

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

Иванов А.Г.¹, Арсентьев Ю.А.², Насонов Д.А.³, Алимов Н.С.⁴

¹АО «ВНИПИпромтехнологии», Москва;

²Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва;

³ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова», Москва;

⁴ООО «Геотехконсалтинг», Москва

Ключевые слова: технологические скважины, кольматация, фильтр, прифильтровая зона, механическая импульсная обработка, устройство разрушения кольматанта.

Аннотация. Добыча урана способом скважинного подземного выщелачивания требует применения специальных методов освоения и поддержания проектной производительности технологических скважин. Функционирование скважин сопровождается механической, химической или газовой кольматацией фильтров и прифильтровых зон, что снижает их дебит. Применяются различные методы удаления кольматанта, среди которых выделяется механическая импульсная обработка дисковым гидровибратором. В качестве устройства, воспроизводящего импульсную нагрузку необходимую для создания условий разрушения кольматанта в прифильтровой зоне технологической скважины, предлагается использовать дисковый гидровибратор устройства разрушения кольматанта. В работе определены оптимальные технические характеристики устройства разрушения кольматанта в режиме «вибрация». Установлены зависимости между расходом рабочего агента (10 л/с), перепадом давления (1,5 МПа), частотой колебаний, энергией удара и эффективностью декольматации. Показано, что конструкция с тремя дисками диаметром 70 мм при частоте 43,3 Гц, амплитуде 10 мм и энергии удара 346,3 Дж обеспечивает эффективную очистку. Радиус воздействия импульса составляет 141 мм, глубина проникновения – 14 мм. Испытания подтвердили преимущество гидроимпульсной обработки: повышение добычи в 2-4 раза и сокращение ремонтно-восстановительных работ. Результаты применимы при проектировании оборудования для урановых месторождений.

DETERMINATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE DEVICE FOR HYDROPULSE TREATMENT OF FILTERS AND FILTER ZONES OF PROCESS WELLS

Ivanov A.G.¹, Arsentiev Yu.A.², Nasonov D.A.³, Alimov N.S.⁴

¹JSC "VNIPIpromtekhnologii", Moscow;

²Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow;

³LLC "Center for Marine Research of the Lomonosov Moscow State University", Moscow;

⁴LLC "Geotechconsulting", Moscow

Keywords: process wells, colmatation, filter, filter zone, mechanical pulse treatment, colmatant destruction device.

Abstract. Uranium mining by the in-situ leaching method requires the application of specialized techniques for well development and maintenance of the design productivity of process wells. Well operation is accompanied by mechanical, chemical, or gas colmatation (clogging) of filters and near-filter zones, which reduces their flow rate. Various methods of colmatant removal are employed, among which mechanical pulse treatment using a disc-type hydrovibrator stands out. As a device generating the pulse load necessary for creating conditions for colmatant destruction in the near-filter zone of a process well, a disc-type hydrovibrator integrated into a colmatant destruction device is proposed. This study determines the optimal technical characteristics of the CRC operating in "vibration" mode. Relationships between the working fluid flow rate (10 L/s), pressure drop (1.5 MPa), vibration frequency, impact energy, and declogging efficiency have been established. It is shown that a configuration with three discs of 70 mm diameter, operating at a frequency of 43.3 Hz, amplitude of 10 mm, and impact energy of 346.3 J, ensures effective cleaning of the filter and near-filter zone. The pulse impact radius is 141 mm, with a penetration depth of 14 mm. Field tests confirmed the advantages of hydroimpulse treatment: a 2-4-fold increase in production and a significant reduction in repair and restoration work. The results are applicable to the design of equipment for uranium deposit development.

Введение

Процессы сооружения и эксплуатации технологических скважин подземного выщелачивания (СПВ) урана сопровождаются снижением проницаемости фильтров и прифильтровых зон (ПФЗ).

В процессе сооружения технологических скважин вскрытие продуктивного водоносного горизонта с применением различных видов очистных агентов приводит к коьматации прифильтровой зоны как частицами выбуриваемого шлама, так и твердой фазой промывочного агента. В подавляющих случаях в продуктивный горизонт проникает глинистый раствор, а на стенках образуется глинистая корка [1-3].

В процессе эксплуатации происходит снижение производительности откачных и приемистости нагнетательных скважин. Основной причиной является коьматация как порового пространства продуктивного горизонта и ПФЗ скважин, так и внутренней и наружной поверхности фильтров, а также отверстий фильтра (диски, щели и пр.).

