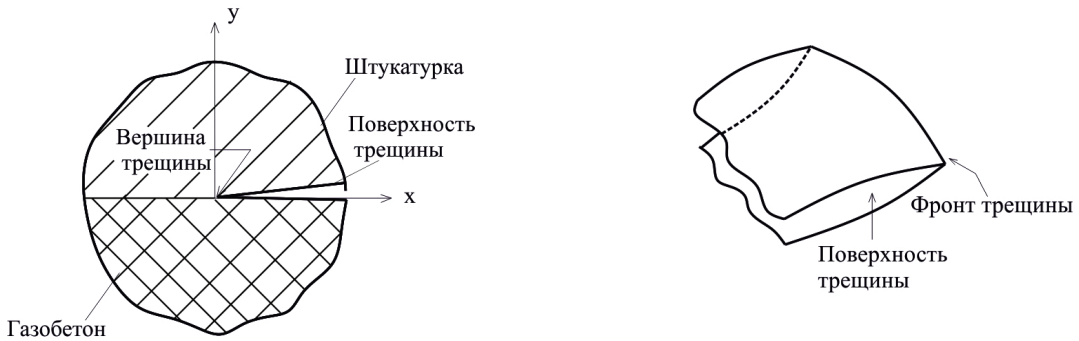


Рисунок 5. Характер трещинообразования в контактной зоне «газобетонная кладка–штукатурное покрытие»

Трещина развивается на границе двух разнородных материалов – газобетонной кладки и штукатурки, имеющих различные свойства. Основной причиной развития трещины является изменение деформации и напряжения в ее вершине, возникающие при увлажнении-высушивании, нагревании-охлаждении стеновой конструкции. При нагревании, увлажнении или при их совместном воздействии происходит рост деформаций в контактной зоне «газобетонная кладка–штукатурное покрытие», что приводит к увеличению радиуса кривизны вершины трещины. Пока уровень деформаций меньше предельного значения адгезионной прочности, трещина не растет. Если в ходе дальнейшего роста внешней нагрузки показатели деформации и напряжения в устье трещины превзойдут предельный уровень, произойдет ее подрастание. На обратном ходе цикла нагружения (снижении температуры или влажности) происходит частичное восстановление геометрии вершины трещины и размера пластической зоны, однако в дальнейшем длина трещины увеличивается.

Это приводит к разрушению в контактной зоне, отслоению штукатурного покрытия от кладки преимущественно по адгезионному типу. Процесс интенсифицируется из-за наличия влаги, агрессивных жидкостей и газов, отрицательных температур. Так, например, в здании, построенном в г. Риге, уже через 24 года эксплуатации в штукатурке наблюдалось большое количество трещин шириной 0,2-2 мм, на 30% площади фасада штукатурка потеряла сцепление с газобетонной кладкой. Имелись значительные отпадения штукатурки по всему фасаду здания [2].

Следовательно, для повышения долговечности ограждающей конструкции необходимо предотвратить протекание вышеуказанных деструктивных процессов, обеспечить совместность работы газобетонной кладки и штукатурного покрытия. Для этого, еще на стадии проектирования состава раствора, необходимо задавать такие его свойства, которые обеспечат совместность его работы с газобетонным основанием.

Снизить температурно-влажностные деформации и напряжения, вызванные ими в покрытии и контактной зоне, можно путем подбора состава штукатурного покрытия со свойствами, наиболее близкими к свойствам газобетонной кладки. Этого можно добиться, целенаправленно модифицируя растворную смесь, создавая условия для формирования бездефектной контактной зоны и штукатурного покрытия.

Для формирования бездефектной контактной зоны необходимо использовать высокий капиллярный потенциал газобетонного основания. При нанесении растворной смеси поры газобетона будут «присасывать» ее к себе, обеспечивая максимальную площадь контакта между ними. У не модифицированной растворной смеси этого не происходит, так как отсос влаги приводит к ее усадке и отслоению раствора от газобетонного основания. Для того чтобы обеспечить максимальную площадь контакта, необходимо, чтобы растворная смесь имела высокую водоудерживающую способность. Поэтому в ее состав мы вводили заполнитель и наполнитель (карбонатный, керамзитовый, бой газобетона, перлит, вермикулит),

водоудерживающий эффект от которых усиливали при помощи эфиров целлюлозы и редиспергируемых полимерных порошков.

При нанесении растворной смеси будет происходить смачивание поверхности газобетонных пор полимерцементной суспензией. Водная дисперсия полимера, проникая в межпоровые перегородки, обеспечит механическое зацепление полимера, находящегося в штукатурном растворе, и адгезии раствора к газобетонному основанию. Силикаты кальция в составе газобетона, являясь центрами кристаллизации для новообразований цементного камня, будут способствовать формированию качественной структуры полимерцементного композита в контактной зоне. Вводя в смесь полимерную фибру и эфиры целлюлозы, мы обеспечим микроармирование контактной зоны. Все эти факторы позволят сформировать контактную зону с малым количеством дефектов, достаточной адгезионной прочностью, трещиностойкостью и эластичностью, позволяющей релаксировать напряжения, возникающие в системе «кладка-штукатурное покрытие».

Однако только формирования бездефектной контактной зоны недостаточно. Рассмотрим стеновую конструкцию как трехслойную систему «штукатурка – контактная зона – газобетонное основание». При использовании штукатурного раствора с большей прочностью и большим модулем упругости, чем у газобетонного основания, и при высокой прочности контактной зоны разрушение будет происходить по газобетону (когезионное разрушение). Необходимо, чтобы кладка и штукатурный раствор имели сходные прочность и модуль упругости, температурные и влажностные деформации. В этом случае формирование достаточно прочной эластичной контактной зоны обеспечит совместную работу слоев системы «кладка-штукатурное покрытие».

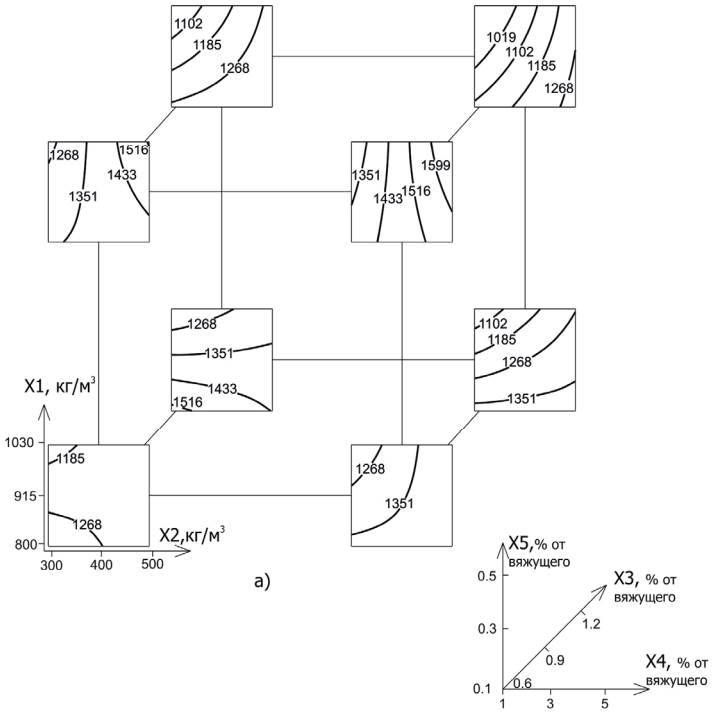
Уменьшение модуля упругости штукатурки приведет (в соответствии с формулами 1,4,5) к уменьшению растягивающих напряжений в штукатурке, напряжений сдвига и уменьшению скорости продвижения магистральной трещины в контактной зоне. Этого можно добиться введением в смесь мелкого заполнителя и наполнителя с низким модулем упругости (карбонатный, керамзитовый, газобетонный, перлитовый, вермикулитовый). Введение полимерной дисперсии и полимерной фибры позволит усилить полученный эффект. Снижение модуля упругости штукатурного раствора до величин, сопоставимых с модулем упругости газобетонного основания, уменьшение его температурных и влажностных деформаций обеспечат повышение трещиностойкости и долговечности системы «кладка-покрытие».

Исходя из вышеизложенных теоретических предпосылок, мы подобрали модифицированные штукатурки на смеси заполнителей и наполнителей – керамзитового и из боя газобетона (состав 1), карбонатного и перлитового (состав 2). Модифицирующий эффект усиливали введением редиспергируемого полимерного порошка Winnapas 8031 H и Tylose MBZ 15009. Для оптимизации рецептурно-технологических параметров использовали пятифакторный эксперимент с варьируемыми факторами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1. Варьируемые параметры штукатурной смеси

Диапазон варьирования	Расход вяжущего, кг/м^3	Расход заполнителя и наполнителя, кг/м^3	Расход фибры, кг/м^3	Расход редиспергируемого полимерного порошка Winnapas 8031 H, % от вяжущего	Расход Tylose MBZ 15009, % от вяжущего
	X1	X2	X3	X4	X5
1	500	1,05/1	1,2	5	0,5
0	400	1,05/1	0,9	3	0,3
-1	300	1,05/1	0,6	1	0,1

В результате получена штукатурка, позволяющая обеспечить совместность работы газобетонной кладки со штукатурным покрытием, и тем самым высокую долговечность стеновой конструкции. Основные физико-механические характеристики штукатурки: средняя плотность 1100–1300 кг/м^3, прочность при сжатии 30–120 кг/см^2 (состав 1, рис. 6–7), средняя плотность 600–1300 кг/м^3, прочность при сжатии 15–60 кг/см^2, (состав 2, рис. 8–9).



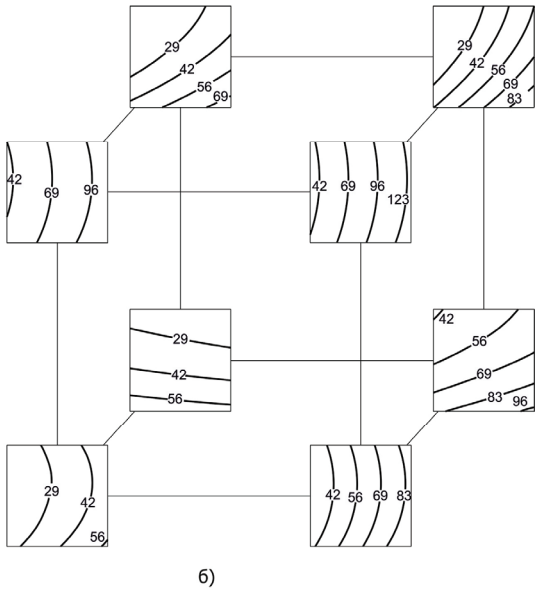
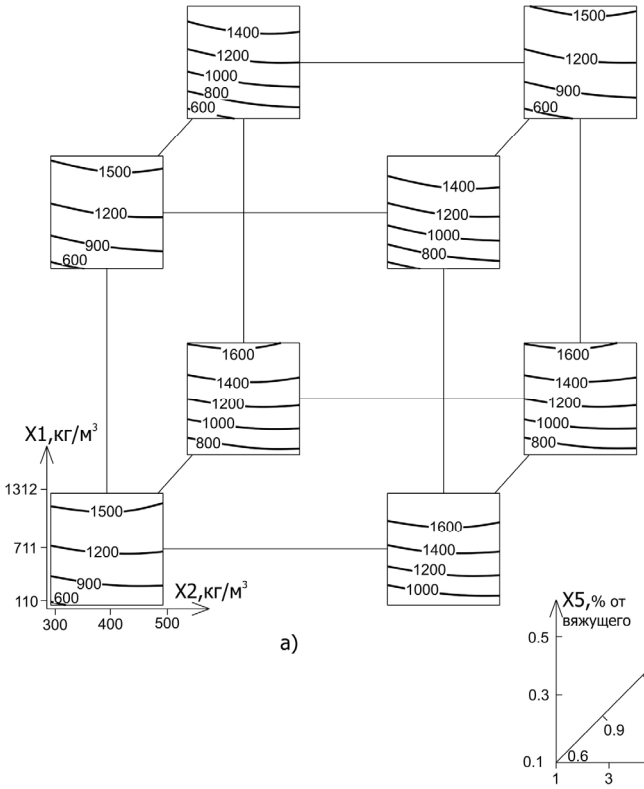


Рисунок 6. Прочность на сжатие при изгибе, кгс/см²

Рисунок 7. Прочность на сжатие, кгс/см²

X1 – Вяжущее, X2 – Заполнитель, X3 – Фибра полимерная, X4 – Vinnapas 8031H, X5 – Tylose MBZ 15009



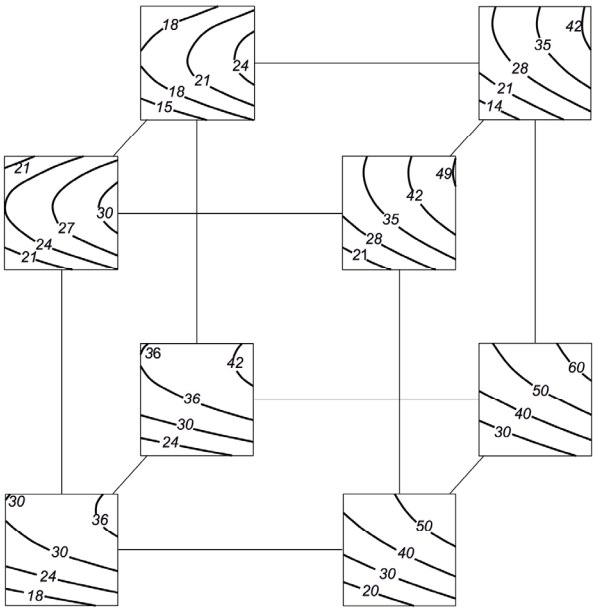


Рисунок 7. Прочность на сжатие при изгибе, кгс/см²

Рисунок 8. Прочность на сжатие, кгс/см²

X1 – Вяжущее, X2 – Заполнитель, X3 – Фибра полимерная, X4 – Vinnapas 8031H, X5 – Tylose MBZ 15009

Приведенные данные свидетельствуют о том, что целенаправленной модификацией штукатурной смеси можно улучшить ее параметры и обеспечить совместность работы системы «газобетонная кладка – штукатурное покрытие». Это, в свою очередь, обеспечит повышение долговечности стеновой конструкции.

Литература

1. Емельянов А. А. Повреждения наружных панелей жилых полносборных зданий при температурных деформациях по данным натурных исследований // Анализ причин аварий и повреждений строительных конструкций. Выпуск 2. Под ред. А. А. Шишкина. М.: Издательство литературы по строительству, 1964. С. 153-177.
2. Силаенков Е. С., Зарин Р. А., Рудин П.В. Опыт эксплуатации газобетонных конструкций // Анализ причин аварий и повреждений строительных конструкций. Выпуск 2. Под ред. А. А. Шишкина. М.: Издательство литературы по строительству, 1964. С. 137-153.
3. Гагарин В. Г. Теплоизоляционные фасады с тонким штукатурным слоем // АВОК. 2007. №6. С. 34-36.
4. Коломацкий А. С., Гринфельд Г. И., Загороднюк Л. Х., Коломацкая С. А., Горшков А. С., Вишневский А. А. Руководство по наружной отделке стен из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения / Национальная ассоциация производителей автоклавного газобетона России. Белгород, 2010. 47 с.
5. Паплавскис Я., Фрош А. Требования к штукатурным составам для наружной отделки стен из ячеистых бетонов. Проблемы эксплуатационной надежности наружных стен на основе автоклавных газобетонных блоков и возможности их защиты от увлажнения // Штукатурные составы для наружной отделки стен из газобетона: материалы семинара. Под ред. Н.И.Ватина. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. С. 10-15.
6. Рекомендации по применению стеновых мелких блоков из ячеистых бетонов / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1992. 84 с.
7. Грановский А. В. К вопросу о повышении надежности наружных стен высотных зданий из ячеистобетонных блоков // Технологии строительства .2008. №7(62). С. 18-22.
8. Парута В. А., Брынзин Е. В., Гайденко Ю. А., Демешко Е. И. Теоретические предпосылки повышения долговечности наружных стен из автоклавного газобетона // Строительные материалы, изделия и санитарная техника. 2011. №40. С. 136-140.
9. СТО 501-52-01-2007. Ч. I Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Российской Федерации. М., 2009.
10. EN 998-1:2003 «Specification for mortar for masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar».
11. Гранау Э. Предупреждение дефектов в строительных конструкциях. М.: Стройиздат. 1980. 234 с.
12. Марчюкайтис Г. В., Гнип И. Я. Влияние состава штукатурного раствора на его деформативные свойства // Строительные материалы. 2003. №9. С. 23-29.
13. Парута В. А. и др. Технические решения стен многоэтажных зданий из ячеистобетонных изделий автоклавного твердения. Альбом-пособие для проектирования и производства работ. / НИИСП Министерства регионального развития, строительства и жилищно-коммунального хозяйства Украины. Киев, 2011. 189 с.
14. Парута В. А. [и др.] Пособие по проектированию малоэтажных зданий из автоклавного бетона с альбомом технических решений / «УкрНДИПроцивильсильбуд» Министерства регионального развития, строительства и жилищно-коммунального хозяйства Украины. Киев, 2011. 163 с.
15. Homann M. Richtig Bauen mit Porenbeton. Stuttgart, Germany, 2003. 268 c.
16. Helmut Künzel. Außenputz. Untersuchungen, Erfahrungen, Überlegungen // Fraunhofer IRB Verlag. 2003. Pp. 23-27.
17. Herman H. Advances in Thermal Spray Technology // Advanced Materials & Processes. 1990. №4. Pp. 41-45.
18. Celarie F., Prades S., Bonamy D., Ferrero L., Bouchaud E., Gulliot C., Marliere C. // Physical Review Letters. 2003. Pp. 24-28.

**Валентин Анатольевич Парута, г. Одесса, Украина*
Тел. раб.: +38(048)*723-84-34; эл. почта: docent2155@gmail.com*

© Парута В.А., Саевский А.А., Семина Ю.А., Столяр Е.А., Устенко А.В., Брынзин Е.В., 2012

Сухие строительные смеси с применением местных материалов Пензенского региона

Д.т.н., профессор В.И. Логанина*;
аспирант Э.Р. Акжигитова;
доцент Г.Д. Фадеева,
ФГБОУ ВПО Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Ключевые слова: глина; обжиг; прочность известкового композита

В связи с интенсивным развитием производства и расширением ассортимента сухих строительных смесей (ССС) актуальным является использование в их рецептуре местных сырьевых материалов. На территории Пензенской области имеются значительные запасы глин, которые могли бы быть компонентами ССС [1-4].

Одним из способов получения активных минеральных добавок является обжиг каолиновых глин при температуре 600–800°С [5-9]. Основанием применения такой добавки является то, что из всех известных сегодня минералов наиболее реакционно-активным по отношению к извести является метакаолинит. Недостатками данного метода получения активной минеральной добавки из глин являются существенные энергозатраты на обжиг.

В работах [10,11] показана эффективность применения термообработанной каолиновой и монтмориллонитовой глин при изготовлении известково-алюмосиликатного вяжущего. По мнению автора, образовавшийся после удаления части гидратной воды одноводный каолинит $Al_2O_32SiO_2H_2O$ является реакционно-активным по отношению к извести.

Глины Пензенского региона по своему минералогическому составу являются смешанными. В связи с этим разработка технологии получения активной добавки на основе смешаннослойных глин для известковых ССС представляет практический и теоретический интерес.

В работе применяли глину Воробьевского, Камешкирского, Иссинского месторождений, а также каолинит. В качестве вяжущего использовали известь 2-го сорта с активностью 84%. Были изготовлены образцы состава известь:песок=1:4 с водоизвестковым соотношением В/И, равным 1,4. В качестве мелкого заполнителя применяли ухтинский кварцевый песок. При определении оптимального зернового состава песка исходили из наименьшей межзерновой пустотности [12,13]. Установлено, что наименьшей пустотностью обладает песок фракции 0,63-0,315 мм и 0,315-0,14 мм в соотношении 80%:20%. Плотность песка составляла $\rho_{нас}$ = 1527 кг/м^3.

При оценке возможности применения глин Пензенского региона в рецептуре ССС в качестве структурирующей добавки была применена следующая технология их подготовки. Часть глины обжигалась при различной температуре, другая часть обжигалась в присутствии влаги в среде насыщенного пара, так как, по мнению некоторых исследователей [10, 11], монтмориллонитовые глины более эффективно обжигать в присутствии влаги.

Нами был проведен дифференциально-термический анализ глин, представленный на рис. 1,2.

При анализе термограммы каолиновой глины (Украина – Глуховское месторождение) установлено, что при температуре 103,5^{o}С наблюдается экзотермический эффект, сопровождающийся удалением свободной воды. При температуре от 384,7°С до 726,4°С происходит выделение конституционной воды с разрушением кристаллической решетки [14, 15]. При температуре 380-455,5°С наблюдается удаление части гидратной воды, что сопровождается резким пиком экзотермического эффекта. Образующееся при этом соединение $Al_2O_3{\cdot}nSiO_2{\cdot}H_2O$ придает глине более высокую реакционную активность по отношению к извести. В интервале температур (455,5-520)°С происходит удаление оставшегося количества гидратной воды до образования метакаолинита $Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$, протекающее с уменьшением массы на 7,3%. Это сопровождается резким пиком эндотермического эффекта. С увеличением температуры от 520°С до 726,4°С продолжается разрушение кристаллической решетки. При этом потеря массы составляет 5%.

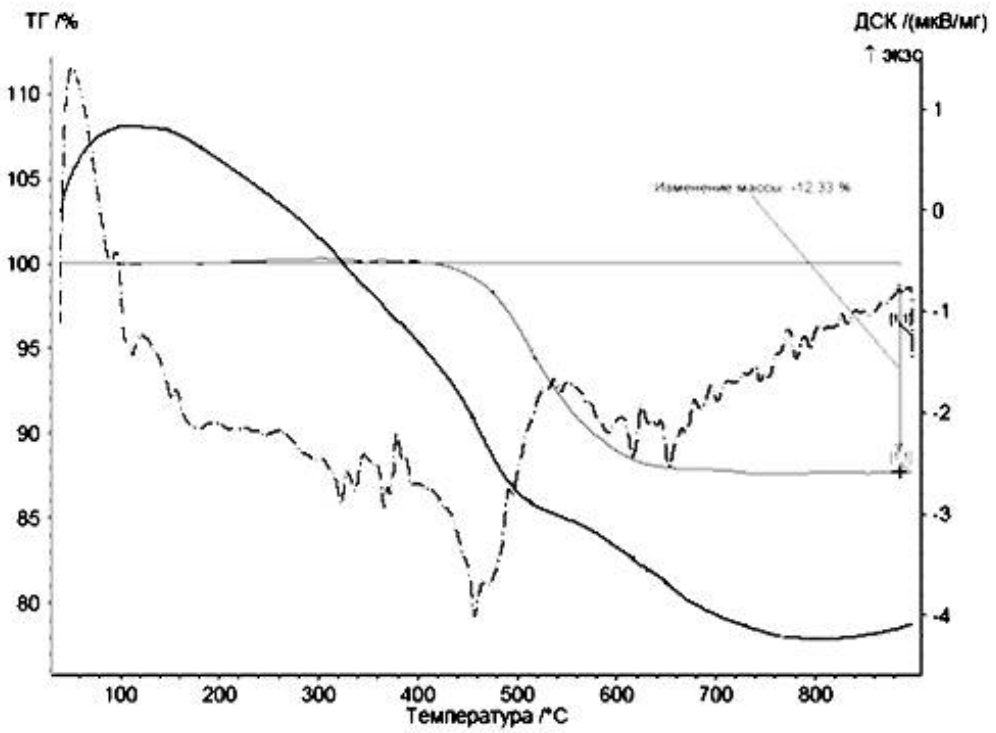


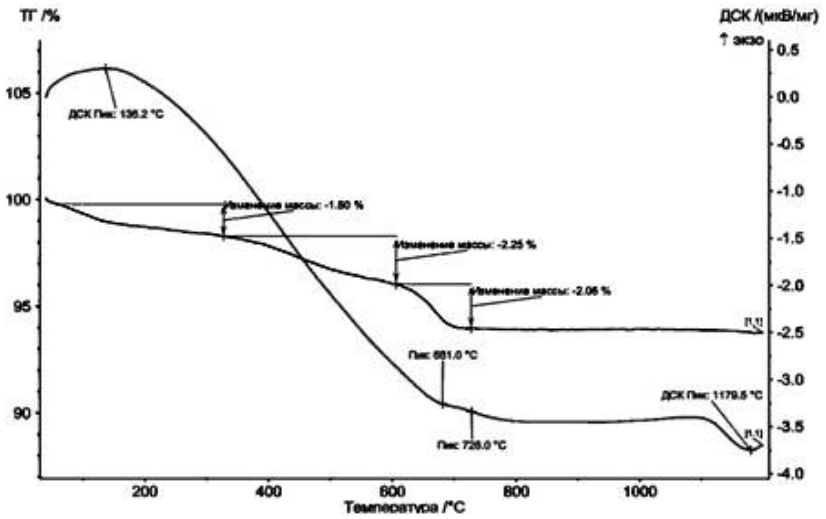
Рисунок 1. Дифференциально-термический анализ каолинитовой глины

При анализе термограмм Иссинской, Камешкирской и Воробьевской глин установлено, что у Иссинской глины начальное удаление гидратной воды начинается при температуре 438°С (экзотермический эффект) и заканчивается при 487°С (эндотермический эффект), у Камешкирской глины – 442°С (экзотермический эффект) и 467,2°С(эндотермический эффект), у Воробьевской глины соответственно 580°С (эндотермический эффект) (рис. 2).

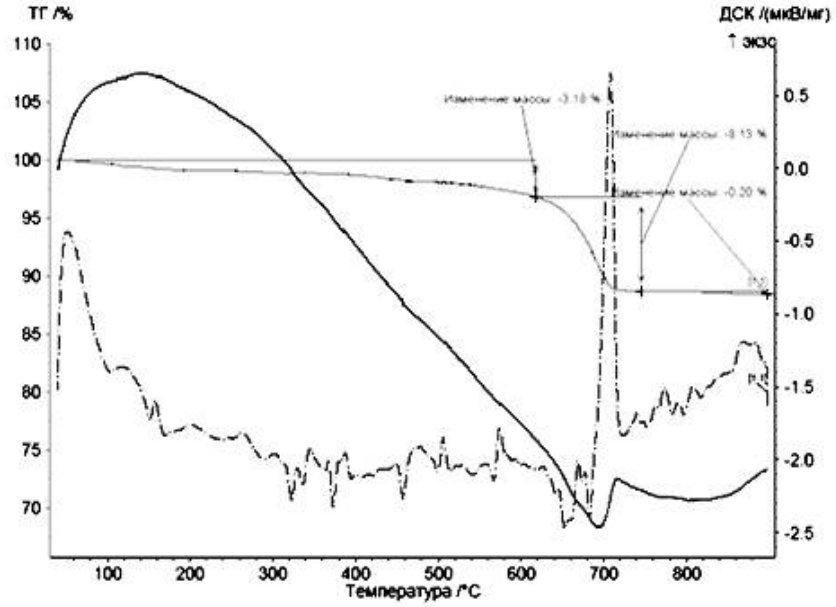
Анализ экспериментальных данных свидетельствует, что введение глины в количестве 10% от массы извести способствует повышению прочности при сжатии, которое составляет 17,85-63% в зависимости от технологии, температуры обжига и вида глины. Наибольшей прочностью обладают композиты с добавкой Воробьевской и Камешкирской глин, обожженных в присутствии влаги при температурах соответственно 500°С и 400°С. Именно в этих интервалах температур, по результатам дифференциально-термического анализа, происходит образование одноводного каолинита, обладающего более высокой реакционной активностью по отношению к извести. Максимальной прочностью обладают составы с применением Воробьевской глины, обожженной при температуре 450-500°С, – увеличение прочности составляет 63%. Прочность при сжатии в возрасте 28 суток твердения контрольных составов составляет $R_{сж}$ = 0,84 МПа; с добавкой необожженной Камешкирской глины – 1,04 МПа; глины, обожженной при температуре 400°С, – 1,29 МПа; обожженной при температуре 400°С в присутствии влаги – 1,41 МПа.

