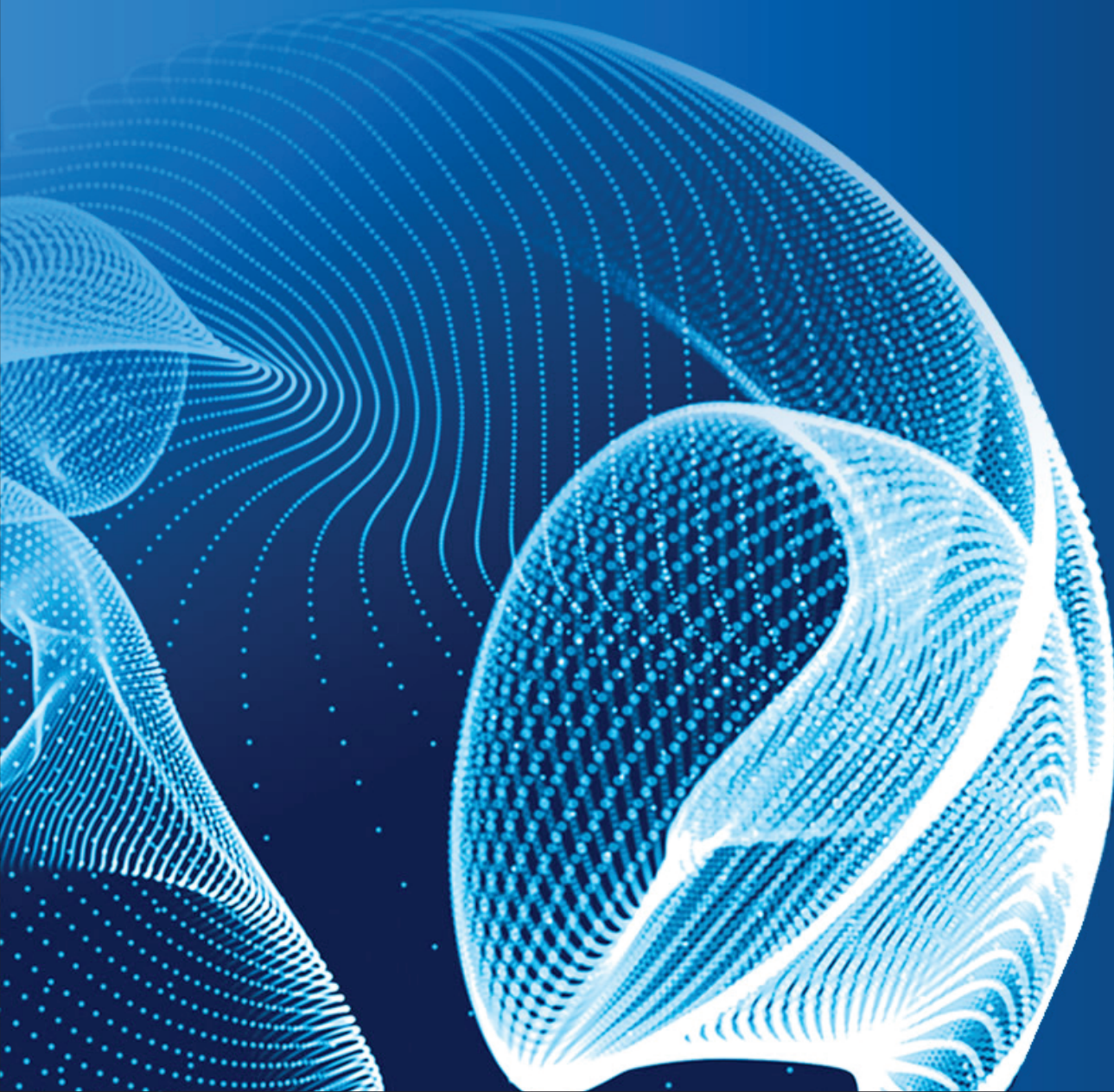


ENGINEERING JOURNAL of Satbayev University

Volume 146 (Issue 1)
February 2024



EDITOR-IN-CHIEF

Alma Bekbotayeva, PhD, associate professor, Geology and Petroleum Engineering Institute of Satbayev University, Kazakhstan

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Kanai Rysbekov, candidate of technical sciences, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Vasyl Lozinskyi, PhD, associate professor, National TU Dnipro Polytechnic, Ukraine

MANAGING EDITOR

Gulziya Burshukova, PhD, associate professor, Satbayev University, Kazakhstan

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

Ata Utku Akçil, PhD, professor, Suleyman Demirel University, Turkey

Adilkhan Baibatsha, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, Geology and Petroleum Engineering Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Atac Bascetin, PhD, professor, Istanbul Technical University, Turkey

Madina Barmenshinova, candidate of technical sciences, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Omirsirik Baigenzhanov, PhD, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Tatiana Chepushtanova, PhD, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, habilit.doctor, professor, Adam Mickiewicz University, Poland

Serik Moldabaev, doctor of technical sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Brajendra Mishra, PhD, professor, Worcester Polytechnic Institute, USA

Suping Peng, professor, academician, Chinese Mining University, China

Reimar Seltsmann, PhD, professor, The Earth Sciences Department, Center for Russian and Central Asian Mineral Research (CERCAMS), Great Britain

Atsushi Shibayama, PhD, professor, Akita University, Japan

Olena Sdvyzhkova, doctor of technical sciences, professor, National TU Dnipro Polytechnic, Ukraine

Khalidilla Yusupov, doctor of technical sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

БАС ҒЫЛЫМИ РЕДАКТОР

Алма Бекботаева, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Геология және мұнай-газ ісі институты, Қазақстан

БАС ҒЫЛЫМИ РЕДАКТОРДЫҢ ОРЫНБАСАРЛАРЫ

Қанай Рысбеков, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тау-кен-металлургия институты, Қазақстан

Василий Лозинский, PhD, қауымдастырылған профессор, «Днепр политехникасы» Ұлттық техникалық университеті, Украина

ЖАУАПТЫ ХАТШЫ

Гулзия Буршукова, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Қазақстан

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА МҮШЕЛЕРІ

Ata Utku Akçil, PhD, профессор, Сүлейман Демирел Университеті, Түркия

Әділхан Байбатша, г-м.ғ.д., профессор, Satbayev University Геология және мұнай-газ ісі институты, Қазақстан

Atac Bascetin, PhD, профессор, Ыстамбұл техникалық университеті, Түркия

Мадина Барменшинова, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тау-кен-металлургия институты, Қазақстан

Өмірсерік Байгенженов, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тау-кен-металлургия институты, Қазақстан

Татьяна Чепуштанова, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тау-кен-металлургия институты, Қазақстан

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, хабилит.доктор, профессор, Адам Мицкевич Университеті, Польша

Серік Молдабаев, т.ғ.д., профессор, Satbayev University Тау-кен-металлургия институты, Қазақстан

Brajendra Mishra, PhD, профессор, Вустер политехникалық институты, АҚШ

Suping Peng, профессор, академик, Қытай тау-кен университеті, ҚХР

Reimar Seltmann, PhD, профессор, Жер туралы ғылымдар бөлімі, Ресей және Орта Азия минералды зерттеулер орталығы (CERCAMS), Ұлыбритания

Atsushi Shibayama, PhD, профессор, Akita University, Жапония

Олена Сдвижкова, т.ғ.д., профессор, «Днепр политехникасы» Ұлттық техникалық университеті, Украина

Халидилла Юсупов, т.ғ.д., профессор, Satbayev University Тау-кен-металлургия институты, Қазақстан

ГЛАВНЫЙ НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

Алма Бекботаева, PhD, асоц.профессор, Институт геологии и нефтегазового дела Satbayev University, Казахстан

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

Канай Рысбеков, к.т.н., асоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Василий Лозинский, PhD, асоц.профессор, Национальный технический университет «Днепровская политехника», Украина

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Гулзия Буршукова, PhD, асоц.профессор, Satbayev University, Казахстан

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Ata Utku Akçil, PhD, профессор, Университет Сулеймана Демиреля, Турция

Адилхан Байбатша, д.г-м.н., профессор, Институт геологии и нефтегазового дела Satbayev University, Казахстан

Atac Bascetin, PhD, профессор, Стамбульский технический университет, Турция

Мадина Барменшинова, к.т.н., Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Омирсерик Байгенженов, PhD, асоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Татьяна Чепуштанова, PhD, асоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, хабилит.доктор, профессор, Университет Адама Мицкевича, Польша

Серик Молдабаев, д.т.н., профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Brajendra Mishra, PhD, профессор, Вустерский политехнический институт, США

Suping Peng, профессор, академик, Китайский горнопромышленный университет, КНР

Reimar Selmann, PhD, профессор, Отдел Наук о Земле, Центр Российских и Среднеазиатских Минеральных Исследований (CERCAMS), Великобритания

Atsushi Shibayama, PhD, профессор, Akita University, Япония

Олена Сдвижкова, д.т.н., профессор, Национальный технический университет «Днепровская политехника», Украина

Халидилла Юсупов, д.т.н., профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i1.01>

Determination of thermodynamic functions of interaction of chromium with silicon and aluminum

A.M. Akuov¹, B.S. Kelamanov^{2*}, Ye.K. Samuratov¹, D.A. Yessengaliyev², M.G. Sultanov²

¹Kazphosphate LLP, Taraz, Kazakhstan

²Aktobe Regional University named after K.Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

*Corresponding author: kelamanov-b@mail.ru

Abstract. The article presents the results of calculating the thermodynamic functions (enthalpy, entropy and Gibbs energy) of chromium reduction reactions from its oxide with the participation of active metal reducing agents by applying the constants of substances and the values of the coefficients of the heat equation, considering the phase transformations involved in reactions such as silicon and aluminum, which occur in the production of refined ferrochrome grades. This calculation is performed by applying the substance constant to the transformed formula for calculating the dependence of the Gibbs energy on the temperature of the reactions of redox processes. As noted above, the results of this calculation are of fundamental importance in the melting processes of refined (medium- and low-carbon) ferrochrome grades with separate and joint (in the form of complex silicon and aluminum-containing alloys) using the above-mentioned elements. The calculations were carried out in the temperature range from 298 K to ~3000 K, since this interval covers the conditions of the redox processes. The range under consideration covers the entire temperature range of phase transformations of chromium ore and reducing agent (siliceous or silicon-aluminum). For these reactions, there are several temperature intervals due to the phase transformations of the initial reagents and the resulting products. After performing thermodynamic calculations, graphs of the dependence of the Gibbs energy change on temperature are constructed. Temperature intervals where phase transitions do not affect the reaction are revealed. Consequently, along with passive temperature intervals, there are active intervals in which a sharp increase in the negative value of the Gibbs energy was observed.

Keywords: refined ferrochrome, silicon, aluminum, reduction, Gibbs energy, equilibrium constant.

1. Введение

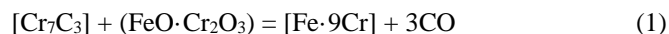
Отличительной особенностью рафинированных марок от высокоуглеродистого феррохрома, кроме ограничений по фосфору, сере и другим вредным примесям, является более низкое содержание углерода. Поэтому при производстве рафинированных марок феррохрома, за исключением отдельных процессов с использованием углерода, более широкое развитие и применение получили металлургические способы.

Металлотермическое восстановление хрома кремнием является основным процессом, протекающим в получении рафинированного феррохрома. Назначение рафинированных марок феррохрома - использование их в качестве легирующей добавки при производстве хромоникелевых и хромистых (суперферритных) сталей. Обладая уникальными запасами хромовой руды, Казахстан входит в число основных производителей рафинированного феррохрома, при этом занимая лидирующие позиции. Как отмечено, что данные марки феррохрома выплавляют металлургическим способом и практически полностью экспортируются. Существующая технологическая схема аналогична технологиям зарубежных стран и имеет одинаково нерешенные технологические задачи: относительно низкая степень извлечения ведущего элемента, неэффективное использование восстановителей, увеличение удельно-

го расхода сырья и электроэнергии. Основываясь на вышеуказанных нерешенных задачах, технология требует усовершенствования.

Как известно, на данное время существуют несколько способов выплавки рафинированных марок феррохрома, отличающихся между собой как по виду используемых восстановителей и шихтовых материалов, так и по аппаратно-технологическому оформлению, а именно [1]:

- рафинирование высокоуглеродистого феррохрома от углерода окислением последнего хромитовой рудой по реакции (1) [2]:



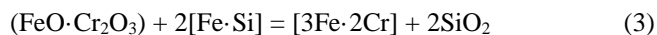
Этот способ нашел широкое применение в Германии. Принимая во внимание тип используемого восстановителя (углерод высокоуглеродистого феррохрома), следует ожидать, что процесс рафинирования от углерода необходимо вести в отдельном агрегате, т.к. хром и железо являются карбидообразующими элементами. Этим можно предсказать трудность получения низкоуглеродистых марок рафинированного феррохрома;

- рафинирование высокоуглеродистого феррохрома от углерода окислением газообразным кислородом воздуха или чистым кислородом в конвертере по химизму (2) [3]:



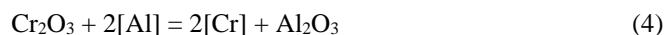
Этот способ разработан Центральным научно-исследовательским институтом черной металлургии (г. Москва) и долгое время был применен на Актюбинском заводе ферросплавов в производстве среднеуглеродистого феррохрома;

- восстановление хрома и попутно железа из хромитовой руды кремнием ферросилиция (способ Беккерта) по реакции (3) [4]:

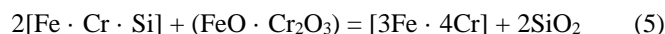


Этот способ в полном объеме не нашел применения вследствие получения феррохрома с пониженным содержанием хрома. Однако, этот процесс может использоваться при выплавке феррохрома с применением ферросилиция для довосстановления хрома из шлака перед выпуском из печи, а также, в зависимости от требований потребителей, может быть применен для выплавки низкоуглеродистого феррохрома с пониженным содержанием хрома;

- алюминотермическое восстановление оксида хрома. Существуют флюсовый и бесфлюсовый варианты выплавки [5]. Этот способ нашел широкое распространение в производстве особо низкоуглеродистых марок феррохрома и металлического хрома по реакции (4):

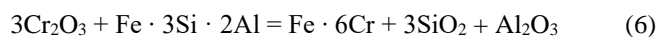


- рафинирование передельного ферросиликохрома от кремния окислением кремния кислородом (способ Джина), содержащимся в оксидах хромитовой руды по реакции (5) [3, 7, 9]:



Этот способ в настоящее время практикуется на ЧЭМК, Актюбинском и Серовском заводах ферросплавов и долгое время использовался на Запорожском заводе ферросплавов. По отработанности технологии, относительной дешевизне (по сравнению с алюминотермией) восстановителя, аппаратному оформлению (в рудно-термических печах с трансформатором мощностью 3.5-7 МВА) и доведенным содержанием хрома в металле (то есть феррохром не разубоживается кремнием, как в случае применения ферросилиция), данный способ нашел наиболее широкое распространение в промышленности;

- восстановление хромитовой руды ферросилико-алюминием (ФСА). Химизм восстановления выглядит следующим образом по реакции (6):



Данная технология получения рафинированных марок феррохрома является разработкой Химико-металлургического института им. Ж.Абишева (г. Караганды) [8-9].

Как было отмечено, выплавку рафинированного феррохрома производят в рафинировочных печах с трансформаторами мощностью 3.5-7 МВА [5] с наклоняющейся ванной, по конструкции идентичных дуговым сталеплавильным печам. Существует также и другая разновидность этого процесса, осуществляемая методом смешивания в высокотемпературном реакторе (ковше) предварительно выплавленных в отдельных агрегатах рудно-известкового расплава и жидкого или твердого

(кускового) ферросиликохрома. Данный способ позволяет получить феррохром с содержанием углерода менее 0.06%, так как исключен контакт расплава с электродами, которые являются источниками поступления углерода в количестве 60-70%.

Анализ практики производства рафинированного феррохрома показывает, что печная и внепечная металлургия широко распространены и успешно применяются в промышленности. Каждый из отмеченных способов имеет как преимущества, так и недостатки. Но несмотря на успешную практикуемость и распространенность данных технологий, необходимо отметить, что технико-экономические показатели процессов еще остаются низкими. Возможно, это вызвано неэффективным использованием восстановителя или некачественным составом потребляемого шихтового материала.

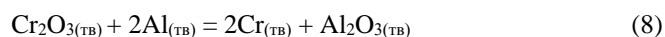
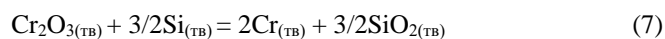
Актуальность задачи заключается в необходимости совершенствования технологии производства рафинированного феррохрома с вовлечением магнезиальных хромовых руд и предотвращения силикатного распада конечных шлаков.

В настоящее время при производстве рафинированного феррохрома наблюдается снижение качества используемой хромовой руды, характеризующегося повышенным содержанием пустой породы, в которой содержание оксида магния составляет ~17-20%, что при рудной электротермии неблагоприятно влияет на термодинамические свойства шлаков, приводя к потере металла со шлаком в виде корольков. Образующийся вязкий гетерогенный расплав приводит к частичному торможению диффузии кремния и кислорода через границу шлак-металл. Вследствие этого происходит постепенное «закремнивание» печи с высокими потерями оксида хрома в отвальном шлаке. Тем самым способствует ухудшению технико-экономических показателей процесса, это объясняется увеличением удельного расхода шихтовых материалов и электроэнергии, снижением степени извлечения ведущего элемента и ростом кратности шлака. Кроме этого, в силикотермии рафинированного феррохрома остро стоит вопрос подверженности конечных отвальных шлаков самораспаду. Мелкодисперсный распавшийся шлак наносит серьезный ущерб окружающей среде, занимая обширные территории [6-9].

В этой связи в последнее время при выплавке рафинированных марок феррохрома ведется поиск альтернативных видов металлических восстановителей [10]. Причина поиска связана с дороговизной восстановителя, ухудшением качества сырья и снижением технико-экономических показателей процесса плавки. Одним из решений проблемы может быть вовлечение в металлургию феррохрома комплексных кремнеалюминиевых восстановителей.

Сущность процесса получения рафинированного феррохрома заключается в достижении максимальной степени восстановления хрома из руды (шлакового расплава) и наибольшей степени рафинирования исходного восстановителя (кремнистого или кремнеалюминиевого) от кремния и алюминия.

В процессах металлургии при восстановлении хрома из руды в общем виде развиваются следующие реакции:



В действительности, процесс восстановления осуществляется по многочисленным взаимодействиям с образованием промежуточных и конечных соединений. По причине отсутствия надежных термодинамических данных для таких соединений, возможна, лишь приближенная оценка полноты протекающих процессов.

2. Методы и материалы

Для осуществления термодинамических расчетов реакций (1) и (2) использованы константы веществ, участвующих в реакциях: энтальпии ($\Delta_f H_{298}^0$, $\Delta H_{\text{пр}}$), энтропии (S_{298}^0 , $\Delta S_{\text{пр}}$) и значения коэффициентов уравнения теплоемкости (C_p) с учетом фазовых превращений [11,12].

Важным термодинамическими характеристиками реакции, непосредственно связанные с направлением ее протекания и величиной константы равновесия, является: изменение энергии Гиббса (изобарно-изотермического потенциала) ΔG^0 для реакции при постоянных давлении и температуре. Как известно, изменение энергии Гиббса характеризует максимальную работу процесса и равно разности между соответствующим тепловым эффектом и «связанной» энергией системы.

Как правило, при выполнении расчета определяемых термодинамических величин при высоких температурах, вначале находят стандартные значения вышеупомянутых функций. Из литературы известны соотношения [13,14]:

$$\Delta_r H_{298}^0 = (\Delta_f H_{298}^0)_{\text{прод.}} - (\Delta_f H_{298}^0)_{\text{реак}} \quad (9)$$

$$\Delta_r S_{298}^0 = (S_{298}^0)_{\text{прод.}} - (S_{298}^0)_{\text{реак}} \quad (10)$$

$$\Delta_r G_{298}^0 = \Delta_r H_{298}^0 - T\Delta_r S_{298}^0 \quad (11)$$

$$\Delta C_{p298}^0 = (\sum C_{p298}^0)_{\text{прод.}} - (\sum C_{p298}^0)_{\text{реак}} \quad (12)$$

Для реакций (1) и (2) значения термодинамических функций в стандартных условиях составляют:

$$\begin{aligned} \Delta_r H_{298(1)}^0 &= -216440.00 \text{ Дж/моль;} \\ \Delta_r S_{298(1)}^0 &= 0.00 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta_r G_{298(1)}^0 &= -216440.00 \text{ Дж/моль;} \\ &35.76 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К} \end{aligned} \quad \Delta C_{p298(1)}^0 = -$$

$$\begin{aligned} \Delta_r H_{298(2)}^0 &= -525640.00 \text{ Дж/моль;} \\ &39.76 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К} \end{aligned} \quad \Delta_r S_{298(2)}^0 = -$$

$$\begin{aligned} \Delta_r G_{298(2)}^0 &= -513791.52 \text{ Дж/моль;} \\ &42.65 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К} \end{aligned} \quad \Delta C_{p298(2)}^0 = -$$

В дальнейшем для расчета зависимости энергии Гиббса от температуры для точности, простоты и удобства применяли формулу, приведенную в работах [13,14]:

$$\begin{aligned} \Delta G_T^0 &= \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0 = \Delta a \cdot T + \frac{1}{2} \cdot \Delta b \cdot T^2 - \Delta c \cdot T^{-1} + X - \\ &T(\Delta a \cdot \ln T + \Delta b \cdot T - \frac{1}{2} \Delta c \cdot T^{-2} + Y) = X + (\Delta a - Y) \cdot T - \\ &\Delta a \cdot T \cdot \ln T - \frac{1}{2} \cdot \Delta b \cdot T^2 - \frac{1}{2} \cdot \Delta c \cdot T^{-2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Величины «X» и «Y» находили по следующим формулам [4, 5]:

$$X = \Delta_r H_T^0 - \Delta a \cdot 298 - \frac{1}{2} \cdot \Delta b \cdot 298^2 + \Delta c \cdot 298^{-1} \quad (16)$$

$$Y = \Delta_r S_{298}^0 - \Delta a \cdot \ln 298 - \Delta b \cdot 298 + \frac{1}{2} \cdot \Delta c \cdot 298^{-2} \quad (17)$$

где Δa , Δb , Δc – алгебраические суммы коэффициентов температурном ряде теплоемкости реакции.

Здесь мы приводим порядок расчета зависимости энергии Гиббса реакции от температуры аналогично [14]:

1. Представим уравнение реакции со стехиометрическими коэффициентами:

$$n \cdot A + m \cdot B = q \cdot AB$$

2. Определим по закону Гесса тепловой эффект реакции при температуре $T=298$ К:

$$\Delta_r H_{298}^0 = q \Delta_r H_{298}^0 AB - (\Delta_r H_{298}^0 A + m \Delta_r H_{298}^0 B)$$

3. Аналогично находим изменение энтропии реакции при температуре $T=298$ К:

$$\Delta_r S_{298}^0 = q S_{298}^0 AB - (n S_{298}^0 A + m S_{298}^0 B)$$

4. Вычислим разность теплоемкостей продуктов реакции и исходных веществ:

$$\Delta C_p^0 = q \Delta C_p^0 AB - (n \Delta C_p^0 A + m \Delta C_p^0 B)$$

$$\text{т.е. } q \Delta C_p^0 AB = qa + qbT + qcT^2;$$

$$n \Delta C_p^0 A = na + nbT + ncT^2;$$

$$m \Delta C_p^0 B = ma + mbT + mcT^2;$$

$$\Delta C_p^0 = \Delta a + \Delta bT + \Delta c T^2$$

5. Рассчитаем величину «X» и «Y».

6. С учетом приведенных выше данных находим значение энергии Гиббса для конкретной интересующей нас температуры.

Следует отметить, что если вещества, участвующие в реакции в интересующем нас интервале температур, имеют фазовые превращения (полиморфные, плавление, кипение), то энтальпия и энтропия фазового перехода учитывается при расчете. При этом следует учесть, что в зависимости от того, в какой части уравнения расположено вещество, энтальпия и энтропия фазовых переходов имеют разные знаки. Например, энтальпия и энтропия фазовых переходов продуктов реакции имеет (+), а исходных веществ (-). А также положительные значения ΔG^0 указывают, следовательно, не на невозможность реакции, а лишь на незначительный или очень малый выход продуктов в стандартном состоянии. При отрицательном значении ΔG^0 , реакции могут протекать самопроизвольно.

Исследуемый температурный интервал для обеих реакций (1, 2) выбрали от 298 К до ~3000 К, так как основные окислительно-восстановительные процессы проходят в этом промежутке. Рассматриваемый диапазон охватывает весь температурный интервал фазовых превращений, хромовой руды и восстановителя (кремнистого или кремнеалюминиевого).

Для рассматриваемых реакций (1) и (2) имеются по 8 и 7 температурных интервалов, соответственно, обусловленных фазовыми превращениями исходных реагентов и образующихся продуктов.

3. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведен график и в таблице 1 представлены уравнения температурной зависимости изменения энергии Гиббса реакции (1).

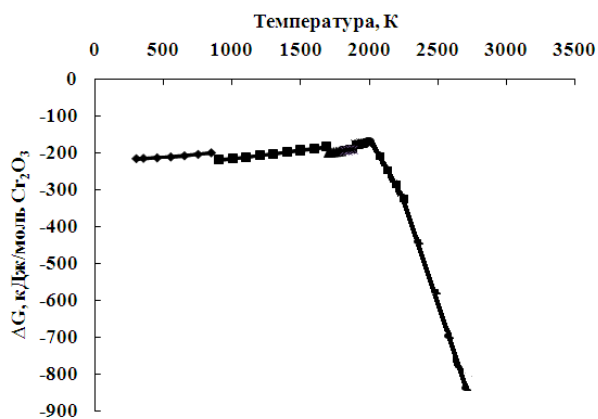


Рисунок 1. Температурная зависимость энергии Гиббса реакции (1)

Таблица 1. Уравнения температурной зависимости энергии Гиббса реакции (1)

№	Уравнение, Дж/моль Cr ₂ O ₃	Темп. интервал фазовых переходов, К
1.	$\Delta G_T = -226601 + 29.858T$	$\Delta T = 298.15-846$
2.	$\Delta G_T = -258942 + 43.585T$	$\Delta T = 846-1688$
3.	$\Delta G_T = -274956 + 44.653T$	$\Delta T = 1688-1800$
4.	$\Delta G_T = -278294 + 46.504T$	$\Delta T = 1800-1883$
5.	$\Delta G_T = -280871 + 54.434T$	$\Delta T = 1883-1953$
6.	$\Delta G_T = -280172 + 55.118T$	$\Delta T = 1953-2000$
7.	$\Delta G_T = -270230 - 13.161T$	$\Delta T = 2000-2173$
8.	$\Delta G_T = -274674 - 191.01T$	$\Delta T = 2173-2963$

Как видно из рисунка 1, фазовые превращения в интервале температур 846-2000 К сильно не влияют на протекание реакции, тем самым сохраняя отрицательное значение, обуславливая направление хода процесса слева направо, то есть в сторону образования продуктов реакции. Дальнейшие изменения в фазовых переходах при температурах выше 2000 К интенсифицирует данную реакцию и способствуют ее глубокому и полному прохождению реакции.

