

УДК 666.9

Проектирование состава высокопрочного самоуплотняющегося бетона с использованием нейронной сети

В. А. Ходаковский, М. А. Шварц, Ф. М. Шварц

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ходаковский В. А., Шварц М. А., Шварц Ф. М. Проектирование состава высокопрочного самоуплотняющегося бетона с использованием нейронной сети // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 860–867. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-860-867

Аннотация

Цель: Расширить возможность интерпретации результатов ограниченного числа физических экспериментов при подборе компонентов для создания бетонной смеси и бетона на ее основе с требуемыми выходными свойствами. **Методы:** С помощью нейронной сети в аналитической среде LogiPlot построена модель с шестью входными переменными, отображающими вводимые специальные добавки, и семью выходными переменными, представляющими параметры качества бетонной смеси и бетона. **Результаты:** В процессе обучения сформирована трехслойная сетевая модель, с помощью которой получены прогнозные выходные характеристики бетонной смеси и бетона. Произведено сравнение экспериментальных данных и прогноза нейронной модели для каждой выходной переменной в наглядной графической форме. **Практическая значимость:** Прогнозирование требуемых характеристик, синтезируемого материала с помощью реакции нейронной модели на различные комбинации входных данных позволяет осуществить оптимальное количество физических экспериментов. Возможно применение предложенного способа моделирования для различных многокомпонентных материалов.

Ключевые слова: Нейронная сеть, множественная регрессия, бетонная смесь, числовой эксперимент, физический эксперимент.

В настоящее время создание бетонных смесей и получение высокоэффективных бетонов с заданными свойствами на их основе требует использования значительного количества компонентов [1], взаимодействующих друг с другом. Соответствующий подбор компонентов смеси обеспечивает требуемые подвижность, текучесть, связность смеси, а также требуемую прочность, свойства долговечности, стойкость к воздействию окружающей среды и т. п.

Очевидно, что получение материала с соответствующим набором свойств связано с проведением большого количества экспериментов, изучающих влияние каждого компонента и их

взаимосвязь на конечный результат. Данный процесс требует значительного количества времени, учитывая общий экспериментальный объем и время выдерживания образцов. Построение теоретической модели процессов взаимодействия совокупности компонентов представляет собой весьма сложную задачу. Известны работы по моделированию свойств бетонных материалов различного состава [2–11], но базовой основой создания высокопрочного самоуплотняющегося бетона является экспериментальный подбор компонентов состава. Сочетая полученные экспериментальные данные и вычислительный эксперимент, возможно ускорить синтез необходимого

Таблица 1. Составы для экспериментального определения рационального соотношения компонентов и эффективности их действия

№ п/п	Расход цемента на 1 м ³ бетонной смеси, кг	Компоненты комплексной химической добавки, % от массы цемента					Водоцементное соотнош. (В/Ц)
		Водн. р-р поликарбосополим. акриловой кислоты с $\rho = 1,025 \text{ г/см}^3$ и pH = 6,0–6,5	Водн. р-р поликарб. сополим. ангидрида акриловой и малеиновой к-ты с $\rho = 1,027 \text{ г/см}^3$ и pH = 6,0–6,5	Золь кремниевой кислоты, $\text{SiO}_2 \cdot n2\text{H}_2\text{O}$, с $\rho = 1,021 \text{ г/см}^3$ и pH = 3,5–4,0	$\text{NaC}_6\text{H}_{11}\text{O}_7$	$\text{KC}_6\text{H}_{11}\text{O}_7$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	460	контрольный состав					0,58
2	460	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47
3	460	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45
4	460	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45
5	460	0,60	0,10	0,00	0,00	0,00	0,43
6	460	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,42
7	460	0,60	0,30	0,00	0,00	0,00	0,41
8	460	0,60	0,20	0,50	0,00	0,00	0,39
9	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,00	0,38
10	460	0,60	0,20	0,70	0,00	0,00	0,37
11	460	0,60	0,20	0,60	0,30	0,00	0,38
12	460	0,60	0,20	0,60	0,50	0,00	0,37
13	460	0,60	0,20	0,60	0,70	0,00	0,37
14	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,30	0,38
15	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,50	0,37
16	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,70	0,38

