Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-413-423 Оригинальная статья/Research article
УДК 620.178.6 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Установление оптимальных условий выщелачивания ванадия из золошлаковых отходов теплоэлектростанций

Анна В. Троеглазова [1] troeglasovaa@mail.ru 0000-0001-9953-3576
Сана К. Кабдрахманова [2] sanaly33@mail.ru 0000-0001-5760-2967
Альмира М. Жилкашинова [3] almira_1981@mail.ru 0000-0003-0948-2280

1 Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плахотного, 10, г. Новосибирск, 630108, Россия
2 Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, г. Алматы,
3 050013, Республика Казахстан
НАО «Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова», ул. Казахстан, 55, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан

Аннотация. В данном исследовании демонстрируется возможность извлечения ванадия из золошлаковых отходов теплоэлектростанций в сочетании с планированием эксперимента путем сернокислотного растворения с добавлением хлорида натрия. Условия кислотного растворения были оптимизированы с использованием метода пятифакторного вероятностно-детерминированного планирования эксперимента на пяти уровнях. Одновременно осуществляли варьирование значений следующих факторов: концентрацию серной кислоты изменяли в диапазоне (0,5-2,5) моль/дм^3; температуру процесса кислотного растворения поддерживали в диапазоне (25-70) °С; длительность процесса составляла (15-90) мин.; концентрацию хлорида натрия варьировали в интервале (0,5-15,0) г/ дм^3; объем хлорида натрия изменяли в диапазоне (0,05-0,25) см^3. По результатам эксперимента, проведенного регрессионного и корреляционного анализа установлено значимое влияние всех пяти факторов на степень извлечения ванадия из золошлаковых отходов теплоэлектростанций. Оптимальными условиями извлечения ванадия, позволяющими достичь его количественного извлечения (96 % масс. и более) являются концентрация серной кислоты от 1,5 моль/дм^3, температура от 60 ºС, длительность процесса от 60 мин, концентрация хлорида натрия в растворе – (0,5-15,0) г/дм^3, объем добавки раствора хлорида натрия – 0,20 см^3. На основании установленных частных регрессионных зависимостей было выведено обобщенное уравнение Протодьяконова, методом корреляционного анализа и с применением коэффициента Стьюдента доказана его адекватность и высокая прогностическая способность. Полученные результаты могут быть применены при разработке методики выполнения измерений массовой доли ванадия в образцах золошлаковых отходов тепловых электростанций методом МС-ИСП и технологии извлечения ванадия из вторичного сырья тепловых электростанций

Ключевые слова: ванадий, вероятностно-детерминированное планирование эксперимента, выщелачивание, золошлаковые отходы теплоэлектростанций.

Establishing optimal conditions for vanadium leaching from ash and slag waste of thermal power plants

Anna V. Troyeglazova [1] troeglasovaa@mail.ru 0000-0001-9953-3576
Sana K. Kabdrahmanova [2] sanaly33@mail.ru 0000-0001-5760-2967
Almira M. Zhilkashinova [3] almira_1981@mail.ru 0000-0003-0948-2280

1 Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotny Street, Novosibirsk, 630108, Russian Federation
2 Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, 22, Satpayev Street, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan
3 East Kazakhstan University named after S. Amanzholov, 55, Kazakhstan Street, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan

Abstract. This study demonstrates the possibility of vanadium extraction from coal ash and slag waste of thermal power plants in combination with experimental design by means of sulfuric acid dissolution with the addition of sodium chloride. The conditions of acid dissolution were optimized using the method of five-factor probabilistic-deterministic experimental design at five levels. The following factors were simultaneously varied: the concentration of sulfuric acid was changed in the range of (0.5-2.5) mol/dm3; the temperature of the acid dissolution process was maintained in the range of (25-70) °C; the process duration was (15-90) min; the concentration of sodium chloride was varied in the range of (0.5-15.0) g/dm3; the volume of sodium chloride was changed in the range of (0.05-0.25) cm3. Based on the results of the experiment, the regression and correlation analysis, a significant effect of all five factors on the degree of vanadium extraction from coal ash and slag waste of thermal power plants was established. The optimal conditions for vanadium extraction, allowing for its quantitative extraction (96% by weight or more), are a sulfuric acid concentration of 1.5 mol/dm3, a temperature of 60 ºC, a process duration of 60 min, a sodium chloride concentration in the solution of 0.5-15.0 g/dm3, and a sodium chloride solution addition volume of 0.20 cm3. Based on the established partial regression dependencies, a generalized Protodyakonov equation was derived; its adequacy and high predictive ability were proven using correlation analysis and the Student's coefficient. The obtained results can be applied in the development of a methodology for measuring the mass fraction of vanadium in samples of ash and slag waste from thermal power plants using the ICP-MS method and a technology for extracting vanadium from secondary raw materials of thermal power plants.

Keywords: vanadium, probabilistic-deterministic experimental design, leaching, ash and slag waste from thermal power plants.

Для цитирования
Троеглазова А.В., Кабдрахманова С.К., Жилкашинова А.М. Установление оптимальных условий выщелачивания ванадия из золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 413–423. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-413-423

For citation
Troyeglazova A.V., Kabdrahmanova S.K., Zhilkashinova A.M. Establishing optimal conditions for vanadium leaching from ash and slag waste of thermal power plants. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 413–423. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-413-423

© 2026, Троеглазова А.В. и др. / Troyeglazova A.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В 2024 г. рынок ванадия оценивался в 13750 млн долл. США, тогда как к 2032 г. прогнозируется рост потребления металла в 52% благодаря его применению в сфере возобновляемых источников энергии при производстве ванадиевых окислительно-восстановительных проточных батарей, в строительстве и автомобилестроении в качестве легирующего компонента, в машиностроении для повышения прочности и твердости материалов, в электронике для обеспечения высокой электропроводности [1, 2] и т. д. Исследования показывают, что к 2030 г. на металлургическую промышленность будет приходиться до 54,8% мирового потребления ванадия, а на отрасль хранения энергии его доля увеличится с 17,3% в 2025 г. до 41,3% в 2030 г. [3]. Важнейшими производителями ванадия являются Китай, Южная Африка и Россия [4].

Наряду с широким потреблением ванадий является рассеянным элементом, содержание его в земной коре составляет 0,019%, при этом ванадий не встречается в свободном виде [3]. Основным сырьем для производства являются железные, урановые, медно-свинцово-цинковые, титаномагнетитовые и ильменит-магнетитовые руды, представляющие собой комплексные руды, содержащие до 90% всего ванадия, размещенного на территории России [4].