Результаты термодинамических расчетов реакции (2) приведены на рисунке 2 и в таблице 2.

Можно предполагать, что образованные по реакциям (1) и (2) SiO₂ и Al₂O₃, могут взаимодействовать между собой и формировать алюмосиликатные соединения типа андалузита (Al₂O₃·SiO₂) и муллита (3Al₂O₃·2SiO₂), при этом Al₂O₃ отводит из зоны реакции SiO₂ и снижает его активность.

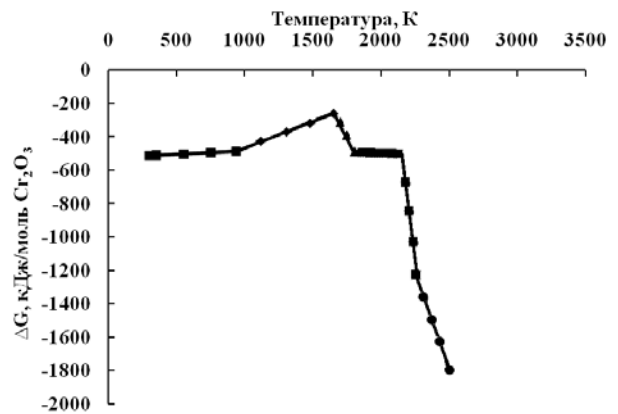
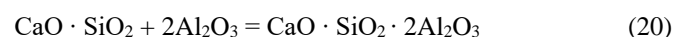
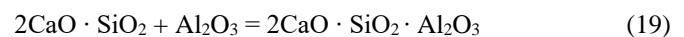
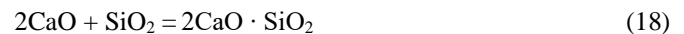


Рисунок 2. Температурная зависимость энергии Гиббса реакции (2)

Таблица 2. Уравнения температурной зависимости энергии Гиббса реакции (2)

№	Уравнение, Дж/моль Cr ₂ O ₃	Темп. интервал фазовых переходов, К
1.	$\Delta G_T = -524257 + 40.478T$	$\Delta T = 298.15-933$
2.	$\Delta G_T = -525906 + 161.180T$	$\Delta T = 933-1650$
3.	$\Delta G_T = -467389 - 15.107T$	$\Delta T = 1650-1800$
4.	$\Delta G_T = -445485 - 26.965T$	$\Delta T = 1800-2126$
5.	$\Delta G_T = -421735 - 371.57T$	$\Delta T = 2126-2173$
6.	$\Delta G_T = -395200 - 561.43T$	$\Delta T = 2173-2500$
7.	$\Delta G_T = -471551 - 240.75T$	$\Delta T = 2500-3000$

Восстановительную способность кремния усиливается благодаря восстановлению его алюминием из SiO₂. А также в присутствии CaO, кремнезем связывается в прочные силикаты кальция – CaO·SiO₂ и 2CaO·SiO₂, что способствует полноте степени восстановления хрома, смещая равновесие реакций вправо и увеличивая вероятность реакций:



с образованием ассоциатов типа 2CaO·Al₂O₃·SiO₂ и CaO·Al₂O₃·2SiO₂.

Появление в фазовом составе шлака вышеперечисленных соединений, с температурой плавления ниже, чем у чистых оксидов, которые влияют на физические свойства (межфазное натяжение, вязкость) и температуру шлака, повышая его технологичность могут существенно способствовать улучшению осаждения запутавшихся корольков феррохрома. Выделяющееся тепло экзотермических реакций способствует образованию жидкоподвижного шлака.

Как уже упоминалось выше, что при использовании высокомагнезиальных хромовых руд с содержанием MgO ~20% происходит накопление первичных и вновь образованных магнезиальных рудных хромшпинелидов в нижних слоях шлака, контактирующих с металлом, который затормаживает диффузию элемента-восстановителя и кислорода, замедляя процесс восстановления. Участие в восстановительных процессах кремнеалюминиевых сплавов способствует взаимодействию магнезиальной хромовой шпинели с алюминием и его оксидом по реакциям:





Как видно из реакций (15) и (16), происходят непосредственное восстановление хрома алюминием и разрушение хромомagneзиальной шпинели оксидом алюминия с формированием устойчивых глинозёмсодержащих шпинелей, которые способствуют повышению скорости и полноте прохождения восстановительных процессов.

4. Выводы

Исходя из рассчитанных величин и приведенной на рисунке 2 зависимости можно прийти к выводу, что в интервалах температур 298.15-933 К, 933-1650 К и 1650-2126 К фазовые переходы не оказывают сильного влияния на протекание реакции. В дальнейших фазовых переходах в интервале температур 2126-2500 К наблюдается резкое увеличение отрицательного значения энергии Гиббса, что будет способствовать интенсивному и полному протеканию реакции.

Как показывают результаты расчетов, процесс металлургического восстановления хрома носит экзотермический характер. Участвующие в восстановлении хрома из руды кремний и алюминий во всем исследованном интервале температур имеют отрицательные значения изменения энергии Гиббса, что в свою очередь подтверждает высокую вероятность протекания реакций в заданных условиях и в сторону образования продуктов реакции. Результаты термодинамической оценки прохождения вышеупомянутых реакций теоретически подтверждают позитивное влияние совместного участия кремния и алюминия в восстановительных процессах при выплавке рафинированных сортов феррохрома. При этом в результате восстановительных процессов, образованные по реакциям (1) и (2) SiO_2 и Al_2O_3 имеют разные температуры плавления. Высокую температуру плавления имеет Al_2O_3 ($T \sim 2050^\circ\text{C}$) и относительно меньшую температуру плавления у SiO_2 ($T \sim 1710^\circ\text{C}$), а растворы или соединения оксидов – (алюмосиликаты), образующиеся в процессах восстановления, как правило, имеют более низкую температуру плавления, чем исходные вещества, тем самым способствуют образованию жидких и маловязких продуктов восстановления.

Рассчитанные данные по изменению энергии Гиббса в интервале температур 298-3000 К, указывают на целесообразность применения комплексных сплавов на

основе алюминия и кремния в качестве восстановителей при выплавке рафинированных марок феррохрома.

Авторы надеются, что проведенные термодинамические расчеты по восстановлению хрома с участием кремния и алюминия металлургическим способом будет содействовать дальнейшему, более широкому применению термодинамического метода при анализе равновесий в металлургических системах.

References / Литература

- [1] Akuov, A.M., Samuratov, Ye.K., Kelamanov, B.S. (2020). Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome. *Metalurgija (Croatian Metallurgical Society)*, 4(59), 529-532.
- [2] Karsanov, G.V. (1954). Ferroalloy smelter. *M.: Metallurgizdat*
- [3] Lyakishev, N.P., Gasik, M.I. (1999). Chromium metallurgy. *M.: Eliz*
- [4] Edmund, T. (1965). La fabrication du ferro-chrome suraffine avec utilisation du ferro-silicium. *J. four electr. et inds. Electrochim*, (70), 219-221
- [5] Lyakishev, N.P., Pliner, Yu.L., Ignatenko, G.F. (1978). Aluminothermy. *M.: Metallurgiya*
- [6] Ryss, M.A. (1985). Production of ferroalloys. *M.: Metallurgiya*
- [7] Shestakov, S.S., Volkov, V.S., Vertij, I.G. (1980). Smelting of low-carbon ferrochrome from magnesia chromite ores. *Stal'*, (12), 1075-1076
- [8] Bajsanov, S.O., Tolymbekov, M.Zh., Almagambetov, M.S. (2008). Method of smelting refined ferrochrome. *Predpatent §19055 RK*
- [9] Akuov, A.M. (2010). Development of technology for smelting refined ferrochrome using a complex alloy AHS (aluminum-chromium-silicon) (Candidate dissertation). *Karaganda: HMI*
- [10] Akuov, A.M., Tolymbekov, M.Zh. & Izbembetov, D.D. (2008). On thermodynamics of ferrochrome metallothermy. *Trudy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Nauka i obrazovanie – vedushchij faktor strategii «Kazakhstan-2030», Karaganda*
- [11] Glushko, V.P. (1982). Thermodynamic properties of individual substances (Spravochnoe izdanie). *M.: Nauka*
- [12] Ruzinov, L.P., Gulyanickij, B.S. (1975). Equilibrium transformations of metallurgical reactions. *M.: Metallurgiya*
- [13] Naumov, G.B., Ryzhenko, B.N. & Hodakovskij, I.L. (1971). Handbook of Thermodynamic quantities. *M.: Atomizdat*
- [14] Kasenov, B.K., Aldabergenov, M.K. & Pashinkin, A.S. (1994). Thermodynamic methods in chemistry and metallurgy. *Almaty: Rauan*

Хромның кремний және алюминиймен әрекеттесуінің термодинамикалық функцияларын анықтау

А.М. Акуов¹, Б.С. Келаманов^{2*}, Е.К. Самуратов¹, Д.А. Есенғалиев², М.Ф. Сұлтанов²

¹«Казфосфат» ЖШС, Тараз, Қазақстан

²Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: kelamanov-b@mail.ru

Андатпа. Мақалада феррохромның тазартылған маркаларын балқыту кезінде металдық тотықсыздандырғыш құрамындағы кремний мен алюминийдің реакцияларға қатысатын фазалық түрлендірулерді ескере отырып, заттар константасын және жылу сыйымдылығы теңдеуінің коэффициенттерінің мәндерін қолдану арқылы хром тотығынан тотықсыздандыру реакцияларының термодинамикалық функцияларын (энтальпия, энтропия және Гиббс энергиясы) есептеу нәтижелері келтірілген. Бұл есептеу Гиббс энергиясының температураға тәуелді реакциялары кезінде өтетін

тотығу-тотықсыздану процестерінің түрлендірілген формуласына заттардың тепе-теңдік константаларын қолдану арқылы жүзеге асырылады. Есептеулердің нәтижелері жоғарыда аталған элементтерді бөлек және бірлесіп (құрамы жағынан күрделі-кешенді кремний және алюминий құрамдас қорытпа түрінде) пайдалану кезінде феррохромның тазартылған (орташа және төмен көміртекті) маркаларын балқыту процестері іргелі мәнге ие. Есептеулер 298 К-ден ~3000 К-ге дейінгі температура аралығында жүргізілді, өйткені осы аралықта тотығу-тотықсыздану процестерінің шарттарын қамтиды. Қарастырылып отырған диапазон хром кені мен тотықсыздандырғыштың (кремнийлі немесе кремни алюминилі) фазалық түрленуінің барлық температуралық аралығын қамтиды. Осы реакциялар үшін бастапқы заттар мен түзілетін өнімдердің фазалық өзгеруіне байланысты бірнеше температуралық интервалдар бар. Термодинамикалық есептеулер жүргізілгеннен кейін Гиббс энергиясының температураға тәуелді графиктері тұрғызылды. Фазалық ауысулар реакция ағымына әсер етпейтін температура аралықтары анықталды. Демек, пассивті температура интервалдарымен қатар теріс күрт өсуі байқалған белсенді температура интервалдары бар Гиббс энергиясының мәндері анықталды.

Негізгі сөздер: тазартылған феррохромы, кремний, алюминий, тотықсыздану, Гиббс энергиясы, тепе-теңдік константасы.

Определение термодинамических функций взаимодействия хрома с кремнием и алюминием

А.М. Акуов¹, Б.С. Келаманов^{2*}, Е.К. Самуратов¹, Д.А. Есенғалиев², М.Г. Султанов²

¹ТОО «Казфосфат», Тараз, Казахстан

²Актюбинский региональный университет им.К.Жубанова, Актюбе, Казахстан

*Автор для корреспонденции: kelamanov-b@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты расчета термодинамических функций (энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) реакций восстановления хрома из его оксида при участии активных металлических восстановителей путем применения константы веществ и значений коэффициентов уравнения теплоемкости с учетом фазовых превращений, участвующих в реакциях, таких как кремний и алюминий, которые протекают в получении рафинированных марок феррохрома. Данный расчет выполнен наложением константы веществ в преобразованную формулу расчета зависимости энергии Гиббса от температуры прохождения реакций окислительно-восстановительных процессов. Как выше отмечено, что результаты данного расчета имеют фундаментальное значение в процессах плавки рафинированных (средне- и низкоуглеродистого) марок феррохрома при раздельном и совместном (в виде сложных по составу - комплексных кремний и алюминийсодержащих сплавов) использовании вышеотмеченных элементов. Расчеты проведены в интервале температур от 298 К до ~3000 К, так как данный интервал охватывает условий протекания окислительно-восстановительных процессов. Рассматриваемый диапазон охватывает весь температурный интервал фазовых превращений хромовой руды и восстановителя (кремнистого или кремнеалюминиевого). Для этих реакций и имеются по несколько температурных интервалов, обусловленных фазовыми превращениями исходных реагентов и образующихся продуктов. После выполнения термодинамических расчетов, построены графики зависимости изменения энергии Гиббса от температуры. Выявлены интервалы температур, где фазовые переходы не влияют на протекание реакции. Следовательно, наряду с пассивными температурными интервалами имеются активные интервалы, в которых наблюдалось резкое увеличение отрицательного значения энергии Гиббса.

Ключевые слова: рафинированный феррохром, кремний, алюминий, восстановление, энергия Гиббса, константа равновесия.

Received: 14 August 2023

Accepted: 15 February 2024

Available online: 29 February 2024

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i1.02>

Enhanced damping properties of novel Cr-Ni-V steels with ceramical-metal nanostucture TiN-Cu coatings

R.Zh. Abuova^{1*}, A. Bondarev², G.A. Burshukova³

¹International education corporation, Almaty, Kazakhstan

²University of Limerick, Ireland

³Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: ryskena@mail.ru

Abstract. The paper investigates novel steel compositions, alloyed with Cr, Ni, and V, exhibiting improved damping properties. Additionally, it proposes a surface coating method to further enhance damping capabilities. Furthermore, the study presents findings on structure and phase formation processes in (TiN)-Cu coatings, deposited via vacuum-arc deposition on EO5 steels substrates. The coating fracture exhibits signs of ductile fracture, accompanied by the formation of fibrous-banded pits on the fracture surface. Scratch tests reveal shear stresses are presumed to be the primary cause of delamination. With increased load, coatings primarily fail along the scratch edge, indicating significant involvement of compressive and tensile stresses. This behavior is attributed to the nanocomposite structure, which hinders crack propagation and allows to maintain ductility. TEM analysis reveals a nanocomposite structure, with electron diffraction confirming the presence of titanium nitride δ -TiN crystallites. No crystallographic texture is observed in the coatings. The coatings significantly influence the internal friction amplitude dependence characteristics. The intricate microstructure, including and internal interfaces, contributes to complex damping properties. Additional damping mechanisms occur at grain interfaces and at the coating-substrate boundary. Further damping mechanisms are incorporated at the interfaces of individual grains and particles and at the interphase interaction boundary in the coating-base system, in addition to the internal damping mechanisms that occur in the coating itself and the substrate independently.

Keywords: nanostructure, damping, dislocation, microstructure, noise, vibration, sound level meter.

1. Introduction

The strategic development of mechanical engineering, associated with technical rearmament, increased labor productivity, and the quality of machine part processing, is largely determined by the implementation of technologies based on automatic lines and flexible manufacturing systems, the reliability of which is conditioned by increased requirements for cutting tools in terms of strength, wear resistance, economic indicators, and the significant role of mechanical noise of impact origin. Noise and vibration in production are harmful and dangerous factors that negatively affect human health. It should be noted that these factors can confidently be called relatives, since they all have a mechanical oscillatory nature of origin. Diseases of the auditory organs (neurosensory hearing loss), musculoskeletal system (vestibular syndrome, polyneuropathy of the upper and lower limbs), cardiovascular system (angiodystonic syndrome) can be caused by prolonged work under the influence of vibroacoustic factors with levels exceeding hygiene standards for workplaces. Occupational diseases related to vibroacoustics account for more than 53% of professional disability losses worldwide. To reduce the noise level at its source, it is necessary to replace impact processes with non-impact ones, replace metallic materials with non-metallic ones, and a number of other methods that effectively combat noise levels [1-8].

The damping capacity of metallic materials is characterized by a combination of acoustic and physico-mechanical characteristics, such as sound pressure level, sound attenuation rate, internal friction, specific electrical resistance, density, shear modulus, and Young's modulus, as well as a number of metallographic features. In the present study, a series of experiments aimed at establishing the relationships between structurally sensitive factors and microstructure with the optimization parameter - the sound level of structural low-alloy steels, the composition of which was determined by the experiment design matrix, were conducted. The selection of nickel, chromium, and vanadium as alloying elements in iron-carbon alloys is explained as follows. As the analysis of works [9-12] showed, alloys with enhanced damping properties contained chromium, nickel, and vanadium as alloying elements. It should be noted that nickel is one of the most abundant elements on Earth (0.09%) and is widely used in iron-based alloys with high damping properties. Nickel additions from 2% to 4% also affect the damping properties of alloys.

The choice of chromium as an alloying element is explained by its wide application in high-damping alloys. Chromium additions to other metals significantly alter their properties and create opportunities for obtaining a wide range of valuable materials. By slightly strengthening ferrite, chromium does not decrease its viscosity, and it is known to be present in more than 3.000 steels and alloys [13].

Vanadium belongs to the elements that are constantly present in steels, and it significantly influences the composition and character of non-metallic inclusions.

In the development of high-damping alloys, one of the main criteria is the unacceptable significant reduction in strength properties. Therefore, one of the reasons for choosing chromium, manganese, and vanadium as alloying elements in iron-carbon alloys was that among the main alloying elements (most commonly used), these elements more strongly strengthen ferrite than others [14].

When using alloying elements in high-damping alloys, reducing the noise level can be achieved in the case of obtaining a real research result because different classes of materials absorb sound energy of vibrations differently, depending on external factors such as the structure component ratio, type of technological processing, etc. Information that the chemical composition of alloys affects damping properties enables the development of compositions from low-alloy steels with high damping properties. In research on noise and vibration reduction during the collision of mechanism parts, noise level reduction is achieved by changing the chemical composition, type of heat treatment, increasing the mass of colliding bodies, and the duration of body collision. However, the surface of metallic materials is rarely changed [15].

The damping ability of the metallic matrix depends on the presence of microplastic deformation in its structure, which is associated with its structure and mechanical parameters. Maximum damping occurs when the structure is ferritic, while minimum damping is provided by a pearlitic structure. A mixed structure exhibits intermediate properties. A mixture of ferrite with troostite demonstrates inferior qualities compared to pearlitic, attributed to the presence of ferrite in its composition. Quenched steel with a martensitic structure dampens more strongly than troostitic due to the increased dislocation density and the appearance of residual stresses at the ends of martensitic crystals.

The use of damping non-metallic materials is limited due to their insufficient strength characteristics in most technological processes. Therefore, the question of creating iron-based alloys with increased damping capacity through changes in chemical composition and special heat treatment is highly relevant. However, the modification of structural materials by coating application is extremely rare.

Improving the operational characteristics of products by applying standard types of coatings, such as chroming and nitriding, has nearly exhausted its possibilities today, necessitating innovative approaches to improvement and the development of a new generation of functional coatings with increased resistance to destruction under conditions of cyclic thermomechanical loads and aggressive environments. One direction in this work is the creation of nanostructured coatings. Nanostructured materials with high grain boundary area exhibit high viscosity and resistance to initiation and propagation of "brittle" cracks, enabling them to resist destruction for extended periods under complex external conditions. The design of the new generation of nanostructured composite coatings with a high grain boundary area allows for the specification of a complex of high physical and mechanical properties.

Nanostructured protective coatings applied to the surfaces of mechanisms and assemblies extend the service life of equipment. Therefore, the application of nanoparticle coat-

ings to products is an urgent task, which this work is dedicated to solving.

In industry, protective coatings are necessary to improve the performance characteristics of components, namely to increase their operational lifespan and reduce production costs. When improving the surface properties of components, their internal structure is not the determining factor. Laboratory research has shown that nanostructured coatings exhibit phenomenal surface protective properties [16-18].

The transition from micro- to nanostructured coatings allows for the enhancement of their properties due to changes in the properties of the crystalline formation itself. This results in the formation of a branched structure of grain boundaries within the film, as the number of atoms inside and on the surface of nanocrystals is equal, eliminating dislocations and internal stresses. The distance between nanocrystals equals the size of several monolayers, resulting in the quantum interaction effect.

Among the methods for forming nanostructured coatings, one of the promising approaches is the process of vacuum arc ion plasma deposition, known in global practice as the arc-PVD process.

Physical vapor deposition from the gas phase, or vacuum deposition, is a group of methods for obtaining coatings where the atomic flux of the deposited substance, created in vacuum or as a result of atomization of the surface atoms of the original material due to physical processes of material evaporation, is formed by bombardment with accelerated ions or neutral atoms.

The formation of the coating occurs as a result of a series of complex physicochemical processes: conversion of the initial deposited material into a flux of sputtered atoms; propagation of the flux towards the deposition surface; collision of the flux with the surface, followed by subsequent adsorption or desorption of atoms on it; surface diffusion of atoms to preferred nucleation sites of the coating; migration, coalescence, and growth of nuclei; coalescence of islands into a continuous film, subsequent growth of the continuous film, and formation of a coating of the required thickness. Each of these stages can be characterized by a set of parameters that ultimately determine the functional purpose of the deposited coatings and their operational characteristics. The fundamental diagram of the vacuum arc spraying method is shown in figure below [19].

The advantages of the method include the following: high coating growth rate (up to 1-1.5 μm , depending on the sprayed material and vacuum chamber configuration); the ability to control the composition of the coating by simultaneously using multiple cathodes or a single multi-component cathode; high adhesive strength of the coatings.

One of the most significant drawbacks of the method is the presence of a droplet phase in the particle stream reaching the surface of the products, which typically adversely affects the film properties and limits the method's application. This problem is addressed using arc filtration [20-21].

2. Materials and methods

For the investigations, samples of steel 20KhN (20XH), 20KhN4PhA (20XH4 Φ A), 25Kh2NMPhA (25X2HM Φ A), and samples of smelted steels EO3, EO4, EO5 were used as the base. Metallic charge materials included scrap metal, ferroalloys, waste from our own production, and iron-armco.

The melting process utilized a crucible induction furnace by Reltex. The arrangement scheme of the samples for the experiment and the melting furnace is demonstrated in Figure 1. Purified titanium in the form of alloy VT1-0 with 99.5% Ti content, copper in the form of alloy M3 with 99.5% Cu content, and composite materials of the titanium-copper system, developed using the powder metallurgy method, were used as cathode materials. The saturation of the composites with the additional component (copper) was low.

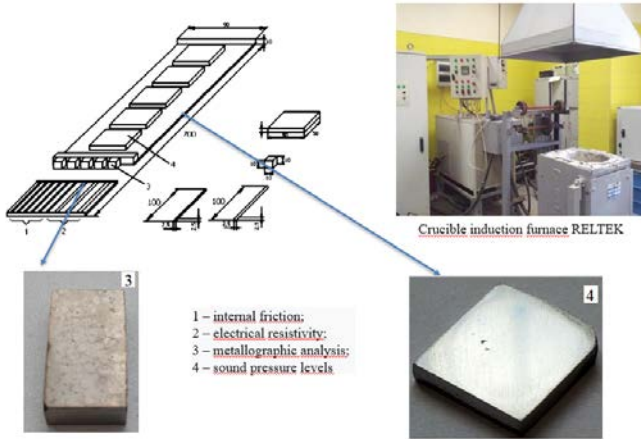


Figure 1. Scheme of cutting out the investigated samples

To implement the main aspects of forming multifunctional coatings, a special vacuum arc plasma spraying setup «Bulat» NNW-6.6-I3 (at the National University of Science and Technology «MISIS», Moscow) was used on the working surfaces of the steel. The principle of operation of the universal vacuum arc setup is provided. The resulting ceramic-metal coatings TiN-Cu with crystallite size ranging from 10 to 100 nm were obtained using ion-plasma vacuum-arc deposition.

The development stages of the ceramic-metal coatings on the surfaces of the steel samples were as follows:

- preparatory;
- ion cleaning and heating;
- application of coatings;
- cooling of the products.

The principle of operation of the universal vacuum arc setup is depicted in Figure 2.

The equipment performs the separation of neutral particles into a micro droplet phase. This is achieved by deflecting charged particles of the ion flow with a powerful magnetic field. The separator can simultaneously serve as a plasma flow accelerator, an electron source needed for thermal activation of the tool, and a source of highly charged ions of gas (nitrogen) for stimulated thermochemical treatment of the tool.

Based on the research of setups for studying acoustic (sound level, sound pressure level) and vibration (vibration acceleration level, overall vibration acceleration level) characteristics of steels, a device for comprehensive study of acoustic and vibration properties of plate and tubular steel samples was applied with further modernization [23]. The operation scheme of the setup is provided in Figure 3.

The impact ball 6 was installed on the inclined plane 5, along which it rolled down and freely fell into the geometric center of the plate sample 3. The impact ball 6 rebounds from the plate sample and lands in the ball receiver 11.