Материалы и методы

Авторами предлагается приведенная в таблице 1 классификация видов коьматации фильтров и ПФЗ технологических скважин СПВ урана.

Табл. 1. Классификация видов коьматации фильтров и ПФЗ технологических скважин СПВ урана

Стадия формирования	Вид коьматации	Примечание
1. Сооружение скважин	Механическая	
	1.2. Газовая	
2. Эксплуатация скважин	2.1. Механическая	
	2.2. Газовая	
	2.3. Химическая	1. Обратимая. 2. Необратимая. 3. Коьматация фильтра. 4. Коьматация ПФЗ.
	2.4. Ионообменная	
	2.5. Биологическая	

Вибрационная обработка фильтров и ПФЗ технологических скважин заключается в генерировании высокочастотной знакопеременной нагрузки, необходимой для разрушения коьматанта в отдельных интервалах фильтра и прифильтровой зоны. График изменения нагрузки во времени приведен на рис. 1.

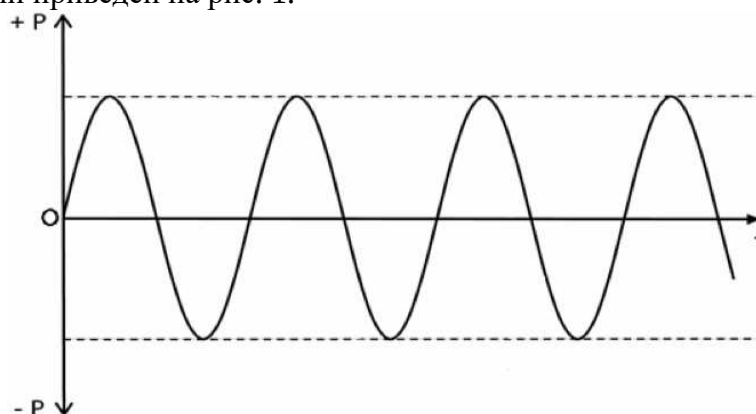


Рис. 1. График изменения давления гидроимпульсов внутрипластовой жидкости, создаваемых в прифильтровой зоне скважин подземного выщелачивания при обработке устройства разрушения коьматанта

В настоящее время существуют различные способы декоьматации скважин, но наиболее универсальным, по нашему мнению, является механическая импульсная обработка.

Как видно из графика (рис. 1), вибрационные колебания пластовой жидкости в ПФЗ сопровождаются одинаковыми по величине гидроимпульсами как в направлении – «от оси фильтра в водоносный горизонт», так и в обратном направлении – «от водоносного горизонта к оси фильтра».

В качестве устройства, воспроизводящего импульсную нагрузку необходимую для создания условий разрушения коьматанта в прифильтровой зоне технологической скважины, предлагается использовать дисковый гидровибратор устройства разрушения коьматанта (УРК) (рис. 2), конструкцию которого предложили сотрудники кафедры механики и инженерной графики им. Б.М. Ребрика геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе. Устройство действует на принципах механической импульсной обработки фильтров и прифильтровых зон водозаборных и технологических скважин. Приведенная конструкция позволяет устанавливать два и более дисков, создающих вибрационное воздействие на коьматант как фильтра, так и прифильтровой зоны. Количество дисков и расстояние между ними определяется длиной фильтра.

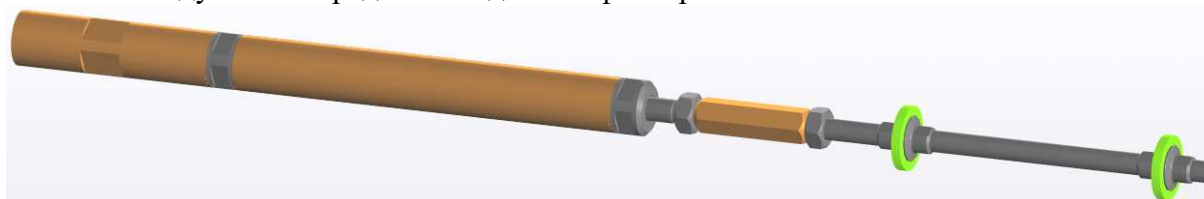


Рис. 2. Модель устройства разрушения коьматанта УРК

Его спускают в прифильтровую зону на бурильных трубах или шланге высокого давления типа ШАПП-50, по которому к рабочему органу вибратора от насосного агрегата самоходной буровой установки УРБ-2А-2, обеспечивающего требуемые расход Q и перепад давления ΔP , подается рабочий агент (техническая вода или растворы реагентов) [4-6].

