

УДК 622.227

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-11-23

Обзорная статья

EDN: CCRISO

КОЛЬМАТАЦИЯ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

А.С. Бабкин, А.Г. Иванов¹,
Ю.А. Арсентьев²,
Е.Ю. Мешков¹,
Н.А. Чернобровкин¹,
Д.Д. Орехов², Р.И. Гаврилов²

¹ АО «Ведущий проектно-
изыскательский и научно-
исследовательский институт про-
мышленной технологии», Москва,
Российская Федерация

² Российский Государственный гео-
логоразведочный университет имени
Серго Орджоникидзе – МГРИ, Москва,
Российская Федерация

В статье рассмотрены виды кольматации фильтров и при-
фильтровых зон технологических скважин скважинного
подземного выщелачивания урана. Приведена классифика-
ция видов кольматации на стадиях сооружения и эксплуата-
ции скважин. На основании выполненных работ и анализа
результатов геофизических исследований установлены раз-
меры зон кольматации глинистым раствором песков различ-
ного гранулометрического состава. Рассмотрены различные
варианты работ по декольматации фильтров и прифильтро-
вых зон. Приведены рекомендации по выбору ремонтно-
восстановительных работ.

Ключевые слова: скважинное подземное выщелачивание
урана, технологическая скважина, фильтр, прифильтровая
зона, кольматация, восстановление производительности
скважин

Процессы сооружения и эксплуатации технологи-
ческих скважин скважинного подземного выщелачи-
вания (СПВ) урана сопровождаются снижением про-
ницаемости фильтров и прифильтровых зон (ПФЗ).

В процессе сооружения технологических сква-
жин вскрытие продуктивного водоносного горизонта

Review article

COLMATATION OF FILTERS AND FILTER ZONES OF PROCESS WELLS OF IN-SITU URANIUM LEACHING

A.S. Babkin, A.G. Ivanov¹
Y.A. Arsenyev², E.Yu. Meshkov¹,
N.A. Chernobrovkin¹, D.D. Orekhov²
R.I. Gavrilov²

¹ JSC "LEADING DESIGN, SURVEY AND
RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL
TECHNOLOGY", MOSCOW, RUSSIAN
FEDERATION

² RUSSIAN STATE GEOLOGICAL PROSPECTING
UNIVERSITY NAMED AFTER SERGO
ORDZHONIKIDZE – MGRI, MOSCOW, RUSSIAN
FEDERATION

The article discusses the types of colmatation of filters and filter
zones of process wells of in-situ uranium leaching. The classifi-
cation of types of colmatation at the stages of well construction
and operation is given. On the basis of the work performed and
the analysis of the results of geophysical studies, the sizes of the
zones of colmatation with clayey solution of sands of various
granulometric were established. Various options for working
on the decolmatation of filters and filter zones are considered.
Recommendations are given for choosing the most options for
repair and restoration work.

KEYWORDS: in-situ leaching of uranium, technological well, fil-
ter, filtration zone, colmatation, recovery of well productivity

с применением различных видов очистных агентов
приводит к кольматации прифильтровой зоны как ча-
стицами выбуриваемого шлама, так и твердой фазой
промывочного агента. В подавляющих случаях в про-
дуктивный горизонт проникает глинистый раствор, а
на стенках образуется глинистая корка.

В процессе эксплуатации происходит снижение
производительности откачных и приемистости на-
гнетательных скважин. Основной причиной является
кольматация как порового пространства продуктив-
ного горизонта и ПФЗ скважин, так и внутренней и

© А.С. Бабкин, А.Г. Иванов, Ю.А. Арсентьев, Е.Ю. Меш-
ков, Н.А. Чернобровкин, Д.Д. Орехов, Р.И. Гаврилов
Поступила в редакцию 05.04.2025

наружной поверхности фильтров, а также отверстий фильтра (диски, щели и пр.).

Авторами предлагается приведенная в табл. 1 классификация видов кольматации фильтров и ПФЗ технологических скважин СПВ урана.

1. ВИДЫ КОЛЬМАТАЦИИ ПРИ СООРУЖЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН.

1.1. Механическая кольматация представляет собой блокирование порового пространства песков продуктивного горизонта проникновением в него промывочного (глинистого) раствора на основе бентонитовых глин и образованием глинистой корки на стенках скважины. Степень кольматации определяется глубиной проникновения раствора в продуктивный горизонт и физико-механическими свойствами глинистой корки. Авторами были выполнены работы по определению глубины проникновения глинистого раствора в пески различного гранулометрического состава. Работы выполнялись на установке исследования проницаемости керна УИПК-1М. Исследования проводились с созданием на образец бокового давления (имитатор горного давления), превышающим осевое давление глинистого раствора.