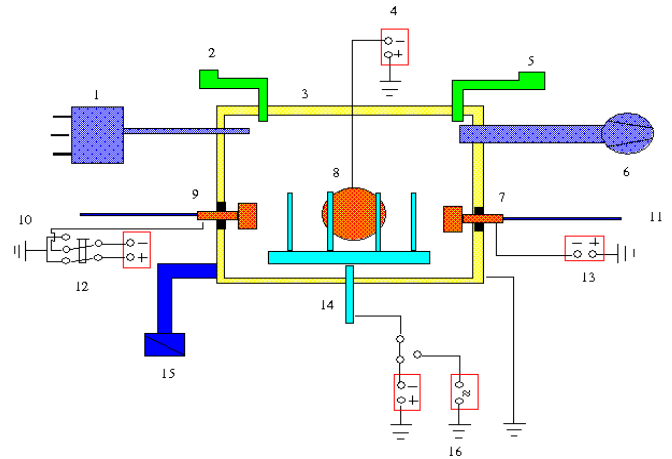


Figure 2. Scheme of vacuum arc setup [22]: 1 - gas mixer; 2 - vacuum meter; 3 - chamber of the setup; 4 - power source for the accelerator-separator; 5 - temperature control system; 6 - vacuum system; 7, 9 - arc evaporators; 8 - source of separated plasma; 10, 11 - evaporator cooling systems; 12, 13 - evaporator power sources; 14 - rotary table for tool placement; 15 - heating and cooling system of the chamber; 16 - source of pulsed bias voltage for the tool

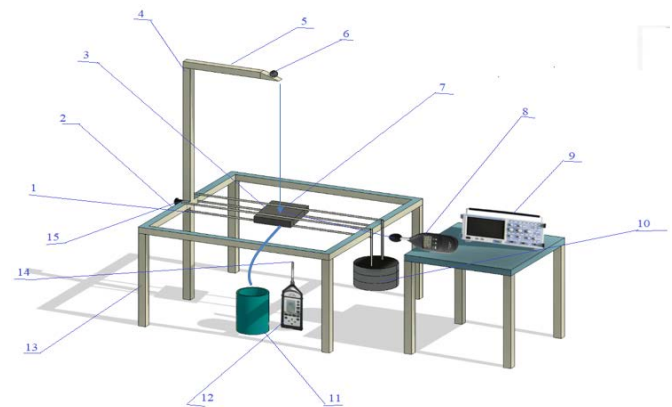


Figure 3. Device for comprehensive study of acoustic and vibration properties of solid samples [23]: 1 - nylon threads; 2 - frame; 3 - plate sample; 4 - frame stand; 5 - inclined plane; 6 - impact ball; 7 - vibration sensor of the «Bruel&Kjer» sound level meter; 8 - «Bruel&Kjer» sound level meter model 2204 with octave filter model 1613; 9 - oscilloscope C-18; 10 - weight; 11 - ball receiver; 12 - «Octava 101A» sound level meter; 13 - frame stands; 14 - microphone of the «Octava 101A» sound level meter; 15 - screw for mounting the impactor stand

Sound generated as a result of the impact between the impact ball 6 and the sample 3 is recorded using the «Octava-101A» sound level meter 12. The plate sample 3, when vibrating in the nylon threads 1, causes vibration, which is measured by the apparatus model 2204 by «Bruel&Kjer» 8. The tension of the sample with nylon threads 1 remains stable because the weight 10 controls the tension force. The height of the ball drop is adjusted by the screw for mounting the impactor stand 15. The complex of mounting the sample 3 and the impact ball 6 is fixed on the frame 2, which is secured by stands 13 at the required height above the floor.

To perform measurements, impact balls ShKh15 (ШХ15) made of steel with diameters of 7 mm (1.40 g), 8 mm (2.09 g), 9 mm (2.97 g), and 11 mm (5.55 g) were utilized. The investigation of steel plate samples (50x50x5 mm) was conducted using the setup.

The mass of the ball, the density of the sample, the distance from the impact point to the sample, and the thickness of the sample are interrelated by the following equation:

$$m < 4.6 \cdot \rho \cdot l \cdot h^2 \quad (6)$$

where m is the mass of the plate sample (g),
 ρ is the density of the material of the plate sample (g/cm³),

l is the distance from the impact point to the nearest edge of the plate sample (cm),

h is the thickness of the plate sample (cm).

It is necessary for the width and length of the plate sample to exceed its thickness by 5 times. An experimental plate with dimensions of 50x50x5 mm meets these criteria.

The investigation of sound pressure levels was conducted in octave frequency bands ranging from 31.5 to 31500 Hz, and vibration acceleration levels were measured in the same frequency range. The sound level was adjusted according to the «A» scale, while the overall vibration acceleration level was adjusted according to the «Lin» characteristic. The use of the sound generator ZG-10 (3Г-10) was necessary for calibrating the sound signal studies. Corrections for changes in the sound signal due to atmospheric pressure were made using the pistonphone of the PF-101 model. The laboratory maintained a constant air temperature and humidity. Acoustic measurements were calculated as the arithmetic mean of five measurements.

Mathematical processing of the experiment results and identification of additional intervals were conducted according to the methodology. Before commencing work, the measurement setup was calibrated by verifying the sound pressure levels of the reference sample.

The determination of the dissipative properties of steels involved registering the sound impulse generated by the collision of the test sample with the striker using a recording oscilloscope. Subsequently, photographs were taken to identify damping parameters, including the logarithmic decrement, sound decay rate, relative scattering, and internal friction.

Figure 4 demonstrates a fixed photograph of the sound impulse resulting from the collision of 20KhN (20XH) steel samples.

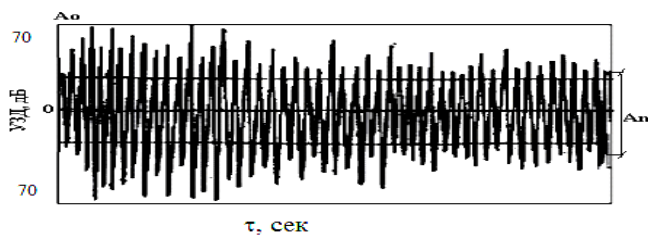


Figure 4. Oscillogram of the sound impulse decay from the collision of the 20KhN (20XH) steel sample and the impact ball

The logarithmic decrement of this alloy, δ , was determined using the following equation [24]:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n} = \frac{1}{40} \ln \frac{74}{42} = 0.0134 \quad (7)$$

where A_0 is the initial maximum amplitude of the sound impulse,

A_n is the final minimum amplitude of the sound impulse,
 n is the number of impulses on the oscilloscope screen.

The relative scattering, ψ , is calculated as follows:

$$\psi = 2\delta = 2 \cdot 0.0134 = 0.028 \quad (8)$$

Internal friction Q^{-1} was calculated using the following relation [25]:

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{0.0134}{3.14} = 0.38 \cdot 10^{-2} \quad (9)$$

The time interval of the oscilloscope display is equal to 0.005 seconds. The interval is divided into $9 \times 5 = 45$ subintervals. Thus, the time interval division value of the oscilloscope is 0.00011 seconds.

Measurement of internal friction was conducted not only through theoretical calculations. Knowing that there is excitation of bending waves in the plate during impact, the study of internal friction of the developed alloys was carried out using the bending oscillation method. For this purpose, an automatic device was used for continuous registration of internal friction occurring during bending oscillations of rods with electromagnetic excitation in the high-frequency range (950-1000 Hz), amplitudes of 104, and temperatures ranging from 20 to 600°C.

The investigation of internal friction was conducted using a discriminator and a pulse counter according to the formula [24]:

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{\pi \cdot n} \ln \frac{V}{V_n} \quad (10)$$

Where δ is the logarithmic decrement; V is the initial amplitude; V_p is the final amplitude; n is the number of oscillations performed by the sample in the range from the initial to the final amplitude.

The detection of instrumental losses was carried out using a quartz rod installed in place of the sample. Such measurements allow for an assessment of the background level of the setup, which has readings of less than 10^{-5} , significantly lower than the minimum attenuation of the samples under investigation. A detailed description of the methodology is provided in the paper. The parameters of internal friction were studied using samples with dimensions of 1.5x1.5x100 mm after hot rolling in the frequency range of 950-1000 Hz at room temperature (20°C). Each sample was measured five times [26].

3. Results and discussion

The identification of chemical elements used in steel production and their physical parameters was carried out using commonly accepted methodologies for identifying alloying substances, as well as tensile testing methodology. The results of studying the chemical substances and physical characteristics of standard steels 20KhN (20XH), 20KhN4PhA (20XH4ΦA), 25Kh2NMPPhA (25X2HMΦA) are demonstrated in Table 1. After reviewing Table 1, you can see the results of the study of the chemical elements included in the prepared steel, as well as the physical qualities.

A comparative analysis of the data presented in Table 2 shows that the smelted steels EO3, EO4, and EO5, with comparable plastic properties (such as relative elongation δ_5 and relative contraction ψ), exhibit higher strength and impact toughness indicators than standard counterparts.

Table 1. Chemical substances and physical characteristics of steels

Type of steel	Chemical elements, %								Physical qualities				
	C	Ni	Mn	Si	V	Cr	Fe	Other substances	σ_B	σ_T	Δ_s	ψ	KCU
									MPa	%		D_{zh}/sm^2	
20KhN (20XH)	0.17-0.23	1.00-1.40	0.40-0.70	0.17-0.37	-	0.45-0.75	rest	$\leq 0,035 S$; $\leq 0,035 P$; $\leq 0,30 Cu$;	780	590	11	40	66
20 KhN4PhA (20XH4ΦA)	0.17-0.24	3.75-4.15	0.25-0.55	0.17-0.37	0.10-0.18	0.70-1.10	rest		880	685	9	40	83
25Kh2NMPPhA (25X2HMΦA)	0.23-0.27	1.30-1.60	0.40-0.70	0.17-0.35	0.05	1.80-2.20	rest		657	520	14	40	49

Table 2. Chemical composition and mechanical properties of smelted steels

Type of steel	Chemical elements, %									Physical qualities				
	C	Ni	Mn	Si	V	Cr	Co	Fe	Other substances	σ_B	σ_T	Δ_s	ψ	KCU
										MPa	%		D_{zh}/sm^2	
EO3	0.22	1.2	0.7	0.30	0.35	0.8	0.1	rest	0,035 S; 0,035 P; 0,35 Cu; 0,02 = Al0,01 = Bi	1100	980	11	48	120
EO4	0.35	2.5	0.8	0.20	0.40	0.8	0.2	rest		1050	950	10	45	100
EO5	0.45 - 0.48	1.0 - 1.2	0.7-0.8	0.5-1.2	0.35-0.45	0.9	0.3-0.4	rest		1100	1000	8	40	110

For instance, the yield strength (σ_v) of these alloys is 1.19-1.25 times greater than that of the most durable standard analogue, 20KhN4PhA (20XH4ΦA), the tensile strength (σ_t) is 1.39-1.46 times greater, and the impact toughness (KCU) is 1.20-1.33 times greater. These results were achieved through additional alloying of the steel with small additions of Co and increased amounts of V, as well as optimization of the content of C, Ni, Cr, Si, and Mn. Therefore, it is more promising in the present study to investigate steels based on chromium, nickel, and vanadium.

The obtained coatings had a thickness of 2.5 μm . The fracture of the coating exhibits signs of ductile failure and is accompanied by the formation of pits in a fibrous-striated fracture on the micro-relief (Figure 5). Analysis of the coating structure conducted using TEM demonstrates the presence of a nanostructure (Figure 5a, b).

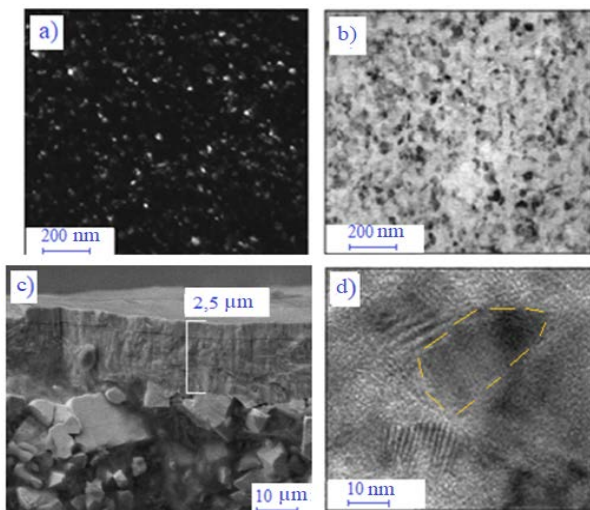


Figure 5. a) Dark-field TEM image of the coating; b) Bright-field TEM image of the cross-section of the coating; c) cross-section fracture Bright-field of TiN-Cu coating on EO5 substrate; d) High-resolution TEM image of TiN-Cu coating

Based on the obtained dark-field images, it can be concluded that the obtained coatings have an average grain size of about 15-30 nm and are characterized by a layer thickness comparable to the grain size.

Figures 6-8 show oscillograms depicting the decrease in the level of the acoustic impulse against the background of the contact of a metal sphere with samples of well-known 25Kh2NMPPhA (25X2HMΦA) and synthesized samples (EO5). In Figures 6-8, it can be observed based on the oscillograms of the acoustic impulse attenuation resulting from contact with a metal sphere with widely used steel grades.

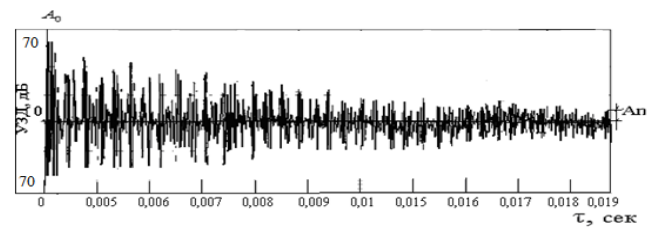


Figure 6. Oscillogram of the attenuation of the acoustic impulse from contact with a metal sphere with the reference 25Kh2NMPPhA (25X2HMΦA) sample

In Figure 7, the oscillogram of the attenuation of the acoustic impulse from contact with a metal sphere with the synthesized steel EO5 is visible.

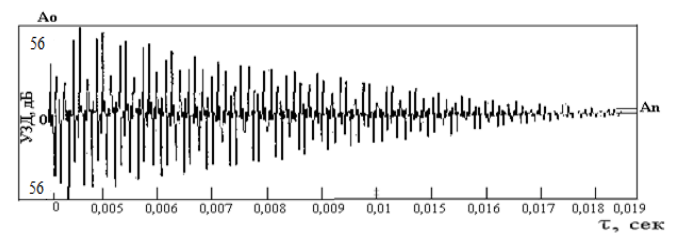


Figure 7. Oscillogram of the attenuation of the acoustic impulse from contact of a metal manufactured EO5 steel

In Figure 8, oscillograms of the attenuation of the acoustic impulse from contact of a metal sphere with EO5 (KMNC) are demonstrated, through which dissipation parameters were identified.

The oscillograms of dissipative alloys EO5 and EO5(KMNC) in terms of sound impulse attenuation show a rapid decrease in sound level, remaining within the range of 25-35 dBA over a large time interval. Meanwhile, the initial sound level is 54-56 dBA.

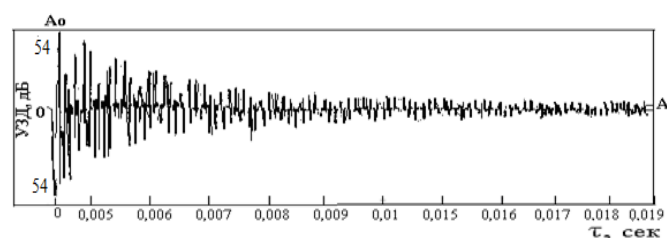


Figure 8. Oscillogram of the attenuation of the acoustic impulse from contact with a metal sphere of the smelted sample EO5(KMNC)

This indicates that the nature of sound wave dissipation in samples EO5 and EO5(KMNC) is higher than that of standard samples 25Kh2NMFA (25X2HMΦA), where the initial sound level is 77 dBA. After half of the time interval, the sound impulse decreases by half, but complete sound attenuation does not occur within 2 ms.

According to the analysis of the oscillograms of sound impulse attenuation shown in Figures 7 and 8, it can be observed that the developed alloys EO5 have the following characteristics: EO5 $Q^{-1}=1.54 \cdot 10^{-2}$; $\psi=9.66 \cdot 10^{-2}$; $\delta=4.83 \cdot 10^{-2}$ и EO5(KMNC) $Q^{-1}=1.72 \cdot 10^{-2}$; $\psi=10.8 \cdot 10^{-2}$; $\delta=5.40 \cdot 10^{-2}$. These alloys exhibit increased sound attenuation rates and dissipative characteristics compared to standard steels such as 25Kh2NMFA (25X2HMΦA), where: 25Kh2NMFA (25X2HMΦA) ($Q^{-1}=0.58 \cdot 10^{-2}$; $\psi=3.64 \cdot 10^{-2}$; $\delta=1.82 \cdot 10^{-2}$).

4. Conclusions

Measurements of ultrasonic pressure have shown that the application of TiN-Cu nanostructured coating, leads to an increase in the attenuation of mechanical vibration energy. When stress amplitudes exceed the critical dislocation mobility, local deformation occurs within individual grains, leading to an increase in the decrement of oscillations. However, further increases in stress levels lead to the accumulation of free dislocations at grain boundaries, reducing their mobility and consequently decreasing the oscillation decrement. The presence of thin coatings on the surface of samples results in the formation of quasi-free dislocations and changes in stress states, thus increasing the damping level of composites.

In vacuum arc deposition, the formation of nanostructured coatings and the contact interphase zone are accompanied by saturation with a large number of point and linear defects. This enhances the damping properties of the structure due to stress fields and relaxation effects. The increase in the ability to dissipate stored elastic energy after the application of coatings primarily occurs for materials with coatings having greater interfacial boundary extension, as demonstrated by multicomponent coatings. Thus, the nanostructured TiN-Cu coating exhibits the highest damping properties.

References

[1] Mukhametzhanova, D. & Bakirbekova, A. (2023). Innovative Directions of Machine Building Development in Kazakhstan. *Economic Series of the Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University*, (4), 73–78

[2] Abdrakhmanov, N.Kh., Fedosov, A.V., Khamitova, A.N., Badrtidinova, I.I. & Matuzov, G.L. (2021). Main aspects of vibroacoustic factors assessment. *Safety of Technogenic and Natural Systems*, (3), 13-22. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-3-13-22>

[3] Izmerov, N.F., Buhtijarov, I.V. & Denisov, Je.I. (2016). Ocenka professional'nyh riskov dlja zdorov'ja v sisteme dokazatel'noj mediciny. *Voprosy shkol'noj i universitetskoy mediciny i zdorov'ja*, (1), 14–20

[4] Volkova, A.A., Shishkunov, V.G., Homenko, A.O. & Tjagunov, G.V. (2018). Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti v primerah i zadachah (Uchebnoe posobie). *Ekaterinburg: Izdatel'stvo Uralskogo universiteta*

[5] Efanov, A.M. (2019). Vlijanie shumovogo vozdejstvija na zdorov'e cheloveka. *Nauka-2020*, 11(36), 158-163

[6] Liming, Yu, Yue, Ma, Chungen, Zhou, Huibin, Xu. (2005). Damping efficiency of the coating structure. *International Journal of Solids and Structures*, (42), 3045-3058

[7] Kopylov, V.I. & Antonenko, D.A. (2014). Fiziko-mehaničeskije karakteristiki i vnutrennee trenie materialov s mnogofaznymi plazmennymi pokrytijami. *Problemy tehniki*, (2), 72-89

[8] Katahara, K.W., Nimalendran, M., Manghnani, M.H. & Fisher, E.S. (1979). Elastic moduli of paramagnetic chromium and Ti-V-Cr alloys. *Journal of Physics F: Metal Physics*, 9(11), 2167-2176

[9] Bobylev, V.N., Tishkov, V.A. & Pauzin, S.A. (2007). Jeksperimental'nye issledovanija zvukoizoljicii mnogoslojnyh konstrukcij s ortotropnym sloem. *Sbornik trudov: Akustika rechi. Medicinskaja i biologičeskaja akustika. Arhitekturnaja i stroitel'naja akustika. Shumy i vibracii. Ajerokustika*, V.3, 201-205

[10] Chatillon Jacques. (2007). Influence of source directivity on noise levels in industrial halls: Simulation and experiments. *Applied Acoustics*, 68(6), 682-698

[11] Wang Huigang, Chen Guoyue, Chen Kean, Muto Kenji. (2006). Blind preprocessing method for multichannel feedforward active noise control. *Acoustic Science Technology*, 27(5), 278-284

[12] Panigrahi, S.N. & Munjal, M. L. (2007). A generalized scheme for analysis of multifarious commercially used mufflers. *Applied Acoustics*, 68(6), 660-681

[13] J. Zhejiang Forest, Ni Yong-zhou. (2006). Zhejiang linxueyuan xuebao. *Coll.*, 23(1), 112-114

[14] Martin, M.A., Tarerro, A., Gonzalez, J. & Machimbarena, M. (2006). Exposure – effect relationships between road traffic noise annoyance and noise cost valuations in Valladolid, Spain. *Acoust.*, 67(10), 945-958

[15] Song Lei-ming, Sun Shou-guang, Xing You-sheng, Zhang Xinhua. (2005). Tiedao xiiebao. *Journal of China Railway Society*, (6), 101-104

[16] Lenkkeri, J.T. & Lahteenkorva, E.E. (1978). An investigation of elastic moduli of vanadiumchromium alloys. *Journal of Physics F: Metal Physics*, 8(8), 1643-1651

[17] Potehin, B.A., Lukashenko, S.G. & Kochugov, S.P. (2000). Vlijanie plazmennyh pokrytij na dempfirujushhie svojstva konstrukcionnyh. *Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov*, (10), 30 – 33

[18] Kutschej, K., Mayrhofer, P.H., Kathrein, M., Polcik, P. & Mitterer, C. (2004). A new low friction concept for Ti1-xAlxN based coatings in high temperature applications. *Surface and Coatings Technology*, (188–189), 358 – 363

[19] Gleiter, H. (1993). Mechanical Properties and Deformation Behaviour of Materials Having Ultra-Fine Microstructures. *Netherlands: Kluwer Akad. Publ*

[20] Pogrebnyak, A.D. Drobyshevskaja, A.A. & Beresnev, V.M. Mikro- i nanokompozitnye zashhitnye pokrytija na osnove Ti–Al–N/Ni–Cr–B–Si–Fe, ih struktura i svojstva. *Technical physics*, 81(7), 124-31

[21] Kuzmichev, A.I. (2008). Magnetronnye raspylitel'nye sis temy. *K.: Avers*

[22] Uteпов, E.B., Suleev, D.K. & Uteпов, T.E. (2000). Nauchnye osnovy sozdanija «tihih» splavov (problemy akustičeskoj jekologii). *Almaty: LLP «Print»*

[23] Granato, A., Lucke, K. (1956). Theory of Mechanical Damping Due to Dislocations. *Journal of Applied Physics*, 27(6), 583-593

- [24] Cremer, H. & Cremer, L. (1948). Theorie der Entstehung des klopts – chalts. *Ereuzenz* 1948, 2(3), 61-71
- [25] Kerzhencev, V.V. & Dedenko, L.G. (1971). Matematicheskaja obrabotka i oformlenie rezul'tatov jeksperimenta. M.: MGU
- [26] Krishtal, M.A. & Golovin, S.A. (1976). Vnutrennee trenie i struktura metallov. M.: Metallurgija
- [27] Abuova, R.Zh. (2020). Structure of chromium-nickel vanadium steels with ceramic (TiN/Cu) nanostructured coating to solve noise reduction problems. *Bulletin of Kazakh Leading Academy of Architecture and Construction*, №3(77), 233-240. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2020.3-31>
- [28] Abuova, R.Zh., Ten, E.B., Burshukova, G. (2021). Study of vibration properties of ceramic-metal nanostructural TiN-Cu coatings with different copper content 7 and 14 at. % on chromium-nickel-vanadium steels. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences*, 5(449), 6-13. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.92>

TiN-Cu металл керамикалық наноқұрылымды жабыны бар жаңа Cr-Ni-V болаттарының жақсартылған демпферлік қасиеттері

Р.Ж. Абуова^{1*}, А. Бондарев², Г.А. Буршукова³

¹Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, Қазақстан

²Лимерик Университеті, Ирландия

³Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: ryskena@mail.ru

Аннотация. Бұл мақалада демпферлік қасиеттері жоғарылаған композициялары бойынша құрамында Cr, Ni, V қоспалары бар жаңа балқытылған болаттарды жасау және оларды наноқұрылымды жабындарды тұндыру арқылы олардың демпферлік қасиеттерін одан әрі арттыру тәсілі ұсынылды. Балқытылған жаңа ЭО5 болаттарға ионды-плазмалық вакуумды-доғалық тұндыру әдісі арқылы (TiN)-Cu жабындардың құрылым және фаза түзілу процестерін зерттеу нәтижелері берілген. Қаптаманың сынуы иілгіш сыну белгілеріне ие және микрорельефте талшықты жолақты сынық шұңқырларының пайда болуымен бірге жүреді. Бөлшектердің сипатына сүйене отырып, ығысу кернеулері бұзылуға негізгі үлес қосады деп болжауға болады. Жүктеме ұлғайған сайын жабындар негізінен сызаттың жиегі бойынша бұзылады, яғни жабынның субстрат материалына көбірек шегінуі кезінде сызаттың шеттеріндегі қысу және созылу кернеулері бұзылуда маңызды рөл атқара бастайды. Бұл зерттелетін жабындардың нанокомпозиттік құрылымымен түсіндіріледі, ол шекаралардың тармақталған желісінің әсерінен жарықшақтардың таралуын тежеуге, сондай-ақ тұтқырлықты сақтауға көмектеседі. Микродифракциялық талдау және қараңғы өрістегі ТЕМ кескіндері негізінде жабындағы кристаллиттер титан нитридін δ-TiN болып табылады деп қорытынды жасауға болады; жабындарда кристаллографиялық құрылым анықталмады. TiN фазасының кристаллит өлшемі TiN-Cu жабыны бар болат үлгілерінің ішкі үйкелісінің амплитудалық тәуелділіктерін құрайды. Демпферлік сипаттамалардың болуы наноөлшемді TiN түйіршіктерінің шекарасында керамикалық негізден және мыс пластикалық фазасынан тұратын жабынның композициялық микроқұрылымына байланысты. Жабындардың өзіне және субстратқа бөлек тән ішкі демпферлік сипаттамаларға қосымша «жабын-негіз» интерфейсында қосымша демпферлік механизмдер жүзеге асырылады.

Негізгі сөздер: наноқұрылым, демпферлеу, дислокация, микроқұрылым, шу, діріл, шу өлшегіш.

