ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ/HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ БЕТОНОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК

Научная статья

Вишторский Е.М.[1], Белов И.В.[2,] *, Ткачев А.А.[3]
[1] ORCID : 0000-0001-9158-6884;
[2] ORCID : 0000-0003-0901-8357;
[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва,
[2, 3] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (bivik.1995[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье рассмотрен трехфакторный математический планируемый эксперимент. При вычислении зависимости от переменных факторов (X_1; X_2; X_3) для прочности при сжатии цементного камня в 28 суток использовался программный комплекс "PlanExp B-D13". Определены максимальные прочностные показатели полученных гидротехнических бетонов. Выполнена графическая интерпретация уравнения регрессии от действующих факторов. Значимость коэффициентов уравнений математической модели проверялась при помощи критерия Стьюдента. Адекватность уравнения математической модели проверялась с помощью критерия Фишера. Приемлемые значения варьируемых факторов определялись при помощи компромиссных значений с помощью анализа графических интерпретации уравнения регрессии, которое характеризует изменение значений предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток.

Целью работы является оптимизация показателей прочности при сжатии гидротехнического бетона, модифицированного микрокремнеземом, с использованием добавки сульфоферритного типа.

Ключевые слова: гидротехнический бетон, экспериментально-статистическая модель, модифицирующая добавка, уравнение регрессии, прочность, оптимизация, планированный эксперимент.

EXPERIMENTAL AND STATISTICAL MODEL OF CHANGES IN THE STRENGTH OF HYDRAULIC ENGINEERING CONCRETES USING COMPLEX MODIFYING ADDITIVES

Research article

Vishtorsky E.M.[1], Belov I.V.[2,] *, Tkachev A.A.[3]
[1] ORCID : 0000-0001-9158-6884;
[2] ORCID : 0000-0003-0901-8357;
[1] National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow,
[2, 3] Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (bivik.1995[at]yandex.ru)

Abstract

The article considers a three-factor mathematical planned experiment. When calculating the dependence on variable factors (X_1; X_2; X_3) for the compressive strength of cement stone in 28 days, the "PlanExp B-D13" software package was used. The maximum strength parameters of the obtained hydraulic engineering concretes are determined. A graphical interpretation of the regression equation from the acting factors is performed. The significance of the coefficients of the equations of the mathematical model was checked using the Student's criterion. The adequacy of the equation of the mathematical model was checked using the Fisher criterion. Acceptable values of the variable factors were determined using compromise values by analyzing graphical interpretations of the regression equation, which characterizes the change in values of compressive strength at the age of 28 days.

The aim of the work is to optimise the compressive strength performance of hydraulic engineering concrete modified with microsilica using sulphoferritic type admixture.

Keywords: hydraulic engineering concrete, experimental statistical model, modifying additive, regression equation, strength, optimization, planned experiment.

Введение

Использование современных вычислительных математических программных комплексов в области анализа данных и построения регрессионных моделей позволяет оптимизировать процесс исследования и минимизировать затраты материальных и временных ресурсов, открывать возможности для автоматизации расчётов, обработки больших объёмов данных, строить различные типы регрессионных моделей, оценивать их качества, прогнозировать результаты и визуализировать полученные данные [1], [2], [3], [4]. Применение программных комплексов позволяет сократить материальные затраты на проведение экспериментов, уменьшить временные затраты на обработку данных,

повысить точность результатов и упростить процесс анализа и интерпретации данных, что критически важно при работе со сложными системами, где необходимо учитывать множество переменных и проводить комплексный анализ для получения достоверных результатов [5].

При оптимизации физико-механических параметров тяжелых гидротехнических бетонов используют определенные математические подходы, которые условно подразделяются на несколько групп:

1) вероятно-статистические методы, включающие использование общей теории вероятности, описательной статистики, выборочного метода и проверку статистических гипотез, дисперсного и регрессионного анализа, математической теории экспериментов и т.д. [6];

2) методы исследования операций, которые включают линейное, нелинейное и динамическое программирование, теорию игр, теорию массового обслуживания, теорию графов и сетей и т.п. [7], [8];

3) методы математического анализа, включающие дифференциальное, интегральное и векторное исчисление, дифференциальные уравнения, в том числе уравнения математической физики, используемые для составления и расчета математических моделей на основе определенных предпосылок о физикохимии исследуемых процессов [9];

4) использование искусственного интеллекта [10], [11], [12].

