

Оптимизация четырехкомпонентного вяжущего с золами аграрной и строительной промышленности Ирака

Фарах Алаа Абдуламир Альваш¹, Александр Сергеевич Иноземцев¹,
Борис Игоревич Булгаков¹, Юлия Сергеевна Филимонова²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Московский политехнический университет (МПУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на разработку и оптимизацию состава четырехкомпонентного вяжущего с использованием местного сырья Ирака. Целью являлось создание математической модели, описывающей влияние переменных факторов — соотношений компонентов добавок — на ключевые выходные параметры: прочность на сжатие и изгиб в возрасте 28 сут.

Материалы и методы. Материалами служили портландцемент ЦЕМ I 52,5Н, метакеолин (МК), зола-уноса (ЗУ) кирпичного производства и зола от сжигания финиковых косточек (ЗФК). Последний компонент представляет особый интерес для утилизации отходов в регионе. Образцы-балочки изготавливали из раствора по стандартной методике. Для оптимизации состава был применен метод ротatableльного центрального композиционного планирования, позволивший построить уравнения множественной регрессии второго порядка.

Результаты. Получены адекватные регрессионные модели, связывающие прочности при изгибе $R_{изг}$ и на сжатие $R_{ск}$ с двумя факторами: соотношениями ЗУ/МК и ЗФК/МК. Анализ показал, что максимальная прочность достигается при частичной замене цемента (10 % массы) смесью активных минеральных добавок. Оптимальное соотношение компонентов в этой смеси составляет МК:ЗУ:ЗФК = (55–60):10:(30–35).

Выводы. Установлено, что наилучшие механические свойства (прочность на сжатие 72,4 МПа и на изгиб 7,58 МПа) демонстрирует состав: 90 % портландцемента, 6 % метакеолина, 1 % золы-уноса и 3 % золы финиковых косточек. Таким образом, работа подтверждает возможность эффективного использования местных промышленных и аграрных отходов Ирака для создания высокопрочного многокомпонентного вяжущего.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: четырехкомпонентное вяжущее, зола финиковой косточки, зола-уноса, прочность на сжатие, прочность при изгибе, регрессионное уравнение, сырье Ирака

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Альваш Ф.А.А., Иноземцев А.С., Булгаков Б.И., Филимонова Ю.С. Оптимизация четырехкомпонентного вяжущего с золами аграрной и строительной промышленности Ирака // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1158–1167. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1158-1167

Автор, ответственный за переписку: Фарах Алаа Абдуламир Альваш, alwashfarah@gmail.com.

Optimization of a four-component binder using ash from Iraq's agricultural and construction industries

Farah Alaa Abdulameer Alwash¹, Aleksandr S. Inozemtcev¹,
Boris I. Bulgakov¹, Yuliya S. Filimonova²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Moscow Polytechnic University; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study aims to develop and optimize the composition of a four-component binder using locally sourced raw materials from Iraq. The goal was to create a mathematical model describing the influence of variable factors — additive component ratios — on key output parameters: compressive and flexural strength at 28 days of age.

Materials and methods. The materials used were Portland cement CEM I 52.5 N, metakaolin (MK), fly ash (FA) from brick production, and date kernel ash (DKA). The latter component is of particular interest for waste management in the region. Beam specimens were prepared from mortar using standard methods. To optimize the composition, a rotatable central composite planning (CCP) method was used, allowing the construction of second-order multiple regression equations.

Results. As a result, adequate regression models were obtained linking flexural R_{bend} and compressive R_{comp} strengths with two factors: the ratios of FA/MK and DKA/MK. The analysis showed that maximum strength is achieved with a partial replacement of cement (10 % of the mass) with a mixture of active mineral additives. The optimal ratio of components in this mixture is МК:ФА:ДКА = (55–60):10:(30–35).

Conclusions. It was found that the best mechanical properties (compressive strength of 72.4 МПа and flexural strength of 7.58 МПа) are demonstrated by a composition consisting of 90 % Portland cement, 6 % metakaolin, 1 % fly ash, and 3 %

date kernel ash. Thus, the study confirms the feasibility of effectively using local industrial and agricultural waste from Iraq to create a high-strength multi-component binder.

KEYWORDS: four-component binder, date kernel ash, fly ash, compressive strength, flexural strength, regression equation, Iraq's raw materials

FOR CITATION: Alwash F.A.A., Inozemtcev A.S., Bulgakov B.I., Filimonova Yu.S. Optimization of a four-component binder using ash from Iraq's agricultural and construction industries. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1158-1167. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1158-1167 (rus.).

