

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 622.245.4+666.962.2

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-490-497>

Поступила в редакцию 04.06.2019

Received 04.06.2019

**Н. Х. Белоус, С. П. Родцевич, О. Н. Опанасенко, Н. П. Крутько,  
В. В. Шевчук, Д. Е. Дударев**

*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ОТХОДЫ РАЗРАБОТКИ СОЛЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

**Аннотация.** Методом математического планирования эксперимента изучено влияние жидко-твердого соотношения и содержания в магнезиальных твердеющих закладочных смесях отходов разработки солевых месторождений на их технологические свойства. Выбран план эксперимента, получены уравнения регрессии, описывающие влияние содержания ангидритового отхода и отхода галита на плотность, растекаемость и начало схватывания закладочных растворов, объемную массу и 28-суточную прочность при одноосном сжатии отвержденных материалов. В результате статистического анализа математических моделей оценена их адекватность, работоспособность, значимость коэффициентов уравнений регрессии, а также возможность расчета технологических характеристик закладок по виду и содержанию техногенного сырья.

**Ключевые слова:** магнезиальные вяжущие, отходы разработки солевых месторождений, факторный эксперимент, факторы и параметры оптимизации, уравнения регрессии, проверка их адекватности, значимость коэффициентов, критерии Стьюдента и Фишера, коэффициент детерминации, средние ошибки аппроксимации

**Для цитирования.** Оптимизация составов закладочных материалов, содержащих отходы разработки солевых месторождений / Н. Х. Белоус [и др.] // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 490–497. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-490-497>

**N. Ch. Belous, S. P. Rodtsevich, O. N. Opanasenko, N. P. Krutko, V. V. Shevchuk, D. E. Dudarev**

*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

## **OPTIMIZATION OF THE COMPOSITIONS OF FILLING MATERIALS CONTAINING WASTE FROM THE DEVELOPMENT OF SALT DEPOSITS**

**Abstract.** By the method of mathematical planning of the experiment, the influence of the liquid-solid ratio and the content of waste of salt deposits in magnesia hardening backfill mixtures on their technological properties have been studied. The plan of the experiment has been chosen, the regression equations describing the influence of anhydrite wastes and halite wastes content on the density, spreadability and early setting time of backfilling- solutions, volumetric mass, and 28-day uniaxial compression strength of hardened materials have been obtained. As a result of the statistical analysis of mathematical models, the significance of their coefficients, adequacy, efficiency and the ability to calculate technological characteristics of backfilling mixtures by type and content of man-made raw materials have been estimated.

**Keywords:** magnesia binders, waste from the development of salt deposits, factorial experiment, the factors and parameters optimization of the regression equation, the test of their adequacy, the significance of the coefficients, the criteria of Student and Fisher, the coefficient of determination, the average error of approximation

**For citation.** Belous N. Ch., Rodtsevich S. P., Opanasenko O. N., Krutko N. P., Shevchuk V. V., Dudarev D. E. Optimization of the compositions of filling materials containing waste from the development of salt deposits. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 490–497 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-490-497>

**Введение.** Появление выработанных пространств и оседание земной поверхности после разработки солевых месторождений – проблемы, решение которых состоит в закладке в выработанные пространства твердеющих минеральных составов на основе побочных продуктов производства [1, 2]. Их применение обеспечивает надежное поддержание пород, повышает безопасность горных работ, снижает потери руды, создает благоприятные условия для полной замены рудных целиков искусственно возводимыми опорами, способствует концентрации горных работ [3]. Закладочные составы (ЗС) представляют собой многокомпонентные системы, включающие вяжущие, заполнители, пластификаторы, активаторы твердения и другие добавки различного функционального назначения. Их получение по традиционным технологиям предполагает широкое использование природных минерально-сырьевых ресурсов, а для солевых месторождений в настоящее

время наиболее перспективно введение в ЗС техногенного сырья, в частности отходов разработки месторождений. Значительное снижение их себестоимости обеспечивается введением отходов в закладки прямо на месте получения.

Кроме того, использование отходов солевых месторождений дает возможность решить проблему утилизации техногенных образований, загрязняющих землю, водные ресурсы и атмосферу. Исследования, проведенные в работах [3, 4], показали, что некоторые отходы производства, даже в отсутствии активаторов твердения, могут успешно заменять вяжущие компоненты закладок.

При оптимизации составов ЗС широкое распространение получили методы математического планирования эксперимента и экспериментально-статистической обработки его результатов [4–6]. При их проведении устанавливается полиномиальная связь между входными параметрами закладываемых систем – факторами оптимизации (чаще всего это компонентный состав ЗС) и выходными характеристиками – параметрами оптимизации (их свойствами). Математическое планирование, сокращая материально-временные затраты, количество экспериментов и сроки их проведения, дает возможность получать количественные оценки влияния факторов на параметры оптимизации и создавать математические модели данных зависимостей.

