

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-8-17

*\*Нелубова В.В., Усиков С.А., Нецвет Д.Д., Боцман Л.Н., Шаповалов Н.А.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: nelubova@list.ru*

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТА С МОДИФИКАТОРАМИ ДЛЯ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ

**Аннотация.** *Современные требования к качеству конструкционных строительных материалов обуславливают потребность в разработке высокоэффективных долговечных композитов на основе цементного вяжущего. Получение таких материалов подразумевает применение добавок и модификаторов, повышающих прочностные характеристики бетонов и снижающих производственные браки за счет стабилизации структуры и свойств изделий. В работе в качестве модифицирующих компонентов смеси выступали добавки производства ЗАО «НП ЦМИД» (г. Санкт-Петербург): минеральный порошок – многокомпонентная комплексная порошкообразная добавка для бетона – ГПМ модификации 9/12-3, гиперпластификатор ГПМж-Ультра, модификация 17/1.*

*Целью работы являлось изучение влияния добавок на прочность материала и определение значений прогнозируемой прочности в отдаленный период эксплуатации.*

*Показано, что введение добавок не влияет на характер набора прочности, но приводит к снижению прочности на сжатие на 13 % для минерального порошка и повышению на 11 % для минерального порошка и пластификатора. Наблюдается снижение количества воды затворения, необходимое для достижения нормальной густоты.*

*Значения расчетной прочности сопоставимы с полученными данными значений прочности: для всех составов характерен рост прочности до 100 суток твердения с последующим затуханием набора прочности.*

*Таким образом, установлены закономерности влияния добавок на прогнозируемые значения марочной прочности вяжущего: наблюдается увеличение начальной скорости твердения и снижение коэффициента торможения процессов гидратации вяжущего при совместном введении минерального порошка и пластификатора. Высокие показатели прочности вяжущего позволяют прогнозировать высокие эксплуатационные характеристики материалов на его основе.*

**Ключевые слова:** *самоуплотняющийся бетон, модификатор, карбонатно-кремнеземная добавка, пластификатор, долговечность.*

**Введение.** Строительство современных зданий и сооружений требует применения высокоэффективных долговечных материалов, соответствующих требованиям действующих нормативных документов. Особое внимание в последние годы уделяется разработке составов самоуплотняющихся бетонов, обладающих высокими показателями по прочности, подвижности смеси, ее стойкости к расслоению при сниженном объеме воды затворения [1–9]. Данные характеристики возможно получить применением пластифицирующих добавок и модификаторов рационально подобранного состава и концентрации [10–15].

Применение добавок и модификаторов при производстве бетонных изделий в наши дни является неотъемлемой частью технологического процесса. Подбор типа и дозировки добавок, способ введения в смесь – одни из важных этапов проектирования составов высокоэффективного композита, отвечающего требованиям современных нормативных документов и запросам отрасли и специалистов.

Применение добавок и модификаторов позволяет повысить качество материала и его долговечность: уже сегодня существуют составы высоко- и ультравысокопрочных бетонов, которые внедрены в технологии производства на предприятиях [16–23].

Среди специальных видов бетонов выделяются самоуплотняющиеся, характеризующиеся высокой подвижностью смесей при низком расходе воды как основной дисперсионной среды, что достигается комплексным подбором состава из множества компонентов при использовании высокоэффективных пластификаторов [18–20]. Рациональный подбор видового состава компонентов и их соотношения обеспечивает формирование плотной упаковки частиц, что, в совокупности с низкой водопотребностью смеси, препятствует ее расслоению на всех технологических этапах и формирует бетон с высокой прочностью без перерасхода цемента как основного связующего компонента.

Однако замена части цемента на активные дисперсные компоненты ставит задачи по оценке

долговечности материалов с их использованием. Оценка долговечности в натуральных условиях представляет собой длительный процесс исследований изменения свойств материалов под действием внешних агрессивных факторов. Решением обозначенной проблемы является использование современных математических методов, позволяющих осуществлять прогнозную оценку потенциального изменения свойств материалов во времени с учетом установленных кинетических закономерностей коррозионных процессов [24, 25].

В данной работе рассматривается изменение прочности во времени цементного вяжущего с добавкой минерального порошка и пластификатора. Как было показано в ранее выполненных исследованиях, введение указанных компонентов позволяет улучшить физико-механические характеристики материала [26]. В частности, достигается получение смесей с высокой подвижностью и низким водоотделением, сохранением свойств во времени, но при этом отвечающим требованиям нормативных документов.

**Материалы и методы.** В качестве вяжущего в работе был использован портландцемент

марки ЦЕМ I 42,5Н производства ЦЗ «Пролетарий» (г. Новороссийск). В качестве добавок использовали материалы производства ЗАО «НП ЦМИД» (г. Санкт-Петербург): многокомпонентные комплексные порошкообразные добавки для бетона – ГПМ (модификации 18/1 и 9/12-3) – тонкодисперсные смеси на основе солей полиметиленафталинсульфонатов, диоксида кремния и карбонатов (химический состав представлен в таблице 1); гиперпластификатор ГПМж-Ультра (модификация 17/1). Эффективность использования данных компонентов для получения высокопрочного самоуплотняющегося бетона доказана авторским коллективом ранее [26]. Минеральные порошки представляют собой полидисперсные системы с разбросом размеров частиц в диапазоне 0–100 мкм с преобладанием частиц до 10 мкм. Гиперпластификатор ГПМж-Ультра выпускается в жидком виде и представляет собой высокоэффективную комплексную добавку, применяемую для повышения пластичности, снижения усадки и ползучести бетонных смесей, повышения их прочности и морозостойкости.