Corresponding author: Farah Alaa Abdulameer Alwash, alwashfarah@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Цемент после его изобретения в середине 20-х гг. XIX в. Джозефом Аспдином и Егором Герасимовичем Челиевым был и останется в обозримом будущем основным вяжущим веществом для получения бетонов и строительных растворов различного назначения. В наши дни из наиболее насыщенных сырьевых ресурсов, потребляемых человеческой цивилизацией, цемент занимает второе место после воды. Однако процесс его изготовления энергоемок и сопровождается выбросом в атмосферу большого количества углекислого газа [1]. На сегодняшний день производство цемента генерирует примерно 8 % ежегодных мировых выбросов CO₂ [2]. Поэтому актуален поиск различных путей снижения вредного воздействия получения цемента на окружающую среду, основными из которых являются разработка составов бесклинкерных «альтернативных» вяжущих и использование тонкодисперсных активных добавок как природного, так и техногенного происхождения, обладающих цементирующим действием, для частичной замены портландцемента в составе многокомпонентных вяжущих [3].

Альтернативные вяжущие представляют собой новое поколение вяжущих веществ. Эти ресурсосберегающие альтернативные цементы могут содержать отходы различных отраслей промышленности (металлургической, топливно-энергетической, химической, аграрной) в виде зол, шлаков, шлама и т.д. [4, 5]. Получение таких альтернативных вяжущих потребляет меньше энергии и сопровождается значительно меньшими выбросами углекислого газа по сравнению с традиционными цементами. В качестве примеров новых вяжущих веществ, являющихся альтернативой традиционному портландцементу, можно привести сульфоломинатный цемент, щелочно-шлаковое вяжущее, белитовый портландцемент, магнезиальные цементы, гидросиликатные цементы и др. [6, 7]. Одно из новых и интересных предложений альтернативного композиционного вяжущего — цемент на основе обожженной доломитовой глины и известняка с небольшой добавкой портландцементного клинкера и гипса, цементный камень которого обладает высокой прочностью и долговечностью [8, 9].

В строительных конструкциях зданий и сооружений материалы могут подвергаться разнообразным внутренним напряжениям: сжимающим, растягивающим, изгибающим, срезающим или крутящим.

Бетон, являющийся основным строительным материалом современности, как и все другие каменные материалы, природные и искусственные, обладает высокой прочностью на сжатие, но значительно меньшей к растягивающим усилиям. Исходя из этого строительные конструкции обычно проектируют таким образом, чтобы бетон в них воспринимал главным образом сжимающие нагрузки, а при необходимости восприятия растягивающих усилий конструкции армируют [10].

Ирак обладает почти неиспользуемыми ресурсами аграрных отходов, в том числе косточками плодов финиковых пальм. За последние годы средняя урожайность фиников в Ираке установилась на уровне примерно 5 т с гектара, что дает возможность производить около 650 000 т фиников в год¹. Результаты проведенных научных исследований говорят о том, что зола, получаемая путем их сжигания при температуре 600–800 °С с последующим мелким измельчением, благодаря своему химическому составу и, в первую очередь, содержанию аморфного кремнезема, обладает пуццоланической активностью и поэтому может быть использована в качестве активной минеральной добавки в бетоны и строительные растворы. Кроме того, подобный эффективный путь утилизации отходов переработки фиников, а также топливных зол будет способствовать защите окружающей среды в Ираке от загрязнения многотоннажными техногенными отходами, а также расширению сырьевой базы местной промышленности строительных материалов [11–13].

Предыдущие исследования показали, что золы уноса теплоэлектростанций, доменные шлаки, а также зола, образующаяся в результате сжигания рисовой шелухи, являются эффективными компонентами бесцементных вяжущих веществ, позволяющими получать геополимерные мелкозернистые бетоны с высокими эксплуатационными показателями [14].

Цель исследования — разработка и оптимизация четырехкомпонентного вяжущего, состоящего из портландцемента и оптимального сочетания тонкодисперсных добавок в виде метаксаолина, золы уноса (ЗУ) и золы финиковых косточек (ЗФК) (обладающих пуццоланической активностью и частич-

¹ Продовольственная и сельскохозяйственная организация ФАО ближе к концу // ФАОСТАТ: продукция растениеводства и животноводства. 2023. С. 384. DOI: 10.4060/cc8166en

но заменяющих портландцемент) и обладающего высокими прочностными показателями. Для этого использован метод математического планирования эксперимента, основная задача которого заключается в установлении зависимостей ключевых физико-механических свойств цементного камня (прочности на сжатие и на растяжение при изгибе) от состава и количества ключевых сырьевых компонентов [15]. При этом первостепенное значение имеют прочностные характеристики цементного камня бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования в соответствии с целью исследования является многокомпонентное вяжущее. В качестве предмета исследования определены зависимости влияния состава и соотношения основных компонентов вяжущего на механические свойства цементного камня. В качестве базовых компонентов состава четырехкомпонентного вяжущего были использованы:

- портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н ($\rho = 3120 \text{ кг/м}^3$) производства иракского цементного завода «Таслужа» (ПЦ), соответствующий иракскому стандарту IQ.S 5:1984 Тип I² и ГОСТ 31108–2020³;
- стандартный полифракционный кварцевый песок для испытаний портландцемента (П) с размером зерен 0,08–2,0 мм, соответствующий требованиям ГОСТ 6139–2020⁴;
- высокоактивный метакраолин (МК) ($\rho = 2550 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_n = 350 \text{ кг/м}^3$) производства компании ООО «Синерго»;
- вода дистиллированная, соответствующая требованиям ГОСТ Р 58144–2018⁵.