Таблица 2. Результаты физико-механических показателей бетонной смеси и бетона в присутствии компонентов комплексной химической добавки

№ п/п	Расплав конуса, мм	Оценка вязкости бетонной смеси (время достиж. диам. расплыва 500 мм, с)	Растворотделение, %	Водоотделение, %	Возраст, 28 суток		
					Прочность на сжатие, МПа	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Коэффициент трещиностойкости
1	2	3	4	5	6	7	8
1	560,00	3,10	4,20	0,80	63,50	7,20	0,1134
2	560,00	3,00	4,00	0,80	64,30	7,60	0,1182
3	560,00	2,90	4,00	0,80	64,90	7,80	0,1202
4	590,00	1,90	4,00	0,80	65,80	7,80	0,1185
5	595,00	1,50	4,00	0,80	66,70	7,90	0,1184
6	600,00	1,30	4,00	0,80	68,10	8,10	0,1189
7	640,00	6,00	3,60	0,60	71,10	8,90	0,1252
8	642,00	6,00	3,60	0,60	72,00	9,00	0,1250
9	644,00	6,00	3,60	0,60	72,20	9,20	0,1274
10	630,00	6,00	3,50	0,56	72,80	9,00	0,1236
11	636,00	6,00	3,50	0,56	73,70	9,10	0,1235
12	630,00	6,00	3,50	0,56	73,80	9,10	0,1233
13	633,00	6,00	3,50	0,56	75,10	9,20	0,1225
14	638,00	6,00	3,50	0,56	76,00	9,40	0,1237
15	634,00	6,00	3,50	0,56	76,40	9,50	0,1243

материала. Ниже рассмотрен пример экспериментального подбора компонентов (табл. 1) и его результатов (табл. 2).

Подбор оптимального состава смеси был осуществлен путем последовательного добавления компонентов, показано их влияние на свойства смеси и затвердевшего бетона. Таким образом, можно говорить о наличии шести входных параметров и семи выходных.

В ходе планирования экспериментов исследовалось влияние пяти добавок при их последовательном вводе после достижения оптимального результата на предыдущем этапе. Всего в эксперименте предусмотрено пять этапов по три эксперимента в каждом. На каждом этапе анализируется влияние одной из добавок.

На первом этапе исследуется влияние сополимера акриловой кислоты, а ее процентное содержание в растворе изменяется следующим образом: 1-й эксперимент — 0,5 %, 2-й — 0,6 %, 3-й — 0,7 %. В ходе последующих этапов берутся медианные значения каждой из добавок.

Далее 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. 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 $\text{pH} = 3,5\text{--}4,0$ с ее процентным содержанием в экспериментах: 7-й — 0,5 %, 8-й — 0,6 %, 9-й — 0,7 %. 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 %. 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 %.

С целью расширения интерпретации результатов влияния различных компонентов на бетонную смесь было принято решение построения

модели множественной регрессии с помощью нейросети. В данном случае входными независимыми переменными являются массовые (объемные) доли вводимых компонентов (шесть переменных), а зависимыми выходными переменными являются параметры качества бетонной смеси и бетона (семь переменных). Данная модель позволяет проводить как аппроксимацию данных, так и экстраполяцию результатов вычислительного эксперимента.

Ниже приводятся результаты обработки данных в аналитической среде «Дедуктор» (Loginom).

На рис. 1. представлено входное окно среды аналитической обработки «Дедуктор», где слева в окне изображен сценарий обработки данных, справа изображена таблица данных эксперимента, столбцы 2–7 являются входными переменными, столбцы 8–14 — выходные переменные.