Дополнительно оценивалась активность термообработанной глины как гидравлической добавки по величине растворимости в 20%-м растворе КОН [16]. Так, установлено, что активность Камешкирской глины (необожженной) составляет 145 мг/г, а активность глины, обожженной при температуре 400°С, – 165мг/г. Более высокая гидравлическая активность глины, обожженной при температуре 400°С, способствует увеличению количества связанной извести в известковом композите.

а)



б)



в)

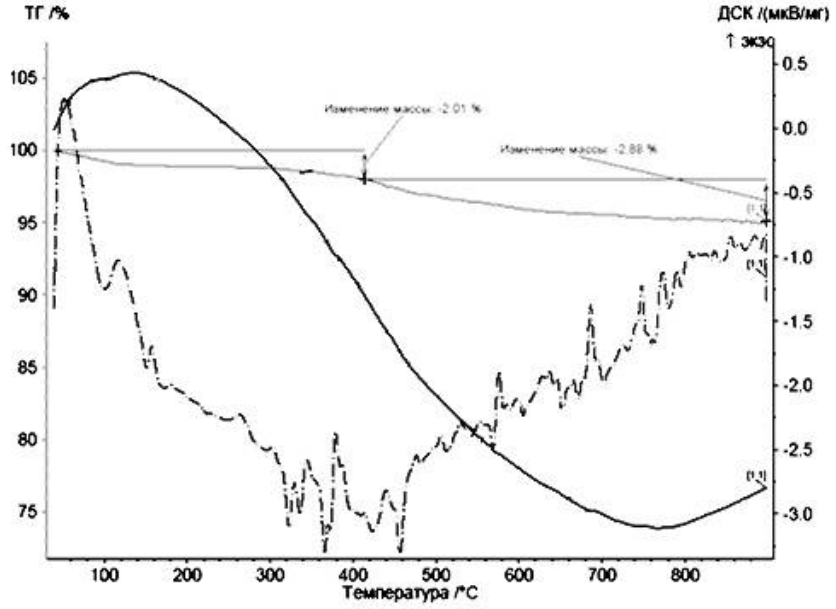
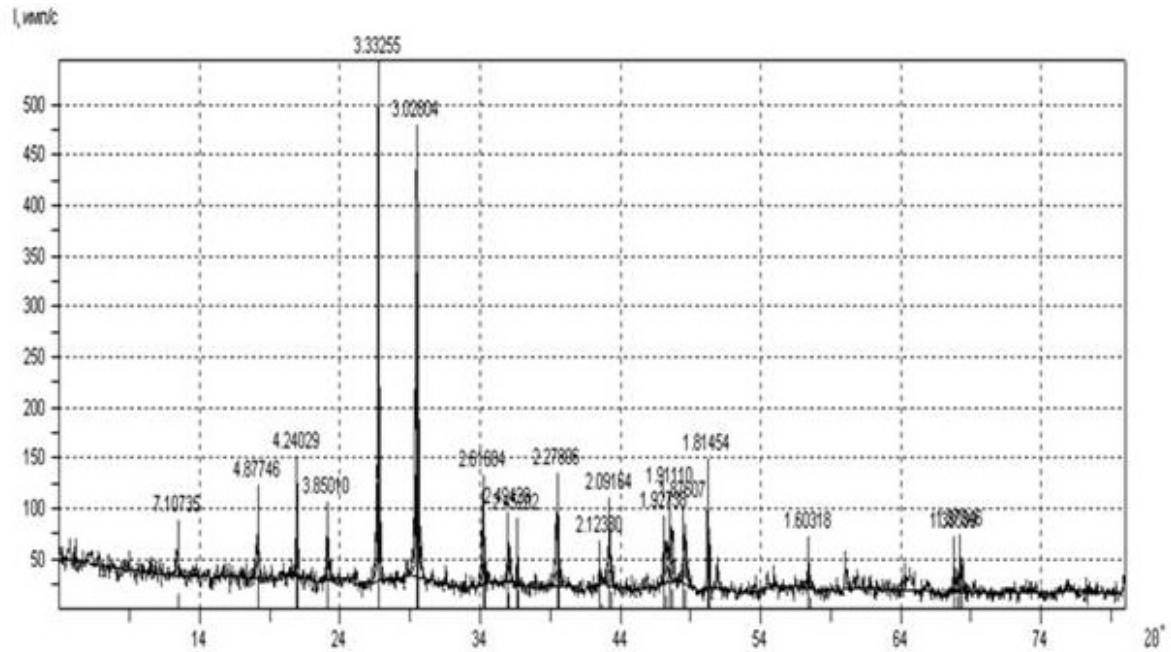


Рисунок 2. Дифференциально-термический анализ глин месторождений: а) Воробьевское; б) Иссинское; в) Камешкирское

а)



б)

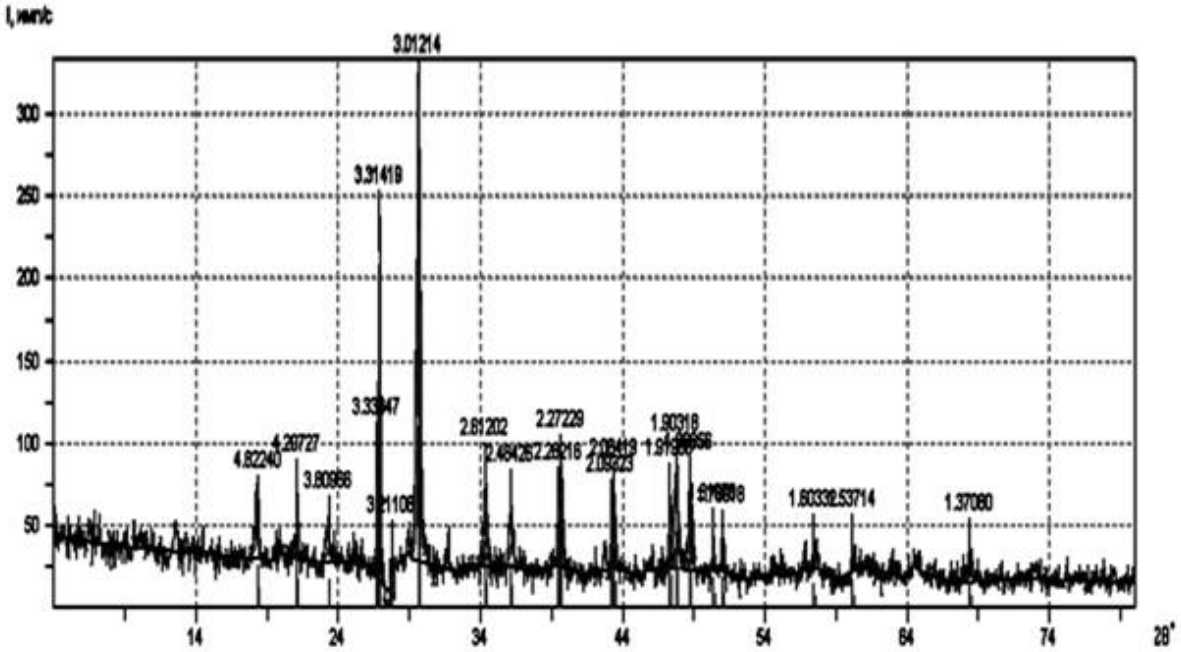


Рисунок 3.Рентгенограммы известково-песчаных составов:
а) глина обожжена при температуре 600°С; б) глина обожжена при температуре 500°С

Структура известково-песчаных образцов изучалась методами РФА [17-19]. Анализ рентгенограммы известково-песчаного образца с добавкой Воробьевской глины, обожженной при температуре 500°С, приведен на рис. 3б и свидетельствует о большем содержании цеолитов ($Ca_6Al_{12}Si_{12}O_{48}\cdot 28\ H_2O$) по сравнению с образцами, содержащими глину, обожженную при температуре 600°С. Интенсивность линий (2,6120 Å; 2,4843 Å; 2,0932 Å; 2,0842 Å), относящихся к цеолитам, на рентгенограмме рис. 3б выше, чем на рентгенограмме рис. 3а.

Большее содержание цеолитов в структуре образца с глиной, обожженной при температуре 500°С, обеспечивает большую прочность образцов.

Таким образом, проведенные исследования доказали целесообразность применения в известковых композитах в качестве структурирующей добавки смешанослойных глин Пензенского региона, обожженных при температуре 450-500°С. Разработаны составы ССС, содержащие известь, кварцевый песок, модифицирующие добавки, в том числе минеральные добавки на основе смешанослойных глин Пензенского региона. Жизнеспособность отделочного состава составляет 3-4 часа, водоудерживающая способность 96 – 97 %. Прочность при сжатии покрытий на основе предлагаемой ССС составляет 2,8-3,1 МПА, прочность сцепления – 0,6-0,8 МПа.

Работа выполнялась в рамках госконтракта с Министерством образования и науки РФ № 13.G25.31.0092.

Литература

1. Сенаторов П. П. [и др.] Минерально-производственный комплекс Пензенской области. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2002. 128 с.
2. Логанина В. И., Петухова Н.А., Акжигитова Э. Р. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2011. №3. С. 8-12.
3. Большаков Э. Л. Сухие смеси для отделочных работ // Строительные материалы. 1997. №7. С. 8-9.
4. Телешов А. В. Новые заводы по производству сухих смесей // Строительные материалы. 2003. №11. С. 12-15.
5. Волженский А. В., Буров Ю. С. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1979. 476 с.
6. Fortes-Revilla C., Martínez-Ramírez S., Blanco-Varela M.T. Modelling of slaked lime–metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables // Cement and Concrete Composites. 2006. Vol. 28. Issue 5. Pp. 458-467.
7. Sepulcre-Aguilar A., Hernández-Olivares F. Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry // Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40. Issue 1. Pp. 66-76.
8. Cachim P., Velosa A.L., Rocha F. Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing conditions // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Issue 1. Pp. 71-78.
9. Konan K.L., Peyratout C., Smith A. Comparison of surface properties between kaolin and metakaolin in concentrated lime solutions // Journal of Colloid and Interface Science. 2009. Vol. 339. Issue 1. Pp. 103-109.
10. Шумков А. И. Бесклинкерное известково-алюмосиликатное гидравлическое вяжущее естественного твердения // Сухие строительные смеси. 2011. №3. С. 20-21.
11. Шумков А. И. Местные вяжущие, получаемые по энергосберегающим технологиям // Известия вузов. Строительство. 1993. №11-12. С. 26-30.
12. Дергунов С. А., Рубцова В. Н. Проектирование составов сухих строительных смесей. Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2008. 97 с.
13. Зоткин А. Г. Применение наполнителей в строительных смесях // Сухие строительные смеси. 2009. №3. С. 66-68.
14. Бабушкин В.И., Матвеев М.Г., Мчедлов-Петросян О.П.. Термодинамика силикатов. М.: Изд-во литературы по строительству. 1972. 352 с.
15. Danielle S Klimesch, Abhi Ray. DTA–TGA of unstirred autoclaved metakaolin–lime–quartz slurries. The formation of hydrogarnet // Thermochimica Acta. 1998. Vol. 316. Issue 2. Pp. 149-154.
16. Волженский А. В., Стамбулко В. И., Ферронская А. В. Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие, бетоны и изделия. М.: Стройиздат, 1971. 318 с.
17. Шангина Н. Н., Харитонов А. М. Особенности производства и применения сухих строительных смесей для реставрации памятников архитектуры // Сухие строительные смеси. 2011. №4. С. 16-19.
18. Горшков В. С., Тимашев В. В., Савельев В. Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.
19. Frías M., Cabrera J. Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C // Cement and Concrete Research. 2001. Vol. 31. Issue 4. Pp. 519-527.

**Валентина Ивановна Логанина, Пенза, Россия*
Тел. раб.: 8(8412)92-94-78, эл. почта: loganin@mail.ru

© Логанина В.И., Акжигитова Э.Р., Фадеева Г.Д., 2012

Исследование возможности модификации карбоксилатных пластификаторов в составе модифицированных мелкозернистых бетонных смесей

Магистрант С. С. Киски*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;
магистрант И. В. Агеев,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный университет;
к.т.н., профессор А.Н. Пономарев,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;
с.н.с. А. А. Козеев;
к.х.н., заместитель директора М. Е. Юдович,
ЗАО «НТЦ Прикладных нанотехнологий»

Ключевые слова: строительные материалы; нанотехнологии; нанодобавки

Анализ литературных данных и постановка задачи исследований

Применению ультрадисперсных добавок в качестве модификаторов бетонных смесей в последние десятилетия посвящено значительное количество обстоятельных работ [1-5]. При этом целями такой модификации ставились, в первую очередь, снижение пористости и повышение прочности получаемых бетонов [6-8]. И только при всестороннем исследовании [8] свойств относительно новой высокодисперсной пуццолановой добавки – активного аморфного микрокремнезема (в английском варианте – «silica fume») была обнаружена возможность его использования в качестве средства повышения подвижности бетонных смесей [9-11]. Однако из-за нестабильности применяемых для этой цели суспензий на основе микрокремнезема, его использование исключительно в качестве добавки, повышающей подвижность бетонных смесей, не нашло широкого применения. В результате по настоящее время ведется интенсивный поиск новых ультрадисперсных добавок, которые могли бы существенно влиять на показатели удобоукладываемости бетонных смесей либо непосредственно, либо в качестве модификаторов в составе пластифицирующих добавок. В этом направлении в последние десятилетия проявился значительный интерес к синтетическим наноуглеродным материалам [12].

Первые исследования влияния углеродных нанокластеров на свойства полимерных и цементных композиций относятся к периоду 1999-2004 гг. [12-13]. Несколько позднее были более подробно изучены синергические эффекты влияния нанокластеров углерода, вводимых в бетонную смесь, и совместного дисперсного армирования этих смесей высокомодульной фиброй [14-15]. В этот же период были выполнены исследования значений поверхностного натяжения и краевых углов смачивания растворов ряда модифицированных карбоксилатных гиперпластификаторов на твердых поверхностях силикатного стекла [16]. Однако в период проведения этих исследований, выполненных на первых образцах карбоксилатных пластификаторов, которые были разработаны к тому времени (VP 2500, ViscoCrete 5 New, ViscoCrete 125 и т.д.), одновременно создавались (и создаются) новые типономиналы улучшенных карбоксилатных добавок того же класса. Главная цель при этом – повышение эффективности их действия в широком диапазоне значений водоцементного отношения с одновременным снижением себестоимости, достигаемого тщательным выбором сырья и совершенствованием технологии производства. В последние годы наиболее широко применяемыми в странах ЕС и в России являются карбоксилатные гиперпластификаторы серии MelFlux (BASF, Германия) – MF1641, MF2641 и MF 5581, а также итальянские карбоксилатные гиперпластификаторы серии PowerFlow (PC 1, PC 2). Именно на примере этих пластификаторов (с использованием, например, MF 1641 как базовой добавки) была проведена работа по исследованию возможностей повышения их эффективности при модификации несколькими вариантами водорастворимых аддуктов нанокластеров углерода (товарный знак – АСТРАЛЕН® С) [17]. Результаты такой модификации, приведенные в цитируемой работе [17], показывают, что введение 2-6% АСТРАЛЕНА® С относительно используемой пластифицирующей добавки (MF 1641) приводит к двукратному увеличению подвижности бетонной смеси и к не менее чем 80%-му повышению прочности на сжатие получаемой таким образом цементной композиции.

На рынке сухих строительных смесей и добавок к ним в последние два года появились и стали доступными для промышленного применения новые виды золы уноса тепловых энергетических установок, работающих на твердом природном топливе. Зола уноса – это одна из высокоэффективных добавок к бетонным смесям, позволяющая получать бетоны с высокими параметрами прочности. Однако существующие в России золоотвалы, к сожалению, не позволяют производить на основе отечественных зол уноса строительные смеси с одними и теми же воспроизводимыми характеристиками, поскольку эти золы были сформированы (и формируются) из продуктов сгорания различных углей с разным количественным содержанием минеральной фазы различного состава. Тому же препятствуют и действующие стандарты на качество зол уноса, имеющие слишком широкий допуск на состав и качество золы.

Однако ситуацию существенно изменило появление на внутреннем и внешнем рынках сланцевой золы марки Zolest Bet [18]. Электрофильтровая зола Zolest Bet марки PSI является продуктом управляемого сгорания эстонских природных сланцев и обеспечена тщательными входным и технологическим контролем, поставляется в Россию в промышленных объемах по коду ТНВЭД 2621900000. Кроме возможности повышения связности бетонных смесей и прочности получаемого бетона, использование сланцевой золы в бетонных смесях положительно влияет на подвижность и удобоукладываемость этих смесей. Однако данные о возможности и результатах сочетания сланцевой золы Zolest Bet и углеродных модификаторов АСТРАЛЕН® С с целью оптимального повышения подвижности и физико-механических характеристик мелкозернистых композиционных бетонов до настоящего времени в доступных источниках не найдены.

В настоящей работе была поставлена задача исследовать пластифицирующую способность карбоксилатных добавок и оценить границы ее возможного повышения на примере нового французского гиперпластификатора PREMIA 360 при его модификации АСТРАЛЕНАМИ® С и введении в состав мелкозернистых бетонных смесей сланцевой золы Zolest BET. Второй, не менее важной задачей, было определить оптимальное соотношение между этими добавками-модификаторами, а также исследовать возможность повышения прочностных характеристик получаемых таким образом композиционных бетонов.

Методика постановки эксперимента

Исследования, результаты которых представлены в настоящей работе, проводились измерением характеристик цементно-песчаной смеси, основным вяжущим в которой являлся бездобавочный портландцемент ПЦ500Д0-Н производства ОАО «Завод «ЦЕСЛА» и ОАО «Мордовцемент», с последующим определением параметров образцов соответствующего мелкозернистого бетона после полного набора твердости. В качестве наполнителя использовался промытый речной песок по ГОСТ 8736-93 с модулем крупности 0-2, пластифицирующей добавкой служили карбоксилатный гиперпластификатор MF 1641 (BASF) – базовый пластификатор сравнения – и новый французский карбоксилатный гиперпластификатор PREMIA 360, для затворения смеси использовалась дистиллированная вода по ГОСТ 6709-72. Роль модификаторов пластифицирующей добавки и бетонной смеси в целом, играли водорастворимые аддукты нанокластеров углерода «АСТРАЛЕНЫ® С» ТУ2166--049-23380399-2010, тип 1 (серии 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1,6) и электрофильтровая сланцевая зола Zolest Bet марки PSI, ТНВЭД 2621900000.

Определение подвижности мелкозернистой бетонной смеси производилось согласно ГОСТ 10181-2000 методом измерения расплыва конуса на встряхивающем столике. Прочность на сжатие образцов затвердевшего бетона определялась по ГОСТ 10180-90. Относительная погрешность измерения величины расплыва конуса при многократных наблюдениях не превышала 14% при доверительной вероятности 0,95. Относительная погрешность определения предела прочности на сжатие контрольных образцов кубов бетона размерами 100x100x100 мм для серии из 20 кубов по каждой серии измерений не превышала 10% при доверительной вероятности 0,95. Нижнее значение предела прочности одного куба из серии не учитывалось. Количество модификатора АСТРАЛЕНА® С определялось методом прямого взвешивания на аналитических весах с относительной погрешностью не более 0,2% при доверительной вероятности 0,95. Количество модификатора Zolest Bet определялось также методом прямого взвешивания на технических весах с относительной погрешностью 2% при доверительной вероятности 0,95. Диапазон изменения концентрации модификатора АСТРАЛЕН® С составлял от 2 до 6% от массы пластифицирующей добавки, диапазон изменения концентрации модификатора Zolest Bet лежал в интервале от 0,1 до 20% масс. относительно всей бетонной смеси. Модификатор АСТРАЛЕН® С в различных концентрациях вводили в пластифицирующую добавку в виде жидкой фазы, формируемой методом последовательного разбавления начального водного

раствора с концентрацией в 0,1% масс., модификатор Zolest Bet в виде сухой добавки вводили в мелкозернистую бетонную смесь непосредственно перед ее затворением.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Результаты модификации базового карбоксилатного пластификатора MF 1641 различными сериями АСТРАЛЕНОВ® С приведены на диаграмме рис. 1. При этом исследования проводились с использованием ПЦ 500 Д0-Н ОАО «Мордовцемент» при в/ц 0,27.

Переход к пластификатору PREMIA 360 потребовал заметного увеличения в/ц (до значения 0,4) при использовании портландцемента производства ОАО «Завод “Цесла”».

Предварительный анализ сравнительной эффективности различных серий АСТРАЛЕНА® С, выполненный по данным, полученным на базовом пластификаторе, позволил выбрать наиболее эффективную серию 1.4 и в дальнейшем использовать для изучения возможностей улучшения пластификатора PREMIA 360 именно этот тип наноуглеродного модификатора. Результаты повышения пластифицирующей способности PREMIA 360 при его модификации АСТРАЛЕНАМИ® С и одновременно АСТРАЛЕНАМИ® С и модификатором бетона Zolest Bet приведены на диаграмме рис. 2.

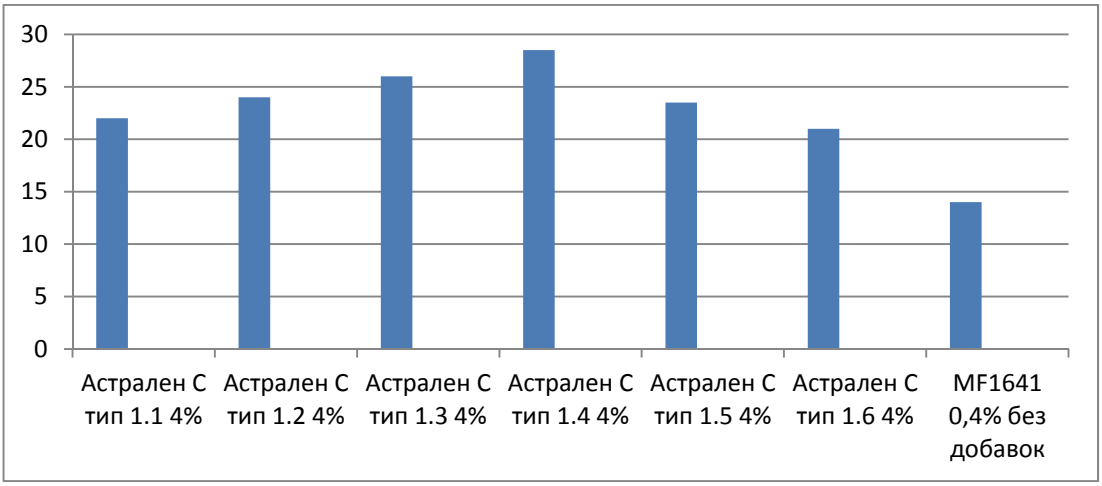


Рисунок 1. Диаграмма значений расплыва конуса на встряхивающем столике для различных серий АСТРАЛЕНА® С при его концентрации 4% масс. относительно модифицируемой пластифицирующей добавки

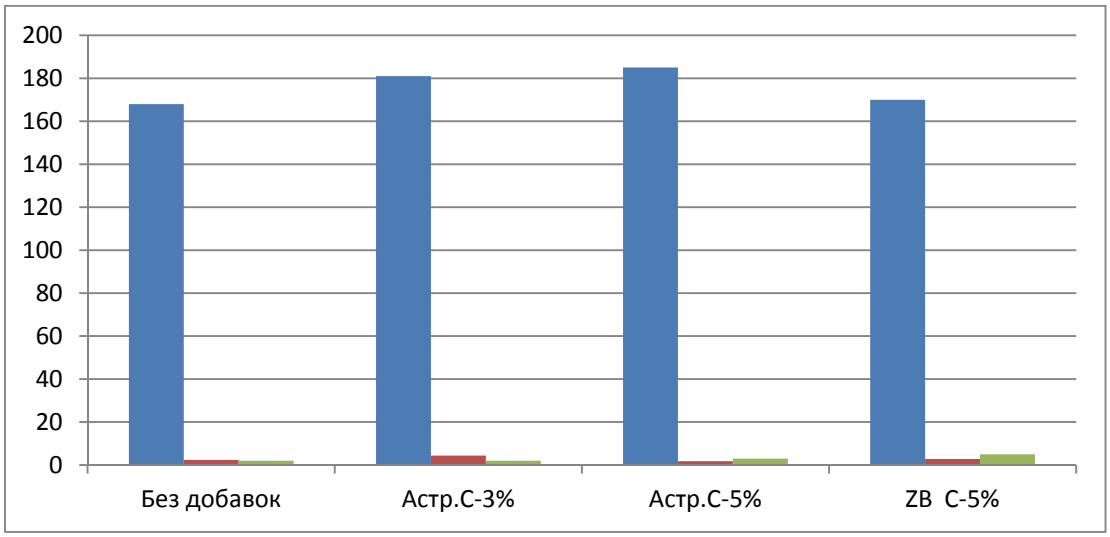


Рисунок 2. Диаграмма значений расплыва конуса для бетонной смеси с гиперпластификатором PREMIA 360, в количестве 0,3 % масс. относительно количества цемента. PREMIA 360 модифицировался АСТРАЛЕНАМИ® С и совместно АСТРАЛЕНАМИ® С и Zolest Bet

Поскольку сланцевая зола Zolest Bet кроме пластифицирующего эффекта обладает определенными пуццолановыми свойствами [15], была исследована также концентрационная зависимость предела прочности на сжатие кубов из той же затвердевшей бетонной смеси в более широком диапазоне концентраций Zolest Bet. Эта зависимость, представляющая интерес для решения задачи пластификации и водоредуцирования, приведена на графике рис. 3.

