

Подбор рациональных параметров ремонтно-восстановительных работ при скважинной добыче урановых руд

¹КЕНЖЕТАЕВ Жигер Смадиевич, PhD, главный научный сотрудник, kzhiger@yahoo.com,

^{1*}ТОГИЗОВ Куаныш Серикханович, PhD, профессор, k.togizov@satbayev.university,

¹ЖАПАБАЕВ Кудайберген Аллабергенулы, старший научный сотрудник, zharabaev.kudaiberger@mail.ru,

¹ЖАНГИРХАНОВА Арайлым Аманжолкызы, магистрант, a.zhanggirkhanova@satbayev.university,

¹МУЗАППАРОВА Акерке Бакбергеновна, преподаватель, a.muzapparova@satbayev.university,

¹НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», Казахстан, Алматы, ул. Сатпаева, 22а,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Целью данного исследования является повышение эффективности скважинной добычи урана за счет подбора декольматирующих растворов и выбора рациональных параметров технологии воздействия на прифильтровую зону пласта геотехнологических скважин, повышение фильтрационных характеристик пласта в зависимости от состава и структуры осадкообразующих материалов. При проведении исследований установлена структура и состав осадкообразования, вызывающие снижение фильтрационных характеристик продуктивного горизонта месторождений Сырдарьинской и Шу-Сарысуйской депрессии. Выбран эффективный состав специального декольматирующего раствора для разрушения и предотвращения осадкообразования в продуктивном горизонте с применением бифторида аммония с добавлением серной кислоты и поверхностно-активных веществ. Разработаны и теоретически обоснованы рациональные параметры инновационной технологии повышения фильтрационных характеристик продуктивного горизонта с применением специальных декольматирующих растворов. Применение инновационной технологии повышения фильтрационных характеристик руд в сложных горно-геологических условиях может увеличить период бесперебойной работы и коэффициент использования геотехнологических скважин, что в свою очередь положительно повлияет на интенсивность отработки технологических блоков и повысит производительность и безопасность труда, а также сократит эксплуатационные расходы предприятий на добычу.

Ключевые слова: скважинная добыча, регенерация, осадкообразование, декольматирующий раствор, уран, рентгенофазовый анализ, Шу-Сарысуйская и Сырдарьинская депрессии.

Введение. Изменение климата вследствие несоразмерной производственной деятельности человека на планете становится все более осознанным. Для защиты и сохранения биоразнообразия, снижения негативного воздействия изменения климата в мире принимаются конкретные меры [1]. В этом плане признание проектов атомной генерации к зеленым видам энергии позволит увеличить генерацию электроэнергии к 2050 году в два раза, что внесет важный вклад в борьбу с глобальным потеплением [2]. Согласно исследованиям МАГАТЭ ядерная энергетика имеет значительный потенциал по снижению выбросов парниковых газов для смягчения последствий изменения климата в отдельных регионах Европы, Азии и Африки (МАГАТЭ). Рост ядерной энергетики приведет к увеличению потребности в природном уране и его продуктах. В решении

вопросов поставок природного урана достойный вклад может внести урановая отрасль Казахстана, опирающаяся на прогрессивную, высокоэффективную скважинную добычу урановых руд.

Казахстан обладает 14% мировых разведанных запасов урана и занимает второе место после Австралии, 70% из них пригодны для разработки скважинным способом. Скважинная разработка урановых руд в Республике Казахстан производится на 26 участках, объединенных в 13 уранодобывающих компаний. Совокупный объем добычи природного урана составляет более 40% общемирового уровня [3, 4].

Месторождения урана на территории Казахстана локализованы в шести провинциях: Шу-Сарысуйской, Сырдарьинской, Северо-Казахстанской, Прикаспийской, Прибалкашской, Илийской. Основная добыча ведется в первых

двух провинциях, расположенных в Кызылординской и Туркестанской областях. Они схематически показаны на рисунке 1.

Скважинная добыча полезных ископаемых, в частности урана, подразумевает растворение полезного компонента движущимся потоком растворителя на месте расположения рудного тела с последующим выносом и подъемом образовавшихся соединений на поверхность [5, 6]. Применение серной кислоты на предприятиях Казахстана в качестве растворителя основана на ее доступности, возможности транспортировки железнодорожным или автомобильным транспортом, низкой отпускной стоимостью и способностью практически полностью растворять урановые минералы. Однако серная кислота имеет высокую реакционную способность с карбонатными и другими минералами рудовмещающих пород, в результате образуются сложнорастворимые осадки с выделением углекислого газа, эти факторы затрудняют процесс выщелачивания [7, 8].