Для расчета параметров дискового гидровибратора используются зависимости, связывающие полную гидравлическую мощность потока рабочего агента с механическими характеристиками колебаний данного устройства.

Поэтому первоначально определяется полная гидравлическая мощность потока рабочего агента как произведение расхода агента на перепад давления по формуле вида:

$$N_r = Q \cdot \Delta P, \quad (1)$$

где N_r – полная гидравлическая мощность потока рабочего агента, Вт; Q – расход рабочего агента, м³/с; ΔP – перепад давления потока рабочего агента, Па.

Одной из основных механических характеристик работы УРК является частота колебаний рабочего органа вибратора (штока с размещенными на нем рабочими дисками). Ее оптимальное значение должно находиться в диапазоне значений резонансных частот, характерных для большинства песчаных водоносных горизонтов (30-50 Гц), что будет способствовать «встряхиванию» ПФЗ и интенсивному механическому измельчению (истиранию) песчаных и глинистых коьматантов, превращающихся в мелкодисперсную взвесь, для последующего ее выноса из скважины эрлифтной прокачкой.

Для определения частоты колебаний f (Гц) рабочих дисков гидровибратора воспользуемся формулой:

$$f = Q / V_{\text{цикл}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{цикл}}$ – суммарный объем рабочего агента, вытесняемый рабочими дисками за один цикл (одно колебание), м³.

При этом суммарный объем рабочего агента за цикл будет равен:

$$V_{\text{цикл}} = S_{\text{сум}} \cdot 2A, \quad (3)$$

где $S_{\text{сум}}$ – суммарная площадь рабочих дисков, м²; A – амплитуда колебания, м.

После подстановки результата, полученного по формуле (3), в выражение (2), имеем

$$f = Q / (S_{\text{сум}} \cdot 2A) \quad (4)$$

$$\text{или} \quad f = Q / (n \cdot S_d \cdot 2A), \quad (5)$$

где S_d – площадь одного диска, м^2 ; n – количество дисков, установленных на штоке, шт.

Еще один параметр, влияющий на эффективность процесса декольматации ПФЗ и функционально связанный с частотой колебаний f рабочего органа УРК – это энергия единичного удара E за цикл, поскольку именно ее величина определяет способность импульса давления рабочего агента перемещать твердую частицу из поры водоносного горизонта во внутреннюю полость эксплуатационной колонны и обратно, обеспечивая условия для механического истирания частиц кольматанта.

Для определения энергии единичного удара за цикл воспользуемся выражением вида:

$$E = N / f = Q \cdot \Delta P / f, \text{ Дж.} \quad (6)$$

Принимая во внимание, вышеуказанные формулы (2)-(6) и конкретные значения расхода рабочего агента $Q = 10 \text{ л/с} = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ и перепада давления $\Delta P = 1,5 \text{ МПа} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$, создаваемые насосным агрегатом, а также амплитуду колебаний $A = 0,02 \text{ м}$; $0,015 \text{ м}$; $0,01 \text{ м}$ и диаметр рабочего диска $d = 0,07 \text{ м}$; $0,1 \text{ м}$ определим величину механических характеристик колебательного процесса гидровибратора в виде частоты колебаний f и энергии удара E за цикл, а результаты расчета разместим в сводной таблице 2.

Табл. 2. Механические характеристики устройства разрушения кольматанта УРК (расход рабочего агента $Q = 10 \text{ л/с}$, перепад давления $\Delta P = 1,5 \text{ МПа}$)

Кол-во дисков n , шт.	Суммарная площадь дисков $S_{\text{сум}}$, м ²	Амплитуда колебаний A , м					
		0,02	0,015	0,01	0,02	0,015	0,01
		Частота колебаний f , Гц			Энергия удара E , Дж		
Диаметр диска, $d = 0,07$ м							
1	0,003848	63,7	84,93	127,39	235,48	176,6	117,75
2	0,0077	31,85	42,47	63,70	470,95	355,2	235,48
3	0,0115	21,23	28,31	43,30	706,55	529,85	346,3
4	0,0154	15,93	21,23	31,85	941,62	706,55	470,95
Диаметр диска, $d = 0,1$ м							
1	0,00785	129,87	173,16	259,74	115,5	86,62	57,75
2	0,0157	64,94	86,58	129,87	230,98	173,25	115,5
3	0,0236	43,11	57,47	86,21	347,95	275,38	173,99
4	0,0314	32,47	43,29	64,94	461,96	346,5	230,98