В работе использовался трехфакторный планированный эксперимент [13]. В качестве программно-алгоритмического средства обработки данных принят "PlanExp B-D13" [14]. Данная программа обладает алгоритмом расчета, который включает в себя основные процедуры [15], [16], [17]:

1) расчет коэффициентов функции отклика;

2) статистической обработка уравнений математической модели.

Основные вычисления, приведенные в работе, рассчитываются циклично, что может позволить перестроить уравнение математической модели моментально, при изменении параметров входных данных [18], [19], [20].

Целью работы является оптимизация показателей прочности при сжатии гидротехнического бетона, модифицированного микрокремнеземом, с использованием добавки сульфоферритного типа.

Основные результаты

В качестве участвующих в планировании эксперимента переменных факторов на 1 $м^3$ тяжелого гидротехнического бетона принимаем:

• X_1 — портландцемент типа ЦЕМ I 42,5Н, выпускаемый АО «ЛИПЕЦКЦЕМЕНТ», кг.;

• X_2 — 10% микрокремнезем МК-85+ добавка сульфоферритного типа (изменяется от 12,5 до 17,5%) от массы портландцемента;

• X_3 — количество суперпластификатора для бетона BASF MasterGlenium ACE 430 – % от массы портландцемента;

Выходным параметром при планировании эксперимента выбран:

• Y_1 — прочность на сжатие при выдерживании в нормальных условиях твердения в возрасте 28 суток, МПа.

Для получения результатов графической интерпретации использовался программный комплекс "Microsoft Excel".

В таблице 1 представлены факторы и интервалы их варьирования.

Таблица 1 - Факторы и интервалы их варьирования

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.2.1

Фактор	Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)	Интервал варьирования	Наименование фактора
X_1:	185	240	295	55	Портландцемент типа ЦЕМ I 42,5Н, кг.
X_2:	22,5	25	27,5	2,5	10% микрокремнезем МК-85+ добавка сульфоферритного типа (изменяется от 12,5 до 17,5 %) от массы ПЦ
X_3:	1	1,5	2	0,5	BASF MasterGlenium ACE 430, % от $m_ц$

В таблице 2 план эксперимента и выходные параметры опытов.

Таблица 2 - План эксперимента и выходные параметры опытов

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.2.2

Номер опыта (u)	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Выходной параметр (Прочность в 28 суток, МПа)		
	X_1	X_2	X_3	Портландцемент типа ЦЕМ I 42,5Н, кг	10% микрокремнезем МК-85 + добавка сульфоферритного типа (изменяется от 12,5 до 17,5 %) от $m_ц$	BASF Master Gleniu m ACE 430, % от $m_ц$	y(u, 1)	y(u, 2)	y(u, 3)
1	-1	-1	-1	185	22,5	1	56,1	45,8	47,6
2	+1	-1	-1	295	22,5	1	40,0	43,1	53,5
3	-1	+1	-1	185	27,5	1	46,7	43,8	61,7
4	-1	-1	+1	185	22,5	2	52,8	61,6	57,0
5	-1	0,19	0,19	185	25,5	1,6	65,3	64,9	64,6
6	0,19	-1	0,19	250,5	22,5	1,6	55,0	48,7	58,0
7	0,19	0,19	-1	250,5	25,5	1	51,9	53,2	60,1
8	-0,29	+1	+1	224,1	27,5	2	49,6	53,7	52,2
9	+1	-0,29	+1	295	24,3	2	62,6	68,5	59,5
10	+1	+1	-0,29	295	27,5	1,4	52,9	46,3	54,3

Коэффициенты уравнения математической модели представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Коэффициенты уравнения математической модели

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.2.3

	b0	b1	b2	b3	b11	b12	b13	b22	b23	b33
$R_{сж.28}$	61,914	-1,447	-0,75	3,326	1,677	-0,099	0,796	-9,371	-1,113	-2,89

Значимость коэффициентов уравнений математической модели проверяется при помощи критерия Стьюдента (табл. 4). Адекватность уравнения математической модели проверяется по критерию Фишера.