Последовательно применяя режимы настройки исходных данных нейронной сети: параметры структурной сети, настройка процесса обучения, настройка параметров остановки процесса обучения, режима обучения сети, запуск процесса обучения, получаем таблицу результатов работы сетевой модели. Отметим, что максимальные достигнутые погрешности имеют порядок 10^{-2} . В тексте погрешности не приводятся.

Важно заметить, что линейная регрессия с использованием режима нейросети «что если» позволяет оценить реакцию модели на различные комбинации входных данных.

Произведено сравнение экспериментальных данных и результатов прогноза нейронной модели для каждой выходной переменной с граничной оценкой 0,015. Графики сравнения экспериментальных данных и результатов прогноза модели представлены последовательно, начиная с выходной переменной 8 (рис. 2) до переменной 14 (рис. 8).

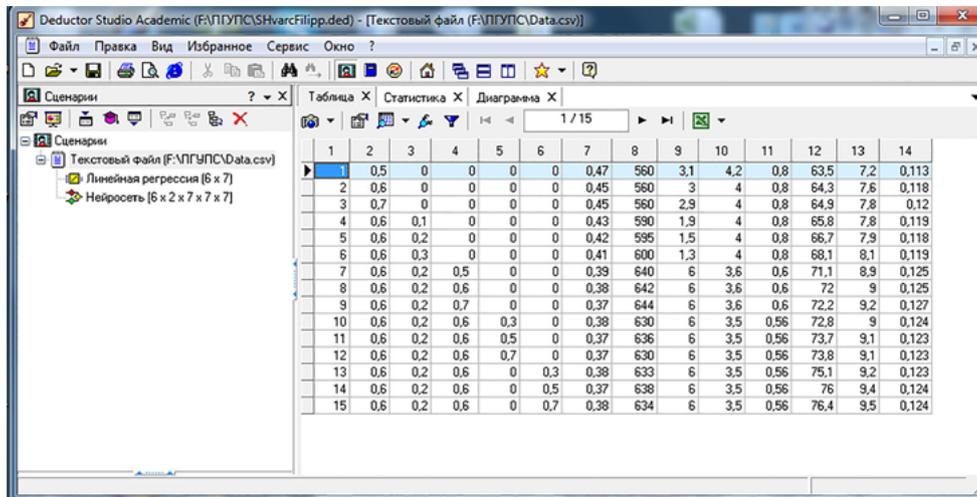


Рис. 1. Входное окно среды аналитической обработки «Дедуктор»

Таблица 3. Результаты работы сетевой модели

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	8 OUT	9 OUT	10 OUT	11 OUT	12 OUT	13 OUT	14 OUT
1	0,5	0	0	0	0	0,47	560	3,1	4,2	0,8	63,5	7,2	0,113	560	3,2	4,2	0,8	63,5	7,2	0,113
2	0,6	0	0	0	0	0,45	560	3	4	0,8	64,3	7,6	0,119	566	2,9	4	0,9	64,4	7,6	0,116
3	0,7	0	0	0	0	0,45	560	2,9	4	0,8	64,9	7,9	0,12	560	3,0	4	0,9	64,9	7,9	0,120
4	0,6	0,1	0	0	0	0,43	590	1,9	4	0,8	65,8	7,9	0,119	593	2,1	4	0,9	65,9	7,9	0,119
5	0,6	0,2	0	0	0	0,42	595	1,5	4	0,8	66,7	7,9	0,119	593	1,7	4	0,9	67	9	0,119
6	0,6	0,3	0	0	0	0,41	600	1,3	4	0,8	68,1	6,1	0,119	604	1,4	4	0,79	69,2	9,1	0,119
7	0,6	0,2	0,5	0	0	0,39	640	6	3,6	0,6	71,1	6,9	0,125	630	5,3	3,7	0,63	71,1	9,9	0,124
8	0,6	0,2	0,6	0	0	0,38	642	6	3,6	0,6	72	9	0,125	640	5,9	3,6	0,6	72	9	0,125
8	0,6	0,2	0,7	0	0	0,37	644	6	3,6	0,6	72,2	9,2	0,127	650	6,5	3,5	0,57	72,9	9,2	0,127
10	0,6	0,2	0,6	0,3	0	0,38	630	6	3,5	0,56	72,8	9	0,124	633	6,1	3,6	0,57	72,7	9	0,124
11	0,6	0,2	0,6	0,5	0	0,37	636	6	3,5	0,56	73,7	9,1	0,123	634	5,9	3,5	0,57	73,5	9,1	0,124
12	0,6	0,2	0,6	0,7	0	0,37	630	6	3,5	0,56	73,8	9,1	0,123	630	6	3,5	0,55	74	9,1	0,123
13	0,6	0,2	0,6	0	0,3	0,38	633	6	3,5	0,56	75,1	9,2	0,123	636	6	3,5	0,59	74,1	9,2	0,124
14	0,6	0,2	0,6	0	0,5	0,37	638	6	3,5	0,56	76	9,4	0,124	640	5,8	3,5	0,57	75,9	9,4	0,124
15	0,6	0,2	0,6	0	0,7	0,38	634	6	3,5	0,56	76,4	9,5	0,124	631	6,1	3,5	0,55	77	9,5	0,123