Отличительной особенностью минеральной сырьевой базы Республики Ирак, как показано выше, служит наличие многотоннажных отходов строительной и аграрной промышленности. В связи с этим разработка и оптимизация многокомпонентного вя-

жущего выполнены с использованием местного сырья:

- механоактивированной золы путем помола в шаровой мельнице в течение 20 мин, ЗУ ($\rho = 2420 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_n = 860 \text{ кг/м}^3$), образовавшейся в результате сжигания твердого топлива при обжиге кирпичей на заводе «Аль-Нахраван» в Багдаде с удельной поверхностью $850 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- золы, полученной в результате сжигания финиковых косточек, поступивших с фабрики по производству финиковой пасты в г. Вавилон Республики Ирак. Финиковые косточки сортировали, промывали и подвергали термической обработке для получения золы. Полученную ЗФК подвергали механической активации путем помола в шаровой мельнице в течение 20 мин. Удельная поверхность составила $1090 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Для определения прочностных показателей четырехкомпонентного вяжущего с целью оптимизации из каждого состава стандартного цементного раствора, состоящего из вяжущего и песка в соотношении 1:3 по массе при водовязущем отношении, равном 0,5, в соответствии с требованиями ГОСТ 30744–2001⁶ были изготовлены по три образца-балочки размером $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$, которые вначале были испытаны на изгиб, а потом их полученные половинки — на сжатие.

Оптимизацию состава четырехкомпонентного вяжущего проводили с использованием уравнений множественной регрессии второго порядка для двух факторов с помощью рототабельного центрального композиционного планирования (РЦКП) и компьютерной программы «Градиент».

Метод РЦКП позволяет получить более точное математическое описание за счет увеличения числа экспериментов в центре и некоторых специальных значений «плеча звезды» [16]. В качестве варьируемых факторов приняты соотношение золы-уноса и метакраолина, а также соотношение золы финиковой косточки и метакраолина, в составе многокомпонентного вяжущего, ЗУ/МК — X_1 и ЗФК/МК — X_2 соответственно. Основные уровни и интервалы варьирования выбраны в соответствии с табл. 1.

⁶ ГОСТ 30744–2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. М. : ГУПЦПП, 2001. 30 с.

Табл. 1. Основные уровни и интервалы варьирования факторов

Table 1. Basic levels and ranges of variation of factors

Фактор / Factor		Уровни варьирования фактора Levels of factor variation			Интервал варьирования Variation interval
Наименование Description	Обозначение Abbreviation	–1	0	+1	
ЗУ/МК / FA/MK	X_1	1,50	4,00	6,50	2,50
ЗФК/МК / DKA/MK	X_2	0,60	2,00	3,40	1,40

Табл. 2. Матрица планирования и соотношения компонентов в составе четырехкомпонентного вяжущего X_1
Table 2. Matrix planning and ratio of components in the composition of a four-component binder X_1

В виде переменных In the form of variables		В натуральном выражении In real terms		Содержание добавок, % Additive content, %		
X_1	X_2	X_1	X_2	МК / МК	ЗУ / FA	ЗФК / DKA
–1	–1	1,50	0,60	3,2	4,8	1,9
+1	–1	6,50	0,60	1,2	8,0	0,7
–1	+1	1,50	3,40	1,7	2,5	5,8
+1	+1	6,50	3,40	0,9	6,0	3,1
–1,41	0	0,46	2,00	2,9	1,3	5,8
+1,41	0	7,54	2,00	0,9	7,2	1,9
0	–1,41	4,00	0,02	2,0	8,0	0,04
0	+1,41	4,00	3,98	1,1	4,5	4,4
0	0	4,00	2,00	1,4	5,7	2,9

После проведения всех девяти опытов, измерения отклика Y и статистической обработки данных методом наименьших квадратов получены уравнения регрессии в виде:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + \Omega, \quad (1)$$

где Y — целевая функция экспериментальной модели; $B_0, B_1, B_2, B_{12}, B_{11}$ и B_{22} — коэффициенты уравнения регрессии второго порядка; X_1, X_2 — входные факторы; Ω — случайная ошибка, которая влияет на неуправляемые переменные [17–19].

С помощью компьютерной программы «Градиент» была получена матрица РЦКП для двух факторов, представленная в табл. 2.