Потенциальным материалом для вторичной переработки с целью извлечения ванадия являются отходы обогащения титаномагнетитовых руд, ванадийсодержащие шлаки [5, 6], тяжелые фракции нефтепереработки [7].

В литературе описано извлечение ванадия из объектов техногенного происхождения (хвосты титаномагнетитовых руд, шлаки металлургического производства) путем окислительного обжига с добавлением хлорида натрия и карбоната натрия при температуре 950 ºС с последующим выщелачиванием ванадия в водной или кислой среде. Степень извлечения аналита, установленная рентгенофлуоресцентным методом, составляет 74,8–91,9% [5].

Предложен способ извлечения ванадия из железных руд ГП «Каракалпакская ГСПЭ» путем окислительного обжига образцов с последующим кислотным или щелочным выщелачиванием аналита. Полученный после гидролиза оксид ванадия (V) используют для восстановления феррованадия и ванадия [6].

Цикл работ посвящен извлечению ванадия из металлургических отходов, характеризующимися высокой стойкостью к окислителям [7,–9]. Для решения проблемы низкой степени извлечения аналита авторами [7] предложено выщелачивание проводить при 10-минутном ультразвуковом воздействии с введением добавки озона, что позволяет повысить степень извлечения ванадия на 46,7%. Традиционно извлечение ванадия из ванадийных шлаков производства стали в конвертерах осуществляется путем обжига материала натрием с последующим водным выщелачиванием [8]. Для повышения степени извлечения аналита авторами [8] предложено проводить выщелачивания сначала в водной среде, затем в растворе серной кислоты. Такой подход позволил увеличить степень извлечения ванадия на 7,72% и достичь количественного извлечения 98,52%. Описан способ извлечения ванадия из высокохромистого ванадиевого шлака, образующегося в процессе плавки высокохромистого ванадий-титанового магнетита [9] путем кислотного выщелачивания из образцов после обжига кальцием. Оптимизацию условий осуществляли по четырем факторам – концентрация серной кислоты, температура процесса, длительность процесса и соотношение жидкой и твердой фаз. Повышение степени извлечения анализа до 89,12% достигается при концентрации серной кислоты 40%, температуре процесса 90 °С, продолжительности 3 ч, соотношении жидкости и твердого вещества 4:1 мл/г, скорости перемешивания 500 об/мин. Обязательным условием является предварительный обжиг высокохромистого ванадиевого шлака [9].

В качестве сырья для извлечения ванадия могут быть применены золы сжигания различных видов ископаемых топлив, в частности, мазутного топлива, каменных углей [10–14]. В процессе сжигания угля ванадий, присутствующий в исходном топливе, перераспределяется между выбросами и твердыми остатками сгорания – золой или шлаками [4]. А в связи с большим количеством зоотвалов и высокой токсичностью ванадия и его соединений (особенно соединений пятивалентного ванадия), его извлечение из золошлаковых отходов тепловых электростанций направлено на решение важнейшей экологической проблемы [4, 5].

Известны данные применения 1 моль/дм³ раствора серной кислоты с добавлением 0,04 моль/дм³ сульфита натрия для создания кислотно-восстановительной среды. Количественное извлечение ванадия достигается при температуре 80 °С и продолжительности процесса 30 минут [11]. Реакция выщелачивания ванадия в кислотно-восстановительной среде может быть описана уравнением (1).

$$V_2O_5+2H_2SO_4+Na_2SO_3 \rightarrow \rightarrow 2VOSO_4+Na_2SO_4+2H_2O \quad (1)$$

В роли реагента для спекания золы сернистых мазутов использовали карбонат натрия. На первом этапе процесса извлечения ванадия осуществляли подготовку трехкомпонентной смеси (зола: Na_2CO_3: вода = 100:(10 – 60): (35 – 55). Приготовленную смесь нагревали при температуре 110–120 °С в течение двух часов, а затем спекали в окислительной среде при температуре 600–800 °С. Выщелачивание ванадия из полученного спека осуществляли при температуре 95–100 °С при добавлении дистиллированной воды [13].

В качестве сырья для извлечения ванадия, никеля и цинка применена зола от сжигания топлива в котлах Эль-Криймат. Процесс проводили в три этапа – кислотное растворение золы, экстракционное концентрирование и извлечение аналитов, соосаждение ионов никеля и цинка. Кислотное растворение осуществляли при концентрации серной кислоты 180 г./л, 4% содержании оксида марганца (IV) в качестве окислителя и температуре процесса выщелачивания 80 ºС. Для экстракции использовали 3% раствор аламина 336 в керосине при pH 0,9 [14].

Авторами [15] в качестве реагентов для извлечения ванадия, германия и лития применены хлорид натрия, нитрат натрия и сульфат натрия. Оптимизация параметров выщаличивания осуществляли путем планирования эксперимента при рассмотрении следующих параметров: соотношение зола-уноса: соль, природа карбоновой кислоты, концентрация карбоновой кислоты и длительность процесса выщелачивания аналитов. По результатам эксперимента выявлено наиболее значимое влияние на результат соотношения золы и реагента, выведение математические модели для прогнозирования эксперимента. Установлено, что оптимальными параметрами извлечения аналитов являются применение 0,5 моль/дм^3 раствора лимонной кислоты, соотношение зола-уноса: карбонат натрия = 1:0,5, длительность процесса 60 мин.

Таким образом, высокое содержание ценных компонентов в отходах углепромышленности (хвостах, шламах, золошлаковых материалах) наряду с необходимостью решения проблемы по их накоплению обусловливает возможность применения их в качестве потенциального источника ценных компонентов, в том числе ванадия.

Цель работы – определение параметров количественного извлечения ванадия из золошлаковых отходов теплоэлектростанций с применением методологии многофакторного вероятностно-детерминированного планирования эксперимента.

Материалы и методы

Исследование проводили с использованием золошлаковых отходов (ЗШО), полученных на теплоэлектростанции (ТЭЦ) в процессе пылеугольного сжигания. После этого отходы транспортировали на золоотвал методом гидроудаления. При проведении эксперимента гидропульпу раствор пропускали через специальный лабораторный бумажный фильтр с маркировкой «синяя лента.

Полученную золу высушивали до постоянной массы в сушильном шкафу SNOL 67/350 (АО «Утеносэлектротехника», Литва) при температуре (105 ± 5) °С. Затем воздушно-сухой образец ЗШО измельчали до фракции 0,1 мм с использованием шаровой мельницы PULVERISETTE 6 (Китай) [20]. Фазовый анализ образца золы осуществляли на рентгеновском дифрактометре X´Pert PRO (PANanalitical, Нидерланды).