Анализ сведений, приведенных в таблице, показывает, что при фиксированных значениях расхода Q рабочего агента и перепада давления ΔP потока с увеличением количества рабочих дисков наблюдается следующее:

- амплитуда колебаний уменьшается при сохранении частоты колебаний;
- частота колебаний снижается при сохранении амплитуды колебаний;
- инертность гидроимпульсной системы возрастает;
- падение частоты колебаний (менее 25 Гц) определяет момент перехода вибратора из режима «вибрации» к менее эффективному для декольматации фильтра и ПФЗ режиму «толчков»;
- энергия удара увеличивается пропорционально количеству дисков.

Опираясь на известный интервал численных значений частоты колебаний рабочих дисков, соответствующих работе гидровибратора (УРК) в режиме «вибрация» $100 \text{ Гц} > f > 25 \text{ Гц}$, для дальнейшего расчета остановимся на конструкции, в состав которой входит три ($n = 3$) параллельно расположенных на штоке рабочих диска диаметром $d = 0,07 \text{ м}$ (70 мм), совершающих колебания с частотой $f = 43,3 \text{ Гц}$ (золотая середина режима «вибрация»), амплитудой $A = 0,01 \text{ м}$ (10 мм) и энергией удара за цикл $E = 346,3 \text{ Дж}$.

При указанных значениях механических характеристик обеспечивается создание динамического воздействия на породы водоносного горизонта, которое эффективно раскачивает частицы кольматанта, способствуя очистке фильтра и ПФЗ [7, 8].

Для определения радиуса воздействия импульса $R_{имв}$ рабочего агента на породы продуктивного горизонта, с учетом геометрических размеров типовой технологической скважины радиусом R_c , можно воспользоваться формулой энергетического баланса вида:

$$R_{имв} = \left(\frac{E}{\pi \cdot m \cdot P_{сд} \cdot h} + R_c^2 \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где R_c – радиус ствола технологической скважины, м (0,127 м); m – пористость песчаного продуктивного горизонта ($m = 0,3$); $P_{сд}$ – давление сдвига для песчаных горизонтов, Па ($P_{сд} = 100000$ Па); h – мощность интервала обработки, м ($h = 1$ м); E – энергия удара за цикл, Дж ($E = 346,3$ Дж).

После подстановки значений указанных параметров, составляющих формулу (7), получим:

$$R_{имв} = \left(\frac{346,3}{\pi \cdot 0,3 \cdot 100000 \cdot 1} + 0,01613 \right)^{1/2} = 0,14075 \text{ м} = 141 \text{ мм}.$$

Таким образом, глубина проникновения рабочего агента в продуктивный горизонт для типовой технологической скважины составит $L_{имв} = R_{имв} - R_c = 141 - 127 = 14$ мм, что вполне достаточно для активного воздействия и разрушения структуры коьматанта (рис. 3).

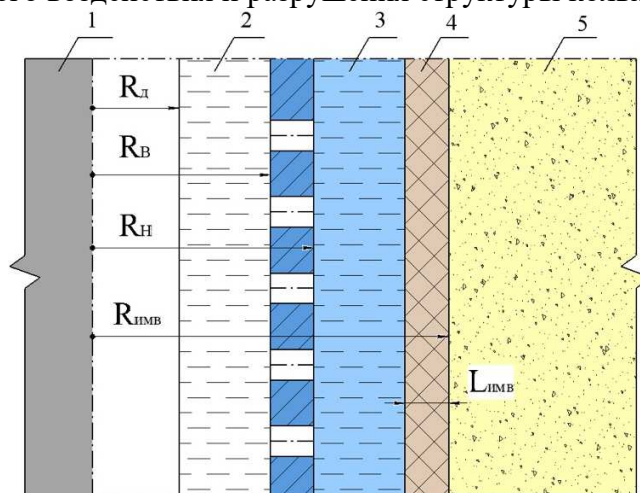


Рис. 3. Схема и геометрические параметры проникновения рабочего агента в песчаный водоносный горизонт при вибрационной очистке ПФЗ от коьматанта: 1 – рабочий диск вибратора; 2 – рабочий агент (техническая вода); 3 – перфорированный участок эксплуатационной колонны; 4 – коьматант; 5 – песчаный водоносный горизонт; R_d – радиус корпуса диска, мм; R_v , R_n – внутренний и наружный радиус обсадной колонны соответственно, мм; $R_{имв}$ – радиус воздействия импульсной нагрузки, мм; L – глубина проникновения рабочего агента в пласт, мм

Затем определяется средний диаметр внутреннего канала корпуса вибратора d_v , необходимого для прохождения потока рабочего агента.