Цель работы – нахождение математических моделей зависимостей плотности, растекаемости, начала схватывания закладочных пластифицированных магниальных растворов, содержащих в качестве заполнителя техногенное сырье, а также объемной массы и прочности при одноосном сжатии отвержденных материалов от его содержания и соотношения жидко-твердых компонентов твердеющих систем. Для оптимальных составов закладок предпочтительны, согласно [7], высокие показатели плотности, растекаемости и сроков начала схватывания растворов, а также значительные объемные массы отвержденных материалов (~ 1,8–2,0 г/см<sup>3</sup>). Прочность при одноосном сжатии, определяемая глубиной залегания рудного тела и высотой выработки, должна составлять ~ 5–10 МПа. Возможность транспортировки ЗС по трубопроводам, которая зависит от их подвижности, можно регулировать либо количеством жидкости затворения в них, то есть жидко-твердым (Ж/Т) соотношением, либо применением пластификаторов, формирующих на границе раздела фаз адсорбционно-сольватные слои [4].

ЗС получали при добавлении к реактиву оксида магния квалификации «ч.» отходов разработки солевых месторождений: ангидритовых отходов (АО) и отходов галита (ОГ), а также порошкообразного нафталинсульфонового суперпластификатора бетонов СЗ (ТУ ВУ 190669631.009-2011, ООО Фрэймхаустрэйд, Минск). Порошок, полученный после перемешивания указанных компонентов в различных соотношениях, затворяли 35 %-ным раствором MgCl<sub>2</sub> плотностью 1,35 г/см<sup>3</sup>.

Для создания детерминированных и вероятностных математических моделей влияния составов ЗС на их свойства выбирали и обосновывали план эксперимента, проводили математическую обработку его результатов, на основании которой получены уравнения регрессии и проведен их статистический анализ. В качестве факторов оптимизации выбраны те, которые по предварительным результатам оказывали существенное влияние на характеристики закладок и могли фиксироваться в процессе эксперимента. При его планировании важна их независимость и возможность установления на любом уровне. Факторы, а также уровни их варьирования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Факторы и уровни варьирования закладок

Table 1. Bookmark variation factors and levels

Факторы, %	Уровни варьирования			
$X_1$	20 а (код)	50 в	80 с	110 д
$X_2$	0,6 А (код)	0,8 В	1,0 С	1,2 Д
$X_3$	50 v (код)	250 π	450 σ	650 S
$X_4$	0,6 g (код)	1,2 h	1,8 ρ	2,4 é

$X_1$  – содержание АО, % от массы MgO, варьируется на 4 уровнях: 20; 50; 80; 110 %;

$X_2$  – Ж/Т соотношения ЗС, 4 уровня: 0,6; 0,8; 1,0; 1,2;

$X_3$  – содержание ОГ, % от массы MgO, 4 уровня: 50; 250; 450; 650 %;

$X_4$  – содержание СП СЗ, % от массы MgO, 4 уровня: 0,6; 1,2; 1,8; 2,4 %.

Воспроизводимость свойств ЗС и уменьшение степени воздействия на них случайных факторов, искажающих результаты моделирования, обеспечивались выполнением эксперимента на одной партии отходов месторождения с одинаковой последовательностью смешивания, при этом для каждой экспериментальной точки проведено по 3 параллельных опыта. Плотность растворов определена по ГОСТу 26798.1-96, их растекаемость (подвижность) и начало схватывания – по ГОСТу 23789-79 и СТ СЭВ 826-77, после этого смеси закладывали в кубы 2×2×2 см и отверждали на воздухе при температуре 20–25 °С и влажности ≤ 60 %. После 28-суточного твердения по ГОСТу 12730.1-78 определена объемная масса составов, а по ГОСТу 10180-2012 – их прочность при одноосном сжатии.

Регрессионный анализ выполнен методом дробного факторного эксперимента по схеме латинских квадратов 4×4. Принятый план является 1/16 дробной репликой полного факторного эксперимента (256 опытов), что при снижении числа опытов, позволяет получать достоверные результаты. Согласно [9], такого числа экспериментов достаточно для получения моделей, адекватно описывающих влияние ЗС на их свойства. Составленная матрица включала 16 опытов (табл. 2), параметрами оптимизации или откликами в работе выбраны:  $Y_1$  – плотность закладочного раствора, г/см<sup>3</sup>;  $Y_2$  – его растекаемость, см;  $Y_3$  – начало схватывания, ч;  $Y_4$  – объемная масса отвержденного материала, г/см<sup>3</sup>;  $Y_5$  – прочность при одноосном сжатии через 28 сут твердения, МПа. Обработку экспериментальных данных проводили по стандартной программе для ПК «Statistica 12».

