ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЬМАТАЦИИ ФИЛЬТРОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН ИМПУЛЬСНЫМИ МЕТОДАМИ ПРИ ПОДЗЕМНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ УРАНА

Мехмонов М.Р.
доцент кафедры «Горное дело» НавГГТУ

Шамсиддинов Д.Т.
студент кафедры «Горное дело» НавГГТУ

Кудратов Х.О.
студент кафедры «Горное дело» НавГГТУ
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.20258210

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены причины снижения производительности технологических скважин при подземном выщелачивании урана, обусловленные механической, химической и биологической кольматацией фильтров и прифильтровой зоны. На основе анализа фильтрационных, геохимических и технологических факторов систематизированы механизмы образования кольматирующих отложений. Предложен подход к инженерному выбору импульсного способа восстановления дебита в зависимости от материала фильтра, глубины интервала и природы загрязнения. Показано, что при рациональном подборе режима воздействия прирост дебита может составлять 1,8–2,3 раза при устойчивости эффекта до 6–8 месяцев. Наиболее универсальным для пластиковых фильтров является электровзрывной метод, тогда как для интенсивно закольматированных интервалов с металлическими фильтрами более эффективны заряды малой мощности и газодетонационные схемы. Полученные обобщения могут использоваться при разработке регламентов регенерации технологических скважин на урановых месторождениях Узбекистана.

Ключевые слова: подземное выщелачивание урана, кольматация фильтра, прифильтровая зона, импульсное воздействие, электровзрыв, пневмоимпульс, газодетонация, ПЭ (полиэтилен), ПВХ (поливинилхлорид), дебит скважины

1. Введение

Для технологических скважин подземного выщелачивания урана устойчивость гидродинамической связи между фильтром и продуктивным интервалом определяет не только дебит и приемистость, но и равномерность фронта выщелачивания, расход реагента и итоговый коэффициент извлечения урана [1-3]. В процессе эксплуатации фильтровая зона подвергается прогрессирующей колматации, обусловленной накоплением тонкодисперсных частиц, выпадением карбонатных и железистых осадков, а также развитием биогенных образований. Это приводит к резкому увеличению фильтрационного сопротивления и снижению эффективности технологической системы.

Практика эксплуатации скважин подземного выщелачивания показывает, что в рыхлых и слабосцементированных песчаных коллекторах Центрального Кызылкума снижение дебита может наблюдаться уже в первые месяцы работы. Основными

причинами являются образование глинистой корки, осаждение малорастворимых соединений кальция и железа, а также локальное развития биопленок [4].

2. Материалы и методы

Методическая база исследования включает комплексный анализ факторов, определяющих процессы кольматации фильтров и прифильтровой зоны технологических скважин при подземном выщелачивании урана.

В работе использованы следующие подходы:

а) анализ причин механической, химической и биологической кольматации;

б) применение уравнений фильтрации для оценки изменения гидродинамических параметров;

в) использование кинетических зависимостей снижения проницаемости во времени;

г) сравнительный анализ параметров импульсных методов восстановления дебита;

д) обобщение результатов натурных испытаний на урановых месторождениях Узбекистана.

При интерпретации результатов использованы положения гидромеханики пористых сред, гидрогеохимии процессов подземного выщелачивания и данные инженерных исследований [1, 2, 16, 17].

2.1. Модель фильтрации (уравнение Дарси)

Фильтрационные процессы в прифильтровой зоне описываются законом Дарси:

$$Q=\frac{k\cdot A\cdot \Delta P}{\mu\cdot L}, \qquad (1)$$

где Q – расход фильтрата, $м^3/с$; k – коэффициент проницаемости породы, $м^2$; A – площадь фильтра, $м^2$; ΔP – перепад давления, Па; μ – динамическая вязкость раствора, Па·с; L – длина фильтрационного пути, м.

При кольматации коэффициент фильтрации k снижается на несколько порядков. Например, при образовании глинистой корки:

$$k=\frac{k_0}{10^3\div 10^4}, \qquad (2)$$

Если исходный коэффициент фильтрации пласта $k_0=10^{-11}$ $м^2$, то: закольматированной зоне $k=10^{-14}\div 10^{-15}$ $м^2$ это приводит к резкому падению Q, т.е. производительности скважины.

$$Q(t)=Q_0\cdot e^{-\alpha t}, \qquad (3)$$

На рисунке 1 представлены зависимости изменения дебита скважины во времени при различных значениях коэффициента кольматации α.