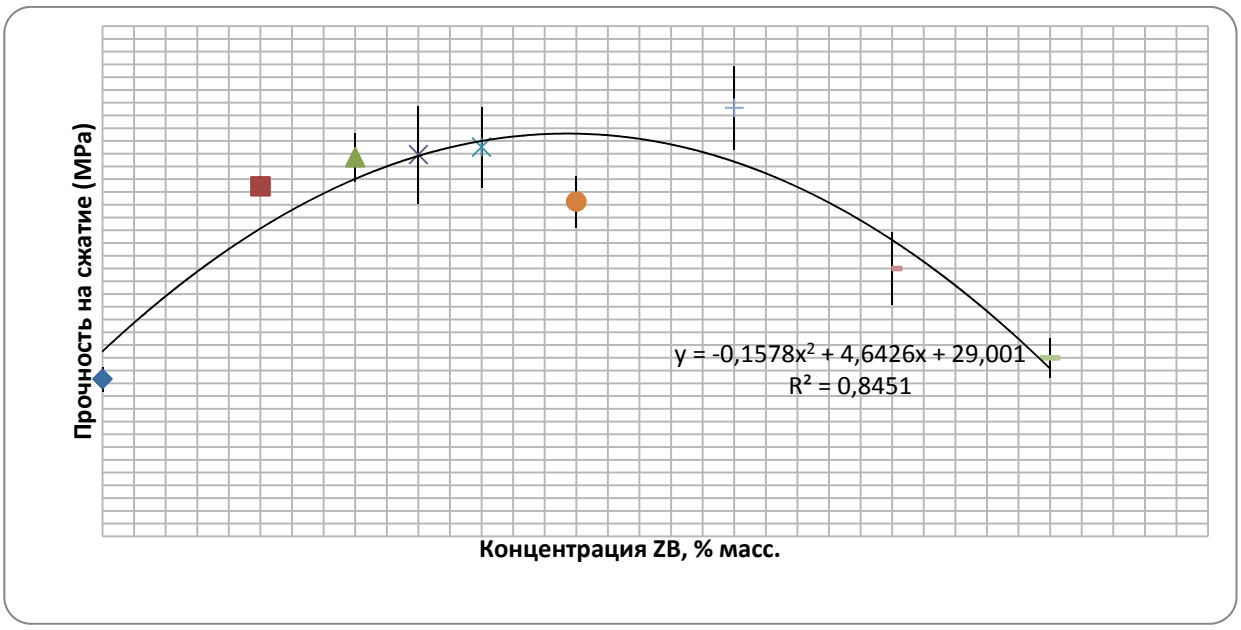


Рисунок 3. График зависимости предела прочности образцов кубов из мелкозернистого бетона от концентрации Zolest Bet в бетонной смеси, % масс. от полной массы смеси, при фиксированных в/ц (0,33) и количестве модифицированной АСТРАЛЕНАМИ® С (4% масс) пластифицирующей добавки (0,4%)

Из приведенного графика видно, что, казалось бы, максимальной прочности можно достичь, вводя 12-15% масс. **Zolest Bet** в состав мелкозернистого бетона. Однако при этом наблюдается определенная потеря подвижности, и тот факт, что при концентрации в 15% масс. на приведенной кривой наблюдается точка перегиба, говорит о начале образования комплексных соединений гидратированного оксида кальция. Эти соединения имеют отличные от основной массы цементного камня коэффициенты термического расширения и приводят к последующей (во времени) потере прочности бетона (растрескиванию). Во избежание этого следует находить компенсирующие решения, которые связываются с введением следующей группы специальных добавок, делающих такой состав слишком сложным.

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод об оптимальности использования небольших количеств Zolest Bet (2-4% масс. относительно массы смеси) как максимально эффективной пуццолановой добавки, позволяющей наилучшим образом модифицировать карбоксилатный пластификатор PREMIA 360 с наиболее эффективной концентрацией АСТРАЛЕНОВ® С (3-5% масс. относительно количества пластификатора).

Выводы

Получены новые данные для оптимальных составов комплексных добавок к составам мелкозернистых бетонных смесей, рассмотренным в работе. Получена концентрационная зависимость подвижности и предела прочности модифицируемых АСТРАЛЕНАМИ® С композиционных мелкозернистых бетонов. Также предложено использовать компенсирующие решения в целях снижения отрицательного влияния сланцевой золы Zolest Bet на подвижность таких бетонных смесей при высоких концентрациях этой добавки.

Литература

1. Баженов Ю. М. Технология бетона. М.: ГИК, 1987. 145 с.
2. Bensted J., Varma S.P. Some applications of infrared and Raman spectroscopy in cement chemistry // Cement Technology. 1974. №5. Pp. 440.
3. Grammond N. J. Thaumasite in Failed Cement Mortars and Renders from Exposed Brickwork // Cement Concrete Research. 1985. Vol. 15. Pp. 1039.
4. Кривцов Е. Е., Никулин Н. М., Ясинская Е. В. Исследование характеристик наномодифицированных сухих строительных смесей // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 29-32.
5. Brown P. W., Franz E., Frohpsdorft G., Taylor H. F. W. Analyses of the aqueous phase during early C3S hydration // Cement Concrete Research. 1984. Vol. 14. Pp. 257.
6. Kurdovski W. and Nocun-Wozelik. The Tricalcium Silicane Hydration in the Presence of Active Silica // Cement and Concrete Research. 1983. Vol. 13. Pp. 341-348.
7. Berenfeld V. A. The structural implications of the thaumasite from of sulfate attak // Structural Engineering. 1999. Vol. 77. №4. Pp. 10–11.
8. Айлер Р. Химия кремнезема. Т. 2. М.: Наука, 1982. 480 с.
9. Holland T. C. Working with Silica Fume in Ready-Mixed Concrete // Proceedings of The USA Experience. CANMET/ACI. Third International Conference. Trondheim, Norway. 1989. Vol. 2. Pp. 763-781.
10. Method of Producing Stabilized aqueous dispersions of Silica Fume / US Patent 4321243. C04B. 33/141.
11. Каприелов С. С. [и др.] Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона // Бетон и железобетон. 1992. №7. С. 4-7.
12. Ponomarev A. N., Aladjishkin A. N., Katselainen I. V., Panov S. A. Influence of hypercarbon fillers on epoxy amine polymer properties // CAILSP of Carbon Nanotubes Washington DC. USA, 1999. Pp. 9.
13. Пономарев А. Н. Синергизм наноструктурирования цементных вяжущих и анизотропных полимерных добавок в технологии композиционных бетонов с повышенными эксплуатационными свойствами // Вестник гражданских инженеров. 2005. №2(3). С. 47-53.
14. Пономарев А. Н. Проблемы синергизма в наноструктурировании цементных вяжущих и анизотропных полимерных добавок для композиционных бетонов // Современное состояние и перспективы развития строительного материаловедения. Восьмые академические чтения РААСН. Самара, 2004. С. 419-423.
15. Пономарев А. Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологий // Инженерно-строительный журнал. 2009. №6. С. 25-33.
16. Юдович М. Ю., Пономарев А. Н., Гареев С. И. Поверхностно-активные свойства наномодифицированных пластификаторов // Строительные материалы. 2008. №3. С. 2-3.
17. Низина Т. А., Пономарев А. Н., Кочетков С. Н., Козеев А. А. Результаты экспериментальных исследований цементных композитов, модифицированных водорастворимыми аддуктами нанокластеров углерода // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. 2011. Вып. 14. С. 117-120.
18. Ватин Н. И., Петросов Д. В., Калачев А. И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2011. №4(22). С. 16-21.

**Светлана Сергеевна Киски, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(921)782-4277; эл. почта: svkiski@yandex.ru

© Киски С.С., Агеев И.В., Пономарев А.Н., Козеев А.А., Юдович М.Е., 2012

Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей

Д.т.н., профессор В.И. Калашников;
д.т.н., профессор О.В. Тараканов;
к.т.н., профессор Ю.С. Кузнецов;
аспирант В.М. Володин;
старший преподаватель Е.А. Белякова*,
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Ключевые слова: высокопрочный бетон; бетон общестроительного назначения; бетон нового поколения; суперпластификатор; каменная мука; удельный расход цемента на единицу прочности

За последние 60 лет цементные бетоны общестроительного назначения прошли три этапа своего развития. Первый этап, начавшийся со второй половины XIX века, продолжался до 1970 г. Бетоны этого периода могут быть названы бетонами старого поколения. Они содержат в своем составе четыре основных компонента: цемент, песок, щебень и воду. Химические добавки использовались в основном в бетонах специального назначения: это пуццолановые, жаростойкие, из минеральных добавок, уплотняющие, противоморозные, ускорители и замедлители твердения. Сильные пластификаторы в бетонах начали применяться с 1969 г. [1-4].

Природные рыхлые, пористые и водопотребные пуццоланы использовались в гидротехнических бетонах. Хотя микрокремнезем (МК) был уже известен, вследствие высокой дисперсности и отсутствия сильных пластификаторов он не нашел применения в практике. В качестве пластификаторов с 1930 г. использовались в основном отходы производства: сульфитно-дрожжевая бражка, упаренная последрожжевая мелассная барда, сульфитно-спиртовая барда; лигносульфонаты – лигносульфонат технический, лигносульфонат технический модифицированный.

Второй переходной этап – период применения эффективных суперпластификаторов первого поколения, начался с 1970 г. Он характеризуется рецептурой бетонов старого поколения, модифицированных суперпластификаторами (СП) на нафталиновой и меламиновой основе. В связи с тем, что такие пластификаторы выпускаются и в настоящее время, а в России в основном количестве, пластифицированные бетоны переходного периода производятся в объеме, близком к 100%. К сожалению, нет статистических данных о производстве непластифицированных бетонов старого поколения без СП. По нашим оценкам, в большинстве районов, областей и республик выпускаются бетоны без СП. Их производители оставляют без внимания значительные революционные преобразования в рецептуре бетонов.

1990 г. – начало эры эффективных суперпластификаторов второго поколения на карбоксилатной основе вместо нафталиновой. Однако в рецептуре, составе и структуре песчаных и щебеночных бетонов не произошло особых изменений. Кардинальным изменением явилось введение в 1995 г. пуццоланического микрокремнезема (МК), кислой золы и каменной муки [5-10]. В этот период в передовых зарубежных странах бетоны становятся многокомпонентными, включающими 6-7 компонентов за счет использования МК и дисперсных наполнителей – кварцевой (микрокварц) и каменной муки (базальтовой, гранитной, известняковой и др.). В России бетоны нового поколения не производятся и в настоящее время.

Нельзя сказать, что порошковая активация бетонов не использовалась во втором переходном периоде и в начале третьего периода, но такая активация не преследовала целей кардинально изменить реологию бетонных смесей с суперпластификаторами. Основное ее назначение – снизить расход цемента в бетонах переходного поколения за счет активных тонкодисперсных наполнителей. Полиструктурная теория, разработанная академиком В.И. Соломатовым и развитая его научной школой, предусматривала введение тонкодисперсных наполнителей в количестве 20-40% взамен цемента. При этом устанавливался максимум прочности в функции объемного содержания наполнителя.

Третий период предусматривал получение высокопрочных и особовысокопрочных бетонов путем добавления в бетон переходного поколения значительного количества порошкового

дисперсного наполнителя, необходимых количеств микрокремнезема и тонкозернистого песка фракции 0,1-0,5÷0,16-0,63 мм. Мы назвали такие бетоны порошково-активированными.

Порошковая активация мелкозернистых и щебеночных бетонов может осуществляться на основе готовой сухой цементно-дисперсной смеси.

Широкая и разнообразная номенклатура сухих строительных смесей, выпускаемых в Западных странах и в России, не коснулась производства сухих бетонных смесей. Выпускать такие смеси для бетона как композиционного материала, включающего цемент, песок и щебень, неразумно и неэкономично. Транспортировать большие объемы щебня и песка в регионы, в которых эти компоненты имеются в достаточном количестве, не имеет смысла. Кроме того, такие смеси нельзя загружать, разгружать и транспортировать пневмотранспортом, они сепарируются при загрузке емкостей. То же самое относится к песчаным бетонам, в которых содержатся средние и крупные пески с размерами частиц 2-5 мм.

Последние достижения в технике бетона ознаменовались внедрением высокопрочных и особовысокопрочных бетонов из саморастекающихся бетонных смесей с прочностью 150-200 МПа [11-15]. При создании таких бетонов используются не суперцементы сверхвысоких марок, а традиционные цементы марок 500-550 (классов ЦЕМ 42,5-52,5). Наиболее полная реализация особых реологических свойств в саморастекании и самоуплотнении бетонных смесей достигнута в тонкодисперсных минерально-цементно-водных системах с гиперпластификаторами (ГП) последних поколений [16-18]. Добавление в минерально-цементные дисперсии реакционно-активных пуццоланических добавок – микрокремнезема, высокодисперсного метакаолина – позволило связывать в бетоне «балластную» гидролизную $Ca(OH)_2$ – портландит – в дополнительные цементирующиеся вещества с повышением начальной и нормированной 28-суточной прочности с кардинальным улучшением всех физико-технических свойств бетонов. Это относится, прежде всего, к порошковым бетонам (ПБ), изготавливаемым из тонкозернисто-порошковых сухих смесей. В таких смесях содержится 50-60% порошкового компонента (цемент, молотая горная порода, микрокремнизем) и 40-50% тонкозернистого (кварцевый песок фракции 0,1-0,6 мм).

Таким образом, реологическая матрица должна быть воднодисперсной, и ее дисперсная фаза должна быть способна к адсорбции олиго- или полиионов ГП и диспергироваться на дискретные частицы из агрегатов (кластеров), образующихся при затворении минеральных порошков водой без поверхностно-активных веществ.

В порошково-активированных щебеночных бетонах нового поколения (рис. 1) имеются три реологические матрицы. Матрица первого рода состоит из цемента, молотого кварцевого песка (каменной муки), микрокремнезема, суперпластификатора и воды; матрица второго рода включает матрицу первого рода и тонкий песок; матрица третьего рода (растворная часть бетона) состоит из матриц первого и второго рода и среднего или крупного песка. В бетоне старого поколения (рис. 2) отсутствует матрица второго рода, а матрица третьего рода состоит из цемента, воды, суперпластификатора и рядового песка.

Кафедра технологии бетонов, керамики и вяжущих Пензенского государственного университета архитектуры и строительства около 15 лет занимается разработкой и исследованием свойств разных видов высокопрочных и особовысокопрочных бесщебеночных порошковых бетонов [3-5], песчаных и щебеночных бетонов на порошковой связке классов по прочности В80-В140. Изготовленные в лаборатории кафедры в 2008-2009 гг. порошковые бетоны из тонкозернисто-порошковой сухой смеси с содержанием цемента (Ц) в пределах 680-750 кг на 1 м^3 бетона, микрокремнезема от 7 до 15% от массы Ц, молотого песка до $S_{уд}$ = 3200-3600 см^2/г – 350-375 кг на 1 м^3, тонкозернистого песка фр. 0,16-0,63 мм – 700-750 кг на 1 м^3, гиперпластификатора марки Melflux (1641F, 2641F, 2651F) – 0,8-0,9% от массы цемента, при В/Т = 0,10-0,13, были нами испытаны на долговременную прочность. Некоторые бетоны были изготовлены со стальной или акрилонитрильной фиброй. Результаты испытания приведены в табл. 1. Порошковая связка прошла успешное испытание для изготовления традиционных бетонов М200-800. В таких видах бетонов достигнут небывало низкий удельный расход цемента на единицу прочности — 3,4-4,5 кг/МПа, в том числе в бетонах без МК.

Как следует из табл. 1, бетоны с прочностью на сжатие 100-129 МПа через 28 суток нормально-влажностного твердения после естественного твердения на воздухе от года до двух лет существенно повышают свою прочность. Прирост прочности на сжатие составляет от 8,5 до 50%, на растяжение при изгибе – от 12,4 до 60%. Таким образом, в высококачественном микрооднородном бетоне «чудес», связанных с потерей его прочности, не обнаружено. ПБ-МК-21, ПБ-МК-46, ПБ-МК-53, ПБ-МК-54, имевшие более низкую прочность 100-110 МПа, через 28 суток

показали более высокий прирост прочности на сжатие (34-50%). Таким образом, некоторые бетоны нового поколения подчиняются по приросту прочности к 1 году известному логарифмическому закону: $R_{365} = R_{28} \cdot lg_{365} / lg_{28}$. В настоящее время испытаны бетоны в возрасте 3-4 лет. Результаты показывают, что прочность со временем возрастает и спадов прочности не происходит.

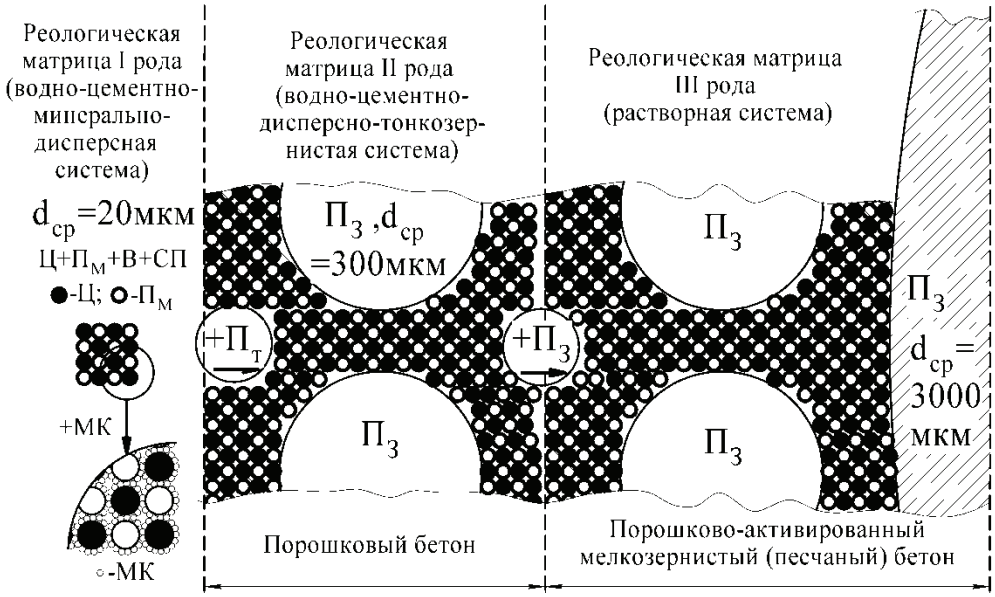


Рисунок 1. Топологическая структура порошково-активированного бетона нового поколения (щебень условно не показан)

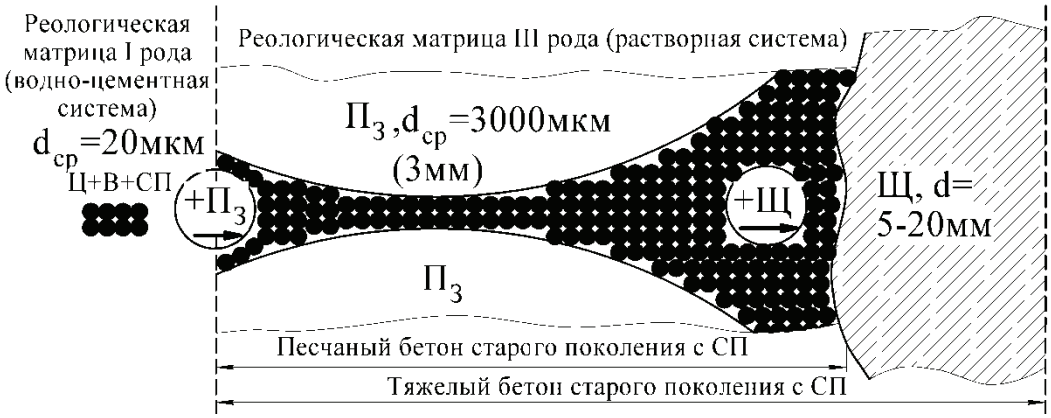


Рисунок 2. Топологическая структура бетонов старого поколения (в том числе СП)

Таким образом, вследствие чрезвычайно высокой прочности цементирующей связки из тонкозернисто-порошковой сухой смеси она может быть универсальной для изготовления: порошкового высокопрочного и особовысокопрочного бетона; песчаного бетона на мелком, среднем и крупном песке; щебеночного высокопрочного, особовысокопрочного бетона и бетона прочностью при сжатии 20-80 МПа.

Задачи исследований:

- разработка рецептуры сухих бетонных смесей с оптимальным соотношением цемента, молотого песка, микрокремнезема, ГП;
- определение плотности сухих смесей;
- изготовление ПБ, порошково-активированных щебеночных бетонов (ПАЩБ), порошково-активированных мелкозернистых бетонов (ПАМБ), порошковых клеев и изучение их свойств.

Таблица 1. Долговременная прочность порошковых бетонов

Показатели	Прочностные показатели реакционно-порошковых бетонов через, суток									
	ПБ-МК-21*		ПБ-МК-30		ПБ-МК-36Б**		ПБ-МК-46		ПБ-МК-52	
	28	610	28	480	28	480	28	480	28	385
Прочность, МПа - при сжатии	101	148	129	140	114	145	108	162	120	148
- на растяжение при изгибе	10,5	14,1	10,0	13,2	12,2	19,7	9,3	12,8	12,4	15,3
Прирост прочности на сжатие, %	46,5		8,5		27,2		50		23,3	
Прирост прочности на растяжение при изгибе, %	34,3		32		61,5		37,6		23,4	
Показатели	**ПБ-МК-53***		**ПБ-МК-53А*****		**ПБ-МК-54*****		**ПБ-МК-56**		**ПБ-МК-57*****	
	28	**385**	**28**	**385**	**28**	**385**	**28**	**365**	**28**	**385**
Прочность, МПа - при сжатии	105	144	110	148	106	144	119	134	115	138
- на растяжение при изгибе	12,1	13,6	12,6	17,6	12,4	16,4	11,3	12,9	13,4	15,8
Прирост прочности на сжатие, %	37,1		34,5		35,8		12,6		20	
Прирост прочности на растяжение при изгибе, %	12,4		39,7		32,25		14,2		17,9	

* – армированные стальной нержавеющей фиброй, d = 0,15мм; l = 8-9мм (1% по объему бетона);
** – армированные акрилонитрильной фиброй, d = 2,5мм; l = 4мм (0,3% по объему бетона);
*** – армированные комбинированной фиброй (стальной (0,9%) и акрилонитрильной (0,1%).

Для изготовления сухой тонкозернисто-порошковой бетонной смеси использовались: ПЦ М500 Д0 Вольского, Красноярского и Топкинского заводов; белый цемент М500 Щуровского завода; кварцевый молотый песок ($П_м$) $S_{уд}$=1400-4000 см^2/г Сурского, Башмаковского, Ивановского месторождений (Пензенская область) и Ачинского месторождения (Красноярский край); тонкозернистый песок фракции 0,16÷0,63 мм ($П_т$); микрокремнизем гранулированный (МК) Новокузнецкого завода ферросплавов и порошкообразный – Липецкого металлургического комбината; ГП на поликарбоксилатной основе Melflux 1641, 2651, 5581F.

В отдельных случаях использовалась металлическая нержавеющая фибра диаметром 0,15 мм, длиной 7-9мм и полиакрилнитрильная Ricem MC 2,5/8 мм.

Цемент из-за отсутствия эффективного смесителя-активатора смешивался предварительно с ГП Melflux пересыпанием на полиэтиленовой пленке и в шаровой лабораторной мельнице МБЛ с малым количеством шаров в течение 10 минут без увеличения удельной поверхности. Гранулированный МК вследствие плохого распускания в воде кратковременно (5-10 минут) диспергировался с тонкозернистым песком в мельнице. После совместного смешивания компонентов сухая смесь непрерывно засыпалась в миксерную мешалку с предварительно отдозированным в нее количеством воды в течение 5-6 минут при 400 об/мин. Смесь разливалась в зависимости от назначения в формы 40×40×160 мм, 100×100×100 мм, 70×70×280 мм, 100×100×400 мм или в пластмассовые формы для отделочных плит с размерами 600×300×15 мм.

При изготовлении песчаных бетонов в приготовленную водно-порошковую смесь добавлялся песок с последующим дополнительным перемешиванием; при изготовлении щебеночных бетонов добавлялся щебень фракции 5÷10 мм или смесь фракций 5÷10 и 10÷20 мм.

Контроль консистенции смесей осуществлялся в зависимости от их вида и требуемой технологии уплотнения: по самопроизвольному диаметру расплыва конуса ($Д_р$) от встряхивающего столика на стекле (конуса Хегерманна по ГОСТ 310.4-81); по осадке стандартного конуса (ОК) или по жесткости (Ж) на приборе Красного (ГОСТ 10181.1-81).

Плотность бетонной смеси определяли по взвешиванию мерных сосудов после ее самоуплотнения или вибрационного уплотнения. Выход бетонной смеси контролировался очень точно по следующим параметрам: обмеру затвердевших образцов в герметичных условиях через 12-14 часов после формования; взвешиванию уплотненных потерь бетонной смеси и сосудов с ее остатками. Фактическая плотность сравнивалась с теоретической, рассчитанной по методу абсолютных объемов.

Результаты испытаний представлены в табл. 2. Как следует из табл. 2, используя сухие тонкозернисто-порошковые бетонные смеси, можно изготавливать эффективные высокопрочные порошковые бетоны, порошково-активированные мелкозернистые и порошково-активированные щебеночные бетоны с удельным расходом цемента от 4,1 до 5,5 кг на один МПа прочности. В настоящее время этот показатель для практически всех бетонов марок от М200 до М800, производимых в России, составляет от 8 до 14 кг на один МПа. И лишь у отдельных производителей снижается до 7 кг/МПа. Многокомпонентные бетоны нового поколения характеризуются малой усадкой (0,22-03 мм/м), низким водопоглощением (0,6-1,5%), высокой морозостойкостью (для малоцементных с прочностью 20-60 МПа – более 200-500 циклов, для высокопрочных и сверхпрочных – более 1000 циклов попеременного увлажнения и оттативания). Важно то, что как песчаные, так и щебеночные бетоны, не содержащие в своем составе МК, имеют прочность на 5-15% ниже, чем с МК.

Таблица 2. Составы и свойства бетонных смесей, темпы твердения и прочность бетонов с использованием сухой порошковой бетонной смеси (СПБС)

№ состав			1	2	3	4	5	6	7
Вид бетонов			РПБ		РППБ		РПЩБ		
Состав бетонной смеси	СПБС	Ц	722	738	497	391	480	480	320
		$П_м$	332	380	374	293	260	260	235
		МК	79	73,2	-	39	52	-	22,2
		$П_т$	1046	1042	400	547	485	480	351
	$П_з$		-	-	1014	950	300	300	510
	Щ		-	-	-	-	800	840	1028
	В		218	169	154	152	157	154	120
ГП, % от Ц			0,9	0,9	0,9	0,9	0,75	0,75	0,9
В/Ц (В/Т)			0,3(0,1)	0,23(0,08)	0,31(0,06)	0,39(0,07)	0,33(0,06)	0,32(0,06)	0,376 (0,048)
Плотность бетонной смеси, кг/м^3			2376	2285	2365	2425	2505	2530	2534
Др, см ОК, см, Ж, с.			ОК 26	ОК 5-6	Ж 10-15	ОК 24	Ж 15-20	ОК 22	ОК 22
Прочность при сжатии (изгибе), МПа, в возрасте, сут.	1		52(8,0)	После ТВО 134 (13,1)	52(9,4)	-	55,6(7,2)	45,0(7,3)	66(8,6)
	7		126(10,8)		94,8(12,0)	91,2(11,7)	93(13,2)	90,4(11,3)	111 (12,1)
	25		147(16,4)		114(12,4)	116(12,1)	120(17,6)	106(13,1)	134 (15,0)
Цуд, кг/МПа			4,9	5,5	4,4	3,37	4,0	4,5	2,4

ГП входит в состав СПБС

Сухие смеси, содержащие в своем составе 6 компонентов, определяющих высокую прочность цементирующей матрицы, при использовании на бетонных заводах и ЖБИ увеличивают точность и существенно упрощают процесс дозирования. Они легко перемещаются пневмотранспортом и имеют насыпную плотность на 20-25% больше, чем цемент (табл. 3).