Осадкообразование закупоривает зазоры фильтров, порового пространства прифильтровой зоны пласта, меняют линии тока технологических растворов, создают непроницаемые зоны и снижают фильтрационные характеристики руд продуктивного горизонта. Это приводит к снижению содержания урана в продуктивном растворе, производительности геотехнологических скважин, тем самым увеличивая период отработки балансовых запасов. При этом повышается себестоимость конечного продукта за счет увеличения расхода серной кислоты, электроэнергии, трудозатрат и других эксплуатационных расходов [9, 10]. В особо сложных горно-геологических условиях при проведении ремонтно-восстано-

вительных работ на скважинах не достигается положительный результат. На решение данной производственной задачи направлено настоящее исследование.

Методика исследования. Детальное установление физико-химических характеристик осадков позволит подобрать более эффективные реагенты и методологии восстановления фильтрационных характеристик руд прискважинной зоны пласта, обеспечивающие увеличение производительности и бесперебойной работы геотехнологических скважин. Для определения количественно-качественных характеристик осадкообразований были отобраны пробы осадков месторождений Шу-Сарысульской и Сырдарьинской депрессии.

При визуальном осмотре пробы №1 с месторождения Сырдарьинской депрессии видно, что осадки представляют из себя пылевидную смесь красного цвета, а осадки пробы №2 из месторождения Шу-Сарысульской депрессии выглядят как белый порошок с множеством бежевых пятен, наличием крупных кристаллов и песка.

Определение фазового состава осадков производили рентгенофазовым методом, на рентгеновском дифрактометре X'Pert MPD PRO (PANalytical). Определение химического состава кольятирующих материалов производилось в соответствии рентгенографическими данными международного кристаллографического общества. В результате снимков проб № 1 и № 2 получены отражения рентгеновских лучей стабильной формы, приведенные на рентгенограммах осадкообразований (рисунок 2). Данные свидетельствуют о высокой кристаллизации компонентов осадкообразующих соединений. Результаты анализа значений межплоскостных расстояний