Важно, что при варьировании указанных факторов количество остальных компонентов фиксировалось и составляло на 1 м³: портландцемент — 465 кг, песок — 1535 кг, вода — 256 кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате ранее проведенных исследований было установлено, что для получения мелкозернистого бетона, обладающего наибольшей прочностью на сжатие, на основе двухкомпонентной вяжущей системы, состоящей из портландцемента и метаксаолина, оптимальной является замена в ее составе портландцемента метаксаолином в количестве 7,5–15 мас. % [20]. После проведения математической оптимизации полученных экспериментальных результатов выявлена замена 10 мас. % портландцемента метаксаолином, при которой уменьшение содержания клинкера в составе вяжущего полностью компенсировалось появлением дополнительных гидратных новообразований в виде гидроалюминатов кальция и главным образом низкоосновных гидросиликатов кальция [21], являющихся основными минералами, повышающими прочность цементного камня. В связи с этим уровень замены портландцемента в 10 % по массе смесью тонкодисперсных добавок установлен в каче-

стве основной границы для создания более сложного четырехкомпонентного вяжущего.

Результаты проведенных испытаний прочности при изгибе, представленные в табл. 3, 4, статистически обработаны с целью построения матрицы планирования эксперимента для расчета коэффициентов регрессии.

Ошибки дисперсии в соответствии с:

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum S_i^2}, \quad (2)$$

где $S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_i^{\text{cp}})^2}{m-1}$, $m=3$ — количество параллельных измерений; $N=9$ — количество опытов; составило $G_{\text{расч}} = 0,235 < G_{\text{табл}} = 0,477$, что указывает на однородность дисперсии.

В соответствии с табл. 3.2 [22] значение t -критерия для числа степеней свободы $f=18$ и $\alpha=0,05$ составляет $t_{\text{табл}} = 2,101$. Тогда значение критерия Стьюдента t_{bj} для коэффициентов b_j уравнения регрессии:

$$t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{\text{св}}(b_j)}, \quad (3)$$

$$\text{где } S_{\text{св}}(b_j) = \sqrt{\frac{\sum S_i^2}{N^2 \cdot k}}.$$

Коэффициент b_j считается значимым, если выполняется условие:

$$t_{bj} \geq t_{\alpha}(f_2),$$

где $t_{\alpha}(f_2)$ — критическое значение распределения Стьюдента.

Для полученных результатов экспериментов, представленных в табл. 4, критерий значимости $t_{bj} > t_{\text{табл}} = 2,1$, т.е. все коэффициенты статистически значимы. Величина p -значений $< 0,0001$ подтверждает высокую статистическую значимость всех коэффициентов регрессии.

Табл. 3. Прочность при изгибе образцов, испытанных в возрасте 28 сут

Table 3. Bending strength of specimens tested at the age of 28 days

Номер состава (опыта) Composition No. (experiment)	В натуральном виде, % In natural form, %			y_i^{cp} / y_i^{av}	$\hat{y}$	$(y_i^{cp} - \hat{y})^2 \cdot 10^3$ $(y_i^{av} - \hat{y})^2 \cdot 10^3$	Ошибка дисперсии S_i^2 Dispersion error S_i^2
	МК MK	ЗУ FA	ЗФК DKA				
1	3,2	4,8	1,9	5,05	5,01	1,76	0,0010
2	1,2	8,0	0,7	6,79	6,76	0,58	0,0049
3	1,7	2,5	5,8	6,76	6,77	0,03	0,0021
4	0,9	6,0	3,1	6,59	6,61	0,53	0,0056
5	2,9	1,3	5,8	6,01	6,04	0,53	0,0080
6	0,9	7,2	1,9	7,17	7,17	0,02	0,0021
7	2,0	8,0	0,04	5,36	5,41	1,94	0,0017
8	1,1	4,5	4,4	6,56	6,54	0,58	0,0017
9	1,4	5,7	2,9	7,65	7,65	0,00	0,0084
Σ						5,95	0,0357

Табл. 4. Значения критерия Стьюдента коэффициентов уравнения регрессии второго порядка прочности образцов при изгибе

Table 4. Values of the Student's t-test coefficients of the second-order regression equation for the strength of specimens in bending

Параметры Parameters	Итерация j / Iteration j					
	0	1	2	3	4	5
B_j	$b_0 = 7,65$	$b_1 = 0,399$	$b_2 = 0,400$	$b_{12} = -0,477$	$b_{11} = -0,524$	$b_{22} = -0,838$
$ b_j $	7,65	0,399	0,400	0,477	0,524	0,838
t_{b_j}	631,1	32,9	33,0	39,3	43,2	69,2
p -значение / p -value	<0,0001					
Статус / Status	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant

Проверка гипотезы об адекватности модели по критерию Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{воспр}}^2}, \tag{4}$$

где $S_{\text{ад}}^2 = \frac{m \sum (y_i^{\text{cp}} - \bar{y})^2}{N - M}$ — дисперсии адекватности;

$\bar{y}$ — рассчитанное по уравнению регрессии значение отклика; M — число оцениваемых коэффициентов регрессии, $m = 6$; n — количество параллельных измерений, $m = 3$, показало, что:

$$F_{\text{расч}} = 1,50 < F_{\text{табл}} = 3,2,$$

т.е. полученное значение критерия Фишера ($F_{\text{расч}}$) меньше табличного ($F_{\text{табл}}$) [23] на выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$, гипотеза об адекватности модели подтверждается.