Теоретическая скорость потока V_m рабочего агента плотностью ρ , которую обеспечивает заданный перепад давления ΔP , определяется по формуле Бернулли:

$$V_T = (2 \cdot \Delta P / \rho)^{1/2}, \quad (8)$$

где $\Delta P = 1,5 \cdot 10^6$ Па; $\rho = 1000$ кг/м³ (техническая вода).

$$V_T = (2 \cdot 1,5 \cdot 10^6 / 1000)^{1/2} = 54,77 \text{ м/с}.$$

Находим среднюю площадь сечения S_v внутреннего канала корпуса вибратора с учетом коэффициента расхода μ , который для внутренних каналов сложной конфигурации принимается равным $\mu = 0,75$. Это значит, что реальный расход рабочего агента меньше теоретического из-за сужения струи и трения, поэтому формула расхода имеет вид:

$$Q = \mu \cdot S_v \cdot V_T, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (9)$$

Откуда

$$S_v = Q / (\mu V_T). \quad (10)$$

В числовом выражении имеем:

$$S_g = 0,01 / 0,75 \cdot 54,77 = 0,000243 \text{ м}^2.$$

С учетом того, что средняя площадь внутреннего канала корпуса есть $S_g = \pi d_g^2 / 4$, то искомый средний диаметр внутреннего канала корпуса вибратора будет равен:

$$d_g = (4 \cdot S_g / \pi)^{1/2} = (4 \cdot 0,000243 / \pi)^{1/2} = 0,0176 \text{ м} = 17,6 \text{ мм}.$$

Для оценки эффективности геометрии внутреннего канала корпуса вибратора найдем безразмерную величину коэффициента гидравлического сопротивления ξ .

Для этого воспользуемся формулой Вейсбаха, которая связывает потерю давления со скоростным напором рабочего агента:

$$\xi = 2 \cdot \Delta P / (\rho \cdot V^2), \quad (11)$$

где V – средняя скорость потока рабочего агента, м/с.

Средняя скорость потока агента будет равна:

$$V = Q / S_g = 0,01 / 0,000243 = 41,15 \text{ м/с}.$$

С учетом полученного результата и формулы (11) имеем:

$$\xi = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^6 / 1000 \cdot (41,15)^2 = 1,77.$$

Полученное значение коэффициента $\xi = 1,77 < 2$ свидетельствует о наличии умеренных местных сопротивлений внутри устройства.

При этом необходимая гидравлическая мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления в канале, должна быть равна:

$$N_r = Q \cdot \xi \cdot \rho V^2 / 2, \quad (12)$$

$$N_r = 0,01 \cdot 1,77 \cdot 1000 \cdot (41,15)^2 / 2 = 15000 \text{ Вт} = 15 \text{ кВт}.$$

Для расчета КПД (η) необходимо соотнести полезную мощность N_k , идущую на генерацию колебаний с полной гидравлической мощностью N_r .

Полезная мощность N_k (кВт) вибратора определяется как работа (энергия удара E), совершаемая за единицу времени (с учетом частоты):

$$N_k = E \cdot f, \quad (13)$$

где $E = 346,3 \text{ Дж}$; $f = 43,3 \text{ Гц}$.

$$N_k = 346,3 \cdot 43,3 = 14,9 \text{ кВт}.$$

КПД будет равен:

$$\eta = \eta_n \cdot \eta_m = \eta_n \cdot N_k / N_r = 0,85 \cdot 14,9 / 15 = 0,84,$$

где η_n – КПД, учитывающий потери мощности на утечках рабочего агента; η_m – КПД, учитывающий механические потери мощности.

Результаты

Испытания аналога устройства проводились на объектах одной из производственных организаций. Графики результатов испытаний и сравнение эффективности применения УРК и пневмоимпульсной обработки приведены на рисунке 4.