Выщелачивание ЗШО ТЭЦ осуществляли путем сернокислого растворения образца. Для этого в химический стакан объёмом 250 см^3 вносили 5,00 г предварительно подготовленного образца ЗШО. После этого добавляли 100 мл раствора серной кислоты квалификации хч (Компонент-реактив), а также раствор хлорида натрия квалификации чда (Компонент-реактив), объём и концентрация которого соответствовали данным, указанным в таблице 1. Роль добавки хлорида натрия заключается в разрушении минеральной матрицы ЗШО. Систему нагревали до заданной температуре в течение установленного времени (таблица 1), затем охлаждали до комнатной температуры, отфильтровывали через фильтр «синяя лента», аликвоту объёмом 2,00 см³ отбирали и переносили в мерную колбу на 100,0 см³. Затем в колбы добавляли дистиллированную воду до метки, тщательно перемешивали, чтобы получить однородный раствор, после чего измеряли интенсивность аналитического сигнала. Измерения проводили на масс-спектрометре Agilent 7500 (Agilent, США) в режиме непрерывного ввода водных растворов. Настройку параметров прибора проводили по рабочих рабочим растворам, приготовленных на основе государственного стандартного образца ионов ванадия (ГСО 7267–96) с концентрацией 1 мг/см³.

Для установления оптимальных условий сернокислотного выщелачивания был реализован комплекс исследований при одновременном варьировании пяти факторов [15–20].

Для этого одновременно варьировали пять факторов на пяти уровнях, значения которых представлены в таблице 1: фактор 1 – концентрация кислоты (моль/дм^3), фактор 2 – температура (°С), фактор 3 – длительность (мин), фактор 4 – концентрация хлорида натрия (г/дм^3), фактор 5 – объем хлорида натрия (см^3).

Таблица 1.

Варьируемые уровни факторов при оптимизации условий выщелачивания ванадия из образцов ЗШО ТЭЦ

Table 1.

Variable conditions for optimizing the leaching conditions of vanadium from ASW samples of thermal power plants

Фактор Factor	Уровни | Levels				
	1	2	3	4	5
1	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
2	25	30	50	60	70
3	15	30	45	60	90
4	0,5	2,5	5,0	10,0	15,0
5	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25

План эксперимента путем проведения 25 опытов представлен в виде план-матрицы в таблице 2 [16–23] с указанием кодированных значений уровней рассматриваемых факторов.

Таблица 2.

План-матрица пятифакторного планирования эксперимента выщелачивания ванадия из образцов ЗШО ТЭЦ

Table 2.

Five-factor design matrix for the experiment on vanadium leaching from samples of ASW TPP

№	Кодированные значения уровней | Coded values of levels				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	3	3	3	3
3	1	2	2	2	2
4	1	5	5	5	5
5	1	4	4	4	4
6	3	1	3	2	5
7	3	3	2	5	4
8	3	2	5	4	1
9	3	5	4	1	3
10	3	4	1	3	2
11	2	1	2	4	3
12	2	3	5	1	2
13	2	2	4	3	5
14	2	5	1	2	4
15	2	4	3	5	1
16	5	1	5	3	4
17	5	3	4	2	1
18	5	2	1	5	3
19	5	5	3	4	2
20	5	4	2	1	5
21	4	1	4	5	2
22	4	3	1	4	5
23	4	2	3	1	4
24	4	5	2	3	1
25	4	4	5	2	3

Для оценки коэффициентов регрессии применяли метод наименьших квадратов, для вывода регрессионного уравнения (1) – метод Крамера.

$$y = a_0 + a_1 \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i + a_2 \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i^2 \qquad (2)$$

где y – числовое значение параметра отклика сигнала аналитического сигнала – степень извлечения ванадия, %; n – число уровней варьируемых факторов (n = 5); x – значения выбранных факторов заданного уровня; a_i – численные коэффициенты (коэффициенты регрессии).

Значимость каждого изученного фактора оценивали методом корреляционного анализа и путем сравнения рассчитанного значения коэффициента Стьюдента с его критическим значением. Коэффициент множественной нелинейной корреляции R оценивали по формуле [16–23]:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-1)\cdot\sum\left(Y_Э - Y_T\right)^2}{(N-K-1)\cdot\sum\left(Y_Э - Y_{ср}\right)^2}} \qquad (3)$$

где N – число описываемых точек (уровней); K – число действующих факторов; $Y_Э$ – экспериментально полученные результаты; Y_T – теоретически рассчитанные результаты.

При оценке коэффициента корреляции одного фактора значение K принимали равным единице, поскольку рассматривали влияние только одно фактора. При установлении коэффициента корреляции при учете всех изучаемых факторов значение K = 5.

Значимость коэффициента корреляции t_R для каждого фактора устанавливали по формуле [16–23]:

$$t_R = \frac{R\sqrt{N-K-1}}{1-R^2} > 2 \qquad (4)$$

Превышение коэффициента корреляции t_R критического значения коэффициента Стьюдента (2) свидетельствует о значимости влияния каждого из рассматриваемых факторов на степень извлечения аналита и обусловливает учет регрессионных уравнений при выводе обобщенного уравнения Протодьяконова (4).

$$Y_П = \frac{\prod_{i=1}^{n} Y_i}{Y_{ср}^{n-1}} \qquad (5)$$

где, $Y_П$ – обобщенная функция; Y_i – частная функция; $\prod_{i=1}^{n}$ – произведение всех частных

функций; $Y_{ср}$ – общее среднее всех учитываемых значений обобщенной функции в степени, на единицу меньшей числа частных функций.

Результаты и обсуждение

Результаты предварительного фазового анализа представлены на рисунке 1.

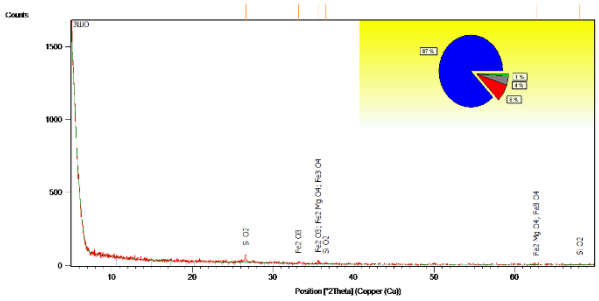


Рисунок 1. Результаты фазового анализа образца золошлаковых отходов теплоэлектростанций

Figure 1. Results of phase analysis of a sample of ash and slag waste from thermal power plants

По результатам фазового анализа установлено, что основу исследуемого образца ЗШО ТЭЦ составляют гематит Fe_2O_3–87%, кварц SiO_2–8%, магнетит Fe_3O_4–4%, железо-магниевая шпинель Fe_2MgO_4–1%, при этом ванадий является сопутствующим элементом железосодержащий руд [4]. Соединения железа Fe_2O_3 и Fe_3O_4 растворяются в растворе серной кислоты с образованием сульфатов двух- и трехвалентного железа (6, 7).