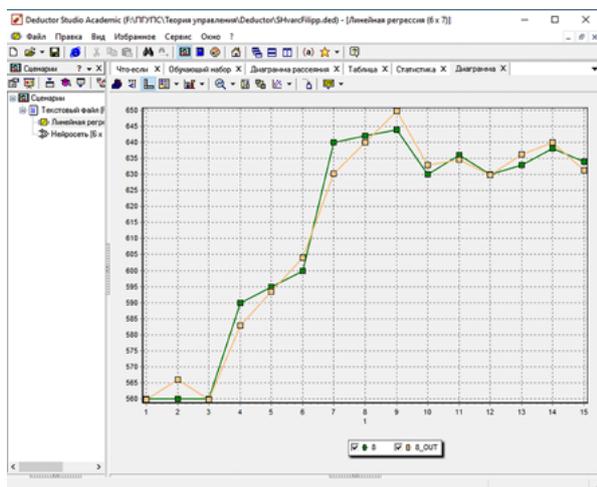


Рис. 2. Выход 8

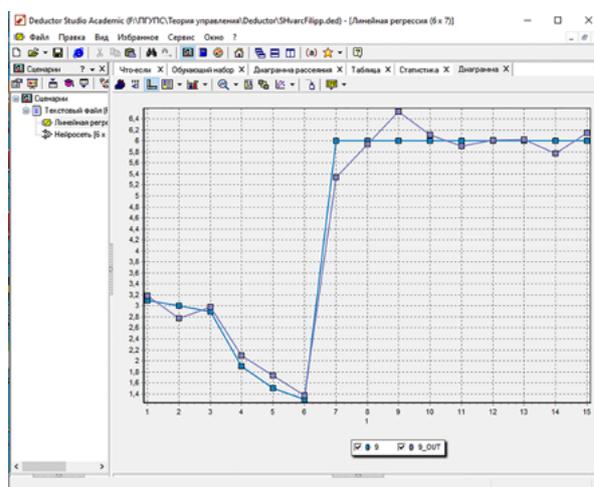


Рис. 3. Выход 9

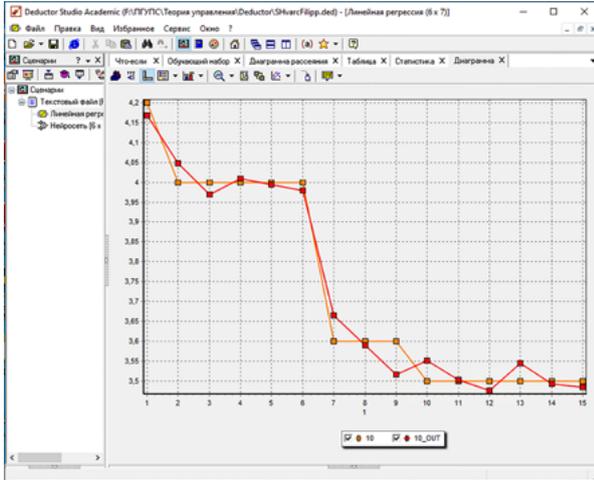


Рис. 4. Выход 10

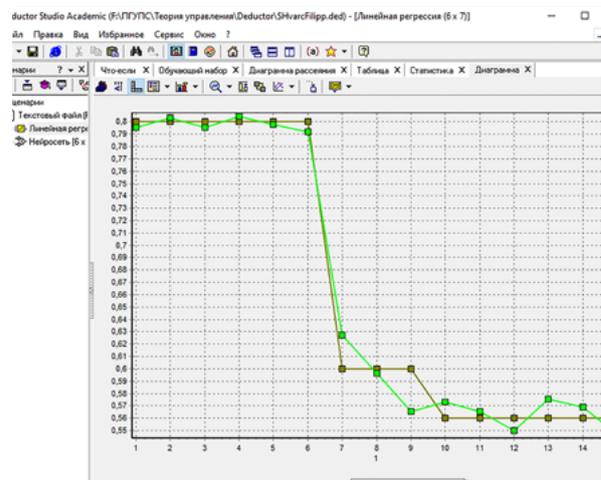


Рис. 5. Выход 11

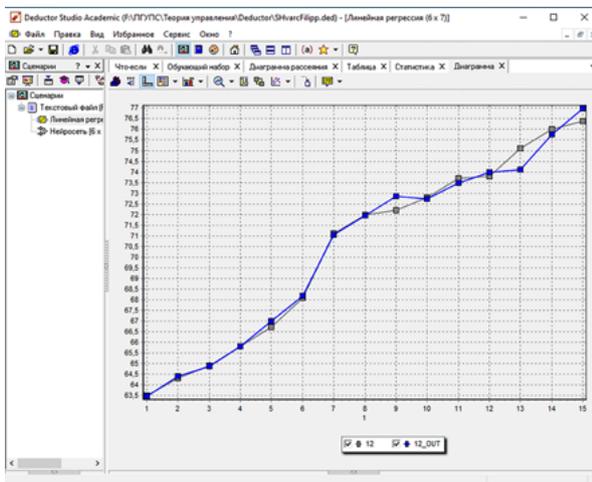


Рис. 6. Выход 12

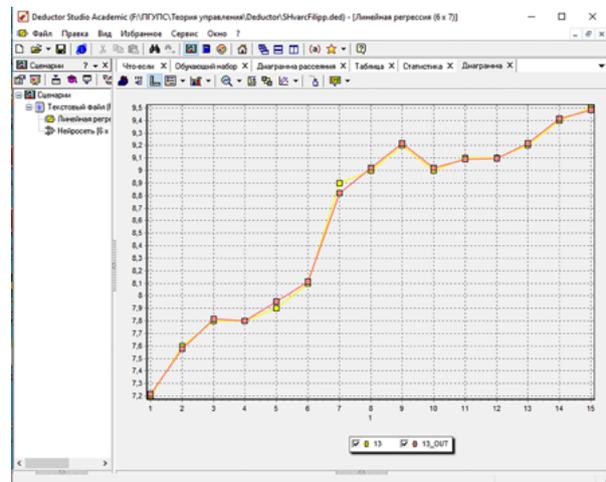


Рис. 7. Выход 13

Выводы

1. Результаты полученной нейронной модели хорошо согласуются с результатами физических экспериментов.

2. Предложенный способ моделирования может быть применен при синтезе различных композитных материалов.