Таблица 4 - Критерии Стьюдента и значимость коэффициентов математической модели

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.2.4

	b0	b1	b2	b3	b11	b12	b13	b22	b23	b33
t-критерий	12,616	0,689	0,357	1,583	0,413	0,04	0,318	2,308	0,444	0,712
Значимость	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Примечание: 1/0 – значимый/незначимый

Дисперсия адекватности математической модели: 54,188.
Число степеней свободы при значимых коэффициентах: 8.
Табличное значение критерия Фишера: 2,45.
Расчетное значение критерия Фишера: 1,95.
Зависимость от переменных факторов (X_1; X_2; X_3) для прочности при сжатии цементного камня в 28 суток:

$$Y_1\,(R_{сж.28}) = 61,914 - 1,447 \cdot X_1 - 0,75 \cdot X_2 + 3,326 \cdot X_3 + \\ +1,677 \cdot X_1^2 - 0,371 \cdot X_2^2 - 2,89 \cdot X_3^2 - 0,099 \cdot X_1 \cdot X_2 + \\ +0,796 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,113 \cdot X_2 \cdot X_3 \qquad (1)$$

Зависимость переменных факторов для прочности показывает, что присутствие знаков «минус» при факторах X_1; X_2 и X_3 приводит к понижению прочности гидротехнического бетона. Положительная зависимость факторов X_1 и X_3 показывает повышение прочности при сжатии с единовременным увеличением вводимого суперпластификатора "BASF MasterGlenium ACE 430", что приводит к увеличению прочности гидротехнического бетона при сжатии.

В связи с тем, что для графической интерпретации функции трех переменных требуется четырехмерное пространство, поэтому для упрощения работы, а также удобством в будущем с уравнениями регрессии, функцию трех переменных требуется перевести в функцию двух переменных, при этом каждый раз принимая в виде константы один из используемых факторов. Основываясь на результатах уравнения регрессии для прочности при сжатии на 28-й день выдержки образцов в нормальных условиях, с использованием программного обеспечения "Microsoft Excel" были созданы графические представления уравнения регрессии, отражающего взаимосвязь между пределом прочности при сжатии и возрастом образцов (рис. 1–3). Каждый фактор, участвующий в построении графиков, фиксировался на нулевом уровне. Приемлемые значения варьируемых факторов определялись при помощи поиска компромиссных значений с помощью анализа графических интерпретации уравнения регрессии, характеризующего изменение предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток.

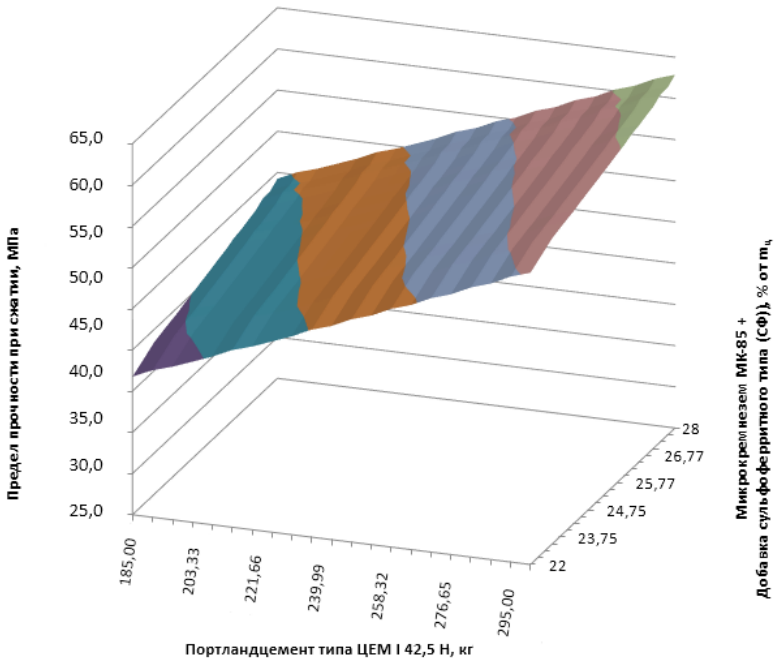

Рисунок 1 - Графическая интерпретация уравнения регрессии, характеризующего изменение предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток от действующих факторов *(X_1; X_2)*
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.2.5