Практическое использование математических моделей возможно лишь при их адекватности и статистической надежности. Проверку адекватности проводили путем оценки аппроксимации опытных точек уравнением регрессии по величинам коэффициентов детерминации ( $R^2$ ), средних ошибок аппроксимации, % ( $A$ ), а также критериев Фишера ( $F$ -статистика) [10, 11]. Согласно [9–11], рассчитаны остаточные ( $S^2_{\text{ост}}$ ), факторные дисперсии ( $S^2_{\text{факт}}$ ), а по критериям Стьюдента проверена статистическая значимость коэффициентов уравнений ( $t$ -статистика).

На вопрос адекватности модели лучше всего дает ответ коэффициент детерминации: чем ближе он к 1, тем выше точность рассчитанных параметров оптимизации и меньше роль неучтенных факторов. В литературе приводятся значения  $R^2$ , свидетельствующие об отсутствии адекватности уравнений регрессии и их статистической незначимости ( $R^2 \leq 0,5$ ) [11]. Такие величины  $R^2$  могут быть обусловлены тем, что в регрессионную модель не включены существенные факторы или выбранная форма аналитической зависимости не отражает реальных соотношений между включенными переменными. Согласно [11], достаточно хорошими являются модели с  $R^2 \geq 0,8$ . Величина средней ошибки аппроксимации ( $A$ ), характеризующая рассеивание эмпирических точек вокруг линии регрессии, также показатель качества модели, она должна быть минимизирована, в адекватной модели  $A$  не превышает 12–15 % [11]. Адекватность моделей подтверждает и  $F$ -критерий. Вследствие низких значений дисперсий воспроизводимости в проведенных экспериментах,  $F$ -критерий проверяли по соотношению факторной и остаточной дисперсий в расчете на одну степень свободы [11]. Согласно [11], рассчитаны фактические значения  $F$ -критерия, которые сравнивали с табличным при 5 %-ном уровне значимости (данный уровень – приемлемая граница статистической значимости при получении математических моделей строительных и закладочных составов) и числе степеней свободы:  $k$  – число факторов и  $N-k-1$  ( $N$  – число экспериментов). Статистическая значимость уравнения в целом и то, что уравнение обеспечивает удовлетворительную точность аппроксимации признается в случае, когда фактическое значение  $F$ -критерия больше табличного ( $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$ ), чем больше различие, тем адекватней модель. Величина  $F$ -критерия может быть рассчитана и по коэффициенту детерминации по формуле  $F_{\text{факт}} = R^2 (N - k - 1) / (1 - R^2) k$ .

На начальном этапе анализа для каждого из исследуемых параметров оптимизации  $Y_1 - Y_5$  получены уравнения регрессии линейного вида и определены их коэффициенты детерминации

( $R^2$ ): для  $V_1 - 0,860$ ,  $V_2 - 0,914$ ,  $V_3 - 0,89$ ,  $V_4 - 0,78$ ,  $V_5 - 0,79$ , которые являются индикаторами степени подгонки моделей к экспериментальным данным. Величины средних ошибок аппроксимации ( $A$ ) для них составили 2,8 – 11,4 %. Как видно из этих величин, статистические показатели уравнений достаточно высоки, однако некоторые из них могут быть улучшены.

Сравнение  $F_{\text{факт}} - 18,34$  уравнения линейного вида для  $V_1$ ;  $F_{\text{факт}} - 29,33$  – для  $V_2$ ;  $F_{\text{факт}} - 22,31$  – для  $V_3$ ;  $F_{\text{факт}} - 10,19$  – для  $V_4$ ;  $F_{\text{факт}} - 10,49$  – для  $V_5$  с критическим  $F_{\text{табл}} = 3,36$  (определен для степеней свободы, с.с. – 4 и 11) показало значительное превышение фактических значений критериев над табличным, что свидетельствует о неплохом качестве и адекватности моделей. Однако после проверки значимости коэффициентов с помощью  $t$ -статистики и удаления незначимых членов, для некоторых параметров оптимизации получены упрощенные математические модели, характеризующиеся меньшими, чем в полном линейном уравнении,  $R^2$ ,  $F_{\text{факт}}$  и более высокими  $A$ . Поскольку, согласно [9, 10], члены уравнения с незначительными коэффициентами исключаются лишь в случае, когда проверка на адекватность упрощенных моделей дает положительный результат, в дальнейшем некоторые линейные модели не использовались. Их усложнение для  $V_2 - V_3$  и  $V_5$  введением перекрестных и квадратичных членов с последующим исключением членов с незначимыми коэффициентами без ущерба для адекватности уравнений, привели к получению следующих математических моделей оптимального вида:

$$V_1 = 2,04 - 0,0006 X_1 - 0,226 X_2 - 0,0002 X_3, \quad (1)$$

$$V_2 = -0,92 + 9,389 X_2 + 0,009 X_3 + 2,989 X_4 + 0,046 X_1 X_2 - 0,003 X_3 X_4 - 0,025 X_1 X_4, \quad (2)$$

$$V_3 = -13,1 + 36,72 X_2 - 5,35 X_4 - 0,02 X_2 X_3 + 0,008 X_3 X_4, \quad (3)$$

$$V_4 = 1,884 - 0,009 X_1 - 0,003 X_3, \quad (4)$$

$$V_5 = 61,05 + 0,082 X_3 - 25,4 X_4 - 0,116 X_2 X_3 + 0,015 X_3 X_4 - 0,0006 X_1 X_3 + 0,047 X_1 X_4 + 14,0 X_2 X_4. \quad (5)$$

Уравнение (1) характеризуется  $R^2 = 0,862$ ;  $A = 3,0$  %;  $F_{\text{факт}} = 25,1$  при критическом  $F_{\text{табл}} = 3,49$  (3 и 12 с.с.). Учитывая это, по работе [11] можно судить о возможности его использования для расчета плотности закладочных растворов по содержанию отходов разработки и Ж/Т соотношениям закладок. Наличие в модели свободного члена большой по сравнению с другими коэффициентами уравнения величины ( $b_0 - 2,04$ ) свидетельствует о существенном вкладе в нее неучтенных факторов. Коэффициенты при независимых переменных уравнения и их знаки указывают на то, что рост содержания ОГ ( $X_3$ ) и АО ( $X_1$ ), а в большей степени Ж/Т соотношений ( $X_2$ ) приводят к снижению плотности закладочных растворов. Однозначно можно говорить и о том, что содержание СЗ ( $X_4$ ) в изученном интервале значений на плотность растворов влияния не оказывает. Возможно, этот факт, несколько противоречащий представлениям о механизме действия суперпластификаторов на вяжущие системы с водоредуцирующим эффектом [12], обусловлен высокими Ж/Т соотношениями и воздухововлечением в смесях, нивелирующим положительное влияние СЗ на плотность закладок.

Иллюстрацией (1) является поверхность функции отклика параметра  $V_1$ , построенная по значимым членам  $X_1$  и  $X_3$  при фиксированных  $X_2 - 0,6$  (рис. 1, а) и 1,2 (рис. 1, б). Графическое изображение уравнения может быть использовано для прогнозирования плотностей закладочных растворов: задавая любое содержание АО и ОГ по поверхностям отклика, можно определить плотность растворов.

Аналогичным образом влияют факторы  $X_1$  и  $X_3$  и на объемную массу отвержденного материала ( $V_4$ , г/см<sup>3</sup>) (4). В данном случае используется простая линейная модель, характеризующаяся  $R^2 - 0,79$ ,  $A - 4,5$  %,  $F_{\text{факт}} - 23,7$  при  $F_{\text{табл}} = 3,8$  (2 и 13 с.с.). Анализируя уравнение, можно сделать вывод, что, как и в (1), увеличение содержания АО и ОГ приводит к снижению объемной массы материала, а содержание СЗ, не оказывает на нее влияния. Для объемной массы в исследуемом интервале значений не проявляется и воздействие фактора  $X_2$ , при этом в модели велика роль неучтенных факторов, о чем свидетельствует величина ее свободного члена ( $b_0 - 1,88$ ).