Рецептура сухих смесей может изменяться и включать в себя не 5, а 4 компонента: цемент, молотый песок, МК и СП. В этом случае она соответствует цементу ЦЕМ V в соответствии с Евразийским стандартом ГОСТ 3108-2003. По этому стандарту ЦЕМ V соответствует цементу, в котором содержание клинкера не превышает 35%. Такой цемент не выпускается ни одним цементным заводом России, хотя стандарт действует уже 10 лет.

Таблица 3. Плотность сухих тонкозернисто-порошковых бетонных смесей при различных соотношениях компонентов

	Соотношение компонентов	$\rho_{нас.}$, кг/м^3	$\rho_{упл.}$, кг/м^3
Сухая смесь без МК с молотым песком при $S_{уд}$=1400см^2/г	Ц : $П_м$: $П_т$ 1: 0,5: 1,63	1376	1786
Сухая смесь с МК с молотым песком при $S_{уд}$ =1400см^2/г	Ц : $П_м$: $П_т$: МК 1: 0,5: 1,38: 0,24	1324	1657
Сухая смесь без МК с молотым песком при $S_{уд}$ =3200см^2/г	Ц : $П_м$: $П_т$ 1: 0,5: 1,63	1336	1783
Сухая смесь с МК с молотым песком при $S_{уд}$ =3200см^2/г	Ц : $П_м$: $П_т$: МК 1: 0,5: 1,38: 0,24	1277	1752

Технология производства ЦЕМ V отличается от производства вяжущего низкой водопотребности (ВНВ), является более гибкой (и доступной для заводов сборного и монолитного бетонов) в связи с тем, что совместному помолу подвергаются не клинкер с наполнителями и СП, а уже произведенный бездобавочный цемент, СП, МК и молотый песок или другие наполнители (известняк, базальт, гранит или другие горные породы, имеющиеся в районе функционирования цементных заводов).

При производстве сухой смеси осуществляется кратковременный домол, определяющий функцию микрооднородного смешивания компонентов. Естественно, на цементном заводе или на заводах по производству сборного или монолитного бетона должен быть предусмотрен помол наполнителя.

Можно полагать, что если цементные заводы не освоят производство цемента ЦЕМ V, то его освоят отдельные крупные ДСК и заводы сборного и монолитного бетона. Для этого им необходимо организовать классификацию кварцевого песка, его помол и однородное смешение с цементом и другими компонентами.

В г. Красноярске в содружестве с ООО «Новые технологии строительства» по разработанной рецептуре смесей при их оптимизированной модификации из цветного бетона марки М1800-М2000 были изготовлены «Памятник Победы» и обелиск «Аллея Победы».

Выводы

1. Настоящий период в России характеризуется в основном производством пластифицированных 5-компонентных бетонов переходного поколения с СП или 6-компонентных с добавкой МК. Многокомпонентные (7- и 8-компонентные) бетоны в России практически не производятся.
2. Показано, что использование сухих тонкозернисто-порошковых смесей для получения всех видов бетонов нового поколения: реакционно-порошковых, порошково-активированных песчаных и порошково-активированных щебеночных, позволяет повысить прочность бетонов до 120-160 МПа, а фибробетонов – до 160-240 МПа и снизить удельный расход цемента на единицу прочности до 2,4-5,0 кг/МПа. Это определяет глобальную экономику в строительстве и отраслях, сопутствующих производству бетонов.
3. Опасения некоторых специалистов по бетону, связанные с потерей прочности бетонов при длительной эксплуатации, являются беспочвенными. Бетоны нового поколения не снижают прочности при длительном твердении и не показывают сбросов ее во времени.
4. Для производства бетонов нового поколения цементные заводы должны освоить выпуск композиционного цемента ЦЕМ V в соответствии с Евразийским стандартом ГОСТ 3108-2003. Крупные домостроительные комбинаты, заводы по производству бетона и заводы ЖБИ могут перейти на производство бетонов нового поколения, если освоят приготовление сухих реакционно-порошковых смесей на своих площадях.

Литература

1. Баженов Ю. М. Технология бетонов XXI века / Академические чтения РААСН. Новые научные направления строительного материаловедения. Часть 1. Белгород. 2005. С. 9–20.
2. Richard P., Cheurezy M. Reactive Powder Concrete with Heigh Ducttility and 200-800 MPa Compressive Strength // AGJ SPJ 144-22. 1994. Pp. 507-518.
3. Dugat J., Roux N., Bernier G. Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes. Materials and Structures. 1996. Vol. 29. Pp. 233-240.
4. Dallaire E., Bonnean O., Lachemi M., Aitsin P.-C. Mechanical Behavior of Consined Reactive Powder Concrete // American Society of Civil Engineers Materials Engineering Coufernce. Washington. 1996. Vol. 1. Pp. 555-563.
5. Kleingelhöfer P. Noue Betouverflissiger auf Basis Polycarboxylat // Proc. 13. Ybasil. Weimar. 1997. Bd. 1. Pp. 491-495.
6. Калашников В. И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов: дис… д-ра техн. наук. Воронеж, 1996. 89 с.
7. Калашников В. И., Иванов И. А. О характере пластифицирования минеральных дисперсных композиций в зависимости от концентрации в них твердой фазы // Механика и технология композиционных материалов. Материалы II Национальной конференции. София: БАН, 1979. С. 455-458.
8. Калашников В.И., Иванов И.А., О структурно-реологическом состоянии предельно разжиженных высококонцентрированных дисперсных систем // Труды IV Национальной конференции по механике и технологии композиционных материалов. София: БАН, 1985. С. 127-130.
9. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. М.: Стройиздат, 1998. 768 с.
10. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Гиперпластификаторы Melflux для сухих строительных смесей и бетонов // Строительные материалы. 2010. №3. С. 38-40.
11. Richard P., Cheurezy M. Composition of Reactive Powder Concrete. Scientific Division Bougies // Cement and Concrete Research. 1995. Vol. 25. №7. Pp. 1501-1511.
12. Калашников В.И., Ананьев С.В. Высокопрочные и особовысокопрочные бетоны с дисперсным армированием // Строительные материалы. 2009. №7. С. 59-61.
13. Свиридов Н.В., Коваленко М.Г. Бетон с прочностью 150 МПа на рядовых портландцементах // Бетон и железобетон. №2. 1990. С. 21-22.
14. Фаликман В.Р., Сорокин Ю.В., Калашников О.О. Строительно-технические свойства особовысокопрочных быстротвердеющих бетонов // Бетон и железобетон. 2004. №5. С. 5-10.
15. Bornemann R., Fenling E. Ultrahochfester Beton-Entwicklung und Verhalten // Leipziger Massivbauseminar. 2000. Bd. 10. Pp. 1-15.
16. Калашников В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов. Часть 1. Виды реологических матриц в бетонной смеси и стратегия повышения прочности бетона и экономии его в конструкциях // Строительные материалы XXI века. Технологии бетонов. 2007. №5. С. 8-10.
17. Калашников В.И. Тонкодисперсные реологические матрицы и порошковые бетоны нового поколения // Технологии бетонов. 2007. №6. С. 8-11.
18. Калашников В.И. От высокопрочных и особовысокопрочных бетонов будущего к суперпластифицированным бетонам общего назначения настоящего // Технологии бетонов. 2008. №1. С. 22-26.

** Елена Александровна Белякова, г. Пенза, Россия*

Тел. раб.: +7(8412)49-48-47; эл. почта: var_lena@mail.ru

© Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А., 2012

Особенности подбора химических модификаторов для экструзионной технологии бетонов

Д.т.н., профессор Д. О. Байджанов*,
Карагандинский государственный технический университет;
к.т.н., начальник отдела Е. К. Бюнау,
ОАО «Газпром-ВНИИГАЗ»;
к.т.н., технический директор О.А. Малышев,
ЗАО «Стример – Центр»

Ключевые слова: модификаторы; экструзионный метод; суперпластификаторы; фазовый переход; измерительный комплекс Микро-Гео-Тест; гидрофобизатор

Государственной программой форсированного индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2010-2014 годы поставлена цель – обеспечение диверсификации и повышение конкурентоспособности экономики страны в долгосрочном периоде с усилением ее социальной эффективности. В связи с этим предусмотрена технологическая модернизация и развитие инноваций и науки. Основными задачами модернизации являются:

- содействие трансферту технологий и внедрению отечественных технологических разработок;
- перевод отечественных предприятий на международные стандарты технического регулирования;
- снижение энергоемкости производства и ресурсосбережение.

Системное преобразование строительной отрасли осуществляется путем совершенствования государственного регулирования архитектурной, градостроительной и строительной деятельности, повышения качества и безопасности строительной продукции и создания условий для развития производства конкурентоспособных строительных материалов, изделий и конструкций с высокой добавленной стоимостью на инновационной основе. К 2014 г. планируется достижение следующих показателей по производству основных видов строительных материалов: цемента – 11,4 млн т/год, сборных железобетонных конструкций и изделий – 6480 тыс. м^3/год.

Одним из актуальных направлений является применение в стройиндустрии высокотехнологичных, низкоэнергоемких методов производства с высоким экономическим эффектом, таких как экструзионный метод формования изделий с применением различных химических добавок. Химические модифицирующие добавки в малых дозировках позволяют целенаправленно управлять технологическим процессом и получать бетон и железобетон высокого качества при относительно низкой себестоимости.

Экструзионная технология производства пустотных изделий из железобетона, в том числе с предварительно наряженным армированием, требует предварительного решения следующих задач: подбор состава и предварительная подготовка исходных материалов, обеспечение подготовки и уплотнения бетонной смеси, формование изделия и его конечная доводка [1-6].

От решения вышеперечисленных задач зависит в целом успех промышленного применения экструзионной технологии. В настоящее время основное количество поставленных задач достаточно успешно решено совместными усилиями строительных и машиностроительных специалистов, однако вопрос о применении химических модификаторов для данной технологии остается нерешенным. Этот факт, в первую очередь, определяется условиями создания изделий, т.е. параметрами сдавливания смеси в формовочной машине.

Целью настоящей работы является установление требований к химическим модификаторам, определяющим их пригодность в технологии экструзионного формования изделий из бетона и железобетона.

Правильное применение уже известных, а также новых химических добавок возможно только на основе сложившихся и развивающихся научных представлений о механизме их воздействия на цементные системы. В недавнем прошлом изыскание и разработка новых добавок проходили в большинстве случаев хаотично. Главное внимание уделялось возможности

использования отходов различных производств, так как основными требованиями были недефицитность сырья и дешевизна добавки [7].

Научно-практические положения о гидрофобизации цементных систем в присутствии кремнийорганических соединений (КОС) изложены в трудах В.Г. Батракова [8], Л.П. Орентлихер [9], Е.А. Ласской [10] и др.

Научно-теоретические воззрения о влиянии гидрофобизаторов, например, окисленного петролатума, кубовых остатков синтетических жирных кислот (КОСЖК), битумных дисперсий, соапстоков растительных масел, на цементные системы изложены в трудах М. И. Хигеровича и его соавторов [11-14].

Механизм действия суперпластификаторов большинство исследователей (Ф.М. Иванов, В.Г. Батраков [15, 16], Ю.М. Баженов [17] и др.) связывают с адсорбцией полярных молекул на поверхности гидратирующихся частиц цемента. Образование адсорбционного слоя приводит к дефлокуляции, изменению электрокинетического потенциала и, как следствие, к увеличению дисперсности твердой фазы и сил электростатического отталкивания.

Каждое из вышеуказанных направлений применения добавок интересно как с научной, так и технической стороны и требует дальнейшего исследования и совершенствования. Таким образом, исходя из краткого научно-технического обзора литературы, возникает необходимость в проведении дальнейших исследований химических модификаторов для экструзионной технологии.

В процессе практической работы над экструзионной технологией нами было отмечено возрастающее различие между такими реологическими свойствами бетонной смеси, как удобоукладываемость и пластичность. Удобоукладываемость определяется подвижностью (текучестью) бетонной смеси в момент заполнения формы, а пластичность – способностью деформироваться без разрыва сплошности. Поэтому индивидуальное применение пластифицирующих добавок для экструзионной технологии оказалось непригодным: формуемые изделия имели рваный вид и сплошные вертикальные и горизонтальные трещины.

Также известно, что индивидуальное применение гидрофобизирующей добавки типа олеиновая кислота приводит к образованию ее нерастворимых кальциевых солей, что усложняет ее применение в технологии бетонов. Приготовление добавок в виде водорастворимых эмульсий снижает экономическую и техническую эффективность их применения.

Нами разработан состав гранулированной добавки с целью применения в экструзионной технологии бетона, который включает в свой состав пластифицирующий гидрофобизирующий компонент и минеральный носитель. Это обеспечивает формование бетонных изделий высокого качества с заданными физико-техническими параметрами.

Практические результаты, полученные нами, показали, что для улучшения свойств рост удобоукладываемости бетонной смеси, применяемой для экструзионного формования, который регулируется химическими добавками пластифицирующего действия, приводит к снижению качества формуемых изделий, их растрескиванию, расслоению бетонной смеси и, в конечном счете, к невозможности реализации технологии. В то же время применение гидрофобизирующего компонента в составе химической добавки способствует снижению подвижности бетонной смеси, начинают проявляться ее пластические свойства, обеспечивающие возможность реализации экструзионной технологии и получения изделий высокого качества. На наш взгляд, в этом и проявляется преобладающий рост пластических свойств бетонной смеси над ее удобоукладываемостью (текучестью).

Теоретическому обоснованию и практическому подтверждению проявления пластических свойств бетонных смесей с гидрофобизирующими добавками посвящены труды М.И. Хигеровича и его учеников [6,9]. Считается, что сетчатый молекулярный слой из молекул гидрофобизирующего компонента добавки, образующийся в результате адсорбции на поверхности гидратирующих цементных зерен, позволяет обеспечить пластичность не только обычных бетонных смесей, но и, как показали наши опыты, бетонных смесей экструзионного формования. Нами был установлен факт пластифицирующего действия гидрофобизирующей добавки на бетонную смесь, применяемую в экструзионной технологии формования бетона, что ранее не было изучено другими исследователями.

Для проведения исследований был применен измерительный комплекс Микро-Гео-Тест (ИК МГТ), который предназначен для автоматизированных лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород, жидких материалов, строительных и низкомодульных конструкционных материалов [18].

Можно предположить, что основную роль в формировании пластических свойств бетона экструзионного формования играют углеводородные «хвосты» молекул гидрофобизатора, закрепившихся на частицах гидратирующего цемента. Это приводит к образованию межплоскостных поверхностей скольжения в бетонной смеси. Под внешним воздействием они позволяют относительно свободно перемещаться компонентам бетонной смеси в плоскостях, параллельных взаимному контакту, одновременно сохраняя однородность бетонной смеси путем удержания ее компонентов в направлении, вертикальном плоскостям скольжения.

С целью проведения исследований химических модификаторов бетона автором ИК МГТ Бюнау Е.К. была сконструирована специальная ячейка (рис. 1), позволяющая снимать данные в области средних давлений (до 100 МПа) при проведении термобарических испытаний образцов различных материалов. Основной задачей новой конструкции ячейки являлась возможность обеспечения наиболее точного снятия термобарических параметров исследуемого вещества.

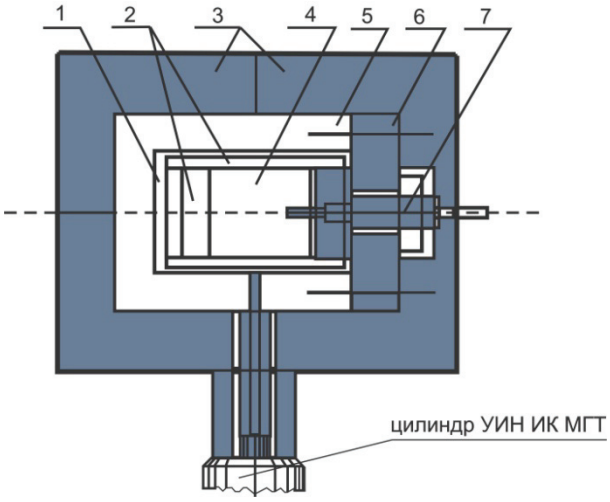


Рисунок 1. Схема ячейки для исследования фазовых превращений:
1 – рабочая жидкость (вода), передающая гидравлическое давление на гидроизолированный образец;
2 – гидроизоляция, передающая гидростатическое давление на образец, она же играет роль дополнительной теплоизоляции;
3 – внешняя термоизоляция силового корпуса ячейки; 4 – исследуемый образец;
5 – силовой корпус ячейки;
6 – крышка корпуса; 7 – термодатчик

В качестве образцов химических модификаторов для экструзионной технологии бетона были выбраны:

- олеиновая кислота;
- моторное масло.5W-50;
- нонадекан «Ч» $C_{19}H_{40}$ (парафин).

В качестве вещества, имеющего фазовый переход первого рода в диапазоне исследуемых PVT параметров (англ. pressure, volume, temperature – давление, объем, температура), был выбран бензол.

Эксперимент проводили по следующей методике:

- диапазон давлений до 100 МПа отобран как определяющий упругие деформации вещества;
- обеспечена гидроизоляция исследуемого образца материала от стального корпуса ячейки;
- минимизирован тепловой контакт корпуса ячейки и насоса ИК МГТ;
- реализована техническая возможность быстрого разогрева и охлаждения исследуемого образца вещества;
- в исследуемое вещество вводится чувствительный термодатчик.

В ходе эксперимента использовали возможность ИК МГТ синхронно регистрировать изменения давления, объема и температуры при постоянной массе исследуемого образца вещества. В данном эксперименте ИК МГТ применялся в том варианте сборки, который имеет следующие параметры:

- управляемое изменение давления в диапазоне 0,1-100 МПа;
- максимальный объем образца 20 см^3 с возможностью управляемого изменения объема в диапазоне 2,5 см^3.
- плавный нагрев (остывание) образца в диапазоне температур (от +15 до +90)°С.

Из трех вышеуказанных PVT параметров управляемыми в данном случае были два: давление P и объем V. Управление данными параметрами велось в трех режимах:

- сканирование плавного изменения давления от атмосферного до заданного и обратно с постоянной заданной скоростью;
- в изобарном режиме поддерживалось постоянным наперед заданное давление;
- в изохорном режиме поддерживался постоянным объем. Результаты исследований приведены на рисунках ниже (рис. 2-8).

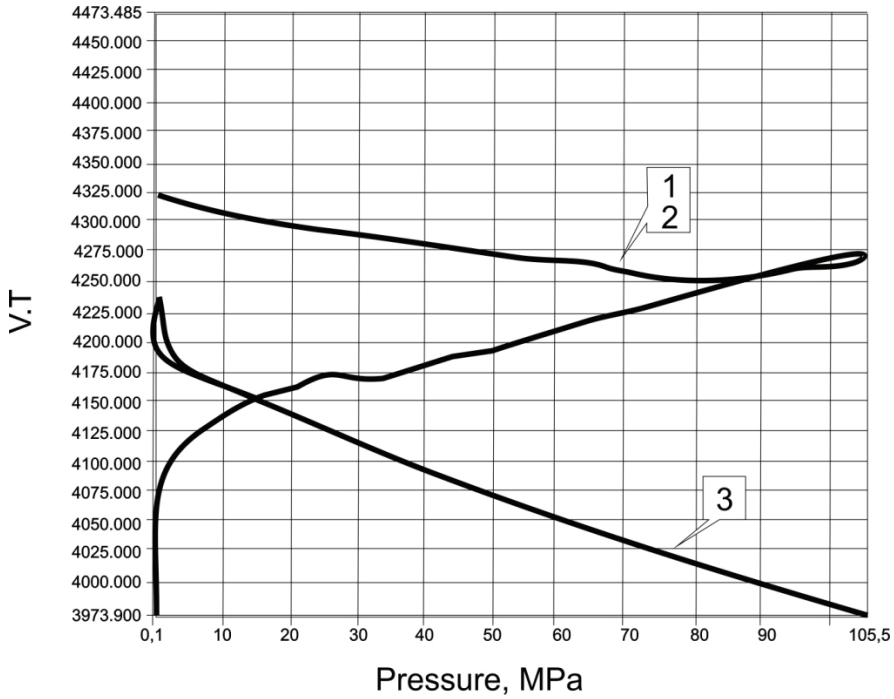


Рисунок 2. Зависимость объема олеиновой кислоты от давления (1). Зависимость температуры от давления олеиновой кислоты (2)

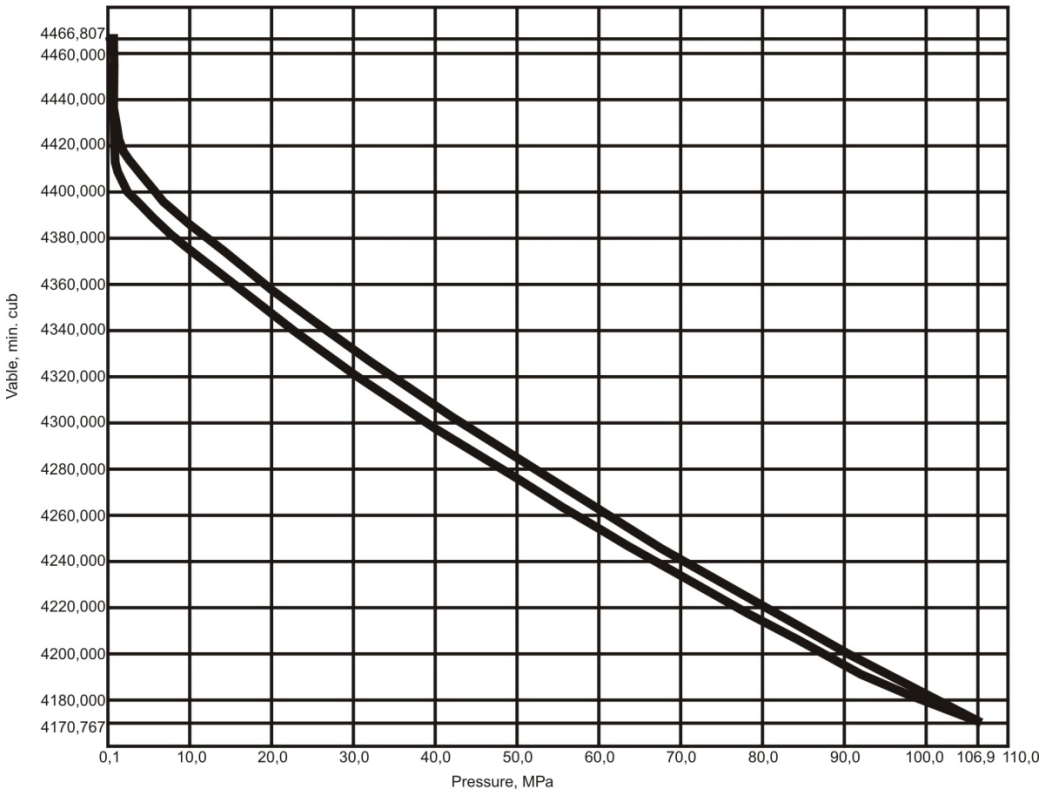


Рисунок 3. Зависимость объема моторного масла 5W-50 от давления

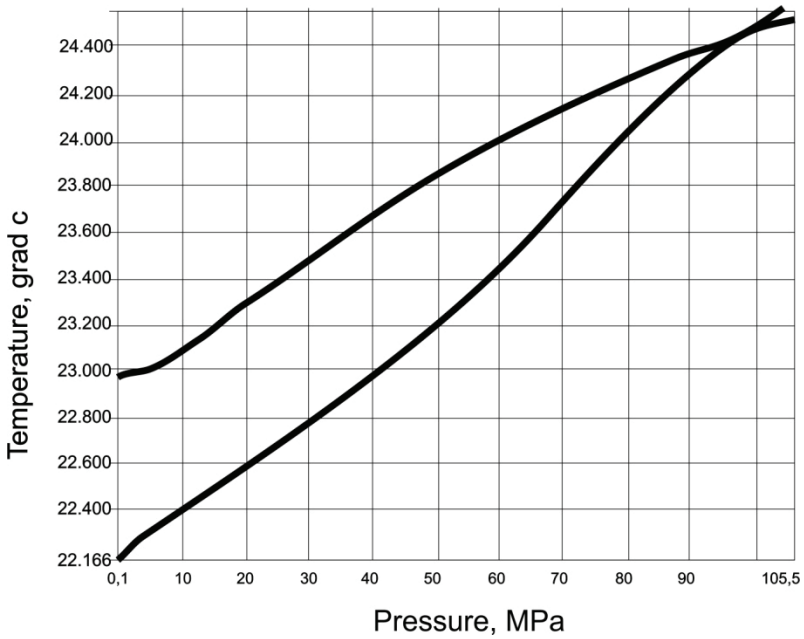


Рисунок 4. Зависимость температуры моторного масла 5W-50 от давления

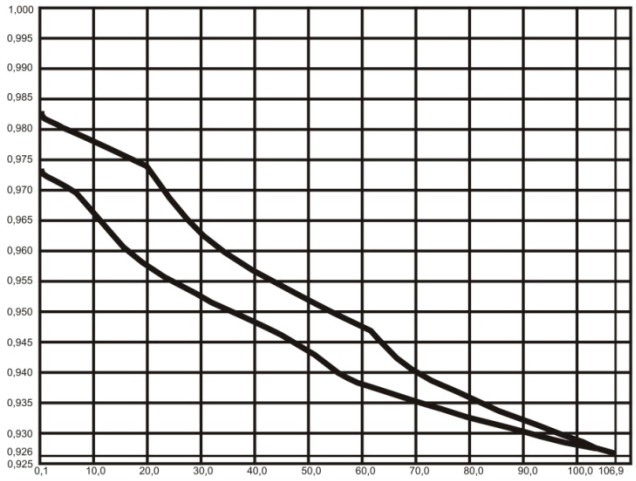


Рисунок 5. Зависимость объема нонадекана «Ч» C19H40 от давления

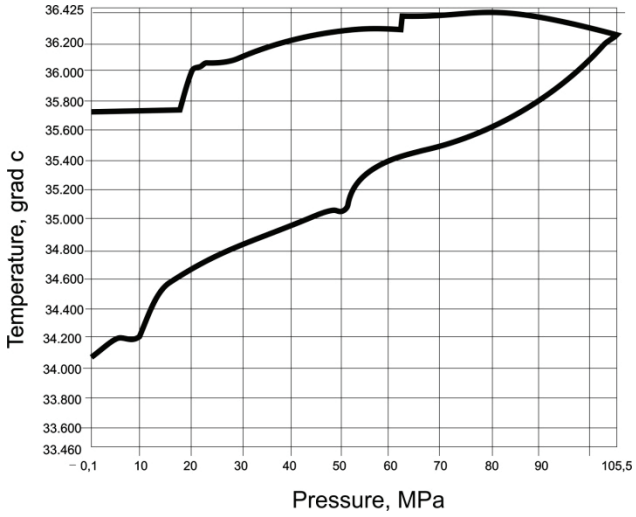


Рисунок 6. Зависимость температуры нонадекана «Ч» C19H40 от давления

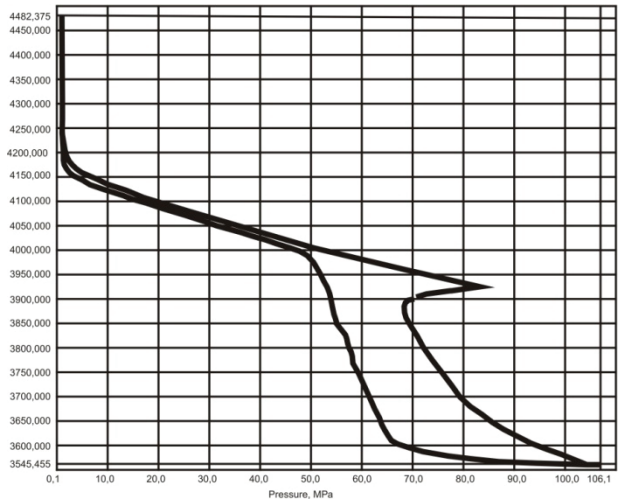


Рисунок 7. Зависимость объема бензола от давления

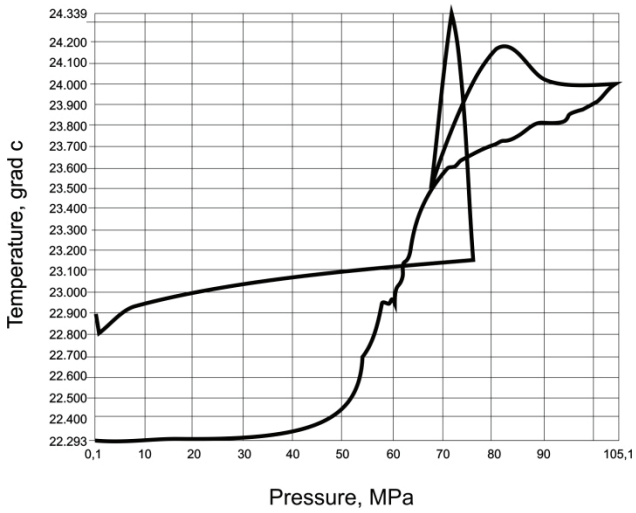


Рисунок 8. Зависимость температуры бензола от давления

Результаты проведенных исследований показали, что некоторые вещества, такие как нонадекан (парафин) и бензол, при объемном сжатии имеют фазовый переход из жидкого агрегатного состояния в твердое. Причем, судя по анализу зависимости температуры от объема этих веществ, которая констатирует скачок температуры, мы имеем дело с фазовыми переходами первого рода. Отметим, что к фазовым переходам первого рода относятся изменения агрегатного состояния вещества (кипение, плавление, возгонка и обратные им процессы). Они сопровождаются теплотой фазового перехода, при этом удельные термодинамические потенциалы фаз остаются постоянными. Резкое изменение температуры объясняется тем, что удельный объем и энтропия меняются скачком, что мы и наблюдаем у исследованных веществ. В данном случае бензол приведен в качестве эталонного, известного вещества, имеющего фазовый переход первого рода.

