

Максимальную температуру при гидратации показали бетонные смеси с добавкой микрокремнезема, что объясняется высокой пуццолановой активностью последнего. Состав без наполнителя занимает «промежуточное положение», а состав, в котором часть активного цемента заменяется инертным доломитом соответственно показывает более низкие температуры при гидратации. Введение в такие смеси пластификаторов поликарбоксилатного типа несколько сдвигает пик экзотермии во времени на более поздние сроки, что можно связать с определенным блокирующим эффектом пластификаторов.

В соответствии с запроектированными составами бетонной смеси были заформованы контрольные образцы и проведены испытания бетона на сжатие. Средняя прочность бетона варьируемых составов составила (см. рис. 4).

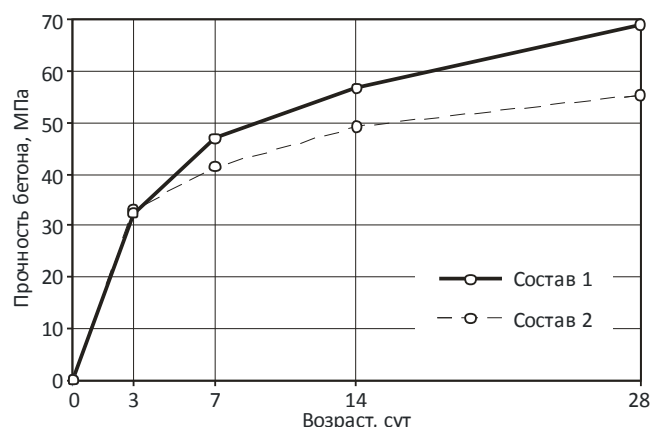


Рисунок 4 – Изменение прочности на сжатие во времени для проектируемых бетонов

Прочность бетона с применением микрокремнезема начиная с 7-сут твердения показывает более высокую кинетику набора. В стандартном возрасте прочность бетона с микрокремнеземом составила 69,15МПа, в то время как для бетона на доломитовом утяжелителе 55,34МПа. Прирост прочности на сжатие бетона состава 1 около 25% обусловлен связыванием портландита в гидратирующей системе в отвечающие за прочность комплексы CSH благодаря пуццолановому эффекту микрокремнезема. При этом, следует все же отметить определенные сложности с вводом микрокремнезема, обладающего высокой удельной поверхностью (~20000 м<sup>2</sup>/кг). Ввод в сухом виде не актуален из-за флокулирующей способности, ввод в виде суспензии порой затруднен из-за некорректного выбора агента вязкости, что приводит к расслоению и оседанию микрокремнезема.

**Заключение.** Как видно из представленных выше данных, разработанные составы полностью удовлетворяют требованиям проекта [7] и СТБ EN 206. Отличия наблюдаются только в прочностных показателях, что обусловлено применением наполнителей типа I и II

в соответствии с классификацией [4]. Применение инертного наполнителя приводит к эффекту наполнения, применение же наполнителя типа II позволяет реализовать пуццолановый эффект за счет связывания крупнодисперсного портландита в мелкокристаллический гель CSH, что и приводит к росту прочности бетона. Однако, замена части цемента наполнителем типа I позволяет снизить теплоту гидратации, что является одним из основных требований при возведении массивных конструкций, подверженных риску трещинообразования. Кроме того, введение наполнителя типа II требует специальной технологии из-за высокой удельной поверхности и риска флокулирования в более крупные агрегаты.

