

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Б.Н.Сатбаев¹, А.И. Кокетаев^{1*}, Н.Т. Шалабаев², А.Б. Сатбаев¹, А.Х. Нурумгалиев²

¹Астанинский филиал РГП «Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан», Астана, Казахстан,

²Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан,
e-mail: aik53@mail.ru

В статье предложены методы экспериментально-статистического моделирования и оптимизации составов высокотемпературных материалов.

Для эффективного проведения исследований при разработке новых составов огнеупоров использовались методы математического моделирования, статистической обработки информации экспериментальных данных.

При моделировании разработки составов огнеупорных материалов предложен метод регрессионного анализа. Это статистический аналитический метод, позволяющий вычислить функцию одной зависимой переменной от одной или нескольких независимых переменных. Используя регрессионный анализ, можно моделировать зависимость между выбранной технической характеристикой огнеупорных материалов от компонентов, входящих в состав разрабатываемого огнеупорного материала.

Результаты математического моделирования представлены на примере одного состава, приведено также сравнение расчетных результатов с экспериментальными.

С помощью математического моделирования состава шихты высокотемпературных материалов были спрогнозированы технические характеристики готовой продукции. Применение этого метода даст возможность оптимизировать процесс разработки рецептур огнеупоров с заданными характеристиками, что позволит повысить эффективность процесса получения огнеупорных материалов с заданными параметрами.

Ключевые слова. огнеупорные и высокотемпературные материалы, огнеупорность, математическое моделирование, регрессия, прикладные программы, оптимизация, параметры оптимизации.

MODELING TECHNICAL CHARACTERISTICS OF FIRE-RESISTANT MATERIALS

B.N. Satbaev¹, A.I. Koketaev^{1*}, N.T. Shalabaev², A.B. Satbaev¹, A.Kh Nurumgaliyev²

¹Astana branch of the RSE “National Center for Integrated Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan”, Astana, Kazakhstan,

²Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan,
e-mail: aik53@mail.ru

The article proposes methods for experimental-statistical modeling and optimization of the compositions of high-temperature materials.

To effectively conduct research in the development of new compositions of refractory materials, methods of mathematical modeling and statistical processing of experimental data were used.

When modeling the development of compositions of refractory materials, a regression analysis method is proposed. This is a statistical analytical method that allows you to calculate the function of one dependent variable on one or more independent variables. Using regression analysis, it is possible to model the relationship between the selected technical characteristics of refractory materials and the components that make up the refractory material being developed.

The results of mathematical modeling are presented using the example of one composition; a comparison of the calculated results with the experimental ones is also given.

Using mathematical modeling of the composition of the charge of high-temperature materials, the technical characteristics of the finished product were predicted. The use of this method will make it possible to optimize the process of developing refractory formulations with given characteristics, which will increase the efficiency of the process of obtaining refractory materials with given parameters.

Keywords: refractory and high-temperature materials, fire resistance, mathematical modeling, regression, application programs, optimization, optimization parameters.

ОТҚА ТӨЗІМДІ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ТЕХНИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН МОДЕЛЬДЕУ

Б.Н. Сәтбаев¹, А.И. Көкетаев^{1*}, Н.Т. Шалабаев², А.Б. Сәтбаев¹, А.Х.Нұрымғалиев²

¹«Қазақстан Республикасының минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу ұлттық орталығы»

РМК Астана филиалы, Астана қ., Қазақстан,

²Қарағанды индустриалды университеті, Теміртау қ. Қазақстан,

e-mail: aik53@mail.ru

Мақалада жоғары температуралы материалдардың композицияларын тәжірибелік-статистикалық модельдеу және оңтайландыру әдістері ұсынылған.

Отқа төзімді материалдардың жаңа композицияларын жасауда зерттеулерді тиімді жүргізу үшін тәжірибелік мәліметтерді математикалық модельдеу және статистикалық өңдеу әдістері қолданылды.

Отқа төзімді материалдар композицияларының дамуын модельдеу кезінде регрессиялық талдау әдісі ұсынылады. Бұл бір немесе бірнеше тәуелсіз айнымалылар бойынша бір тәуелді айнымалының функциясын есептеуге мүмкіндік беретін статистикалық аналитикалық әдіс. Регрессиялық талдауды пайдалана отырып, отқа төзімді материалдардың таңдалған техникалық сипаттамалары мен әзірленетін отқа төзімді материалды құрайтын компоненттер арасындағы байланысты модельдеуге болады.