$$Fe_2O_3+3H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3+3H_2O \quad (6)$$

$$Fe_3O_4+4H_2SO_4 \rightarrow FeSO_4+Fe_2(SO_4)_3+4H_2O \quad (7)$$

Феррит магния в растворе серной кислоты подвергается разложению с образованием сульфатов магния и трехвалентного железа (8).

$$MgFe_2O_4+4H_2SO_4 \rightarrow \rightarrow MgSO_4+Fe_2(SO_4)_3+4H_2O \quad (8)$$

Хлорид-ионы, присутствующие в системе благодаря введению добавки раствора хлорида натрия способствуют полному разложению железо-магниевой шпинели за счет восстановления Fe^{3+} (9) и окисляют соединения ваналия до степени окисления +5.

$$Fe^{3+}+4Cl^- \rightarrow [FeCl_4]^- \quad (9)$$

Результаты анализа растворов, полученных после кислотного растворения золошлаковых отходов ТЭЦ раствором серной кислоты с добавление раствора хлорида натрия, представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Экспериментальные значения степеней извлечения ванадия

Table 3.

Experimental values of vanadium extraction degrees

№	Натуральные значения уровней Natural values of levels					R_V, %.
	1	2	3	4	5	
1	0,5	25	15	0,5	0,05	61,1
2	0,5	50	45	5,0	0,15	74,3
3	0,5	30	30	2,5	0,10	54,8
4	0,5	70	90	15,0	0,25	98,4
5	0,5	60	60	10,0	0,20	97,6
6	1,5	25	45	2,5	0,25	74,1
7	1,5	50	30	15,0	0,20	93,1
8	1,5	30	90	10,0	0,05	83,8
9	1,5	70	60	0,5	0,15	74,6
10	1,5	60	15	5,0	0,10	71,9
11	1,0	25	30	10,0	0,15	62,1
12	1,0	50	90	0,5	0,10	74,9
13	1,0	30	60	5,0	0,25	90,0
14	1,0	70	15	2,5	0,20	86,4
15	1,0	60	45	15,0	0,05	86,4
16	2,5	25	90	5,0	0,20	73,7
17	2,5	50	60	2,5	0,05	74,6
18	2,5	30	15	15,0	0,15	68,2
19	2,5	70	45	10,0	0,10	94,9
20	2,5	60	30	0,5	0,25	99,6
21	2,0	25	60	15,0	0,10	93,1
22	2,0	50	15	10,0	0,25	91,0
23	2,0	30	45	0,5	0,20	86,4
24	2,0	70	30	5,0	0,05	77,6
25	2,0	60	90	2,5	0,15	91,9

При анализе данных таблицы 3 установлено, что в зависимости от сочетания условий проведения процесса сернокислотного выщелачивания степени извлечения ванадия находятся в широком диапазоне от 54,1% масс. до 99,6% масс. Степени извлечения ванадия 96% масс. и выше удалось достичь при концентрации серной кислоты 0,5 моль/дм^3 и 2,5 моль/дм^3; температуре процесса кислотного растворения не ниже 60 °С, длительности от 30 мин, концентрации хлорида натрия в диапазоне от 0,5 г/дм^3 до 15,0 г/дм^3 и объеме раствора хлорида натрия 0,20–0,25 см^3. Степень извлечения ванадия уменьшается преимущественно вследствие снижения длительности и температуры процесса кислотного растворения, что может быть обусловлено недостаточной степенью воздействия реагентов на минеральную матрицу.

Для построения точечных графиков и получения регрессионных уравнений с целью установления влияния совокупности всех рассматриваемых факторов на результат данные, представленные в таблице 3, преобразованы в сводную таблицу 4, в которой Y_i представляют собой средние арифметические значения степеней извлечения ванадия, установленные для каждого фактора и каждого уровня в отдельности. Например, при расчете значения усредненной степени извлечения для первого фактора и первого уровня в таблице 4 учитывали данные

экспериментов № 1–5; тогда как при расчете значения усредненной степени извлечения для третьего фактора и второго уровня в таблице 4 учитывали данные экспериментов № 3, 7, 11, 20 и 24.

Среднее арифметическое значение степеней извлечения, рассчитанных для пяти уровней каждого фактора в отдельности равно общему среднему для рассматриваемого фактора. Установлено, что при условии одновременного влияния всех рассматриваемых факторов значение общего среднего составило 81,38% масс. Равенство значений общего среднего для различных факторов является критерием отсутствия ошибки в расчетах (таблица 4).

Обработка сводных экспериментальных данных (таблица 4) позволила построить графиков частных зависимостей. Они демонстрируют, как изменение каждого параметра процесса сказывается на степени извлечения ванадия, при этом все остальные факторы в модели учтены (рисунки 1–5).

Графики зависимости степеней извлечения ванадия от значений всех рассматриваемых факторов имеют линейную форму и описываются уравнениями (5–9). При увеличении значений рассматриваемых факторов степень извлечения аналита незначительно увеличивается (рисунки 1–5).

$$Y_1 = 3,5817x_1 + 76,009 \quad (10)$$

$$Y_2 = 0,3311x_2 + 65,819 \quad (11)$$

$$Y_3 = 0,1322x_3 + 75,038 \quad (12)$$

$$Y_4 = 0,7872x_4 + 76,186 \quad (13)$$

$$Y_5 = 74,707x_5^2 + 70,176 \quad (14)$$

Для оценки того, как изученные параметры влияют на степень извлечения ванадия, применен критерий Стьюдента. Расчетный коэффициент множественной корреляции t_R сопоставляли с критическим значением (2,0) при доверительной вероятности 95%.

Таблица 4.

Экспериментальные значения частных функций определения ванадия

Table 4.