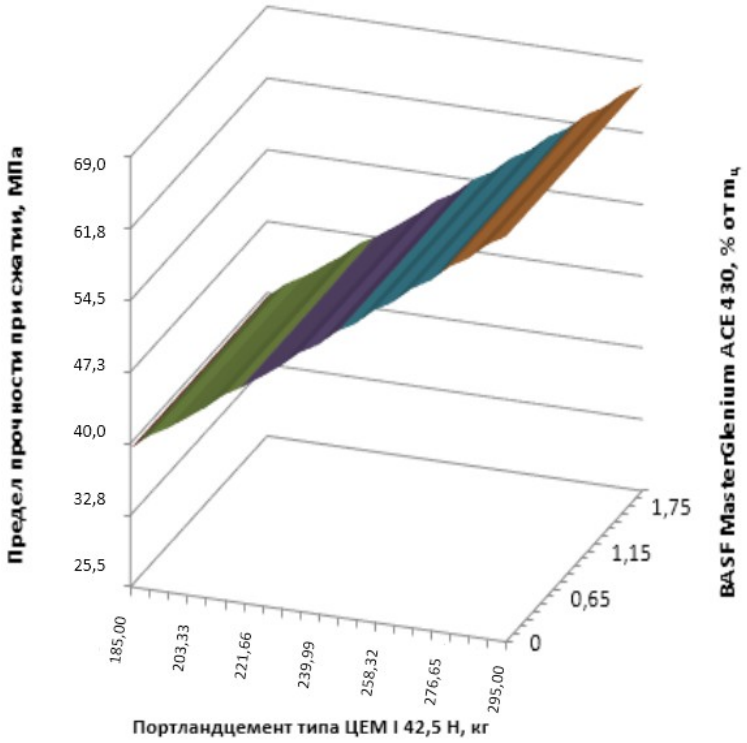

Рисунок 2 - Графическая интерпретация уравнения регрессии, характеризующего изменение предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток от действующих факторов *(X_1, X_3)*
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.2.6

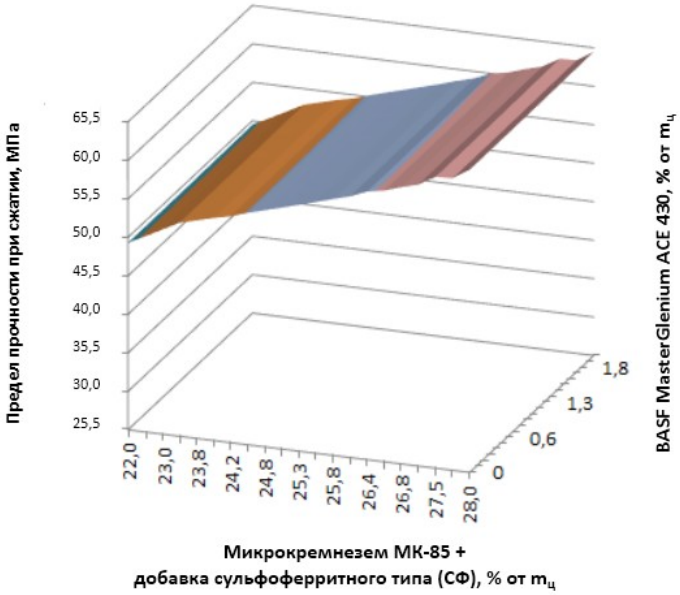

Рисунок 3 - Графическая интерпретация уравнения регрессии, характеризующего изменение предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток от действующих факторов *(X_2; X_3)*
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.2.7

Заключение

По результатам проведенного математического планированного эксперимента, установлено, что требуемые показатели предела прочности при сжатии гидротехнических бетонов достигаются с использованием портландцемента типа ЦЕМ I 42,5Н в количестве 240 кг., 10% микрокремнезем МК-85 + добавка сульфоферритного типа 11% от массы портландцемента, суперпластификатора "BASF MasterGlenium ACE 430" 1,5% от массы цемента.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Вишторский Е.М. Исследование текучести цементного теста для гидротехнического бетона при модифицировании суперпластификаторами / Е.М. Вишторский, И.В. Белов, А.А. Ткачев // Бетон и железобетон. — 2024. — № 5 (624). — С. 45–52. — DOI: https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-45-52.

2. Ординарцева Н.П. Планирование эксперимента в измерениях / Н.П. Ординарцева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2013. — № 3. — С. 72–76.