Выбор того либо иного состава в итоге должен быть обусловлен требованиями спецификации на данный бетон.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. European Ready Mixed Concrete Industry Statistics based on the Y2013 production data. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ermco.eu/publications/statistics/>
2. Okamura H., Ozawa K.; Mix Design for Self-Compacting Concrete. "Concrete Library of JSCE", N 25, June, 1995.
3. Greszczyk, S. Beton samozagęszczalny – projektowanie, właściwości, kierunki rozwoju. – Inz. I bud., N 9/2002.
4. Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие. Проект: СТБ EN 206.
5. Павлова, И.П. Влияние пластифицирующих добавок на свойства расширяющихся цементных систем // Вестник ПГУ, Полоцк, 2017 – С. 125–131.
6. Отчет по ХД 16/82 «Подбор составов бетона с применением добавок ООО «ПолипластХИМ». Этап №2: ««Определение эффективности пластифицирующих добавок в сульфаталюминатных расширяющихся цементных системах». – Брест: БрГТУ, 2016 – 53 с.
7. Документ DD5537A-43A3 Требования к сырьевым материалам, показателям качества для бетонирования монолитной плиты на отметке +129,310 по объекту «ОАО «Нафтан». Строительство установки замедленного коксования нефтяных остатков», позиция «Коксовые барабаны».
8. Бетонные и железобетонные изделия и конструкции из самоуплотняющегося бетона. Правила изготовления: ТКП 5 45-03-266-2012. – Минск: Стройтехнорм, 2013 – 32 с.
9. Tur W., Fic S. Materiały budowlane I technologia betonow. Podrecznik do swiczen laboratoryjnych // Biala Podlaska, 2012 – 115 p.
10. Методы определения геометрических показателей заполнителей. Часть 1. Определение гранулометрического состава. Метод просеивания: СТБ EN 933-1-2015 – Минск: Стройтехнорм, 2016 – 18 с.
11. Методы определения геометрических свойств гранулометрических фракций горных пород. Часть 2. Определение гранулометрического состава. Контрольные сита. Номинальные размеры сит: СТБ EN 933-2-2002 – Минск: Стройтехнорм, 2005 – 5 с.

Материал поступил в редакцию 04.03.2017

#### PAVLOVA I.P. Mix Design and Properties of Self-Compacting Concrete with additions of Type I and Type II

In article results of concrete mix designing, based on rules of «triple proportion» with accounting of aggregate continuous grading, and experimental researches of properties of self-compacted concrete (SCC) according to requirements STB EN 206 are presented. Influence of type and amount of additions on fresh concrete mix workability and concrete strength parameters are revealed.

УДК 691.32 (043.3)

Павлова И.П., Беломесова К.Ю.

### ВЛИЯНИЕ РАСШИРЯЮЩИХСЯ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ МЕТАКАОЛИНА НА СРОКИ СХВАТЫВАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

**Введение.** Приоритетным направлением в строительной отрасли является производство эффективных материалов с высокими характеристиками. Бетон как универсальный строительный материал, обладающий рядом высоких фи-

зических характеристик. Бетон как универсальный строительный материал, обладающий рядом высоких фи-

Беломесова Кристина Юрьевна, магистрант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура

зико-механических характеристик, присущих **композитным** структурам, на сегодняшний день является самым распространенным строительным материалом.

Достоинства бетона как конструкционного строительного материала хорошо известны и достаточно широко изучены, но по-прежнему остается в наличии ряд недостатков, устранение которых на сегодняшний день является весьма важной задачей для всей строительной отрасли. К основным недостаткам бетона как искусственного композита относят сравнительно невысокую прочность при растяжении (по сравнению с прочностью при сжатии), а также усадочные деформации, развивающиеся как во время гидратации портландцемента, так и в процессе эксплуатации конструкций. Усадка бетона конструкции, в целом или отдельных её зон, опасна не столько нарушением геометрии элемента конструкции, сколько возникающими при этом растягивающими напряжениями в бетоне, которые часто приводят к образованию сквозных или поверхностных трещин [1].

С целью снижения негативного влияния усадочных деформаций эффективно применение напрягающих и расширяющихся вяжущих, а также бетонов на их основе, что подтверждено многочисленными исследованиями и практическим опытом использования. Напрягающий бетон – это бетон на основе расширяющегося вяжущего, обладающего способностью при твердении увеличиваться в объеме, а в условиях ограничения деформаций расширения развивать усилие самонапряжения [2]. Бетоны на напрягающем цементе за счет своих свойств позволяют с успехом применять их в сборных и монолитных конструкциях и сооружениях в различных областях строительства. Накопленный практический опыт применения таких бетонов свидетельствует, что в большинстве случаев использование таких бетонов дает возможность возводить конструкции и сооружения, которые превосходят по своим техническим и эксплуатационным характеристикам аналоги из бетона на портландцементе [3].

На сегодняшний момент известны различные составы расширяющихся и напрягающих цементов, однако, основываясь на уже существующих, а также собственных исследованиях в данной области [4], выявлен наиболее эффективный механизм расширения через образование этtringита - высокоосновной формы гидросульфата алюмината кальция. Одним из вариантов реализации механизма расширения является применение смеси портландцемента и расширяющейся добавки, состоящей из высокоактивного метакеолина (ВМК) и природного гипса.