Experimental values of partial functions for determining vanadium

№	Степени извлечения ванадия по уровням (Yi), % Vanadium extraction rates by levels (Yi), %					Общее среднее, % Overall average, %
	1	2	3	4	5	
1	77,24	79,97	79,51	88,01	82,18	81,38
2	72,82	76,63	81,58	89,48	86,39	81,38
3	75,71	77,45	83,21	86,00	84,54	81,38
4	79,30	76,37	77,50	85,89	87,86	81,38
5	76,72	77,91	74,21	87,45	90,62	81,38

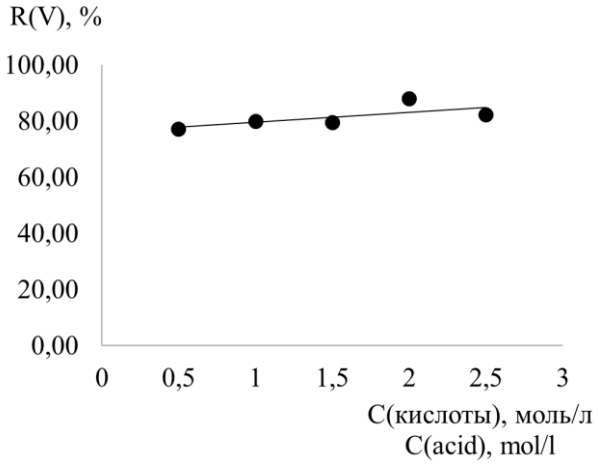


Рисунок 2. Частная зависимость степеней извлечения ванадия от концентрации серной кислоты

Figure 2. Particular dependence of the degree of extraction of vanadium on the concentration of sulfuric acid

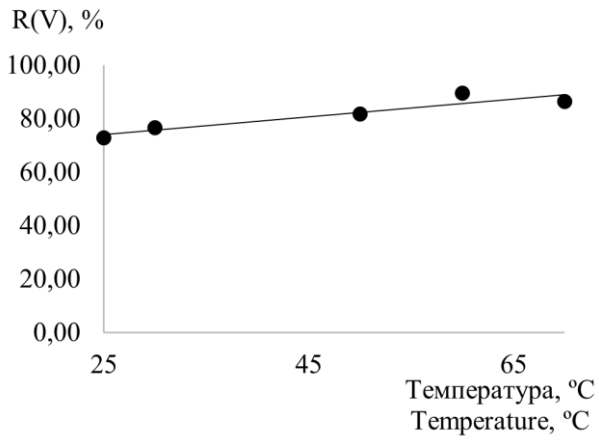


Рисунок 3. Частная зависимость степеней извлечения ванадия от температуры процесса

Figure 3. Particular dependence of the degree of vanadium extraction on the process temperature

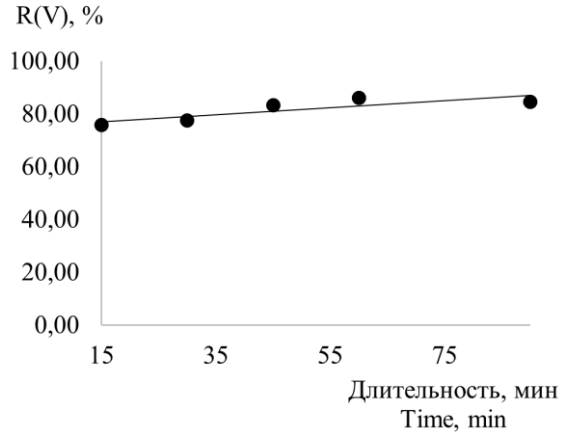


Рисунок 4. Частная зависимость степеней извлечения ванадия от длительности процесса

Figure 4. Particular dependence of the degree of vanadium extraction on the duration of the process

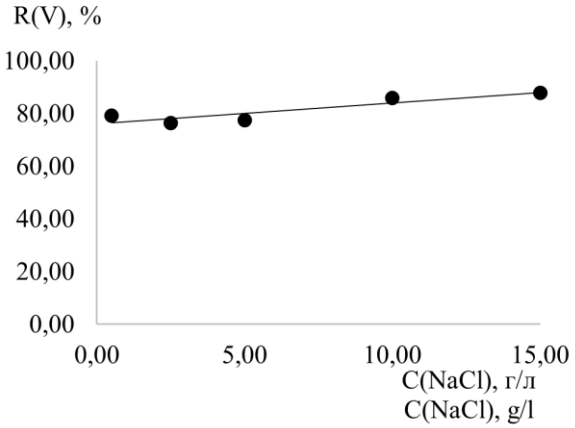


Рисунок 5. Частная зависимость степеней извлечения ванадия от концентрации хлорида натрия

Figure 5. Particular dependence of the degree of extraction of vanadium on the concentration of sodium chloride

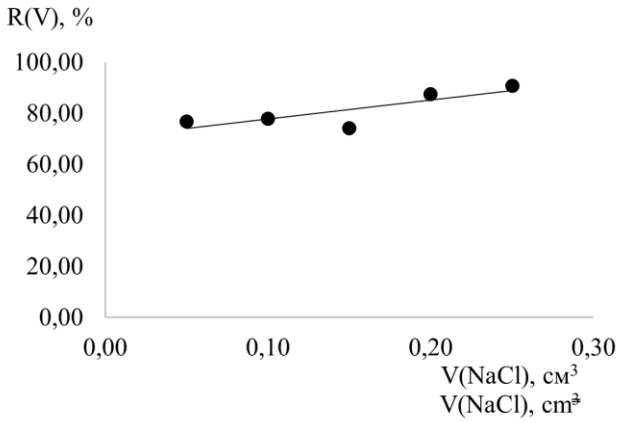


Рисунок 6. Частная зависимость степеней извлечения ванадия от объема хлорида натрия

Figure 6. Particular dependence of the degree of extraction of vanadium on the volume of sodium chloride

Таблица 5.
Результаты оценивания значимости изученных факторов на степень извлечения ванадия

Table 5.
Results of assessing the significance of the studied factors on the degree of vanadium extraction

№	R	t_R	Значимость Significance
1	0,4775	2,29	+
2	0,8700	12,43	+
3	0,7079	4,99	+
4	0,8051	7,97	+
5	0,6724	4,34	+

Согласно данным таблицы 5, рассчитанные значения коэффициента Стьюдента превышают его критическое значение, следовательно, все пять рассматриваемых факторов оказывают статистически значимое воздействие на процесс выщелачивания ванадия. При этом значимость влияния факторов снижается в следующей последовательности: фактор 2 > фактор 4 > фактор 3 > фактор 5 > фактор 1. То есть наиболее значимое влияние на степень выщелачивания ванадия оказывает температура процесса кислотного растворения, наименее значимое – концентрация серной кислоты.

На основе сопоставления данных таблицы 3 и графических зависимостей степеней извлечения аналита от уровней рассматриваемых факторов определены оптимальные условия количественного (96% масс. и выше) извлечения ванадия. Данный показатель достигается при концентрации серной кислоты от 0,5 моль/дм^3, температуре от 60 ºС, длительности процесса в течение не менее 60 мин, концентрации хлорида натрия в растворе от 0,5 г/дм^3, объеме добавки раствора хлорида натрия не менее 0,20 см^3.