Таблица 1

#### Химический состав многокомпонентных комплексных порошкообразных добавок для бетона ГПМ

Тип добавки	Оксиды, %									
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	П.п.п.
18/1	39,3	31,1	12,1	8,5	0,2	4,2	2,1	1,5	0,58	0,42
9/12-3	55,6	21,3	9,8	4,9	2,8	2,2	2,1	0,3	0,26	0,74

Эффективность модификаторов подтверждали анализом активности добавок, определяемой количеством кислотных брэнстедовских центров адсорбции и количеством поглощенного CaO из раствора. Оценка кислотных свойств, исследуемых образцов проводили индикаторным способом. Данная методика основана на адсорбции одноосновных индикаторов на поверхности твердых частиц в водной среде [27–29], это приводит к изменению окраски индикаторов, которая в свою очередь позволяет определить величину кислотности (основности) анализируемой поверхности. Оптическую плотность растворов для количественного определения центров адсорбции измеряли спектрофотометрическим методом в ультрафиолетовой и видимой областях спектра с помощью спектрофотометра LEKI SS1207. Оценка сорбционной емкости модификаторов, основанной на определении способности анализируемых проб поглощать из водного раствора гидроксид кальция, проводили титриметрическим способом по методу И.Д. Запорожца [30].

Подготовку образцов производили по ГОСТ 30744-2001. Прочность на сжатие и изгиб определяли согласно ГОСТ 310.4-81.

**Основная часть.** На первоначальном этапе осуществляли оценку активности порошкообразных добавок, применяемых в работе в качестве компонента для получения самоуплотняющегося бетона. Согласно полученным данным, модификатор серии 9/12-3 отличается несколько повышенной суммарной активностью (рис. 1, а). Так, при сопоставимой концентрации кислотных центров Брэнстеда (отличия не превышает 10%), модификатор обозначенной серии характеризуется увеличенной в 1,5 раза сорбционной емкостью веществ, определяемых количеством поглощенного CaO: к 3 суткам общее количество поглощенного CaO для порошкообразных модификаторов ГПМ 18/1 и 9/12-3 составляет 34 и 47 мг/г соответственно. Эти данные хорошо коррелируют с изменением концентрации свободного CaO в растворе во времени (рис. 1, б). Так, в случае модифицирующего компонента ГПМ 18/1 в

первые три часа практически не происходит изменения концентрации СаО. Поглощение начинается в период с 3 до 5 часов, при этом концентрация равномерно снижается до 1 г/л. В случае порошка для модификации 9/12-3 имеет место скачкообразное изменение концентрации СаО в известковом растворе. Так, в первый час концентрация падает почти в 1,5 раза (с изначальной 1,47 г/л до 1 г/л). При этом к 3 часам выдержки порошка в растворе часть поглощенного свобод-

ного вещества возвращается в раствор (в пределах 20 % от поглощенного). Тем не менее, несмотря на колебания в процессах поглощения и отдачи свободного СаО, сорбционная емкость данного порошка выше. Вероятным объяснением такой специфики модификатора серии 9/12-3 является увеличенное содержание карбонатных компонентов в его составе (табл. 1), характеризующихся высокой гигроскопичностью и, соответственно, поглощающей способностью.

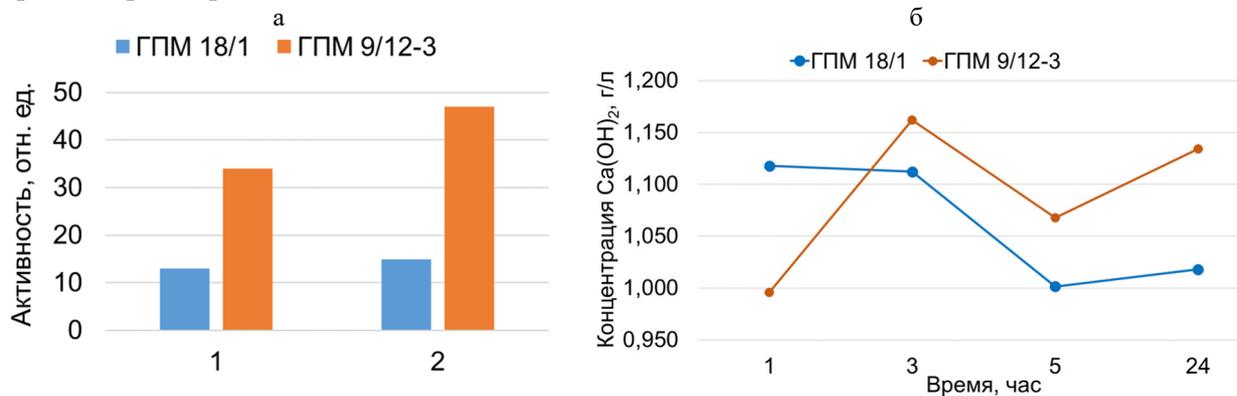


Рис. 1. Активность (а) и поглощение СаО из раствора (б) во времени порошковых компонентов самоуплотняющихся бетонов:

1 – кислотные брэнстедовские центры,  $10^3$  моль/г;

2 – количество поглощенного СаО из раствора по методу Запорожца, мг/г

В результате по совокупности данных, характеризующих активность порошкообразных минеральных модификаторов, установлено, что в составе цементного теста в качестве активной добавки целесообразно использовать модификатор серии ГПМ 9/12-3.