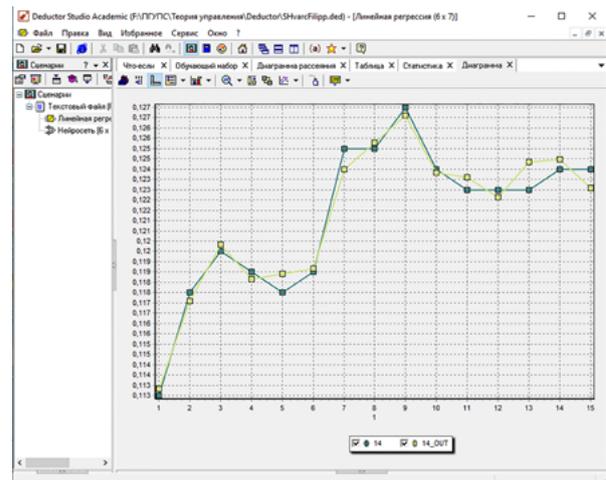


Рис. 8. Выход 14

Библиографический список

1. Калашников В. И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего / В. И. Калашников // Строительные материалы. — 2016. — № 1/2. — С. 96–103.

2. Белов В. В. Теоретическое обоснование оптимальных зерновых составов композиционных материалов с минеральными наполнителями / В. В. Белов, П. В. Куляев // Строительство и реконструкция. — 2017. — № 5(73). — С. 94–101.

3. Резаев Р. О. Применение комплексного подхода к оптимизации производственных составов на примере товарного бетона / Р. О. Резаев, А. А. Дмитриев, Н. А. Бородуля и др. // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие Смеси. — 2021. — № 2(63). — С. 42–55.

4. Низина Т. А. Построение экспериментально-статистических моделей «состав — свойство» физико-механических характеристик модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов / Т. А. Низина, А. С. Балыков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2016. — С. 54–66.

5. Низина Т. А. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов / Т. А. Низина, А. С. Балыков // Инженерно-строительный журнал. — 2016. — № 2. — С. 13–24.

6. Низина Т. А. Применение моделей «состав — свойство» для исследования свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов / Т. А. Низина, А. С. Балыков, Л. В. Макарова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 12. — С. 15–21.

7. Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетона / Л. И. Дворкин. — 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. дисс. ... д-ра техн. наук / В. А. Вознесенский. — М., 1970. — 44 с.

9. Вознесенский В. А. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, А. Д. Довгань // Современное промышленное и гражданское строительство. — 2007. — Т. 3. — № 1. — С. 5–15.

10. Комохов П. Г. Структура и свойства цементного камня с позиции компьютерного материаловедения / П. Г. Комохов, А. М. Харитонов // Academia. Архитектура и строительство. — 2007. — № 4. — С. 63–66.

11. Комохов П. Г. Имитационно-численная модель структуры и свойств цементного камня / П. Г. Комохов, А. М. Харитонов // Известия вузов. Строительство. — 2008. — № 4(592). — С. 10–16.

Дата поступления: 04.10.2023

Решение о публикации: 21.11.2023

Контактная информация:

ХОДАКОВСКИЙ Валентин Аветикович — д-р техн. наук, проф.

ШВАРЦ Михаил Александрович — канд. техн. наук, доц.; shvarts4545@mail.ru

ШВАРЦ Филипп Михайлович — аспирант; films@mail.ru

Designing the Composition of High-Strength Self-Compacting Concrete Using Neural Network

V. A. Khodakovsky, M. A. Shvarts, F. M. Shvarts

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Khodakovsky V. A., Shvarts M. A., Shvarts F. M. Designing the Composition of High-Strength Self-Compacting Concrete Using Neural Network // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 860–867. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-860-867

Summary

Purpose: To extend the possibility of interpreting the results of a limited number of physical experiments while selecting the components for the creation of concrete mixes and concrete on its basis with the required output properties. **Methods:** Using a neural network in the analytical environment Loginom, a model with six input variables representing introduced special additives and seven output variables representing the quality parameters of the concrete mix and concrete has been built. **Results:** In the process of training a three-layer network model has been formed, with the help of which the predicted output characteristics of concrete mix and concrete have been obtained. Experimental data and neural model prediction for each output variable have been compared in a clear graphical form. **Practical significance:** Prediction of the required characteristics of the synthesized material by means of the neural model response to various combinations of input data allows to carry out an optimal number of physical experiments. It is possible to apply the proposed modeling method for various multicomponent materials.