Глинистый раствор, который используют для вскрытия продуктивного водоносного горизонта, обогащается частицами разбурываемых пород, в т.ч. пе-

сков, и контактируя после этого со стенками скважины в интервале водоносного горизонта, кольматирует пески в том числе и частицами содержащихся в нем пород горизонта. Таким образом, твердая фаза (шлам в виде зерен песка) блокирует поровое пространство в породах вскрываемого горизонта, уменьшая при этом глубину проникновения глинистого раствора в породу. Изучение этого вопроса является важным с точки зрения выбора наиболее эффективных методов декольматации прифильтровой зоны на стадии сооружения технологических скважин СПВ урана.

С целью определения глубины проникновения глинистого раствора с различным содержанием твердой фазы (табл. 2) в поры песчаных водоносных горизонтов, представленных крупно-, средне-, мелко- и разнозернистыми песками, были проведены лабораторные работы с использованием 46 образцов керна и установки исследования проницаемости керна (УИПК-1М) (рис. 1).

В качестве твердой фазы в глинистый раствор добавлялся шлам, представляющий собой разрушенные и просеянные образцы крнвового материала. Размер частиц шлама соответствовал размеру зерен песка исследуемого образца керна. Для каждого образца выполнялось не менее 3-х замеров. Высота исследуемых образцов составляла 50 мм. Для предупреждения гидроразрыва образцов и исключения гидропрорыв-

ТАБЛИЦА 1.

Классификация видов кольматации фильтров и ПФЗ технологических скважин СПВ урана

Стадия формирования кольматанта	Вид кольматации	Примечание
1. Сооружение скважин	1.1. Механическая	
	1.2. Газовая	
2. Эксплуатация скважин	2.1. Механическая	
	2.2. Газовая	
	2.3. Химическая	2.3.1. Обратимая 2.3.2. Необратимая 2.3.3. Кольматация фильтра 2.3.4. Кольматация ПФЗ
	2.4. Ионообменная	
	2.5. Биологическая	

ТАБЛИЦА 2.

Параметры глинистого раствора с твердой фазой

Глинистый раствор	Параметры раствора			
	Плотность, г/см ³	Вязкость, С	Водоотдача, см ³ /30 мин	Содержание песка, %
Раствор 1	1,07	31	14	до 3
Раствор 2	1,10	33	21	5
Раствор 3	1,13	33	25	10
Раствор 4	1,17	34	25	20

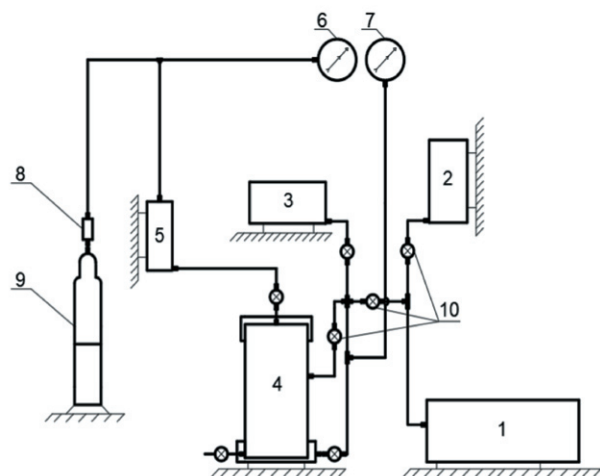


РИС. 1.

Принципиальная схема УИПК: 1 – пресс высокого давления; 2 – емкость для гидравлической жидкости; 3 – пресс ручной; 4 – кернодержатель; 5 – контейнер жидкостной; 6 – манометр давления жидкости; 7 – манометр давления в гидросистеме; 8 – редуктор газовый; 9 – баллон газовый; 10 – вентили запорные

ва глинистого раствора по контакту «кернодержатель – боковая поверхность образца» давление обжата образца превышало давление подачи глинистого раствора на образец при кольматации.

Образцы для экспериментов отбирались из кернового материала, поднятого с глубины 200–220 м, поэтому давление обжата было принято равным 2–2,2 МПа. Для равномерного нагружения торцевых плоскостей исследуемых образцов керна в качестве распределителя потока глинистого раствора использовался перфорированный диск с отверстиями диаметром 3 мм. При проведении экспериментальных работ давление подачи глинистого раствора для кольматации керна составляло 0,5; 1,0; 2,0 МПа.

Результаты исследований по определению глубины проникновения глинистого раствора с твердой фазой в образцы керна приведены в табл. 3 и на рис. 2.

