

**В.А. Ходаковский<sup>1</sup>, В.Я. Соловьева<sup>1,2</sup>, М.А. Шварц<sup>1</sup>, Ф.М. Шварц<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ КОМПОНЕНТОВ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МНОГОМЕРНОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ**

Задача оптимального подбора количественного содержания компонентов усложняется с ростом числа составляющих смеси. В работе получена линейная аппроксимация различных свойств бетона как функции количества тех или иных добавок в бетонную смесь. Аппроксимация строится на данных, полученных в ходе проведенных экспериментов, на основе построения модели множественной регрессии. На конкретном примере показано, какие добавки и в каких количествах могут существенно улучшить качество бетона. В статье приведены данные по экспериментальному подбору оптимального состава смеси, полученные экспериментальные данные реологических свойств бетонной смеси, а также получаемые прочностные характеристики в зависимости от применяемых добавок в бетонной смеси. Дано описание планирования эксперимента, приведены результаты моделирования физико-механических свойств бетонной смеси и бетона на ее основе. Произведено сравнение экспериментальных данных и прогноза модели множественной регрессии для основных выходных переменных в наглядной графической форме. Получен вывод о хорошем совпадении экспериментальных данных и выходных параметров модели, приведены зависимости по наиболее значимым факторам по влиянию на улучшение свойств бетона. Показаны коэффициенты корреляции, отражающие действие наиболее значимых компонентов комплексной химической добавки, отмечается близкий к линейному характер изменения оцениваемых параметров совместного действия на свойства бетона и бетонной смеси. По мнению авторов, данная работа может иметь существенное практическое значение. Прогнозирование требуемых характеристик синтезируемого материала с помощью модели на различные комбинации входных данных позволяет сократить количество физических экспериментов и получить оптимальные количественные значения используемых компонентов.

**Ключевые слова:** числовой и физический эксперименты, множественная регрессия, бетонная смесь, коэффициент корреляции.

Эволюция бетонных составов за последние два века прошла путь от четырехкомпонентной смеси до сложных многокомпонентных составов с семью и более составляющими [1]. На текущем уровне развития технологии создание современных эффективных бетонных смесей и бетонов с заданными свойствами на их основе предполагает использование большого количества составляющих, которые находятся во взаимодействии друг с

другом. Например, для создания самоуплотняющегося бетона, который был изобретен в конце 80-х гг. XX в. в Японии профессором Окамурой, требуется не менее пяти компонентов, а в настоящее время – более шести (стандартные: вода, цемент, мелкий наполнитель (песок), грубый наполнитель (щебень), далее суперпластификатор, микронаполнитель и наночастицы). Компоненты и их соотношение следует подобрать таким образом, чтобы обеспечить необходимые свойства смеси: высокую подвижность, отсутствие расслоения, определенную текучесть, а также свойства готового материала: плотность, различные виды прочности (на сжатие и на растяжение при изгибе), стойкость к негативным воздействиям внешней среды (морозостойкость, водонепроницаемость, коррозионная стойкость) и т.п.

Для получения материала, обладающего подобным набором свойств, состоящего из большого числа компонентов, необходимо проведение большого количества экспериментов по подбору требуемого состава. Эксперименты направлены на выявление влияния свойств каждого компонента и взаимосвязи в общем составе смеси. Варьирование параметров компонентов часто происходит в небольшом диапазоне значений, тем не менее общее время и трудозатраты на проектирование композиции существенно увеличиваются. Создание теоретической модели, учитывающей вклад каждого из компонентов, а также их взаимовлияние, представляет собой чрезвычайно сложную задачу.

**Материалы и методы исследования.** В настоящее время все шире используется численное моделирование для проектирования различных составов бетонов с требуемыми свойствами [2–11]. В данной работе анализируется влияние некоторых компонентов бетонной смеси на результаты синтеза высокопрочного самоуплотняющегося бетона на основе физических экспериментов, осуществленных в рамках ранее проводимых исследований [12, 13], и разработанной математической модели множественной регрессии.

Исходные данные, результаты физических экспериментов и оценки параметров линейной модели множественной регрессии представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

**Описание этапов планирования экспериментов.** Проведено пять этапов по три эксперимента в каждом. На каждом этапе анализируется влияние одной из добавок, представляющих собой ее водный раствор.