Keywords: Neural network, multiple regression, concrete mix, numerical experiment, physical experiment.

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]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials]. 2016, Iss. 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]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction]. 2017, Iss. 5(73), pp. 94–101. (In Russian)
3. Rezaev R. O., Dmitriev A. A., Borodulya N. A. et al. *Primenenie kompleksnogo podhoda k optimizatsii proizvodstvennyh sostavov na primere tovarnogo betona* [Application of an integrated approach to optimization of production compositions on the example of ready-mixed concrete]. *ALITinform: Tsement. Beton. Sukhie Smesi* [ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes]. 2021, Iss. 2(63), pp. 42–55. (In Russian)
4. Nizina T. A., Balykov A. S. *Postroenie eksperimentalno-statisticheskikh modelej "sostav — svojstvo" fiziko-mekhanicheskikh harakteristik modifitsirovannyh dispersno-armirovannyh melkozernistykh betonov* [Construction of experimental and statistical models "composition — property" of physical and mechanical characteristics of modified dispersed-reinforced fine-grained concrete]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture]. 2016, pp. 54–66. (In Russian)

5. Nizina T. A., Balykov A. S. Eksperimental'no-statisticheskie modeli svoystv modificirovannykh dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov [Experimental and statistical models of the properties of modified dispersed-reinforced fine-grained concrete]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Construction Engineering Journal]. 2016, Iss. 2, pp. 13–24. (In Russian)
6. Nizina T. A., Balykov A. S., Makarova L. V. Primenenie modelej “sostav — svoystvo” dlya issledovaniya svoystv modificirovannykh dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov [application of “composition-property” models to study the properties of modified dispersed-reinforced fine-grained concrete]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after. V. G. Shukhova]. 2016, Iss. 12, pp. 15–21. (In Russian)
7. Dvorkin L. I. *Optimalnoe proektirovanie sostavov betona* [Optimal design of concrete compositions]. Lvov: Visha shkola Publ., 1981, 159 p. (In Russian)
8. Voznesenskij V. A. *Statisticheskie resheniya v zadachah analiza i optimizacii kachestva stroitelnykh 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, 1970, 44 p. (In Russian)
9. Voznesenskij V. A., Lyashenko T. V., Dovgan A. D. Kompromissnaya mnogofaktornaya optimizaciya garantirovannogo kachestva shlakoshelochnykh vyazhushih [Compromise multifactor optimization of guaranteed quality of slag-alkali binders]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Modern industrial and civil construction]. 2007, vol. 3, Iss. 1, pp. 5–15. (In Russian)
10. Komohov P. G., Haritonov AM. Struktura i svoystva cementnogo kamnya s pozicii kompyuternogo materialovedeniya [Structure and properties of cement stone from the perspective of computer materials science]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and construction]. 2007, Iss. 4, pp. 63–66. (In Russian)
11. Komohov P. G., Haritonov A. M. Imitacionno-chislennaya model struktury i svoystv cementnogo kamnya [Simulation-numerical model of the structure and properties of cement stone]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News from universities. Construction]. 2008, Iss. 4(592), pp. 10–16. (In Russian)

Received: October 04, 2023

Accepted: November 21, 2023

Author's information:

Valentin A. KHODAKOVSKY — Dr. Sci. in Engineering, Professor

Mikhail A. SHVARTS — PhD in Engineering, Associate Professor; shvarts4545@mail.ru

Philipp M. SHVARTS — Postgraduate Student; films@mail.ru