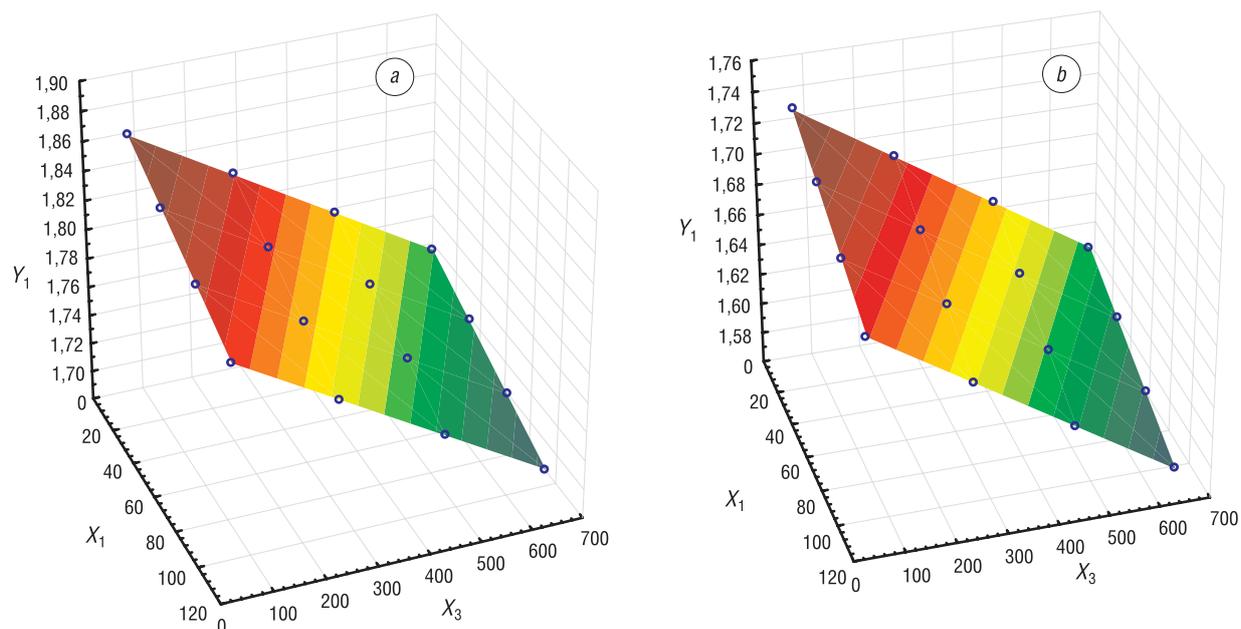


Рис. 1. Графическое изображение уравнения (1), построенного по  $X_1$  и  $X_3$  при фиксированных значениях Ж/Т соотношений:  $X_2 = 0,6$  (a) и  $X_2 = 1,2$  (b)

Fig. 1. Graphic representation of equation (1), constructed from  $X_1$  and  $X_3$  for fixed values of the L / S ratios:  $X_2 = 0.6$  (a) and  $X_2 = 1.2$  (b)

На рис. 2 приведено графическое изображение линейной модели  $Y_4$ , для которой по содержанию отходов можно вычислить объемную массу отвержденного материала.

Анализ (2) свидетельствует о том, что модель хорошо описывает влияние содержания отходов и Ж/Т соотношений ЗС на их растекаемость или подвижность:  $R^2 = 0,98$ ;  $A = 6,2\%$ ;  $F_{\text{факт}} = 71,7$  при критическом  $F_{\text{табл}} = 3,37$  (6 и 9 с.с.). Как следует из уравнения, увеличение содержания ОГ ( $X_3$ ) и в большей степени суперпластификатора СЗ ( $X_4$ ) приводят к росту подвижности ЗС, но наибольший эффект на этот параметр оказывает увеличение Ж/Т соотношений ( $X_2$ ). Для уравнения характерен небольшой свободный член,  $b_0 = (-0,92)$ , свидетельствующий о высокой степени

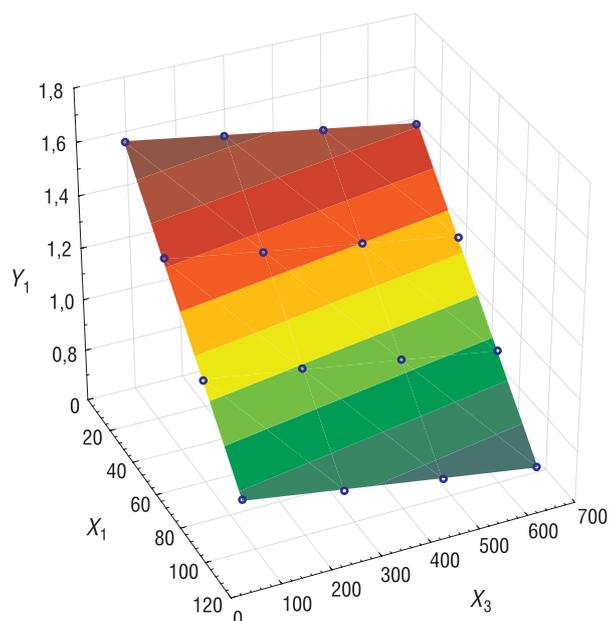


Рис. 2. Графическое изображение уравнения (4), построенное по значениям факторов  $X_1$  и  $X_3$

Fig. 2. Graphic representation of equation (4), based on the values of factors  $X_1$  and  $X_3$