С учетом экспоненциального снижения проницаемости во времени (уравнение (3)) и закона Дарси (уравнение (1)) получена зависимость изменения дебита:

$$Q(t)=\frac{k_0\cdot A\cdot \Delta P}{\mu\cdot L}\cdot e^{-\alpha t}, \qquad (4)$$

где k_0 – начальная проницаемость пласта, $м^2$.

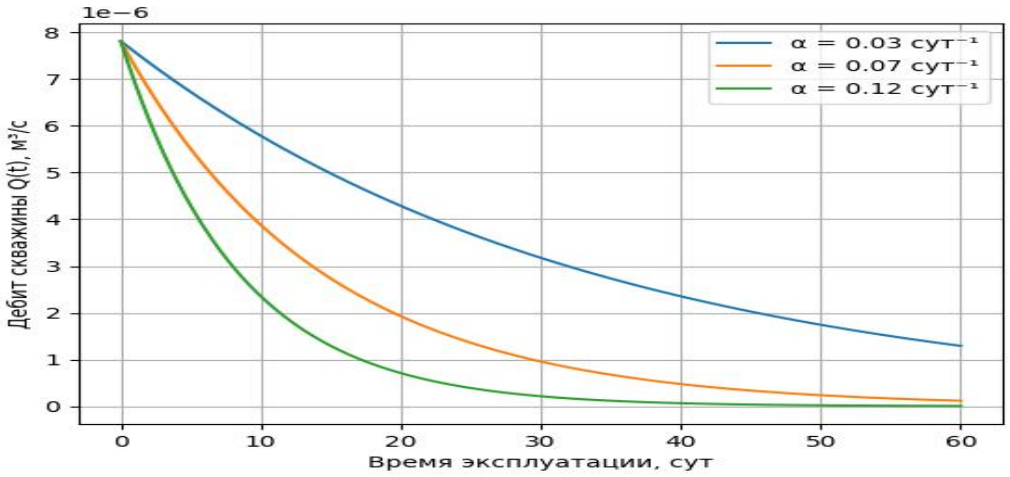


Рис. 1. Снижение дебита технологической скважины во времени при различных скоростях кольматации (при постоянных A, ΔP, μ и L)

Данная зависимость показывает, что дебит скважины уменьшается по экспоненциальному закону вследствие прогрессирующей кольматации прифильтровой зоны.

2.2. Кинетическая модель кольматации

Из уравнения (1) следует, что снижение коэффициента проницаемости k в кольматированной зоне непосредственно приводит к уменьшению расхода через фильтр при прочих равных условиях.

Для описания постепенного ухудшения фильтрационных свойств применена экспоненциальная модель изменения проницаемости:

$$k(t)=k_0 \cdot e^{-\alpha t}, \quad (5)$$

где k_0 – начальная проницаемость пласта, м^2; α – коэффициент кольматации, сут$^{-1}$ t – время эксплуатации, сут.

Такая форма записи удобна для количественного сопоставления скоростей деградации фильтрационных свойств при различных режимах эксплуатации и химическом составе рабочих растворов [5].

При α = 0,1 сут $^{-1}$ и t = 30 суток:

$$k(30)=k_0 \cdot e^{-3} \approx 0{,}05 \cdot k_0, \quad (6)$$

что свидетельствует о снижении проницаемости более чем в 20 раз по сравнению с исходным состоянием.

На рисунке 2 представлена зависимость изменения коэффициента проницаемости во времени.