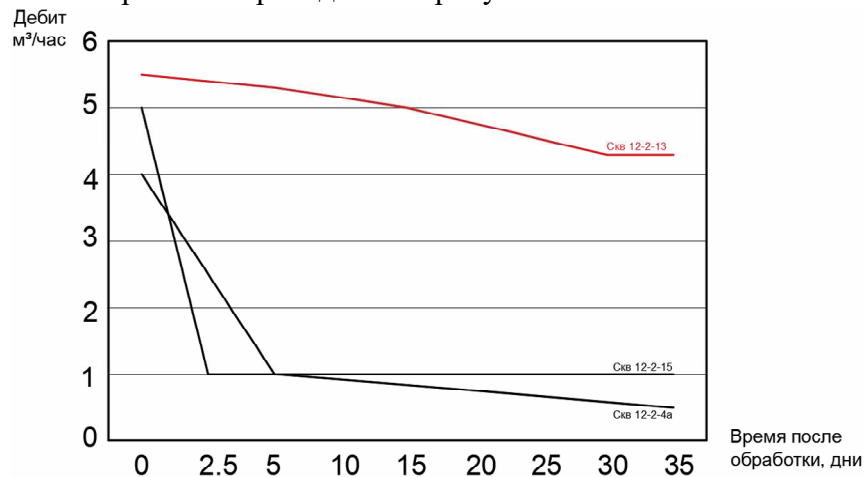


Рис. 4. Снижение производительности скважин 12-2-13 (обработана УРК), 12-2-15 и 12-2-4а (обработка пневмоимпульсной установкой)

Приведенные результаты однозначно свидетельствуют о преимуществе гидроимпульсной обработки фильтров и прифильтровых зон по сравнению с пневмоимпульсной обработкой. Последняя эффективна только при ее применении для разрушения продуктов химической кольтматации с последующим удалением их эрлифтной прокачкой или промывкой. После проведения испытаний опытное устройство использовалось несколько лет и показало лучшие результаты по сравнению с другими способами поддержания производительности технологических скважин.

Выводы

1. Правильный выбор вида механической импульсной обработки является гарантией получения высокого экономического эффекта по каждой скважине с учетом типа кольтматации фильтра и прифильтровой зоны.

2. При равных начальных условиях применение гидровибратора для разрушения кольтматанта позволяет в 2-4 раза повысить объем добычи полезного продукта.

3. Проведение механической импульсной обработки фильтров и ПФЗ с помощью гидровибратора позволяет сократить в десятки раз число РВР, необходимых для поддержания проектного значения производительности технологических скважин.

Заключение

Промышленные испытания подтвердили преимущество гидроимпульсной обработки перед пневмоимпульсной: применение разработанного устройства позволяет повысить дебит скважин в 2-4 раза и существенно сократить объёмы ремонтно-восстановительных работ. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации оборудования для поддержания производительности технологических скважин на урановых месторождениях, разрабатываемых методом подземного выщелачивания.

Благодарности и финансирование

Исследование выполнено без привлечения внешних источников финансирования. Авторы благодарят сотрудников АО «ВНИПИпромтехнологии» за содействие в проведении испытаний.

Список литературы

1. Арсентьев Ю.А., Назаров А.П., Забайкин Ю.В., Иванов А.Г. О расчете эксплуатационных колонн из полимерных материалов для условий многолетнемерздых пород // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: российский и зарубежный опыт. – 2019. – №21. – С. 27-32.
2. Верчеба А.А., Алёшин А.П. Урановая геология и развитие безуглеродной экономики // Разведка и охрана недр. – 2023. – №2. – С. 59-64.
3. Жукова Д.А. Анализ загрязнения почв и подземных вод // Вестник науки. – 2024. – Т. 2, №12(81). – С. 1859-1866.
4. Чекулаев А.В. Анализ проблемы кольтматации технологических скважин на месторождениях урана, разрабатываемых методом подземного выщелачивания // Успехи современного естествознания. – 2018. – №2. – С. 165-170.
5. Солодов И.Н., Камнев Е.Н. Геотехнология урана (Российский опыт): монография. – М.: «КДУ», «Университетская книга», 2017. – 576 с.
6. Алексеев В.С., Тесля В.Г. Критерии проектирования фильтров водозаборных скважин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – №11. – С. 21-29.
7. Ивашечкин В.В., Шейко А.М. К расчету межремонтных периодов работы скважинных водозаборов с учетом старения скважин // Наука и техника. – 2006. – №5. – С. 5-10.
8. Иванова И.Е., Ивашечкин В.В., Верemenюк В.В. Теоретические исследования процесса выщелачивания кольтматанта в гравийной обсыпке фильтра скважины при использовании установки для реверсивно-реагентной регенерации // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, №1. – С. 80-92. – DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92.
9. Иванов А.Г., Михайлов А.Н., Алексеев Н.А., Иванов Д.А., Арсентьев Ю.А., Соловьев Н.В., Назаров А.П. Ремонтно-восстановительные работы для повышения производительности технологических скважин // Разведка и охрана недр. – 2020. – №6. – С. 52-57.
10. Иванов А.Г., Михайлов А.Н., Алексеев Н.А., Иванов Д.А., Арсентьев Ю.А., Соловьев Н.В., Назаров А.П. Методы и технические средства обработки фильтров и прифильтровых зон технологических скважин // Разведка и охрана недр. – 2020. – №7. – С. 40-43.