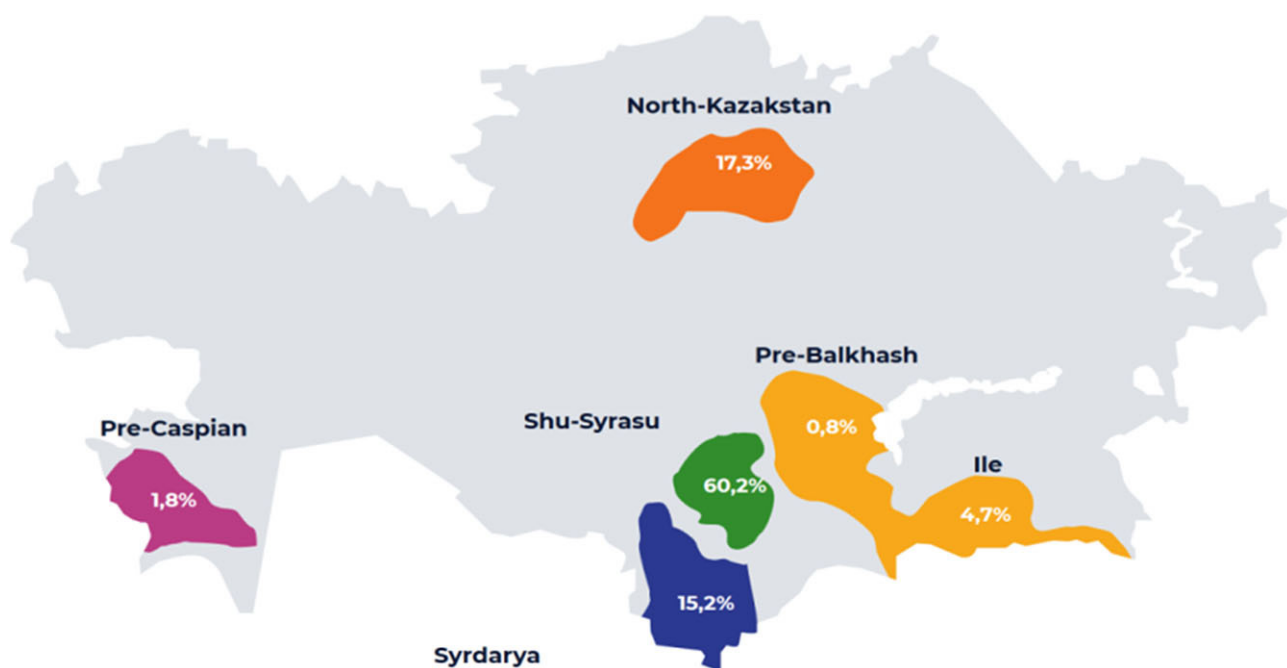


Рисунок 1 – Схема расположения регионов разведанных месторождений урана

свидетельствуют о образовании в составе полевых шпатов, сложных алюмосиликатов и гипса. Слабозаметное отражение некоторых рентгеновских лучей обусловлено аморфным состоянием проб. Результаты сравнительного анализа количественно-качественных характеристик составов осадкообразующих компонентов месторождений Сырдарьинской и Шу-Сарысуйской депрессии приведены в таблице.

Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют, что осадкообразования из месторождений Сырдарьинской и Шу-Сарысуйской депрессий схожи по своему составу. На месторождениях Сырдарьинской депрессии преобладают осадки химического происхождения, такие как анкерит, доломит, гипс 23, 24, 18%. Это вызвано взаимодействием серной кислоты с карбонатными минералами руд и вмещающих пород продуктивного горизонта. Карбонатные и гипсовые осадкообразования характерны химическому типу происхождения, образующиеся при химической реакции взаимодействия. На месторождениях Шу-Сарысуйской депрессии преобладают осадкообразования механического типа, такие как кварц, фосфат алюминия 34, 22%. Это связано с преобладанием в продуктивном горизонте полевых шпатов и глин. Механические осадки образуются при растворении мелких фракций, транспортировке и выпадении в осадок в зоне разгрузки.

Подбор эффективных параметров регенерации скважин. При восстановлении филь-

трационных характеристик руд прискважинной зоны пласта за счет разрушения и удаления осадкообразований, препятствующих фильтрации растворов в пласте на комплексах подземного скважинного выщелачивания (ПСВ), широко используются химические и гидродинамические методы ремонтно-восстановительных работ на скважинах.

Для повышения эффективности скважинной добычи урана за счет интенсификации геотехнологических процессов и восстановления проницаемости прифильтровой зоны пласта авторами была разработана и опробована методика химической обработки скважин специальным раствором. Инновационная методика обработки фильтровой части скважин предусматривает приготовление и подачу декольматирующего раствора в фильтровую часть скважины, нагнетание в продуктивный горизонт, для большего взаимодействия химических реагентов с осадками с целью их полного растворения. Процесс удаления продуктов реакции взаимодействия из продуктивного горизонта на поверхность предусмотрен компрессорной прокачкой. На рисунке 3 приведена разработанная схема составляющих работ по интенсификации скважинной добычи урана [11].

Как видно из рисунка 3, основная масса осадкообразований 3, происходит в продуктивном горизонте 1, непосредственно в зоне разгрузки растворов и повышения скорости движения рас-