На первом этапе исследуется влияние сополимера акриловой кислоты, а ее процентное содержание в растворе изменяется следующим образом, %: 1-й эксперимент – 0,5, второй – 0,6, третий – 0,7. В ходе последующих этапов содержание этой добавки остается постоянным на уровне 0,6 %.

Таблица 1

## Исходные данные физических экспериментов

№ п/п	Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	Компоненты комплексной химической добавки, мас. % от массы цемента					Водоцементное отношение	Расплав конуса, мм	Оценка вязкости бетонной смеси (время достижения диаметра расплава 500 мм, с)	Раствороотделение, %	Водоотделение, %	Возраст, 28 суток		
		водный раствор поликарбоната сополимера акриловой кислоты с $\rho = 1,025 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0-6,5$	водный раствор поликарбоната сополимера ангидрида акриловой и малеиновой кислот с $\rho = 1,027 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0-6,5$	золь кремниевой кислоты, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , с $\rho = 1,021 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 3,5-4,0$	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{O}_7$	$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$						прочность на сжатие, МПа	прочность на растяжение при изгибе, МПа	коэффициент трещиностойкости (отношение прочности на растяжение при изгибе к прочности на сжатие)
1	460	контрольный состав					0,58	400	-	4,00	0,80	58,00	6,80	0,117
2	460	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	560,00	3,10	4,20	0,80	63,50	7,20	0,1134
3	460	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	560,00	3,00	4,00	0,80	64,30	7,60	0,1182
4	460	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	560,00	2,90	4,00	0,80	64,90	7,80	0,1202
5	460	0,60	0,10	0,00	0,00	0,00	0,43	590,00	1,90	4,00	0,80	65,80	7,80	0,1185
6	460	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,42	595,00	1,50	4,00	0,80	66,70	7,90	0,1184
7	460	0,60	0,30	0,00	0,00	0,00	0,41	600,00	1,30	4,00	0,80	68,10	8,10	0,1189
8	460	0,60	0,20	0,50	0,00	0,00	0,39	640,00	6,00	3,60	0,60	71,10	8,90	0,1252
9	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,00	0,38	642,00	6,00	3,60	0,60	72,00	9,00	0,1250
10	460	0,60	0,20	0,70	0,00	0,00	0,37	644,00	6,00	3,60	0,60	72,20	9,20	0,1274
11	460	0,60	0,20	0,60	0,30	0,00	0,38	630,00	6,00	3,50	0,56	72,80	9,00	0,1236
12	460	0,60	0,20	0,60	0,50	0,00	0,37	636,00	6,00	3,50	0,56	73,70	9,10	0,1235
13	460	0,60	0,20	0,60	0,70	0,00	0,37	630,00	6,00	3,50	0,56	73,80	9,10	0,1233
14	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,30	0,38	633,00	6,00	3,50	0,56	75,10	9,20	0,1225
15	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,50	0,37	638,00	6,00	3,50	0,56	76,00	9,40	0,1237
16	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,70	0,38	634,00	6,00	3,50	0,56	76,40	9,50	0,1243