Снижение проницаемости образца определялось созданием технической водой противодействия на противоположную закольматированную торцевую плоскость образца. При этом давление технической воды было равно давлению глинистого раствора. Давление технической воды поднималось постепенно, при этом фиксировалось давление начала декольматации. Полученные результаты приведены в таблице 4.

Меньшие значения $R_{ндк}$, из приведенных в табл. 4, соответствуют крупнозернистым, а большие – мелкозернистым пескам. Существенного различия в значениях $R_{ндк}$ в зависимости от концентрации твердой фазы в глинистом растворе и давлении кольматации R_k не выявлено, что свидетельствует об определяющем влиянии прочности глинистой корки на поверхности образца на величину давления декольматации. В процессе проведения экспериментов было отмечено следующее. Давление $R_{ндк}$ увеличивалось до 0,25–0,3 МПа ($R_k=1,0$ МПа, $A=25–30\%$) при многократной кольматации образцов глинистым раствором 2, причем перед каждым очередным циклом

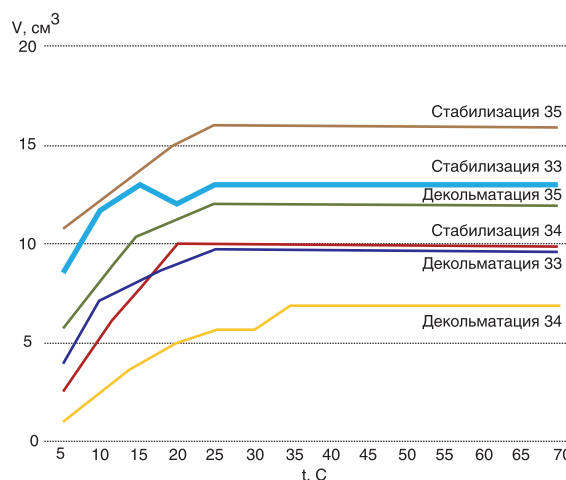


РИС. 2.

Графики кольматации глинистым раствором и декольматации технической водой 3-х образцов, представленных мелкозернистыми песками при давлении 1,0 МПа

ТАБЛИЦА 3.

Глубина проникновения глинистого раствора с твердой фазой

Глинистый раствор	Показатели				
	Глубина проникновения глинистого раствора в образец, мм			Время достижения полной кольматации, минут	Снижение проницаемости после декольматации, %
	Гранулометрический состав песков образцов				
	мелкозернистые	среднезернистые	крупнозернистые		
Раствор1	1–1,5	1,5 – 3	3 – 5	до 1	30 – 50
Раствор 2	1	3	3,5 – 4	до 2	20 – 40
Раствор 3	1	1,5 – 2	3	до 4	10 – 20
Раствор 4	1	1,5 – 2	3	до 8	10

ТАБЛИЦА 4.

Соотношение давления декольматации к давлению кольматации

Давление кольматации P_k , МПа	Давление начала декольматации $P_{ндк}$, МПа	Отношение $A=(P_{ндк}/P_k) \cdot 100\%$
0,5	0,15–0,2	30–40
1,0	0,15–0,2	15–25
2,0	0,2–0,3	10–15

нагружения образца с его поверхности удалялась глинистая корка. Эти результаты близки к результатам, полученным Н.А. Прусовой [10].

Результаты позволяют сделать вывод о том, что при отсутствии условий для гидроразрыва пород, представленных песками различной крупности, глубина проникновения глинистого раствора в водоносный горизонт не превышает 5 мм при условии содержания в глинистом растворе твердой фазы в количестве не менее 3%. Доказательством того, что ускоренная (до 8 минут) кольматация пор водоносного горизонта происходит за счет системы «глинистый раствор + твердая фаза» подтверждается результатами кольматации образцов глинистым раствором без добавок твердой фазы. Результаты измерения продолжительности кольматации в зависимости от состава глинистого раствора показаны в табл. 5 и на рис. 3.

Полученные при исследованиях результаты по кольматации водоносных горизонтов, представленных песками различной крупности, глинистым раствором, содержащим твердофазную добавку, могут быть использованы как для разработки технологических материалов по освоению скважин различного назначения (водозаборных, технологических), так и для проведения ликвидационных работ на скважинах, оборудованных фильтрами, с минимальным загрязнением водоносных горизонтов. В последнем случае прифильтровая зона скважины перед заполнением последней материалом гидроизоляции промывается глинистым раствором, содержащим твердую фазу. Размер частиц твердой фазы при этом принимается равным

ТАБЛИЦА 5.