Переходы первого рода описываются уравнением Клайперона-Клаузиуса:

$$dp / dT = q / T(v1 - v2), \quad (1)$$

где P – давление;
T – температура;
q – тепло;
V1 – объем жидкой фазы;
V2 – объем твердой фазы.

С микроскопической точки зрения при структурных фазовых переходах первого рода атомы вещества перемещаются на большие расстояния порядка размеров постоянной решетки. При этом изменение симметрии решетки происходит скачком.

Ввиду важности наличия фазового перехода первого рода для экструзионной технологии формования бетонных изделий можно утверждать, что вещества, для которых характерны аналогичные структурные изменения в исследуемом диапазоне PVT параметров, не пригодны для модифицирования бетонной смеси по данной технологии. В других PVT параметрах они могут быть применены, с учетом достигаемых эффектов, но для экструзионной технологии это не имеет смысла.

Характеризуя это явление с точки зрения реологии, мы имеем вместо ожидаемого пластифицирующего эффекта его отсутствие, так как в данных условиях экструзионного формования (от 25 до 45 МПа) перечисленные вещества начинают обладать свойствами, присущими кристаллическим веществам, т.е. превращаться в балласт (с точки зрения химического модификатора) или просто микронаполнитель.

Таким образом, из результатов исследований установлено, что для экструзионной технологии формования бетона в качестве гидрофобизирующего компонента добавки пригодна олеиновая кислота. Применение моторного масла 5W-50, в силу наличия у него канцерогенных свойств, становится неприемлемым.

Анализ результатов проведенных исследований позволил сформулировать следующие предположения:

- при определении пригодности химических модификаторов бетона необходимо знать их токсикологические характеристики и термобарические характеристики для конкретных условий работы;
- для экструзионной технологии формования бетона могут быть пригодны только химические модификаторы, у которых отсутствуют фазовые переходы первого рода.

В дополнение к изложенному отметим, что при проведении исследований нонадекана «Ч» $C_{19}H_{40}$ было обнаружено наличие двух фазовых переходов, что подтвердило наличие в нем еще одного вещества, установленного на основании известных табличных данных [19], такого как гептадекан $C_{17}H_{36}$. Это подтверждает эффективность разработанного измерительного комплекса Микро-Гео-Тест и методики проведенных исследований.

Выводы

В данной статье приводятся экспериментальные данные по оценке пригодности химических добавок, основанных на индивидуальных свойствах компонентов, которые входят в состав химических модификаторов, применяемых для экструзионной технологии формования бетонных изделий. По результатам исследований установлено, что в качестве гидрофобизирующих компонентов в составе химических добавок могут использоваться только те вещества, у которых в диапазоне физических параметров технологии экструзионного формования бетонных смесей не отмечается явление фазового перехода первого рода. Кроме того, в составе рекомендуемых модификаторов реагенты, которые обладают канцерогенными свойствами, являются неприемлемыми.

Литература

1. Байджанов Д. О. Экструзионная технология железобетона / КарГТУ. Караганда, 2001. 165 с.
2. Москвин В. М., Иванов Ф. М., Алексеев С. Н., Гузеев Е. А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
3. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. М.: Стройиздат, 1990. 400 с.
4. Орентлихер Л. П. Использование кремнийорганической смолы в строительных материалах // Материалы совещания «Эффективности применения кремнийорганических продуктов в строительстве». М., 1977. С. 25-26.
5. Ласская Е. А., Воронков М. Г. Кремнийорганические водоотталкивающие покрытия. Киев: Будівельник, 1968. 91 с.
6. Хигерович М. И. Гидрофобный цемент и гидрофобно-пластифицирующие добавки. М.: Промстойиздат, 1957. 203 с.
7. Хигерович М. И., Набоков А. Б. Влияние некоторых адсорбирующих добавок на структуру и свойства цементынх систем // Труды X конференций силикатной промышленности. Будапешт, 1970. С. 102-105.
8. Хигерович М. И., Байер В. Е. Улучшение свойств бетона органическими поверхностно-активными добавками // Обзорная информация ВНИИЭСМ. М., 1975. С. 46.
9. Хигерович М. И., Байер В. Е. Гидрофобно-пластифицирующие добавки для цементов, растворов и бетонов. М., 1979. 124 с.
10. Иванов Ф. И., Москвин В. М., Батраков В. Г. и др. Добавки для бетонных смесей-суперпластификаторов С-3 // Бетон и железобетон. 1979. № 10. С. 20.
11. Иванов Ф. М., Батраков В. Г., Лагойда А. В. Основные направления применения химических добавок к бетону // Бетон и железобетон. 1985. № 4. С. 17-18.
12. Баженов Ю. М. Технология бетона: учебное пособие для вузов. М., 2002. 253 с.
13. Патент №2431129, Российская Федерация. Способ определения механических свойств монолитных образцов / Пятахин М.В., Бюнау Е.К., опубл. 10.10.2011 г.
14. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 708 с.
15. Вовк А. И. Суперпластификаторы в бетоне: еще раз о сульфате натрия, наноструктурах и эффективности // Мир строительства и недвижимости. 2011. №4. С. 1-3.
16. Вовк А. И. Добавка на основе сополимеров нафталинсульфокислоты: теория и практика использования // Технология бетонов. 2010. №11-12. С. 6-8.
17. Изотов В. С., Соколов Ю. А. Химические добавки для модификации бетона. М.: Палеотип, 2006. 244 с.
18. Чан Минь Дык, Сахаров Г. П. Экструзионный мелкозернистый бетон // Известия вузов. Строительство. 2008. № 2. С. 24-26.
19. Сахаров Г. П., Чан Минь Дык. Экструдированный мелкозернистый бетон // Технологии бетонов. 2009. № 2. С. 24-25.

**Байджанов Джумагельды Омарович, г. Караганда, Казахстан*

Тел. раб.: 8(7212) 56-95-06; эл. почта: BDO3@yandex.ru

© Байджанов Д.О., Бюнау Е.К., Малышев О.А., 2012

Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства

К.т.н., доцент С.В. Клюев*,
ФГБОУ ВПО Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

Ключевые слова: мелкозернистый бетон; техногенный песок; фибробетон

Для строительства объектов чемпионата мира по футболу 2018 года необходимо в ближайшие годы удвоить производство высококачественных строительных конструкций, таких как балки, плиты, ригели и др. Более того, в настоящее время происходит интенсивное строительство крупных объектов, что приводит к необходимости использования бетонов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, такими как прочность на сжатие и растяжение, износостойкость, коррозионная стойкость, трещиностойкость, морозостойкость и т. д. Для разрешения данной проблемы были разработаны составы мелкозернистого сталефибробетона на основе техногенного песка (отсева дробления кварцитопесчаника, обогащенного таволжанским песком), композиционных вяжущих, микродисперсной добавки и гиперпластификатора GLENIUM 115.

Исследования, посвященные дисперсно-армированному бетону, были выполнены Российским инженером В.П. Некрасовым в начале XX в. В России основу знаний о сталефибробетоне сформировали Ю.М. Баженов, И.В. Волков, В.П. Вылекжанин, Л.Г. Курбатов, И.А. Лобанов, А.П. Павлов, Ю.В. Пухаренко, Ф.Н. Рабинович, В.П. Романов, К.В. Талантова, Г.К. Хайдуков, О.Н. Хегай и др. [1-5].

В развитие науки о сталефибробетоне большой вклад внесли ученые Австрии, Австралии, Бельгии, Германии, Голландии, Испании, Канады, Китая, Польши, США, Франции, Чехии, Швейцарии, ЮАР, Японии и других стран. Из них необходимо отметить J.P. Romualdi, B. Gordon, G.B. Batson, M. Jeffrey, I.A. Mandel, I.L. Carson, W.F. Chen, D.I. Hannant, B. Kelly, P.S. Mangat, A.E. Naaman, R.N. Swamy, D. Colin Johnston, D.R. Lankard, V. Ramakrishnan, G. Ruffert, K. Kordina, W.A. Marsden, J. Vodichka и др. [6-12].

Ценность стальных волокон состоит в том, что они не только придают бетону новые свойства, но и открывают путь принципиально новой технологии изготовления строительных изделий. Армирование производится непосредственно в бетоносмесительных агрегатах, т.е. в бетономешалку загружают цемент, песок, щебень и сами волокна, перемешивают их и получают готовую к применению армированную бетонную смесь, которую заливают в форму. Время изготовления изделий сокращается практически вдвое. В связи со значительным повышением физико-механических свойств снижается материалоемкость элементов конструкций, что приводит к уменьшению веса зданий и сооружений.

Ранее проведенные исследования по изучению возможности использования техногенных песков Курской магнитной аномалии (КМА) касались в основном изучения вещественного состава и строения попутнодобываемых скальных пород КМА, разработки составов и технологии производства цементобетонов на их основе, что позволило перевести породы сланцевой толщи, кварцитопесчаники, пески, попавшие в зону горных работ при добыче железистых кварцитов, из разряда отходов в категорию полезных ископаемых [13,14].

Свойства техногенных песков, бетонных смесей и бетонов на их основе зависят от многих факторов, обусловленных свойствами исходных пород, способами их измельчения и методами обогащения полученного продукта. Наиболее существенное влияние оказывают прочность, структура и состав породы. При сопоставлении свойств природных и техногенных песков выявляются принципиальные различия этих материалов. Природные пески в основном являются кварцевыми, с округлой формой зерен и гладкой поверхностью, а техногенные пески имеют существенные различия по составу и свойствам исходных пород, форме зерен и шероховатости их поверхности (рис. 1.).

Шероховатость заполнителей тесно связана с водопоглощением породы: чем выше шероховатость, тем больше водопоглощение. По смачиваемости поверхности заполнителя можно судить о его активности. Чем активнее поверхность заполнителя, тем толще слой притягиваемой и удерживаемой ею воды. При низком значении Ц/В большая толщина удерживаемой воды должна уменьшать расслоение цементного теста и этим повышать адгезию в растворе или бетоне [13].

а) б)

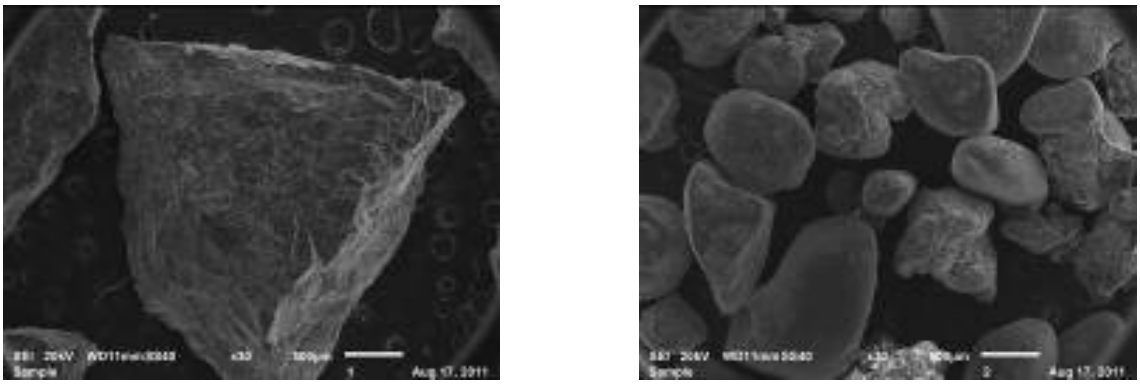


Рисунок 1. Зерно: а) техногенного песка; б) природного песка

При высоком значении Ц/В невозможно образование толстой пленки жидкой фазы на поверхности заполнителя, так как соотношение толщины пленок жидкой фазы вокруг зерен заполнителя и цемента будет определяться соотношением их гидравлической активности. Для цементного теста высокой вязкости (из-за повышенного значения Ц/В) и песка с высокой водоудерживающей способностью может иметь место неполное смачивание поверхности заполнителя и, в результате, частичное прилипание цементного теста к поверхности заполнителя, что значительно снизит величину сцепления между ними.

Основной задачей при производстве мелкозернистых бетонов, в том числе фибробетонов, является снижение расхода клинкерной составляющей, так как из-за отсутствия крупного заполнителя идет перерасход цемента. Наиболее существенными факторами снижения содержания цемента в дисперсно-армированных мелкозернистых бетонах являются уменьшение водопотребности бетонной смеси и повышение активности вяжущего. В связи с этим перспективным направлением повышения эффективности таких бетонов является применение композиционных вяжущих [13,14].

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны вяжущие следующих составов:

- вяжущее тонкомолотый цемент (ТМЦ-100) получали путем домола до удельной поверхности *S*уд=500 м²/кг портландцемента ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108–2003;
- вяжущее низкой водопотребности (ВНВ-100) получали путем совместного помола до удельной поверхности 500 м²/кг портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н и пластифицирующей добавки СП-1 в оптимальной дозировке (табл. 1).

Таблица 1. Физико-механические характеристики композиционных вяжущих

Вид вяжущего	Нормальная густота теста, %	Сроки схватывания, час.		В/Ц	Активность вяжущего, (МПа)	
		начало	конец		при изгибе	при сжатии
ЦЕМ I 42.5Н	26,2	2-40	4-40	0,4	7,2	48,9
ТМЦ-100	25,3	2-20	4-30	0,35	10,2	61,3
ВНВ-100	22,8	2-10	4-10	0,28	12,4	80,2

Исследование реологических свойств композиционных вяжущих проводили путем оценки метода совмещения полных реологических кривых, исследуемых в стационарном ламинарном потоке.

При сопоставлении зернового состава ТМЦ-100 и ВНВ-100 можно сделать вывод, что при одинаковой удельной поверхности вяжущих в ВНВ-100 зерен крупностью от 5 до 20 мкм,чем в ТМЦ-100, соответственно, доля частиц размером менее 5 мкм в ТМЦ-100 несколько выше, чем в ВНВ-100. Зерновой состав получаемого при этом вяжущего ВНВ-100 отличается более высоким содержанием частиц крупностью от 5 до 20 мкм, что обеспечивает его более высокую активность.

По полученным данным можно оценить и эффективность помола: помол цемента с пластифицирующей добавкой СП-1 в количестве 0,6% от массы цемента проходит интенсивнее; так, требуемая величина удельной поверхности 500 м^2/кг достигается через 2 ч. помола, а не через 3 ч., как в случае помола цемента без добавки, что объясняется расклинивающим действием самой добавки (рис. 2).

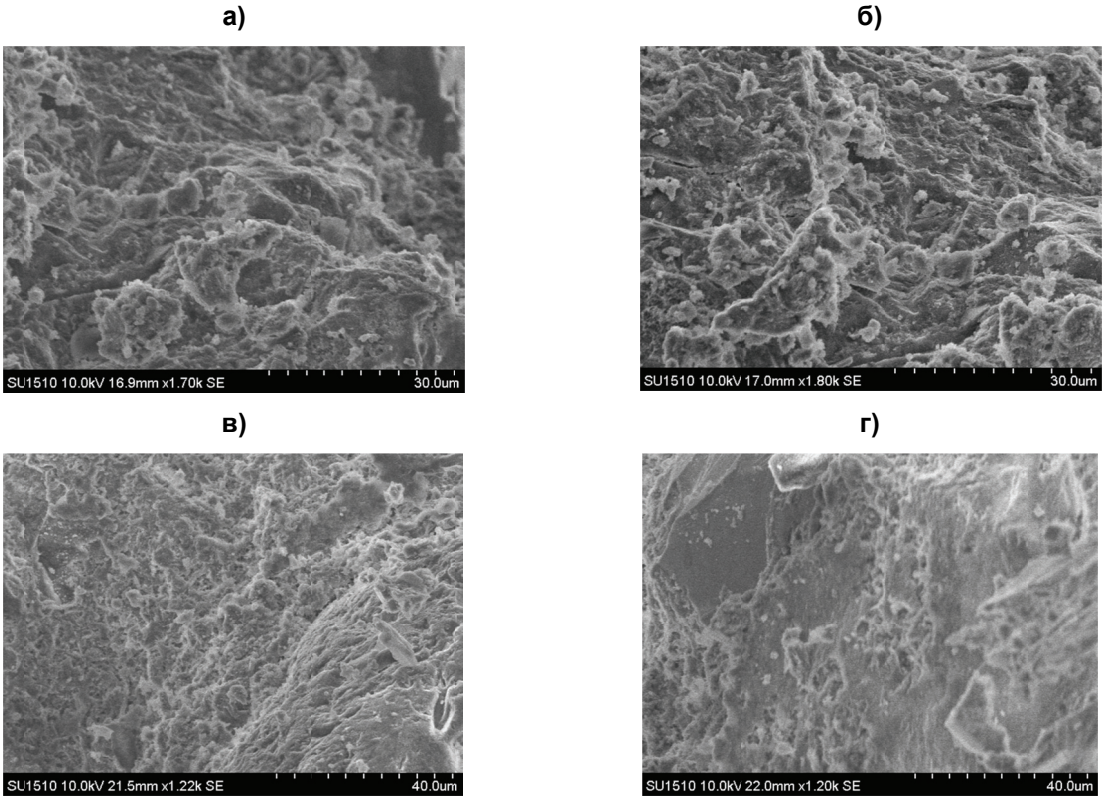


Рисунок 2. Микроструктура в зависимости от свойств вяжущих: а), б) морфология новообразований цементного камня ЦЕМ I 42,5Н; в), г) морфология новообразований цементного камня ВНВ-100. Увеличение: а), в) – х16000; б), г) – х32000

Микродисперсную добавку получали путем помола до удельной поверхности *S*уд=700 м²/кг используемого отсева дробления кварцитопесчаника. С целью изучения его свойств был проведен рентгенофазовый анализ (рис. 3).

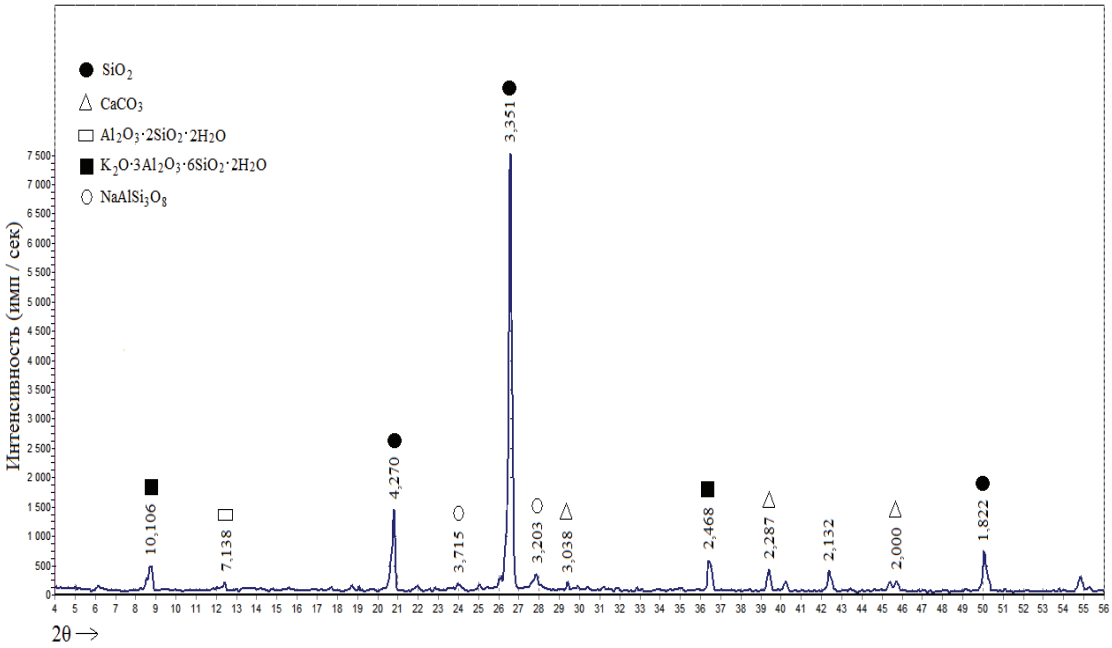


Рисунок 3. Рентгенограмма микронаполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника

Анализ рентгенограммы показал, что микронаполнитель состоит преимущественно из кварца зеленосланцевой степени метаморфизма, спецификой которого является дефектность кристаллической решетки и наличие включений. В процессе техногенных преобразований, при дроблении и помоле частицы кварцитопесчаника частично аморфизуются, превращаясь в активную минеральную добавку [13].

Перспективным направлением повышения эффективности мелкозернистого сталефибробетона является применение композиционных вяжущих и высокоплотной упаковки зерен заполнителя. В данном исследовании был разработан алгоритм и программа расчета составов мелкозернистого сталефибробетона на техногенных песках, обогащенных таволжанским песком, позволяющие получать более плотную упаковку зерен заполнителя (рис. 4).

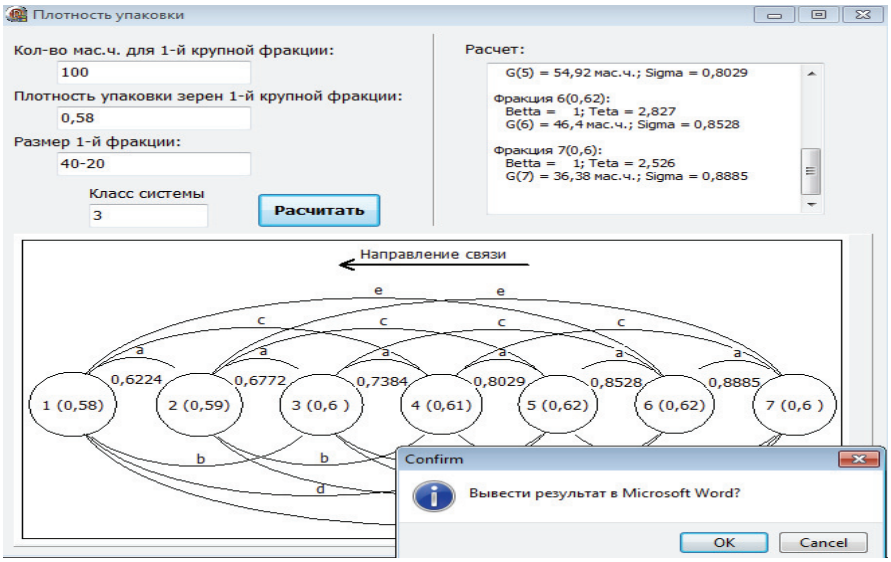


Рисунок 4. Внешний вид программы

Применение микродисперсной добавки (в количестве 7% от массы вяжущего) и дисперсного армирования, а также оптимизация цементного камня (в том числе за счет высокоплотной упаковки зерен заполнителя), использование суперпластификатора – все это позволило получить прочность при сжатии через 28 суток, равную 100,2 МПа (более чем на 60% выше, чем у обычного бетона). Введение микродисперсной добавки способствовало более эффективной и быстрой реакции. Данная добавка уплотнила цементный камень, заполнив пустоты и улучшив сцепление с заполнителем и фиброй. Эффект заполнения пор, создаваемый микрочастицами добавки, способствует значительному уменьшению капиллярной пористости и проницаемости бетона.

Раннее проведенные исследования [15-19] позволили установить, что при трехпроцентном армировании по массе удается получить максимальные физико-механические показатели, что объясняется уплотнением цементного камня между волокнами.

Экспериментальные исследования показали, что дальнейшее увеличение процента дисперсного армирования дает незначительный прирост прочностных, деформативных и эксплуатационных характеристик. Это можно объяснить уменьшением толщины бетонного слоя настолько, что материал проявляет склонность к расслоению. Поэтому для дальнейшего исследования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов принимаем процент армирования 3.

Сталефибробетон с использованием волновой фибры в качестве армирующего материала обладает наилучшими прочностными и деформативными характеристиками [15-19]. Известно, что рост трещиностойкости при дисперсном армировании объясняется процессами «торможения» распространения трещин (разрушение границ раздела между волокном и матрицей; вытягивание волокон из матрицы), действующих последовательно. За счет этого возникает дополнительное сопротивление трещинообразованию и его развитию. В свою очередь, фибре волновой формы будут сложнее вытягиваться из композита, что позволит уменьшить трещинообразование за счет сдерживания образования трещин еще в начальной стадии и лучшего распределения напряжений в самом бетоне.