Метакеолин ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) – продукт обезвоживания (дегидроксилирования) минерала каолинита – относится в настоящее время к одной из самых высокоэффективных пуццолановых добавок для цементов, бетонов и растворов [5]. Представляет собой порошок от белого до серовато-бежевого или розового цвета со средним размером частиц от 1 до 15 мкм, состоящий из смеси аморфного глинозема и кремнезема практически в равных количествах: массовая доля  $Al_2O_3$  составляет 40–45 %,  $SiO_2$  – 50–55 %.

Одним из аспектов влияния метакеолина на структуру цементного камня в затвердевшем бетоне является её модификация, а именно, уплотнение. Достигается такой эффект благодаря тому, что средний медианный размер дисперсных пластинчатых частиц метакеолина на порядок меньше тонины вяжущего вещества (портландцемента, гипса), что позволяет говорить об эффекте «микробетона», т.е. заполнении межзеренных пустот (пустот между частицами вяжущего) частицами активной минеральной добавки. Эти частицы в свою очередь вступают в химическое взаимодействие с продуктами гидратации клинкерных минералов, а также с примесными щелочными оксидами, что и приводит в дальнейшем к образованию плотных нерастворимых водой новообразований (пуццолановый эффект). Следствием такого взаимодействия метакеолина с компонентами цементного камня является существенное уплотнение структуры формирующихся при твердении гидратных новообразований, что ведет к повышению плотности бетона, его водонепроницаемости, коррозионной стойкости, и долговечности (бетона и конструкции в целом). Более наглядно оценить степень дисперсности частиц метакеолина по отношению, например, к частицам природного гипса можно на рис. 1.

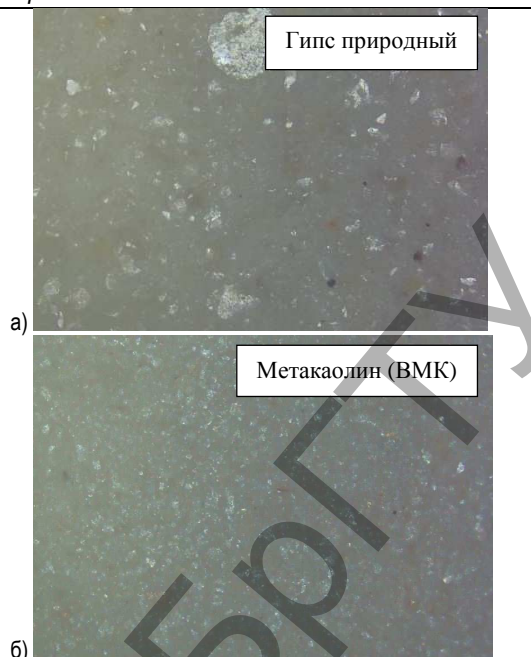


Рисунок 1 – Микрофотография природного гипса (а) и метакеолина (б) (увеличение  $\times 125$ ) согласно [5]

Также стоит отметить, что мелкодисперсные пластинчатые частицы метакеолина обеспечивают модифицируемым бетонным и растворным смесям высокую пластичность и стойкость к расползанию. Однако за счет своей высокой дисперсности метакеолин способен вызвать резкое повышение водопотребности, что может в дальнейшем привести к существенному спаду прочности затвердевшего бетона. Поэтому при изготовлении бетонных смесей с метакеолином, неотъемлемым условием является использование эффективных пластификаторов.

Одним из перспективных направлений применения бетонов на напрягающем цементе является устройство эффективной гидроизоляции, а также в качестве ремонтных составов, применяемых, в том числе при торкретировании.

Понятие «торкретбетон» существует давно и включает в себя не только название строительного материала, но и способ бетонирования и строительства [6]. Такой способ бетонирования, а именно торкретирование, представляет собой послойное нанесение бетонных или штукатурных растворов под большим давлением, за счет которого обеспечивается плотное взаимодействие частиц раствора с подготовленной поверхностью, заполнение пустот, мелких пор и трещин. Доступность и универсальность технологии позволяют использовать ее в самых различных областях строительной индустрии: при изготовлении тонкостенных железобетонных конструкций самой разнообразной прямолинейной или криволинейной конфигурации без применения сложной системы опалубки; для ремонта и упрочнения железобетонных конструкций, в том числе для усиления фундаментов зданий, значительно улучшая их эксплуатационные характеристики; при строительстве и реконструкции гидротехнических сооружений; при укреплении и отделке сводов туннелей, арочных перекрытий и т. д.