Таблица 2

## Результаты поиска оценок параметров линейной модели множественной регрессии

№ п/п	Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	Компоненты комплексной химической добавки, мас. % от массы цемента					Водоцементное отношение	Результаты моделирования выходных параметров						
		водный раствор поликарбоната сополимера акриловой кислоты с $\rho = 1,025 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0-6,5$	водный раствор поликарбоната сополимера ангидрида акриловой и малеиновой кислот с $\rho = 1,027 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0-6,5$	золь кремниевой кислоты, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , с $\rho = 1,021 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 3,5-4,0$	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{O}_7$	$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$		расплав конуса, мм	оценка вязкости бетонной смеси (время достижения диаметра расплава 500 мм, с)	раствороотделение, %	водоотделение, %	прочность на сжатие, МПа	прочность на растяжение при изгибе, МПа	коэффициент трещиностойкости (отношение прочности на растяжение при изгибе к прочности на сжатие)
1	460	контрольный состав					0,58	400,00	0,00	4,00	0,80	58,00	6,80	0,117
2	460	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	552,24	3,23	4,12	0,80	63,54	7,23	0,116
3	460	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	563,02	2,87	4,05	0,80	64,26	7,56	0,118
4	460	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	577,25	2,68	4,00	0,80	65,05	7,84	0,119
5	460	0,60	0,10	0,00	0,00	0,00	0,43	582,97	2,25	4,02	0,80	65,54	7,75	0,118
6	460	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,42	604,64	1,72	4,00	0,80	66,85	7,93	0,119
7	460	0,60	0,30	0,00	0,00	0,00	0,41	626,32	1,19	3,98	0,80	68,16	8,11	0,119
8	460	0,60	0,20	0,50	0,00	0,00	0,39	624,47	5,27	3,66	0,63	71,13	8,83	0,124
9	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,00	0,38	627,74	5,94	3,59	0,60	71,97	9,02	0,125
10	460	0,60	0,20	0,70	0,00	0,00	0,37	631,02	6,61	3,52	0,56	72,81	9,21	0,127
11	460	0,60	0,20	0,60	0,30	0,00	0,38	630,80	6,01	3,55	0,58	72,85	9,04	0,124
12	460	0,60	0,20	0,60	0,50	0,00	0,37	631,11	5,97	3,51	0,56	73,40	9,08	0,124
13	460	0,60	0,20	0,60	0,70	0,00	0,37	633,15	6,01	3,48	0,55	73,99	9,10	0,123
14	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,30	0,38	632,06	5,99	3,54	0,58	74,16	9,23	0,124
15	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,50	0,37	633,22	5,94	3,50	0,56	75,59	9,38	0,124
16	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,70	0,38	637,82	6,06	3,48	0,55	77,09	9,50	0,123

В ходе второго этапа исследуется дополнительное влияние сополимера акриловой кислоты с добавлением малеиновой кислоты с процентным ее содержанием, %: 4-й эксперимент – 0,1; 5-й – 0,2 и 6-й – 0,3. В ходе последующих экспериментов содержание малеиновой кислоты остается неизменным на уровне 0,2 %.

На третьем этапе исследуется дополнительное влияние золя кремниевой кислоты;  $\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ , с  $\rho = 1,021 \text{ г/см}^3$  и  $\text{pH} = 3,5 - 4,0$  с ее процентным содержанием в экспериментах, %: 7-й – 0,5; 8-й – 0,6; 9-й – 0,7, причем в ходе последующих экспериментов ее содержание остается постоянным на уровне – 0,6 %.

В ходе четвертого этапа исследуется влияние добавки:  $\text{NaC}_6\text{H}_{11}\text{O}_7$  с процентным ее содержанием в экспериментах, %: 10-й – 0,3; 11-й – 0,5; 12-й – 0,7, причем в ходе последующих экспериментов данная добавка не используется.

На заключительном, пятом, этапе исследуется влияние добавки:  $\text{KC}_6\text{H}_{11}\text{O}_7$  с процентным ее содержанием в экспериментах, %: 13-й – 0,3; 14-й – 0,5; 15-й – 0,7.

**Результаты и обсуждение.** Анализируя результаты физических экспериментов и численного моделирования, необходимо отметить существенное совместное влияние первых трех компонентов комплексной добавки на выходные результаты физико-механических показателей бетонной смеси и бетона, что наглядно подтверждается графиками изменения выходных параметров на рис. 1–3.

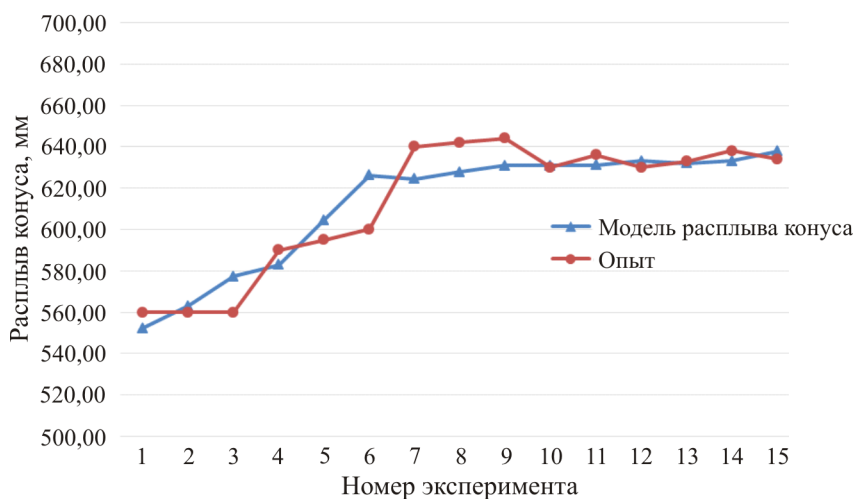


Рис. 1. Выходные данные экспериментов и модели множественной регрессии по параметру «расплав конуса»