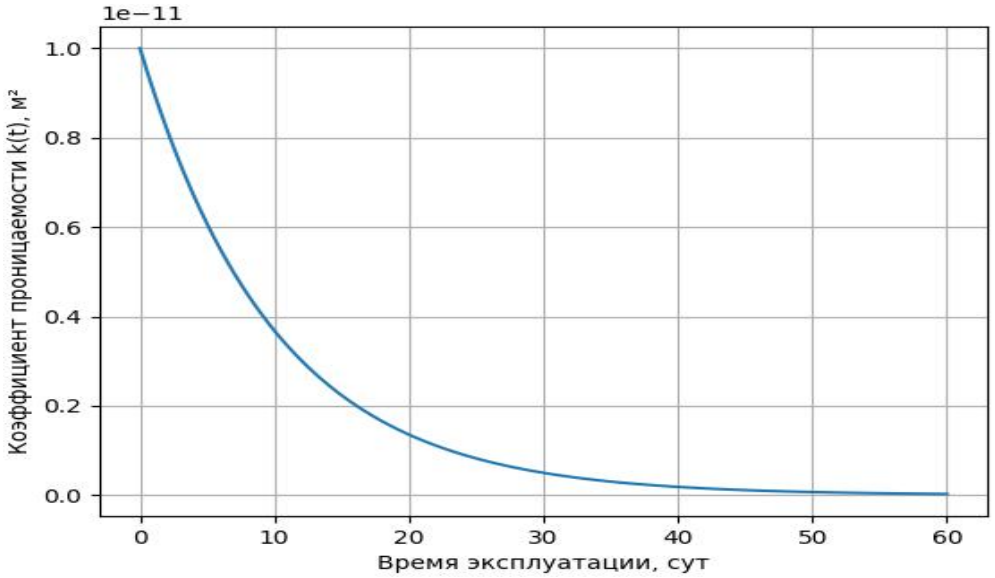


Рис.2. Снижение коэффициента проницаемости прифильтровой зоны во времени в условиях кольматации

Из графика (рис. 2) видно, что наиболее интенсивное снижение проницаемости наблюдается в начальный период эксплуатации, что соответствует стадии активного формирования кольматирующих отложений.

По мере увеличения времени темп снижения проницаемости уменьшается, что связано с частичной стабилизацией структуры порового пространства и ограничением дальнейшего накопления загрязняющих компонентов.

Полученная зависимость хорошо согласуется с экспериментальными данными по эксплуатации скважин подземного выщелачивания в условиях рыхлых песчаных коллекторов.

2.3. Химические процессы кольматации

Для химической кольматации характерно образование малорастворимых соединений в поровом пространстве прифильтровой зоны. В качестве типовых реакций осадкообразования можно выделить:

$$Ca^{2+}+CO_3^{2-}\rightarrow CaCO_3\downarrow, \quad (5)$$

$$4Fe^{2+}+O_2+6H_2O\rightarrow 4Fe(OH)_3\downarrow, \quad (6)$$

Данные процессы приводят к цементации пор, снижению эффективной проницаемости и увеличению гидравлического сопротивления фильтрационной зоны.

3. Результаты и обсуждение

При сравнении методов восстановления использованы следующие критерии: радиус эффективного воздействия, совместимость с типом фильтра, возможность многократного применения, производственная безопасность и длительность сохранения эффекта.

На рисунках 3 и 4 представлены зависимости изменения дебита скважины и коэффициента проницаемости во времени при прогрессирующей кольматации.