В работе были изучены следующие составы (табл. 1) [23]:

1. Цемент без добавки (состав 1 – контроль);
2. Цемент + 12,5 % минерального порошка от массы цемента (пор 9/12-3) (состав 2);
3. Цемент + 12,5 % минерального порошка от массы цемента (пор 9/12-3) + 3 % пластификатора ГПМЖ 17/1 от массы цемента (состав 3).

Следует отметить, что минеральный порошок используется взамен части цемента.

Для указанных выше составов была определена нормальная плотность цементного теста. По представленным в таблице 2 результатам видно, что введение минерального порошка приводит к росту водоцементного отношения (с В/Ц=0,255 до В/Ц=0,286), требуемого для получения теста нормальной плотности, за счет снижения доли цемента в составах. Однако общее количество воды затворения, вводимое в систему, остается неизменным. В результате формируется система с повышенным расходом воды по отношению к цементу, что может негативно сказаться на конечной прочности цементного камня с модификато-

ром. Данный факт отражен в полученных результатах и на графике (рис. 2). При введении пластификатора водотвердое отношение снижается на 36 % (с В/Т=0,255 до В/Т=0,163). Таким образом, обеспечивается возможность сокращения количества воды затворения при сохранении подвижности и удобоукладываемости смеси. Водотвердое отношение у состава 3 по сравнению с составом 2 снижается на 36 %, а по сравнению с составом 1 – на 28 %.

На основании полученных значений В/Т были рассчитаны составы и заформованы образцы-балочки (40×40×160 мм) для определения прочностных характеристик материалов. Для исследуемых составов была изучена кинетика набора прочности (рис. 2).

Твердение образцов проходило по ГОСТ 30744-2001. Определение прочности производили на 1, 3, 7, 14 и 28 суток.

Введение модификаторов не влияет на характер зависимости кинетики набора прочности: наблюдается плавный рост с достижением к 7 суткам 70 % прочности с последующим замедлением процессов. Так, уже к 3 суткам отмечаются различия в значениях прочности цементного камня: камень, полученный с использованием минерального порошка в совокупности с пластификатором, характеризуется повышенной прочностью (на 16 %). Указанная особенность сохраняется при твердении камня вплоть до 28 суток.

Введение минерального порошка приводит к снижению прочности материала на 13 % по сравнению с контролем (цемент без использования добавок). Данный факт можно объяснить «раз-

бавлением» твердой фазы инертным компонентом, то есть снижением концентрации в системе цемента, обеспечивающего высокие значения прочности.

Таблица 2

Состав и свойства цементного камня с модификаторами

№ состава п/п	Состав			В/Т	Нормальная густота (В/Ц)	Предел прочности при изгибе на 28 сутки, МПа	Предел прочности при сжатии на 28 сутки, МПа
	Цемент	Минеральный порошок*	Пластификатор*				
1	+	-	-	0,26	0,255	7,9	101,3
2	+	+	-	0,26	0,286	6,6	87,9
3	+	+	+	0,16	0,183	20,8	112,2

\*процент от массы цемента

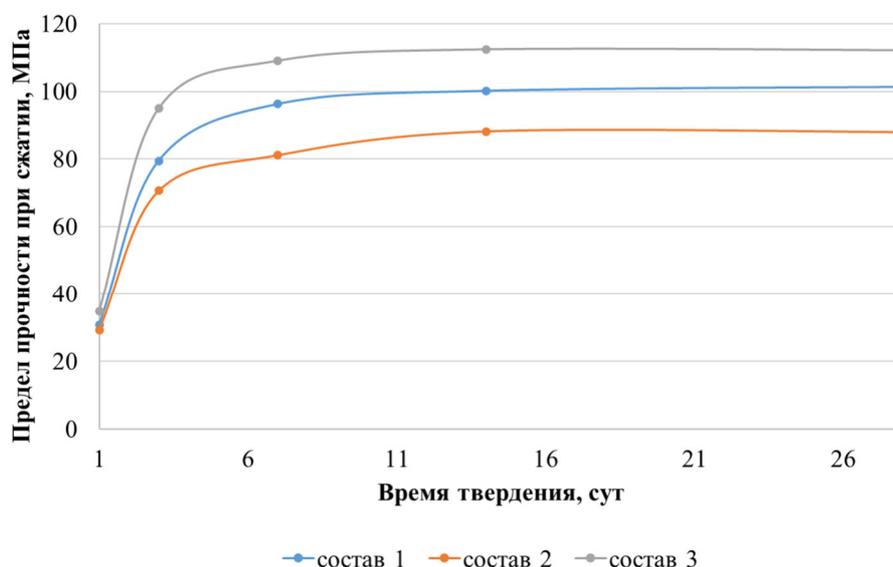


Рис. 2. Кинетика набора прочности цементного камня в присутствии модификаторов

Совместное введение минерального порошка и пластификатора приводит к росту прочности на 11 % к концу срока твердения: за счет действия пластификатора обеспечивается равномерное обволакивание частиц цемента водой (химический фактор), при этом минеральный порошок способствует предотвращению их коагуляции (механический фактор) и обеспечивает формирование плотнейшей упаковки частиц твердой фазы, состоящей как из частиц цемента, так и составляющих модификатора. Таким образом, комплексное совместное действие добавок обеспечивает структурную стабильность цементного теста, что обуславливает формирование максимально бездефектной структуры цементного камня в последующем.