С целью получения более высокопрочных сталефибробетонов были проведены экспериментальные исследования, результаты которых приведены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-механические характеристики мелкозернистого бетона, армированного стальной волновой фиброй

Вид вяжущего	Вяжу-щее, кг	Расход материалов, кг/м^3				Гипер-пласти-фикатор GENIUM 115, кг	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа
		Отсев дроб-ления КВП***, кг	Тавол-жанс-кий песок, кг	Вода, л	Стальная волновая фибра, кг			
Цем I 42,5Н	510	1180	555	170	-		50,2	13,7
Цем I 42,5Н *ВПУ	510	1185	555	172	-		56,5	14,2
Цем I 42,5Н	510	1180	555	172	72		57,4	16,8
Цем I 42,5Н *ВПУ+ **МКН	510	1185	555	174	72	4	72,2	21,1
ТМЦ-100	510	1180	555	160	72		71,4	21,0
ТМЦ-100 *ВПУ+ **МКН	510	1185	555	162	72	4	94,7	22,2
ВНВ-100	510	1180	555	150	72		82,2	21,9
ВНВ-100 *ВПУ+ **МКН	510	1185	555	152	72	4	104,8	23,2

*ВПУ – высокоплотная упаковка зерен мелкозернистого сталефибробетона
**МКД – микронаполнитель
*** КВП – кварцитопесчаник

Таким образом, высокоплотная упаковка компонентов смеси на основе композиционных вяжущих оказывает направленное воздействие на структурообразование сталефибробетона, позволяя повысить прочностные характеристики изгибаемых элементов. Рациональный подбор заполнителя, применение композиционного вяжущего, стальной фибры оптимальной формы и гиперпластификатора дали возможность получить фибробетон с пределом прочности при сжатии 104,8 МПа и пределом прочности на растяжение при изгибе 23,2 МПа.

Состав мелкозернистого фибробетона на композиционном вяжущем имеет более высокие физико-механические, деформативные и эксплуатационные характеристики. Данный факт объясняется лучшей пространственной упаковкой частиц в полученном композите и особенностями структурообразования. Использование композиционного вяжущего и микродисперсной добавки с активной поверхностью ускоряет процесс синтеза новообразований, который заключается в уменьшении периода формирования структуры – за счет связывания гидроксида кальция (образующегося при гидратации алита), и формировании плотной микроструктуры композита. Это подтверждается исследованием рентгенограмм, которые позволили сравнить цементный камень мелкозернистого фибробетона на основе композиционного вяжущего с добавлением микродисперсной добавкой и суперпластификатора GLENIUM115.

**Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, грант № 14.B37.21.1487, тема: «Разработка научных и практических основ создания композиционных вяжущих на основе техногенного сырья с целью производства фибробетона для ремонтных работ», при финансовой поддержке в виде гранта президента Российской Федерации МК-2715.2012.8 по теме: «Разработка научных и практических основ повышения эффективности мелкозернистого фибробетона на основе техногенного песка и композиционного вяжущего для промышленного и гражданского строительства».*

Литература

1. Баженов Ю. М. Технология бетона. М.: АСВ, 2003. 500 с.
2. Пухаренко Ю. В. Принцип формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2004. №10. С. 47–50.
3. Рабинович Ф. Н. Дисперсно-армированные бетоны. М.: Стройиздат, 1989. 174 с.
4. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологи, конструкции. М.: АСВ, 2004. 560 с.
5. Талантова К. В. Основы создания сталефибробетонных конструкций с заданными свойствами // Бетон и железобетон. 2003. №5. С. 4–8.
6. Brandt A. M. Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance. London: Spon Press, 2009. 544 p.
7. 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. №506. Pp. 415–428.
8. 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. №232. Pp. 99–103.
9. Beaudoin J. J. Handbook of Fiber-Reinforced Concrete: Principles, Properties, Developments and Applications (Building Materials Science). Noyes: William Andrew, 1990. 194 p.
10. Bernhard Maidl. Steel Fibre Reinforced Concrete. Wiley: Ernst & Sohn, 1995. 292 p.
11. Piasta J. Rheological Properties of Concretes with Fine Aggregate// Cement and Concrete Researh. 1985. Vol. 15. №2. Pp. 253–260.
12. 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. №508. Pp. 1–9.
13. Лесовик Р. В. Мелкозернистые бетоны на композиционных вяжущих и техногенных песках: дисс. … д-ра техн. наук. Белгород, 2009. 496 с.
14. Черкашин Ю. Н. Мелкозернистые бетоны для энергетического строительства на обогащенных песках курской магнитной аномалии: автореф. дисс. … канд. техн. наук. Белгород, 2006. 24 с.
15. Клюев А. В. Отходы горнодобывающих предприятий как сырье для производства мелкозернистого бетона армированного фибрами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №4. С. 81–84.
16. Клюев А. В. Сталефибробетон для сборно-монолитного строительства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №2. С. 60–63.
17. Клюев С. В., Лесовик Р. В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон с использованием полипропиленового волокна // Бетон и железобетон. 2011. №3. С. 7–9.
18. Клюев С. В., Лесовик Р. В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон стекловолокном // Бетон и железобетон. 2011. №6. С. 4–6.
19. Клюев С. В. Экспериментальные исследования фибробетонных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. №4. С. 71–74.

**Сергей Васильевич Клюев, Белгород, Россия*

Тел. моб.: +7(951)139-63-27; эл. почта: Klyuyev@yandex.ru

© Клюев С.В., 2012

Ускоритель твердения бетона на основе гальванического шлама

К.т.н., доцент Н.М. Морозов*;
ассистент С.В. Степанов;
д.т.н., профессор В.Г. Хозин,
ФГБОУ ВПО Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Ключевые слова: ускоритель твердения; гальванический шлам; цементный камень; бетон; прочность

Энергетическая ситуация в нашей стране, несмотря на большой процент мировой добычи энергоносителей, такова, что рассмотрение всех предложений, направленных на снижение энергозатрат в процессах производства и потребления, является насущной потребностью.

При производстве бетонных конструкций интенсификация твердения цемента в основном достигается за счет различных способов его термообработки (пропаривание, разогрев, автоклавирование и др.) или путем использования быстротвердеющих и специальных цементов, а также с помощью химических добавок. Ускорение твердения приобретает особое значение при заводском производстве бетонных и железобетонных изделий, так как при этом достигается максимальное использование производственных площадей, повышение оборачиваемости форм и дорогостоящего оборудования [1-5]. В России практически на всех предприятиях по производству бетонных и железобетонных изделий и конструкций главным способом ускорения твердения бетона является его тепловлажностная обработка. В настоящее время на тепловую обработку 1 м^3 бетона затрачивается около 0,35-0,6 Гкал тепловой энергии, что сопоставимо с 55-65 кг условного топлива. Это высокие показатели в условиях рыночной экономики, когда становится жизненно необходимым рациональное использование ресурсов и денежных средств.

Одним из эффективных технологических приемов снижения энергозатрат является использование химических добавок – ускорителей твердения. В качестве ускорителей твердения в основном используют соли на основе хлоридов и сульфатов натрия, калия и кальция. Кроме того, применяются оксиды и гидроксиды алюминия. С экономической и экологической точек зрения для производства добавок целесообразно использовать побочные продукты и отходы промышленности [6-9]. Однако для этого необходимы научно-обоснованные способы их применения, базирующиеся на знании химического состава и агрегатного состояния используемого материала [10].

Одним из таких объектов является гальванический шлам, получаемый при обработке алюминиевых изделий, в частности, погонажных профилей для мебельной промышленности. Гальванический шлам – концентрированная водная дисперсия алюминатов – представляет безусловный интерес для применения в качестве добавки в цементные бетоны, однако не в индивидуальном виде, а в комплексе с другими функциональными компонентами, позволяющими улучшить свойства конечного продукта. Основные преимущества многокомпонентных добавок в общем случае выражаются в том, что монодобавки наряду с положительным оказывают и отрицательное влияние на свойства бетонов, что снижает их эффективность.

Основной задачей данной работы является разработка комплексного ускорителя твердения цементных бетонов на основе гальванического шлама.

Гальванический шлам (ГШ) – это материал с высоким содержанием влаги (до 80-90%). После сушки шлам представляет собой кускообразный материал, поэтому для применения в бетоне его необходимо размалывать. В ходе эксперимента мы производили помол в течение 2 мин в пружинной мельнице, в результате был получен порошок серого цвета с удельной поверхностью 350 м^2/кг. Химический состав ГШ и содержание в нем химических элементов (мг/кг) представлены в табл.1.

Таблица 1. Химический состав гальванического шлама

Оксиды	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	SO_3	ППП/ 1000
Содержание в %	0,61	0,01	55,47	0,13	<0,01	1,52	1,06	1,90	<0,01	0,05	9,47	29,78

Из всех известных добавок – ускорителей твердения нами были выбраны сульфат калия, сульфат натрия, хлорид натрия, хлорид кальция, поташ как наиболее эффективные по своему основному показателю – ускорению твердения в ранние сроки. Также в качестве предполагаемого ускорителя твердения был выбран ГШ – отход производства алюминиевых профилей – с содержанием оксида алюминия 55%. Для сравнения с ГШ были испытаны чистые продукты: оксид, гидрооксид и сульфат алюминия.

Оценка эффективности добавок производилась по изменению их реологических характеристик и сроков схватывания цемента, а также по изменению прочности цементного камня на первые и двадцать восьмые сутки твердения. Результаты приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, наибольшее ускорение схватывания цементного теста наблюдается при добавлении хлорида кальция, сульфата калия, сульфата натрия и ГШ. По эффекту упрочнения в раннем (1 сутки) и нормативном (28 суток) возрасте лучшие показатели имеют сульфат натрия (61,7 и 95,7 МПа), хлорид кальция (62 и 95 МПа) и ГШ (92,7 и 95,5 МПа соответственно). Оксид и гидроксид алюминия также являются ускорителями твердения цемента: 60,2 и 90,3 у первого, 54,2 и 83,4 МПа у второго, соответственно.

Таблица 2. Свойства цементного теста в присутствии электролитов

№ п/п	Добавка	Дозировка, %	НГ,%	Сроки схватывания, час-мин		Прочность, МПа	
				начало	конец	1 сутки	28 сутки
1	-	-	**24**	**2-05**	**3-05**	**48,0**	**77,2**
2	Сульфат калия	0,5	25,25	1-20	2-40	50,2	78,9
3		1	26,25	1-10	2-30	56,4	85,0
4		2	27,5	0-40	1-50	62,0	83,2
5	Сульфат натрия	0,5	25,25	2-00	2-50	48,9	82,0
6		1	26	1-45	2-40	55,8	88,5
7		**2**	**26,5**	**1-20**	**2-10**	**61,7**	**95,7**
8	Хлорид натрия	0,5	26,0	2-00	2-45	49,7	81,3
9		1	26,5	1-40	2-30	55,2	87,5
10		2	27,25	1-25	2-05	61,5	94,2
11	Хлорид кальция	0,5	25	1-50	2-30	49,2	80,1
12		1	25	1-15	2-00	59,3	88,2
13		**2**	**25,5**	**0-45**	**1-10**	**68,0**	**95,0**
14	Сульфат алюминия	0,5	24,5	0-55	1-50	51,7	83,4
15		1	25,5	0-45	1-20	58,2	87,3
16		2	27,0	0-35	0-55	54,3	85,6
17	$Al(OH)_3$	0,5	27,0	2-00	3-10	48,0	76,7
18		1	27,5	2-10	3-15	50,3	79,8
19		2	28,5	2-20	3-20	51,8	81,4
20	Al_2O_3	0,5	26,75	1-50	3-05	48,2	78,9
21		1	28,0	1-40	2-40	51,8	80,4
22		2	29,0	1-30	2-30	57,2	83,3
23	ГШ	0,5	26,0	1-25	2-40	50,2	81,3
24		1	26,5	1-10	2-05	56,0	89,2
25		**2**	**27,0**	**1-00**	**1-55**	**63,7**	**95,5**

Следует отметить, что чистый гидроксид алюминия при этом не является ускорителем схватывания, наоборот, он несколько замедляет сроки (2ч 20мин и 3ч 20мин – начало и конец, по сравнению с 2ч 5мин и 3ч 5 мин у контрольного образца, соответственно). ГШ обладает высокой активностью по поглощению оксида кальция [11], так как в результате реакции происходит образование эттрингита.

Как известно, хлорид кальция вызывает коррозию арматуры. Эту добавку запрещено использовать в железобетонных изделиях. Сульфат натрия и гальванический шлам показали практически одинаковые результаты, как по ускорению схватывания цемента, так и по набору прочности цементного камня. Тем самым, целесообразно дальнейшее исследование гальванического шлама как ускоряющего компонента в составе будущего комплексного модификатора.

Из-за высокой удельной поверхности ГШ нормальная густота цемента резко возрастает, поэтому для снижения водопотребности целесообразно вводить добавки-суперпластификаторы.

Основным критерием эффективности пластифицирующих добавок является снижение водопотребности цементных систем (водоредуцирующий показатель) [12-18]. Оптимальное количество добавок определяется по изменению прочностных показателей бетона [19, 20]. В нашей работе выполнены поисковые исследования по подбору и сравнению оптимальных дозировок и оценке влияния суперпластификатора С-3 и гиперпластификатора Melflux 2651F на реологические и структурно-механические характеристики цементных систем.

Основу суперпластификатора С-3 составляют натриевые соли продукта конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида. Melflux 2651F – порошковый продукт на основе модифицированного полиэфиркарбоксилата, полученный методом распылительной сушки. Дозировка добавки С-3 варьировалась от 0,2 до 1,2% от массы цемента, а добавки Melflux 2651F – от 0,1 до 0,5%.

Если же проанализировать значения прочности цементного камня в первые часы и сутки твердения (табл.3), то видно, что оптимальной дозировкой С-3 является 1% (состав 6), так как при данной дозировке наблюдается наибольшее увеличение прочности в 12 часов твердения и далее, в отличие от добавки Melflux. Так, прочность через 12 часов в 3 раза больше, чем у бездобавочного состава.

Таблица 3. Составы и прочность модифицированного цементного камня

№ состава	Цемент, г	Вода, мл	С-3, %	Melflux, %	ГШ, %	В/Ц	Прочность на сжатие, МПа в возрасте			
							12 часов	16 часов	1 сутки	28 суток
1	500	120	-	-	-	0,24	14,9	27,1	38,2	86
2		100	0,8	-	-	0,20	13,6	31,9	43,4	100
3		95	1	-	-	0,19	12,1	28,1	46,9	103
4		95	1,2	-		0,19	10,9	24,2	45,3	107
5		103	0,8	-	2	0,21	31,1	41,1	50,9	102
6		101	1	-	2	0,20	37,7	45	54,1	108
7		101	1,2	-	2	0,20	36,2	44,0	52,8	109
8		100	-	0,1	-	0,20	13,1	29,8	41,2	94,0
9		96	-	0,2	-	0,19	12,9	26,7	37,2	100
10		92	-	0,3	-	0,18	10,9	22,3	33,2	107
11		104	-	0,1	2	0,21	35,8	43,1	52,3	96
12		101	-	0,2	2	0,20	33,7	41,7	51,7	106
13		95	-	0,3	2	0,19	29,1	39,2	47,2	113

Поэтому в качестве оптимальных были выбраны дозировки 1% (от массы цемента) суперпластификатора С-3 и 2% гальванического шлама. В результате можно совместно использовать суперпластификатор С-3 и ГШ как комплексный ускоритель твердения цементных бетонов (ГШС).

Для оценки эффективности разработанной комплексной добавки ГШС были исследованы свойства различных бетонных смесей с добавкой и без нее. В качестве заполнителей использовали речной гравий фракции 5-20 м и кварцевый песок с модулем крупности 2,2. В качестве вяжущего использовали Мордовский цемент ЦЕМ I 42,5Б. Количество воды варьировалось в зависимости от требуемой подвижности смеси. Были выбраны три марки подвижности: П1, П3 и П5. В результате исследовано влияние подвижности бетонных смесей на эффективность комплексного ускорителя твердения бетонов ГШС, произведена оценка влияния комплексной ускоряющей добавки на воздухововлечение (Вв) и плотность бетонной смеси. Составы бетонных смесей и их свойства представлены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, плотность бетонных смесей при увеличении подвижности уменьшается, при этом использование комплексного ускорителя позволяет несколько увеличить этот показатель. Введение комплексной добавки снижает водопотребность бетонных смесей. Также видим, что использование разработанной добавки позволяет снизить воздухововлечение

бетонных смесей, особенно на высокоподвижных смесях. Снижение воздухововлечения позволяет получать бетоны более плотной структуры, что положительно сказывается на свойствах долговечности.

Таблица 4. Составы бетона и свойства бетонной смеси

№ состава бетона	Расчетный расход компонентов бетона, кг/м^3					В/Ц	Подвиж-ность (ОК), см	Вв, %	Расчетная плотность бетонной смеси, кг/м^3
	Цемент	Гравий	Песок	Вода	ГШС				
1	350	1050	850	170	-	0,49	4	2,8	2420
2	350	1050	850	143	10,5	0,41	4	2,8	2404
3	350	1050	850	193	-	0,55	15	2,7	2430
4	350	1050	850	159	10,5	0,45	15	2,2	2415
5	350	1050	850	218	-	0,62	24	2,1	2432
6	350	1050	850	184	10,5	0,52	25	1,4	2430

Влияние подвижности бетонных смесей на эффективность комплексного ускорителя твердения бетонов представлено на рис. 1. Как видно из рис. 1, с увеличением подвижности бетонных смесей прочность образцов понижается, так как увеличивается водопотребность. Так, прочность образцов без добавки, имевших подвижность П1 и твердевших в нормальных условиях, составила 8 МПа, прочность при подвижности П3 составила 6,5 МПа, при подвижности П5 – 4,4 МПа. При введении добавки в состав бетонных смесей прочность бетона увеличивается на 95-105%, т.е. эффективность комплексного ускорителя твердения не зависит от подвижности. Добавка ГШС позволяет обеспечить ускоренный набор прочности бетона и повысить ее в два раза.

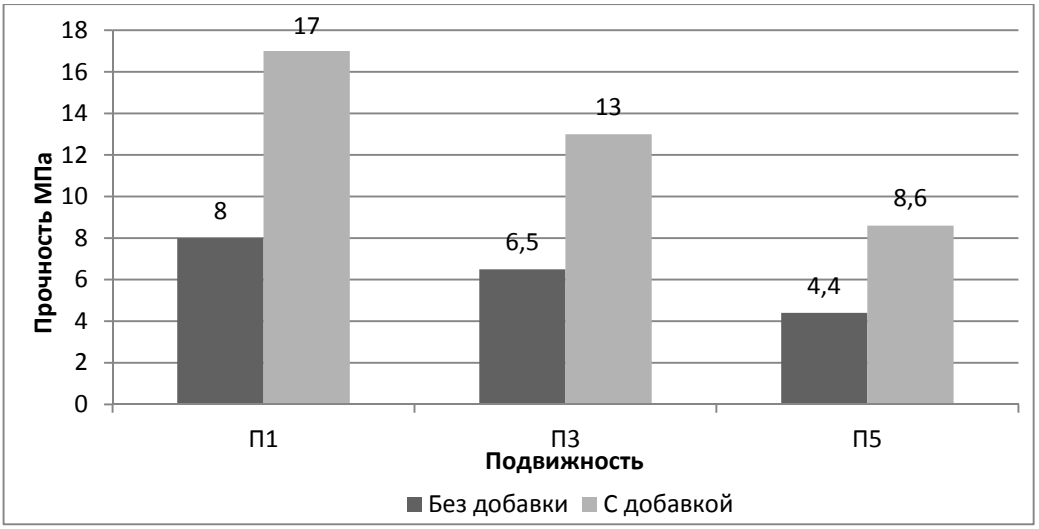


Рисунок 1. Влияние подвижности бетонных смесей на прочность бетонных образцов в возрасте 1 суток

В возрасте 28 суток прочность бетона с добавкой ГШС также выше, чем прочность бездобавочного состава. При подвижности смеси П1 прочность контрольного состава была 38,4 МПа, прочность бетона с ГШС – 50,1 МПа, при подвижности П3 прочность контрольного состава была 33,8 МПа, прочность бетона с ГШС – 43,7 МПа, при подвижности П5 прочность контрольного состава была 27,4 МПа, прочность бетона с ГШС – 36,1 МПа. Увеличение прочности бетона при введении добавки ГШС составило в итоге от 29 до 32%.

Для оценки эффективности применения комплексного ускорителя твердения ГШС была проведена апробация на производстве тротуарной плитки. Использование добавки ГШС позволило снизить расход цемента на 10% и ускорить набор распалубочной прочности, что в итоге снизило себестоимость изделий.

Выводы

1. В результате исследований показано, что гальванический шлам позволяет сократить сроки схватывания цементного теста и повысить прочность цементного камня в первые и двадцать восьмые сутки нормального твердения.

2. Установлено, что наиболее эффективно гальванический шлам работает в сочетании с суперпластификатором С-3. В этом случае прочность цементного камня уже в первые часы твердения увеличивается в 3 раза, а прочность бетона увеличивается в первые сутки нормального твердения на 100%.

3. Показано, что использование гальванического шлама в составе цементных бетонов является эффективной возможностью его утилизации, что решает важную экологическую проблему.

Литература

1. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.: Технопроект, 1998. 768 с.
2. Li Guozhong, Li Jianguan, Guan Ruifang, Sui Su, Liu Huashi.. Forschungen zur wasserfestigkeit von Gips material // Zement Kalk Gips. 2003. Vol. 56. №08/09. Pp. 87-95.
3. Тараканов О. В., Пронина Т. В. Химические добавки в растворы и бетоны / ПГУАС. Пенза, 2007. 102 с.
4. Pistilli M. F. The Variability of Condensed Silica Fume from a Canadien Sourse and its Influence on the Properties of Portland Cement Concrete // Cement, Concrete and Aggregate. 1984. Vol. 6. №1. Pp. 33-37.
5. Морозов Н. М., Хозин В. Г., Мугинов Х. Г. Особенности формирования структуры модифицированных песчаных бетонов // Строительные материалы. 2010. №9. С. 72-73.
6. Тараканов О. В. К вопросу об использовании нейтрализованных шламов в производстве строительных растворов и бетонов // Экономика природопользования и природоохраны: Тез. докл. межд. науч.-практ. конф. Пенза, 2002. С. 95-100.
7. Bensted Y. Early Hydration behaviour of Portandcement in water. Calcium Chloride and Calcium Formiate Solution // Int. Conf. on cement and Concrete admixtures and improving addibives. Mons, Belgium. 1977. Pp. 124-129.
8. Генцлер И. В. Влияние гальванических осадков на свойства бетонных смесей и бетонов. // Известия Вузов. Строительство. 1999. №7. С. 67-70.
9. Коренькова С. Ф., Миронова А. С. Нанотехнологичный материал для структурных фасадных покрытий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. №10. С. 60–61.
10. Соломатов В. И., Коренькова С. Ф., Чумаченко Н. Г. Новый подход к проблеме утилизации отходов стройиндустрии // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2000. №1. С. 28-29.
11. Хозин В. Г., Морозов Н. М., Степанов С. В. Влияние гальванического шлама на процессы твердения цементных композиций // Цемент и его применение. 2011. №3. С.129-131.
12. Баженов Ю. М. Технология бетона. М.: АСВ, 2002. 500 с.
13. Гордеев Е. В. Выбор химических добавок, модифицирующих прочность бетона // Технологии бетонов. 2001. №7-8. С. 21-24.
14. Walraven J. C., De Uitdaging van Het. Hoogwaardig Beton // Cement. 1990. №2. Pp. 6-8.
15. Aggarwal P., Aggarwall Y. Siddique R.,,Gupta S. M.. Self-Compacting Concrete – Procedure for Mix Design // Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies. 2008. Issue 12. Pp.15-24.
16. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete // Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1. №1. Pp. 5-15.
17. Морозов Н. М., Хозин В. Г., Боровских И. В., Степанов С. В. Высокопрочные цементные бетоны для дорожного строительства // Строительные материалы. 2009. №11. С. 15-17.
18. Андреева А. Б. Пластифицирующие и гидрофобизирующие добавки в бетонах и растворах. М.: Высшая школа, 1988. 55 с.
19. Морозов Н. М., Боровских И. В., Хозин В. Г., Авксентьев В. И., Мугинов Х. Г. Влияние компонентов песчаного бетона на воздухововлечение при его приготовлении // Известия КазГАСУ. 2011. №3. С. 129-133.
20. Таубе П. Г., Вернигорова В. Н., Хаскова Т. Н. Влияние добавок суперпластификаторов на свойства портландцемента // Цемент. 1983. №2. С. 17.

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

© Морозов Н.М., Степанов С.В., Хозин В.Г., 2012

Эффективность добавок – ускорителей схватывания и твердения для торкрет-бетона

Инженер А.С. Васильев,
ООО «Эм-Си Баухеми»;
д.т.н., доцент Ю.Г. Барабанщиков*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: торкрет-бетон; добавки ускорителей схватывания и твердения; сроки схватывания; прочность; тепловыделение

В условиях высоких темпов проведения строительных работ большой интерес среди регуляторов кинетики гидратации цемента вызывают ускорители схватывания и твердения бетона, применение которых является зачастую необходимым, но в ряде случаев может иметь негативные последствия для бетона. В случае применения хлоридов это коррозия стальной арматуры, при использовании солей калия и натрия – щелочная коррозия. Существуют ускорители на основе органических веществ, такие как ди-, триэтаноламины, кальциевые соли муравьиной и уксусной кислот, различные карбоновые кислоты [1-2]. Недостатком подобных ускорителей является их относительно высокая стоимость и избирательное действие в зависимости от выбранных дозировок и типов цемента.

Уникальными по своим свойствам являются ускорители схватывания и твердения для торкрет-бетонов. При торкретировании бетонная смесь с помощью специального устройства (торкрет-машины) подается на обрабатываемую поверхность под давлением и уплотняется за счет энергии удара [3]. В обеспечении качественного торкретирования важнейшую роль играют ускорители схватывания и твердения, вводимые в состав торкрет-бетонных смесей. В отличие от обычного бетона, в торкрет-бетонах добавки-ускорители являются практически неотъемлемой составляющей. Расход ускорителя в торкрет-бетонах выше, чем при обычном бетонировании, и составляет 3-6 % от массы цемента, а иногда и более. Особенностью добавок ускорителей схватывания и твердения для торкрет бетона является моментальное схватывание «flash setting», которое исключает оползание смеси и позволяет увеличить толщину наносимого слоя. В настоящее время используются преимущественно бесщелочные, не содержащие хлоридов добавки, обладающие высокой эффективностью [4-6]. Термин «бесщелочные» означает, что выполняется требование к добавке по содержанию $Na_2O \leq 1{,}0$ % по массе, установленное стандартом EN 480-12. Данные ускорители получают на основе неорганических соединений алюминия.

Крупнейшими производителями добавок-ускорителей являются фирмы BASF, Sika, Mapei, MCBauchemie. Существуют целые линейки добавок ускорителей схватывания и твердения для торкрет-бетона: MEYCO SA, Delvo Crete (BASF); Sigunit (Sika); Mapequick (Mapei); Centrament Rapid (MC-Bauchemie). В РФ производство добавок – ускорителей схватывания и твердения для торкрет-бетона осуществляют компании Полипласт (Реламикс Торкрет) и Эм-Си Баухеми (Центрамент Рапид 640 R и 650R).

Целью данной работы является исследование кинетики схватывания и твердения цементных паст в присутствии бесщелочных ускорителей для торкрет-бетона.