Математикалық модельдеу нәтижелері бір композицияның мысалында берілген, есептелген нәтижелердің эксперименттік нәтижелермен салыстыруы да келтірілген.

Жоғары температуралы материалдардың шихтасының құрамын математикалық модельдеуді пайдалана отырып, дайын өнімнің техникалық сипаттамалары болжалады. Бұл әдісті қолдану берілген сипаттамалары бар отқа төзімді құрамдарды жасау процесін оңтайландыруға мүмкіндік береді, бұл берілген параметрлері бар отқа төзімді материалдарды алу процесінің тиімділігін арттырады.

Түйін сөздер: отқа төзімді және жоғары температураға төзімді материалдар, отқа төзімділік, математикалық модельдеу, регрессия, қолданбалы бағдарламалар, оңтайландыру, оңтайландыру параметрлері.

Введение. Развитие металлургической промышленности невозможно без высококачественных огнеупорных материалов, используемых в тепловых агрегатах металлургических производств, где предъявляются жесткие требования по их физико-химическим и техническим характеристикам.

Разработка новых составов огнеупорных материалов связана с трудоемкой работой по приготовлению лабораторных образцов исследуемых составов, их термическим, механическим, химическим воздействиям [1-5]. При этом состав этих изделий многокомпонентный и требует проведения испытаний большого числа составов разрабатываемых материа-

лов. Так если мы исследуем влияние n компонентов на качественный состав огнеупорной смеси и каждый компонент принимает всего два значения, то для изучения влияния всех компонентов и их взаимодействий на технические характеристики разработанного состава, то необходимо перебрать все возможные комбинации значений компонентов смеси, совокупность которых составит полный факториальный план. Количество таких комбинаций вычисляется по формуле: $N=2^n$, где n - количество двухуровневых компонентов. Следовательно, число опытов, проводимых по полному факториальному плану, резко возрастает с увеличением числа компонентов огнеупорной смеси. Если учитывать, что для до-

стоверности результатов опыта необходимо проводить проверку одной комбинации несколько раз, то можно ожидать высокую стоимость проведения таких экспериментальных работ.

Материалы и методы. Как следует из анализа вопросов оптимизации и управления химико-технологических процессов их исследование проводится с помощью создания различных моделей. Это диктуется тем, что не всегда имеется возможность детального изучения механизма и физико-химической сущности технологических процессов, которые нужны для создания детерминированных моделей. В этих случаях разрабатывают эмпирические модели с применением статистических методов, которые при неизвестном механизме, протекающих в объекте процессов, дают возможность исследовать зависимость реакции системы на изменение ее входных параметров [6-9].

С целью эффективного проведения опытов для разработки новых составов огнеупоров нами использованы методы математического моделирования со статистической обработкой экспериментальных данных.

При моделировании для разработки составов огнеупорных материалов воспользуемся регрессионным анализом. Это статистический и аналитический метод, позволяющий вычислить функцию одной зависимой переменной от одной или нескольких независимых переменных. Используя регрессионный анализ, можно смоделировать и найти зависимость между выбранной технической характеристикой огнеупорных материалов и компонентов, входя-

щих в их состав.

Целями оптимизации могут быть следующие характеристики: огнеупорность, °С; термостойкость по количеству теплосмен; прочность при сжатии и изгибе, Мпа, и.т.д.

Критерием для оптимизации высокотемпературных материалов выбираем огнеупорность. В то же время, в зависимости от объекта применения огнеупорных материалов критериями оптимизации (параметрами оптимизации) могут быть разные характеристики. Так, для применения во вращающихся печах - главным критерием будет истираемость; в электросталеплавильных печах - шлакоустойчивость, количество теплосмен и т.д.

При разработке оптимальной рецептуры новых огнеупорных материалов качество конечной продукции будем определять следующими выходными параметрами: огнеупорность y_1 , °С; термостойкость y_2 , количество теплосмен; прочность при сжатии y_3 , МПа; прочность при изгибе y_4 , МПа.