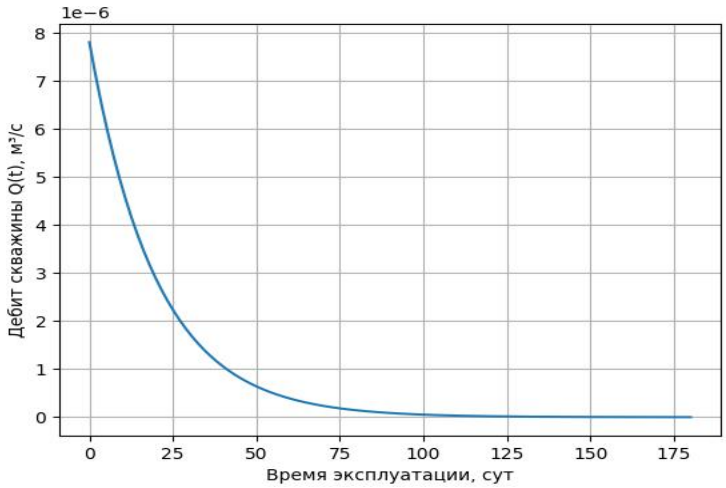


Рис. 3. Снижение дебита скважины при прогрессирующей кольматации

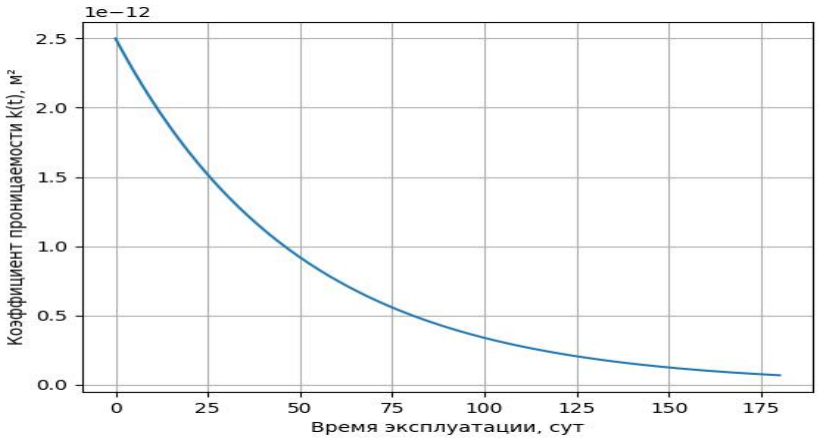


Рис. 4. Снижение коэффициента проницаемости прифильтровой зоны во времени

Анализ представленных зависимостей показывает, что снижение дебита и проницаемости носит экспоненциальный характер, что согласуется с принятыми математическими моделями (уравнения (3)–(4)).

На начальном этапе эксплуатации наблюдается наиболее интенсивное снижение параметров, обусловленное активным формированием кольматирующих отложений. В дальнейшем процесс замедляется, что связано с частичной стабилизацией структуры порового пространства.

Проведенный анализ показал, что механическая кольматация, как правило, инициируется несоответствием гранулометрического состава коллектора параметрам фильтра, а также недостаточной очисткой скважины после бурения.

Наиболее характерными являются: поступление шлама; формирование глинистой корки; миграция мелкодисперсных частиц; уплотнение порового пространства [4–8].

В этом случае снижение проницаемости происходит интенсивно и сопровождается увеличением остаточного гидравлического сопротивления.

Химическая кольматация формируется при нарушении равновесия в системе «пластовая вода – выщелачивающий раствор – минералы коллектора». Осаждение карбонатов кальция и магния, гидроксидов железа, а также сульфидных и силикатных соединений приводит к цементации пор и снижению фильтрационной способности [8].

Биологическая кольматация усиливает указанные процессы за счет образования биопленок и биогенных осадков, особенно при наличии железобактерий и аэрации среды [9].

Для оценки эффективности различных технологий восстановления проницаемости проведено их сопоставление по ключевым инженерным параметрам (табл. 1).

Таблица 1

Метод	Источник энергии	Радиус воздействия, м	Совместимость с фильтром	Типичный эффект
Взрыв ВВ	заряд малой мощности	до 0,8	металл	максимальное разрушение плотных отложений
Электровзрыв	разряд в водной среде	0,2–0,4	ПЭ, ПВХ, металл	гибкое регулируемое воздействие
Пневмовзрыв	сжатый воздух	0,3–0,6	ПЭ, ПВХ, металл	гидроудар без ВВ
Газовая детонация	ацетилено-воздушная смесь	до 0,5	ПЭ, ПВХ, металл	мягкая ударная волна

Сравнительный анализ (рис. 5) показывает, что максимальный радиус воздействия характерен для взрыва малых зарядов ВВ. Однако данный метод предъявляет повышенные требования к прочности фильтра и промышленной безопасности [19].