Для оптимизации процесса серокислотного выщелачивания золошлаковых материалов, используя уравнение Протодьяконова, была получена обобщенная математическая модель (5), позволяющая перемножить частные функции отклика пяти значимо влияющих факторов, нормированные к среднему значению, и получить итоговый результат в виде мультипликативной зависимости (5). Она объединяет факторы, влияющие на степень извлечения ванадия из золошлаковых отходов ТЭЦ.

$$Y_{П} = \frac{Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_3 \cdot Y_4 \cdot Y_5}{Y_{ср}^4} \quad (15)$$

Достоверность модели подтверждена статистически: коэффициент корреляции зафиксирован на уровне 0,8564, а критерий Стьюдента равен 14,01. Превышение фактического критерия Стьюдента табличного (критического) значения доказывает адекватность полученного уравнения и его высокую прогностическую способность.

Обобщенную математическую модель можно использовать для прогнозирования условий кислотного растворения испытуемых образцов. При условии достижения количественного извлечения ванадия произведен прогностический расчет значения третьего фактора (длительность процесса кислотного растворения) при соблюдении различных значений влияющих факторов. Расчет производили с применением обобщенной математической модели (10).

При установлении концентрации серной кислоты 5,0 моль/дм^3, температуры 100 ºС, концентрации хлорида натрия 1,0 г/дм^3, объеме хлорида натрия 0,01 см^3, функция Y_3 (длительность процесса кислотного растворения) принимает значение 83,02. Обобщенная формула примет вид (16).

$$96 = \frac{93{,}92 \cdot 98{,}93 \cdot Y_3 \cdot 76{,}97 \cdot 70{,}92}{81{,}38^4} \quad (16)$$

Подставив рассчитанное значение Y_3 в регрессионное уравнение для третьего фактора (продолжительность процесса) при определении степени извлечения ванадия, получим выражение (7).

$$83{,}02 = 0{,}1322x_3 + 75{,}038 \quad (17)$$

Решая квадратное уравнение, находим значение продолжительности процесса кислотного растворения ЗШО ТЭЦ при установленных значениях рассматриваемых факторов, равное 57 мин.

Методика масс-спектрометрического определения содержания ванадия включает в себя несколько этапов:

1) выщелачивание ванадия из образцов золошлаковых отходов теплоэлектростанций;

2) приготовление рабочих растворов для настройки масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой;

3) масс-спектрометрическое с индуктивно связанной плазмой измерение аналитического сигнала;

5) метрологическое обоснование МС-ИСП методики определения массовых концентраций ванадия с позиций концепции погрешности.

Таблица 6.

Показатели качества методики масс-спектрометрического определения содержания ванадия в золошлаковых отходах теплоэлектростанций (*S, S_R* – стандартные отклонения повторяемости и воспроизводимости, *r, R* – пределы повторяемости и воспроизводимости, *Δ_c* – показатель правильности методики анализа, *±Δ* – границы интервала, в котором находится погрешность результатов анализа при доверительной вероятности *P = 0,95*)

Table 6.

Quality indicators of the mass spectrometric method for determining the vanadium content in ash and slag waste from thermal power plants (S, S_R – standard deviations of repeatability and reproducibility, r, R – limits of repeatability and reproducibility, Δ_c – indicator of the correctness of the analysis method, ±Δ – boundaries of the interval in which the error in the analysis results is located at a confidence level of P = 0.95)

Содержание ванадия, % Vanadium content, %	Повторяемость Repeatability		Воспроизводимость Reproducibility		Правильность Right	Точность Accuracy
	S	*r*	*S_R*	*R*	*Δ_c*	*± Δ*
0,010–0,10	0,004	0,011	0,003	0,008	0,005	0,007
св. 0,10–0,20	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,04
св. 0,20–0,50	0,03	0,09	0,02	0,05	0,04	0,06

Навеску золошлакового отхода массой 1,0000 г. помещали в химический стакан вместимостью 250 см^3, вводили 100 см^3 раствора серной кислоты с концентрацией 0,5 моль/дм^3 и 0,20 см^3 раствора хлорида натрия с концентрацией 0,5 г/дм^3. Полученный раствор выдерживали на электрической плитке при температуре 60 ºС в течение 60 мин. По истечение указанного времени систему охлаждали до комнатной температуры, отфильтровывали через фильтр «синяя лента». Аликвоту фильтрата объёмом 2,00 см³ отбирали и количественно переносили в мерную колбу вместимостью 100,0 см³. Затем в колбы добавляли дистиллированную воду до метки, тщательно перемешивали и измеряли интенсивность аналитического сигнала на масс-спектрометре Agilent

7500 (Agilent, США). За результат анализа принимали среднее арифметическое двух результатов единичных определений, каждое из которых выполнено из отдельной навески.

Метрологическое обоснование методики масс-спектрометрического с индуктивно связанной плазмой определения содержания ванадия в золошлаковых отходах теплоэлектростанций осуществляли в концентрационном диапазоне 0,010–0,500% масс.

Показатели прецизионности (повторяемости и воспроизводимости), правильности и точности методики анализа представлены в таблице 6. Показатели правильности методики анализа оценивали методом варьирования навесок.

Заключение

На основании проведенных исследований установлены оптимальные условия процесса кислотного растворения золошлаковых отходов ТЭЦ. Применение для этого серной кислоты в качестве реагента и хлорида натрия в качестве восстановителя для повышения эффективности разрушения минеральной матрицы вторичного сырья, согласуется с литературными данными [11, 14]. По результатам исследований определены оптимальные условия выщелачивания ванадия, установлена значимость влияния пяти рассматриваемых факторов на результат, выведена обобщенная модель на основе уравнения Протодьяконова, позволяющая осуществлять предварительный прогностический анализ до проведения эксперимента. Методика масс-спектрометрического с индуктивно связанной плазмой определения ванадия в золошлаковых отходах теплоэлектростанций имеет диапазон определяемых содержаний аналита 0,010–0,50% масс., точность методики анализа составляет ± Δ 0,007–0,06% масс.

Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции полученных данных при разработке методики выполнения измерений концентрации ванадия методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой при контроле качества в условиях заводских лабораторий. Кроме того, полученные результаты могу быть применимы при разработке технологии извлечения ванадия из золошлаковых отходов теплоэлектростанций при решении проблемы утилизации вторичного сырья

Благодарности

Работа выполнена при поддержке НАО «Восточно-Казахстанский университета им. Сарсена Аманжолова» (г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан).

Литература

1 Буланов В.Н. Анализ влияния легирования ванадия Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 2. С. 5–12.

2 Обзор рынка Ванадиевая мишень. https://www.futuremarketreport.com/ru/industry-report/vanadium-target-market

3 Jin Wang, et al. Toward high-purity vanadium-based materials: Fundamentals, purifications, and perspectives // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol 476. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143721.