3. Жарницкий В.Я. Обоснование математической модели многослойного сдвигового течения бетонной смеси по наклонной поверхности откоса канала / В.Я. Жарницкий, П.А. Корниенко, А.П. Смирнов // Природообустройство. — 2022. — № 4. — С. 57–62. — DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-57-62.

4. Конопацкий Е.В. Некоторые вопросы математического и компьютерного моделирования в строительстве / Е.В. Конопацкий // Информатика и кибернетика. — 2016. — № 2 (4). — С. 37–42.

5. Конопацкий Е.В. Некоторые вопросы математического и компьютерного моделирования в строительстве / Е.В. Конопацкий // Информатика и кибернетика. — 2016. — № 2 (4). — С. 37–42.

6. Орехов В.В. Математическое моделирование изменения гидрогеологического режима территории в результате строительства подземного комплекса / В.В. Орехов, С.Н. Хохотва, Г.В. Алексеев // Вестник МГСУ. — 2016. — № 4. — С. 52–61.

7. Орехов В.В. Гидрогеологическая модель территории гидроузла Коусар / В.В. Орехов, С.Н. Хохотва // Вестник МГСУ. — 2015. — № 3. — С. 59–68.

8. Борделяну Г.В. Экспериментально-статистические исследования деформаций ползучести заводского бетона с построением математических моделей второго порядка для их вычисления и прогнозирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Г.В. Борделяну. — Кишинев, 1974. — 23 с.

9. Жуков А.Д. Практикум по технологическому моделированию : учебное пособие / А.Д. Жуков, Т.В. Смирнова, П.К. Гудков. — Москва : Московский государственный строительный университет, 2014. — 168 с.

10. Корниенко П.А. Об учете массовых сил в расчетах плоско-параллельного слоя бетонной смеси на наклонном грунтовом массиве / П.А. Корниенко, А.Г. Прозоровский, П.Ф. Сабодаш // Материалы научно-технической конференции, 18–21 апреля 2000 г. — Москва : Московский государственный университет природообустройства, 2000. — С. 93–94.

11. Сокольников В.В. Математическая постановка задачи моделирования поточной организации работ в строительстве / В.В. Сокольников // Вестник МГСУ. — 2020. — Т. 15. — № 3. — С. 443–451. — DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.443-451.

12. Мелехин В.Б. Математическое моделирование процесса проблемно-целевого планирования и ситуационного управления проектами в гидроэнергетическом строительстве / В.Б. Мелехин, Т.Г. Гамзатов // Научное обозрение. — 2014. — № 8–1. — С. 121–127.

13. Жарницкий В.Я. Экспериментально-теоретическое обоснование метода оценки трещиностойкости и расстояния между усадочными швами бетонных облицовок водохозяйственных каналов / В.Я. Жарницкий, А.П. Смирнов, Е.В. Андреев // Природообустройство. — 2022. — № 2. — С. 63–68. — DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-63-68.

14. Бибик М.С. Влияние состава легкого бетона на смешанном вяжущем и отходах деревообработки на его прочность и плотность / М.С. Бибик, И.И. Тулупов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки. Строительство. — 2007. — № 6. — С. 92–100.

15. Шаинян Г.А. Рациональное размещение прямых отвесов в бетонных плотинах / Г.А. Шаинян // Вестник МГСУ. — 2019. — Т. 14. — № 6 (129). — С. 713–721. — DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.713-721.

16. Bukayev Y.Z. A new technology for manufacturing polymer-cement composition from limestone-shell mining waste / Y.Z. Bukayev, A.Z. Bukayeva, G.K. Mutalibova // Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Respubliki Kazakhstan. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk [News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences]. — 2022. — Vol. 2. — № 452. — P. 73–88. — DOI: 10.32014/2022.2518-170X.161.

17. Григорьева Д.Э. Использование 3D-моделирования в гидротехническом строительстве / Д.Э. Григорьева, Н.А. Николаева // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : материалы Шестой национальной (всероссийской) научно-технической конференции. — Петропавловск-Камчатский : Камчатский государственный технический университет, 2024. — С. 95–98.

18. The effect of complex additives used in the preparation of concrete structures used in hydraulic engineering construction / M.S. Egamberdiev, M.A. Sodiqov, N. Idiev [et al.] // Tochnaya nauka [Exact Science]. — 2019. — № 50. — P. 38–40.