Результаты измерения продолжительности кольматации образцов

Глинистый раствор	Время выхода первой капли фильтрата, секунды	Выход фильтрата за 10 минут фильтрации, cm^3
Без добавок твердой фазы	2,0	9,0
С добавкой твердой фазы	1,0	4,0

А.С. БАБКИН, А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ, Е.Ю. МЕШКОВ, Н.А. ЧЕРНОВРОВКИН, А.А. ОРЕХОВ, Р.И. ТАВРИЛОВ
КОЛЬМАТАЦИЯ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

размеру частиц водоносного горизонта. Образовавшийся при этом объем «цилиндра загрязнения» можно рассчитать следующим образом:

$$V_3 = 1,57 \times L_{\phi} \cdot (D_{\phi}^2 + 2 \times l_k), \quad (1)$$

где: V_3 – объем «цилиндра загрязнения», m^3 ; L_{ϕ} – длина фильтра, м; D_{ϕ} – наружный диаметр фильтра, м; l_k – глубина проникновения глинистого раствора с твердой фазой в водоносный горизонт.

Результаты показали, что глубина проникновения в пески различного гранулометрического состава твердой фазы глинистого раствора находится в диапазоне 1–5 мм: (1–1,5 мм для мелкозернистых песков; 1,5–3 мм для среднезернистых песков; 3–5 мм для крупнозернистых песков). Время достижения полной кольматации, в зависимости от содержания в глинистом растворе твердой фазы, составляет от 1 до 8 минут. Твердая фаза при исследованиях представлялась песками гранулометрического состава, соответствующего составу исследуемого образца. Минимальное время достижения кольматации получено для глинистого раствора с содержанием песка до 3%, максимальное – для глинистого раствора с содержанием песка в 20%.

При проведении исследований определялось давление начала декольматации по отношению к давлению кольматации. Для давлений кольматации 0,5; 1,0; 2,0 МПа оно составило 0,15–0,2; 0,15–0,2; 0,2–0,3 МПа соответственно или от 10 до 40% от давления кольматации.

Таким образом, для полной декольматации водоносного горизонта обязательным условием является поинтервальное освоение участков фильтра на стадии сооружения скважины.

1.2. Газовая кольматация наблюдается на стадии освоения технологических скважин методом эрлифтной прокачки со спуском смесителя воздушного

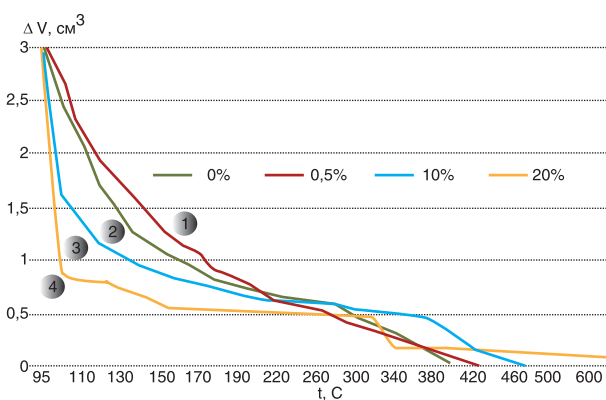


РИС. 3.

Графики кольматации образца керна глинистым раствором с различным содержанием твердой фазы: 1, 2, 3, 4 – содержание твердой фазы в глинистом растворе соответственно 0; 0,5; 10 и 20%

шланга в зону фильтра и ниже [9]. При этом эксплуатационная колонна является водоподъемной колонной и подвергается воздействию ударно-вибрационных нагрузок. Газовая кольматация на стадии освоения проявляется в скважинах с низким статическим уровнем.

2. ВИДЫ КОЛЬМАТАЦИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

Виды кольматации, возникающие при эксплуатации технологических скважин, определяются тем, что при фильтрации выщелачивающего раствора через поровое пространство продуктивного горизонта происходит изменение его проницаемости, характер и величина которого определяются природой и концентрацией выщелачивающего реагента и минералогическим составом вмещающих горных пород. Движение выщелачивающих растворов в продуктивном горизонте происходит с переменной проницаемостью, что определяет производительность технологических скважин на протяжении всего периода их эксплуатации.

2.1. Механическая кольматация наблюдается в фильтрах вследствие несоответствия размеров проходных отверстий фильтров гранулометрическому составу вмещающих пород. В результате водопримные отверстия фильтров заклиниваются или перекрываются песком, глиной, гравием, в связи с чем удельный дебит скважин снижается.

Этот вид кольматации наблюдается в песчаных отложениях в результате суффозии или подачи в пласт растворов, содержащих взвешенные частицы.