Результаты испытаний прочности на сжатие были статистически обработаны с целью построения матрицы планирования эксперимента для расчета коэффициентов регрессии. С помощью компьютерной программы «Градиент» были получены матрицы РЦКП для двух факторов, представленные в табл. 5, 6.

Все коэффициенты значимы при $\alpha = 0,05$, так как все p -значения $< 0,05$. $R^2 = 0,9424$, т.е. модель объясняет 94,24 % изменчивости данных. Скорректированный $R^2 = 0,935$ — высокая объясняющая способность.

Ошибка дисперсии составляет $G_{\text{расч}} = 0,139 < G_{\text{табл}} = 0,477$, что указывает на однородность дисперсии.

Критерий значимости $t_{b_j} > t_{\text{табл}} = 2,014$, поэтому все коэффициенты статистически значимы на уровне значимости $\alpha = 0,05$ и даже на более строгих уровнях. P -значения $< 0,0001$ подтверждают высокую статистическую значимость всех коэффициентов регрессии.

Проверка гипотезы об адекватности модели по критерию Фишера показала, что:

$$F_{\text{расч}} = 2,399 < F_{\text{табл}} = 2,875,$$

т.е. гипотеза подтверждается.

Таким образом, по результатам проведенных исследований получены следующие уравнения регрессии для исследуемых критериев (прочность при изгибе и сжатии), графическая интерпретация которых изображена на рисунке:

$$R_{\text{изг}} = 7,65 + 0,40X_1 + 0,40X_2 - 0,48X_1X_2 - 0,52X_1^2 - 0,84X_2^2; \tag{5}$$

Табл. 5. Прочность на сжатие образцов, испытанных в возрасте 28 сут

Table 5. Compressive strength of specimens tested at the age of 28 days

Номер состава (опыта) Composition No. (experiment)	В натуральном виде, % In natural form, %			y_i^{cp} / y_i^{av}	$\hat{y}$	$(y_i^{cp} - \hat{y})^2 \cdot 10^3$ $(y_i^{av} - \hat{y})^2 \cdot 10^3$	Ошибка дисперсии S_i^2 Dispersion error S_i^2
	МК MK	ЗУ FA	ЗФК DKA				
1	3,2	4,8	1,9	56,9	56,1	0,575	0,500
2	1,2	8,0	0,7	68,2	68,0	0,101	0,162
3	1,7	2,5	5,8	66,4	66,0	0,177	1,478
4	0,9	6,0	3,1	63,8	63,7	0,001	1,609
5	2,9	1,3	5,8	62,1	62,8	0,462	0,890
6	0,9	7,2	1,9	69,5	69,6	0,003	1,656
7	2,0	8,0	0,04	58,0	58,7	0,370	2,942
8	1,1	4,5	4,4	62,6	62,7	0,017	2,029
9	1,4	5,7	2,9	74,1	74,1	0,000	1,563
Σ						1,710	12,83

Табл. 6. Значения критерия Стьюдента коэффициентов уравнения регрессии второго порядка прочности на сжатие

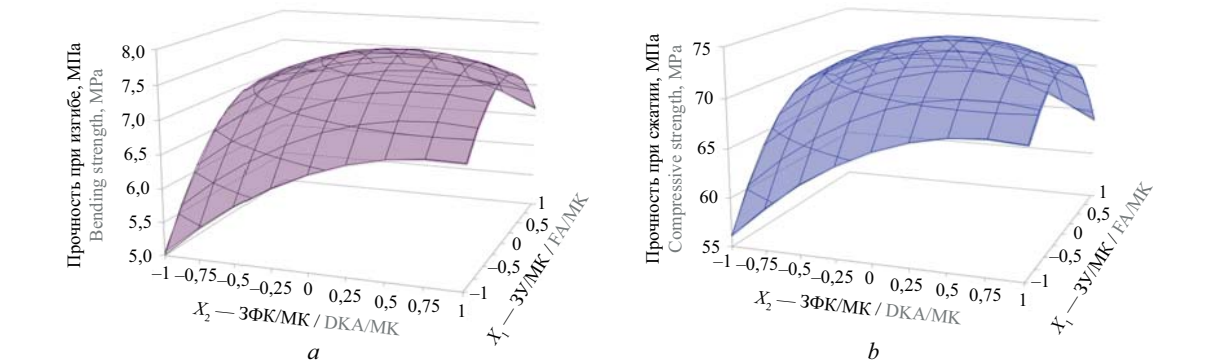
Table 6. Values of the Student's *t*-test coefficients of the second-order regression equation for compressive strength