19. Антохина Ю.А. Искусственный интеллект. Инноватика : учебное пособие / Ю.А. Антохина, М.Л. Кричевский, Ю.А. Мартынова [и др.]. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. — 320 с.

20. Баланов А.Н. Искусственный интеллект. Понимание, применение и перспективы : учебник для вузов / А.Н. Баланов. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 312 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Vishtorsky E.M. Issledovanie tekuchesti cementnogo testa dlja gidrotehnicheskogo betona pri modificirovanii superplastifikatorami [Researching of cement paste fluidity for hydraulic concrete with superplasticizers modification] / E.M. Vishtorsky, I.V. Belov, A.A. Tkachev // Beton i zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]. — 2024. — № 5 (624). — P. 45–52. — DOI: https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-45-52. [in Russian]

2. Ordinartseva N.P. Planirovanie eksperimenta v izmerenijah [Design of the experiments in measurements] / N.P. Ordinartseva // Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov [Industrial Laboratory. Materials Diagnostics]. — 2013. — № 3. — P. 72–76. [in Russian]

3. Zharnitskiy V.Ya. Obosnovanie matematicheskoj modeli mnogoslojnogo sdvigovogo techenija betonnoj smesi po naklonnoj poverhnosti otkosa kanala [Substantiation of the mathematical model of multilayer shear flow of concrete mixture along the inclined surface of the channel slope] / V.Ya. Zharnitskiy, P.A. Kornienko, A.P. Smirnov // Prirodoobustrojstvo [Environmental Engineering]. — 2022. — № 4. — P. 57–62. — DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-57-62. [in Russian]

4. Bajenov U.M. Nekotorye voprosy matematicheskogo i komp'yuternogo modelirovaniya v stroitel'stve [Fine-aggregate concrete have modified by the complex microdisperse additive] / U.M. Bajenov, N.P. Lukutcova, E.G. Karpikov // Informatika i kibernetika [Bulletin of Moscow State Building University]. — 2013. — № 2. — P. 94–100. [in Russian]

5. Konopatskiy E.V. Nekotorye voprosy matematicheskogo i komp'juternogo modelirovanija v stroitel'stve [Some questions of mathematical and computer modeling in building] / E.V. Konopatskiy // Informatika i kibernetika [Informatics and Cybernetics]. — 2016. — № 2 (4). — P. 37–42. [in Russian]

6. Orekhov V.V. Matematicheskoe modelirovanie izmenenija gidrogeologicheskogo rezhima territorii v rezul'tate stroitel'stva podzemnogo kompleksa [Mathematical simulation of the change in hydrogeological mode of the territories resulting from the construction of an underground complex] / V.V. Orekhov, S.N. Khokhotva, G.V. Alekseev // Vestnik MGSU. — 2016. — № 4. — P. 52–61. [in Russian]

7. Orekhov V.V. Gidrogeologicheskaja model' territorii gidrouzla Kousar [Hydrogeological model of the territory of kowsar hydraulic project] / V.V. Orekhov, S.N. Khokhotva // Vestnik MGSU. — 2015. — № 3. — P. 59–68. [in Russian]

8. Bordelyanu G.V. Jeksperimental'no-statisticheskie issledovanija deformacij polzuchesti zavodskogo betona s postroeniem matematicheskih modelej vtorogo porjadka dlja ih vychislenija i prognozirovanija [Experimental-statistical studies of creep deformations of factory concrete with construction of second-order mathematical models for their calculation and prediction] : abst. of dis. ... of PhD in Engineering : 05.23.01 / G.V. Bordelyanu. — Chisinau, 1974. — 23 p. [in Russian]

9. Zhukov A.D. Praktikum po tehnologicheskomu modelirovaniju [Workshop on technological modeling] : textbook / A.D. Zhukov, T.V. Smirnova, P.K. Gudkov. — Moscow : Moscow State University of Civil Engineering, 2014. — 168 p. [in Russian]

10. Kornienko P.A. Ob uchete massovyh sil v raschetah plosko-parallel'nogo sloja betonnoj smesi na naklonnom gruntovom massive [On accounting of mass forces in calculations of plane-parallel layer of concrete mixture on inclined soil mass] / P.A. Kornienko, A.G. Prozorovskiy, P.F. Sabodash // Materialy nauchno-tehnicheskoj konferencii, 18–21 aprelja 2000 g. [Proceedings of the Scientific and Technical Conference, April 18–21, 2000]. — Moscow : Moscow State University of Environmental Engineering, 2000. — P. 93–94. [in Russian]