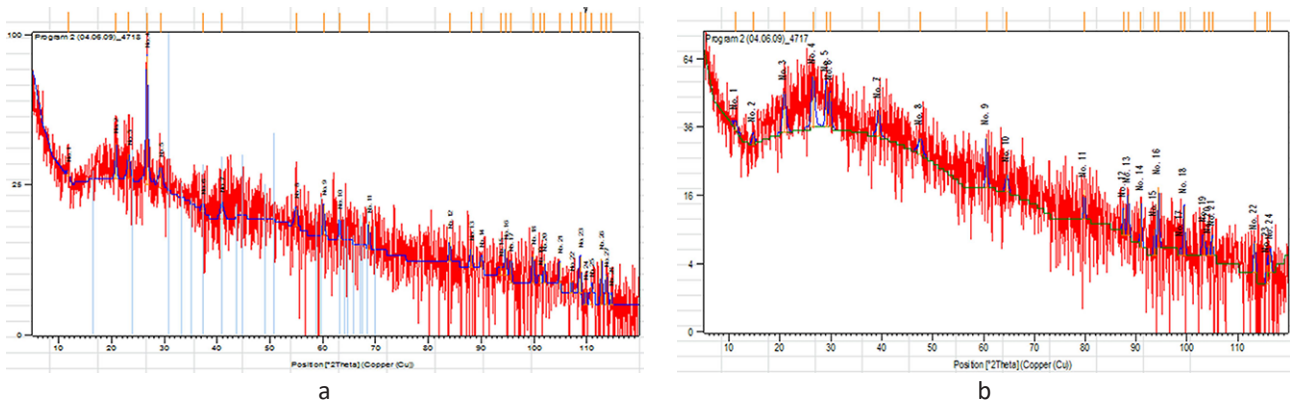
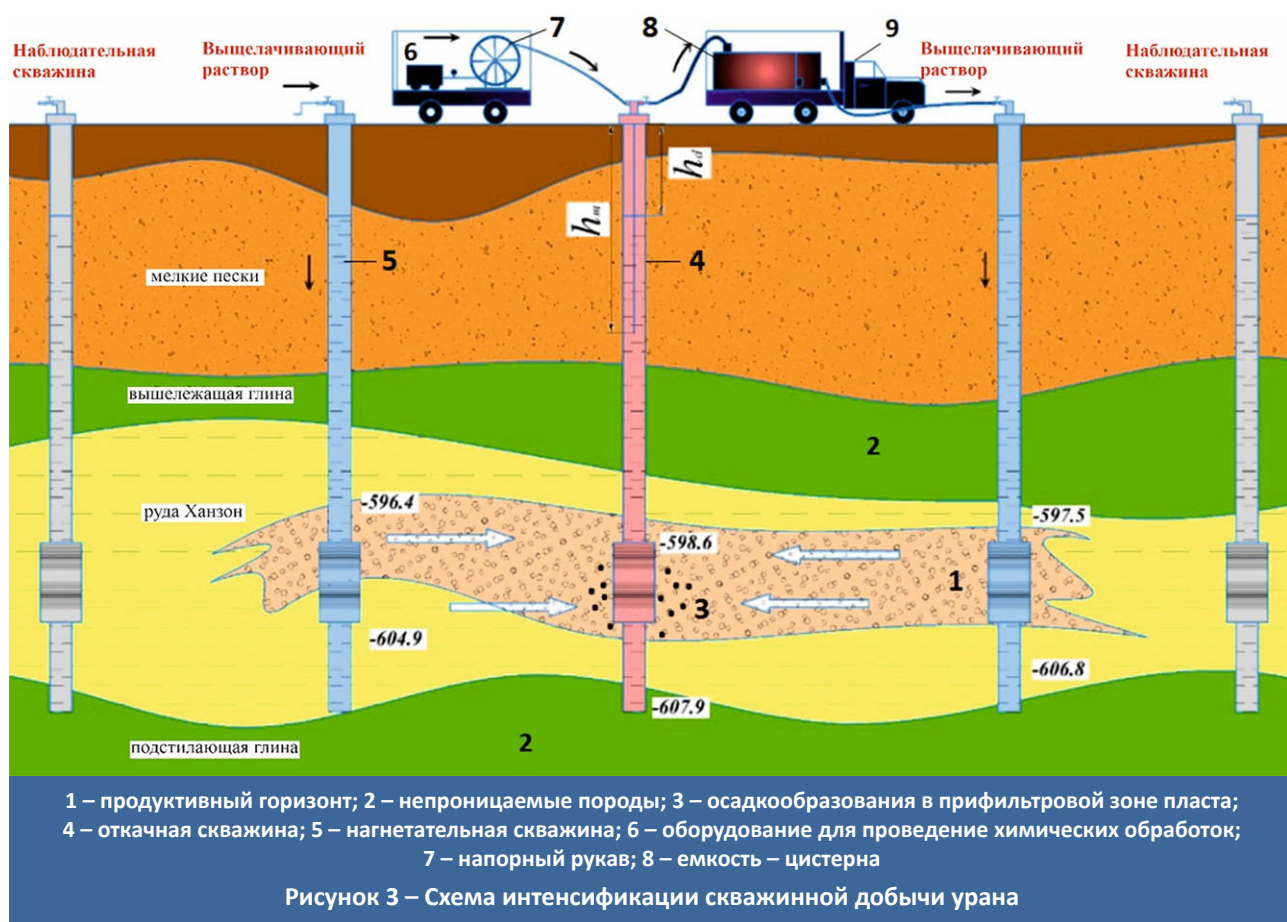