Под суффозией подразумевают перемещение наиболее мелких частиц по поровым каналам под действием напорного градиента при большой скорости фильтрации жидкости. Суффозия может повлечь за собой как улучшение проницаемости пород (при выносе частиц), так и ее снижение (при закупорке поровых каналов).

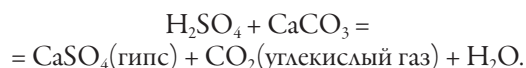
К суффозии приводит резкое увеличение производительности скважин как закачных, так и откачных. С увеличением производительности при закачке в отверстиях фильтров и поровом пространстве прифильтовой зоны продуктивного горизонта происходит увеличение скорости фильтрации, которая затухает с удалением от оси ствола скважины. Создаются условия для перемещения частиц грунта и переосаждения их на некотором расстоянии от стенки фильтра. В результате происходит закупорка поровых каналов и приемистость скважин уменьшается.

С увеличением производительности откачных скважин происходит вынос частиц пород в фильтр (пескование скважины) и увеличение пропускной способности прифильтовой зоны.

Причиной механической кольматации служат не только суффозионные явления, но и загрязнение вы-

щелачивающих растворов продуктами технологической переработки (частицы смолы, гидроуборка полов, атмосферная пыль, твердые примеси серной кислоты и др.).

2.2. Газовая кольматация связана с выделением свободного газа в поровом пространстве пород, чаще всего углекислого, образующегося в результате реакции серной кислоты с карбонатами, например, карбонатом кальция:



Влияние газовой кольматации на проницаемость продуктивного горизонта может быть значительной. При заполнении жидкостью 50% порового объема ее фазовая проницаемость падает в 10 раз, а если жидкость занимает менее 25% порового объема, то ее фильтрация полностью прекращается, а в движении может участвовать только газ [11].

Продолжительность воздействия на проницаемость пород газовая кольматация имеет обычно временный характер. Образующийся при реакции газ покидает водоносный горизонт через откачные скважины как в виде газовой фазы, так и вместе с жидкостью в растворенном состоянии.

Среди карбонатов наиболее активно взаимодействует с серной кислотой карбонат кальция – CaCO_3 . Остальные карбонаты реагируют с серной кислотой значительно медленнее, что не приводит к образованию свободного газа.

При содержании CaCO_3 менее 0,2% или использовании раствора серной кислоты с концентрацией до 2 г/дм³ свободный газ при атмосферном давлении не образуется. В условиях водоносных горизонтов (в особенности высоконапорных) растворимость газа растет прямо пропорционально гидростатическому давлению жидкости в продуктивном горизонте, т.е. при гидростатическом давлении, превышающем в 10 раз атмосферное давление, минимальные значения концентрации серной кислоты и карбоната кальция, не приводящие к образованию свободного газа, могут быть увеличены в 8,4 раза.

Для некоторых месторождений возможно образование сероводорода при взаимодействии растворов серной кислоты с сульфидами [2, 3 и др.]. При сохранении производительности скважин объем его продуцирования недостаточен для газовой кольматации ПФЗ и продуктивного горизонта.

Таким образом, процесс газовой кольматации контролируется содержанием CaCO_3 и концентрацией серной кислоты в растворах.

2.3. Химическая кольматация характеризуется выпадением из рабочих растворов химических осадков в результате взаимодействия серной кислоты с породами.

Кольматацию этого вида можно разделить на следующие подвиды: 2.3.3 – кольматация фильтра; 2.3.4 – кольматация прифильтровой зоны (ПФЗ).

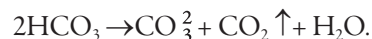
2.3.3. Химическая кольматация фильтра заключается в закупоривании отверстий в фильтре химическими осадками. При этом известно, что чем выше скважность фильтра, тем меньше скорость закупоривания его пропускных отверстий. Поэтому подбор типа фильтра – важнейший момент, определяющий эффективность формирующейся конструкции скважины и влияющий на продолжительность межремонтного цикла (МРЦ). Анализ рекомендаций специалистов в области гидравлики течения пластовых вод в фильтре и ПФЗ, а также результаты работ по извлечению на поверхность различных типов фильтров показал, что оптимальным является однокаркасный щелевой фильтр с горизонтальными щелями [1], представленный на рис. 4.