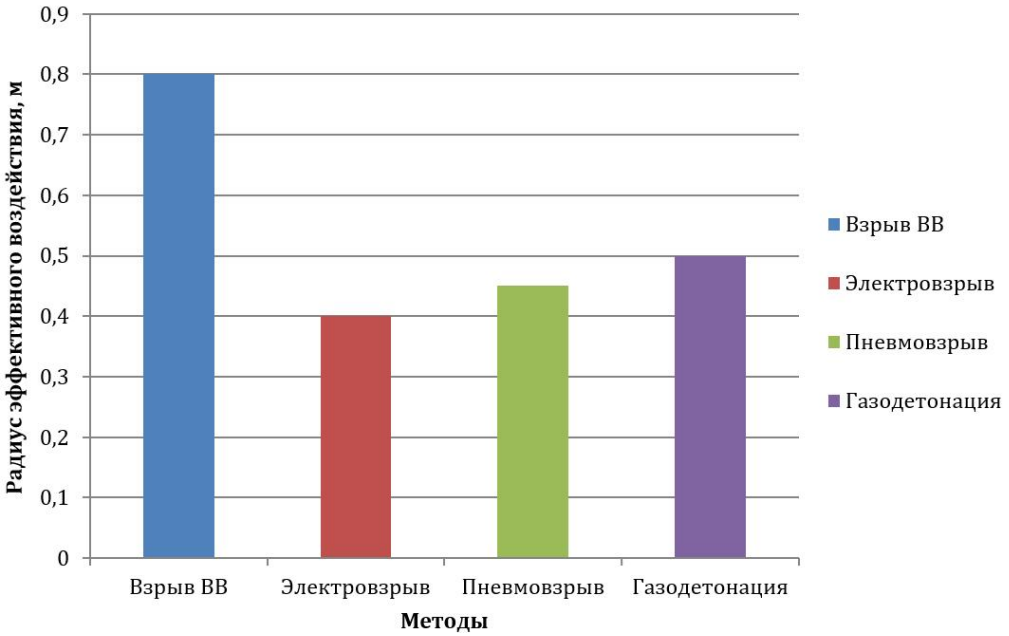


Рис. 5. Сравнение импульсных методов восстановления по радиусу эффективного воздействия

Электровзрывной метод уступает по радиусу воздействия, но обладает высокой управляемостью и может эффективно применяться в скважинах с пластиковыми фильтрами [13–16].

Пневмоимпульсные и газодетонационные методы занимают промежуточное положение, обеспечивая баланс между эффективностью и безопасностью воздействия [15].



Рис. 6. Последовательность диагностики и восстановления фильтровой зоны технологической скважины

На основании анализа процессов кольматации и сравнительной оценки эффективности импульсных методов предложена последовательность инженерных действий по восстановлению проницаемости прифильтровой зоны.

Алгоритм включает этапы диагностики, выбора метода воздействия, проведения импульсной обработки, удаления кольматанта и контроля гидродинамических параметров.

Такой подход позволяет повысить эффективность регенерации скважин и обеспечить устойчивость достигнутого эффекта во времени.

С инженерной точки зрения выбор метода не должен основываться исключительно на максимальной энергии импульса.

Ключевыми факторами являются: тип фильтра (металл / пластик); степень кольматации; глубина воздействия; допустимый уровень динамических нагрузок.

При преобладании рыхлых механических и биогенных отложений рационально применение электровзрывных и пневмоимпульсных методов.

Для плотных химических осадков целесообразно использование комбинированных технологий (импульс + кислотная обработка) [9,10].

По обобщенным данным натурных испытаний наиболее высокий абсолютный радиус воздействия характерен для взрыва малых зарядов ВВ. Однако именно этот метод предъявляет наиболее жесткие требования к прочности фильтра и к промышленной безопасности [19]. Электровзрывной метод уступает по радиусу действия, но выигрывает по управляемости импульса и по возможности работы в

скважинах с пластиковыми фильтрами [13–16]. Пневмовзрыв и газодетонационные схемы занимают промежуточное положение, сочетая достаточную эффективность с приемлемым риском повреждения фильтра [15].

С инженерной точки зрения выбор метода не должен основываться только на максимальной энергии импульса. Для слабоцементированных песков и пластиковых фильтров решающим становится отношение между необходимой глубиной декольматации и допустимым уровнем динамического воздействия на конструкцию скважины. При преобладании рыхлых механических и биогенных отложений рационально использовать электровзрывные и пневмоимпульсные схемы. При наличии более плотных химически стойких осадков может потребоваться комбинирование импульсной обработки с кислотной или реагентной стадией [9,10].

Полученные результаты подтверждают, что устойчивый эффект регенерации определяется не только амплитудой первой ударной волны, но и полнотой удаления разрушенного кольматанта из зоны фильтра. Поэтому после импульсного воздействия обязательны промывка, откачка и контроль восстановления гидродинамических показателей. Для эксплуатационной практики ПВ это особенно важно, поскольку кратковременный прирост дебита без удаления продуктов разрушения может быстро смениться вторичным засорением.