Факторами, определяющими свойства огнеупоров, являются химический состав основных компонентов, количество и свойства связующих элементов, дисперсность компонентов, качество смешивания, температура реакции и т.д.

Каждый фактор может принимать одно из нескольких возможных значений, которые называются уровнями. При этом примем, что каждый фактор имеет определенной количество уровней.

Составляющие компоненты, определяющие технические характеристики высокотемпературных материалов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Составы огнеупорных материалов и результаты испытаний

Компонент состава, %	Обозначение	Область определения
1	2	3
Сульфат магния	X1	4,5-5
Алюминий	X2	1,6-2
Глина огнеупорная	X3	58-61
Декстрин	X4	0,7-1
Шамот	X5	32-34,3

Функция оптимизации:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \quad (1)$$

В таблице 1 в графе 3 приведены диапазоны ва-

рирования компонентов в серии опытов для высокотемпературных материалов

Для определения оптимальных составов высокотемпературных материалов используется уравнение регрессии [10]:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \quad (2)$$

Необходимо соблюдать условие, что для вычисления коэффициентов регрессии число проводимых опытов N должно быть хотя бы на 1 больше числа компонентов, т.е. соблюдался принцип насыщенности плана.

Результаты и обсуждение. Для проведения моделирования используем экспериментальные данные получения составов огнеупорных материалов и их огнеупорность, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Взаимосвязь параметров и влияющих факторов для получения огнеупорных материалов

Состав	Эксперименты					
	1	2	3	4	5	6
Сульфат магния	5	4	4,5	5	4,5	4,6
Алюминий	2	1,7	1,5	2	1,8	1,6
Глина огнеупорная	58	60	59	59	60	61
Декстрин	0,7	1	0,9	0,9	1	0,8
Шамот	34,3	33,3	34,1	33,1	32,7	32
Огнеупорность, °С	1850	1850	1830	1830	1820	1810

Данные таблицы 2 являются исходными для получения уравнение регрессии с помощью прикладных приложений Microsoft Office Exel для параметра огнеупорность:

$$y_1 = 7657 - 103,6 * x_1 + 0 * x_2 - 61,3 * x_3 - 111 * x_4 - 48,3 * x_5 \quad (3)$$

С целью определения оптимального состава синтезированного огнеупорного материала примем уравнение регрессии в качестве целевой функции:

$$y_1 = 7657 - 103,6 * x_1 + 0 * x_2 - 61,3 * x_3 - 111 * x_4 - 48,3 * x_5 \rightarrow \max \quad (4)$$

При ограничениях:

$$4.5 \leq x_1 \leq 5 \quad (5)$$

$$1.6 \leq x_2 \leq 2$$

$$58 \leq x_3 \leq 61$$

$$0.7 \leq x_4 \leq 1$$

$$32 \leq x_5 \leq 34.3$$

$$\sum_{i=1}^5 X_i = 100$$

Необходимо найти оптимальное решение, т.е. допустимый набор значений переменных решения, оптимизирующий целевую функцию данной модели.

Воспользуемся инструментом, встроенным в стандартный пакет прикладных программ Microsoft

Office Exel для решения задач оптимизации, которая использует следующие команды: Поиск решения («Данные» - «Анализ») – рассчитывает оптимальную величину, учитывая переменные и ограничения. Значения, полученные в результате решения оптимизационной задачи приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты решения

x_1	4,5
x_2	2
x_3	58,5
x_4	0,7
x_5	34,3

При этом составе компонентов шихты огнеупорность будет иметь значение (целевая функция) $y_1=1870\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для того, чтобы определить влияние того или иного компонента огнеупорной массы воспользуемся понятием коэффициента корреляции.

Как известно [11], коэффициент корреляции, r , представляет собой как силу, так и направление связи между независимой и зависимой переменными.

Значения r находятся в диапазоне между -1.0 и +1.0. Когда r имеет положительное значение, связь между x и y является положительной, а когда значение r отрицательно, связь также отрицательна. Коэффициент корреляции, близкий к нулевому значению, свидетельствует о том, что между x и y связи не существует.