4 Bartoňová L., Raclavská H., Najser J. Vanadium – Valuable and toxic element in coal combustion ash: An overview // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 172. P. 923–940. DOI 10.1016/j.psep.2023.02.070.

5 Шубина М.В., и др. Техногенные образования как источник минерального сырья для получения ванадия // Черные металлы. 2023. № 12. С. 5–12. DOI 10.17580/chm.2023.12.02.

6 Тошназаров А.Х., Аликулов Ш.Ш., Ахмедова Н.М. Разработка технологии извлечения ванадия из руды месторождения «Тебинбулак» // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2025. 7(136). С. 60–62.

7 Haoyu Li, Chunhua Hu, Xinyi He, Jun Wang, Shihong Tian, Xuejun Zhu, Xuehua Mao. Mechanism and kinetics study of vanadium leaching from landfilled metallurgical residues by ultrasonic with ozonation enhancement in a low-acid medium // Ultrasonics Sonochemistry. 2024. doi: 10.1016/j.ultsonch.2024.106998

8 Pengcheng Hu, Yimin Zhang, Hong Liu, Tao Liu, Sheng Li, Ruobing Zhang, Zhijie Guo. High efficient vanadium extraction from vanadium slag using an enhanced acid leaching-coprecipitation process // Separation and Purification Technology. 2023. – Vol. 304. P. 61–69. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122319.

9 Hao Peng, Bing Li, Wenbing Shi, Zuohua Liu. Efficient Recovery of Vanadium from High-Chromium Vanadium Slag with Calcium-Roasting Acidic Leaching // Minerals 2022, 12, 160. https://doi.org/10.3390/min12020160.

10 Лапин И.Ии др.Исследование состава зол сжигания в качестве потенциального сырья для производства соединений ванадия // Успехи в химии и химической технологии. ТОМ XXXVI. 2022. № 2. С. 34–35.

11 Мишин И.В., Нистратов А.В., Пичугов Р.Д. Исследование процесса кислотно-восстановительного выщелачивания ванадия из летучей золы ТЭЦ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 7. С. 107–115. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4728.

12 Kovalov O., et al. Prospects for the of Use Ash and Slag Waste of Thermal Power Plants as Raw Materials for the Extraction of Vanadium and Nickel Compounds // Key Engineering Materials. 2024. P. 73–89. DOI:10.4028/p-JI8dAh.

13 Садыхов Г.Б. оглы, и др. Способ извлечения ванадия из зол ТЭС от сжигания мазута. RU2775452C1

14 Mahmoud S. Khalafalla, W.M. Abdellah, H.A. Abu Khoziem & Abd Allh M. Abd El-Hamid. Ecological treatment of El Kriymat boiler ash for recovering vanadium, nickel and zinc from sulfate leach liquor // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2023. Vol. 25. P. 441–455. https://doi.org/10.1007/s10163–022–01550–2.

15 Homa Rezaei, Sied Ziaedin Shafaei, Hadi Abdollahi, Alireza Shahidi, Sina Ghassaa. A sustainable method for germanium, vanadium and lithium extraction from coal fly ash: Sodium salts roasting and organic acids leaching // Fuel. – 2022. – Vol. 312. – P. 1–9. DOI:10.1016/j.fuel.2021.122844

16 Фомин В.Н., и др. Оптимизация параметров лазерно-искрового эмиссионного спектрометра с применением вероятностно-детерминированного планирования эксперимента / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. № 87(5). С. 14–19. DOI: https://doi.org/10.26896/1028–6861–2021–87–5–14–19.

17 Fomin V. Software implementation of probabilistic-deterministic design of a chemical experiment on R / Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series. 2025. 151(2). P. 130–142. https://doi.org/10.32523/2616–6771–2025–151–2–130–142.

18 Fomin V.N., et al. Method of classification and quantitative analysis of vein quartz using LIBS and chemometric techniques / BULLETIN of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography Series. 2024. Vol. 147. № 2. P. 48–60. DOI: https://doi.org/10.32523/2616–6771–2024–147–2–48–60.

19 Gogol Daniil B., et al. Deposition of Transition Metal onto Carbonate Materials Surface: Theoretical Evaluation of Optimal Parameters / Eurasian Journal of Chemistry. 2023. Vol. 28. No. 4 (112). P. 1–9. DOI: https://doi.org/10.31489/2959–0663/4–23–13.

20 Turovets Milana A., et al. Chemometric Approach for the Determination of Vanadium by the LIBS Method / Eurasian Journal of Chemistry. 2024. Vol. 29. No. 4 (116). P. 61–70. DOI: https://doi.org/10.31489/2959–0663/4–24–10.

21 Троеглазова А.В., Вихарева Н.А. Математическое моделирование условий извлечения железа из золошлаковых отходов тепловых электростанций // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки. 2019. № 10. С. 172–178.

22 Azadeh Hassanpour, Johannes Geibel, Henner Simianer, Antje Rohde, Torsten Pook. Optimization of breeding program design through stochastic simulation with evolutionary algorithms // Quantitative Methods. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.17286.

23 Tyanakh, S., Baikenov, M.I., Ma Feng-Yun, Fomin, V.N., Baikenova, G.G., Ashimhanov, A.S., & Seitzhan, R.S. (2023) Determination of Optimal Conditions for Catalytic Hydrogenation of Oil Sludge (Atasu-Alashankou) // Eurasian Journal of Chemistry. 110(2). 139–146. https://doi.org/10.31489/2959–0663/2–23–15

References

1 Bulanov V.N. Analiz vliyaniya legirovaniya vanadiya Pd, Al, Co, Ni na rastvorimost' vodoroda // Vestnik SPbGUT. 2023. T. 1. № 2. S. 5–12.

2 Obzor rynka Vanadievaya mishen'. https://www.futuremarketreport.com/ru/industry-report/vanadium-target-market

3 Jin Wang, et al.. Toward high-purity vanadium-based materials: Fundamentals, purifications, and perspectives // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol 476. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143721.

4 Bartoňová L., Raclavská H., Najser J. Vanadium – Valuable and toxic element in coal combustion ash: An overview // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 172. R. 923–940. DOI 10.1016/j.psep.2023.02.070.

5 Shubina M.V., Mahotkina E.S., Shubin I.G. Tekhnogennye obrazovaniya kak istochnik mineral'nogo syr'ya dlya polucheniya vanadiya // Chernye metally. 2023. № 12. S. 5–12. DOI 10.17580/chm.2023.12.02.