Улучшенные демпфирующие свойства новых сталей Cr-Ni-V с металлокерамическим наноструктурным покрытием TiN-Cu

Р.Ж. Абуова^{1*}, А. Бондарев², Г.А. Буршукова³

¹Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан

²Университет Лимерик, Ирландия

³Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: ryskena@mail.ru

Аннотация. В данной статье проведены исследования впервые разработанных составов сталей марки ЭО5, легированных Cr, Ni, V, обладающими повышенными демпфирующими свойствами и предложен подход по дальнейшему повышению их демпфирующих свойств за счет осаждения на их поверхность покрытий. Приведены результаты исследований процессов формирования структуры и фазообразования в покрытиях (TiN)-Cu полученных методом ионно-плазменного вакуумно-дугового напыления на подложки из выплавленных сталей ЭО5. Излом покрытия имеет признаки вязкого разрушения и сопровождается образованием ямок волокнисто-полосчатого излома в микрорельефе. Исходя из характера отслоений при скратч-тестировании, можно предположить, что основной вклад в разрушения

вносят сдвиговые напряжения. При увеличении нагрузки покрытия основном разрушаются по краю царапины, то есть при большем вдавливании покрытия в материал подложки существенную роль в разрушении начинают играть сжимающие и растягивающие напряжения по краям царапины. Это объясняется нанокomпозиционной структурой исследуемых покрытий, способствующей сдерживанию распространения трещин за счет разветвленной сети границ, а также сохранения вязкости. По микродифракционному анализу и полученным темнопольным изображениям методом ПЭМ можно заключить, что кристаллиты в покрытии являются нитридом титана δ -TiN, кристаллографической текстуры в покрытиях обнаружено не было. Размер кристаллитов фазы для TiN составляет амплитудные зависимости внутреннего трения образцов сталей с покрытиями TiN-Cu. Наличие демпфирующих характеристик обусловлено композиционной микроструктурой покрытия, состоящей из керамической основы и пластичной фазы меди по границам наноразмерных зерен TiN. Кроме внутренних демпфирующих характеристик, присущих самим покрытиям и подложке по отдельности, реализуются дополнительные демпфирующие механизмы на границах раздела «покрытие-основа».

Ключевые слова: наноструктура, демпфирование, дислокация, микроструктура, шум, вибрация, шумомер.

Received: 25 November 2023

Accepted: 15 February 2024

Available online: 29 February 2024

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i1.03>

Review of methods for processing ore vanadium-containing raw materials

T.A. Chepushtanova¹, S.B. Yulussov¹, O.S. Baigenzhenov¹, A.T. Khabiyev¹, Y.S. Merkiybayev^{1*}, B. Mishra²

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA

*Corresponding author: y.merkibayev@satbayev.university

Abstract. The article discusses the methods of processing vanadium-containing raw materials, including methods of pre-sintering and leaching of raw materials, extraction and precipitation of vanadium-containing solutions. In addition, the specific methods used for each type of vanadium-containing raw materials are described, with a description of their advantages and limitations. The article also briefly analyzes a number of the main influencing factors and mechanisms of various processes. Some research prospects are proposed to improve the methods of vanadium concentration from vanadium-containing raw materials. The article considers the potential of extraction and processing of vanadium-containing black shale ore, as well as vanadium-containing titanomagnetite ores. Spent vanadium catalysts used in petrochemical processes can be a potential source for vanadium extraction. In addition, vanadium-containing bauxite raw materials, oil and steel production slags can be promising raw materials for further extraction of vanadium. The article presents methods for processing vanadium-containing raw materials, including methods of pre-sintering and leaching of raw materials, extraction and precipitation of vanadium-containing solutions. In addition, the specific methods used for each type of vanadium-containing raw materials are described, with a description of their advantages and limitations. The article also examines the potential of extraction and processing of vanadium-containing black shale ore, vanadium-containing titanomagnetite ores as a potential source for vanadium extraction. Vanadium-containing bauxite raw materials and steelmaking slags can also be promising raw materials for further extraction of vanadium.

Keywords: vanadium-containing raw materials, black shale ore, titanium magnetite ores, leaching, sintering.

1. Введение

Ванадий является переходным металлом и важнейшим элементом, широко применяемым в различных отраслях промышленности, включая производство стали [1], накопление энергии [2] и катализ [3]. Его уникальные свойства, такие как высокая прочность, отличная коррозионная стойкость и способность образовывать стабильные соединения, делают его незаменимым в этих отраслях [4]. Цель данного обзора - анализ и систематизация существующих методов переработки ванадийсодержащих руд, выявление их достоинств и недостатков. Рассмотрены как традиционные пиро- и гидрометаллургические схемы, так и современные комбинированные технологии, включающие окислительный обжиг, выщелачивание и экстракционное извлечение ценных компонентов. Особое внимание уделено инновационным решениям, позволяющим повысить степень извлечения ванадия и снизить экологическую нагрузку производства. Проведенный анализ методов переработки позволит оптимизировать существующие и разработать новые ресурсосберегающие технологии комплексной переработки ванадийсодержащего сырья. Вследствие этого в последние годы значительное внимание уделяется добыче и переработке ванадия из различных источников.

Ввиду того, что спрос на ванадий продолжает расти, эффективная переработка ванадиевых руд и промышленных отходов приобретает первостепенное значение для обеспечения устойчивой цепочки поставок этого важного ресурса.

Далее на рисунке 1 представлена схема извлечения ванадия из ванадийсодержащего сырья и перерождения его в оксид ванадия [5-13], состоящая из четырех стадий, таких как обжиг, выщелачивание, извлечение и прокаливание. Для каждой из стадий представлены процессы, необходимые для реализации данных стадий.

Ванадий может быть извлечен из руд и материалов с помощью пирометаллургических процессов [14]. Один из распространенных методов известен как процесс спекания-выщелачивания. В этом процессе руду или материал сначала спекают при высоких температурах для превращения минералов ванадия в водорастворимые соединения. Затем обожженный материал выщелачивают соответствующим раствором для растворения соединений ванадия. Полученный раствор подвергается дальнейшей переработке для удаления примесей и извлечения ванадия. Это может включать осаждение, фильтрацию и другие методы разделения. В конечном итоге ванадий получают в виде соединения высокой чистоты, например, оксида ванадия (V) [15, 16].



Рисунок 1. Схема извлечения ванадия из ванадийсодержащего сырья и перевода его в оксид ванадия (V)

2. Переработка черносланцевых руд

2.1. Методы извлечения ванадия из черносланцевых руд с использованием кислотных технологий

Метод кислотного выщелачивания (рисунок 2) широко используется при извлечении ценных металлов из черносланцевых руд [17]. Данный метод включает в себя стадии обжига ванадийсодержащего сланца, водное выщелачивание и фильтрацию полученного продукта после обжига, кристаллизацию квасцов и их фильтрацию, восстановление Fe(III) и регулирование pH водного раствора, экстракцию растворителями ванадийсодержащих ценных продуктов, а также стадию очистки.

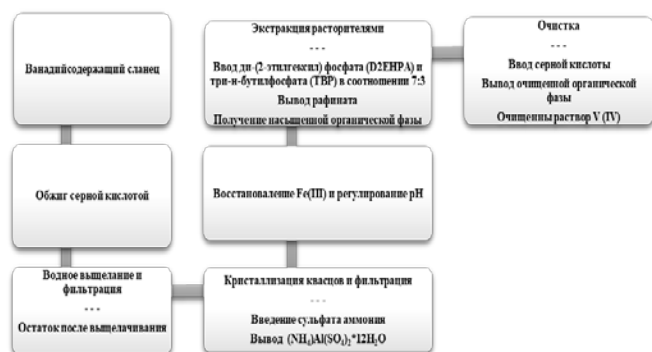


Рисунок 2. Схема извлечения ванадия из ванадийсодержащего сырья и перевода его в оксид ванадия (IV)

Черносланцевые руды представляют собой осадочные породы, содержащие высокие концентрации различных минералов, включая неблагородные металлы, драгоценные металлы и редкоземельные элементы [18]. В этом методе используются сильные кислоты для растворения и извлечения этих ценных металлов из руды. Принцип работы заключается в том, что кислота (чаще

всего серная или соляная) реагирует с минералами, образуя растворимые соли. Это позволяет отделить ценные металлы от нежелательных компонентов.

Первым этапом процесса кислотного выщелачивания является подготовка руды. Черносланцевую руду подвергают дроблению и измельчают на мелкие частицы, чтобы увеличить площадь поверхности для лучшего контакта с кислотой. За этим следует ряд этапов предварительной обработки, таких как обжиг или спекание, для удаления примесей или органических веществ, которые могут помешать процессу выщелачивания.

После спекания материал подвергают процессу кислотного выщелачивания. Серная кислота является наиболее часто используемой кислотой для этой цели из-за ее доступности и эффективности при растворении широкого спектра металлов. Кислоту обычно добавляют в руду контролируемым образом, чтобы обеспечить эффективное выщелачивание при минимальном расходе кислоты.

В процессе выщелачивания кислота вступает в реакцию с минералами, содержащимися в руде, растворяя ценные металлы и переводя их в раствор. Условия выщелачивания, такие как температура, давление и концентрация кислоты, тщательно контролируются для оптимизации эффективности процесса выщелачивания. Повышение температуры и концентрации кислоты может улучшить кинетику растворения, но чрезмерно высокая температура и добавление кислоты могут привести к нежелательным побочным реакциям или образованию нерастворимых соединений.

Раствор после выщелачивания содержит растворенные металлы и отделяется от оставшегося твердого остатка с помощью ряда методов разделения твердого вещества и жидкости, таких как фильтрация или осаждение. Твердый остаток, также известный как осадок выщелачивания или хвосты, все еще может содержать следы ценных металлов и может быть подвергнут дальнейшей переработке для извлечения оставшихся металлов.

После проведения процесса кислотного выщелачивания необходимо извлечь ценные растворенные металлы из раствора, полученного после выщелачивания. Обычно это достигается с помощью методов сорбции, осаждения или экстракции растворителем [19]. Осаждение включает добавление подходящего реагента к раствору для выщелачивания, в результате чего металлы образуют нерастворимые осадки, которые можно легко отделить. Экстракция растворителем, с другой стороны, предполагает использование органического растворителя, который избирательно извлекает нужные металлы из раствора для выщелачивания.

Далее извлеченные металлы могут быть дополнительно очищены и переработаны для получения конечного продукта. В зависимости от требований к очистке металлов, могут потребоваться дополнительные стадии рафинирования, такие как электролиз или плавка. Эти этапы направлены на удаление примесей и повышение чистоты и качества конечного металлосодержащего продукта.

Метод кислотного выщелачивания обладает рядом преимуществ при переработке черносланцевых руд [20]. Во-первых, это позволяет извлекать из руды широкий спектр ценных металлов, включая неблагородные металлы, такие как медь и цинк, драгоценные металлы, такие как золото и серебро, и редкоземельные элементы. Это

делает его универсальным и экономически целесообразным методом извлечения множества металлов из одного источника руды.

Во-вторых, процесс кислотного выщелачивания относительно прост и прямолинеен, требует минимального оборудования и инфраструктуры по сравнению с другими методами экстракции, что делает его экономически эффективным вариантом как для мелкомасштабных, так и для крупномасштабных операций по добыче полезных ископаемых.

Более того, метод кислотного выщелачивания является экологически чистым по сравнению с традиционными методами добычи полезных ископаемых. Это уменьшает необходимость в масштабных операциях по добыче полезных ископаемых, которые могут нанести значительный ущерб окружающей среде и нарушить ее покой. Кроме того, использование кислот в процессе выщелачивания может быть оптимизировано для минимизации потребления кислоты и образования отходов. Однако метод кислотного выщелачивания также имеет некоторые ограничения и проблемы. Одной из основных проблем является наличие в руде примесей, таких как органическое вещество или тугоплавкие минералы, которые могут препятствовать процессу выщелачивания и снижать общую эффективность извлечения. Для удаления этих примесей и улучшения эффективности выщелачивания часто необходимы этапы предварительной обработки, такие как обжиг или спекание.

Метод кислотного выщелачивания предлагает экономически эффективный и экологически чистый подход к извлечению ценных металлов из этих сложных руд или материалов. Благодаря постоянному совершенствованию технологий и оптимизации технологических процессов метод кислотного выщелачивания продолжает оставаться многообещающим вариантом для горнодобывающей и металлургической промышленности.

2.2. Методы извлечения ванадия из черносланцевых руд с использованием щелочных технологий

Черносланцевые руды являются одним из важнейших источников ванадия в мире. По оценкам экспертов, на их долю приходится 35-40% от общемировой добычи ванадия [21]. Ванадий в данных рудах присутствует преимущественно в виде тонкодисперсных (размер частиц менее 0,1 мкм) вкраплений минералов ванадинита $Pb_5(VO_4)_3Cl$ и роскоелита KV_2O_4 в тонкозернистой сланцевой породе [22]. Высокая дисперсность ценного компонента, его плотная ассоциация с вмещающей породой значительно осложняют процесс извлечения ванадия из черных сланцев традиционными методами обогащения - гравитационными, магнитной сепарацией, флотацией.

Для эффективного извлечения ванадия из подобного труднообогатимого сырья широко используются гидрометаллургические щелочные технологии, основанные на химическом разложении (вскрытии) сырья в щелочных растворах с переводом ванадия в раствор и последующим его выделением [23].

Наиболее распространен способ обработки черносланцевой руды растворами гидроксида натрия или кальция при температуре 90-95°C, давлении 1.2-1.5 МПа и продолжительности процесса 1-2 часа [24]. Достоинствами данного подхода являются высокая (до 95%) степень извлечения ванадия из руды и относительная

простота технологической схемы процесса. Однако метод обладает существенным недостатком - образованием большого количества жидких щелочных отходов, содержащих до 2-3 г/л V_2O_5 . Это требует применения дорогостоящих методов очистки стоков и регенерации щелочи.

Альтернативой химическому выщелачиванию служит бактериальное выщелачивание с использованием щелочеобразующих хемолитоавтотрофных бактерий, окисляющих соединения серы с образованием сульфат-иона и щелочи [25]. Преимуществами данного подхода являются экологичность и возможность переработки бедных руд. Ограничения метода - низкие скорости процесса и необходимость тщательного контроля параметров культивирования микроорганизмов.

Таким образом, применение щелочных технологий позволяет кардинально повысить степень извлечения ванадия из труднообогатимых черносланцевых руд по сравнению с традиционными методами. Дальнейшее развитие методов должно быть направлено на снижение расхода дорогостоящих химических реагентов, минимизацию образования жидких отходов, повышение скорости процессов и снижение их себестоимости.

Процесс щелочного выщелачивания включает использование щелочных растворов, обычно гидроксида натрия (NaOH) или гидроксида аммония (NH_4OH), для растворения металлов, присутствующих в руде. Выщелачивание обычно проводят при повышенных температурах и давлениях для улучшения кинетики растворения. Щелочной раствор действует как выщелачивающий агент, разрушая минеральную структуру и высвобождая металлы в раствор [26].

Одним из ключевых преимуществ метода щелочного выщелачивания является его способность избирательно растворять определенные металлы, оставляя другие в первоначальной матрице. Такая селективность достигается за счет регулирования pH и состава выщелачивающего раствора. В случае черносланцевых руд метод щелочного выщелачивания может быть использован для выборочного извлечения ценных металлов, таких как ванадий, уран и РЗЭ, оставляя в остатке соединения с нежелательными элементами, таких как железо и кремний.

На процесс щелочного выщелачивания влияют несколько факторов, включая размер частиц руды, концентрация выщелачивающего раствора, время выщелачивания, а также температура и давление. Размер частиц руды или исходного материала играет решающую роль в определении эффективности выщелачивания, поскольку более мелкие частицы обеспечивают большую площадь поверхности для контакта выщелачивающего раствора с рудой. Концентрация выщелачивающего раствора влияет на скорость растворения металла, причем более высокие концентрации могут приводить к более быстрой кинетике выщелачивания. Время выщелачивания, температура и давление могут быть оптимизированы для достижения желаемого извлечения металла при минимальном потреблении реагентов и энергии [27].

В дополнение к параметрам выщелачивания, на метод щелочного выщелачивания также влияет минералогический состав руды. Присутствие сульфидных минералов может существенно повлиять на процесс выщелачивания. Эти минералы могут вступать в реакцию со щелочным раствором, что приводит к расходу реагентов и образованию нежелательных побочных продуктов. Та-

ким образом, для успешного внедрения метода щелочного выщелачивания необходимо глубокое понимание минералогии исходной руды и материала.

Метод щелочного выщелачивания успешно применяется к различным черносланцевым рудам по всему миру. В нескольких исследованиях сообщалось о высоком извлечении металлов с использованием этого метода. Например, в исследовании, проведенном на черносланцевой руде месторождения Цехштайн в Польше показано, что извлечение ванадия достигает 90% при использовании гидроксида натрия в качестве раствора для выщелачивания. В другом исследовании, проведенном на черносланцевой руде месторождения Купфершифер в Германии, было достигнуто извлечение ванадия более чем на 95% с использованием гидроксида аммония в качестве раствора для выщелачивания [28].

Помимо извлечения металла, метод щелочного выщелачивания также обладает преимуществом - экологической устойчивости. Благодаря избирательному извлечению металлов из руды этот метод снижает потребность в традиционных методах добычи и переработки полезных ископаемых, которые часто приводят к образованию большого количества отходов и оказывают значительное воздействие на окружающую среду. Кроме того, метод щелочного выщелачивания также можно комбинировать с другими методами - экстракции, такими как экстракция растворителем и электролиз, для дальнейшего повышения эффективности извлечения металла и минимизации воздействия на окружающую среду.

Как было показано, метод щелочного выщелачивания является очень важным при переработке черносланцевых руд. Он обладает преимуществами - селективное извлечение металлов, высокий выход металла и экологическая устойчивость. Однако успешное внедрение метода щелочного выщелачивания требует тщательного понимания минералогии руды и оптимизации параметров выщелачивания. Дальнейшие исследования и разработки в этой области необходимы для повышения эффективности и рентабельности метода щелочного выщелачивания при переработке черносланцевых руд.

2.3. Методы извлечения ванадия из ванадийсодержащих магнетитовых руд

Ванадийсодержащие магнетитовые руды являются одним из основных промышленных источников ванадия в мире. По различным оценкам, на их долю приходится от 30 до 40% от общемировой добычи этого ценного металла [29]. Ванадий в данных рудах присутствует главным образом в виде изоморфной примеси, замещающей железо в кристаллической решетке магнетита - $\text{Fe}_3(\text{V,Fe})_2\text{O}_4$. Типичные содержания V_2O_5 в промышленных ванадийсодержащих магнетитовых рудах составляют 0.5-1.5% [30].

Традиционно для извлечения ванадия из подобных руд применяется пирометаллургическая схема, включающая обжиг руды при температуре 1200-1300°C с получением чугуна, содержащего основную часть железа, и шлака, в котором концентрируется ванадий. Из шлака ванадий затем извлекают различными способами [31]. Основным недостатком этой технологии являются относительно невысокие (50-70%) показатели извлечения ванадия в шлак, а также значительные потери ванадия с чугуном (до 30%).

Более эффективным способом извлечения ванадия из магнетитовых руд может служить гидрометаллургический процесс - селективное выщелачивание ванадия растворами серной кислоты непосредственно из руды с последующим осаждением ванадия из растворов в виде пятиоксида V_2O_5 [32]. Достоинствами данного подхода являются более высокая (до 95%) степень извлечения ванадия из сырья и экологичность. Основным недостатком выступает высокая стоимость серной кислоты, что делает процесс дорогостоящим.

Наиболее эффективным решением представляются комбинированные схемы, сочетающие преимущества пиро- и гидрометаллургии. Они включают окислительный обжиг руды, кислотное выщелачивание обожженного продукта и экстракционное извлечение ванадия из растворов [33]. Применение таких комплексных технологий позволяет достичь практически полного (до 98%) извлечения ванадия из ванадийсодержащих магнетитовых руд.

Таким образом, переработка данного типа сырья может эффективно осуществляться как пирометаллургическими, так и гидрометаллургическими методами. Однако наибольшую эффективность демонстрируют комбинированные схемы, интегрирующие преимущества обоих подходов.

Переработка ванадийсодержащих магнетитовых руд (рисунок 3) представляет собой сложную и многоступенчатую процедуру, которая включает в себя различные методы и технологии, такие как дробление исходного сырья, измельчение и магнитную сепарацию полученного продукта, обжиг последующего продукта с солями, выщелачивание водой, удаление кремнезема, осаждение метаванадата аммония с последующим прокаливанием с получением оксида ванадия (IV).



Рисунок 3. Схема извлечения ванадия из титаномагнетитов и перевода его в оксид ванадия (IV)

Первым этапом переработки ванадийсодержащих магнетитовых руд является дробление и измельчение руды для уменьшения ее крупности. Обычно это делается с помощью щековых дробилок и шаровых мельниц, которые измельчают руду на более мелкие частицы. Целью этого этапа является увеличение площади поверхности руды, что обеспечивает лучший контакт с химическими веществами, используемыми в последующих процессах переработки. Как только руда будет из-

мельчена, она подвергается магнитной сепарации, чтобы отделить магнетит от других минералов. Это достигается с помощью магнитных сепараторов, которые используют магнитные свойства магнетита для притягивания и отделения его от немагнитных минералов. Магнетитовый концентрат, полученный в результате этого процесса, богат железом и ванадием.

Следующим этапом переработки ванадийсодержащих магнетитовых руд является выплавка магнетитового концентрата. Плавка включает, нагрев концентрата в печи до высоких температур, обычно превышающих 1200 °C. Этот процесс направлен на отделение железа и ванадия от других примесей, присутствующих в концентрате. Вовремя плавки магнетитовый концентрат смешивается с флюсами, такими как известняк и кремнезем, которые помогают удалить примеси и облегчают образование расплавленного шлака. Шлак, содержащий большую часть примесей, затем удаляется из печи, в то время как расплавленный металл, состоящий в основном из железа и ванадия, сливается и собирается. После плавки расплавленный металл подвергается дальнейшей обработке для получения чистого ванадия.

Одним из распространенных методов является извлечение ванадия из расплавленного металла с использованием процесса продувки кислородом. Это включает продувку кислорода через расплавленный металл, который вступает в реакцию с ванадием с образованием оксида ванадия (V) (V_2O_5). Затем V_2O_5 может быть подвергнут дальнейшей обработке с получением различных соединений ванадия или преобразован в феррованадий, который используется в сталелитейной промышленности [36, 37, 38, 39, 40, 41].

Другим методом извлечения ванадия из расплавленного металла является процесс осаждения метаванадата аммония (NH_4VO_3). В этом способе метаванадат аммония осаждают из расплавленного металла путем добавления хлорида или карбоната аммония. Осажденный метаванадат аммония может быть подвергнут дальнейшей переработке с получением соединений ванадия или преобразован в феррованадий [42].

В последние годы растет интерес к гидрометаллургическим методам переработки ванадийсодержащих магнетитовых руд. Эти методы предполагают использование химических растворов для извлечения ванадия из руды. Одним из таких методов является процесс кислотного выщелачивания, который включает выщелачивание измельченной руды серной или соляной кислотой. Затем выщелачивающий раствор обрабатывают для удаления примесей и извлечения ванадия в виде соединения ванадия.

Другим гидрометаллургическим методом является процесс щелочного выщелачивания, при котором для извлечения ванадия из руды используются щелочные растворы, такие как гидроксид или карбонат натрия. Далее раствор для выщелачивания обрабатывают для удаления примесей и извлечения ванадия в виде соединения ванадия.

Известен способ извлечения ванадия из магнетита с помощью биовыщелачивания с использованием биогенных органических кислот, что указывают путь к тестированию различных видов микроорганизмов для оптимизации процесса извлечения [43].

Переработка ванадийсодержащих магнетитовых руд включает в себя комбинацию физических и химических методов, включая дробление, измельчение, магнитную сепарацию, плавку и гидрометаллургические процессы. Каждый этап технологического процесса имеет решающее значение для эффективного извлечения ванадия из руды. Выбор метода переработки зависит от различных факторов, таких как состав руды, желаемый ванадиевый продукт и экономические соображения.

3. Выводы

В заключение, в этой обзорной статье всесторонне рассмотрены различные источники, содержащие ванадий, включая черную сланцевую руду, титаномагнетитовые руды, отработанные ванадиевые катализаторы, остатки бокситов, нефтяные остатки и соответствующие технологии их переработки. Результаты исследований, представленные в этой статье, демонстрируют потенциал этих источников в качестве жизнеспособных и устойчивых альтернатив для производства ванадия.

Черная сланцевая руда, которая в изобилии встречается во многих регионах, была определена как перспективный источник ванадия из-за ее высокого содержания ванадия. Добыча и извлечение ванадия из черной сланцевой руды были тщательно изучены, и для достижения эффективного извлечения ванадия были разработаны различные технологии переработки, такие как кислотное и щелочное выщелачивание. Эти технологии показали многообещающие результаты с точки зрения высоких показателей извлечения ванадия и низкого воздействия на окружающую среду.

Титаномагнетитовые руды, еще один важный источник ванадия, широко изучались на предмет содержания в них ванадия. Извлечение ванадия из этих руд включает в себя ряд сложных процессов, включая магнитную сепарацию, обжиг и кислотное выщелачивание. Разработка передовых технологий, таких как селективное восстановление и прямое выщелачивание, еще больше повысила эффективность извлечения ванадия из титаномагнетитовых руд.

Отработанные ванадиевые катализаторы, которые образуются в качестве отходов различных промышленных процессов, также были признаны потенциальными источниками ванадия. Переработка этих отработанных катализаторов не только способствует извлечению ванадия, но и способствует снижению загрязнения окружающей среды. Для извлечения ванадия из отработанных катализаторов использовались различные методы, такие как кислотное выщелачивание, прокаливание и экстракция растворителем, что позволило получить значительный выход ванадия.

Бокситы и нефтяные остатки стали нетрадиционными источниками ванадия. Извлечение ванадия из бокситовых остатков, отходов производства глинозема, показало себя многообещающим с помощью различных методов, таких как обжиг, выщелачивание и осаждение. Аналогичным образом, переработка нефтяных остатков, таких как нефтяной кокс и тяжелая нефтяная зола-унос, продемонстрировала потенциал извлечения ванадия с использованием таких методов, как прямое выщелачивание.