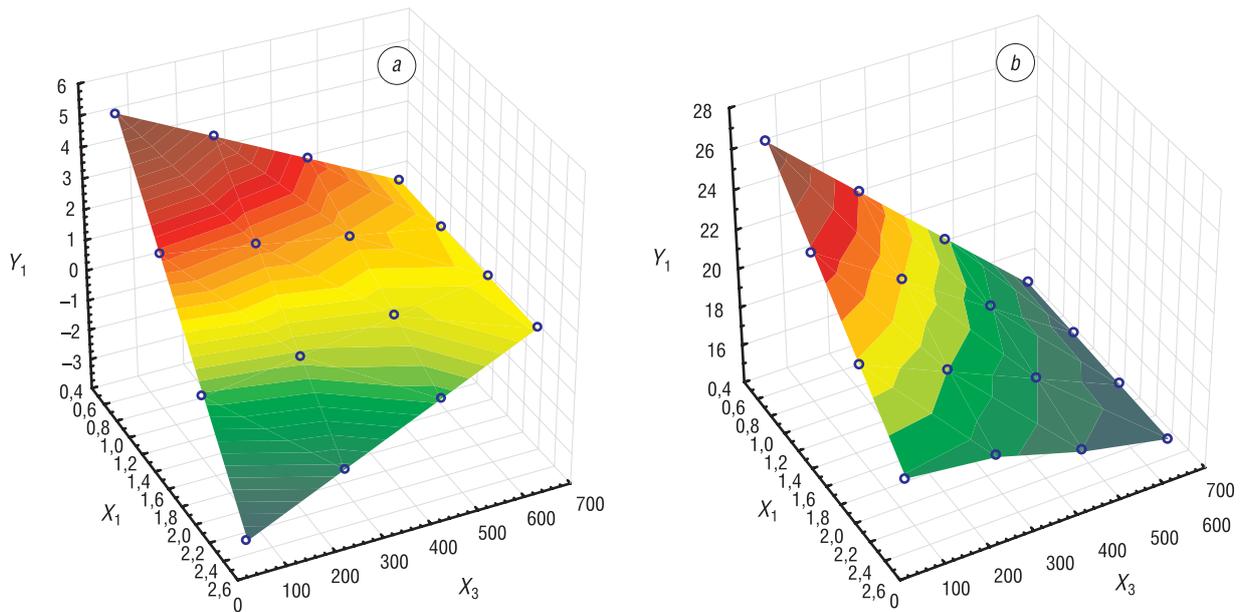


Рис. 3. Графическое изображение уравнения (3), построенного по  $X_4$  и  $X_3$  при фиксированных Ж/Т соотношениях:  $X_2 = 0,6$  (a) и  $X_2 = 1,2$  (b)

Fig. 3. Graphic representation of equation (3), constructed from  $X_4$  and  $X_3$  with fixed L/S ratios:  $X_2 = 0.6$  (a) and  $X_2 = 1.2$  (b)

его подгонки к экспериментальным данным и небольшом вкладе в модель неучтенных факторов ( $R^2 = 0,98$ ).

Для математической модели 3 начало схватывания смесей:  $R^2 = 0,91$ ;  $A = 2,4$  %;  $F_{\text{факт}} = 29,1$  при критическом  $F_{\text{табл}} = 3,36$  (4 и 11 с.с.) зафиксирован рост  $V_3$  при снижении содержания СП СЗ ( $X_4$ ). Наиболее существенно на время начала схватывания влияет Ж/Т соотношение закладок ( $X_2$ ): при его увеличении растет и продолжительность схватывания. Никакого влияния на сроки схватывания, согласно (3), не оказывает содержание АО в смесях ( $X_1$ ). О зависимости сроков схватывания от содержания ОГ говорить что-либо сложно, поскольку этот фактор входит лишь в перекрестные члены уравнения.

В модели 3 также присутствует свободный член значительной величины  $b_0 = (-13,1)$ , отражающий степень влияния на сроки схватывания неучтенных факторов. Графическое изображение уравнения (3) (рис. 3) можно использовать для прогнозирования времени начала схватывания ЗС: задавая любое значение содержания ОГ и СЗ по поверхностям отклика для Ж/Т соотношений – 0,6 (рис. 3, a) и 1,2 (рис. 3, b), можно определить  $V_3$ .

Оптимальная, статистически значимая зависимость прочности при одноосном сжатии ( $\sigma_{\text{сж}}$ , МПа) через 28 сут твердения ( $V_5$ ) от содержания отходов и Ж/Т соотношений представлена уравнением (5), содержащим перекрестные члены и отражающим влияние на  $\sigma_{\text{сж}}$  всех факторов. Модель характеризуется хорошей адекватностью:  $R^2 = 0,96$ ;  $A = 3,5$  %;  $F_{\text{факт}} = 25,3$  при критическом  $F_{\text{табл}} = 3,50$  (7 и 8 с.с.), однако имеет сложный вид, в результате чего по величинам и знакам членов уравнения однозначно судить о влиянии каждого фактора невозможно, но можно по содержанию отходов разработки, суперпластификатора СЗ и Ж/Т соотношениям рассчитать прочность при одноосной нагрузке через 28 сут твердения закладок.

Значения характеристик закладочных растворов и отвержденных материалов, полученные экспериментальным путем и рассчитанные по уравнениям регрессии, приведены в табл. 2.