6 Toshnazarov A.H., Alikulov Sh. Sh., Ahmedova N.M. Razrabotka tekhnologii izvlecheniya vanadiya iz rudy mestorozhdeniya «Tebinbulak» // Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. 2025. 7(136). S. 60–62.

7 Haoyu Li, Chunhua Hu, Xinyi He, Jun Wang, Shihong Tian, Xuejun Zhu, Xuehua Mao. Mechanism and kinetics study of vanadium leaching from landfilled metallurgical residues by ultrasonic with ozonation enhancement in a low-acid medium // Ultrasonics Sonochemistry. 2024. doi: 10.1016/j.ultsonch.2024.106998

8 Pengcheng Hu, Yimin Zhang, Hong Liu, Tao Liu, Sheng Li, Ruobing Zhang, Zhijie Guo. High efficient vanadium extraction from vanadium slag using an enhanced acid leaching-coprecipitation process // Separation and Purification Technology. 2023. – Vol. 304. P. 61–69. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122319.

9 Hao Peng, Bing Li, Wenbing Shi, Zuohua Liu. Efficient Recovery of Vanadium from High-Chromium Vanadium Slag with Calcium-Roasting Acidic Leaching // Minerals 2022, 12, 160. https://doi.org/10.3390/min12020160.

10 Lapin I.I., et al. Issledovanie sostava zol szhiganiya v kachestve potencial'nogo syr'ya dlya proizvodstva soedinenij vanadiya // Uspekhi v himii i himicheskoj tekhnologii. TOM XXXVI. 2022. № 2. S. 34–35.

11 Mishin I.V., Nistratov A.V., Pichugov R.D. Issledovanie processa kislotno-vosstanovitel'nogo vyshchelachivaniya vanadiya iz letuchej zoly TEC // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2025. T. 336. № 7. C. 107–115. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4728.

12 Kovalov O., et al. Prospects for the of Use Ash and Slag Waste of Thermal Power Plants as Raw Materials for the Extraction of Vanadium and Nickel Compounds // Key Engineering Materials. 2024. R. 73–89. DOI:10.4028/p-JI8dAh.

13 Sadyhov G.B. ogly, Goncharov K.V., Kashekov D. Yu. Sposob izvlecheniya vanadiya iz zol TES ot szhiganiya mazuta. RU2775452C1

14 Mahmoud S. Khalafalla, W.M. Abdellah, H.A. Abu Khoziem & Abd Allh M. Abd El-Hamid. Ecological treatment of El Kriymat boiler ash for recovering vanadium, nickel and zinc from sulfate leach liquor // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2023. Vol. 25. P. 441–455. https://doi.org/10.1007/s10163–022–01550–2.

15 Homa Rezaei, et al. A sustainable method for germanium, vanadium and lithium extraction from coal fly ash: Sodium salts roasting and organic acids leaching // Fuel. – 2022. – Vol. 312. – P. 1–9. DOI:10.1016/j.fuel.2021.122844

16 Fomin V.N., et al. Optimizaciya parametrov lazerno-iskrovogo emissionnogo spektrometra s primeneniem veroyatnostno-determinirovannogo planirovaniya eksperimenta / Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2021. № 87(5). S. 14–19. DOI: https://doi.org/10.26896/1028–6861–2021–87–5–14–19.

17 Fomin V. Software implementation of probabilistic-deterministic design of a chemical experiment on R / Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series. 2025. 151(2). R. 130–142. https://doi.org/10.32523/2616–6771–2025–151–2–130–142.

18 Fomin V.N., et al. Method of classification and quantitative analysis of vein quartz using LIBS and chemometric techniques / BULLETIN of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography Series. 2024. Vol. 147. № 2. R. 48–60. DOI: https://doi.org/10.32523/2616–6771–2024–147–2–48–60.

19 Gogol Daniil B., et al. Deposition of Transition Metal onto Carbonate Materials Surface: Theoretical Evaluation of Optimal Parameters / Eurasian Journal of Chemistry. 2023. Vol. 28. No. 4 (112). R. 1–9. DOI: https://doi.org/10.31489/2959–0663/4–23–13.

20 Turovets Milana A., et al. Chemometric Approach for the Determination of Vanadium by the LIBS Method / Eurasian Journal of Chemistry. 2024. Vol. 29. No. 4 (116). R. 61–70. DOI: https://doi.org/10.31489/2959–0663/4–24–10.

21 Troeglazova A.V., Vihareva N.A. Matematicheskoe modelirovanie uslovij izvlecheniya zheleza iz zoloshlakovyh othodov teplovyh elektrostancij // Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2019. № 10. S. 172–178.

22 Azadeh Hassanpour, et al. Optimization of breeding program design through stochastic simulation with evolutionary algorithms // Quantitative Methods. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.17286.

23 Tyanakh, S., et al.. (2023) Determination of Optimal Conditions for Catalytic Hydrogenation of Oil Sludge (Atasu-Alashankou) // Eurasian Journal of Chemistry. 110(2). 139–146. https://doi.org/10.31489/2959–0663/2–23–15.

Сведения об авторах

Анна В. Троеглазова .х.н., доцент, кафедра информационной безопасности, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плахотного, 10, 630108, Россия, troeglasovaa@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9953-3576

Сана К. Кабдрахманова к.т.н., ассоц. профессор, руководитель Международного R&D центра передовых функциональных материалов и их композитов кафедры химических процессов и промышленной экологии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, Алматы, 050013, Казахстан, sanaly33@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5760-2967

Альмира М. Жилкашинова к.ф.-м.н., ассоц. профессор, старший научный сотрудник, Национальная научная лаборатория, НАО «Восточно-Казахстанский университет С. Аманжолова, ул. Казахстан, 55, Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, almira_1981@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0948-2280

Information about authors

Anna V. Troyeglazova Cand. Sci. (Chem.), assistant professor, Department of Information Security, Siberian State University of Geosystems and Technologies, Plakhotny Street, 10, 394036, Novosibirsk, 630108, Russian Federation, troeglasovaa@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9953-3576

Sana K. Kabdrahmanova Dr. Sci. (tehn.), assistant professor, Head of the International R&D Center for Advanced Functional Materials and Their Composites, Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Satpayev Street, 22, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, sanaly33@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5760-2967

Almira M. Zhilkashinova Cand. Sci. (physical and mathem.), assistant professor), senior research fellow, National Scientific Laboratory, NAO "East Kazakhstan University named after S. Amanzholov", Kazakhstan Street, 55, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, almira_1981@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0948-2280

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/07/2026	После редакции 18/07/2026	Принята в печать 20/08/2026
Received 01/07/2026	**Accepted in revised** 18/07/2026	Accepted 20/08/2026