Параметры Parameters	Итерация <i>j</i> / Iteration <i>j</i>					
	0	1	2	3	4	5
B_j	$b_0 = 74,1$	$b_1 = 2,40$	$b_2 = 1,44$	$b_{12} = -3,50$	$b_{11} = -3,94$	$b_{22} = -6,69$
$ b_j $	74,1	2,40	1,44	3,50	3,94	6,69
t_{b_j}	455,8	14,8	8,88	21,6	24,3	41,2
<i>p</i> -значение <i>p</i> -value	<0,0001					
Статус / Status	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant

$$R_{сж} = 74,1 + 2,40X_1 + 1,44X_2 - 3,50X_1X_2 - 3,94X_1^2 - 6,69X_2^2. \quad (6)$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что прочность при изгибе и сжатии имеет схожий характер зависимости от соотношения ЗУ/МК и ЗФК/МК, т.е. изменение этих свойств имеет экстремальный вид. Из уравнения (5) и (6) видно, что коэффициенты B_1 и B_2 имеют положительный знак, а B_{12} , B_{11} и B_{22} — отрицательный, что указывает на наличие экстремума и области оптимальных значений X_1 и X_2 .

Из математической модели, описывающей $R_{изг} = f(X_1, X_2)$, следует, что влияние содержания золы-уноса и золы финиковых косточек от содержания метакеолина в составе многокомпонентного вяжущего идентичное ($B_1 = B_2 = 0,40$). При этом избыток каждой из этих добавок приводит к негативному влиянию, направленному на снижение прочности при изгибе. При интенсивности этого влияния золы-уноса почти в 2 раза больше, чем золы финиковых косточек. На необходимость ограничения величины варьируемых факторов указывает также отрицатель-



Графическая интерпретация уравнений $R_{изг} = f(X_1, X_2)$ (a) и $R_{сж} = f(X_1, X_2)$ (b)
Graphical interpretation of equations $R_{bend} = f(X_1, X_2)$ (a) and $R_{comp} = f(X_1, X_2)$ (b)

Табл. 7. Результаты установления экстремумов и величины варьируемых факторов
Table 7. Results of establishing extremes and the magnitude of variable factors

$R_{изг}, \text{МПа}$ $R_{bend}, \text{МПа}$	$R_{сж}, \text{МПа}$ $R_{comp}, \text{МПа}$	В кодовом виде / In code form		МК МК	ЗУ FA	ЗФК DKA
		X_1	X_2			
7,58	—	0,178	0,622	5,5	1	3,5
—	72,4	0,116	0,611	6	1	3

ный коэффициент $B_{12} = -0,52$, демонстрирующий совместный негативный эффект на $R_{изг}$.

Анализ уравнения (6) показывает, что на прочность при изгибе влияние варьируемых факторов имеет различную интенсивность. При этом оба фактора влияют положительно. ЗУ/МК имеет более интенсивное положительное влияние на $R_{сж}$, чем ЗФК/МК. Однако совместное воздействие или избыток содержания золы-уноса и золы финиковых косточек, так как и для прочности при изгибе, характеризуется негативным влиянием на прочность при сжатии. Причем этот эффект почти в 1,5–3,0 раза больше, чем положительный. Это указывает на необходимость установления оптимального количества каждого из этих компонентов.

Поиск максимумов для уравнений осуществляется через производную, взятую по X_1 и X_2 . Результаты установления экстремумов и величина варьируемых факторов представлены в табл. 7.

Таким образом, путем математической оптимизации полученных результатов экспериментальных испытаний установлено, что наибольшей прочностью на сжатие 72,4 МПа и на растяжение при изгибе 7,58 МПа в возрасте 28 сут обладает четырехкомпонентное вяжущее на основе портландцемента с частичной его заменой в количестве 10 мас. % смесью активных тонкодисперсных добавок, состоящей из метакаолина, золы-уноса и золы финиковых косточек.

чек при их оптимальном соотношении в указанной смеси МК:ЗУ:ЗФК = (55–60):10:(30–35).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе проведенных исследований по оптимизации четырехкомпонентного вяжущего с использованием местного сырья Республики Ирак получены регрессионные модели второго порядка:

$$R_{изг} = f\left(\frac{ЗУ}{МК}, \frac{ЗФК}{МК}\right) \text{ и } R_{сж} = f\left(\frac{ЗУ}{МК}, \frac{ЗФК}{МК}\right),$$
 адекватно описывающие зависимости прочности четырехкомпонентного вяжущего при изгибе и на сжатие от соотношений активных тонкодисперсных добавок, состоящих из метакаолина, золы-уноса и золы финиковых косточек.