Таким образом, в работе получены математические модели, дающие с высокой степенью вероятности возможность расчета по содержанию техногенного сырья: ангидритовых отходов и отходов галита, а также Ж/Т соотношениям плотности, растекаемости, начала схватывания закладочных смесей, объемной массы и прочности при одноосном сжатии материалов через 28 сут их твердения.

Таблица 2. План эксперимента, экспериментальные и рассчитанные характеристики ЗС, содержащих отходы солевых месторождений

Table 2. Experiment plan, experimental and calculated characteristics of FM containing wastes from salt deposits

Номер опыта	$X_1$ , % АО	$X_2$ Ж/Т	$X_3$ , %, ОГ	$X_4$ , %, СЗ	$Y_1$ , г/см <sup>3</sup>	$Y_1^*$ , г/см <sup>3</sup>	$Y_2$ , см,	$Y_2^*$ , см	$Y_3$ ч	$Y_3^*$ ч	$Y_4$ г/см <sup>3</sup>	$Y_4^*$ г/см <sup>3</sup>	$Y_5$ МПа, 28 сут	$Y_5^*$ МПа
1	20	0,6	50	0,6	1,94	1,88	6,7	7,1	4,5	5,4	1,93	1,85	49,0	51,8
2	50	0,6	250	1,2	1,78	1,83	9,4	9,4	3,5	2,1	1,74	1,76	49,3	42,8
3	80	0,6	450	1,8	1,76	1,78	9,7	9,9	3	0,7	1,72	1,67	27,4	31,2
4	110	0,6	650	2,4	1,74	1,73	9,1	8,9	3	1,5	1,57	1,57	19,1	17,2
5	20	0,8	250	1,8	1,78	1,81	13,4	12,5	6	6,5	1,71	1,78	37,9	37,6
6	50	0,8	50	2,4	1,8	1,82	12,5	12,6	3	3,6	1,82	1,82	31,5	32,2
7	80	0,8	650	0,6	1,7	1,71	14,1	14,4	4	6,1	1,62	1,60	19,7	19,7
8	110	0,8	450	1,2	1,75	1,72	13,3	13,0	7	7,3	1,60	1,64	17,8	21,2
9	20	1,0	450	2,4	1,74	1,73	15,5	15,8	9	10,9	1,73	1,72	29,6	30,2
10	50	1,0	650	1,8	1,7	1,68	15,6	15,7	6	10,9	1,65	1,63	18,2	18,3
11	80	1,0	50	1,2	1,78	1,75	13,5	13,5	16	16,7	1,72	1,79	48,4	48,5
12	110	1,0	250	0,6	1,71	1,70	15,3	15,3	18	16,7	1,69	1,70	34,4	33,2
13	20	1,2	650	1,2	1,66	1,66	18,1	17,5	19,5	15,7	1,65	1,66	15,6	17,1
14	50	1,2	450	0,6	1,65	1,67	16,8	17,1	19,5	19,4	1,68	1,69	22,9	20,7
15	80	1,2	250	2,4	1,67	1,68	16,3	17,3	19,5	17,2	1,74	1,73	33,1	30,9
16	110	1,2	50	1,8	1,67	1,69	17,7	16,9	20,0	20,9	1,82	1,77	48,4	49,8

$Y_n^*$  – параметры оптимизации, рассчитанные по уравнениям регрессии (1)–(5):  $Y_1^*$  – (1),  $Y_2^*$  – (2),  $Y_3^*$  – (3),  $Y_4^*$  – (4),  $Y_5^*$  – (5).

### Список использованных источников

1. Кузьменко, А. М. Твердеющая закладка при отработке рудных крутых залежей в сложных горно-геологических условиях / А. М. Кузьменко, М. В. Петлованный, В. Ю. Усатый. – Днепрпетровск: НГУ, 2004. – 140 с.
2. Битимбаев, М. Ж. Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых / М. Ж. Битимбаев, Л. А. Крупник, Ю. Н. Шапошник. – Алматы: АУЗ Казахстан, 2012. – 624 с.
3. Гаркушин, П. К. Исследования и выбор составов твердеющей закладки для калийных рудников Прикарпатья: дис. ... канд. техн. наук / П. К. Гаркушин. – Л., 1972. – 179 с.
4. Туляев, С. Х. Закладочные бесцементные твердеющие смеси на основе техногенного сырья: дис. ... канд. техн. наук / С. Х. Туляев. – Киев, 1989. – 350 с.
5. Чулкова, И. Л. Автоматизированное проектирование составов бетонных смесей / И. Л. Чулкова, Т. А. Санькова. – Омск: СибАДИ, 2009. – 120 с.
6. Вершинин, В. И. Планирование и математическая обработка результатов химического эксперимента. – Омск: Изд-во ОмГУ, 2005. – 216 с.
7. Корнеева, Е. В. Бесцементные закладочные смеси на основе активированных шлаков сталеплавильного производства: дис. ... канд. техн. наук / Е. В. Корнеева. – Новосибирск, 2011. – 161 с.
8. Смешанные гипсомагнезиальные материалы / Н. Х. Белоус [и др.] // Технологии бетонов. – 2018. – № 5–6. – С. 24–30.
9. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1976. – 386 с.
10. Гринфельд, Г. М. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / Г. М. Гринфельд, А. В. Моисеев. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУВПО «Кн. АГТУ», 2014. – 76 с.
11. Формулы математической статистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://math.semestr.ru/corel/fisher.php>
12. Барабанщиков, Ю. Г. Суперпластификатор С-3 и его влияние на технологические свойства бетонных смесей / Ю. Г. Барабанщиков, М. В. Комаринский // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 6 (21). – С. 58–69.