Для эффективного внедрения данных материалов в строительство важно обеспечить не

только прочностные характеристики, но и долговечность — способность сопротивляться комплексному действию атмосферных и других факторов в условиях эксплуатации и сохранять на допустимом уровне структурные параметры, сложившиеся в технологический период.

Для анализа прочностных характеристик в отдаленный период был произведен расчет по методике Ш.М. Рахимбаева [24, 25]. Методика основана на расчете начальной скорости процесса  $U_0$  и коэффициентов торможения ( $k_{\text{кор}}$ ) и корреляции ( $k_{\text{кор}}$ ) по известным уравнениям теории переноса (уравнение 1, 2).

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_0 + k_1 \sigma, \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_0 + k_2 \tau, \quad (2)$$

$\tau$  – время гидратации, сут;  $\sigma$  – предел прочности при сжатии, МПа;  $(\tau/\sigma)_0$  – величина, обратная начальной скорости твердения (гидратации), сут/МПа;  $k_1, k_2$  – коэффициенты торможения процесса гидратации (твердения).

Уравнения выведены с учетом следующих гипотез: процесс начинается с максимальной скоростью  $U_0$  (МПа/сут), определяемой потенциальной реакционной способностью системы в представленных условиях. Физический смысл начальной скорости твердения – прочность материала через сутки твердения. Далее идет торможение, скорость процесса стремится к нулю. В случае цементных систем замедление гидратации происходит в результате образования гидратных пленок на поверхности клинкерных минералов, что затрудняет диффузию воды и продуктов гидратации [24, 25].

Вычисления производились с помощью «Программы для расчета параметров кинетики твердения цементного камня и ряда других процессов», составленной Ш.М. Рахимбаевым.

Рассчитанные данные приведены в таблице 3: введение минерального порошка совместно с пластификатором позволяет повысить начальную скорость процесса  $U_0$  и снизить коэффициент торможения  $k_{\text{тор}}$ . Введение в систему минерального порошка без пластификатора приводит к обратному эффекту.

Для определения прогнозной прочности модифицированного вяжущего воспользуемся уравнением 3:

$$\sigma_i = \frac{iU_0}{1+iU_0} k_{\text{тор}}, \quad (3)$$

где  $i$  – время твердения, сут;  $U_0$  – начальная скорость твердения;  $k_{\text{тор}}$  – коэффициент торможения процесса гидратации (твердения).

Как известно, начальная скорость твердения отвечает за набор прочности в первые сутки твердения и ее повышение позволяет рационализировать технологический процесс за счет снижения временных затрат и ускорения периода оборота форм: материал набирает распалубочную прочность быстрее, за счет чего можно снизить период оборота форм. При этом снижение коэффициента торможения говорит о том, что процессы фазо- и структурообразования, набора прочности будут проходить в системе дольше и, таким образом, в отдаленный период прочность будет выше проектной.

Согласно полученным данным (табл. 3), введение дисперсного порошка незначительно снижает начальную скорость твердения цементного камня, что связано, вероятно, с частичным поглощением воды и незначительным замедлением гидратации цемента вследствие этого. Тогда как совместное использование порошкообразной добавки в комплексе с пластификатором обеспечивает формирование условий для ускоренной гидратации вследствие малого количества воды как дисперсионной среды в объеме цементного теста, следовательно, исключается образование сольватной оболочки вокруг цементных частиц. Это и выражается существенным увеличением начальной скорости твердения на 30 % по сравнению с бездобавочным составом.

Таблица 3

### Результаты расчета по уравнениям теории переноса и расчетные прочности составов цементного камня с модификаторами в возрасте 28 суток

№ состава п/п	$U_0$	$K_{\text{тор}}$	$\sigma_{\text{расч}}^{28}$	$\sigma_{\text{эксп}}^{28}$	Отклонение $\Delta$ , МПа	Отклонение $\Delta$ , %
1	73,8	0,0093	102,208	101,31	-0,898	-0,88
2	72,41	0,0107	89,34	87,99	-1,35	-1,51
3	96,19	0,0084	114	112,17	-1,83	-1,61

Как видно из графического представления полученных данных (рис. 3), расчетные результаты сопоставимы с полученными экспериментальными: наибольшая прочность наблюдается у состава с совместным введением минерального порошка и пластификатора.

Для всех составов характерен рост прочности до 100 суток твердения с последующим затуханием набора прочности. При этом по сравнению с чистым цементом наблюдается снижение прочности на 13,1 % при введении минерального порошка и повышение прочности при введении суперпластификатора на 10,7 %, а также на

27,5 % по сравнению с составом с минеральным порошком. Несмотря на повышенное содержание воды в системе без пластифицирующей добавки, образцы с содержанием порошкообразного модификатора обеспечивают повышение прочности, что связано с реализацией двух факторов: физического – увеличение плотности упаковки твердой фазы ввиду существенно более высокой дисперсности модификатора; химического – пуццолановая реакция между портландитом, сформированным при гидратации цемента, и активным компонентом модифицирующей добавки.