Установлено, что наибольшей прочностью на сжатие 72,4 МПа и на растяжение при изгибе 7,58 МПа обладает вяжущее на основе портландцемента с частичной его заменой (в количестве 10 % мас.) смесью активных тонкодисперсных добавок при оптимальном соотношении МК:ЗУ:ЗФК = (55–60):10:(30–35). Таким образом, для получения эффективного вяжущего на территории Ирака могут быть использованы местные ресурсы в виде зол аграрной и строительной промышленности. Состав разработанного четырехкомпонентного вяжущего включает портландцемент — 90 %, метакаолин — 6 %, золу-уноса — 1 % и золу финиковых косточек — 3 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Британский патент № 5022. Усовершенствование способа производства искусственного камня / Аспдин Дж. 1824.
2. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М. : Высшая школа, 1973. 504 с.
3. Andrew R.M. Global CO₂ emissions from cement production // Earth System Science Data. 2018. Vol. 10. Issue 1. Pp. 195–217. DOI: 10.5194/essd-10-195-2018
4. Танг Ван Лам, Нгуен Зоан Тунг Лам, Самченко С.В. Влияние добавки золошлакового отхода на свойства сульфоалюминатного портландцемента // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 8. С. 991–1003. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003. EDN RLRYSI.
5. Иноземцев А.С., Королёв Е.В., Доунг Т.К. Структурная модель течения пластифицированных цементно-минеральных смесей // Строительные ма-

териалы. 2020. № 4–5. С. 90–96. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-90-96. EDN CVBCCN.
6. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
7. Provis J.L. Alkali-activated materials // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. Pp. 40–48. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.009
8. Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements // Cement and Concrete Research. 2004. Vol. 34. Issue 9. Pp. 1489–1498. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.021
9. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi S., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC³) // Cement

and Concrete Research. 2008. Vol. 114. Pp. 49–56. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017

10. *Avet F., Scrivener K.* Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 107. Pp. 124–135. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.016

11. *Al-Hamamre Z., Saidan M., Hararah M., Rawajfeh K., Alkhasawneh H.E., Al-Shannag M.* Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 67. Pp. 295–314. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.035

12. *Gunarani G.I., Chakkravarthy S.P.* Experimental studies on effect of Date Seed Ash (DSA) on strength properties of cement sand mortar // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 80. P. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/80/1/012015

13. *Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В.* Возможность использования золы-уноса и золы рисовой шелухи для получения геополимерных бетонов // *Инновации и моделирование в строительном материаловедении и землеустройстве : мат. V Междунар. науч.-техн. конф.* 2021. С. 126–131. EDN BYKMMG.

14. *Танг Ван Лам, Ву Ким Дьен, Булгаков Б.И.* Исследование сочетания летучей золы и доменного шлака для получения высокопрочного мелкозернистого бетона без цемента // *Журнал строительства*. 2021. № 10. С. 183–190.

15. *Mehta P.K., Monteiro P.J.* Concrete — Structure, Properties and Materials. University of California at Berkeley, 2006. 684 p.

16. *Абомелик Т.П.* Методология планирования эксперимента : учебное пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2006. 37 с.

17. *Образцов И.В.* Оптимизация зерновых составов цементно-минеральных смесей для производства строительных композитов методами компьютерного моделирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2014. 23 с. EDN ZPLQCP.

18. *Шмигальский В.Н.* Оптимизация состава цементобетонов. Кишинев : Штиинца, 1981. 123 с.

19. *Танг В.Л., Булгаков Б.И., Александрова О.В.* Математическое моделирование влияния сырьевых компонентов на прочность высококачественного мелкозернистого бетона при сжатии // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 9 (108). С. 999–1009. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.9.999-1009. EDN ZHKODP.

20. *Tuyen Minh Nguyen.* Planning of the experiment // *Publishing of Science and Technology*. Hanoi, 2007. 264 p.

21. *Фарах А.А., Булгаков Б.И.* Влияние замены части портландцемента на метакаолин на свойства мелкозернистого бетона // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023 : сб. докл. IV Национ. науч. конф.* 2024. С. 284–287. EDN GNKMDM.

22. *Гмурман В.Е.* Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. М. : Высшая школа, 1977. 334 с.

23. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М. : Наука, 1983. 416 с.

Поступила в редакцию 19 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 22 января 2026 г.