Таким образом, разведка и использование ванадийсодержащих источников, обсуждаемые в этой обзорной

статье, открывают многообещающие возможности для устойчивого производства ванадия. Кроме того, использование этих источников не только удовлетворяет растущий спрос на ванадий, но и способствует сокращению образования отходов и загрязнения окружающей среды. Продолжение исследований и разработок в этой области, несомненно, приведет к дальнейшему прогрессу в производстве ванадия, сделав его более экономически выгодным и экологически устойчивым.

Финансирование

Данное исследование было профинансировано Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант ПЦФ с ИРН - BR21881939 КН МНВО РК)

References / Литература

- [1] Yang, M., Yang, J. (2024). Vanadium extraction from steel slag: Generation, recycling and management, *Environmental Pollution*, (343), 123126. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123126>
- [2] Zhang, B., Feng, Ch., Ni, J., Zhang, J. & Huang, W. (2012). Simultaneous reduction of vanadium (V) and chromium (VI) with enhanced energy recovery based on microbial fuel cell technology. *Journal of Power Sources*, (204), 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.013>
- [3] Gao, Z., Zhang, D., Hou, L., Li, X. & Wei, Y. (2019). Understanding of the corrosion protection by V(IV) conversion coatings from a sol-gel perspective. *Corrosion Science*, 108196. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108196>
- [4] Zharski, M., Orekhova, S.E., Kurilo, I.I., Bychek, I.V. & Kryshilovich, E.V. (2012). Vanadium-containing wastes recycling for enterprises using fuel oil: high expectations. *Proceedings of BSTU. Chemistry and Technology of Inorganic Substances, Issue 3*.
- [5] Tong, Sh., Ai, L., Hong, L., Sun, C., Li, Y. & Yuan, Y. (2024). Reduction of chengde vanadium titanium magnetite concentrate by microwave enhanced Ar–H₂ atmosphere, *International Journal of Hydrogen Energy*, 49(D), 42-48. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.219>
- [6] Xiang, J., Bai, L., Lu, X., Luo, M., Huang, Q., Zhang, Sh. & Lv, X. (2023). Selective recovery of vanadium from high-chromium vanadium slag by a mechanically activated low-sodium salt roasting-water leaching process, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111304. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111304>
- [7] Zhu, X., Li, W., Tang, S., Zeng, M., Bai, P., Chen, L. (2006). Selective recovery of vanadium and scandium by ion exchange with D201 and solvent extraction using P507 from hydrochloric acid leaching solution of red mud. *Chemosphere*, (175), 365-372. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.083>
- [8] Taty Costodes, V.C., Mause, C.F., Molala, K. & Lewis, A.E. (2006). A simple approach for determining particle size enlargement mechanisms in nickel reduction. *International Journal of Mineral Processing*, 78(2), 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2005.09.001>
- [9] Li, H., Ren, Q., Tian, J., Tian, Sh., Wang, J., Zhu, X., Shang, Y., Liu, J. & Fu, L. (2004). Efficient recovery of vanadium from calcification roasted-acid leaching tailings enhanced by ultrasound in H₂SO₄-H₂O₂ system. *Minerals Engineering*, (205), 108492. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108492>
- [10] Padh, B., Das, M. & Reddy, B.R. (2023). A roast-leach process for the recovery of vanadium from vanadium-bearing gasifier slag (VBGS) using citric acid as a green reagent: Leaching studies and statistical analysis for sustainable processing. *Hydrometallurgy*, (216), 106020. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106020>
- [11] Luo, Y., Che, X., Cui, X., Zheng, Q. & Wang, L. (2021). Selective leaching of vanadium from V-Ti magnetite concentrates by pellet calcification roasting-H₂SO₄ leaching process. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(3), 507-513. <https://doi.org/10.1016/10.1016/j.ijmst.2021.02.002>
- [12] Zhou, Zh., Jin, J., Zhu, Y., Han, Y., Bai, Z. & Tang, Zh. (2023). Effect of roasting temperature on vanadium extraction, kinetics, phase transformation, and microstructure evolution of vanadium-bearing shale during suspension oxidation roasting process. *Advanced Powder Technology*, 34(11), 104233. <https://doi.org/10.1016/10.1016/j.apt.2023.104233>
- [13] Bepalova, Zh.I., Panenko, I.N. (2018). The Formation of Vanadium-Containing Coatings in a Stagewise Microarc Oxidation Process. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 54(5), 822–829
- [14] Peng, H. (2019). A Literature Review on Leaching and Recovery of Vanadium. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 103313. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103313>
- [15] Volkov, A., Kologrieva, U., Kovalev, A., Wainstein, D. & Vakhrushev, V. (2020). Vanadium Chemical Compounds Forms in Wastes of Vanadium Pentoxide Production. *Materials*, (13), 4889. <https://doi.org/10.3390/ma13214889>
- [16] Li, W., Guo, R., Li, Y. & Dong, Zh. (2022). Recovery of vanadium from direct acid leaching solutions of weathered crust vanadium-titanium magnetite via solvent extraction with N235. *Hydrometallurgy*, (213), 105913. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105913>
- [17] Hu, X., Yue, Y., & Peng, X. (2018). Release kinetics of vanadium from vanadium titanomagnetite: The effects of pH, dissolved oxygen, temperature and foreign ions. *Journal of Environmental Sciences*, (64), 298-305. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.07.001>
- [18] Li, Q., Gu, Sh., Yu, L., Han, F. & Dong, J. (2024). Separation of vanadium and chromium from vanadium-chromium slag by high-temperature heating. *Separation and Purification Technology*, (336), 126098. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.126098>
- [19] Yee, S.L., Wan, H., Chen, M., Li, L., Li, J. & Ma, X. (2022). Development of a cleaner route for Aluminum–Vanadium alloy production. *Journal of Materials Research and Technology*, (16), 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.125>
- [20] Chen, L., Wang, Zh., Qin, Zh., Zhang, G., Yue, H., Liang, B. & Luo, D. (2021). Dissolution behavior and mechanism of low valence vanadium of vanadium-iron spinel in sulfuric acid solution. *Journal of Materials Research and Technology*, (12), 1391-1402. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.036>
- [21] Ajruni, A.T. (2015). Chernoslancevye mestorozhdeniya vanadija. *Gornyj zhurnal*, (4), 46-50
- [22] Ivanov, I.P. (2019). Mineralogija chernyh slancev. *M.: Nauka*
- [23] Ivanov, V.P. (2019). Shhelochnye tehnologii pererabotki vanadijsoderzhashhego syr'ja. *Cvetnye metalli*, (8), 23-28
- [24] Smirnov, S.V., Lebedev, P.A. (2021). Shhelochnoe vyshhelachivanie vanadija iz chernoslancevyh rud. *Cvetnye metalli*, (1), 16-22
- [25] Lazarev, S.I., Kogan, V.M. (2021). Biovyshhelachivanie vanadija iz chernyh slancev. *Izvestija vuzov: Cvetnaja metallurgija*, (5), 12-18
- [26] Loukola-Ruskeeniemi, K., Hyvönen, E., Airo, M.-L., Lerssi, J. & Arkimaa, H. (2023). Country-wide exploration for graphite- and sulphide-rich black shales with airborne geophysics and petrophysical and geochemical studies. *Journal of Geochemical Exploration*, (244), 107123. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107123>
- [27] Kologrieva, U., Volkov, A., Zinoveev, D., Krasnyanskaya, I., Stulov, P. & Wainstein, D. (2021). Investigation of Vanadium-Containing Sludge Oxidation Roasting Process for Vanadium Extraction. *Metals*, (11), 100. <https://doi.org/10.3390/met11010100>
- [28] Makhambetov, E.N., Vorobkalo, N.R., Baisanov, A.S. & Mynzhasar, E.A. (2023). Smelting of vanadium-containing al-

- loys with using non-standard reducing agents. *CIS Iron and Steel Review*, (25), 21–25
- [29] Loginov, Ju.V. (2018). Resursy vanadija v Rossii i mire. *Mineral'nye resursy*, (5), 45-50
- [30] Ivanov, I.I. (2015). Mineralogija zhelezorudnyh mestorozhdenij. M.: *Metallurgija*
- [31] Sidorov, V.A. (2010). Pirometallurgija vanadijsoderzhashhih rud. *Ekaterinburg: UGTU*
- [32] Lazarev, S.I., Morozov, Ju.P. (2018). Gidrometallurgicheskaja shema pererabotki vanadijsoderzhashhih titanomagnetitov. *Cvetnye metally*, (8), 16-22
- [33] Petrov, I.V., Smirnov, S.A. (2020). Kombinirovannaja tehnologija izvlechenija vanadija. *Cvetnaja metallurgija*, (3), 14-19
- [34] Hukkanen, E., Walden, H. (1985). The production of vanadium and steel from titanomagnetites. *International Journal of Mineral Processing*, 15(1-2), 89-102. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(85\)90026-2](https://doi.org/10.1016/0301-7516(85)90026-2)
- [35] Hu, B., Zhang, C., Yang, M., Liu, Q., Wang, M. & Wang, X. (2021). A clean metallurgical process for vanadium precipitation from chromium-containing vanadate solution. *Hydrometallurgy*, (205), 105742. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105742>
- [36] Dzhumankulova, S.K., Zhuchkov, V.I., Alybaev, Zh.A. & Beke-nova, G.K. Review of state and prospects for development of vanadium production in the Kazakhstan Republic. *Metallurgist*, 64(1-2), 2020. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00968-z>
- [37] Lewis, C.-E.M., Fernando, J.F.S., Siriwardena, D.P., Firestein, K.L., Zhang, C., Treifeldt, J.E. & Golberg, D.V. (2022). Vanadium-Containing Layered Materials as High Performance Cathodes for Aqueous Zinc-Ion Batteries. *Advanced Materials Technologies*, 7(4), 2100505
- [38] Nasimifar, A., & Mehrabani, J. (2022). A review on the extraction of vanadium pentoxide from primary, secondary, and co-product sources. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 56(4), 361-382. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2022.319012.594893>
- [39] Kovalev, A., Wainstein, D., Vakhrushev, V., Volkov, A. & Kologrieva, U. (2019). Features of the Microstructure and Chemical Compositions of Vanadium-Containing Slags Including Determination of Vanadium Oxidation Degrees. *Materials*, (12), 3578. <https://doi.org/10.3390/ma12213578>
- [40] Kologrieva, U., Volkov, A., Zinoveev, D., Krasnyanskaya, I., Stulov, P. & Wainstein, D. (2021). Investigation of Vanadium-Containing Sludge Oxidation Roasting Process for Vanadium Extraction. *Metals*, (11), 100
- [41] Hryh, E., Rutqvist, E., Björkqvall, J. & Nyborg, L. (2014). Development of methodology for surface characterization of vanadium containing slag. *Surface and Interface Analysis*, (46), 984–988
- [42] Rybenko, I.A., Golodova, M.A., Nokhrina, O.I. & Rozhikhina, I.D. (2018). To the question of improving steel processing technology by converter vanadium slag. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 411, 012067. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012067>
- [43] Abdulvaliyev, R.A., Akcil, A., Gladyshev, S.V., Tastanov, E.A., Beisembekova, K.O., Akhmediyeva, N.K. & Deveci, H. (2015). Gallium and vanadium extraction from red mud of Turkish alumina refinery plant: Hydrogarnet process. *Hydrometallurgy*, (157), 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.07.007>
- [44] Rezaei, H., Shafaei, S.Z., Abdollahi, H., Ghassa, S., Boroumand, Z. & Nosratabad, A.F. (2023). Spent-medium leaching of germanium, vanadium and lithium from coal fly ash with biogenic carboxylic acids and comparison with chemical leaching. *Hydrometallurgy*, (217), 106038. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106038>

Құрамында ванадий бар шикізатты өңдеу әдістеріне шолу

Т.А. Чепуштанова¹, С.Б. Юлусов¹, О.С. Байгенженов¹, А.Т. Хабиев¹, Е.С. Меркибаев^{1*}, Б. Мишра²

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Вустер политехникалық институты, Вустер, АҚШ

*Корреспонденция үшін автор: y.merkibayev@satbayev.university

Аңдатпа. Мақалада құрамында ванадий бар шикізатты өңдеу әдістері, соның ішінде шикізатты алдын ала агломерациялау және шаймалау, құрамында ванадий бар ерітінділерді алу және тұндыру әдістері қарастырылған. Сонымен қатар, құрамында ванадий бар шикізаттың әр түрі үшін олардың артықшылықтары мен шектеулерін сипаттайтын нақты әдістер келтірілген. Мақалада сонымен қатар әртүрлі процестердің бірқатар негізгі әсер етуші факторлары мен механизмдері қысқаша талданады. Құрамында ванадий бар шикізаттан ванадийді концентрациялау әдістерін жақсарту үшін кейбір зерттеу перспективалары ұсынылады. Мақалада құрамында ванадий бар қара тақтатаc кенін, сондай-ақ құрамында ванадий бар титаномагнетит кендерін өндіру және өңдеу әлеуеті қарастырылады. Мұнай-химия процестерінде қолданылатын қалдық ванадий катализаторлары ванадийді алудың әлеуетті көзі бола алады. Сонымен қатар, құрамында ванадий бар боксит шикізаты, мұнай және болат токсиндері ванадийді одан әрі алу үшін перспективалы шикізат болуы мүмкін. Мақалада құрамында ванадий бар шикізатты өңдеу әдістері, соның ішінде шикізатты алдын ала агломерациялау және шаймалау, құрамында ванадий бар ерітінділерді алу және тұндыру әдістері келтірілген. Сонымен қатар, құрамында ванадий бар шикізаттың әр түрі үшін олардың артықшылықтары мен шектеулерін сипаттайтын нақты әдістер келтірілген. Сондай-ақ, мақалада ванадий бар черносланец кенін, құрамында ванадий бар титаномагнетит кендерін өндіру және өңдеу әлеуеті ванадийді алудың әлеуетті көзі ретінде қарастырылады. Құрамында ванадий бар боксит шикізаты және болат өндіретін шлактар ванадийді одан әрі алу үшін перспективалы шикізат бола алады.

Негізгі сөздер: құрамында ванадий бар шикізат, черносланец кені, титаномагнетит кендері, шаймалау, күйдіру.

Обзор методов переработки рудного ванадийсодержащего сырья

Т.А. Чепуштанова¹, С.Б. Юлусов¹, О.С. Байгенженов¹, А.Т. Хабиев¹, Е.С. Меркибаев^{1*}, Б. Мишра²

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Вустерский политехнический институт, Вустер, США

*Автор для корреспонденции: y.merkibayev@satbayev.university

Аннотация. В статье рассмотрены методы переработки ванадийсодержащего сырья, включая методы предварительного спекания и выщелачивания сырья, экстракции и осаждения ванадийсодержащих растворов. Кроме того, приведены конкретные методы, используемые для каждого вида ванадийсодержащего сырья, с описанием их преимуществ и ограничений. В статье также кратко проанализированы ряд основных влияющих факторов и механизмов различных процессов. Предлагаются некоторые перспективы исследований для улучшения методов концентрирования ванадия из ванадийсодержащего сырья. В статье рассматривается потенциал добычи и переработки ванадийсодержащей черносланцевой руды, а также ванадийсодержащих титаномагнетитовых руд. Отработанные ванадиевые катализаторы, используемые в нефтехимических процессах, могут быть потенциальным источником для извлечения ванадия. Кроме того, ванадийсодержащее бокситовое сырье, нефть и шлаки сталелитейного производства могут быть перспективным сырьем для дальнейшего извлечения ванадия. В статье представлены методы переработки ванадийсодержащего сырья, включая методы предварительного спекания и выщелачивания сырья, экстракции и осаждения ванадийсодержащих растворов. Кроме того, приведены конкретные методы, используемые для каждого вида ванадийсодержащего сырья, с описанием их преимуществ и ограничений. Статья также рассматривает потенциал добычи и переработки ванадийсодержащей черносланцевой руды, ванадийсодержащих титаномагнетитовых руд как потенциального источника для извлечения ванадия. Ванадийсодержащее бокситовое сырье и шлаки сталелитейного производства также могут быть перспективным сырьем для дальнейшего извлечения ванадия.

Ключевые слова: ванадийсодержащее сырье, черносланцевая руда, титаномагнетитовые руды, выщелачивание, спекание.

Received: 13 November 2023

Accepted: 15 February 2024

Available online: 29 February 2024

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i1.04>

Application of geostatistical interpolation methods for filtration coefficients on the Nurkazgan East field using the Python programming language

P.G. Shirokiy, V.A. Zavaley, Ye.S. Auelkhan*, M.M. Alzhigitova

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: y.auvelkhan@satbayev.university

Abstract. This article presents the results of applying geostatistical interpolation methods to filtration coefficients obtained from interval hydrogeological studies in six geotechnical wells, with depths up to 1500 meters, in the Nurkazgan East field. Packers were used to isolate the required intervals, and pressure changes during tests were recorded using autonomous sensors. Subsequent processing of the results was carried out using the Python programming language. Geostatistical interpolation methods (including simple kriging and stochastic methods) for geological features were examined. For this purpose, several Python programming language libraries were utilized for data preparation, interpolation, visualization, and export to the required data format, such as Pandas, Numpy, PyGSLIB, GeONE, and others. As a result, the distribution of filtration coefficients within the boundaries of the modeled block was obtained. The applied stochastic methods allowed obtaining the necessary number of equiprobable realizations of the filtration coefficient distribution, which on average converged to the solution of simple kriging. Using these equiprobable realizations in further solving the problem of determining the forecast volume of drainage water, using geofiltration modeling, will provide a probabilistic distribution of these volumes. The forecast volume of drainage water significantly impacts the economy of the entire mining enterprise, as it affects the chosen mine dewatering scheme, selection of infrastructure for drainage water pumping, the magnitude of unbalanced volumes of pumped water discharged into the evaporator pond, and much more. Accordingly, the described method will allow determining both the most probable volumes of drainage water and their upper and lower bounds. Conducting geostatistical calculations using programming languages, particularly Python, enables hydrogeologists to fully utilize the theoretical foundations of any direction, whereas ready-made software products to some extent impose limitations.

Keywords: geostatistics, filter coefficient, kriging, Python programming language, stochastic method.

1. Введение

Формирование гидрогеологических условий участка месторождения Nurkazgan Восточный происходит под влиянием многообразных факторов, основными из которых являются геолого-структурное строение территории, климат, рельеф, наличие поверхностных вод и др. Приуроченность месторождения к узлу сочленения крупных каледонских структур определяет разнообразие литологических разностей водовмещающих пород, значительную тектоническую нагрузку на территорию с соответствующей трещиноватостью и раздробленностью пород, носящий четко выраженный анизотропный характер и характеризующейся крайне неравномерной обводненностью пород в плане и разрезе.

В целом, район можно рассматривать как крупный массив трещинных вод, на фоне которого выделяются отдельные бассейны трещинно-карстовых (карбонатные мульды) вод. Гидрогеологический массив, таким образом, образован различными взаимосвязанными водоносными комплексами осадочных, вулканогенных и магматических пород, характер и степень обводненности которых определяются их физическим состоянием и структурно-морфологическим положением.

Водоносная зона трещиноватости вулканогенных пород развита на всей площади месторождения и связана с рудовмещающими вулканогенными образованиями, пронизанными многочисленной серией малых субвулканических и интрузивных тел. Породы с поверхности подвержены интенсивному выветриванию и образуют зону окисления мощностью до 40 м глинисто-щебнистого состава, сильно ожелезненную и омарганцованную. Подземные воды циркулируют преимущественно в верхней части разреза, где развита типичная экзогенная трещиноватость до глубины 40-60 м.

Характер и глубина проникновения экзогенной трещиноватости полностью зависит от литологического состава пород, тектоники, условий водообмена и многих других факторов геологического, тектонического, климатического и морфологического характера. Наличие разноплановой тектоники различной протяженности и глубины заложения создают благоприятные условия для развития трещинных вод на глубину до 120-130 м, которую следует принять за границу наиболее обводненной части разреза. В условиях анизотропной водовмещающей среды основными коллекторами и каналами движения подземных вод являются линейные зоны разломов.

© 2024. P.G. Shirokiy, V.A. Zavaley, Ye.S. Auelkhan, M.M. Alzhigitova

p.shirokiy@stud.satbayev.university; v.zavaley@satbayev.university; y.auvelkhan@satbayev.university; m.alzhigitova@satbayev.university

Engineering Journal of Satbayev University. eISSN 2959-2348. Published by Satbayev University

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

В условиях развития трещинных вод подземные воды носят, в основном, грунтовый или слабонапорный характер с глубиной залегания в зависимости от рельефа от 1.6 до 30.3 м. В основном, до глубины 50-60 м подземные воды при отсутствии с поверхности водоупорных глин носят безнапорный характер.

Несмотря на довольно благоприятные условия формирования естественных запасов подземных вод в зоне экзогенной трещиноватости, обводненность зоны неравномерная и увязывается, в первую очередь, с полной раскрытостью трещин. В условиях интенсивной, но заполненной вторичными продуктами выветривания трещиноватости, дебиты скважин редко превышают 0.5 л/с при понижении уровня до 30-47 м. При наличии хорошо открытых и промытых трещин дебиты скважин составляют 1-4 л/с при понижении уровня от 1.1 до 25.4 м.

Минерализация и химический состав трещинных вод довольно четко увязывается с гидродинамической схемой формирования подземных вод, характеризующей местные области питания и транзита в приповерхностной зоне (~100 м). В целом, вулканогенная толща относится к хорошо промытой. Отмечена вертикальная зональность, проявляющаяся в увеличении минерализации с глубиной. Для участков, являющихся местными областями питания, характерны сульфатно-гидрокарбонатные или гидрокарбонатно-сульфатные воды с минерализацией до 1 г/дм³. При удалении от областей питания минерализация подземных вод повышается до 1.3-1.5 г/дм³. По химическому составу это преимущественно хлоридно-сульфатные воды, из катионов преобладают натрий и калий.

В целом, детально участок месторождения Нурказган Восточный, в гидрогеологическом плане, изучен до глубины 100 м.

2. Методы и материалы

На текущий момент на участке месторождения Нурказган Восточный, в связи с подготовкой данного объекта к отработке подземным способом, был осуществлен комплекс гидрогеологических исследований, который заключался в проведении интервальных экспресс-опробований. Данные исследования были проведены в шести наклонных скважинах глубиной до 1500 м и диаметром 96.1 мм (НҚ). Экспресс-опробования производились с использованием съемного пакера, который применялся для изоляции требуемого интервала.

Установка пакера осуществлялась по мере бурения и при достижении забоя требуемой глубины производился подъем бурового инструмента на необходимую отметку, после чего выполнялся комплекс мероприятий по установке пакера и проведения опытных гидрогеологических работ. Комплекс экспресс-опробований состоял из нескольких фаз:

1. Фаза поглощения (slug test);
2. Фаза нагнетания с постоянным дебитом;
3. Фаза восстановления.

При выделении интервалов экспресс-опробования особое внимание уделялось зонам интенсивного дробления, участкам тектонических нарушений, контактам литологических разностей, слагающих массив горных пород исследуемого участка, а также рудным участкам, к которым приурочены проектные горные выработки. Первоначально границы исследуемых интервалов были

определены по имеющимся данным ранее проведенных работ, в том числе и геологических разрезов. В полевых же условиях эти границы были уточнены по фактическим данным полученных образцов керна. Нижние отметки опробуемых интервалов предварительно были указаны в геолого-техническом наряде скважины, в связи с чем персонал, производящий описание образцов керна, мог оперативно остановить буровые работы при выявлении признаков достижения границы интервала.

Следует отметить, что геологическое строение исследуемого участка характеризуется наличием обширной зоны дробления горных пород, которая прослеживается в интервалах глубин от 100 до 300 м, фильтрационные свойства которой не были изучены на данный момент. В тоже время проектные горные выработки находятся гипсометрически ниже этой зоны и не исключена возможность прямой гидравлической связи между подземными водами зоны дробления и проектными горными выработками, с учетом дезинтеграции массива горных пород при фактической проходке и отработки рудных блоков. Рудовмещающие горные породы представлены гранодиорит-порфирами и кварцевыми диоритами.

Также при планировании вышеописанного комплекса работ следует учитывать несколько важных факторов, которые могут повлиять на финальный результат проводимых экспресс-тестов, в том числе и возможность их выполнения. Первый фактор, влияющий на качественную изоляцию надувным элементом требуемого интервала, является вертикальный угол наклона буримой скважины, так как в случае, если он будет ниже 64-66°, установка пакера может не обеспечить качественную изоляцию и на конечный результат может повлиять приток подземных вод из вышележащих водовмещающих пород.

Следующим фактором, является установленное давление открытия нижнего клапана, которое может варьироваться в зависимости от его конструкции и в некоторых случаях открытие может не произойти из-за высокого гидростатического давления, либо к его преждевременному срабатыванию на больших глубинах.

Немаловажным параметром является и рабочие параметры надувного элемента пакерного оборудования, так как установка пакера на больших глубинах может привести к аварийным ситуациям и порче оборудования при разрыве надувного элемента.

В данном случае вертикальный угол наклона всех скважин был не ниже 70°, что обеспечило качественную изоляцию интервалов, а само пакерное оборудование не устанавливалось ниже глубины 900 м.

Изменения напоров воды в скважине при установке пакера и проведении экспресс-опробования фиксировались с помощью автономного датчика регистрации уровня подземных вод, который располагался в специальной насадке в нижней части пакера, то есть по факту в изолируемом интервале. Временной интервал регистрации изменения напоров был выставлен в размере 2-х секунд, что позволило с большой точностью отслеживать время открытия нижнего клапана (момент начала первой фазы), а также качество установки пакера и изоляции требуемого интервала надувным элементом.

3. Результаты и обсуждение

Файл, содержащий результаты измерений, в таком случае может состоять из более чем 100000 записей при длительной продолжительности экспресс-теста, что может затруднить обработку результатов при помощи стандартного программного обеспечения Excel. В связи с чем, в данном случае также был использован язык программирования Python. Обработка результатов производилась с помощью скриптов написанных на данном языке программирования для каждой из фаз экспресс-тестирования, с использованием стандартных библиотек и библиотек Pandas и Numpy, что значительно сократило время обработки достаточно больших объемов данных, автоматизировав данную процедуру.

Первоначально, файл (в формате .csv) содержащий результаты измерений загружался в датафрейм (структура данных библиотеки Pandas), индексом которого назначалось время регистрации значений напора подземных вод, после чего исходный датафрейм разбивался по количеству выполненных фаз по ключевым точкам. Вычисление коэффициентов фильтрации производилось с учетом необходимых значений параметров выполненных тестов, таких как глубина установки автономного датчика, результаты инклинометрии ствола скважины, мощность исследуемого интервала, статический уровень подземных вод, наружный и внутренний диаметр скважины, дебит налива. Таким образом, обработка выполненных экспресс-тестов сводилась к изменению в копии скрипта имени файла, содержащего результаты измерений и редактированию начальных параметров.