Рисунок – 2 Дифрактограмма осадкообразований с месторождений Сырдарьинской – а, и Шу-Сарысуйской – б депрессий

Минеральный состав осадкообразований месторождений Сырдарьинской и Шу-Сарысуйской депрессий

Наименование компонента	Химическая формула	Содержание пробы № 1, [%]	Содержание пробы № 2, [%]
Кварц	SiO ₂	21	34
Алюминий фосфат	Al (PO ₄)	14	22
Анкерит	Ca (MgFeMn) (CO ₃) ₂	23	25
Доломит	Ca Mg Fe (CO ₃) ₂	24	12
Гипс	Ca S O ₄ · 2 H ₂ O	18	17



творов от нагнетательных скважин 5, к откачной скважине 4. Проведение химической обработки с применением комплекса химических реагентов предусматривает приготовление растворов на специальном оборудовании 6, и подачу по напорному рукаву 7 до фильтровой части скважины 4. При этом приготовленный специальный раствор подается из емкости цистерны 8. Подача декольматирующих растворов на основе бифторида аммония (2%), серной кислоты (5%), непосредственно в фильтровую часть технологических скважин позволяет снизить расход химических реагентов и повысить проникающую способность для большего разрушения и диспергирования осадков.

Для правильного ведения работ, связанных с регенерацией скважин при добыче урана и соблюдении технологического режима выщелачивания, необходимо выполнять расчеты нижеследующих геотехнологических параметров: отношение Ж:Т, расчетный радиус растекания, среднее содержание урана в продуктивном растворе (ПР), степень извлечения и т.д. Отношение жидкости к твердому (Ж:Т) определяется как:

$$\text{Ж:Т} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{ВР}}}{\text{ГРМ}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{ВР}}$ – общее количество выщелачивающего раствора (ВР), поданного в недра за время t (м^3); ГРМ – расчетная горнорудная масса (т).

$$\text{ГРМ} = SM_s \delta, \quad (2)$$

где S – расчетная площадь выщелачивания (м^2); M_s – мощность эффективная (м); δ – удельная масса рудовмещающих пород ($\text{т}/\text{м}^3$).

Расчетная площадь растекания раствора от фильтра по продуктивному горизонту определяется по формуле 3. Затем, по формуле 4, определяется расчетный радиус растекания раствора.

$$S = \frac{Q/0,22}{M_s}, \quad (3)$$

где Q – объем раствора, поданный в скважину (м^3); 0,22 – усредненный коэффициент пористости вмещающих пород продуктивного горизонта; M_s – эффективной мощности продуктивного горизонта (м).

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (4)$$

где π – 3,14.

По завершении нагнетания выщелачивающего раствора в обрабатываемую скважину производят операцию по компрессорной обработке скважины для очищения фильтровой части от продуктов реакции и осветления раствора. Затем, в соответствии с технологическим регламентом, следует операция по спуску погружного электро-насосного агрегата в устье скважины для запу-

ска скважины в добычу. Усредненное содержание полезного компонента (урана) в ПР определяется исходя из среднемесячной концентрации в ПР по формуле:

$$C_{\text{ср}}^U = \frac{\sum_{i=1}^n C_{\text{ПР}}^U Q_{\text{ПР}}}{\sum_{i=1}^n Q_{\text{ПР}}}, \quad (5)$$

где $C_{\text{ПР}}^U$ – среднемесячное содержание урана в ПР (г/л); $Q_{\text{ПР}}$ – объем продуктивного раствора скважины (м^3).

Контроль за геотехнологическим процессом скважинной добычи осуществляется также и по расчетному количеству добытого урана из недр P_U – полученного в продуктивных растворах за единицу времени (кг) по формуле 6.

$$P_U = \frac{\sum_{i=1}^n C_{\text{ПР}}^U Q_{\text{ПР}}}{1000} \cdot 0,97, \quad (6)$$

где 0,97 – принятый расчетный коэффициент сорбционного извлечения урана из ПР.