Так, например, параметр «расплав конуса» практически линейно возрастал при последовательном введении поликарбоксилатного сополимера акриловой кислоты, затем сополимера ангидрида малеиновой кислоты, совместное действие которых на цемент было усилено в результате добавления

золя кремниевой кислоты. Механизм действия поликарбоксилатных добавок можно объяснить совокупным воздействием электростатического и стерического эффектов золь кремниевой кислоты [14] за счет создания наноструктурного элемента в бетонной смеси, что способствует увеличению гидратационной активности системы, увеличивая прочность бетона [15].

Полезно отметить, что коэффициент корреляции, отражающий совместное действие поликарбоксилатного сополимера акриловой кислоты и сополимера ангидрида малеиновой кислоты на расплыв конуса, составляет примерно 0,72, что подтверждает близкий к линейному характер изменения этого параметра рис. 1.

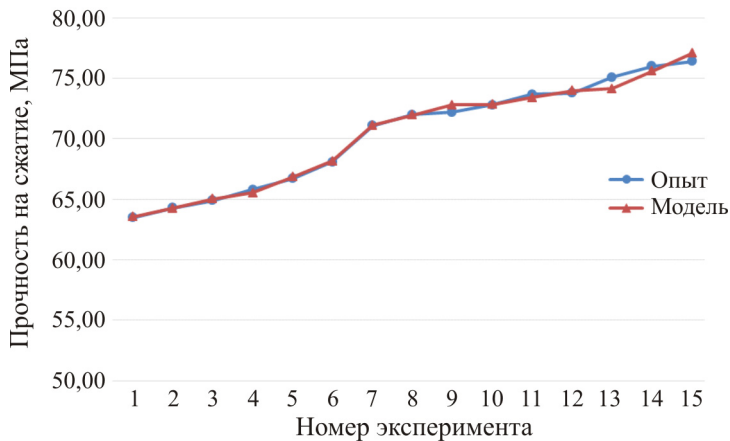


Рис. 2. Выходные данные экспериментов и модели множественной регрессии по параметру «прочность на сжатие»

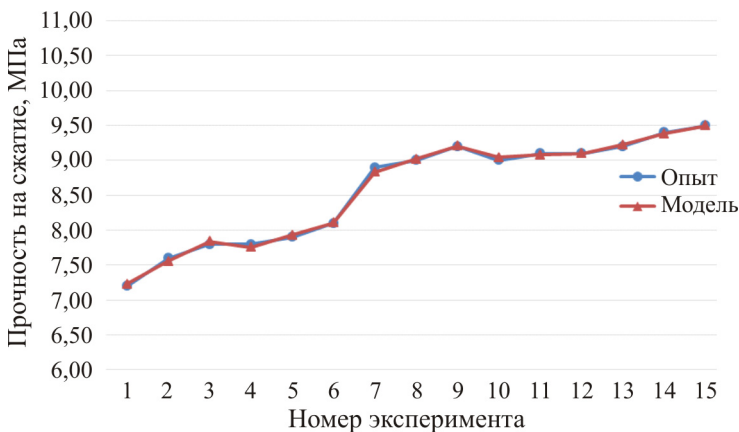


Рис. 3. Выходные данные экспериментов и модели множественной регрессии по параметру «прочность на растяжение при изгибе»

Кроме того, анализируя действие указанных добавок на выходные параметры «прочность на сжатие» и «прочность на растяжение при изгибе», можно увидеть относительно линейное их возрастание с коэффициентами корреляции 0,63 и 0,57 соответственно, что можно наблюдать на рис. 2 и 3.

**Выводы.** Результаты, полученные с помощью модели множественной регрессии, хорошо согласуются с данными физических экспериментов.