Двухкаркасные фильтры типа КДФ, ФКД и других, конструкция которых включает размещение фильтрующих дисков на перфорированном трубном каркасе, наименее пригодна по следующим основным причинам:

- низкая скважность (работают только те участки щелей фильтрующих дисков, которые расположены против перфорированных отверстий каркаса);
- межкаркасное пространство в зонах сплошного тела трубы-каркаса не работает (застойная зона) и быстро зарастает химическими осадками. Этот факт многократно подтверждается извлечением на поверхность двухкаркасных фильтров, где межкаркасное пространство зацементировано химическими осадками, не удаляемыми никакими способами обработок фильтра. Прямое определение состава осадков, кольматирующих фильтры и ПФЗ скважин, извлеченные через различные периоды работы, показывают, что они в основном представлены $\text{Fe}(\text{OH})_{2/3}$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, CaCO_3 , $\text{Mn}(\text{OH})_2$, $\text{Mn}(\text{OH})_4$, $\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$, сульфидами металлов.

На стадии закисления продуктивного горизонта, когда откачиваются пластовые воды, химическая коль-

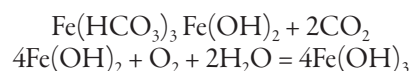
матация обуславливается нарушением химического состава подземных вод в результате изменения гидродинамических параметров фильтрационного потока. При изменении пластового давления уменьшается растворимость газов (в основном CO_2), происходит их выделение и нарушается углекислотное равновесие:



Присутствие катионов кальция и магния и нарушение углекислотного равновесия приводит к образованию CaCO_3 и MgCO_3 . Интенсивно происходит выделение карбонатных осадков в зоне фильтров, при удалении от них, т.е. вглубь продуктивного горизонта, интенсивность выпадения осадков уменьшается. В фильтрах, имеющих большие гидравлические сопротивления, возрастают потери давления, что приводит к более активному выделению из воды CO_2 и увеличению количества карбонатных осадков. Этому способствует турбулизация потока подземных вод и их перемешивание при прохождении через водоприемную часть фильтра.

Если кольматация происходит только карбонатными соединениями, то осадки по структуре близки к кристаллическим и имеют серовато-белый цвет. При взаимодействии с соляной кислотой наблюдается интенсивное выделение углекислого газа.

Распространенными кольматантами при этом являются железистые осадки, которые выделяются при откачке подземных вод, содержащих закисное железо. Переход железа из закисного в окисное и выпадение в осадок происходит при наличии в подземных водах растворенного кислорода. Этому также способствует выделение CO_2 и повышение pH воды вследствие нарушения углекислотного равновесия:



Гидрат оксида железа имеет студнеобразный вид и откладывается на поверхности фильтров и в поровом пространстве ПФЗ продуктивного горизонта. Интенсивность выпадения железистых осадков возрастает при неравномерной откачке воды из скважин с использованием эрлифта, приводящей к насыщению рабочего раствора кислородом воздуха. Железосодержащие осадки характеризуются желто-коричневым цветом, пачкают руки.

На кольматацию фильтра большое влияние оказывает наличие в подземных водах сероводорода H_2S . Содержание гидросульфитов HS^- приводит к образованию труднорастворимых и непроницаемых сернистых отложений железа, меди, цинка. Сульфиды металлов в виде корковидных наростов черного цвета образуют прочное пленочное покрытие на поверхности средств раствороподъема (погружных электро-



РИС. 4.

Конструкция щелевого фильтра из труб НПВХ с горизонтальными щелями

насосов) и постепенно разрушают их. При взаимодействии с рабочими растворами эти осадки бурно выделяют сероводород.

При наличии в железосодержащих подземных водах кремнекислоты наблюдается образование трудно-растворимых силикатных отложений с примесью закисного железа, придающего им бурю окраску. Эти осадки характеризуются высокой прочностью и практически нерастворимы в кислотах.

Предотвратить химическую кольматацию фильтров и прифильтровой зоны скважин, обусловленную нарушением углекислотного равновесия, невозможно, поскольку ее причиной является нарушение естественного режима водоносного пласта.

По характеру воздействия на фильтрационные свойства пород химическая кольматация может быть обратимой и необратимой. К обратимой (временной) следует отнести кольматацию, вызванную выпадением в осадок гидроксидов железа и алюминия.

При снижении величины рН в процессе закисления пород образовавшиеся ранее осадки снова начинают растворяться (сначала гидроксид железа (II) при $\text{pH} = 6$ и менее, затем гидроксид алюминия при $\text{pH} = 4$ и ниже и железа (III) при $\text{pH} = 3$ и ниже), и проницаемость пород восстанавливается. Однако при высоком содержании алюминия и железа в породах и большом расстоянии между закачными и откачными скважинами осадок гидроксидов может полностью закольматировать ПФЗ откачных скважин и привести их к выходу из строя.

К необратимой химической кольматации приводит выпадение гипса, растворимость которого невелика (около 2 г/дм^3) и практически не зависит от величины рН. Гипсовая кольматация начинает проявляться несколько позднее газовой.