На основе анализа процессов кольматации и результатов моделирования и экспериментальных исследований сформулированы следующие основные выводы:

– Установлено, что снижение производительности технологических скважин обусловлено совмещенным действием механической, химической и биологической кольматации фильтра и прифильтровой зоны.

– Для описания деградации фильтрационных свойств целесообразно использовать сочетание уравнения Дарси и экспоненциальной зависимости изменения проницаемости во времени.

– Наибольший радиус эффективного воздействия обеспечивает взрыв ВВ, однако его применение ограничено материалом фильтра и требованиями безопасности.

– Наиболее универсальным способом регенерации ПВ-скважин с пластиковыми фильтрами является электровзрывной метод, тогда как пневмовзрыв и газовая детонация эффективны как малоинерционные и технологически гибкие решения.

– Для повышения надежности результата импульсную обработку следует рассматривать как элемент комплексного цикла: диагностика – выбор метода – воздействие – удаление кольматанта – контроль дебита.

Библиографический список:

1. Арутюнян А.С., Трофимов А.В. Подземное выщелачивание урана: основы теории и практики. – М.: Недра, 2019. – 312 с.
2. Дуллен Ф. Пористые среды: транспортные свойства. – М.: Мир, 1992. – 560 с.
3. Кадыров К.М., Махкамов Б.А. Технологические основы подземного выщелачивания урана. – Ташкент: Фан, 2019. – 182 с.
4. Иванов П.А. Проблемы кольматации фильтров при СПВ // Гидрогеология и инженерная геология. – 2018. – № 2. – С. 45–52.
5. Смирнов В.В., Карташев Ю.М. Технологии восстановления проницаемости фильтров // Разработка подземных месторождений. – 2016. – № 4. – С. 88–94.
6. Назаров Д.Х., Мустафаев Ш.Х. Особенности взаимодействия фильтра и прифильтровой зоны // Вестник горной науки. – 2020. – № 3. – С. 59–67.
7. Байжанов А.С. Механическая кольматация и методы её устранения // Геотехнологии. – 2019. – № 1. – С. 72–77.

8. Артыков Ж.Н. Химическая кольматация при выщелачивании урана // Технология и техника добычи полезных ископаемых. – 2021. – № 2. – С. 33–39.
9. Горшков А.И. Микробиологические процессы в геотехнологических системах. – Новосибирск: СО РАН, 2015. – 248 с.
10. МАГАТЭ. Manual of Acid In Situ Leach Uranium Mining Technology. – Vienna: IAEA, 2001. – 175 p.
11. Кучеренко В.В., Казаков Н.Г. Импульсные методы интенсификации ПВ-скважин // Вестник гидрогеологии. – 2021. – № 3. – С. 45–52.
12. Tikhonov A., Rudenko S. Shock-wave impact on uranium-bearing aquifers // Journal of Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 197. – Article 104579.
13. Egorov S.N., Kravchenko M.Y. Кавитационные эффекты при электровзрывной очистке скважин // Вестник горной науки. – 2022. – № 2. – С. 91–99.
14. Отчёт ОАО «Навоийский горно-металлургический комбинат». Результаты натурных испытаний по восстановлению производительности ПВ-скважин методом электровзрывного импульса. – ЦНИЛ, 2022. – 18 с.
15. Третьяков В.А. Пневмоимпульсные методы очистки фильтровых скважин. – М.: Недра, 2012. – 128 с.
16. Отчёт ЦНИЛ НГМК. Испытания пневмовзрывных установок на месторождении Майлы. – Навои, 2022.
17. Отчёт ОАО «Навоийский горно-металлургический комбинат». Испытания газодетонационного метода восстановления скважин. – ЦНИЛ, 2022. – 17 с.
18. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. – М.: Физматлит, 2017. – 408 с.
19. Мамилов В.А. Петров Р.П., Водолазов Л.И. и др. Добычи урана методом подземного выщелачивания. - Москва: Атомиздат, 1980. – с. 99-102.
20. Ivanov A.A. Acid leaching techniques for carbonate removal in ISL uranium mining // Hydrometallurgy. – 2020. – Vol. 195. – P. 105–112.
21. Шукуров А.Н. Парокислотные технологии в ПВ // Материалы конференции «Уран–2022». – Ташкент, 2022. – С. 119–123.