Извлечение (ϵ), определяется как отношение суммы добытого урана к имеющимся запасам, выражается в процентах (7).

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^n P_U}{P}, \quad (7)$$

где $\sum_{i=1}^n P_U$ – сумма добытого урана (кг); P – запасы урана (кг).

Оборудование для приготовления и подачи растворов химических реагентов состоит из емкости и насоса, которые изготовлены из коррозионностойкого материала, в связи с тем, что они контактируют с ВР укрепленной серной кислотой. Последующее нагнетание ВР в обрабатываемые скважины, обеспечивало распространение растворов химических реагентов в продуктивном горизонте, на эффективный радиус растекания, ограниченный сверху и снизу непроницаемыми породами.

Выводы

Проведенные количественно-качественные

исследования состава осадкообразования месторождений Шу-Сарысуйской депрессии свидетельствуют, что основную часть пробы составляют кварц (34%), фосфат алюминия (22%), анкерит (25%). Остальную часть пробы составляют доломит (12%) и гипс (17%). В данных осадкообразованиях преобладает механический тип осадков, образующихся в результате взаимодействия технологических растворов с глинистыми минералами продуктивного горизонта. Основа пробы месторождения Сырдарьинской депрессии состоит из анкерита (23%), доломита (24%) и кварца (21%), остальная часть пробы состоит из фосфата алюминия (14%) и гипса (17%). Данные осадкообразования преимущественно являются продуктами взаимодействия серной кислоты с карбонатными минералами руд и вмещающих пород.

В результате анализа физико-химических характеристик осадкообразований и изучения применяемых методов регенерации скважин, были разработаны эффективные параметры интенсификации скважинной добычи урана в сложных горно-геологических условиях. Приготовление и подача декольматирующего раствора на основе бифторида аммония (2%), серной кислоты (5%) и поверхностно-активных веществ в малых количествах позволяют повысить растворяющую способность декольматирующего раствора и предотвращают осадкообразование в пласте на более длительное время.

Разработанная методика восстановления фильтрационных характеристик продуктивного горизонта на основе обработки фильтровой части скважин позволяет увеличить эффективность декольматирующего раствора.

Благодарность. Данные исследования были проведены в рамках проекта грантового финансирования молодых ученых 2023-2025 гг. АР19575556 «Разработка инновационной технологии интенсификации подземного выщелачивания урана с применением полимерных и вяжущих компонентов в условиях скважинной добычи урана» Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khawassek Y.M. Kinetics of Leaching Process Using Sulfuric Acid for Sella Uranium Ore Material, South Eastern Desert / Y.M. Khawassek, M.H. Taha*, A.A. Eliwa // International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering. – 2016. – V 6. – Pp. 62-73.
2. Rashad, M.M. Kinetics of uranium leaching process using sulfuric acid for Wadi Nasib ore, South western Sinai, Egypt / M.M. Rashad, S.A. Mohamedb, E.M. EL sheikha, H.E. Miraa, G.M. Abd el Wahaba, S.A. Zakia // Aswan University Journal of Environmental Studies. – 2020. – V 2. – Pp. 171-182.
3. Bahig M., Atia1., Mohamed, A. Gado1., Mohamed, F. Cheira1. Kinetics of uranium and iron dissolution by sulfuric acid from Abu Zeneima ferruginous siltstone, Southwestern Sinai, Egypt // Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration. – 2018. – V 3. – Pp. 1-12.
4. Chen J., Zhao Y., Song Q., Zhou Z., & Yang S. Exploration and mining evaluation system and price prediction of uranium resources // Mining of Mineral Deposits, 2018. 12(1), Pp. 85-94.
5. Rakishv B.R., Bondarenko V.I., Mataev M.M., Kenzhetaev Z.S. Influence of chemical reagent complex on intensification of uranium well extraction// Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2019, (6). – Pp. 25-30.
6. Panfilov M., Uralbekov B., Burkitbayev M. Reactive transport in the underground leaching of uranium: Asymptotic analytical