Моделирование и прогнозирование процессов, протекающих в торкретбетоне, является сложной задачей. Это связано с тем, что лабораторные условия сильно отличаются от условий на месте торкретирования, которые также могут различаться. Поэтому для оценки эффективности добавок по физико-механическим показателям был использован модельный состав, включающий цемент, заполнитель и суперпластификатор. Для растворной смеси задавалась высокая подвижность (расплыв конуса Хегерманна 170-190 мм), эквивалентная марке П5 для бетонной смеси. Для имитации уплотнения торкрет-бетонной смеси применялась укладка раствора на вибростоле.

Использовались следующие материалы.

1. Портландцемент CEMI 42.5 Н (ЗАО «Осколцемент»), имеющий фазовый состав, мас.%: алит ($3CaO \cdot SiO_2$) – 52–53, белит ($2CaO \cdot SiO_2$) – 18–20, промежуточная фаза ($3CaO \cdot Al_2O_3$ + $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) – 20– 22, гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) – 3–4, ангидрит ($CaSO_4$) – 1, $CaCO_3$ – 2. По данным химического анализа, общее содержание Al_2O_3 в цементе – 4,9 мас.%.

2. Песок с модулем крупности $M_к$=2,5.

3. Ускорители схватывания: Centrament Rapid 650 (Эм-Си Баухеми), MEYCOSA 167 (BASF), SiguniteL-53 (Sika) и РеламиксТоркрет (Полипласт).

Испытания эффективности действия ускорителей на схватывание и твердение проводились на цементном растворе. Состав раствора – 1:3 (цемент:песок); В/Ц – 0,45; содержание добавок, % от массы цемента: суперпластификатора Muraplast FK 63 (ООО «Эм-Си Баухеми») – 0,4; ускорителя – 6.

Приготовление раствора осуществляли следующим образом. Суперпластификатор Muraplast FK 63 смешивали с водой затворения. Добавляли остальные компоненты в указанной ниже последовательности, после чего перемешивали по режиму: цемент – 30 с, песок – 60 с, остановка – 90 с, окончательное перемешивание – 30 с. Затем определяли подвижность раствора по расплыву стандартного конуса после 30 встряхиваний (ГОСТ 310.4). Следили за тем, чтобы расплыв конуса составлял 170-190 мм. После этого вводили ускоритель схватывания и твердения и перемешивали смесь в течение 10 с. Сразу после перемешивания растворную смесь помещали в кольцо прибора Вика и уплотняли на вибрационном столе в течение 10 с. Затем определяли сроки схватывания (ГОСТ 310.3) и из оставшейся смеси готовили образцы-балочки размерами 40x40x160 мм для определения прочностных характеристик. Образцы хранили в камере нормального твердения (при 100%-ой отн. влажности и t=20 °С) и испытывали на сжатие в возрасте 6 ч, 1 сут. и 28 сут.

Результаты испытаний приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1. Влияние бесщелочных добавок ускорителей схватывания и твердения на прочность цементного раствора

Образцы	Предел прочности при сжатии, МПа		
	6 часов	1 сутки	28 сутки
Контрольный образец	0,40	12,6	45,3
Centrament Rapid 650	0,70	17,0	49,0
MEYCO SA 167	0,70	16,0	45,0
Sigunite L-53	0,60	13,7	40,9
Реламикс Торкрет	0,55	18,0	44,5

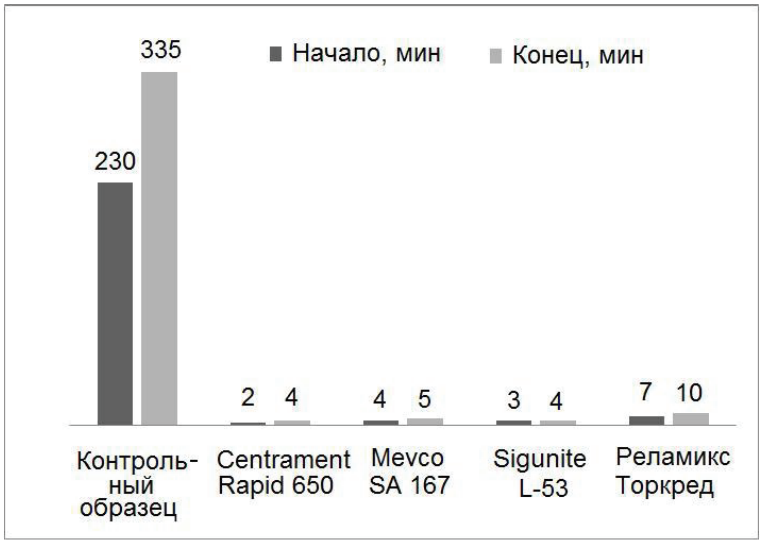


Рисунок 1. Влияние бесщелочных добавок–ускорителей на сроки схватывания цементного раствора

Из данных табл. 1 и рис. 1 следует, что все испытанные добавки обладают высокой способностью к ускорению схватывания и твердения. Сроки схватывания сокращаются в 30-100 раз. Наиболее эффективными ускорителями схватывания являются Centrament Rapid 650 и Sigunite L-53, наименее эффективным – Реламикс Торкрет. Прочностные показатели свидетельствует о том, что, ускоряя твердение, добавки не влияют на конечную прочность бетона. Если в 6-часовом возрасте прирост прочности образцов с добавками ускорителей составил 140-175% от прочности контрольного состава, то в 28-суточном возрасте их прочность практически такая же, как и у контрольных образцов (разброс значений лежит в пределах обычной погрешности прочностных испытаний). Наиболее эффективными ускорителями твердения показали себя Centrament Rapid 650 и MEYCO SA 167.

Для более детального изучения кинетики гидратации цементного камня с добавками ускорителей были проведены калориметрические исследования цементных паст. Калориметр (рис. 2) состоит из теплоизолирующего корпуса 4, мешалки 3, алюминиевого стакана 1 с цементным тестом 2 и измерительной системы, включающей термопары 6 и регистрирующий прибор 7.

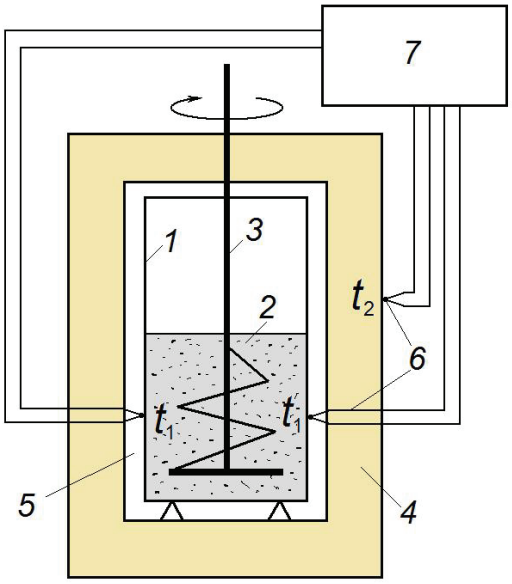


Рисунок 2. Схема калориметра

В процессе опыта регистрировали температуры образца t_1 и среды t_2 каждую минуту в течение 1 суток.

Теплота Q, выделяемая цементом при гидратации, идет на нагрев содержимого в термосе (Q_1) и потери в среду (Q_2): $Q=Q_1+Q_2$.

$$Q_1=C_т(t_1-t_о),$$

где $C_т$ – аддитивная теплоемкость нагреваемой в термосе системы, Дж/°С; $t_о$ – начальная температура теплового равновесия элементов системы.

$$C_т = c_ц m_ц + c_в m_в + \sum c_i m_i,$$

где c и m – соответственно удельная теплоемкость и масса: цемента (индекс «ц»), воды (индекс «в») и прочих нагреваемых частей (индекс «i»), к которым относятся: внутренняя стенка термоса, металлический стаканчик, термопары. Величина $\sum c_i m_i$ определялась экспериментально и составила 178-179 Дж/°С. Было принято: $c_ц$=1,04 и $c_в$=4,28 кДж/(кг·°С).

$$Q_2 = Q_k \int_0^{\tau} (t_1 - t_2)\, d\tau ,$$

где Q_k – константа теплоотдачи калориметра, определялась экспериментально по методике описанной в работе [7] (для используемого калориметра $Q_к$=0,074 Вт/°С); т – время.

Интегрирование по времени заменяли суммированием по площади, заключенной между графиками $t_1=f$(т) и $t_2=f$(т).

Для проведения калориметрических испытаний из цементной пасты готовили 2 серии образцов:

1) 5 составов с ускорителями без пластифицирующей добавки;
2) те же составы, но с суперпластификатором Muraplast FK63.

В образцах первой серии водоцементное отношение (В/Ц) составляло 0,5, во второй серии при использовании суперпластификатора Muraplast FK63 в количестве 0,4% от массы цемента В/Ц было принято равным 0,4, что обеспечивало равноподвижность цементных смесей. Цемент (500 г) помещали в стакан 1, добавляли воду и перемешивали при скорости вращения мешалки 800 об/мин в течение 10 с. Оставляли в покое на 20 мин, производя измерения температур. Через 20 мин с помощью шприца впрыскивали добавку-ускоритель в количестве 30 г и снова перемешивали 10 с. После этого мешалку удаляли и смесь оставляли в покое для дальнейшего твердения.

Результаты испытаний приведены ниже на рис. 3-6. Начальный скачок тепловыделения, сразу после затворения цемента водой, обусловлен в основном выделением теплоты смачивания цемента, что объясняется понижением поверхностной энергии на границе раздела фаз [8-9]. Дальнейший ход кривых тепловыделения может характеризовать кинетику гидратации цемента и позволяет оценить характер и скорость твердения, несмотря на то, что теплота выделяется и в результате других процессов в твердеющем цементном камне. Некоторые из них протекают с поглощением теплоты, например, растворение клинкерных минералов в воде. Однако по сравнению с теплотой химической реакции эти тепловые эффекты незначительны.

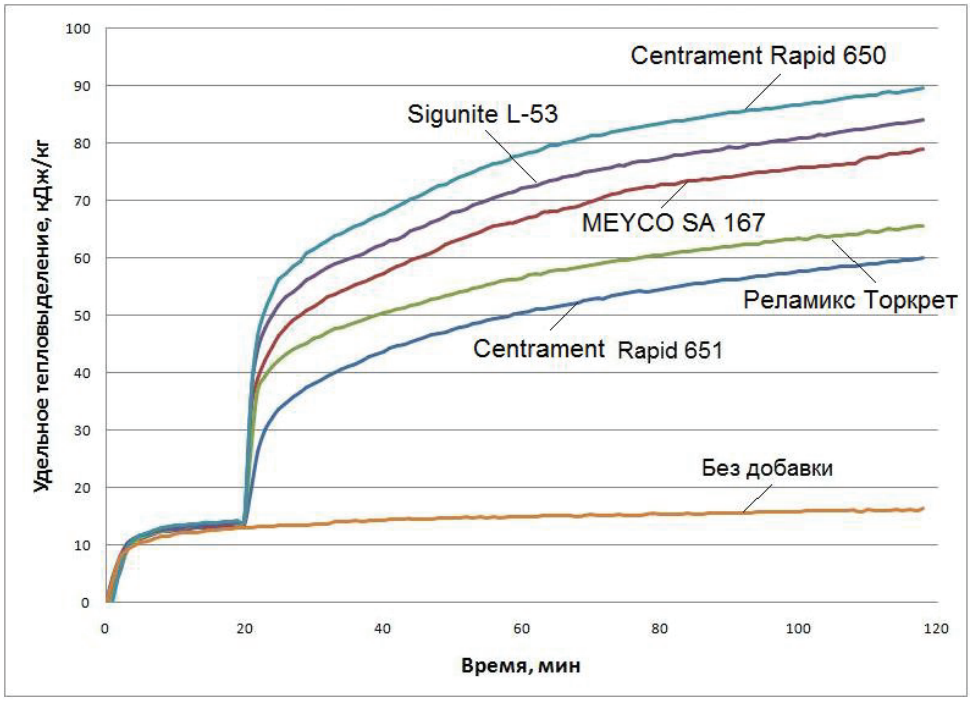


Рисунок 3. Тепловыделение образцов 1-й серии (без пластификатора) с добавками-ускорителями в первые 2 часа

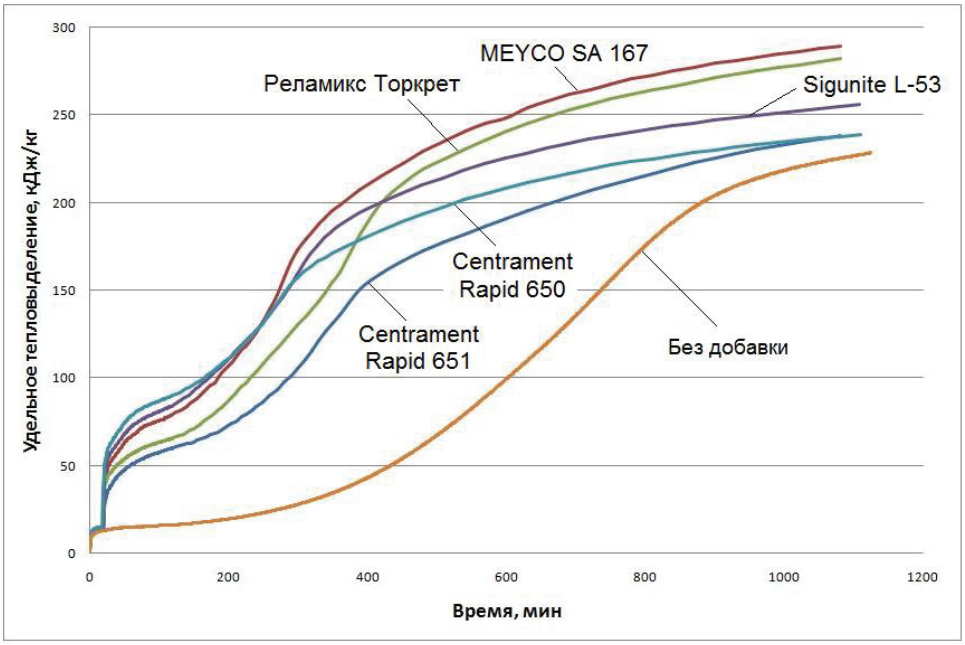


Рисунок 4. Тепловыделение образцов 1-й серии (без пластификатора) с добавками-ускорителями в первые 20 часов

В течение первых 20 минут кривые тепловыделения в пределах одной серии совпадают, так как образцы не имеют различий в составе. Введение ускоряющих добавок в тесто на 21-й минуте твердения вызывает в каждом случае резкий скачок кривой в течение 1-3 минут (см. рис. 3) и последующее замедление процесса, продолжающееся около 100-120 минут, после чего наблюдается новый подъем тепловыделения, однако более плавный (см. рис. 4). Дальнейший ход кривых показывает тенденцию к сближению экзотермии образцов с контрольным составом, не содержащим ускорителей. Это подтверждает данные по прочности и еще раз свидетельствует о том, что добавки оказывают незначительное влияние на конечные результаты твердения и тепловыделения, но существенно ускоряют эти процессы. В первой серии образцов наибольший скачок тепловыделения при введении дала добавка Centrament Rapid 650, на втором месте Sigunite L-53, затем следуют MEYCO SA 167 и Реламикс Торкрет (рис. 3). Эти данные согласуются с сокращением сроков схватывания цементных растворов, где имеет место такое же расположение ускорителей в ряду эффективности. Добавка Centrament Rapid 651, относящаяся к опытной партии, показала низкую эффективность и снята с производства.

Последовательность расположения кривых тепловыделения для второй серии образцов (с добавкой суперпластификатора) отличается только тем, что MEYCO SA 167 и Sigunite L-53 показали примерно одинаковые значения начального скачка тепловыделения (рис. 5).

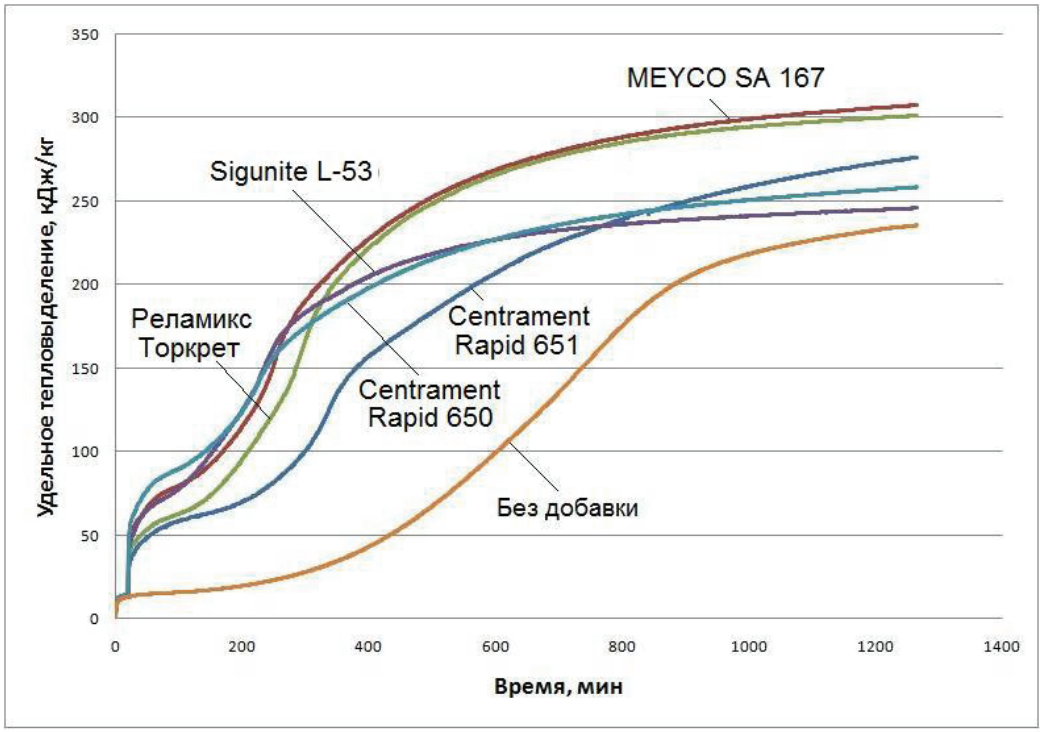


Рисунок 5. Тепловыделение образцов 2-й серии (с гиперпластификатором Muraplast FK63) с добавками-ускорителями в первые 20 часов

Пластифицирующая добавка Muraplast FK63, относящаяся к группе поликарбоксилатов, незначительно повышает тепловыделение цемента в присутствии добавок-ускорителей. Возможно, что это повышение экзотермии связано с более низким В/Ц в присутствии пластификатора. Сам же пластификатор не участвует в химических процессах гидратации цемента. На рис. 6 показано различие в тепловыделении цементного теста, содержащего ускоритель Centrament Rapid 650, в присутствии пластификатора и при его отсутствии. Это различие начинает быть заметным спустя, примерно, 80 минут с момента введения ускорителя. Аналогичная картина наблюдается в случае добавок РеламиксТоркрет и MEYCO SA 167. Вероятно, механизм ускорения схватывания и твердения испытанных добавок заключается в взаимодействии их с продуктами гидратации цемента и образовании гидросульфоалюминатов кальция [10-11]. Этот процесс сопровождается сокращением сроков схватывания цемента и повышением тепловыделения, наблюдаемого при калориметрических исследованиях.

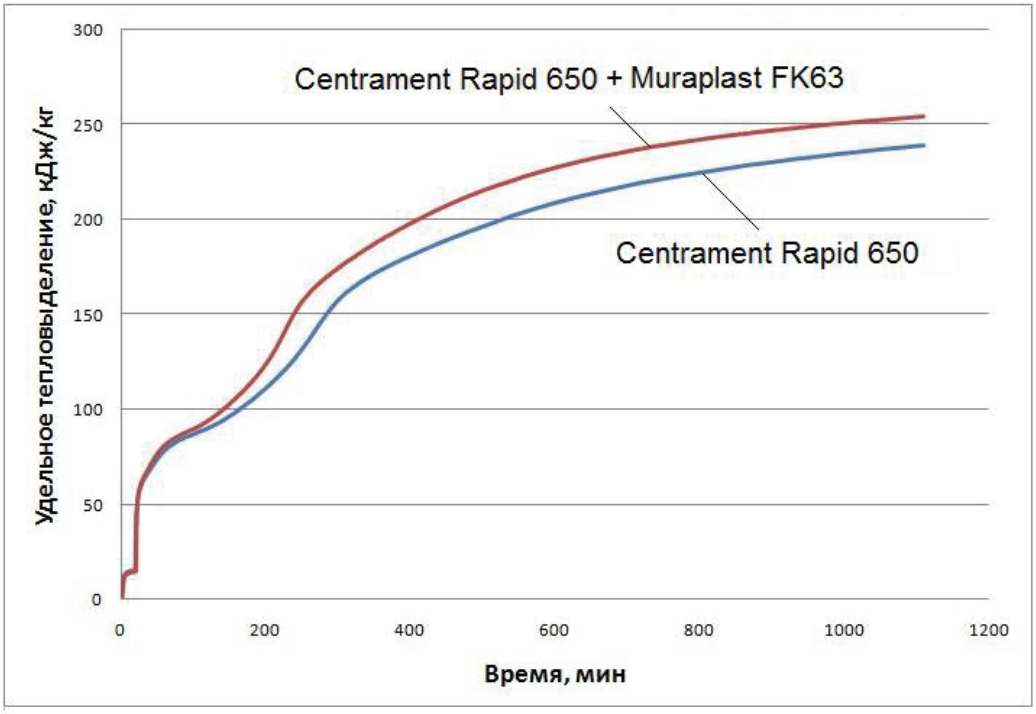


Рисунок 6. Влияние гиперпластификатора Muraplast FK63 на тепловыделение цемента с добавкой-ускорителем Centrament Rapid 650

Соединения алюминия, заявленные в составах бесщелочных ускорителей [12-15], представляют собой сульфаты и гидроксиды алюминия, которые оказывают сильный ускоряющий эффект на схватывание цементных композиций. При этом происходит образование высокосульфатного гидросульфоалюмината кальция $3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$ (фаза AFt, или эттрингит), низкосульфатного гидросульфоалюмината кальция $3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}CaSO_4{\cdot}12H_2O$ (фаза AFm, или моносульфоалюминат), а также гидроалюминатов кальция, например, $4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}19H_2O$, которые также относятся к фазам типа AFm, имеющим слоистую морфологию. Образование эттрингита происходит по реакциям [5,16]:

$$Al_2(SO_4)_3 + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow 3CaOAl_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O + Al(OH)_3$$

$$2Al(OH)_3 + 3Ca(OH)_2 + 3CaSO_4{\cdot}H_2O + 23H_2O \rightarrow 3CaOAl_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$$

При этом, возможно, гипс, активно взаимодействующий с некоторыми алюмосодержащими добавками, не выполняет функцию регулятора гидратации трехкальциевого алюмината (C_3A) или выполняет эту функцию менее активно [17-18]. В этих условиях гидратация C_3A протекает быстро, с образованием продуктов пластинчатой морфологии (AFm).

На основании проведенных исследований можно заключить, что бесщелочные добавки – ускорители схватывания и твердения на основе сульфатов и гидроксидов алюминия при введении их в цементное тесто через 20 минут после его приготовления вызывают резкий подъем тепловыделения и температуры, при этом значительно ускоряются процессы схватывания и твердения. По эффективности действия добавки можно расположить следующим образом: наиболее эффективной является добавка Centrament Rapid 650, на втором месте Sigunite L-53, затем следуют MEYCO SA 167 и РеламиксТоркрет. Действие этих добавок в присутствии суперпластификатора Muraplast FK63, относящегося к группе поликарбоксилатов, несколько усиливается. То есть суперпластифицирующая добавка повышает тепловыделение цемента. Анализ кривых тепловыделения показывает, что при совместном действии добавок-ускорителей с пластификатором имеет место взаимное влияние их друг на друга, которое следует учитывать при подборе составов бетона.

Литература

1. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика : монография. М.: Стройиздат, 1998. 768 с.
2. Рамачандран В., Фельдмин Р., Бодуэн Р. Добавки в бетон : монография. М.: Стройиздат, 1988. 575 с.
3. Rixom R., Mailvaganam N. Chemical Admixtures for Concrete. E&FN Spon, London, 1999. 446 p.
4. Melbye T., Dimmock R., Garshol K.F. Sprayed concrete for rock support / MBT International Underground Construction Group, Division of MBT () Ltd. Switzerland, 2001. 247 p.
5. Myrdal R. Accelerating admixtures for concrete. State of the art// SINTEF report № SBF BK A07025, Trondheim, 2007. 35 p.
6. Илясов А. Г., Медведева И. Н., Корнеев В. И. Ускорители схватывания и твердения портландцемента на основе оксидов и гидроксидов алюминия // Металлург. 2008. №12. С. 73-77.
7. Барабанщиков Ю. Г. Тепловыделение при трении дисперсных систем // Научно-технические ведомости. 2004. № 1. С. 221-226.
8. Барабанщиков Ю. Г., Запорожец И. Д. О роли адсорбции воды в тепловыделении цемента // Бетоны для водопропускных сооружений : Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия, 1980. С. 75-78.
9. Барабанщиков Ю. Г. К вопросу об особых свойствах граничных слоев воды // Межвуз. сб. науч. тр. по гидротехническому и специальному строительству / МГСУ. М., 2002. С. 27-32.
10. Paglia C., Wombacher F., Bohni H. The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems. I. Characterization of the setting behavior // Cem. Concr. Res. 2001. Vol. 31. Pp. 913 918.
11. Maltese C., Pistolesi C., Bravo A., et al. Effects of setting regulators on the efficiency of an inorganic acid basedalkali-free accelerator reacting with a Portland cement // Cem. Concr. Res. 2007. Vol. 37. Pp. 528–536.
12. Angelskaar T.Cement accelerator and method// Пат. US2006210716(США), МПКB05D 7/00. Оп. 21.09.2006.
13. Sommer M., Mader U., Wombacher F., Lindlar B.Solidification and hardening accelerator for hydraulic binding agents and method for the production thereof // Пат. US0080110375 (США), МПК C04B 24/00. Оп. 15.05.2008.
14. Lindlar B., Wombacher F., Schurch H., Mader U. Water-based setting and hardening accelerator for hydraulic binders and process for producing it // Пат. US20110017100 (США), МПК C04B 22/04. Оп. 27.01.2011.
15. Weibel M.Stable Sprayed Concrete Accelerator Dispersion Having A High Active Substance Content // Пат. US20100003412 (США), МПК B05D 3/10. Оп. 07.02.2010.
16. Илясов А. Г. Гидратация и твердение цементов в присутствии тонкодисперсных оксидов – гидроксидов алюминия : дис. … канд. техн. наук: 05.17.11: защищена 2005 / А.Г. Илясов. СПб, 2005. 179 с.
17. Барабанщиков Ю. Г., Парийский А.А. К вопросу о кинетике взаимодействия добавок-электролитов с цементом // Бетоны для водопропускных сооружений : Мат. Конф. и совещ. по гидротехнике. Л.: Энергия, 1980. С. 79-82.
18. Барабанщиков Ю. Г., Парийский А. А. Влияние добавок на условия образования гидросульфоалюмината кальция // Совершенствование технологии строительного производства : Межвуз. тем. сб. / Томский ун-т. Томск, 1981. С. 131-137.