Установлено существенное совместное влияние поликарбоксилатного сополимера акриловой кислоты, сополимера ангидрида малеиновой кислоты и золя кремниевой кислоты на результаты физико-химических показателей бетонной смеси и бетона.

Предложенную методику целесообразно использовать при синтезе иных многокомпонентных материалов.

#### Библиографический список

1. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего // *Строительные материалы*. – 2016. – № 1/2. – С. 96–103.
2. Белов В.В., Куляев П.В. Теоретическое обоснование оптимальных зерновых составов композиционных материалов с минеральными наполнителями // *Строительство и реконструкция*. – 2017. – № 5(73). – С. 94–101.
3. Применение комплексного подхода к оптимизации производственных составов на примере товарного бетона / Р.О. Резаев, А.А. Дмитриев, Н.А. Бородуля, Д.В. Чернявский // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие Смеси*. – 2021. – № 2 (63). – С. 42–55.
4. Низина Т.А., Балыков А.С. Построение экспериментально-статистических моделей «состав – свойство» физико-механических характеристик модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2016. – Вып. 45 (64). – С. 54–66.
5. Низина Т.А., Балыков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // *Инженерно-строительный журнал*. – 2016. – № 2. – С. 13–24.
6. Низина Т.А., Балыков А.С., Макарова Л.В. Применение моделей «состав – свойство» для исследования свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2016. – № 12. – С. 15–21.
7. Дворкин Л.И. Оптимальное проектирование составов бетона. – Львов: Вища школа, 1981. – 159 с.
8. Вознесенский В.А. Статистические решения в задачах анализа и оптимизации качества строительных материалов (методология и опыт применения): автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Моск. инженер.-строит. ин-т. – М., 1970. – 44 с.
9. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Довгань А.Д. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих // *Современное промышленное и гражданское строительство*. – 2007. – Т. 3, № 1. – С. 5–15.
10. Комохов П.Г., Харитонов А.М. Структура и свойства цементного камня с позиции компьютерного материаловедения // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2007. – № 4. – С. 63–66.
11. Комохов П.Г., Харитонов А.М. Имитационно-численная модель структуры и свойств цементного камня // *Известия вузов. Строительство*. – 2008. – № 4 (592). – С. 10–16.
12. Высокоэффективные самоуплотняющиеся бетонные смеси и высокопрочные бетоны на их основе / В.Я. Соловьева, Ф.М. Шварц, И.В. Степанова, Д.В. Соловьев // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. – 2019. – № 11 (1023). – С. 48–50.

13. Степанова И.В., Шварц Ф.М. Высокопрочный самоуплотняющийся бетон // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2020. – № 11 (1035). – С. 37–39.
14. Василик П.Г., Голубев И.В. Особенности применения поликарбонатных гиперпластификаторов Melflux® [Электронный ресурс]. – URL: [https://baltimix.ru/confer\\_archive/reports/doclad03/Vasilik.php/](https://baltimix.ru/confer_archive/reports/doclad03/Vasilik.php/) (дата обращения: 15.09.2023).
15. Нанодобавки из кремне- и железосодержащего (III) золя для тяжелого бетона на рядовых цементах / Л.Б. Сватовская, В.Я. Соловьева, И.В. Степанова, Д.С. Старчуков // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2010. – № 5. – С. 61–68.