Одобрена для публикации 20 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Фарах Алаа Абдуламир Альваш** — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 59132544700, ORCID: 0009-0008-7214-9919; alwashfarah@gmail.com;

Александр Сергеевич Иноземцев — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 616006, Scopus: 55889834500, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemcevAS@mgsu.ru;

Борис Игоревич Булгаков — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 281781, Scopus: 57192383523, ORCID: 0009-0002-4737-8524; bulgakovbi@mgsu.ru;

Юлия Сергеевна Филимонова — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного, гражданского и подземного строительства; **Московский политехнический университет (МПУ)**; 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38; РИНЦ ID: 1021538, Scopus: 58823301800, ORCID: 0009-0002-3793-8433; julias06@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. British Patent No. 5022. *Improvement in the method of producing artificial stone* / Aspdin J.P. 1824.
2. Butt Yu.M., Timashev V.V. *Workshop on chemical technology of binders*. Moscow, Vysshaya Shkola, 1973; 504. (rus.).
3. Andrew R.M. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*. 2018; 10(1):195-217. DOI: 10.5194/essd-10-195-2018
4. Tang Van Lam, Nguyen Doan Tung Lam, Samchenko S.V. Effect of ash-and-slag waste on the properties of sulphoaluminate Portland cement. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(8):991-1003. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003. EDN RLRYCI. (rus.).
5. Inozemtsev A.S., Korolev E.V., Doung T.Q. Structural flow model of plasticized cement-mineral mixtures. *Construction Materials*. 2020; 4-5:90-96. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-90-96. EDN CVBCCH. (rus.).
6. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
7. Provis J.L. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114:40-48. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.009
8. Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*. 2004; 34(9):1489-1498. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.021
9. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi S., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC³). *Cement and Concrete Research*. 2008; 114:49-56. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017
10. Avet F., Scrivener K. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*. 2018; 107:124-135. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.016
11. Al-Hamamre Z., Saidan M., Hararah M., Rawajfeh K., Alkhasawneh H.E., Al-Shannag M. Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 67:295-314. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.035
12. Gunarani G.I., Chakkravarthy S.P. Experimental studies on effect of Date Seed Ash (DSA) on strength properties of cement sand mortar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 80:012015. DOI: 10.1088/1755-1315/80/1/012015
13. Tang V.L., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Possibility of using rice ash and rice hull ash for geopolymer concrete. *Innovations and Modeling in Construction Materials Science and Land Management : Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference*. 2021; 126-131. EDN BYKMMG. (rus.).
14. Tang Van Lam, Vu Kim Dien, Bulgakov B.I. Research on combination of fly ash and blast furnace slag to make high-performance fine-grained concrete without cement. *Journal of Construction*. 2021; 10:183-190. (rus.).
15. Mehta P.K., Monteiro P.J. *Concrete — Structure, Properties and Materials*. University of California at Berkeley, 2006; 684.
16. Abomelik T.P. *Methodology of Experimental Design : textbook*. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2006; 37. (rus.).
17. Obraztsov I.V. *Optimization of the particle size distribution of cement-mineral mixtures for the production of construction composites using computer modeling methods : abstract of Candidate of Technical Sciences dissertation*. Voronezh, 2014; 23. EDN ZPLQCP. (rus.).
18. Shmigalsky V.N. *Optimization of Cement-Concrete Composition*. Chisinau, Shtiintsa, 1981; 123.
19. Tang V.L., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Mathematical modeling of the impact of raw material composition on compressive strength of high performance fine-grained concrete. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(9):(108):999-1009. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.9.999-1009. EDN ZHKODP. (rus.).
20. Tuyen Minh Nguyen. Planning of the experiment. *Publishing of Science and Technology*. Hanoi, 2007; 264.
21. Farah A.A., Bulgakov B.I. The effect of replacing part of Portland cement with metakaolin on the properties of fine-grained concrete. *Current Issues in the Construction Industry and Education – 2023 : proceedings of the IV National Scientific Conference*. 2024; 284-287. EDN GNKMDM. (rus.).
22. Gmurman V.E. *Guide to Solving Problems in Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow, Vysshaya Shkola, 1977; 334. (rus.).
23. Bolshev L.N., Smirnov N.V. *Tables of mathematical statistics*. Moscow, Nauka, 1983; 416. (rus.).

Received January 19, 2026.

Adopted in revised form on January 22, 2026.

Approved for publication on May 20, 2026.

B I O N O T E S: **Farah Alaa Abdulameer Alwash** — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 59132544700, ORCID: 0009-0008-7214-9919; alwashfarah@gmail.com;

Aleksandr S. Inozemtcev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 616006, Scopus: 55889834500, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemtcevAS@mgsu.ru;

Boris I. Bulgakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 281781, Scopus: 57192383523, ORCID: 0009-0002-4737-8524; bulgakovbi@mgsu.ru;

Yuliya S. Filimonova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial, Civil and Underground Construction; **Moscow Polytechnic University**; 38 Bolshaya Semenovskaya st., Moscow, 107023, Russian Federation; ID RSCI: 1021538, Scopus: 58823301800, ORCID: 0009-0002-3793-8433; julias06@mail.ru.

Authors' contributions: all authors contributed equally to the publication.

The authors declare no conflicts of interest.