В результате было получено распределение коэффициентов фильтрации по каждой скважине, причём данное распределение достаточно четко коррелирует с глубиной залегания водовмещающих пород, то есть наиболее высокие коэффициенты фильтрации приурочены к верхней зоне интенсивной трещиноватости и зоне дробления, а по мере увеличения глубины исследованных интервалов значение коэффициентов фильтрации снижается и после отметки 800 м, движение подземных вод практически отсутствует по всем опробованным скважинам.

Следует отметить, что в дальнейшем по данному участку планируется построение геофильтрационной модели для определения прогнозных объемов дренажных вод, которая предполагает наличие достаточно высокой детализации конечно-разностной сетки, в связи с широко развитой системой горных выработок и большого числа рудных горизонтов. При этом будет определено, что проектные горные выработки задаются с помощью пакета Drain программного комплекса Modflow, которые будут включаться последовательно, согласно плану отработки рудника. Соответственно, на данном этапе, необходимо получить распределение фильтрационных свойств горных пород всего блока месторождения для получения более точного прогноза.

Большая площадь горных выработок, даже при низких значениях коэффициентов фильтрации горных пород, существенно влияет на суммарный объем дренажных вод, и при незначительном их изменении этот объем может варьироваться в широких пределах. Но так как, в данном случае имеются результаты значений коэффициентов фильтрации только по шести скважинам, включение в геофильтрационную модель их усредненных значений может привести к значительному несоответствию фактических водопритоков в горные выработки с прогнозными.

С целью вычисления распределения коэффициентов фильтрации по всему моделируемому блоку были рассмотрены геостатистические методы интерполяции (экстраполяции) геологических признаков, такие как простой кригинг и стохастические методы.

Алгоритм получения финальных результатов выглядит следующим образом:

1. Подготовка исходных данных;
2. Загрузка данных в рабочую среду JupyterLab;
3. Определение равных интервалов по скважинам;
4. Интерполяция методом простого кригинга;
5. Интерполяция стохастическими методами;
6. Визуализация и экспорт полученных результатов.

Первый этап предполагает составление базы данных, содержащей как параметры скважин, в которых проведены исследования, так и вычисленные значения коэффициентов фильтрации. Согласно общепринятой практике, исходные данные предоставляются в виде базы данных, состоящей из трех таблиц:

1. collar – координаты устья скважин и их глубина;
2. survey – результаты инклинометрии скважин (направление ствола скважины);
3. assay – таблица геологического признака (в нашем случае это коэффициент фильтрации).

Фактические координаты положения устья скважины определяются при помощи топографической съемки и должны содержать также и высотную отметку.

Для выполнения второго этапа на рабочей станции должна быть предустановлена рабочая среда JupyterLab, со всеми необходимыми библиотеками: Pandas, Numpy, Matplotlib, PyGSLIB, Geone. Установку данного набора программ лучше произвести с помощью дистрибутива Anaconda, предназначенного для упрощения установки и управления библиотеками и инструментами. Anaconda включает в себя не только интерпретатор Python но и множество предустановленных библиотек. Anaconda также предоставляет собственный менеджер пакетов conda, который упрощает управление зависимостями и обновлениями библиотек в рабочем окружении. Он также позволяет создавать виртуальные окружения для изоляции проектов и их зависимостей.

В дальнейшем, все операции произведены в рабочей среде JupyterLab с использованием языка программирования Python 3.8, которая предоставляет удобный интерфейс и гибкую среду для работы с кодом, анализа данных и визуализации результатов. На данный момент - это наиболее распространенный инструмент в области научных исследований. Загрузка исходных данных осуществляется с использованием библиотеки Pandas при помощи соответствующей функции чтения данных, при этом каждая таблица базы данных загружается в отдельный датафрейм.

Следующий этап необходим для подготовки исходных данных с целью определения входных параметров методов интерполяции библиотеки Geone, таких как вариограмма, функции ковариации и массива точек с вычисленными значениями коэффициентов фильтрации.

Так как все мощности опробуемых горных пород различны, необходимо выделить интервалы равной длины, по которым определяются координаты их средней точки, а значение коэффициента фильтрации назначается таким же, каким он был определен в данной мощности.

Для этих целей использовались методы библиотеки PyGSLIB, которая позволяет выполнить данную процедуру по имеющимся исходным данным, в качестве которых выступают датафреймы collar, survey и assay. Длина интервала выбрана равной 10 м. В результате получен набор данных, содержащий всю необходимую информацию для последующей обработки методами геостатистики, которая состоит из столбцов с координатами центральных точек и значениями в них коэффициентов фильтрации.

Для моделирования пространственной корреляции в геостатистике используется вариограмма, которая является важным инструментом для анализа пространственной изменчивости или корреляции в данных о геологических явлениях. Вариограмма представляет собой функцию, измеряющую полувариацию (половину дисперсии) между значениями в разных местах в зависимости от расстояния между этими местами. Она позволяет оценить, насколько схожи или различны значения в точках пространства, а в данном случае в моделируемом блоке. С целью определения вариограммы исследуемого участка были применены методы библиотеки scipy-geostat с использованием имеющихся результатов (рисунок 1).

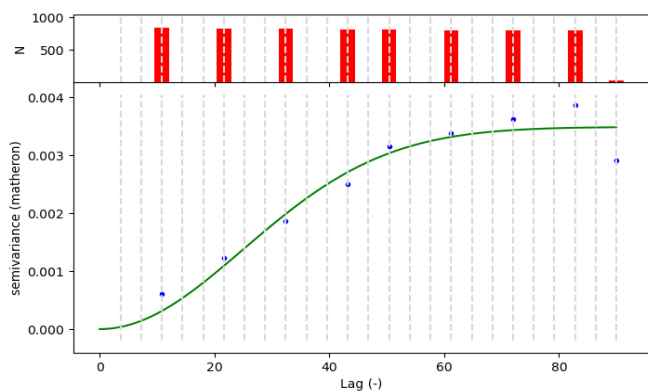


Рисунок 1. Вариограмма коэффициента фильтрации участка Нурказган Восточный

Дальнейший анализ данных показал, что распределение коэффициента фильтрации имеет некоторую анизотропию, то есть в горизонтальном направлении его изменчивость несколько ниже, чем в вертикальном, соответственно функция ковариации для различных направлений, выглядит следующим образом (рисунок 2).

Анизотропия в геостатистике относится к той ситуации, когда характеристики пространственной изменчивости геологического признака зависят от направления. Иными словами, изменчивость этого признака может различаться в различных направлениях и после определения функции ковариации можно использовать метод кригинга или другие методы интерполяции с учетом анизотропии для предсказаний значений в неизвестных участках моделируемого блока с учетом изменчивости в различных направлениях. Данная функция рассчитана с помощью метода covModel.covModel3D библиотеки Geone. На данном этапе имеется весь необходимый набор данных для расчета распределения коэффициента фильтрации на весь модельный блок, методом простого кригинга. Метод простого кригинга (Simple Kriging) – это один из методов интерполяции в геостатистике, используемый для предсказаний значений в неизвестных участках моделируемого блока на основе наблюдаемых данных в известных точках пространства.

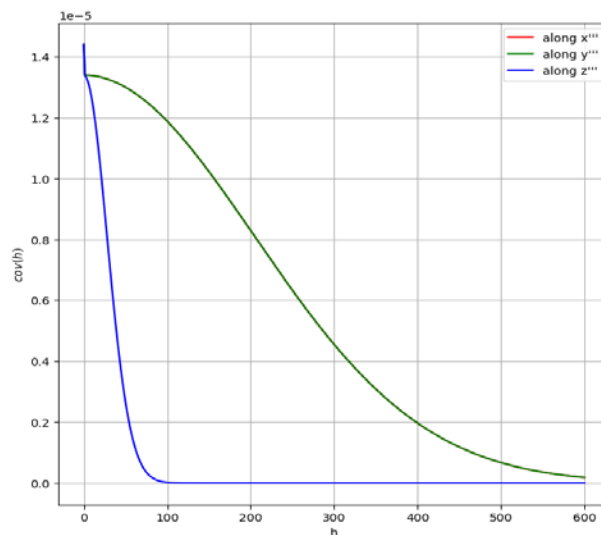


Рисунок 2. Функция ковариации

Простой кригинг учитывает пространственную корреляцию данных и стремится предоставить наилучшее линейное несмещенное значение в каждой точке интерполяции. С этой целью использован метод grf.krige3D библиотеки Geone (рисунок 3). Данный метод даёт единственное решение при заданных параметрах и в дальнейшем будет использоваться как опорный вариант при решении прогнозной задачи моделирования потока подземных вод.

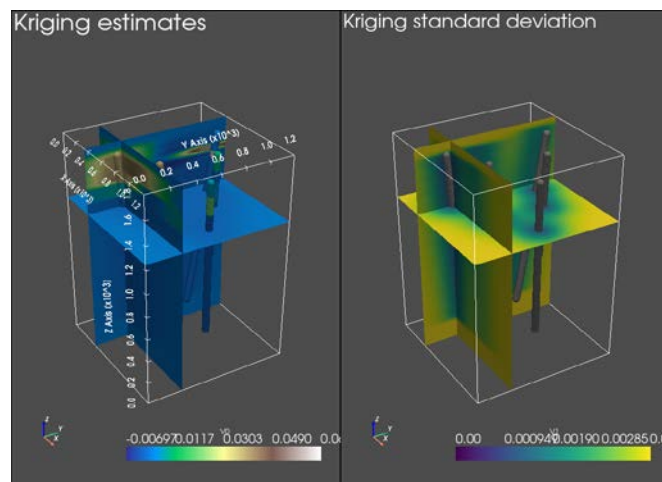


Рисунок 3. Результаты метода «кригинг»

В геостатистике стохастические методы используются для моделирования неопределенности в пространственных данных, а также для генерации альтернативных реализаций геологических или гидрогеологических моделей. Эти методы учитывают случайность и изменчивость в данных, что позволяет учесть различные возможные варианты структуры горных пород. Существует несколько стохастических методов, широко используемых в геостатистике.

Метод многократного кригинга позволяет моделировать пространственную структуру данных с использованием информации из определенных точек. Он основан на условной симуляции и может быть применён для моделирования сложных и нерегулярных распределений геологического признака, которые могут быть сложны для представления с использованием традиционных методов.

Моделирование гауссовскими случайными функциями – представляют собой набор случайных переменных, упорядоченных в соответствии с географическими координатами. Они широко используются в геостатистике для моделирования структуры пространственной зависимости данных. Симуляция на основе объектов – этот метод в себя моделирование геологических объектов или образований, а затем генерацию реализаций геологических моделей. Симуляция объектов может быть использована для учета сложных геологических структур и их взаимодействия.

Методы марковских случайных полей – широко используются для моделирования неопределенностей в геостатистике. Эти методы учитывают влияние близлежащих точек на другие точки, что особенно полезно при работе с категориальными (дискретными) данными.

Гауссовская симуляция – этот метод является частным случаем стохастической симуляции и используется для генерации случайных полей, основанных на гауссовской случайной функции. Он широко применяется в геостатистике для генерации альтернативных реализаций геологических или гидрогеологических моделей.

Эти стохастические методы позволяют учитывать различные возможные варианты распределения геологического признака в объеме моделируемого блока, а также предоставляют информацию о неопределенности в пространственных данных.

В отличие от простого кригинга стохастический метод позволяет получить бесконечное количество равновероятных решений, которые в своей сумме в среднем и дадут решение методом простого кригинга, то есть весь заданный набор будет сходиться в точках с заданными значениями и далее будет расходиться по случайным траекториям. Для решения использован метод `grf.grf3D` библиотеки `Geope`, в котором количество требуемых реализаций задается через переменную `nreal`. Ниже представлены результаты решения для первых двух реализаций (рисунок 4).

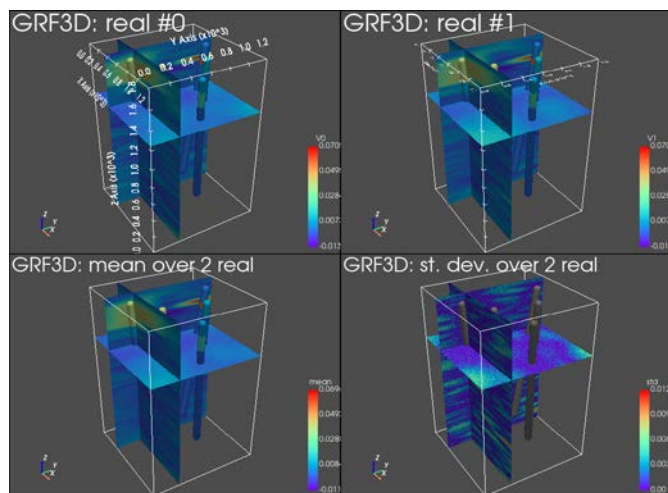


Рисунок 4. Результаты первых двух реализаций

Как видно, они несколько схожи с решением методом простого кригинга, особенно на участках, приуроченных к известным значениям, и в тоже время различны по всему объему модельного блока.

По результатам расчетов обозначено несколько зон с относительно высокими значениями коэффициентов фильтрации и по глубине они как раз коррелируют с

предполагаемым положением зоны интенсивного дренирования. Вероятно, контуры распространения этих зон окажут основное влияние на формирование объемов дренажных вод, хотя питание их за счет инфильтрации атмосферных осадков в какой-то мере затруднено. В конечном счете прогнозный водоприток дренажных вод также будет зависеть и от положения проектных выработок относительно выявленных зон.

Чем больше будет выполнено реализаций, тем точнее будет получено распределение вероятности значений коэффициента фильтрации, что в последующем моделировании, подставляя каждый раз следующую реализацию (автоматизировав данный процесс с использованием языка программирования Python) возможно будет получить вероятное распределение прогнозных объемов дренажных вод на весь период отработки.

Экспорт полученных значений осуществляется методами библиотеки `Numpy` и сохраняется в текстовые файлы формата `.csv`.

Таким образом, последовательно выполняя все этапы алгоритма расчета финальных результатов возможно получить необходимое количество реализаций распределения коэффициентов фильтрации в моделируемом блоке участка месторождения.

Для реализации гидрогеологической модели планируется использование библиотеки `Flory`, которая в Python представляет собой инструмент для создания, модификации и визуализации моделей для численного моделирования потока подземных вод (`Modflow`) – одной из широко используемых программ. Библиотека `Flory` предоставляет удобный интерфейс для создания и управления входными данными для моделей `Modflow` в Python. Она поддерживает различные версии `Modflow`, такие как `Modflow-2000`, `Modflow-2005`, `Modflow-NWT`, `Modflow-USG`, и т.д.

Разработка геофильтрационной модели с использованием библиотеки `Flory` включает в себя несколько этапов, начиная от создания модели, определения параметров и граничных условий, и заканчивая анализом результатов. Параметры ячеек будут задаваться на каждом этапе итераций расчета прогноза объема дренажных вод, согласно номеру реализации распределения коэффициента фильтрации, но при этом возможно потребуются сопоставление размерности этой реализации с конечно-разностной сеткой модели.

4. Выводы

Проведение геостатистических расчетов с использованием языков программирования, в частности Python, позволяет гидрогеологу в полной мере использовать теоретические основы любого направления, в то время как готовые программные продукты в какой-то мере — это условие ограничивают.

Использование языка программирования Python в гидрогеологии может предоставить гидрогеологам ряд преимуществ и полезных инструментов, облегчающих анализ данных, моделирование и визуализацию результатов. Основные причины использования Python в повседневной работе гидрогеолога могут быть следующими:

– Python обладает обширным набором библиотек и инструментов для научных вычислений, статистики, геоинформационного анализа и визуализации данных. Возможность легко интегрировать различные библиотеки позволяет гидрогеологам решать широкий спектр

задач, начиная от обработки данных и заканчивая моделированием.

– Python обеспечивает удобные средства для обработки и анализа данных, включая библиотеки Pandas для работы с табличными данными и NumPy для численных вычислений. Это полезно для подготовки данных, фильтрации, агрегации и проведения статистических анализов.

– Python обладает библиотеками, таким как GeoPandas, Shapely, и Fiona, которые упрощают работу с географическими данными и проведения геоинформационного анализа.

– Библиотеки вроде Matplotlib и Seaborn позволяют строить высококачественные графики и диаграммы для визуализации результатов и представления данных.

– Использование Python для создания и анализа гидрогеологических моделей может быть удобным и эффективным. Библиотеки, такие как Floru для моделирования потока подземных вод и Rumpke для создания файлов модельного инструментария, облегчают процесс создания и управления моделями.

– Python имеет библиотеки для работы с ГИС данными, такие как GDAL и Rumpke, что облегчает интеграцию гидрогеологических данных с ГИС-инструментами.

– Python позволяет автоматизировать рутинные задачи, создавать скрипты для обработки данных и повторяемых операций, что повышает эффективность работы.

– Python имеет активное сообщество, и множество бесплатных ресурсов, онлайн-курсов и библиотек для поддержки и обучения. Это обеспечивает доступ к широкому спектру знаний и опыта, что может быть полезным для гидрогеологов.

Наличие большого количества свободно распространяемых библиотек позволяет гибко комбинировать их между собой, что и было продемонстрировано в данной работе. В конечном результате получена вся необходимая информация для последующего прогноза объема дренажных вод исследуемого участка.

Прогноз объема дренажных во многом влияет на экономику всего горнорудного предприятия, так как от этого будет зависеть выбранная схема осушения рудника, подбор инфраструктуры для откачки дренажных вод, величина дебалансовых объемов откаченных вод, которые будут сбрасывать в пруд испаритель и многое другое. Соответственно, описанный метод позволит определить, как наиболее вероятные объемы дренажных вод, так и их верхнюю и нижнюю границу.

References / Литература

- [1] Bindeman, N.N. & Jazvin, L.S. (1970). Ocenka jekspluatacionnyh zapasov podzemnyh vod. M.: Nedra
- [2] Davis, J.C. (1990). Statistics and data analysis in geology (Russian translate). M.: Nedra
- [3] Turner, A.K. & Kessler, H. (2021). Applied Multidimensional Geological Modeling. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119163091>
- [4] Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press
- [5] Isaaks, E.H. & Srivastava, R.M. (1989). Applied Geostatistics. Oxford University Press
- [6] Carrera, J. & Neuman, S.P. (1986). Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. Maximum likelihood method incorporating prior information. *Water Resources Research*, 22(2), 199-210
- [7] Deutsch, C.V. & Journel, A.G. (1992). GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford University Press
- [8] Wackernagel, H. (2003). Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications. Springer
- [9] Rubin, Y. & Dagan, G. (1987). Stochastic identification of transmissivity distribution in an aquifer from field data. *Water Resources Research*, 23(9), 1717-1726
- [10] Kitanidis, P.K. (1997). Introduction to Geostatistics: Applications in Hydrogeology. Cambridge University Press
- [11] Journel, A.G. & Huijbregts, C. (1978). Mining Geostatistics. Academic Press
- [12] Mariethoz, G., & Kelly, B. F. J. (2010). Support and kernel-based weights for data integration in environmental studies. *Computers & Geosciences*, 36(7), 823-834
- [13] Renard, P. & Allard, D. (2013). Geostatistical Simulations to Assess the Impact of Spatial Arrangement of Flow Measurements on Hydraulic Tomography Surveys. *Water Resources Research*, 49(5), 2650-2660
- [14] Beale, G. & Read, J. (2014). Guidelines for Evaluating Water in Pit Slope Stability. CSIRO Publishing
- [15] Delfiner, P. & Delhomme, J. P. (1976). Conditions for the unbiasedness of kriging. *Mathematical Geology*, 8(3), 295-312
- [16] Zhang, Y., Zhang, Y.K., & Li, X.L. (2012). Spatial interpolation of groundwater levels using kriging with external drift: an example from the North China Plain. *Hydrogeology Journal*, 20(7), 1389-1401

Python бағдарламалау тілін пайдалана отырып, Шығыс Нұрқазған кен орны учаскесінде сүзу коэффициенттерін интерполяциялаудың геостатистикалық әдістерін қолдану

П.Г. Широкий, В.А. Завалей, Е.С. Ауелхан*, М.М. Альжигитова

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: y.auyelkhan@satbayev.university

Андатпа. Бұл мақалада Шығыс Нұрқазған кен орнының учаскесінде терендігі 1500 м дейінгі алты геотехникалық ұңғымада аралық гидрогеологиялық зерттеулер жүргізу нәтижелері бойынша алынған сүзу коэффициенттерін интерполяциялаудың геостатистикалық әдістерін қолдану нәтижелері келтірілген. Қажетті аралықтарды оқшаулау үшін пакерлік жабдық пайдаланылды, ал сынақтарды жүргізу кезінде қысымның өзгеруін тіркеу дербес датчиктің көмегімен жүргізілді. Алынған нәтижелерді кейіннен өңдеу Python бағдарламалау тілін қолдану арқылы жүзеге асырылды. Геологиялық белгіні интерполяциялаудың (экстраполяциялаудың) геостатистикалық әдістері, оның ішінде

қарапайым кригинг және стохастикалық әдістер қарастырылады. Осы мақсатта Python бағдарламалау тілінің бірқатар кітапханалары деректерді дайындау, оларды интерполяциялау, визуализациялау және Pandas, Numpy, PyGSLIB, Geone және басқалары сияқты қажетті деректер форматына экспорттау үшін пайдаланылды. Нәтижесінде модельденген блоктың шекараларында сүзу коэффициентінің таралуы алынды, ал қолданылған стохастикалық әдістер сүзу коэффициентін бөлудің қажетті бірдей мүмкін болатын санын алуға мүмкіндік берді, олар орташа есеппен қарапайым кригинг әдісін шешуге жақындайды. Геофильтрациялық модельдеуді қолдана отырып, дренаждық сулардың болжамды көлемін анықтау мәселесін одан әрі шешу кезінде осы бірдей ықтимал іске асыруларды пайдалану осы көлемдердің ықтимал таралуын алуға мүмкіндік береді. Дренаж көлемінің болжамы бүкіл тау-кен кәсіпорнының экономикасына көп әсер етеді, өйткені шахтаны құрғатудың таңдалған схемасы, дренажды суларды сору үшін инфрақұрылымды таңдау, буландырғышты тоғанға тастайтын сорылған сулардың теңгерімсіз көлемінің мөлшері және тағы басқалар осыған байланысты болады. Тиісінше, сипатталған әдіс дренажды сулардың ең ықтимал көлемін де, олардың жоғарғы және төменгі шекараларын да анықтайды. Бағдарламалау тілдерін, атап айтқанда Python көмегімен геостатистикалық есептеулер жүргізу гидрогеологқа кез-келген бағыттың теориялық негіздерін толық пайдалануға мүмкіндік береді, ал дайын бағдарламалық өнімдер белгілі бір дәрежеде бұл шартты шектейді.

Негізгі сөздер: геостатистика, сүзу коэффициенті, кригинг, Python бағдарламалау тілі, стохастикалық әдіс.

Применение геостатистических методов интерполяции коэффициентов фильтрации на участке месторождения Нурказган Восточный с использованием языка программирования Python

П.Г. Широкий, В.А. Завалей, Е.С. Ауелхан*, М.М. Альжигитова

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: y.auyelkhan@satbayev.university

Аннотация. В данной статье представлены результаты применения геостатистических методов интерполяции коэффициентов фильтрации, полученных по результатам проведения интервальных гидрогеологических исследований в шести геотехнических скважинах глубиной до 1500м на участке месторождения Нурказган восточный. Для изоляции требуемых интервалов использовалось пакерное оборудование, при этом, регистрация изменения напоров при проведении тестов производилось с использованием автономного датчика. Последующая обработка полученных результатов произведена с использованием языка программирования Python. Рассмотрены геостатистические методы интерполяции (экстраполяции) геологического признака в том числе простой кригинг и стохастические методы. С этой целью были использованы ряд библиотек языка программирования Python для подготовки данных, их интерполяции, визуализации и экспорта в требуемый формат данных, такие как Pandas, Numpy, PyGSLIB, Geone и другие. В результате получено распределение коэффициента фильтрации в границах моделируемого блока, при этом примененные стохастические методы позволили получить необходимое количество равновероятных реализаций распределения коэффициента фильтрации, которые в среднем сходятся в решение метода простого кригинга. Использование этих равновероятных реализаций при дальнейшем решении задачи определения прогнозного объема дренажных вод, с применением геофильтрационного моделирования, позволит получить вероятностное распределение этих объемов. Прогноз объема дренажных во многом влияет на экономику всего горнорудного предприятия, так как от этого будет зависеть выбранная схема осушения рудника, подбор инфраструктуры для откачки дренажных вод, величина дебалансовых объемов откаченных вод, которые будут сбрасывать в пруд испаритель и многое другое. Соответственно, описанный метод позволит определить, как наиболее вероятные объемы дренажных вод, так и их верхнюю и нижнюю границу. Проведение геостатистических расчетов с использованием языков программирования, в частности Python, позволяет гидрогеологу в полной мере использовать теоретические основы любого направления, в то время как готовые программные продукты в какой-то мере - это условие ограничивают.

Ключевые слова: *геостатистика, коэффициент фильтрации, кригинг, язык программирования Python, стохастический метод.*

Received: 21 November 2023

Accepted: 15 February 2024

Available online: 29 February 2024

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i1.05>

Water quality of the Syrdarya River and groundwater of the Kyzylzharma field in the Kyzylorda region (Kazakhstan)

M.K. Absametov¹, K.T. Ospanov^{2*}, B. Kenesbayeva²

¹Institute of Hydrogeology and Geoecology named after U.Ahmedsafina, Almaty, Kazakhstan

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: ospanovkairat@mail.ru

Abstract. This research's purpose is to monitor changes in the water quality of the Syrdarya River and groundwater of the Kyzylzharma field for the sustainable supply of drinking water to the city of Kyzylorda, Kazakhstan. This article presents the results of chemical analyzes of natural waters of the Syrdarya River, taken from river water in the direction of flow, in the territory of Zhanakorgan, Kyzylorda and Kazaly. The results of the quality of groundwater used in some wells are presented in comparison with the drinking water standards in force in Kazakhstan. It should be noted that in the area of the Kyzylorda field, the mineralization of groundwater is 0.8-1.1 g/l, the sulfate content in the water of individual production wells reaches 690 mg/l, and the total hardness of groundwater is up to 14 mEq/l. The results of an assessment of possible changes in groundwater quality are presented. According to forecasts for February 16, 2038, the greatest increase in groundwater mineralization (by 0.22 g/l) will occur in wells with map numbers 131, 133, 135.