## References

1. Kalashnikov V. I., Evolyuciya razvitiya sostavov i izmenenie prochnosti betonov. Betony nastoyashchego i budushchego [Evolution of the development of compositions and changes in the concrete strength. Concretes of the present and future.]. *Building Materials*. 2016 №1/2. pp. 96-103. (In Russian)
2. Belov V.V., Kulyaev P.V., Teoreticheskoe obosnovanie optimal'nyh zernovyh sostavov kompozitsionnyh materialov s mineral'nymi napolnitelyami [Theoretical substantiation of optimal grain compositions of composite materials with mineral fillers]. *Construction and reconstruction*. – 2017. – № 5(73). – pp. 94-101.
3. Rezaev R. O., Dmitriev A. A., Borodulya N. A., Chernyavskij D. V., Primenenie kompleksnogo podhoda k optimizacii proizvodstvennyh sostavov na primere tovarnogo betona [Application of an integrated approach to optimization of production compositions on the example of ready-mixed concrete]. *ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes*. 2021 №2 (63). pp. 42-55.
4. Nizina T.A., Balykov A.S. Postroenie eksperimentalno-statisticheskikh modelej «sostav – svojstvo» fiziko-mehaničeskikh harakteristik modifitsirovannyh dispersno-armirovannyh melkozernistyh betonov [Construction of experimental and statistical models “composition – property” of physical and mechanical characteristics of modified dispersed-reinforced fine-grained concrete]. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture*. 2016. pp. 54–66.
5. Nizina T.A., Balykov A.S. Eksperimental'no-statisticheskie modeli svojstv modifitsirovannyh dispersno-armirovannyh melkozernistyh betonov. [Experimental and statistical models of the properties of modified dispersed-reinforced fine-grained concrete]. *Construction Engineering Journal*, 2016. No. 2, pp. 13-24.
6. Nizina T.A., Balykov A.S., Makarova L.V. Primenenie modelej «sostav – svojstvo» dlya issledovaniya svojstv modifitsirovannyh dispersno-armirovannyh melkozernistyh betonov [application of “composition-property” models to study the properties of modified dispersed-reinforced fine-grained concrete]. *Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhova* 2016, No. 12, pp. 15-21.
7. Dvorkin L.I. Optimalnoe proektirovanie sostavov betona [Optimal design of concrete compositions] / L.I. Dvorkin. – Lvov: Visha shkola, 1981.- 159 p.
8. Voznesenskij V.A. Statisticheskie resheniya v zadachah analiza i optimizacii kachestva stroitelnyh materialov (metodologiya i opyt primeneniya): Avtoref. dis. d-ra tehn. nauk: [Statistical solutions in problems of analysis and optimization of the quality of building materials (methodology and application experience): Abstract of thesis. dis. Dr. Tech. Sciences]. *Moscow Civil Engineering Institute*. - M., 1970. - 44 p.
9. Voznesenskij V.A., Lyashenko T.V., Dovgan A.D. Kompromissnaya mnogofaktornaya optimizaciya garantirovannogo kachestva shlakoshelochnyh vyazhushih [Compromise multifactor optimization of guaranteed quality of slag-alkali binders]. *Modern industrial and civil construction*. – 2007, vol. 3, no. 1. – P. 5-15.
10. Komohov, P.G., Haritonov A.M. Struktura i svojstva cementnogo kamnya s pozicii kompyuternogo materialovedeniya [Structure and properties of cement stone from the perspective of computer materials science]. *Academia. Architecture and construction*. 2007. No. 4. - P. 63-66.
11. Komohov, P.G., Haritonov A.M. Imitacionno-chislennaya model struktury i svojstv cementnogo kamnya/ [Simulation-numerical model of the structure and properties of cement stone]. *News from universities. Construction*. - 2008. - No. 4 (592). - pp. 10-16.
12. Solovyeva V.Ya., Shvats F.M., Stepanova I.V., Solovov D.V. Vysokoeffektivnye samouplotnyayushiesya betonnye smesi i vysokoprochnye betony na ih osnove [Highly efficient self-compacting concrete mixtures and high-strength concrete based on them] *BST: Bulletin of Construction Equipment*. - 2019, - No. 11 (1023). – P.48 -50.

13. Stepanova I.V., Shvats F.M., Vysokoprochnyj samouplotnyayushij beton [High strength self-compacting concrete] *BST: Bulletin of Construction Equipment*. - 2020, - No. 11 (1035). – P. 37 -39.

14. Vasilik P.G., Golubev I.V., Osobennosti primeneniya polikarboksilatnyh giperplastifikatorov Melflux® [Features of the use of polycarboxylate hyperplasticizers Melflux®] available at: [https://baltimix.ru/confer\\_archive/reports/doclad03/Vasilik.php/](https://baltimix.ru/confer_archive/reports/doclad03/Vasilik.php/) (accessed 15 September 2023).

15. Svatovskaya, L.B., Solovyeva V.Ya., Stepanova I.V., Starchukov D.S. Nanodobavki iz kremne- i zhelezosoderzhashego (III) zolya dlya tyazhelogo betona na ryadovyh cementah [Nanoadditives from silicon- and iron-containing (III) sol for heavy concrete on ordinary cements] *Nanotechnologies in construction: scientific online journal*. – 2010. – No. 5. – pp. 61-68.