Рассчитаем коэффициент для огнеупорности исследуемых составов от каждого из компонентов по формуле:

$$r = \frac{n * \sum (x_i * y_i) - (\sum x_i * \sum y_i)}{\sqrt{[n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] * [n * \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (6)$$

где X_i — значения переменной X; Y_i — значения переменной Y; n - число экспериментов.

Рассчитанные по этой формуле коэффициенты корреляции огнеупорности Y_i от X_i сведены в таблицу 4:

Таблица 4 – коэффициенты корреляции огнеупорности от компонентов состава

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
r	-0,1	0,39	-0,65	-0,089	0,76

Из этой таблицы видно, что наиболее сильно влияет на показатель огнеупорности коэффициент при переменной x_3 x_5 , т.е. компонент «Глина огнеупорная» и «Шамот».

Теперь с помощью надстройки «Поиск решения» программы Microsoft Office Exel определим при каких значениях влияющих переменных целевая функция будет принимать нужное значение огнеупорности разрабатываемого высокотемператур-

ного материала.

С этой целью будем приравнивать целевую функцию температурам 1810 $^{\circ}\text{C}$, 1820 $^{\circ}\text{C}$, 1830 $^{\circ}\text{C}$, 1850 $^{\circ}\text{C}$.

Результаты этого моделирования представлены в таблице 5, где для сравнения показаны экспериментальные данные и отклонение теоретических значений от экспериментальных.

Таблица 5 – Сравнительные данные расчетных и экспериментальных составов огнеупорных материалов

Компонент	1810 $^{\circ}\text{C}$			1820 $^{\circ}\text{C}$			1830 $^{\circ}\text{C}$			1850 $^{\circ}\text{C}$		
	Расч	Эксп	Откл	Расч	Эксп	Откл	Расч	Эксп	Откл	Расч	Эксп	Откл
X1	5,00	4,6	-0,087	5,00	4,5	-0,111	4,89	5	0,021	4,58	5	0,08
X2	1,84	1,6	-0,153	2,00	1,8	-0,111	2,00	2	0,000	1,98	2	0,01
X3	59,19	61	0,030	59,00	60	0,017	59,29	59	-0,005	59,84	58	-0,03
X4	1,00	0,8	-0,250	1,00	1	0,000	0,87	0,9	0,029	0,70	0,7	0,00
X5	32,97	32	-0,030	33,00	32,7	-0,009	32,94	33,1	0,005	32,90	34,3	0,04

На рисунке 1 графически показаны эти результаты для компонента x_1 - сульфата магния.

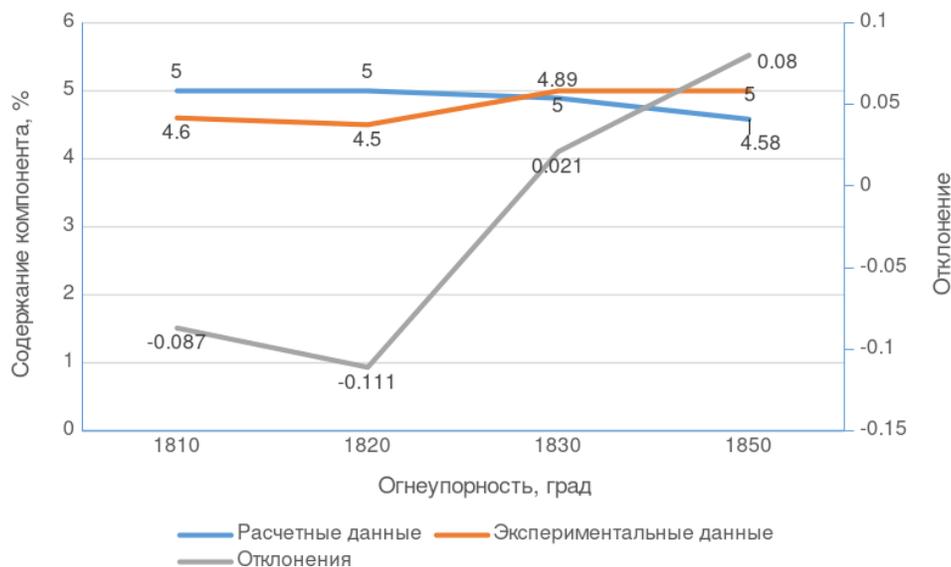


Рис. 1 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных содержания сульфата магния в составе огнеупорного материала

Как видно из диаграмм сходимость расчетных и экспериментальных данных составляет примерно $\pm 10\%$, что соответствует практике разработки огнеупорных материалов. Такие графики можно построить и для компонентов X2-X5.