Keywords: natural water, Syrdarya River, groundwater, Kyzylzharma field, water quality, chemical composition, change in groundwater quality.

1. Introduction

The state of the environment and its components increasingly influences economic development, health and life expectancy. That is why protection of the environment and, especially, water bodies from pollution and depletion is one of the most important tasks in the modern world [1-2].

The chemical composition of water is of great importance, since it can influence the course of diseases, in particular those caused by excessive intake of microelements into the human body [3].

The main problem currently is the pollution of natural waters by various pollutants: pesticides and toxic chemicals, oil and petroleum products, surfactants. Increasing pollution of water bodies and drains is observed in all industrial countries [4].

Many infectious diseases of animals and humans are transmitted through water. The causative agents of these diseases are transmitted by ingesting water contaminated with human or animal feces containing pathogenic bacteria, viruses and parasites (protozoa, parasite eggs). They can survive in water for varying periods of time depending on many factors. Monitoring the safety of water sources is based on determining parameters indicating pollution caused by wastewater, animal excrement, waste storage, manure and artificial fertilizers, etc. [5-6].

Supplying the population with drinking water in sufficient quantities has important social, sanitary and hygienic significance and protects people from epidemic diseases spread through water [7].

Despite certain improvements in the provision of drinking water, today a significant part of the population of the Republic of Kazakhstan is still not fully provided with water of appropriate quality [8].

At the same time, the Republic of Kazakhstan belongs to territories with a fairly low supply of fresh surface and groundwater resources, and not all of them are suitable for use as sources of domestic drinking water supply [9].

The shortage of fresh surface water is forcing many countries to increase their use of groundwater. Groundwater as an object of law occupies a special position among all types of natural resources. On the one hand, they are contained in the subsoil and have the main characteristics of minerals, on the other hand, they are part of the general water resources of the land [10].

The anthropogenic impact on groundwater has also become especially noticeable in the current century due to the development and intensification of industry and agriculture, the growth of large cities and the expansion of urban areas. It manifests itself in the depletion of groundwater reserves and deterioration of their quality [11].

Groundwater is significantly different from other minerals. Groundwater resources, their quality, and therefore suitability for use can vary significantly over time [12]. Therefore, it is important to be able not only to assess their current state, but also to predict the future.

The purpose of this research is to monitor changes in the water quality of the Syrdarya River and groundwater of the Kyzylzharma field for the sustainable supply of drinking water to the city of Kyzylorda.

2. Materials and methods

The Kyzylorda region is located in the lower reaches of the Syrdarya River and occupies a low-lying plain, a significant part of which is covered with massifs of aeolian sands (Fig. 1). In the north these are the Aral Karakum Desert, in the south – the Northern Kyzylkum Desert. The eastern part of the region is framed by the northwestern end of the Karatau ridge, and in the west it covers the northern and eastern coasts of the Aral Sea. The described territory is located within the inland zone of deserts and semi-deserts, which is characterized by a sharply continental climate with high amplitudes of fluctuations in annual, seasonal and daily temperatures, relatively mild winters, hot and dry summers. In winter, fairly severe frosts alternate with frequent and sometimes prolonged thaws. In winter, the air temperature is usually down to -100°C , but minimum values can reach -370°C . The snow cover is thin and unstable. In summer, daytime air temperatures range from $+25$ to $+330^{\circ}\text{C}$, reaching -450°C in some years.



Figure 1. Map of Kyzylorda region

Atmospheric precipitation is distributed very unevenly over the seasons. The maximum amount of precipitation falls in the winter-spring period. In summer, rains occur 1-3 times a season and are short-lived. The average annual precipitation is 110-150 mm per year. Almost all settlements are concentrated along the Syrdarya River and the railway line passing through the entire territory of the region with area is 226.02 thousand km^2 [13].

The city of Kyzylorda is the administrative center of the Kyzylorda region. The official population of the city for 2022 was 277.678 people [14].

The provision of drinking water in the city of Kyzylorda is carried out by the State Municipal Enterprise under the right of economic management «Kyzylorda su zhuyesi». On average, the city consumes water 200.000.0 m^3/day . Currently, water supply to the city of Kyzylorda is carried out from two sources: - from a surface source - the Syrdarya River; - from underground sources – wells of the Kyzylzharma and Kyzylorda fields.

At the site of water intake facilities for treatment from an open source (Syr Darya River) for drinking water supply, the following complex of water treatment facilities operates:

1. Understream water intake.
2. Pumping station of the 1st lift, design capacity – 46.0 thousand m^3/day .
3. Two filtration stations with a total capacity of 56.5 thousand m^3/day .

4. Chlorination shop. Automatic vacuum chlorinator AHB-1000 – 1 piece, designed for dosing chlorine gas and chlorinating drinking water.

5. Coagulant reagent workshop, automatic dosing unit for preparing coagulant solution ALEBRO Mixlain 7100 with a total capacity of 2000 l/hour.

6. Clean water tanks – 5 pcs. with a total volume of 18800 m^3 .

7. Pumping station of the 2nd lift with a design capacity of 65.23 thousand m^3/day .

Groundwater collection from Quaternary alluvial deposits is carried out from 20 wells linearly located along the river bed at a distance of 100 m. The depth of the wells is 60-65 m, the distance between them is 237 m. The number of wells is 113 pieces.

We have carried out research work to study the quality of water from surface and underground (Kyzylzharma field) water supply sources for the city of Kyzylorda. To study the quality of water in the Syrdarya River, samples were taken from river water in the direction of flow, that is, in the territory of Zhanakorgan, Kyzylorda and Kazaly. Water sampling was carried out in 2021-2022 in accordance with [15]. The layout of observation sites for sampling is shown in Figure 2.



Figure 2. Layout of observation positions

In order to determine the chemical composition of groundwater, water samples were taken from wells 1-ts, 2r, 4r and 1721. The observation method during the pumping process is generally accepted [16]. At the end of pumping, water samples were taken for the necessary types of analysis. The layout of the wells in which sampling was carried out is shown in Figure 3.

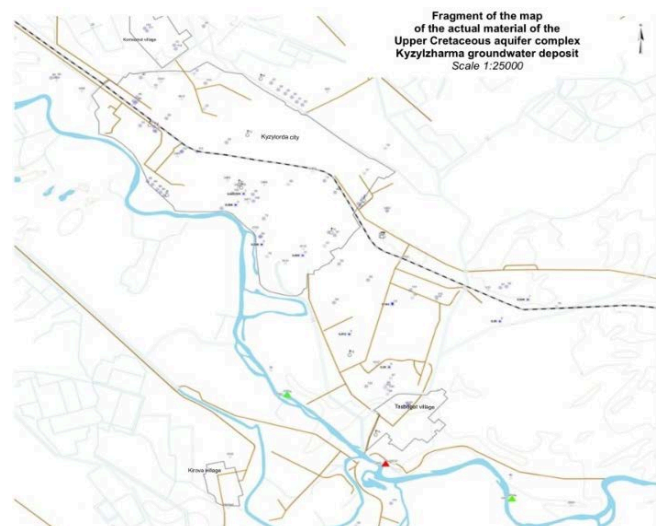


Figure 3. Layout of wells in which sampling was carried out

Laboratory analyzes of samples from the Syrdarya River and groundwater were carried out using photometric, flame-atomic absorption, spectrometric measurement methods using a spectrometer, photocalorimeter and oil product analyzer with a fluorimeter, in a certified laboratory of the «Institute of Hydrogeology and Geoecology named after U. Ahmedsafina».

3. Results and discussion

3.1. Characteristics of water quality of the Syrdarya River

The Syrdarya River is formed far beyond the borders of Kazakhstan at the confluence of the Kara Darya and Naryn rivers. The total length of the river is 2660 km, the basin area is 462 thousand km². The banks of the Syrdarya are low, composed of loess-like loams and sands. The river often washes them out and moves its bed across the plain, forming branches and channels. The average slope of the river bed is 0.002-0.003. The river's feeding is mixed. It receives the greatest amount of water in May-July. The river flow by season is distributed as follows: in spring – 41% of the annual norm, in summer – 26%, in autumn – 18% and in winter – 15%. The bed of the Syrdarya River is characterized by a large number of meanders and oxbow lakes. The natural banks of the river are steep, but not high, no more than 0.7 m above the water's edge in spring and no more than 3-4 m in low water. To protect the coastal area from flooding by flood waters, numerous dams were built along the banks of the river.

The river flow usually does not exceed 700 m³/s, and in the summer it decreases (in the area of Kyzylorda) to 100 m³/s or less. The width of the Syrdarya River is 140-600 m with a depth of 2.1-5.0 m. The river flow speed is 0.8-1.7 m/s. The river freezes in December and is cleared of ice in February-March. The results of chemical analyzes of natural waters of the Syrdarya River taken from river water in the direction of flow in the territory of Zhanakorgan, Kyzylorda and Kazaly are shown in Table 1.

Table 1. Results of chemical analyzes of natural waters of the Syrdarya River

No.	Name of chemical indicators	Water quality information		
		Zhana-korgan	Ky-zylorda	Kazaly
1	Temperature at the time of sampling, °C	3-27		
2	pH value	7.20	7.15	7.21
3	Odor at 20°C and 60°C, points no more	1	1	1
4	EMF turbidity mg/l	33.8	38.4	39.1
5	Ammonium salt NH ₄ mg/l	0.001	0.44	0.47
7	Nitrates NO ₂ mg/l	0.035	0.021	0.14
8	Nitrates NO ₃ mg/l	9.4	10.8	11.2
9	Chlorides Cl mg/l	102.8	182.4	137.9
10	Iron Fe mg/l	0.87	1.36	1.37
11	Total hardness mEq/l	7.8	9.0	9.1
12	Sulfates SO ₄ mg/l	384.7	458.16	460.4
13	General mineralization, mg/l	1679.6	1715.0	1684.8
14	Aluminum Al mg/l	0.11	0.2	0.18
15	Oxidability mg O/l	2.16	2.1	2.21
17	Fluorides F mg/l	0.39	0.41	0.38
18	Manganese Mn mg/l	0.021	0.018	0.022
19	Copper Cu mg/l	0.0012	0.0010	0.001
20	Biological oxygen demand (BOD ₅) mg O ₂ /l	1.92	1.9	1.97
21	Suspended substances, mg/l	109.8	84.3	85.9
25	Total α – radioactivity, Bq/l	0.09	0.09	0.07
26	Total β – radioactivity Bq/l	0.09	0.1	0.1
27	Coli - index	599.0	604.0	603.0
28	TMC (total microbial count)	45.0	45.0	46.0

The results of chemical analyzes showed that there is no significant increase in pollution in the city of Kyzylorda. The main pollution is transboundary and is formed outside the territory of the Kyzylorda region.

At the same time, in certain seasons of the year, water mineralization increases to 1.5-1.84 g/dm³, the sulfate content increases to 748 mg/dm³, and the total water hardness increases to 14 mg/dm³, this makes it completely unsuitable for household and drinking purposes without purification.

3.2. Characteristics of groundwater quality

Fresh groundwater from the Upper Turonian aquifer at the Kyzylzharma field will be used for centralized domestic and drinking water supply. Therefore, their quality must be assessed in accordance with the standards of modern requirements for the quality of water used for centralized domestic and drinking water supply, i.e. in accordance with standards [17]. The quality of groundwater used in some wells in comparison with drinking water standards in force in Kazakhstan is shown in Table 2.

In the area of the Kyzylzharma field, the mineralization of groundwater in the alluvial aquifer complex is 0.8-1.1 g/l, the sulfate content in the water of individual production wells reaches 690 mg/l, and the total hardness of groundwater is up to 14 mEq/l.

It should be noted that fresh and very slightly brackish groundwater with mineralization up to 1.0-1.4 g/l in the alluvial quaternary aquifer complex is distributed within a relatively narrow riverbed strip of the Syrdarya River valley.

Groundwater of Quaternary alluvial deposits has a close relationship with the surface water of the Syrdarya River, the waters of which in recent years have been subject to significant technogenic impact and have sharply deteriorated their quality. In this regard, negative changes are noted in the chemical composition of groundwater in alluvial deposits (increased mineralization, increase in sulfate content, increase in total hardness, etc.) It is not possible to predict further changes in the quality of both groundwater and surface waters, due to the transboundary nature of the river flow Syrdarya and the inability to foresee the impact of human economic activity on the ecosystem of the Syrdarya River.

In addition, when assessing operational reserves, the problem of predicting possible changes in the quality of groundwater by the end of the design life of water intakes was solved. This particular task was carried out using mathematical modeling. The forecast for groundwater quality during further operation of the water intake is given below in Table 3.

3.3. Assessment of possible changes in groundwater quality

The deterioration of the quality of groundwater in the exploited Upper Turonian aquifer of the Kyzylzharma field is possible mainly due to the flow of brackish groundwater from the Maastrichtian, Coniacian-Campanian and Upper Albian-Cenomanian horizons. In order to predict changes in the quality of groundwater in the Kyzylzharma field, the problem of transfer of components dissolved in it by the flow of groundwater was solved using the created model.

Table 2. Quality of groundwater used in comparison with drinking water standards

No.	Water quality indicators or names of certain components	National Standard for Drinking Water	Quality indicators or component content			
			Observation points			
			Well 1-C	Well 2P	Well 4P	Well 1721
1	Smell, points at 20°C	up to 2	0	0	0	0
4	Color, degrees	up to 20	0	0	0	0
5	Turbidity, NTU	up to 1.5	1	0.6	0.5	0.5
6	pH value	6-9	8.37	7.05	7.65	8.27
7	Permanganate oxidability O ₂ , mg/l	2-5	1.28	0.84	1.16	0.72
8	Ammonia nitrogen (by nitrogen), mg/l	up to 2.0	0.5	1.0	<0.1	<0.1
9	Nitrates NO ₂ mg/l	up to 3.3	<0.01	<0.01	<0.01	1.2
10	Nitrates NO ₃ mg/l	up to 45.0	0.2	<0.2	3.5	1.3
11	Total hardness mEq/l	up to 7.0	0.7	1.3	1.3	0.6
12	Dry residue, mg/l	up to 1000 (1500)	1003	1320	1068	1012
13	Chlorides, mg/l	up to 350	170.2	258.8	212.7	191.5
14	Sulfates, mg/l	up to 500	341.2	477	349	332.2
15	Iron (Fe ⁺² , Fe ⁺³), mg/l	up to 0.3 (up to 1.0)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
16	Copper, mg/l	up to 1.0	0.05	0.04	0.06	0.05
17	Zinc, mg/l	up to 5.0	0.05	0.05	0.048	0.05
18	Molybdenum, mg/l	up to 0.25	0.0025	0.002	0.0021	0.0025
19	Arsenic, mg/l	up to 0.05	0.001	0.004	0.0038	0.005
20	Lead, mg/l	up to 0.03	0.04			0.002
21	Fluorine, mg/l	up to 1.2	0.55	0.5	0.55	0.55
22	Aluminum, mg/l	up to 0.5	0.5			0.04
23	Mercury, mg/l	up to 0.0005	0.0002			0.0002
24	Polyphosphates, mg/l	up to 3.5				
25	Beryllium, mg/l	up to 0.0002	0.00005			0.00005
26	Selenium, mg/l	up to 0.01	0.0001			0.0001
27	Manganese, mg/l	up to 0.1 (up to 0.5)	0.05			0.05
28	Nickel, mg/l	up to 0.1	0.001			0.005
29	Cobalt, mg/l	up to 0.1				
30	Chromium, (Cr+6), mg/l	up to 0.05	0.01			0.025
31	Bor, mg/l	up to 0.5	0.25	0.45	0.45	0.4
32	Barium, mg/l	up to 0.1	-			0.004
33	Cadmium, mg/l	up to 0.001	0.0007			0.001
34	Cyanide (CN), mg/l	up to 0.035	0.005			0.005
35	Petroleum products, in total, mg/l	up to 0.1	0.05			0.05
36	Surfactants, mg/d m ³	до 0.5	0.05			0.05
37	Phenolic index, mg/l	up to 0.25	0.001			0.0005
41	Total α – radioactivity, Bq/l	up to 0.1	0.018			0.046
42	Total β – radioactivity Bq/l	up to 1.0	0.09			0.18

The mathematical model of the transfer of components dissolved in them by groundwater flow is generally described by the equation:

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k \quad (1)$$

C^k – the concentration of the dissolved k -th component (ML⁻³);

θ – porosity of the filtration medium, dimensionless value;

t – time;

x_i – coordinate corresponding to the i -th Cartesian coordinate axis, (L);

D_{ij} – hydrodynamic dispersion coefficient tensor (L²T⁻¹);

v_i – filtration speed (LT⁻¹) which is defined as Darcy flow through the relation $v_i = q_i / \theta$;

q_s – volumetric flux per unit volume of the aquifer, representing a source (positive) or sink (negative) (T⁻¹);

C_s^k – concentration of the dissolved k -th component in the source or sink (ML⁻³).

To solve this equation, the MT3D module of the GMS modeling system was used. The mathematical model simulated the convective transport of components dissolved in groundwater. It was believed that the mineralization of groundwater in the Maastricht aquifer is 4 g/l and does not change in the process of solving the forecast problem. The initial values of groundwater mineralization of the Coniac-Campanian, Upper Turonian aquifers and the Upper Albian-Cenomanian aquifer complex for solving the forecast problem were set on the basis of the corresponding maps constructed as of October 1, 2010.

The map of the predicted mineralization of groundwater in the Upper Turonian aquifer (as of February 16, 2038) is shown in the Figure 4.

The map of changes in the mineralization of groundwater in the Upper Turonian aquifer from October 1, 2010 to February 16, 2038 is shown in Figure 5.

Table 3 shows the results of calculating the predicted mineralization in water intake wells of the Upper Turonian aquifer as of 02/16/2038.

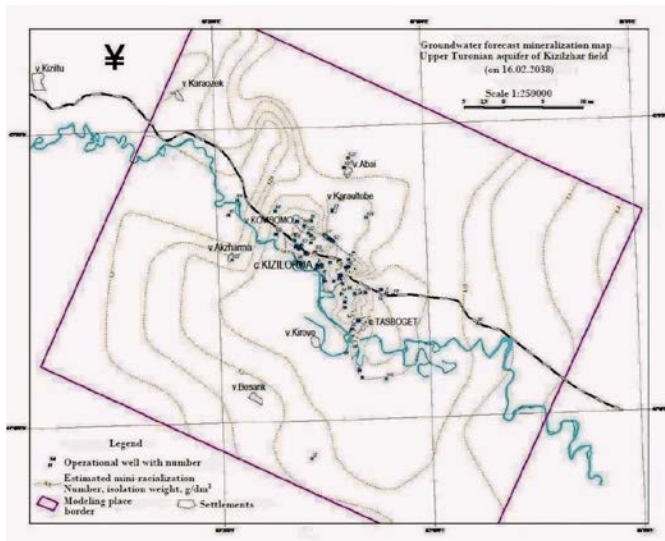


Figure 4. Map of predicted groundwater mineralization of the Upper Turonian aquifer (as of 02/16/2038)

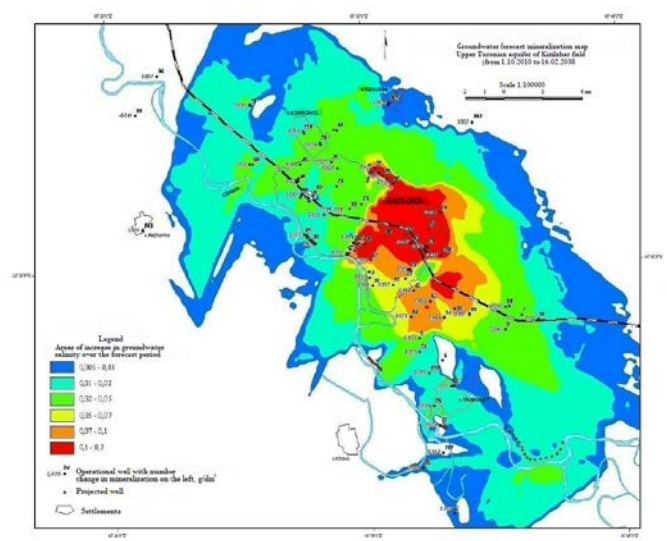


Figure 5. Map of changes in the mineralization of groundwater in the Upper Turonian aquifer from 10/1/2010 to 02/16/2038

Table 3. Predicted values of groundwater mineralization for production wells of the Upper Turonian aquifer as of February 16, 2038 (based on modeling results)

Name	No. on the map	Row number, column number of the model block	Forecast water turnover Q, m ³ /day	Water conductivity km, m ² /day	Water well filter radius r, m	Mineralization C, g/dm ³	Change in mineralization over the forecast period ΔC, g/dm ³	Sulfate concentration, g/dm ³
Water intake		(I, J)						
Wells								
LLP "Hotel Kyzylorda", well No. 0760	1	-58.62	43.3	350.00	0.10	1.212	0.1116	0.369
JV "Kazgermunai", well No. 0339	2	-93.99	950.4	164.24	0.10	1.094	0.0087	0.333
JSC "Torgai Petroleum", well No. 226-D	3	-63.67	46.6	278.95	0.10	1.154	0.0545	0.351
JSC "PetroKazakhstan Kumkol Resources", well No. 1, water intake	4	-59.62	79.15	350.00	0.10	1.191	0.0906	0.362
JSC "PetroKazakhstan Kumkol Resources", well No. 2, water intake	5	-69.8	79.15	228.72	0.10	1.204	0.0334	0.366
JSC "Ai-Dan Munai", well No. 19-D	6	-71.85	280	210.55	0.10	1.191	-0.0087	0.363
LLP JV "Kuat Amlon Munai", Belkul station, well No. U-300/55	7	-56.95	46.6	149.77	0.10	1.054	0.0349	0.321
JSC "Ai-Dan Munai", well No. 0759	8	-58.62	20	350.00	0.10	1.212	0.1116	0.369
CJSC "KumkolTrans-Service", well No. 1	9	-60.93	46.6	157.92	0.10	1.049	0.0433	0.319
State Municipal Enterprise "Regional Medical Center", well No. 2.225-D	10	-54.22	150	160.00	0.10	1.299	-0.0011	0.395
State Municipal Enterprise "Regional Medical Center" skv No. 2,225-D	11	-62.71	605.5	252.03	0.10	1.178	0.0568	0.358
LLP "Shopan-Ata", well No. 96-D	12	-116.96	50	159.23	0.10	1.179	0.0001	0.359
Plot" well No. 2	13	-63.82	164.4	234.39	0.10	1.172	0.0638	0.357
Plot" well No. 4	14	-63.82	164.4	234.39	0.10	1.172	0.0638	0.357
Aeroportovskaya	110	-92.1	500	149.75	0.10	1.261	0.0006	0.384
LLP "KUAT", Akmechet Microdistrict, well No. 1721	15	-55.55	45	350.00	0.10	1.071	0.0124	0.326
Individual Enterprise "Murzagalieva", well No. 1-V	16	-57.63	50	350.00	0.10	1.193	0.0927	0.363
LLP "Nurai", well No. 271-D	17	-49.73	49.9	102.72	0.10	1.231	0.1310	0.375
Syrdaroil (Nik Oil Company)	18	-61.86	50	193.07	0.10	1.077	0.0671	0.328
Belkul station (JSC "Vagonservis")	19	-56.98	46	148.91	0.10	1.050	0.0204	0.320
Individual (Abenova Orazgul)	20	-94.1	47	148.48	0.10	1.264	0.0006	0.385
Aray microdistrict, Bereke str., 3, apt. 18	21	-60.73	48	250.00	0.10	1.215	0.0629	0.370
"NefTechService", Hong Bon Do str., 26	22	-45.53	49.9	224.36	0.10	1.025	0.0246	0.312
"Trans Service", Hong Bon Do str., 40	23	-49.55	49.3	287.85	0.10	1.026	0.0260	0.312
LLP "SPF Montazhspestroy"	24	-62.84	149	220.40	0.10	1.113	0.0714	0.339
"Koksu" peasant farm	25	-89.9	72.8	161.42	0.10	1.107	0.0093	0.337
Kyzylzhar village, well No. 1	26	-43.59	437.3	103.08	0.10	1.165	0.0978	0.355
Kyzylzhar village, well No. 2	27	-43.6	437.3	98.49	0.10	1.206	0.1267	0.367
Kyzylzhar village, well No. 3	28	-43.61	437.3	95.14	0.10	1.219	0.1561	0.371
Kyzylzhar village, well No. 4	29	-43.62	437.3	92.29	0.10	1.229	0.1712	0.374
Kyzylzhar village, well No. 5	30	-43.62	437.3	92.29	0.10	1.229	0.1712	0.374
Kyzylzhar village, well No. 6	31	-44.63	437.3	90.82	0.10	1.133	0.1327	0.345
Kyzylzhar village, well No. 7	32	-44.64	437.3	87.71	0.10	1.154	0.1314	0.351
Kyzylorda Energy Center, well No.1	33	-54.5	437.3	350.00	0.10	1.048	0.0173	0.319
Kyzylorda Energy Center, well No.2	34	-54.51	437.3	350.00	0.10	1.050	0.0164	0.320
Kyzylorda Energy Center, well No.3	35	-54.51	437.3	350.00	0.10	1.050	0.0164	0.320
Kyzylorda Energy Center, well No.4	36	-54.52	437.3	350.00	0.10	1.054	0.0178	0.321
Kyzylorda Energy Center, well No.5	37	-54.52	437.3	350.00	0.10	1.054	0.0178	0.321
Munayshi street, well №	40	-53.75	437.3	109.16	0.10	1.333	0.2114	0.406