11. Sokolnikov V.V. Matematicheskaya postanovka zadachi modelirovaniya potochnoy organizatsii rabot v stroitelstve [Mathematical formulation of the problem of modeling the flow organization of works in construction] / V.V. Sokolnikov // Vestnik MGSU. — 2020. — Vol. 15. — № 3. — P. 443–451. — DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.443-451. [in Russian]

12. Melekhin V.B. Matematicheskoe modelirovanie protsessa problemno-tselevogo planirovaniya i situatsionnogo upravleniya proektami v gidroenergeticheskom stroitelstve [Mathematical modeling of the process of problem-target planning and situational management of projects in hydroelectric construction] / V.B. Melekhin, T.G. Gamzatov // Nauchnoe obozrenie [Scientific Review]. — 2014. — № 8–1. — P. 121–127. [in Russian]

13. Zharnitsky V.Ya. Eksperimentalno-teoreticheskoe obosnovanie metoda otsenki treschinostoykosti i rasstoyaniya mezhdu usadochnymi shvami betonnykh oblitsovok vodokhozyaystvennykh kanalov [Experimental and theoretical substantiation of the method for assessing crack resistance and distance between shrink joints of concrete linings of water management canals] / V.Ya. Zharnitsky, A.P. Smirnov, E.V. Andreev // Prirodoustroystvo [Land Reclamation]. — 2022. — № 2. — P. 63–68. — DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-63-68. [in Russian]

14. Bibik M.S. Vliyanie sostava legkogo betona na smeshannom vyazhushchem i otkhodakh derevoobrabotki na ego prochnost i plotnost [Influence of the Composition of Lightweight Concrete on Mixed Binder and Woodworking Waste on Its Strength and Density] / M.S. Bibik, I.I. Tulupov // Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B: Prikladnye nauki. Stroitelstvo [Bulletin of Polotsk State University. Series B: Applied Sciences. Construction]. — 2007. — № 6. — P. 92–100. [in Russian]

15. Shainyan G.A. Ratsionalnoe razmeshchenie pryamykh otvesov v betonnykh plotinakh [Rational arrangement of direct plummets in concrete dams] / G.A. Shainyan // Vestnik MGSU. — 2019. — Vol. 14. — № 6 (129). — P. 713–721. — DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.713-721. [in Russian]

16. Bukayev Y.Z. A new technology for manufacturing polymer-cement composition from limestone-shell mining waste / Y.Z. Bukayev, A.Z. Bukayeva, G.K. Mutalibova // Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Respubliki Kazakhstan. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk [News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences]. — 2022. — Vol. 2. — № 452. — P. 73–88. — DOI: 10.32014/2022.2518-170X.161.

17. Grigorieva D.E. Ispolzovanie 3D-modelirovaniya v gidrotekhnicheskom stroitelstve [The use of 3D modeling in hydraulic engineering] / D.E. Grigorieva, N.A. Nikolaeva // Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i

puti razvitiya [Technical operation of water transport: problems and development paths] : proceedings of the Sixth National (All-Russian) Scientific and Technical Conference. — Petropavlovsk-Kamchatsky : Kamchatka State Technical University, 2024. — P. 95–98. [in Russian]

18. The effect of complex additives used in the preparation of concrete structures used in hydraulic engineering construction / M.S. Egamberdiev, M.A. Sodiqov, N. Idiev [et al.] // Tochnaya nauka [Exact Science]. — 2019. — № 50. — P. 38–40.

19. Antokhina Yu.A. Iskusstvennyi intellekt. Innovatika [Artificial Intelligence. Innovation] : textbook / Yu.A. Antokhina, M.L. Krichevsky, Yu.A. Martynova [et al.]. — Saint Petersburg : Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2023. — 320 p. [in Russian]

20. Balanov A.N. Iskusstvennyi intellekt. Ponimanie, primenenie i perspektivy [Artificial Intelligence. Understanding, Application and Prospects] : textbook for universities / A.N. Balanov. — Saint Petersburg : Lan, 2024. — 312 p. [in Russian]