Выводы. Таким образом, с помощью математического моделирования состава шихты высокотемпературных материалов были спрогнозированы технические характеристики готовой продукции. Применение этого метода даст возможность выявить оптимальные параметры и технологический режим

получения огнеупоров с заданными характеристиками. При этом в качестве целевой функции могут быть другие технологические характеристики огнеупорных материалов: термостойкость, количество теплосмен; прочность при сжатии, прочность при изгибе и т.д.

В целом с использованием вышеуказанного экспериментально-статистического метода разработки новых огнеупорных материалов позволит оптимизировать количество экспериментальных исследований и экономить материальные ресурсы.

Литература

1. Сатбаев Б.Н., Нухулы А., Свидерский А., Нуркенов О.А. Огнеупорные СВС-материалы и их применение в металлургии. - Павлодар. – 2008.- 276 с.
2. Кашеев И. Д., Земляной, К. Г. Производство огнеупоров. – Санкт-Петербург: Лань.- 2021. - 344 с.
3. Satbaev B.N., Koketaev, A.I., Aimbetova, É.O. et al Environmental Technology for the Integrated Disposal of Man-Made Wastes of the Metallurgical Industry: Self-Curing, Chemically Resistant Refractory Mass. Journal «Refractories and Industrial Ceramics.-2019.- Vol.6.-pp.64-68. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-6-64-68>
4. Satbaev B.N., Koketaev A.I., Aimbetova É.O., Berdikulova F.A., Shalabaev N.T., Satbaev A.B. Production of chemically resistant refractory concrete mixes from metallurgical waste and their physical and chemical properties. Refractories and Industrial Ceramics.- 2021.-Vol.61. -No.5.-pp. 484 - 486. <https://doi.org/10.1007/s11148-021-00507-6>
5. Satbaev B.N., Koketaev A.I., Aimbetova É.O., Berdikulova F.A., Shalabaev N.T., Satbaev A.B. Use of Aluminothermic Slags for Preparation of Chemically Stable Refractory Composite Materials. Refractories and Industrial Ceramics.- 2021.- Vol.62.,No.1.-pp.57-59.

DOI: 10.1007/s11148-021-00558-9

6. Азназарова С. Л., Кафаров В. В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа.-1985.- 327 с.
7. Кайрақбаев А.К., Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Исследование влияния Al_2O_3 на кислотостойкость и термостойкость кислотоупоров с применением регрессивного метода анализа. Новые огнеупоры.- 2015.- № 5. – стр.58-62.
8. Abdrakhimova E.S. Study of acid-resistant material properties based on nonferrous metallurgy waste using regression analysis. Refractories and Industrial Ceramics.-2016.- Vol. 56, No 5.-pp. 510-516.
9. Сатбаев Б.Н., Кокетаев А.И., Аймбетова Э.О., Шалабаев Н.Т., Сатбаев А.Б. Оптимизация составов магниезальных и переклазохромитовых высокотемпературных материалов. Промышленность Казахстана.- 2019.- № 3.- с.77-79.
10. Мюррей А. Эффективная работа в Microsoft Excel. ДМК Пресс, 2021 -276 с. ISBN 978-5-97060-4.
11. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. -М.: Наука.- 1986. - 544 с.