- solution for multi-reaction model/ Hydrometallurgy, 2016, (160). – Pp. 60-72.
7. Yusupov Kh. A., Aliev S. B., Dzhakupov D. A., Elzhanov E. A. Application of ammonium bifluoride for chemical treatment of wells in underground uranium leaching / Gorny zhurnal, 2017, (4), pp. 57-60.
 8. Rakishev B., Mataev M., Kenzhetaev Z., Shampikova A., Tohtaruly B. «Innovative methods for intensifying borehole production of uranium in ores with low filtration characteristics». News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2020. – 6(444). – Pp. 213-219.
 9. Carla M. Zammit, Joël Brugger, Gordon Southam, Frank Reith. In situ recovery of uranium – the microbial influence // Hydrometallurgy. – 2014, (150). – Pp. 236-244.
 10. Polynovsky, K.D., Approach complexe to solve the problem of intensification of in situ leaching of uranium. Min. Inf.-Anal. Bull. (Gornyi informatsionno-analyticheski bulletin). – 2012. (7), 64-73.
 11. Rakishev B.R., Mataev M.M., Kenzhetaev Z.S., Shampikova A.Kh. Innovative methods of intensification in situ leaching of uranium in deposits with low filtration characteristics of ores // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2022. – 5(455). – Pp. 188-206.

Уран кендерін ұңғымалық өндіру кезінде жөндеу-қалпына келтіру жұмыстарының ұтымды параметрлерін таңдау

¹**КЕНЖЕТАЕВ Жигер Смадиевич**, PhD, бас ғылыми қызметкер, kzhiger@yahoo.com,

¹***ТОҒЫЗОВ Қуаныш Серікханұлы**, PhD, профессор, k.togizov@satbayev.university,

¹**ЖАПАБАЕВ Құдайберген Аллабергенұлы**, аға ғылыми қызметкер, zhapabaev.kudaibergen@mail.ru,

¹**ЖӘҢГІРХАНОВА Арайлым Аманжолқызы**, магистрант, a.zhanggirkhanova@satbayev.university,

¹**МУЗАППАРОВА Акерке Бакбергеновна**, оқытушы, a.muzapparova@satbayev.university,

¹«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Қазақстан, Алматы, Сәтбаев көшесі, 22а,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты – декольматирлеуші ерітінділерді іріктеу және геотехнологиялық ұңғымалардың қатты сүзгілі аймағына әсер ету технологиясының ұтымды параметрлерін таңдау есебінен уранды ұңғымалық өндірудің тиімділігін арттыру, тұнба түзуші материалдардың құрамы мен құрылымына байланысты қатты сүзгілі сипаттамаларын арттыру. Зерттеулер жүргізу кезінде Сырдария және Шу-Сарысу депрессиясы кен орындарының өнімді горизонттының сүзгіштік сипаттамаларының төмендеуіне әкелетін шөгінділердің құрылымы мен құрамы анықталды. Күкірт қышқылы мен беттік-белсенді заттар қосылған аммоний бифторидін қолдана отырып, өнімді горизонтта шөгінділердің пайда болуын болдырмау және жою үшін арнайы декольматизациялық ерітіндінің тиімді құрамы таңдалды. Арнайы декольматикалық ерітінділерді қолдана отырып, өнімді горизонттың сүзу сипаттамаларын арттырудың инновациялық технологиясының ұтымды параметрлері әзірленді және теориялық тұрғыдан негізделген. Күрделі тау-кен геологиялық жағдайларда кендердің сүзу сипаттамаларын арттырудың инновациялық технологиясын қолдану үздіксіз жұмыс кезеңін және геотехнологиялық ұңғымаларды пайдалану коэффициентін арттыруы мүмкін, бұл өз кезегінде технологиялық блоктардың жұмыс қарқындылығына оң әсер етеді және еңбек өнімділігі мен қауіпсіздігін арттырады, сондай-ақ кәсіпорындардың өндіруге арналған пайдалану шығындарын азайтады.

Кілт сөздер: ұңғыманы өндіру, регенерация, тұнба түзілуі, декольматизация ерітіндісі, уран, рентгендік фазалық талдау, Шу-Сарысу және Сырдария депрессиялары.