Установлены определенные требования к сырьевым компонентам, к качеству нанесенного торкретбетона, а также к поверхности, на которую его наносят. Например, к компонентам торкретбетона основными требованиями являются: - крупность заполнителя и непрерывная гранулометрия; - форма заполнителя (окатанная); - вид цемента (быстротвердеющий).

Чтобы обеспечить хорошее сцепление торкретбетона с поверхностями, на которые наносят смесь, необходимым требованием является их предварительная обработка. Наиболее эффективной мерой данной обработки является пескоструйная очистка [6].

Таблица 1 – Исследуемые составы

| № состава | Компоненты смеси                          | Технология перемешивания компонентов | Кол-во ПЦ, % | Кол-во расширяющейся добавки (РД), % | Кол-во метакеолина, % | Кол-во пластификатора, % от массы цемента | НГ, % |
|-----------|-------------------------------------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|-------|
| 1         | Цемент СЕМ I 42,5N                        | а) ПЦ<br>б) Вода                     | 100          | -                                    | -                     | -                                         | 27    |
| 2         | Цемент СЕМ I 42,5N<br>Добавка Арколин (А) | а) ПЦ<br>б) Вода + А                 | 85           | 15                                   | -                     | -                                         | 30    |
| 3         | Цемент СЕМ I 42,5N<br>Добавка Арколин (А) | а) ПЦ<br>б) Вода + А                 | 80           | 20                                   | -                     | -                                         | 32    |
| 4         | Цемент СЕМ I 42,5N<br>Добавка Арколин (А) | а) ПЦ<br>б) Вода + А                 | 75           | 25                                   | -                     | -                                         | 33    |
| 5         | Цемент СЕМ I 42,5N<br>Добавка Арколин (А) | а) ПЦ<br>б) Вода + А                 | 70           | 30                                   | -                     | -                                         | 35    |
| 6         | Цемент СЕМ I 42,5N<br>Метакаолин (М)      | а) ПЦ<br>б) Вода + М                 | 85           | -                                    | 15                    | -                                         | 34    |
| 7         | Цемент СЕМ I 42,5N<br>Метакаолин (М)      | а) ПЦ<br>б) Вода + М                 | 80           | -                                    | 20                    | -                                         | 37    |
| 8         | Цемент СЕМ I 42,5N<br>Добавка Арколин (А) | а) ПЦ<br>б) Вода + А + пластиф.      | 85           | 15                                   | -                     | 0,6                                       | 27    |
| 9         | Цемент СЕМ I 42,5N<br>Метакаолин (М)      | а) ПЦ<br>б) Вода + М + пластиф.      | 85           | -                                    | 15                    | 1,5                                       | 27    |

Что же касается требований к торкретбетону, то при нанесении на стены или на потолочные поверхности он не должен оползть или обвалиться. Поэтому необходимо обеспечивать хорошее сцепление тонких слоев торкретбетона с поверхностью, на которую его наносят (адгезия); хорошее сцепление между слоями свеженанесенной бетонной смеси (когезия) и нанесение торкретбетона тонкими слоями с учетом влияния собственной массы без образования рабочих швов [6]. Исключить вероятность оплыва свеженанесенного торкретбетона можно благодаря ускорению процесса набора прочности, а также сокращению сроков схватывания.

Одним из возможных эффективных механизмов сокращения сроков схватывания и повышения кинетики раннего набора прочности является применение расширяющихся вяжущих сульфаталюминатного типа, в которых повышенное содержание трехвалентного алюмината СЗА отвечает за ускорение сроков схватывания и твердения.

**Экспериментальные исследования.** Целью данного исследования являлось определение влияния компонентов расширяющейся добавки на скорость схватывания цементных систем. Исследования проводились на 6 опытных составах, варьируемым фактором в которых было содержание расширяющейся добавки, состоящей из высокоактивного метакеолина и природного гипса (в дальнейшем добавки РД) в соотношении 1:1. Программа исследований представлена в таблице 1. Также в исследованиях были использованы составы с метакеолином для определения влияния повышения количества алюминатов в цементной системе на сроки схватывания.

Методика проведения испытаний и применяемое оборудование для определения сроков схватывания, а также нормальной густоты цементного теста подробно описаны в СТБ EN 196-3 [7].

**Результаты постановочных исследований и их анализ.** Результаты испытаний всех опытных составов представлены в таблице 2.