** Юрий Германович Барабанщиков, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)534-12-86; эл. почта: ugb@mail.ru

© Васильев А.С., Барабанщиков Ю.Г., 2012

Применение пленкообразующего препарата для увеличения стойкости бетонных изделий в условиях резкого континентального климата

К.т.н., доцент Л.В. Янковский*,
ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Ключевые слова: пластификатор; пленкообразующий препарат; бетон; цементобетонные изделия; воздействие климата; долговечность

Проблема повышения долговечности цементобетонных конструкций и сооружений, находящихся в условиях агрессивной среды, является одной из наиболее актуальных [1-8]. Данная работа посвящена изучению влияния пленкообразующих препаратов на характеристики бетонных изделий, эксплуатируемых в условиях негативного воздействия климата Урала и Сибири [9, 10].

Общеизвестен технологический прием повышения стойкости бетона путем увеличения его прочности к началу негативного воздействия [11-14]. Чаще всего увеличение прочности обеспечивается пропаркой бетонных и железобетонных изделий. Пропарка изделий приводит к увеличению стойкости бетона, но одновременно способствует образованию дефектов структуры, которые при определенных условиях могут сказаться на стойкости бетонов. Использование форсированных режимов пропарки, увеличение температуры пропарки или пропарка изделий в термоформах приводит к увеличению дефектности структуры бетона к началу воздействия на него климата и может стать определяющим фактором в обеспечении стойкости.

Как показала практика изготовления железобетонных изделий, наиболее дефектной структурой отличаются бетоны изделий, пропарка которых осуществлялась в термоформах [15]. Неравномерность температурного поля в бетоне при его прогреве контактным способом является причиной перемещения свободной влаги, вследствие чего наблюдается процесс термовлагопроводности, на который накладывается перенос влаги под действием градиента общего внутреннего давления в твердеющем бетоне.

В последнее время проводятся исследования по смягчению этого недостатка посредством покрытия поверхностей изделий, свободных при прогреве от опалубки, пленкообразующими материалами [16]. Пленкообразующие материалы, используемые преимущественно для ухода за свежеуложенным бетоном монолитных конструкций (помароль, этиноль, латекс СКС-65111, битумная эмульсия, полиэтиленовые пленки и т.п.), сложны в обращении, зачастую обходятся дорого и не исследованы при температурах выше 60°С, поэтому на заводах сборного железобетона практически не применяются.

В связи с этим возникла необходимость дополнения номенклатуры пленкообразующих материалов, эффективно применяемых при прогреве железобетонных изделий контактным способом. В качестве такого материала нами выбран препарат К-9 водорастворимого полимера, соответствующий ТУ 606-17-03-77. Препарат К-9 представляет собой отходы производства азота и используется преимущественно в качестве пластификатора глинистого раствора при бурении скважин. Апробация этого препарата в качестве пленкообразующего материала произведена в лабораторных условиях и на железобетонных изделиях – сваях и лотках, изготавливаемых в термоформах на полигоне в летний период.

Изучение возможности использования пленкообразующего препарата К-9 для повышения стойкости бетонов в условиях воздействия климата осуществлялось двумя путями: посредством создания пленки на поверхности образцов и изделий, свободных от опалубки, до прогрева их в термоформах и в виде вторичной защиты образцов и изделий, пропаренных в камерах ямного типа.

В первом случае образцы прогревались на специальной установке, обеспечивающей нагрев днища форм. Верхняя поверхность образцов контактировала с внешней средой и прокрывалась пленкообразующим препаратом одним или двумя слоями. Полимер К-9 в виде водного раствора наносился на поверхность образцов и изделий через 15-25 минут после формования.

Для сопоставления часть образцов оставалась непокрытой, часть смачивалась водопроводной водой и лак-этинолем в один или два слоя.

Температура бетона замерялась в центре образцов и варьировалась от 80 до 135°С, скорость подъема температуры менялась от 20 до 60°С в час, время прогрева составило 8 часов, остывание естественное.

При испытаниях определялись следующие свойства образцов: кубиковая и призменная прочности, нижний уровень микротрещинообразования и водопоглощение. Испытания проводились в холодном состоянии через 10-12 часов после отключения подогрева, часть образцов испытана в возрасте 28 суток и 3 месяца. В качестве характеристики структуры бетона использовалось водопоглощение бетона. Определение эффекта от применения пленкообразующего препарата К-9 на изделиях, прогреваемых в термоформах, осуществлялось на сваях и лотках.

Во втором случае водный раствор пленкообразующего препарата К-9 наносился на поверхность образцов и изделий через 4 часа после их тепловлажностной обработки. Эффект от использования пленкообразующего препарата в качестве вторичной защиты определялся посредством исследования физико-механических свойств и петрографическим анализом бетонных образцов и потребительских свойств плит ПГ. Оценка качества предварительно напряженных плит ПГ (3х6 м) производилась по фактическим показателям прочности, жесткости и трещиностойкости плит. Для сопоставления результатов испытывались следующие виды плит: не покрытые пленкообразующим препаратом К-9, покрытые пленкообразующим препаратом и плиты, изготовленные из бетонных смесей, пластифицированных добавкой ПЯ-01, и покрытые препаратом К-9.

Результаты исследований выявили, что из-за неравномерности температурных полей при пропарке в термоформах процессы гидратации и кристаллизации в массе бетона протекают неравномерно, образуются участки, различные по прочности, что приводит, с позиций теории структурных неоднородностей, к общему снижению прочности бетона (рис. 1).

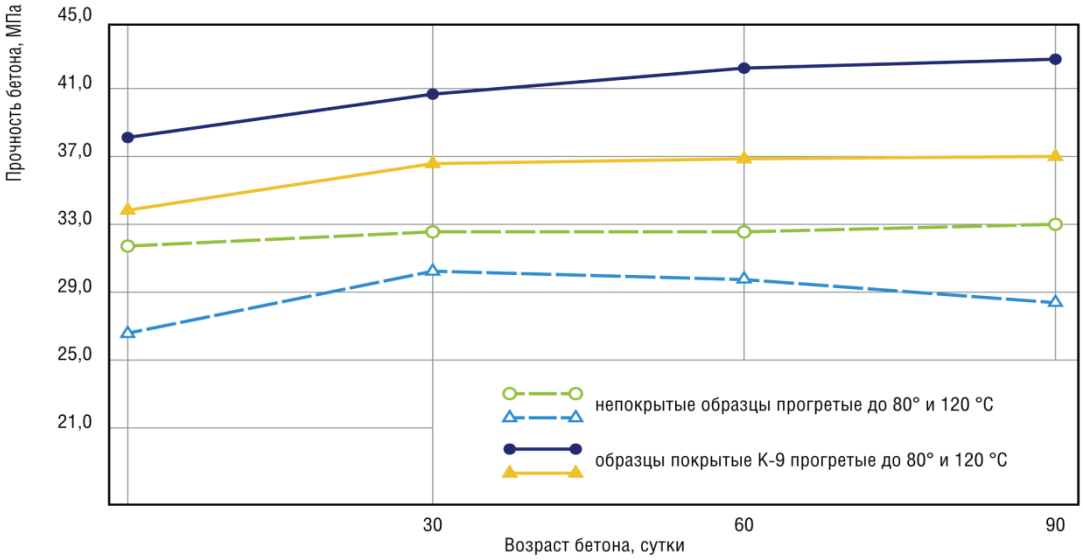


Рисунок 1. Изменение кубиковой прочности бетона образцов, прогреваемых в термоформах, во времени

Испытание лабораторных образцов, прогреваемых в термоформах, показало, что бетон в зависимости от температуры прогрева характеризуется отсутствием прироста прочности или спадом прочности при дальнейшем твердении в воздушно-сухих условиях (рис. 2).

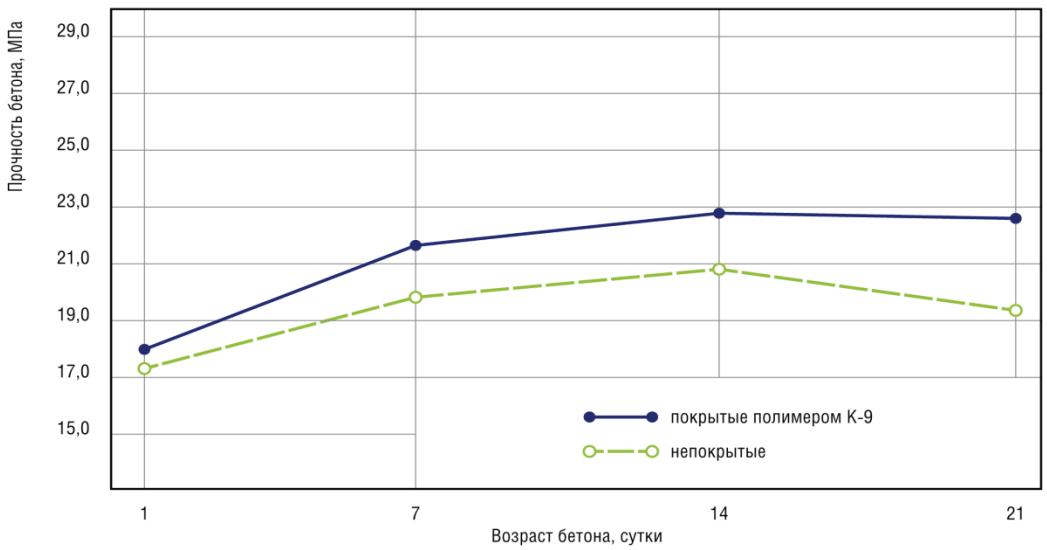


Рисунок 2. Изменение прочности бетона лотков

Результаты испытаний подтвердили предположение о том, что в процессе прогрева контактным способом бетон теряет влагу и приобретает дефектную структуру, причем дальнейшее твердение на воздухе не влечет за собой улучшение качества бетона. Покрытие поверхности, свободной от опалубки, полимером К-9 повысило качество бетона и обеспечило стабильный прирост прочности во времени.

Данные, приведенные в таблице 1, показывают, что прочность бетона образцов, прогреваемых в термоформах, зависит от температуры прогрева (с повышением температуры прогрева прочность бетона уменьшается). Покрытие поверхности образцов пленкообразующими материалами влечет за собой увеличение прочности: чем выше температура прогрева, тем больший эффект использования пленкообразующих материалов.

Таблица 1. Прочность бетона после прогрева

Скорость подъема температуры, °С в час	Максимальная температура бетона, °С	Кубиковая прочность бетона, МПа					
		не покрытого	покрытого				
			водой	полимером		лак-этинолем	
				за 1 раз	за 2 раза	за 1 раз	за 2 раза
60	135	20,9/ 100,0	21,1/ 100,9	34,1/ 163,1	31,8/ 152,1	24,9/ 119,1	26,1/ 124,9
50	120	27,2/ 100,0	27,5/ 101,1	37,6/ 138,4	37,4/ 137,5	31,3/ 116,1	32,8/ 120,6
40	96	29,6/ 100,0	29,5/ 99,6	37,9/ 127,9	37,5/ 126,6	33,1/ 117,8	34,8/ 117,5
20	80	31,7/ 100,0	32,7/ 103,1	38,3/ 120,8	37,8/ 119,2	34.6/ 109,1	37.2/ 117,3

Примечание: над чертой даны абсолютные величины прочности бетона, под чертой – в процентах по отношению к прочности непокрытого бетона.

Сопоставление полимера К-9 с лак-этинолем показывает, что при температуре прогрева 96°С и выше полимер К-9 предпочтительней, так как дает больший эффект. Нанесение пленкообразующего материала на поверхность, свободную от опалубки, уменьшает количество испарившейся воды (таблица 2), способствуя тем самым сохранению влаги в бетоне и последующему набору прочности.

Результаты апробации полимера К-9 в сопоставлении с лак-этинолем представлены в таблице 3.

Таблица 2. Водопоглощение бетона

Скорость подъема температуры, °С в час	Максимальная температура бетона, °С	Водопоглощение, в % бетона			
		не покрытого	покрытого		
			водой	полимером	
				за 1 раз	За 2 раза
40	96	13,5	13,1	11,8	11,9
Количество испарившейся воды, в г					
40	96	139	124	86	79

Таблица 3. Характеристики прочности бетона в изделии

Характеристика	Значение характеристики в изделиях			
	покрытых полимером		покрытых лак-этинолем	
	за 1 раз	за 2 раза	за 1 раз	за 2 раза
Средняя прочность, МПа	19,4/14,7	18,5/14,3	17,7/16,2	19,9/16,8
Среднеквадратичное отклонение	19,6/33,4	13,5/28,9	18,5/32,3	19,7/27,6
Коэффициент вариации прочности бетона в изделии (**v**)	10,1/19,8	7,3/17,7	10,4/19,9	10,4/16,4

Примечание: над чертой – для изделий, покрытых пленкообразующими материалами, под чертой – непокрытых

Из данных видно, что нанесение раствора полимера К-9 и лак-этиноля на поверхность изделия, свободную от опалубки, дает эффект в виде повышения прочности на 31,9 и 15,3% соответственно. Нанесение второго слоя полимера в этом случае уменьшило разброс показателей прочности по изделию, уменьшив среднеквадратичные отклонения и коэффициенты вариации прочности (см. табл. 3).

При температуре 80°С эффект сравниваемых пленкообразующих материалов примерно одинаков. Покрытие полимером К-9 2 раза нецелесообразно, так как при этом, по-видимому, нарушается целостность ранее нанесенного слоя.

Большое внимание в настоящее время уделяется разработке новых методов расчета долговечности бетонных конструкций [17,18]. Определение стойкости бетона по разработанной методике [9,19] велось на лабораторных образцах. Значения характеристик свойств сравниваемых бетонов приведены в таблице 4. Стойкость бетона образцов, рассчитанная по разработанной нами методике, составила для непокрытых образцов – 9,4 года, для покрытых – 12,1 лет. При этом улучшается и структура бетона, о чем свидетельствуют данные, приведенные в таблицах 2 и 5.

Таблица 4. Характеристика сравниваемых бетонов

Параметры	Значение характеристик бетона в возрасте			
	28 суток		12 месяцев	
	непокрытых	покрытых	непокрытых	покрытых
R_b, МПа	23,2	27,8	26,0	30,5
R_{crc}^0	0,34	0,35	0,35	0,37
W, %	12,7	11,5	11,3	10,9

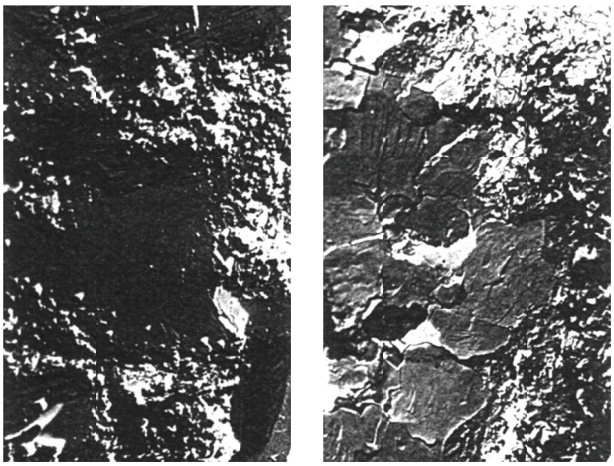
Изучение прочностных свойств бетона лотков, изготавливаемых в термоформах, показало, что по длине и по высоте лотков имеет место разброс показателей прочности бетона. Лоток формуется днищем вверх, и прочность уменьшается по направлению снизу вверх, то есть по направлению движения влаги при прогреве изделия. В первой серии экспериментов среднее значение прочности бетона изменялось по высоте лотка от 19,0 до 29,0 МПа, а по длине – от 25,0 до 35,0 МПа, в целом до лотку от 16,0 до 34,0 МПа. Аналогичный разброс имел место и во второй серии экспериментов.

При использовании полимера К-9 как пленкообразующего материала прочность бетона лотков увеличилась на 5,5% при нанесении полимера в один слой и на 12,9% при нанесении в два слоя. При этом изменение средней прочности бетона по высоте изделия составило: при нанесении полимера в один слой – 24,3%, при нанесении в два слоя – 20,7%, а в непокрытых лотках – 34,5%. По длине лотков средняя прочность изменялась в первом случае на 18,8%, во втором – на 25,8%, а в непокрытых лотках – на 34,4%. Апробация полимера на изделиях (сваях и лотках) показала наличие эффекта несколько меньшего, чем на лабораторных образцах.

Изучение структуры бетона с добавкой ПЯ-01, покрытого препаратом К-9, показало, что по своим основным характеристикам защищенный бетон близок к бетону, который после изготовления твердел в нормальных условиях. Основные характеристики структуры представлены в таблице 5, а микроструктура цементного камня бетонов – на рисунках 3 и 4.

Таблица 5. Характеристики структуры бетона образцов в возрасте 29 месяцев

Характеристики структуры бетона	Единица измерения	Бетон, твердевший в условиях		
		Нормальных	Реальной климатической среды	
			Покрытый пленкой	Непокрытый
Непрогидротированные реликты	%	7-10	7-10	10
Пористость	%	3	2-3	5
Размеры пор	микрон	60-120	80-120	80-120
Размеры микротрещин	микрон	10-12	2-5	7-12
Гидрогель	%	5-7	7	7-8
Гидросиликаты и гидроокись Са	%	2-3	7	1,5-2
Гидросульфоалюминат	%	0,5	-	1,5-2



а) б)

Рисунок 3. Микроструктура цементного камня (×10 000) бетона, покрытого полимером К-9 (а) и непокрытого (б), твердевших под воздействием климата

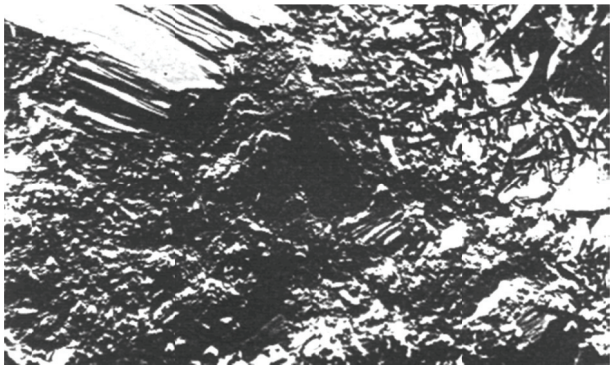


Рисунок 4. Микроструктура цементного камня бетона, твердевшего в нормальных условиях

Микротрещины в защищенном бетоне преимущественно заполнены новообразованиями, в то время как в незащищенном бетоне они полые. Характер новообразований, уменьшение размеров пор, микротрещин, количества непрогидратированных реликтов объясняют увеличение стойкости защищенных бетонов.

Цементный камень бетона, защищенного пленкообразующим препаратом К-9, характеризуется плотной игольчатой структурой, в промежутках между слоевыми кристаллами вторичного портландита наблюдаются мелкие призматические кристаллы и их сплетения. Мелкие кристаллы заполняют поровое пространство, тем самым упрочняя цементный камень.

В цементном камне незащищенного бетона крупные кристаллы несут в себе отпечатки зародышей кристаллизации. Контакты крупного заполнителя с цементным камнем неплотные, наблюдаются полые микротрещины шириной 7-12 микрон. Контакты цементного камня с мелким заполнителем выполнены в основном гидросульфоалюминатом.

Исследования были проведены также на натурных изделиях – предварительно напряженных ребристых плитах ПГА-IV-2Т (3х6 м), предназначенных для покрытия производственных зданий [20, 21]. Испытывались 4 плиты, из них две серийные, выпускаемые заводом, две другие были изготовлены с использованием добавки ПЯ-01, при этом расход цемента в производственном составе был уменьшен на 10%. Поверхности одной серийной плиты и одной плиты с добавкой после пропарки и разопалубки покрывались пленкообразующим препаратом К-9. Плиты и образцы через 1 сутки после изготовления были вывезены на полигон завода и до испытаний хранились в условиях воздействия климатической среды.

Цель испытаний – оценка и сопоставление фактической прочности, жесткости и трещиностойкости плит в соответствии с требованиями ГОСТ.

Плиты из бетона без добавки разрушились под нагрузкой 702,22 кг/м^2, что в 1,873 раза превышает расчетную испытательную нагрузку. Прогиб плиты при контрольной нагрузке по жесткости на 46,3% превышал допускаемое значение, ширина раскрытия трещин при контрольной нагрузке по трещиностойкости, равной 250 кг/м^2, превысила допустимую в 2,2 раза.

Плита из бетона без добавки, покрытая пленкообразующим препаратом К-9, разрушилась под нагрузкой 578 кг/м^2, что в 1,541 раза превышает расчетную испытательную нагрузку. Прогиб плиты при контрольной нагрузке по жесткости составил 4,46 мм, что меньше допускаемого значения, ширина раскрытия трещин при контрольной нагрузке по трещиностойкости, равной 250 кг/м^2, превысила допускаемую в 1,6-2 раза.

Плиты из бетона с добавкой ПЯ-01 разрушились под нагрузкой 604,44 кг/м^2, что в 1,612 раза превышает расчетную испытательную нагрузку. Прогиб плиты при контрольной нагрузке по жесткости составил 3,5 мм, что меньше допускаемого значения, трещин при контрольной нагрузке по трещиностойкости, равной 250 кг/м^2, не появилось. Плита удовлетворяет требованиям проекта.

Использование добавки ПЯ-01 увеличило прочность бетона в возрасте 28 суток на 11,6%, а покрытие пленкообразующим препаратом К-9 – на 10,4%. Пластификация бетона добавкой ПЯ-01 и защита его препаратом К-9 повысила прочность в том же возрасте на 24%.

Плиты, изготавливаемые по установившейся на заводе технологии, не удовлетворяли требованиям ГОСТ по жесткости и трещиностойкости. Применение добавки ПЯ-01 и пленкообразующего препарата К-9 улучшило качество плит ПГ, повысило их жесткость и трещиностойкость. Наибольший эффект наблюдается при использовании добавки ПЯ-01 и последующей защиты бетона от климатических воздействий пленкообразующим препаратом К-9.

Было проведено определение стойкости бетона по разработанной нами методике на лабораторных образцах. Значения характеристик бетона сравниваемых плит определялись в возрасте 28 суток и 12 месяцев и представлены в таблице 6.

Стойкость бетона с добавкой ПЯ-01, защищенного после изготовления от воздействия климата пленкообразующим препаратом К-9, составила 15,9 лет. Таким образом, защита пленкообразующим препаратом повысила стойкость бетона плит на 16,9%.

Таблица 6. Характеристики свойств бетона, защищенного пленкообразующим препаратом

Наименование характеристик	Значения характеристик свойств бетона в возрасте		Значения параметров состояния бетона после 12 месяцев воздействия климата
	28 суток	12 месяцев	
R_b, МПа	35,5	42,5	0,197
R_{crc}^0	0,37	0,4	0,081
W, %	10,5	9,3	-0,114

Выводы

1. Выявлено, что использование жестких режимов термовлажностной обработки изделий существенно ухудшает структуру и понижает стойкость пропаренных бетонов к воздействию климата.
2. Доказано, что защита бетона изделий пленкообразующим препаратом К-9 улучшает структуру и свойства бетона, снижает водопоглощение, повышает кубиковую и призменную прочности и стойкость бетонов в условиях воздействия резкого континентального климата.
3. Доказано, что защита бетона изделий пленкообразующим препаратом К-9 повышает жесткость и трещиностойкость плит ПГА-IV-2Т в 1-2 месячных возрастах.
4. Предложен практический метод улучшения структуры и свойств бетона изделий и конструкций, при изготовлении которых используется прогрев в термоформах.

Литература

1. Рапопорт П. Б., Рапопорт Н. В., Кочетков А. В., Васильев Ю. Э., Каменев В. В. Проблемы долговечности цементных бетонов // Строительные материалы. 2011. №5. С. 38-41.
2. Рапопорт П. Б. [и др.] Анализ срока службы современных цементных бетонов // Современные проблемы науки и образования. 2012. №4. С. 92-92.
3. Гарибов Р. Б., Маринин А. Н., Овчинников И. Г. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации. Саратов: РАТА, 2008. 260 с.
4. Чуб А. А. Организационные принципы принятия технологических решений при восстановлении объектов городского хозяйства // Современное промышленное и гражданское строительство. 2011. Т. 7. №2. С. 75-81.
5. Шейнин А. М., Эккель С. В. High-strength concrete for roads // Наука и техника в дорожной отрасли. 2008. №3. С. 31-34.
6. Platoshkina V. V., Lyupaev B. M. The forecast of durability of polymer concretes based on liqiuid rubbers with the use of thermofluctuation approach to destruction and deformation of the solids // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2010. №3. Pp. 20-28.
7. Darquennes A., Staquet S., Espion B., Delplancke-Ogletree M.-P. Effect of autogenous deformation on the cracking risk of slag cement concretes // Cement and Concrete Composites. 2011. Vol. 33. №3. Pp. 368-379.
8. Chan W. W. J., Wu C. M. L. Durability of concrete with high cement replacement // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. №6. Pp. 865-879.
9. Янковский Л. В. К вопросу оценки и прогноза состояния цементных бетонов, эксплуатирующихся в условиях воздействия климата Урала и Сибири // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. 2012. №2. С. 86–95.
10. Янковский Л. В. Долговечность цементных бетонов в свете перехода на европейские стандарты // Строительные материалы. 2012. №1. С. 16–18.
11. Изотов В. С., Ибрагимов Р. А. Влияние комплексной добавки на долговечность тяжелого бетона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. №2(16). С. 190-194.
12. Гаркави М. С., Трошкина Е. А. Влияние модифицированных лигносульфонатов на твердение и долговечность бетона на основе шлакопортландцемета // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. №3. С. 50-55.
13. Шитиков Е. С. [и др.] Лигносульфонатные пластификаторы нового типа для бетонных смесей и бетонов различного назначения // Строительные материалы. 2002. №6. С. 36-38.
14. Кондратов Г. М. Долговечность бетонов и растворов, модифицированных латексом ВДВХМК-65Е-ВДК // Успехи современного естествознания. 2007. №10. С. 88-90.
15. Федорак А. Д. Эффективность производства бетонов и бетонных изделий // Инженерно-строительный журнал. 2012. №3. С. 2.
16. Selvaraj R., Selvaraj M., Iyer S.V.K. Studies on the evaluation of the performance of organic coatings used for the prevention of corrosion of steel rebars in concrete structures // Progress in organic coatings. 2009. Vol. 64. №4. Pp. 454-459.
17. Кочетков А. В. [и др.] Состояние современного методического обеспечения расчета и конструирования дорожных одежд // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. 2011. №1. С. 65-74.
18. Межнякова А. В., Овчинников И. Г. Методы оценки долговечности армированных конструкций при действии нагрузок и агрессивных сред // Промышленное и гражданское строительство. 2008. №8. С. 44–45.
19. Янковский Л. В. Метод прогнозирования состояния цементобетонных строительных конструкций в условиях воздействия климата // Вестник гражданских инженеров. Архитектура. Строительство. Транспорт. 2012. №5(34). С. 315-319.
20. Челпанов И. Б. [и др.] Стандартизация испытаний строительных, дорожных материалов и изделий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. 2011. №2. С. 57-68.
21. Васильев Ю. Э. [и др.] Статистические методы контроля качества при производстве цементобетона и цементобетонных смесей // Современные проблемы науки и образования. 2012. №4. С. 101-101.

** Леонид Вацлавович Янковский, г. Пермь, Россия*
Тел. раб.: +7(834)239-14-04; эл. почта: yanekperm@yandex.ru

© Янковский Л.В., 2012