Кольматация порового пространства гипсом определяется содержанием иона Ca^{2+} в породах и не зависит от концентрации иона SO_4^{2-} .

2.4. Ионообменная кольматация проявляется в горных породах, содержащих значительное количество глинистых минералов, главным образом, монтмориллонитовой группы. Она приводит к постепенному, нередко значительному (в 2 раза и более) ухудшению проницаемости песчано-глинистых пород в результате набухания глинистых частиц при замещениях в их мицеллах (дисперсная частица вещества в коллоидах с адсорбированными на ее поверхности ионами) и гидратными оболочками (диполями воды) двухвалентных катионов одновалентными ионами металлов.

Ионообменные процессы влияют на проницаемость пород могут и косвенно. Например, переходящий в раствор в результате этих процессов ион кальция, соединяясь с сульфат-ионом серной кислоты, вызывает частичную необратимую кольматацию порового пространства гипсом.

Образование гипса сопровождается в той или иной мере процесс подземного выщелачивания при использовании в качестве растворителя серной кислоты ввиду накопления солей в оборотных растворах и малой его растворимости.

Ионный обмен определяется двумя рядами факторов.

К первому ряду факторов относятся:

1. Минералогический состав глинистой части породы. Наибольшей способностью к ионному обмену обладает группа монтмориллонита, средней – иллита, наименьшей – каолинита.
2. Размер глинистых частиц, определяющий удельную поверхность породы. С повышением степени раздробленности минералов увеличивается их способность к ионному обмену.

Ко второму ряду факторов относятся:

1. Величина рН, определяющая толщину диффузионного слоя глинистой частицы.
2. Концентрация серной кислоты в растворе. С ее увеличением способность к ионному обмену возрастает.
3. Природа обменивающихся ионов. По энергии обмена катионы располагаются в следующий ряд (в порядке уменьшения энергии):



Ион H^+ , вводимый в большом количестве в раствор при использовании серной кислоты, стоит особняком, занимая в этом ряду место между двух- и трехвалентными катионами. Замещая в диффузионной оболочке глинистой частицы обычно содержащийся там ион Ca^{2+} , имеющий значительно меньший радиус, H^+ -ион способствует набуханию глинистых частиц и сокращению порового пространства. В особенности склонен к набуханию монтмориллонит.

Наличие в растворе значительного количества трехвалентных катионов (например Fe^{3+}), наоборот, способствует сокращению размеров диффузионных оболочек и сохранению проницаемости песчано-глинистых пород в кислой среде (при отсутствии других форм кольматации).

Таким образом, кольматацию, связанную с ионообменными процессами, контролируют монтмориллонитовые глины и содержание серной кислоты.

2.5. Биологическая кольматация связана с образованием растительных и животных микроорганизмов в поровом пространстве пород продуктивного горизонта и в настоящей работе не рассматривается.

Описание методов удаления продуктов различных видов кольматации приведено во многих работах [7, 8 и др.]. Авторами рассмотрены основные виды работ по декольматации фильтров и ПФЗ, приведенные в табл. 6.

Рассмотрим основные варианты выполнения работ.

А.1.1. Эрлифтная прокачка с водоподъемом по эксплуатационной колонне производится с обязательным

оборудованием устья скважины прокачным оголовником. Варианты оголовников приведены на рис. 5.

Процесс сопровождается подачей в колонну сжатого воздуха, аэрацией скважинной жидкости, подъемом газожидкостной смеси до устья и ее изливом на поверхность или в специальную емкость через отводной шланг. В подавляющем большинстве случаев эта смесь имеет пробковую структуру, в которой основная масса газа движется в виде сплошных столбиков-чечек, чередующихся со столбиками жидкости. При средних условиях работы эрлифта скорость излива газожидкостной смеси составляет $V_{\text{вос}} = 9-10$ м/с. Приведенный вариант эрлифтной прокачки сопровождается ударными нагрузками $N_{\text{уд}}$ на торцевую – горизонтальную или наклонную – поверхность оголовника. В варианте Б это приводит к возникновению осевого воздействия и соударению с восходящим потоком газожидкостной смеси. Этот процесс вызывает вибрационные нагрузки в обсадных трубах эксплуатационной колонны, что может приводить к разрушению, прежде всего, резьбовых соединений. При использовании оголовника в варианте Б (с наклонной поверхностью) изгибающая нагрузка, действующая на верх полимерной эксплуатационной колонны, существенно снижается. Поэтому только такой вариант оголовника допускается использовать в редчайших случаях при эрлифтной прокачке скважин.