11. Прускова Н.Л. Исследование процесса закупоривания проницаемых пород дисперсной фазой различных буровых растворов и разработка очистительных устройств: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1988. – 23 с.

References

1. Arsenyev Yu.A., Nazarov A.P., Zabaykin Yu.V., Ivanov A.G. On the calculation of operating columns made of polymer materials for permafrost conditions // Actual Problems and Prospects for Economic Development: Russian and Foreign Experience. 2019, no. 21, pp. 27-32.
2. Vercheba A.A., Aleshin A.P. Uranium geology and the development of a low-carbon economy // Exploration and Protection of Subsoil. 2023, no. 2, pp. 59-64.
3. Zhukova D.A. Analysis of soil and groundwater pollution // Bulletin of Science. 2024, vol. 2, no. 12(81), pp. 1859-1866.
4. Chekulaev A.V. Analysis of the problem of colmatation of technological wells at uranium deposits developed by in-situ leaching // Advances in Modern Natural Science. 2018, no. 2, pp. 165-170.
5. Solodov I.N., Kamnev E.N. Uranium geotechnology (Russian experience): monograph. – M.: "KDU", "University Book", 2017. – 576 p.
6. Alekseev V.S., Teslya V.G. Design criteria for filters of water supply wells // Water Supply and Sanitary Engineering. 2009, no. 11, pp. 21-29.
7. Ivashechkin V.V., Sheyko A.M. Calculation of overhaul periods of well intake operation in view of wells' deterioration // Science and Technology. 2006, no. 5, pp. 5-10.
8. Ivanova I.E., Ivashechkin V.V., Veremenyuk V.V. Theoretical studies of the leaching process of colmatant in gravel packing of a well filter when using a reverse-reagent regeneration unit // Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 80-92. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92.
9. Ivanov A.G., Mikhailov A.N., Alekseev N.A., Ivanov D.A., Arsenyev Yu.A., Solovyev N.V., Nazarov A.P. Repair and restoration work to enhance productivity of technological wells // Exploration and Protection of Subsoil. 2020, no. 6, pp. 52-57.
10. Ivanov A.G., Mikhailov A.N., Alekseev N.A., Ivanov D.A., Arsenyev Yu.A., Solovyev N.V., Nazarov A.P. Methods and Technical Means of Treatment of Filters and Near-Filter Zones of Technological Wells // Exploration and Protection of Subsoil. 2020, no. 7, pp. 40-43.
11. Pruskova N. L. Study of the clogging process in permeable formations by the dispersed phase of various drilling fluids and development of cleaning devices: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – M., 1988. – 23 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Иванов Александр Георгиевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник	Ivanov Aleksandr Georgievich – candidate of technical sciences, leading researcher
Арсентьев Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры механики и инженерной графики имени Б.М. Ребрика	Arsentyev Yury Aleksandrovich – doctor of technical sciences, professor of the Department of mechanics and engineering graphics named after B.M. Rebrik
Насонов Дмитрий Александрович – заместитель руководителя проектов отдела комплексных инженерных изысканий	Nasonov Dmitry Aleksandrovich – deputy project manager of the Department of integrated engineering surveys
Алимов Никита Сергеевич – геолог arsentev1956@yandex.ru	Alimov Nikita Sergeevich – geologist

Получена 15.05.2026