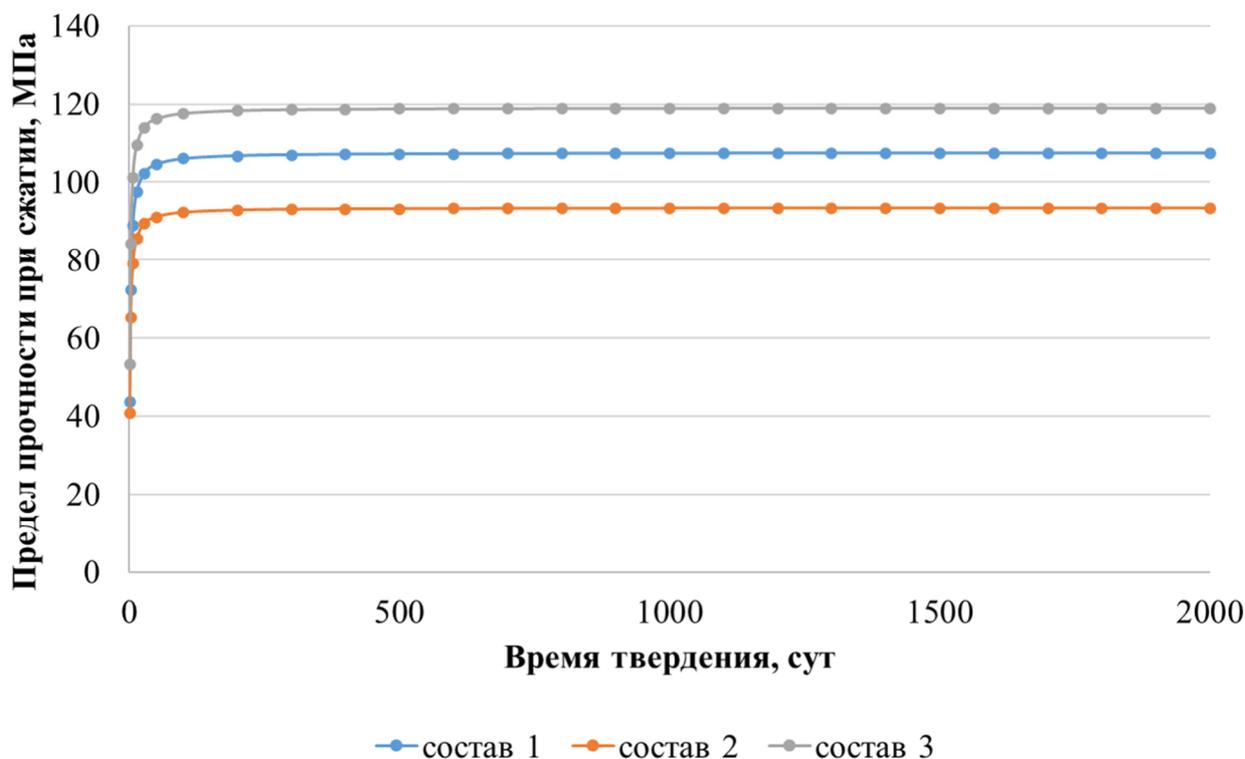


Рис. 3. Расчетная кинетика набора прочности цементного камня в зависимости от состава

**Выводы.** Таким образом, в работе показано влияние введения минерального порошка и пластификатора на прочностные характеристики в отдаленный период. Высокая эффективность модификаторов обеспечивается их физико-химической активностью.

Расчетная методика определения прочности материалов в отдаленный период эксплуатации основана на теории переноса. Согласно полученным результатам, совместное введение минерального порошка и пластификатора приводит к повышению прочности материала, увеличению начальной скорости процесса гидратации, снижению коэффициента торможения.

Высокие показатели прочности вяжущего позволяют прогнозировать высокие эксплуатационные характеристики материалов на его основе.

**Благодарности.** Работа выполнена с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зорин И.М., Плешко М.С. Концепция самоуплотняющегося бетона // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2019. № 2. С. 31–34.
2. Городецкий И.Ю., Сердюченко В.М. Особенности использования самоуплотняющегося бетона // The Scientific Heritage. 2021. № 72–2 (72). С. 3–5. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-72-2-3-5.

3. Николенко Ю.В., Сташевская Н.А., Окольников Г.Э. Применение самоуплотняющихся бетонов в монолитном домостроении // Системные технологии. 2017. № 2(23). С. 38–42.

4. Рыжов И.Н., Романов А.Н. Самоуплотняющиеся бетонные смеси - производство и применение // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2008. № 1(2). С. 71–77.

5. Лесовик В.С., Дегтев Ю.В., Воронов В.В. Вяжущие для малых архитектурных форм из самоуплотняющихся бетонов // Вестник БГТ им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 85–90.

6. Nandhini K., Karthikeyan J. A review on sustainable production of self-compacting concrete utilizing industrial by-products as cementitious materials // Innovative Infrastructure Solutions. 2022. Vol. 7. Iss. 3. 199. DOI: 10.1007/s41062-022-00792-1.