References

1. Satbaev B.N., Nuhuly A., Sviderskij A., Nurkenov O.A. Ogneupornye SVS-materialy i ih primeneniye v metallurgii. - Pavlodar. – 2008.- 276 s. [in Russian].
 2. Kashheev I. D., Zemljanoj , K. G. Proizvodstvo ogneuporov. – Sankt-Peterburg: Lan'.- 2021. - 344 s. [in Russian].
 3. Satbaev B.N., Koketaev, A.I., Aimbetova, É.O. et al Environmental Technology for the Integrated Disposal of Man-Made Wastes of the Metallurgical Industry: Self-Curing, Chemically Resistant Refractory Mass. Journal «Refractories and Industrial Ceramics.-2019.- Vol.6.-pp.64-68. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-6-64-68>
 4. Satbaev B.N., Koketaev A.I., Aimbetova É.O., Berdikulova F.A., Shalabaev N.T., Satbaev A.B. Production of chemically resistant refractory concrete mixes from metallurgical waste and their physical and chemical properties. Refractories and Industrial Ceramics.- 2021.-Vol.61. -No.5.-pp. 484 - 486. <https://doi.org/10.1007/s11148-021-00507-6>
 5. Satbaev B.N., Koketaev A.I., Aimbetova É.O., Berdikulova F.A., Shalabaev N.T., Satbaev A.B. Use of Aluminothermic Slags for Preparation of Chemically Stable Refractory Composite Materials. Refractories and Industrial Ceramics.- 2021.-Vol.62.,No.1.-pp.57-59.
- DOI: 10.1007/s11148-021-00558-9
6. Aznazarova S. L., Kafarov V. V. Optimizaciya jeksperimenta v himii i himicheskoj tehnologii. 2-e izd., pererab. i dop. - M.: Vysshaja shkola.-1985.- 327 s. [in Russian].
 7. Kajrakbaev A.K., Abdrahimov V.Z., Abdrahimova E.S. Issledovanie vlijaniya Al_2O_3 na kislotostojkost' i termostojkost' kislotouporov s primeneniem regressivnogo metoda analiza. Novye ogneupory.- 2015.- № 5. – str.58-62. [in Russian].
 8. Abdrakhimova E.S. Study of acid-resistant material properties based on nonferrous metallurgy waste using regression analysis. Refractories and Industrial Ceramics.-2016.- Vol. 56, No 5.-pp. 510-516.
 9. Satbaev B.N., Koketaev A.I., Ajmbetova Je. O., Shalabaev N.T., Satbaev A.B. Optimizaciya sostavov magnezial'nyh i pereklazohromitovyh vysokotemperaturnyh materialov. Promyshlennost' Kazahstana.- 2019.- № 3.- с.77-79. [in Russian].
 10. Mjurrej A. Jeffektivnaja rabota v Microsoft Exel. DМК Press, 2021 -276 s. ISBN 978-5-97060-4. [in Russian].
 11. Bronshtejn I.N., Semendjaev K.A. Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhihsja vtuzov. -M.: Nauka.- 1986. - 544 s. [in Russian].

Сведения об авторах

Сатбаев Б.Н. - д.т.н., проф., директор Астанинского филиала РГП «Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан», Астана, Казахстан, e-mail: fnc-astana@mail.ru;

Кокетаев А.И. - д.т.н., снс, Астанинский филиал РГП «Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан», Астана, Казахстан, e-mail: aik53@mail.ru;

Шалабаев Н.Т.- Phd докторант Карагандинского индустриального университета, Темиртау, Казахстан, e-mail: fnc-astana@mail.ru;

Сатбаев А.Б. -магистр, ведущий инженер Астанинского филиала РГП «Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан», Астана, Казахстан, e-mail: fnc-astana@mail.ru;

Нурумгалиев А.Х. -д.т.н., проф., Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Республика Казахстан, e-mail: as_nurum@mail.ru.

Information about the author

Satbaev B.N. - Doctor of Technical Sciences, Prof., Director of the Astana branch of the RSE “National Center for Integrated Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan”, Astana, Kazakhstan, e-mail: fnc-astana@mail.ru;

Koketaev A.I. - Doctor of Technical Sciences, Senior Scientist, Astana branch of the RSE “National Center for Integrated Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan”, Astana, Kazakhstan, e-mail: aik53@mail.ru;

Shalabaev N.T. - doctoral student at Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: fnc-astana@mail.ru;

Satbaev A.B. - master’s degree, leading engineer of the Astana branch of the RSE “National Center for Integrated Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan”, Astana, Kazakhstan, e-mail: fnc-astana@mail.ru;

Nurumgaliev A.Kh. - Doctor of Technical Sciences, Professor, Karaganda Industrial University, Temirtau, Republic of Kazakhstan e-mail: as_nurum@mail.ru.