### References

1. Kuzmenko O. M., Petlovanniy M. V., Usaty V. Yu. *Hardening backfill during mining of ore steep deposits in difficult mining and geological conditions*. Dnepropetrovsk, National Technical University «Dnipro Polytechnic», 2004. 140 p. (in Russian).
2. Bitimbaev M. Zh., Krupnik L. A., Shaposhnik Yu. N. *Theory and practice of backfilling in the development of mineral deposits*. Almaty, AVUZ Kazakhstan, 2012. 624 p. (in Russian).

3. Garkushin P. K. *Research and selection of compositions of hardening backfills for potash mines of the Carpathian*. Leningrad, 1972. 179 p. (in Russian).
4. Tulyaev S. Kh. *Backfilling cement-free hardening mixtures based on technogenic raw materials*. Kiev, 1989. 350 p. (in Russian).
5. Chulkova I. L., Sankova T. A. *Automated design of concrete mixes*. Omsk, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), 2009. 120 p. (in Russian).
6. Vershinin V. I., Pertsev N. V. *Planning and Mathematical Processing of the Results of a Chemical Experiment*. Omsk, Omsk State University, 2005. 216 p. (in Russian).
7. Korneeva E. V. *Cement-free filling mixtures based on activated steelmaking slags*. Novosibirsk, 2011. 161 p. (in Russian).
8. Belous N. Kh., Rodtsevich S. P., Opanasenko O. N., Krut'ko N. P., Shevchuk V. V. Mixed gypsum-magnesia materials. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technology], 2018, no. 5–6, pp. 24–30 (in Russian).
9. Schenck H. *Theories of Engineering Experimentation*. Mc Graw Hill., 1961. 239 p.
10. Grinfeld G. M., Moiseev A. V. *Methods of optimization of the experiment in chemical technology*. Komsomolsk on the Amur, FSBEHVP "Book. ASTU", 2014. 76 p. (in Russian).
11. *Formulas of mathematical statistics*. Available at: <https://math.semestr.ru/corel/fisher.php>.
12. Barabanshchikov Yu. G., Komarinskii M. V. Superplasticized technological properties of concrete mixtures. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii = Construction of Unique Buildings and Structures*, 2014, no. 6 (21), pp. 58–69 (in Russian).

### Информация об авторах

*Белоус Наталия Хасеньевна* – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [belous2788247@yandex.ru](mailto:belous2788247@yandex.ru)

*Родцевич София Павловна* – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [rodtsevich@igic.bas-net.by](mailto:rodtsevich@igic.bas-net.by)

*Опанасенко Ольга Николаевна* – д-р хим. наук, зав. лаб. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [ionch@igic.bas-net.by](mailto:ionch@igic.bas-net.by)

*Крутько Николай Павлович* – академик, д-р хим. наук, профессор, зав. отделом. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [krutko@igic.bas-net.by](mailto:krutko@igic.bas-net.by)

*Шевчук Вячеслав Владимирович* – член-корреспондент, д-р хим. наук, зав. отделом. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [shevchukslava@rambler.ru](mailto:shevchukslava@rambler.ru)

*Дударев Дмитрий Евгеньевич* – мл. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь).

### Information about the authors

*Natalia Ch. Belous* – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [belous2788247@yandex.ru](mailto:belous2788247@yandex.ru)

*Sofia P. Rodtsevich* – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [rodtsevich@igic.bas-net.by](mailto:rodtsevich@igic.bas-net.by)

*Olga N. Opanasenko* – D. Sc. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [ionch@igic.bas-net.by](mailto:ionch@igic.bas-net.by)

*Nikolay P. Krutko* – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Department. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [krutko@igic.bas-net.by](mailto:krutko@igic.bas-net.by)

*Viacheslav V. Shevchuk* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Chemistry), Head of the Department. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [shevchukslava@rambler.ru](mailto:shevchukslava@rambler.ru)

*Dmitry E. Dudarev* – Junior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).