Selection of Rational Parameters of Repair and Restoration Work at the Well of Uranium Ore Extraction

¹**KENZHETAEV Zhiger**, PhD, Chief Researcher, kzhiger@yahoo.com,

¹***TOGIZOV Kuanysh**, PhD, Professor, k.togizov@satbayev.university,

¹**ZHAPABAYEV Kudaibergen**, Senior Researcher, zhapabaev.kudaibergen@mail.ru,

¹**ZHANGIRKHANOVA Arailym**, Master Student, a.zhanggirkhanova@satbayev.university,

¹**MUZAPPAROVA Akerke**, Teacher, a.muzapparova@satbayev.university,

¹NCJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev», Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street, 22a,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of this study is to increase the efficiency of downhole uranium production by selecting decolmatizing solutions and choosing rational parameters for the technology of influencing the near-filter zone of the formation of geotechnological wells, increasing the filtration characteristics of the formation depending on the composition and structure of sediment-forming materials. During the research, the structure and composition of sedimentation were established, causing a decrease in the filtration characteristics of the productive horizon of the deposits of the Syrdarya and Shu-Sarysu depression. An effective composition of a special decolmatizing solution for the destruction and prevention

of sedimentation in the productive horizon using ammonium bifluoride with the addition of sulfuric acid and surfactants was chosen. Rational parameters of an innovative technology for improving the filtration characteristics of a productive horizon using special decolmatizing solutions have been developed and theoretically substantiated. The use of innovative technology to improve the filtration characteristics of ores in difficult mining and geological conditions can increase the period of uninterrupted operation and the utilization rate of geotechnological wells, which in turn will positively affect the intensity of processing of technological blocks and increase productivity and labor safety, as well as reduce the operating costs of enterprises for mining.

Keywords: borehole production, regeneration, sedimentation, decomposing solution, uranium, X-ray phase analysis, Shu-Sarysu and Syrdarya depression.

REFERENCES

1. Khawassek Y.M. Kinetics of Leaching Process Using Sulfuric Acid for Sella Uranium Ore Material, South Eastern Desert / Y.M. Khawassek, M.H. Taha*, A.A. Eliwa // International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering. – 2016. – V 6. – Pp. 62-73.
2. Rashad, M.M. Kinetics of uranium leaching process using sulfuric acid for Wadi Nasib ore, South western Sinai, Egypt / M.M. Rashada, S.A. Mohamedb, E.M. EL sheikha, H.E. Miraa, G.M. Abd el Wahaba, S.A. Zakia // Aswan University Journal of Environmental Studies. – 2020. – V 2. – Pp. 171-182.
3. Bahig M., Atia1., Mohamed, A. Gado1., Mohamed, F. Cheira1. Kinetics of uranium and iron dissolution by sulfuric acid from Abu Zeneima ferruginous siltstone, Southwestern Sinai, Egypt // Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration. – 2018. – V 3. – Pp. 1-12.
4. Chen J., Zhao Y., Song Q., Zhou Z., & Yang S. Exploration and mining evaluation system and price prediction of uranium resources // Mining of Mineral Deposits, 2018. 12(1), Pp. 85-94.
5. Rakishhev B.R., Bondarenko V.I., Mataev M.M., Kenzhetaev Z.S. Influence of chemical reagent complex on intensification of uranium well extraction// Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2019, (6). – Pp. 25-30.
6. Panfilov M., Uralbekov B., Burkitbayev M. Reactive transport in the underground leaching of uranium: Asymptotic analytical solution for multi-reaction model/ Hydrometallurgy, 2016, (160). – Pp. 60-72.
7. Yusupov Kh. A., Aliev S. B., Dzhakupov D. A., Elzhanov E. A. Application of ammonium bifluoride for chemical treatment of wells in underground uranium leaching / Gorny zhurnal, 2017, (4), pp. 57-60.
8. Rakishhev B., Mataev M., Kenzhetaev Z., Shampikova A., Tohtaruly B. «Innovative methods for intensifying borehole production of uranium in ores with low filtration characteristics». News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2020. – 6(444). – Pp. 213-219.
9. Carla M. Zammit, Joël Brugger, Gordon Southam, Frank Reith. In situ recovery of uranium – the microbial influence // Hydrometallurgy. – 2014, (150). – Pp. 236-244.
10. Polynovsky, K.D., Approach complexe to solve the problem of intensification of in situ leaching of uranium. Min. Inf.-Anal. Bull. (Gornyi informatsionno-analyticheski bulletin). – 2012. (7), 64-73.
11. Rakishhev B.R., Mataev M.M., Kenzhetaev Z.S., Shampikova A.Kh. Innovative methods of intensification in situ leaching of uranium in deposits with low filtration characteristics of ores // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2022. – 5(455). – Pp. 188-206.