7. Faraj Rabar H., Mohammed Azad A., Omer Khalid M. Self-compacting concrete composites modified with nanoparticles: A comprehensive review, analysis and modeling / Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 501. Article number 104170. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104170.

8. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Некоторые особенности механизма действия органоминеральных модификаторов на цементные системы // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 1. С. 40–46.

9. Шаповалов Н.А., Ломаченко В.А., Яшуркаева Л.И., Яшуркаев О.В. Ячеистые бетоны с суперпластификатором СБ-3 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. № 2. С. 33–35.
10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Чилин И.А. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 58–63.
11. Несветаев Г.В. Технология самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 24–29.
12. Трошкина Е.А., Мухина К.С. Разработка составов и исследование свойств самоуплотняющихся бетонов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2014. Т. 2. С. 42–44.
13. Наруть В.В., Ларсен О.А., Самченко С.В., Александрова О.В., Булгаков Б.И. Разработка составов самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома с использованием структурных характеристик // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 4. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-8-16.
14. Степанова И.В., Шварц Ф.М. Высокопрочный самоуплотняющийся бетон // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2020. № 11 (1035). С. 37–39.
15. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 4–6.
16. Пат. № 2679322, Российская Федерация, МПК С04В 28/04, С04В 24/26, С04В 18/24. Самоуплотняющийся бетон / Р.С. Федюк, П.Г. Козлов, С.Р. Кудряшов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДФУ). № 2018108644; заявл. 13.03.2018; опубл. 07.02.2019, Бюл. № 4. 6 с.
17. Пат. № 2659290, Российская Федерация, МПК С04В 28/04, С04В 28/08, С04В 24/26. Способ получения самоуплотняющегося бетона и бетонная смесь / А.В. Кравцов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Костромская государственная сельскохозяйственная академия". № 2017112580; заявл. 12.04.2017; опубл. 29.06.2018, Бюл. № 19. 8 с.
18. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Арзуманов И.А., Чилин И.А. Новый национальный стандарт на самоуплотняющиеся бетонные смеси // Вестник НИЦ Строительство. 2021. № 3 (30). С. 30–40. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-3(30)-30-40.
19. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В., Кардумян Г.С., Ургапов В.И. Опыт возведения уникальных конструкций из модифицированных бетонов на строительстве комплекса "Федерация" // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 8. С. 20–22.
20. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Строительные материалы. 2013. № 7. С. 28–30.
21. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С., Гридчин А.М., Фишер Х.Б. Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся фибробетоны для защитных сооружений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 7. С. 77–85. DOI: 10.12737/article\_5b4f02bf93df52.30110991.
22. Батудаева А.В., Кардумян Г.С., Каприелов С.С. Высокопрочные модифицированные бетоны из самовыравнивающихся смесей // Бетон и железобетон. 2005. № 4. С. 14–18.
23. Ogurtsova Y.N., Netsvet D.D., Kuzmina N.O., Usikov S.A. Calculation of grade strength and durability of a cement binder with a nanostructured modifier // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Iss. 3. 032087. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032087.
24. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов // Ресурсосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций. Белгород: Везелица. 1993. С. 8.
25. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов по единичному сроку испытания // Строительные материалы. 1994. №4. С. 17–18.
26. Нелюбова В.В., Усиков С.А., Строкова В.В., Нецвет Д.Д. Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса модификаторов // Строительные материалы. 2021. № 12. С. 48–54. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-798-12-48-54.
27. Танабе К. Твердые кислоты и основания. М.: Мир, 1973. 156 с.
28. Кислотно-основные свойства поверхности твердых веществ: метод. указания. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1989. 23 с.
29. Захарова Н.В., Сычев М.М., Корсаков В.Г., Мякин С.В. Эволюция донорно-акцепторных центров поверхности сегнетоэлектриков при диспергировании // Конденсированные среды и межфазные границы. 2011. Т. 13. № 1. С. 56–62.
30. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1973. 504 с.

*Информация об авторах*

**Нелюбова Виктория Викторовна**, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: nelubova@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Усиков Сергей Андреевич**, аспирант кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: serjikk94@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Нецвет Дарья Дмитриевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: netsvet\_dd@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Боцман Лариса Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: lora80@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Шаповалов Николай Афанасьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной химии. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*Поступила 05.04.2022 г.*