**V. Hodakovskij, V. Solovyeva, M. Shvarts, F. Shvarts**

## **ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SOME COMPONENTS OF SELF-COMPACTING CONCRETE USING THE MULTIVARIATE LINEAR REGRESSION METHOD**

The problem of optimal selection of the quantitative content of components becomes more complicated as the number of mixture components increases. The work obtained a linear approximation of various properties of concrete as a function of the amount of certain additives in the concrete mixture. The approximation is based on data obtained during the experiments, based on the construction of a multiple regression model. A specific example shows, which additives and in what quantities can significantly improve the quality of concrete. The article presents data on the experimental selection of the optimal composition of the mixture, the obtained experimental data on the rheological properties of the concrete mixture, as well as the obtained strength characteristics, depending on the additives used in the concrete mixture. A description of the planning of the experiment is given, and the results of modeling the physical and mechanical properties of the concrete mixture and concrete based on it are presented. A comparison was made between the experimental data and the prediction of the multiple regression model for the main output variables in a clear graphical form. It was concluded that there is a good agreement between the experimental data and the output parameters of the model, and the dependences on the most significant factors in influencing the improvement of concrete properties are presented. Correlation coefficients reflecting the effect of the most significant components of the complex chemical additive are shown, and the close to linear nature of the change in the estimated parameters of the joint effect on the properties of concrete and concrete mixture is noted. According to the authors, this work can have significant practical significance. Predicting the required characteristics of the synthesized material using a model for various combinations of input data makes it possible to reduce the number of physical experiments and obtain optimal quantitative values of the components used.

**Keywords:** numerical and physical experiments, multiple regression, concrete mixture, correlation coefficient.

**Ходаковский Валентин Аветикович** (Санкт-Петербург, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Информатика и информационная безопасность», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург, 190031, Московский пр., 9, e-mail: [hva1104@mail.ru](mailto:hva1104@mail.ru)).

**Соловьева Валентина Яковлевна** (Санкт-Петербург, Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерная химия и естествознание», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург, 190031, Московский пр., 9); профессор кафедры «Строительный ин-



жиниринг и материаловедение», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: 9046185117@mail.ru).

**Шварц Михаил Александрович** (Санкт-Петербург, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург, 190031, Московский пр., 9, e-mail: shvarts4545@mail.ru).

**Шварц Филипп Михайлович** (Санкт-Петербург, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Инженерная химия и естествознание», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург, 190031, Московский пр., 9, e-mail: films@mail.ru).

**Valentin Hodakovskij** (Saint-Petersburg, Russian Federation) – Doctor of Engineering, Professor of the Department of Computer Science and Information Security, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University (9, Moskovsky av., 190031, Saint Petersburg, e-mail: hval104@mail.ru).

**Valentina Solovyeva** (Saint-Petersburg, Perm, Russian Federation) – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Engineering Chemistry and Natural Sciences, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University (9, Moskovsky av., 190031, Saint Petersburg); Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: 9046185117@mail.ru).

**Michael Shvarts** (Saint-Petersburg, Russian Federation) – Associate Professor of Higher Mathematics Department, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University (9, Moskovsky av., 190031, Saint Petersburg, e-mail: shvarts4545@mail.ru).

**Philipp Shvarts** (Saint-Petersburg, Russian Federation) – Post-Graduate Student of the Department of Engineering Chemistry and Natural Sciences, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University (9, Moskovsky av., Saint Petersburg, 190031, e-mail: films@mail.ru).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.

Поступила: 16.10.2023

Одобрена: 20.10.2023

Принята к публикации: 27.10.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Анализ влияния некоторых компонентов самоуплотняющегося бетона с использованием метода многомерной линейной регрессии / В.А. Ходаковский, В.Я. Соловьева, М.А. Шварц, Ф.М. Шварц // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2023. – № 3. – С. 45–53. DOI: 10.15593/2409-5125/2023.03.03

Please cite this article in English as: Hodakovskij V., Solovyeva V., Shvarts M., Shvarts F. Analysis of the influence of some components of self-compacting concrete using the multivariate linear regression method. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*, 2023, no. 3, pp. 45-53. DOI: 10.15593/2409-5125/2023.03.03