Munayshi street, well №2	41	-53.74	437.3	108.74	0.10	1.317	0.2174	0.401
Munayshi street, well №3	42	-52.75	437.3	107.92	0.10	1.326	0.2019	0.404
Munayshi street, well №4	43	-52.74	437.3	107.16	0.10	1.271	0.1705	0.387
Titova auyl, well №1	44	-51.48	437.3	321.36	0.10	1.040	0.0341	0.317
Titova auyl, well №2	45	-48.48	437.3	273.47	0.10	1.035	0.0259	0.315
Titova auyl, well №3	46	-52.48	437.3	336.56	0.10	1.043	0.0371	0.317
Titova auyl, well №4	47	-52.49	437.3	348.05	0.10	1.029	0.0295	0.313
Titova auyl, well №5	48	-52.49	437.3	348.05	0.10	1.029	0.0295	0.313
Tasboget auyl, well No. 1	49	-74.89	437.3	198.25	0.10	1.106	0.0082	0.337
Tasboget auyl, well No. 2	50	-74.89	437.3	198.25	0.10	1.106	0.0082	0.337
Tasboget auyl, well No. 3	51	-74.89	437.3	198.25	0.10	1.106	0.0082	0.337
Kyzylorda, Biological wastewater treatment station (BWTP) well No. 1	52	-42.35	437.3	193.48	0.10	1.118	0.0183	0.340
Kyzylorda, Biological wastewater treatment station (BWTP) well No. 2	53	-42.35	437.3	193.48	0.10	1.118	0.0183	0.340
Kyzylorda, Biological wastewater treatment station (BWTP) well No. 3	54	-42.35	437.3	193.48	0.10	1.118	0.0183	0.340
Zhakhaeva street, Kyzylorda, well No. 1	55	-62.66	437.3	292.55	0.10	1.156	0.0562	0.352
Zhakhaeva street, Kyzylorda, well No. 2	56	-62.66	437.3	292.55	0.10	1.156	0.0562	0.352
Shugyla microdistrict, well No. 1	57	-58.74	437.3	214.71	0.10	1.236	0.0539	0.376
Shugyla microdistrict, well No. 2	58	-58.73	437.3	219.62	0.10	1.252	0.0701	0.381
Kyzylorda City park, well No. 1	59	-57.62	437.3	350.00	0.10	1.194	0.0935	0.363
Kyzylorda City park, well No. 2	60	-57.62	437.3	350.00	0.10	1.194	0.0935	0.363
Kyzylorda City park, well No. 3	61	-57.62	437.3	350.00	0.10	1.194	0.0935	0.363
Kosherbaeva street, Kyzylorda, well No. 1	62	-61.76	437.3	250.00	0.10	1.188	0.0878	0.362
Kosherbaeva street, Kyzylorda, well No. 2	63	-62.79	437.3	245.60	0.10	1.187	0.0875	0.361
Astana	64	-66.77	437.3	250.00	0.10	1.175	0.0753	0.358
Kyzylorda Sity Polise Department	65	-53.71	437.3	109.07	0.10	1.248	0.1467	0.380
Shukurova street, well No. 1	66	-74.88	437.3	200.31	0.10	1.143	0.0201	0.348
Kyzylorda Old market	67	-60.61	437.3	350.00	0.10	1.151	0.0511	0.350
Kyzylorda TB dispensary, well No. 1	68	-53.39	437.3	227.39	0.10	1.120	0.0213	0.341
Kyzylorda TB dispensary, well No. 2	69	-53.39	437.3	227.39	0.10	1.120	0.0213	0.341
Komsomol district, Kyzylorda, well No. 1	70	-43.49	437.3	212.74	0.10	1.049	0.0333	0.319
Agroprom district, Kyzylorda,	71	-52.7	437.3	107.52	0.10	1.230	0.1302	0.374
Baiseitova st., well No. 2	72	-60.65	437.3	350.00	0.10	1.193	0.0926	0.363
30 years of victory	73	-50.6	437.3	205.48	0.10	1.044	0.0440	0.318
Nurdaulet	74	-71.81	437.3	215.92	0.10	1.215	0.0153	0.370
Kyzylorda Nursing home, well No. 2	75	-58.73	437.3	219.62	0.10	1.252	0.0701	0.381
Tasboget area – 2, well No. 2	76	-79.87	437.3	186.65	0.10	1.169	0.0142	0.356
Water intake 1C	77	-82.89	437.3	171.15	0.10	1.123	0.0069	0.342
Residence, Citizens Service Centre (CSC)	78	-64.68	437.3	265.27	0.10	1.152	0.0519	0.351
Zhanaauyl	79	-45.74	437.3	95.74	0.10	1.202	0.1024	0.366
Shapagat (new)	80	-54.66	437.3	193.04	0.10	1.196	0.1014	0.364
Seksenbaeva street, well No.1	81	-39.51	437.3	197.05	0.10	1.052	0.0440	0.320
Gagarina village, 5th clinic	82	-52.52	437.3	350.00	0.10	1.018	0.0184	0.310
Kultekenova street, Kyzylorda	83	-52.59	437.3	262.11	0.10	1.038	0.0347	0.316
Seksenbaeva street, Kyzylorda, well No. 2	125	-40.51	964.9	203.94	0.10	1.045	0.0447	0.318
Chizha San Tina street, Kyzylorda, well No. 1	126	-44.59	964.9	105.03	0.10	1.099	0.0864	0.335
Chizha San Tina street, Kyzylorda, well No. 2	127	-44.59	964.9	105.03	0.10	1.099	0.0864	0.335
Chizha San Tina street, Kyzylorda, well No. 3	128	-45.59	964.9	107.95	0.10	1.043	0.0433	0.318
Chizha San Tina street, Kyzylorda, well No. 4	129	-45.6	964.9	102.33	0.10	1.062	0.0623	0.323
Chizha San Tina street, Kyzylorda, well No. 5	130	-46.6	964.9	106.00	0.10	1.054	0.0544	0.321
Munayshi, well No. 4	131	-53.74	964.9	108.74	0.10	1.317	0.2174	0.401
Munayshi, well No. 1	132	-52.74	964.9	107.16	0.10	1.271	0.1705	0.387
Munayshi, well No. 5	133	-53.74	964.9	108.74	0.10	1.317	0.2174	0.401
Munayshi, well No. 2	134	-52.74	964.9	107.16	0.10	1.271	0.1705	0.387
Munayshi, well No. 3	135	-53.74	964.9	108.74	0.10	1.317	0.2174	0.401
Kyzylorda Sity Polise Department, well No. 1	136	-53.71	964.9	109.07	0.10	1.248	0.1467	0.380
Kyzylorda Sity Polise Department, well No. 2	137	-53.71	964.9	109.07	0.10	1.248	0.1467	0.380
Kyzylorda City park, well No. 1 повторение	138	-57.62	964.9	350.00	0.10	1.194	0.0935	0.363
Kyzylorda City park, well No. 2	139	-57.62	964.9	350.00	0.10	1.194	0.0935	0.363
Kyzylorda City park, well No. 3	140	-57.62	964.9	350.00	0.10	1.194	0.0935	0.363
Kyzylorda City park, well No. 4	141	-57.62	964.9	350.00	0.10	1.194	0.0935	0.363
Kyzylorda Old market, well No. 1	142	-61.61	964.9	350.00	0.10	1.150	0.0504	0.350
Kyzylorda Old market, well No. 2	143	-60.61	964.9	350.00	0.10	1.151	0.0511	0.350
Kyzylorda Old market, well No. 3	144	-60.62	964.9	350.00	0.10	1.190	0.0904	0.362
"Arai 2" area, well No. 1	149	-76.73	964.9	158.14	0.10	1.100	0.0005	0.335
"Arai 2" area, well No. 2	150	-76.73	964.9	158.14	0.10	1.100	0.0005	0.335
"Arai 2" area, well No. 3	151	-76.73	964.9	158.14	0.10	1.100	0.0005	0.335
"Arai 2" area, well No. 4	152	-76.73	964.9	158.14	0.10	1.100	0.0005	0.335
"Arai 2" area, well No. 5	153	-77.74	964.9	156.93	0.10	1.099	-0.0009	0.335
"Arai 2" area, well No. 6	154	-77.74	964.9	156.93	0.10	1.099	-0.0009	0.335
"Arai 2" area, well No. 7	155	-77.75	964.9	158.45	0.10	1.106	0.0064	0.337
"Arai 2" area, well No. 8	156	-77.75	964.9	158.45	0.10	1.106	0.0064	0.337
"Arai 2" area, well No. 9	157	-77.75	964.9	158.45	0.10	1.106	0.0064	0.337
"Arai 2" area, well No. 10	158	-77.76	964.9	159.95	0.10	1.144	0.0435	0.348
"Arai 2" area, well No. 11	159	-77.76	964.9	159.95	0.10	1.144	0.0435	0.348
Water intake, well No. 1	160	-82.89	964.9	171.15	0.10	1.123	0.0069	0.342

Water intake, well No. 2	161	-82.9	964.9	168.30	0.10	1.103	0.0013	0.336
Water intake, well No. 3	162	-82.9	964.9	168.30	0.10	1.103	0.0013	0.336
Water intake, well No. 4	163	-82.9	964.9	168.30	0.10	1.103	0.0013	0.336
Water intake, well No. 5	164	-82.91	964.9	165.51	0.10	1.098	0.0076	0.334
"Steppe 2" area, well No.1	165	-77.1	964.9	160.00	0.10	1.283	0.0005	0.391
"Steppe 2" area, well No.2	166	-77.1	964.9	160.00	0.10	1.283	0.0005	0.391
"Steppe 2" area, well No.3	167	-78.1	964.9	160.00	0.10	1.281	0.0005	0.390
"Steppe 2" area, well No.4	168	-78.1	964.9	160.00	0.10	1.281	0.0005	0.390
"Steppe 2" area, well No.5	169	-78.1	964.9	160.00	0.10	1.281	0.0005	0.390
"Steppe 2" area, well No.6	170	-79.1	964.9	160.00	0.10	1.279	0.0005	0.389
"Steppe 2" area, well No.7	171	-79.1	964.9	160.00	0.10	1.279	0.0005	0.389
"Steppe 2" area, well No.8	172	-80.1	964.9	160.00	0.10	1.277	0.0005	0.389
"Steppe 2" area, well No.9	173	-80.1	964.9	160.00	0.10	1.277	0.0005	0.389
"Steppe 2" area, well No.10	174	-80.1	964.9	160.00	0.10	1.277	0.0005	0.389
"Steppe 2" area, well No.11	175	-80.1	964.9	160.00	0.10	1.277	0.0005	0.389
"Steppe 2" area, well No.12	176	-79.1	964.9	160.00	0.10	1.279	0.0005	0.389
"Steppe 2" area, well No.13	177	-79.1	964.9	160.00	0.10	1.279	0.0005	0.389
"Steppe 2" area, well No.14	178	-78.1	964.9	160.00	0.10	1.281	0.0005	0.390
"Steppe 2" area, well No.15	179	-77.11	964.9	160.00	0.10	1.274	0.0006	0.388
"Steppe 2" area, well No.16	180	-76.11	964.9	160.00	0.10	1.276	0.0006	0.388
"Steppe 2" area, well No.17	181	-75.11	964.9	160.00	0.10	1.278	0.0006	0.389
"Merey" microdistrict, well No.1	145	-60.54	964.9	350.00	0.10	1.116	0.0161	0.340
"Merey" microdistrict, well No.2	146	-61.54	964.9	350.00	0.10	1.114	0.0144	0.339
"Merey" microdistrict, well No.3	147	-61.55	964.9	350.00	0.10	1.119	0.0188	0.341
"Merey" microdistrict, well No.4	148	-61.55	964.9	350.00	0.10	1.119	0.0188	0.341

The highest mineralization of groundwater will be in well No. 40. It will reach 1.33 g/l by the end of the forecast period. The greatest increase in groundwater mineralization (by 0.22 g/l) will occur in wells with map numbers 131, 133, 135. In these wells, the maximum depth of the dynamic level is also predicted (129.81 m) at the end of the forecast period.

4. Conclusions

The obtained analyzes indicate that the surface waters of the Syrdarya River are polluted with sulfates, magnesium, and have increased mineralization. At the same time, in certain seasons of the year, water mineralization increases to 1.5-1.84 g/l, the sulfate content increases to 748 mg/l, and the total water hardness increases to 14 mg/l. The water of the Syrdarya River is suitable for irrigation and industry, and for domestic and drinking water supply the use of deep water treatment methods is required. And also the results of chemical analyzes showed that there is no significant increase in pollution in the Kyzylorda region. The main pollution is transboundary and is formed outside the territory of the Kyzylorda region. It is not possible to predict further changes in the quality of both groundwater and surface waters, due to the transboundary nature of the flow of the Syrdarya River.

Groundwater of Quaternary alluvial deposits has a close relationship with the surface water of the Syrdarya River, the waters of which have been subject to significant technogenic impact in recent years and have sharply deteriorated their quality. In this regard, negative changes are noted in the chemical composition of groundwater in alluvial deposits (increased mineralization, increased sulfate content, increased total hardness, etc.)

The obtained analyzes indicate that very slightly brackish groundwater with mineralization up to 1.0-1.4 g/l in the alluvial quaternary aquifer complex is distributed within a relatively narrow riverbed strip of the Syrdarya River valley.

At the same time, in the area of the Kyzylzharma field, the mineralization of groundwater in the alluvial aquifer complex is 0.8-1.1 g/l, the sulfate content in the water of individual production wells reaches 690 mg/l, and the total hardness of groundwater is up to 14 mEq/l.

As well as deterioration in the quality of groundwater in the exploited Upper Turonian aquifer of the Kyzylzharma field is possible mainly due to the flow of brackish groundwater from the Maastrichtian, Coniacian-Campanian and Upper Albian-Cenomanian horizons. In order to predict changes in the quality of groundwater in the Kyzylzharma field, the problem of transfer of components dissolved in it by the flow of groundwater was solved using the created model.

The obtained analyzes for predicting changes in groundwater quality indicate that the highest mineralization of groundwater will be in well No. 40. It will reach 1.33 g/l by the end of the forecast period. The greatest increase in groundwater mineralization (by 0.22 g/l) will occur in wells with map numbers 131, 133, 135.

It should be noted that currently there is no unified groundwater monitoring system throughout the entire territory of the Kyzylzharma field. Moreover, the overwhelming majority of operating production wells are not equipped with water meters that allow reliable accounting of water intake. There are also no special observation wells-piezometers that allow long-term observations of the position of the depression surface of the operational Upper Turonian aquifer and observation wells on the above and below-lying aquifers, from which substandard groundwater may flow.

Acknowledgements

We highly appreciate the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan. This research has been/was/is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR10965134 "Assessment of fresh groundwater resources as the main source and long-term reserve of sustainable drinking water supply for the population of the Republic of Kazakhstan").

References

- [1] Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Retrieved from: <http://www.caresd.net/iwrm/new/doc/direct.pdf>

- [2] Environmental Code of the Republic of Kazakhstan. (2021). Retrieved from: <https://adilet.zan.kz/eng/docs/K070000212>
- [3] U.S. EPA. (2000). The history of drinking water treatment. EPA-816-F-00-006. Retrieved from: www.epa.gov/safewater/consumer/pdf/hist.pdf
- [4] Fawell, J. & Nieuwenhuijsen, J.M. (2003). Contaminants in drinking water: environmental pollution and health. *British Medical Bulletin*, 68(1), 199–208. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg027>
- [5] Sasakova, N., Veselitz-Lakticova, K., Hromada, R., Chvojka, D., Kosco, J., and Ondrasovic, M. (2013). Contamination of individual sources of drinking water located in environmentally polluted central spis region (Slovakia). *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 3(3), 262–265
- [6] Marks, S.J.; Clair-Caliot, G.; Taing, L.; Bamwenda, J.T.; Kanyesigye, C.; Rwendeire, N.E.; Kemerink-Seyoum, J.S.; Kansiime, F.; Batega, D.W.; Ferrero, G. Water supply and sanitation services in small towns in rural–urban transition zones: The case of Bushenyi-Ishaka Municipality, Uganda. *NPJ Clean Water* 2020, 3, 1–9.
- [7] United Nations Human Settlements Programme. State of the World's Cities 2010/2011: Bridging the Urban Divide; Earthscan: London, UK. Retrieved from: <https://unhabitat.org/annual-report-2010>
- [8] State program of housing and communal development «Nurly Zher» for 2020-2025. Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan dated §1054.
- [9] Information bulletin on the state of the environment of the Republic of Kazakhstan for 2022. Retrieved from: <https://www.kazhydromet.kz/en/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayuschey-sredy/2022>
- [10] Ushakova, E., Shchukova, I. (2008). Possibility of using underground waters of the microdistrict upper kuria of the city of perm for drinking water supply. *PNRPU. Applied ecology. Urban development*, 4, 118-128. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2018.04.10>
- [11] Wang, L.F., Chen, Q., Long, X.P., Wu, X.B. & Sun, L. (2005). Comparative analysis of groundwater fluorine levels and other characteristics in two areas of Laizhou Bay and its explanation on fluorine enrichment. *Water Supply*, (15), 384–394
- [12] Banerjee, A., Singh, P. & Pratap, K. (2016). Hydrogeological component assessment for water resources management of semi-arid region: A case study of Gwalior, MP, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(18), 711. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2736-8>
- [13] Smagulov, A.S. (2006). Report «Study of the regime and balance, regime observations of the state and rational use of groundwater in the Kyzylorda region based on the results of work carried out in 2003-2006»
- [14] Material from Wikipedia – the free encyclopedia. [Retrieved from: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>]
- [15] ST RK GOST R 51592-2003. Water. General requirements for sampling. - Astana: Committee for Technical Regulation and Metrology of the Ministry of Industry and Trade of the Republic of Kazakhstan
- [16] Instructions for organizing and maintaining routine observations of the level, pressure, flow rate, temperature and chemical composition of groundwater in the State groundwater monitoring system. Kokshetau, 2006
- [17] Sanitary and epidemiological requirements for water sources, places of water intake for household and drinking purposes, household and drinking water supply and places of cultural and domestic water use and the safety of water bodies. Order of the Minister of Health of the Republic of Kazakhstan §26
- [18] Fridrich, B., Krčmar, D., Dalmacija, B., Molnar, J., Pešić, V. & Kragulj, M. (2014). Impact of wastewater from pig farm lagoons on the quality of local groundwater. *Agricultural Water Management*, (135), 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.014>

Қызылорда облысындағы (Қазақстан) Сырдария өзені мен Қызылжарма кен орнының жер асты суларының сапасы

М.К. Абсаметов¹, К.Т. Оспанов^{2*}, Б. Кенесбаева²

¹У.М. Ахмедсафин атындағы гидрогеология және геоэкология институты, Алматы, Қазақстан

²Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: ospanovkairat@mail.ru

Аңдатпа. Бұл зерттеудің мақсаты Қызылорда қаласын (Қазақстан) ауыз сумен тұрақты қамтамасыз ету үшін Сырдария өзені суының және Қызылжарма кен орнының жерасты суларының сапасының өзгеруіне мониторинг жүргізу болып табылады. Бұл мақалада Жаңақорған, Қызылорда және Қазалы аумақтарындағы ағыс бағыты бойынша өзен суларынан алынған Сырдария өзенінің табиғи суларына химиялық талдау нәтижелері келтірілген. Қазақстанда қолданыстағы ауыз су нормативтерімен салыстырғанда кейбір ұңғымаларда пайдаланылатын жерасты суларының сапасының нәтижелері ұсынылған. Айта кету керек, Қызылорда кен орны ауданында жер асты суларының минералдануы 0.8-1.1 г/л құрайды, жекелеген өндіруші ұңғымалардың суындағы сульфаттардың мөлшері 690 мг/л жетеді, ал жер асты суларының жалпы қаттылығы-14 мг экв/л дейін. 2038 жылғы 16 ақпандағы болжам бойынша жер асты суларының минералдануының ең көп ұлғаюы (0.22 г/л-ге) карта нөмірлері 131, 133, 135 ұңғымаларда болады.

Негізгі сөздер: табиғи су, Сырдария өзені, жер асты сулары, Қызылжарма кен орны, судың сапасы, химиялық құрамы, жер асты суларының сапасының өзгеруі.

Качество воды реки Сырдарья и подземных вод месторождения Кызылжарма в Кызылординской области (Казахстан)

М.К. Абсаметов¹, К.Т. Оспанов^{2*}, Б. Кенесбаева²

¹Институт гидрогеологии и гидрофизики им. У.М. Ахмедсафина, Алматы, Казахстан

²Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Автор для корреспонденции: ospanovkairat@mail.ru

Аннотация. Целью данного исследования является мониторинг изменений качества воды реки Сырдарья и подземных вод месторождения Кызылжарма для устойчивого снабжения питьевой водой города Кызылорда (Казахстан). В данной статье представлены результаты химических анализов природных вод реки Сырдарья, взятых из речных вод по направлению течения, на территории Жанакоргана, Кызылорды и Казалы. Представлены результаты качества используемых в некоторых скважинах подземных вод в сравнении с нормативами питьевой воды, действующими в Казахстане. Следует отметить, что в районе Кызылординского месторождения минерализация подземных вод составляет 0.8-1.1 г/л, Содержание сульфатов в воде отдельных добывающих скважин достигает 690 мг/л, а общая жесткость подземных вод – до 14 мг-экв/л. Представлены результаты оценки возможных изменений качества подземных вод. По прогнозам на 16 февраля 2038 года наибольшее увеличение минерализации подземных вод (на 0.22 г/л) произойдет в скважинах с номерами карт 131, 133, 135.

Ключевые слова: природная вода, река Сырдарья, подземные воды, месторождение Кызылжарма, качество воды, химический состав, изменение качества подземных вод.

Received: 02 December 2023

Accepted: 15 February 2024

Available online: 29 February 2024

CONTENTS

<i>Akuov A.M., Kelamanov B.S., Samuratov Ye.K., Yessengaliyev D.A., Sultanov M.G.</i> DETERMINATION OF THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF INTERACTION OF CHROMIUM WITH SILICON AND ALUMINUM.....	1
<i>Abuova R.Zh., Bondarev A., Burshukova G.A.</i> ENHANCED DAMPING PROPERTIES OF NOVEL Cr-Ni-V STEELS WITH CERAMICAL- METAL NANOSTUCTURE TiN-Cu COATINGS.....	7
<i>Chepushtanova T.A., Yulussov S.B., Baigenzhenov O.S., Khabiyev A.T., Merkibayev Y.S., Mishra B.</i> REVIEW OF METHODS FOR PROCESSING ORE VANADIUM-CONTAINING RAW MATERIALS	15
<i>Shirokiy P.G., Zavaley V.A., Auelkhan Ye.S., Alzhigitova M.M.</i> APPLICATION OF GEOSTATISTICAL INTERPOLATION METHODS FOR FILTRATION COEFFICIENTS ON THE NURKAZGAN EAST FIELD USING THE PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE.....	23
<i>Absametov M.K., Ospanov K.T., Kenesbayeva B.</i> WATER QUALITY OF THE SYRDARYA RIVER AND GROUNDWATER OF THE KYZYLZHARMA FIELD IN THE KYZYLORDA REGION (KAZAKHSTAN).....	30

МАЗМҰНЫ

<i>Ақуов А.М., Келаманов Б.С., Самуратов Е.К., Есенғалиев Д.А., Сұлтанов М.Г.</i> ХРОМНЫҢ КРЕМНИЙ ЖӘНЕ АЛЮМИНИЙМЕН ӘРЕКЕТТЕСУІНІҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ФУНКЦИЯЛАРЫН АНЫҚТАУ.....	1
<i>Абуова Р.Ж., Бондарев А., Буришукова Г.А.</i> TiN-Cu МЕТАЛЛ КЕРАМИКАЛЫҚ НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ ЖАБЫНЫ БАР ЖАҢА CR-NI-V БОЛАТТАРЫНЫҢ ЖАҚСАРТЫЛҒАН ДЕМПФЕРЛІК ҚАСИЕТТЕРІ.....	7
<i>Чепуштанова Т.А., Юлусов С.Б., Байгенженев О.С., Хабиев А.Т., Меркибаев Е.С., Мишра Б.</i> ҚҰРАМЫНДА ВАНАДИЙ БАР ШИКІЗАТТЫ ӨНДЕУ ӘДІСТЕРІНЕ ШОЛУ	15
<i>Широкий П.Г., Завалей В.А., Ауелхан Е.С., Альжигитова М.М.</i> PYTHON БАҒДАРЛАМАЛАУ ТІЛІН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, ШЫҒЫС НҰРҚАЗҒАН КЕН ОРНЫ УЧАСКЕСІНДЕ СҮЗУ КОЭФФИЦИЕНТТЕРІН ИНТЕРПОЛЯЦИЯЛАУДЫҢ ГЕОСТАТИСТИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНУ.....	23
<i>Абсаметов М.К., Оспанов К.Т., Кенесбаева Б.</i> ҚЫЗЫЛОРДА ОБЛЫСЫНДАҒЫ (ҚАЗАҚСТАН) СЫРДАРИЯ ӨЗЕНІ МЕН ҚЫЗЫЛЖАРМА КЕН ОРНЫНЫҢ ЖЕР АСТЫ СУЛАРЫНЫҢ САПАСЫ	30

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ақуов А.М., Келаманов Б.С., Самуратов Е.К., Есенғалиев Д.А., Сұлтанов М.Г.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХРОМА С КРЕМНИЕМ И АЛЮМИНИЕМ.....	1
<i>Абуова Р.Ж., Бондарев А., Буришукова Г.А.</i> УЛУЧШЕННЫЕ ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА НОВЫХ СТАЛЕЙ CR-NI-V С МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИМ НАНОСТРУКТУРНЫМ ПОКРЫТИЕМ TiN-Cu.....	7
<i>Чепуштанова Т.А., Юлусов С.Б., Байгенженев О.С., Хабиев А.Т., Меркибаев Е.С., Мишра Б.</i> ОБЗОР МЕТОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ РУДНОГО ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ.....	15
<i>Широкий П.Г., Завалей В.А., Ауелхан Е.С., Альжигитова М.М.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИЛЬТРАЦИИ НА УЧАСТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НУРКАЗГАН ВОСТОЧНЫЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON.....	23
<i>Абсаметов М.К., Оспанов К.Т., Кенесбаева Б.</i> КАЧЕСТВО ВОДЫ РЕКИ СЫРДАРЬЯ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД МЕСТОРОЖДЕНИЯ КЫЗЫЛЖАРМА В КЫЗЫЛОРДИНСКОЙ ОБЛАСТИ (КАЗАХСТАН).....	30

Учредитель: Satbayev University

Регистрация:

Министерство информации и общественного развития Республики Казахстан
№ KZ19VPY00056529 от 30.09.2022

Официальный сайт: <https://vestnik.satbayev.university/index.php/journal/>

Основан в августе 1994 г. Выходит 6 раз в год

Адрес редакции:

г. Алматы, ул. Сатпаева,
22 тел.: 292-63-46