Анализ данных, полученных в ходе проведения исследований по определению нормальной густоты цементного теста, показывает, что введение в цемент расширяющейся добавки приводит к повышению водопотребности цементного теста с 0,27 до 0,35 (составы 1-5). Количество воды затворения увеличивается примерно на 20 %. А в случае смесей, следующего состава: ПЦ+М (составы 6,7) наблюдается повышение водопотребности цементного теста с 0,27 до 0,37, увеличение воды затворения примерно на 30 %. Повышение количества воды затворения в данных случаях обусловлено в первую очередь высокой удельной поверхностью частиц метакеоли-

на, а также их пластинчатой морфологией. Однако, учитывая то, что высокое значение водопотребности отрицательно влияет на прочностные характеристики цементного камня, необходимым условием является применение пластифицирующих добавок.

Таблица 2 – Нормальная густота и сроки схватывания цементного теста с добавками

| № опытного состава | НГ, % | Сроки схватывания, ч-мин |       |
|--------------------|-------|--------------------------|-------|
|                    |       | начало                   | конец |
| 1                  | 27    | 1:05                     | 4:03  |
| 2                  | 30    | 3:24                     | 4:44  |
| 3                  | 32    | 3:25                     | 4:35  |
| 4                  | 33    | 3:59                     | 5:19  |
| 5                  | 35    | 3:37                     | 4:37  |
| 6                  | 34    | 2:40                     | 3:40  |
| 7                  | 37    | 3:22                     | 4:32  |
| 8                  | 27    | 3:52                     | 5:10  |
| 9                  | 27    | 0:22                     | 0:42  |

Анализируя данные, полученные при определении сроков схватывания, определили, что при добавлении расширяющейся добавки РД происходит значительное замедление начала схватывания цементного теста (составы 2-5). Вызвано это в первую очередь наличием в расширяющейся добавке природного гипса, который и применяют в целях замедления сроков схватывания цементных систем. Растворение более крупных зерен гипса происходит медленнее, чем растворение ультрадисперсных частиц метакеолина, поэтому начальное образование этtringита несколько отодвигается во времени до момента вступления гипса в реакцию. Далее начинается активное образование этtringита, что приводит к сокращению диапазона времени между началом и концом схватывания, который составляет около полутора часов (составы 2-5) в отличие от бездобавочного состава на портландцементе, для которого сроки схватывания находятся в пределах 3-х часов (см. рис. 2.).

Последним этапом исследований было испытание смесей с постоянным количеством воды, соответствующим нормальной густоте чистого цементного теста (составы 1,8,9). Базовое значение нормальной густоты цементного теста было принято – 27 % (состав 1), составы 8 и 9 доводились до значения НГ=27% за счет введения в них пластификатора на поликарбоксилатной основе. Оптимальное

количество пластификатора было определено опытным путем для каждого состава отдельно. Данные, полученные в ходе исследований (составы 1,8,9) дают возможность утверждать, что введение метакаолина, как активной добавки в цементное тесто способствует резкому сокращению сроков схватывания, при этом ускоряются и начало схватывания, так и конец схватывания (таблица 2). Многие исследователи отмечают, что метакаолин, обладая пуццолановой активностью, способен ускорять гидратацию и твердение цементных композиций. Однако, применение метакаолина в чистом виде без пластифицирующих добавок не дает такого же эффекта по ускорению сроков схватывания цементных систем, поскольку за счет возросшего количества воды, дополнительно вводимого из-за высокой удельной поверхности метакаолина, происходит «разжижение» структуры, скорость гидратации замедляется и как следствие удлиняются сроки схватывания.

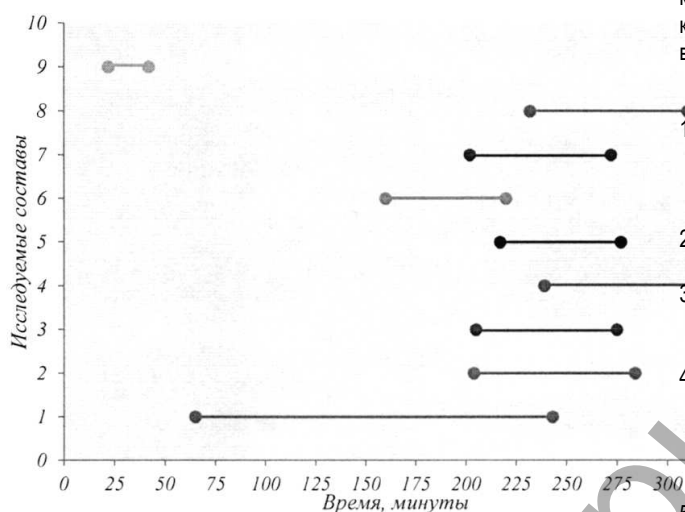


Рисунок 2 – Интервалы времени начала и конца схватывания исследуемых цементных систем