© Нелюбова В.В., Усиков С.А., Нецвет Д.Д., Боцман Л.Н., Шаповалов Н.А., 2022

*\*Nelyubova V.V., Usikov S.A., Netsvet D.D., Botsman L.N., Shapovalov N.A.*

*Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov*

*\*E-mail: nelubova@list.ru*

## PREDICTING THE STRENGTH OF CEMENT STONE WITH MODIFIERS FOR SELF-COMPACTING CONCRETE

**Abstract.** *Modern requirements for the quality of constructional building materials determine the need for the development of highly efficient durable composites based on cement binder. Obtaining such materials implies the use of additives and modifiers for increasing the strength characteristics of concrete and reduce production defects by stabilizing the structure and properties of products. In this research, additives produced by private company limited by shares "NP CMID" (Saint Petersburg, Russia) are used as modifying components of the mixture. They are mineral powder - a multicomponent complex powdered additive for concrete GPM modification 9/12, hyperplasticizer GPMZH-Ultra, modification 17/1. The purpose of this work is to study the effect of the introduction of additives on the strength of the material and to determine the values of the predicted strength in the long-term period of operation. It is demonstrated that the introduction of additives does not affect the character of the strength set. However, it leads to a decrease in the compressive strength by 13 % for mineral powder and an increase by 11 % for mineral powder and plasticizer. There is also a decrease in the amount of tempering water required to achieve standard consistency. The values of the calculated strength in the long-term period are comparable with the obtained data of strength values: all compositions are characterized by an increase in strength up to 100 days of hardening, followed by a damping of the strength set. Thus, the work established the regularities of the effect of additives on the predicted values of the brand strength of the binder: there is an increase in the initial hardening rate and a decrease in the inhibition coefficient of the hydration processes of the binder with the combined introduction of mineral powder and plasticizer. The high strength of the binder makes it possible to predict the high operational characteristics of materials based on it.*

**Keywords:** *self-compacting concrete, modifier, carbonate-silica additive, plasticizer, durability.*

### REFERENCES

1. Zorin I.M., Pleshko M.S. Concept of self-compacting concrete [Konceptiya samouplotnyayushchegosya betona]. Proceedings of the rostov state transport university. 2019. No. 2. Pp. 31–34. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-72-2-3-5. (rus)

2. Gorodetsky I.Yu., Serdyuchenko V.M. Features of using self-compacting concrete [Osobennosti ispol'zovaniya samouplotnyayushchegosya betona]. The Scientific Heritage. 2021. No. 72–2 (72). Pp. 3–5. (rus)

3. Nikolenko Yu.V., Stashevskaya N.A., Okol'nikova G.E. Application of SCC in the mono-

lithic housing [Primenenie samouplotnyayushchihsya betonov v monolitnom domostroenii]. System Technologies. 2017. No. 2(23). Pp. 38–42. (rus)

4. Ryzhov I.N., Romanov A.N. Self-compacting concrete mixes production and usage [Samouplotnyayushchiesya betonnye smesi - proizvodstvo i primeneniye]. ALITinform: Cement. Concrete. Dry Mixtures. 2008. No. 1(2). Pp. 71–77. (rus)

5. Lesovik V.S., Degtev Yu.V., Voronov V.V. Binders for small architectural forms from self-compacting concrete [Vyazhushchie dlya malyh arhitekturnykh form iz samouplotnyayushchihsya betonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 5. Pp. 85–89. (rus)

6. Nandhini K., Karthikeyan J. A review on sustainable production of self-compacting concrete utilizing industrial by-products as cementitious materials. Innovative Infrastructure Solutions. 2022. Vol. 7. Iss. 3. 199. DOI: 10.1007/s41062-022-00792-1.

7. Faraj Rabar H., Mohammed Azad A., Omer Khalid M. Self-compacting concrete composites modified with nanoparticles: A comprehensive review, analysis and modeling. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 501. 104170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104170>.

8. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V. Some features of the mechanism of action of organo-mineral modifiers on cement systems [Nekotorye osobennosti mekhanizma dejstviya organo-mineral'nykh modifikatorov na cementnye sistemy]. Earthquake engineering. Constructions safety. 2017. No. 1. Pp. 40–46. (rus)

9. Shapovalov N.A., Lomachenko V.A., Yashurkaeva L.I., Yashurkaev O.V. Cellular concretes with superplasticizer SB-3 [Yacheistye betony s superplastifikatorom SB-3]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No. 2. Pp. 33–35. (rus)

10. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Chilin I.A. About selection of compositions of high-quality concretes with organic-mineral modifiers [O podbore sostavov vysokokachestvennykh betonov s organomineral'nymi modifikatorami]. Stroitel'nye Materialy. 2017. No. 12. Pp. 58–63. (rus)

11. Nesvetaev G.V. Technology of self-compacting concrete [Tekhnologiya samouplotnyayushchihsya betonov]. Stroitel'nye Materialy. 2008. No. 3. Pp. 24–29. (rus)

12. Troshkina E.A., Muhina K.S. Development of compositions and investigation of properties of self-compacting concrete [Razrabotka sostavov i issledovanie svoystv samouplotnyayushchihsya betonov]. Actual problems of modern science, technology and education. 2014. Vol. 2. Pp. 42–44. (rus)

13. Naruts V.V., Larsen O.A., Samchenko S.V., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Use of structural

characteristics in self-compacting concrete mix design with recycled concrete aggregates [Razrabotka sostavov samouplotnyayushchegosya betona na osnove betonogo loma s ispol'zovaniem strukturnykh harakteristik]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 4. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-8-16. (rus)

14. Stepanova I.V., Schwartz F.M. High strength self-compacting concrete [Vysokoprochnyj samouplotnyayushchihsya beton]. BCE: Bulletin of construction equipment. 2020. No 11 (1035). Pp. 37–39. (rus)

15. Kalashnikov V.I. Calculation of compositions of high-strength self-compacting concrete [Raschet sostavov vysokoprochnykh samouplotnyayushchihsya betonov]. Stroitel'nye Materialy. 2008. No 10. Pp. 4–6. (rus)

16. Fedyuk R.S., Kozlov P.G., Kudryashov S.R. Self-laying concrete. Patent RF, no. 2679322, 2019. (rus)

17. Kravtsov A.V. Self-consistent concrete production method and concrete mixture. Patent RF, no. 2659290, 2017. (rus)

18. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Arzumanov I.A., Chilin I.A. New national standard for self-compacting concrete mixes [Novyj nacional'nyj standart na samouplotnyayushchiesya betonnye smesi]. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021. No. 3 (30). Pp. 30–40. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-3(30)-30-40. (rus)

19. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kiselyova Ju.A., Prigozhenko O.V., Kardumyan G.S., Urgapov V.I. Erection of unique structures made of modified concrete and used for construction of the complex “Federation” MMDTS “Moscow-City” [Opyt vozvedeniya unikal'nykh konstrukcij iz modifitsirovannykh betonov na stroitel'stve kompleksa “Federation”]. Industrial and civil engineering. 2006. No. 8. Pp. 20–22. (rus)

20. Kaprielov S.S., Chilin I.A. Ultra-high-strength self-compacting fiber concrete for monolithic structures [Sverhvysockoprochnyj samouplotnyayushchihsya fibrobeton dlya monolitnykh konstrukcij]. Stroitel'nye Materialy. 2013. No. 7. Pp. 28–30. (rus)

21. Fedyuk R.S., Mochalov V.S., Lesovik V.S., Gridchin A.M., Fisher H.-B. Composite binding and self-fitting fiberbetons for protective facilities [Kompozicionnye vyazhushchie i samouplotnyayushchiesya fibrobetony dlya zashchitnykh sooruzhenij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No 7. Pp. 77–85. DOI: 10.12737/article\_5b4f02bf93df52.30110991. (rus)

22. Batudaeva A.V., Kardumyan G.S., Kaprielov S.S. High-strength modified concretes from self-

leveling mixtures [Vysokoprochnye modifitsirovannye betony iz samovyrovnyayushchih smesey]. Concrete and reinforced concrete. 2005. No. 4. Pp. 14–18. (rus)

23. Ogurtsova Y.N., Netsvet D.D., Kuzmina N.O., Usikov S.A. Calculation of grade strength and durability of a cement binder with a nanostructured modifier. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Iss. 3. 032087. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032087.

24. Rakhimbayev Sh.M., Avershina N.M. Prediction of the durability of building material [Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nykh materialov]. Resource-saving technologies of building materials, products and structures. Belgorod: Veselitsa. 1993. Pp. 8. (rus)

25. Rakhimbayev Sh.M., Avershina N.M. Prediction of the durability of building materials by a single test period [Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nykh materialov po edinichnomu sroku ispytaniya]. Stroitel'nye Materialy. 1994. No. 4. Pp. 17–18. (rus)

26. Nelyubova V.V., Usikov S.A., Strokova V.V., Netsvet D.D. Composition and properties of

self-compacting concrete using a complex of modifiers [Sostav i svoystva samouplotnyayushchegosya betona s ispol'zovaniem kompleksa modifikatorov]. Stroitel'nye Materialy. 2021. No. 12. Pp. 48–54. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-798-12-48-54. (rus)

27. Tanabe K. Solid acids and bases [Tverdye kisloty i osnovaniya]. Moscow: Mir, 1973. 156 p. (rus)

28. Acid-base properties of the surface of solids: method. Instructions [Kislotno-osnovnye svoystva poverhnosti tverdykh veshchestv: metod. ukazaniya.]. L.: LTI im. Lensoвета, 1989. 23 p. (rus)

29. Zakharova N.V., Sychev M.M., Korsakov V.G., Myakin S.V. evolution of donor-acceptor centers on the surface of BaTiO<sub>3</sub> – CaSnO<sub>3</sub> ferroelectric materials in the course of their dispersion [Evolutsiya donorno-akceptornykh centrov poverhnosti segnetoelektrikov pri dispergirovani]. Condensed Matter and Interphases. 2011. Vol. 13. No. 1. Pp. 56–62. (rus)

30. Butt Yu.M., Timashev V.V. Tutorial on chemical technology of binding materials [Praktikum po himicheskoy tekhnologii vyazhushchih materialov]. Moscow: Higher School, 1973. 504 p. (rus)

#### Information about the authors

**Nelubova, Viktoria V.** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials Science and Technology of Materials. E-mail: nelubova@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

**Usikov, Sergey A.** Postgraduate student of the Department of Materials Science and Technology of Materials. E-mail: nataly26071992@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

**Netsvet, Daria D.** Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Materials Science and Technology of Materials. E-mail: netsvet\_dd@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

**Botsman, Larisa N.** Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Materials Science and Technology of Materials. E-mail: lora80@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

**Shapovalov, Nikolaj A.** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Applied Chemistry. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Received 05.04.2022

#### Для цитирования:

Нелюбова В.В., Усиков С.А., Нецвет Д.Д., Ботсман Л.Н., Шаповалов Н.А. Прогнозирование прочности цемента с модификаторами для самоуплотняющихся бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-8-17

#### For citation:

Nelyubova V.V., Usikov S.A., Netsvet D.D., Botsman L.N., Shapovalov N.A. Predicting the strength of cement stone with modifiers for self-compacting concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-8-17