**Заключение.** По результатам выполненных экспериментально-теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

- применение расширяющейся добавки РД (метакаолин:гипс) приводит к значительному повышению водопотребности цементного теста, что резко замедляет схватывание и гидратацию из-за излишнего количества воды, присутствующей в гидратирующей системе. При использовании вместе с РД эффективных пластификаторов

водопотребность смеси снижается и появляется возможность использовать эффект ускорения раннего структурообразования за счет повышенного содержания алюминатов. Присутствие в цементной системе двуводного гипса приводит к замедлению начала схватывания, но само время схватывания сокращаются;

- применение чистого метакаолина совместно с суперпластификатором способствует резкому сокращению сроков, что объясняется высоким содержанием алюминатов и пуццолановой активностью метакаолина. Введение метакаолина без пластификаторов не эффективно из-за высокой водопотребности, приводящей к «разжижению» за счет возросшего количества воды, и, как следствие, к замедлению начала схватывания;
- возможность сокращения времени схватывания в расширяющихся сульфоалюминатных цементных системах при обязательном введении суперпластификатора позволяет рассматривать такие вяжущие как один из возможных эффективных вариантов применения в торкретбетоне, где ранний набор прочности и сокращение сроков схватывания являются обязательными технологическими условиями.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Титов, М.Ю. Бетоны с компенсированной усадкой на расширяющих добавках: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.23.05 / М.Ю. Титов; НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. – Москва, 2012. – 22 с.
2. Бетоны напрягающие. Технические условия: СТБ 2101-2010. – Введ. 01.01.2011 – Минск: Госстандарт, 2011. – 20 с.
3. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона. – Брест, 1998. – 244 с.
4. Беломесова, К.Ю. Исследование влияния расширяющихся сульфферритных и сульфоалюминатных добавок на прочностные показатели и собственные деформации цементных систем / И.П. Павлова, Т.В. Каленюк, К.Ю. Беломесова // Весн. БрГТУ. – № 1: Строительство и архитектура. – 2016. – С. 123–127.
5. Брыков, А.С. Цемент и его применение. Метакаолин // Статья УДК 666.9+961.545.: СПбГТИ(ТУ), Россия, 2012. – С. 1–4.
6. Брукс, Г. Торкрет-бетон, торкрет-цемент, торкрет-штукатурка / Г. Брукс, Р. Линдер, Г. Руфферт; пер. с нем. М.В. Алешечкиной, З.А. Липкинда; под ред. Л.А. Феднера. – Москва: Стройиздат, 1985. – 205 с.
7. Методы испытания цемента. Часть 3. Определение сроков схватывания и равномерности изменения объема : СТБ ЕН 196-3-2011. – Введ. 01.06.2012 – Минск: Минстройархитектуры, 2012 – 11 с.

Материал поступил в редакцию 30.03.2017

#### PAVLOVA I.P., BELOMESOVA K.Yu. *Metakaolin Basis Expansive Admixtures Influence on the Cementitious Systems Setting Time*

Results of setting time experimental study for cementitious systems with influence of expansive additives, based on metakaolin, are resulted in article. The basic mechanisms of early structure formation with application of expansive additives together with effective plasticizing additives are revealed. The opportunity of modified expansive binder application is proved at shotcrete manufacturing.

УДК 624.04

Борисевич А.А.

### ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ ФЕРМ ПО УСЛОВИЯМ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ

**Введение.** В сложившейся к настоящему времени практике расчетов строительных систем решение задач оптимизации выполняется с помощью методов математического программирования. Ограничения на прочность стержней фермы (и других конструкций) записываются в виде нелинейных функций. Численная реализация задач нелинейного математического программирования весьма трудоемка, особенно в

реальном проектировании, хотя теоретических исследований проведено достаточно много. Заранее определить какие ограничения в задаче оптимизации будут активными не всегда возможно. Поэтому, даже сформулировав задачу оптимизации в терминах математического программирования, получить ее решение затруднительно.

Борисевич Арсений Александрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой строительной механики Белорусского национального технического университета.  
Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.