Сводные таблицы ударных импульсов на оголовник при эрлифтной прокачке технологических скважин СПВ урана для трех залежей приведены в табл. 7, 8, 9.

Приведенные данные получены при проведении РВР методом эрлифтной прокачки с использованием оголовников конструкции рис. 5. Продолжительность одной прокачки до восстановления проектной производительности составляет в среднем 6 часов. Соответственно на эксплуатационную колонну за это время наносится от 1000 до 20000 ударов, что существенно сокращает срок ее службы. Кроме того, эрлифтные прокачки таким методом приводят к возникновению изгибающей составляющей нагрузки на

верхний участок эксплуатационной колонны. Графики изменения дебита при проведении эрлифтной прокачки при выполнении ремонтно-восстановительных работ по залежам 1, 2, 3 приведены на рис. 6.

А.1.2. Эрлифтная прокачка с водоподъемом по специальной водоподъемной колонне.

Опыт показывает, что наиболее приемлемым вариантом может быть только вариант эрлифтной прокачки с параллельным расположением воздушной и водоподъемной колонн.

Схема эрлифта с параллельным расположением воздушной и водоподъемной колонн исключает воздействие ударных, вибрационных и изгибающих нагрузок на эксплуатационную колонну. Все эти нагрузки воспринимаются водоподъемной колонной, которая выполняется из шлангов типа ШАПП-50

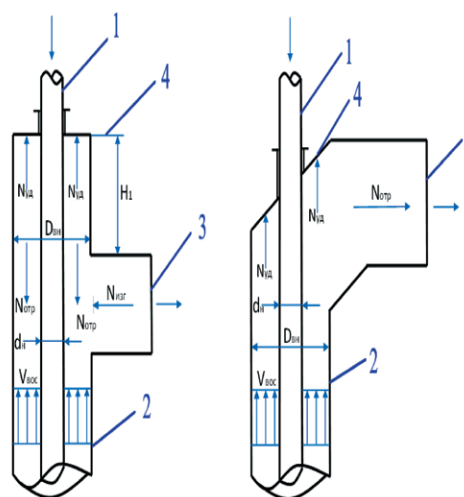


Рис. 5.

Варианты прокачных оголовников (А – вариант с горизонтальной поверхностью оголовника; Б – вариант с наклонной поверхностью оголовника): 1 – воздушный шланг; 2 – эксплуатационная колонна; 3 – отводной патрубок; 4 – поверхность оголовника, воспринимающая ударные нагрузки

ТАБЛИЦА 6.

Основные виды работ по декольматации фильтров и прифильтровых зон

Вид работ	Варианты выполнения работ	Примечание
А.1. Эрлифтная прокачка	А.1.1. Водоподъем по эксплуатационной колонне	Только для скважин небольшой глубины при фиксации колонны на устье
	А.1.2. Водоподъем по специальной водоподъемной колонне	Рекомендуется для всех скважин на стадии сооружения и эксплуатации
А.2. Ударные способы	А.2.1. Пневмоимпульсная обработка	Рекомендуется только для разрушения монолитных продуктов химической коагуляции
	А.2.2. Механическая импульсная обработка	Основной вид работ по удалению любых продуктов коагуляции
А.3. Химические способы		Состав реагента для декольматации подбирается в зависимости от вида коагулянта

ТАБЛИЦА 7.

Залежь 1, обсадные трубы ПНД160 × 18

Дебит при от- качке Q_0 ($Q_{оср}$), м³/час	Среднее количе- ство импульсов, ед./мин	Дебит единичного удара $Q_{1уд}$, м³/уд
0–1,0 (0,7)	2,8	0,042
1,1–2,0 (1,96)	5,2	0,063
2,1–3,0 (2,78)	6,9	0,067
3,1–4,0 (3,31)	11,2	0,049
4,1–5,0 (4,5)	13,6	0,055
5,1–6,0 (5,66)	22,8	0,041
6,1–7,0 (6,46)	30,7	0,035
7,1–8,0 (7,73)	27,8	0,046
8,1–9,0 (-)	–	–
9,1–10,0 (10)	36	0,046

ТАБЛИЦА 8.

Залежь 2, обсадные трубы ПНД160 × 18

Дебит при откачке Q_0 ($Q_{оср}$), м³/час	Среднее коли- чество импуль- сов, ед./мин	Дебит единич- ного удара $Q_{1уд}$, м³/уд
0–1,0 (-)	–	–
1,1–2,0 (1,53)	3,8	0,086
2,1–3,0 (2,69)	8,9	0,05
3,1–4,0 (3,7)	12,1	0,51
4,1–5,0 (4,7)	22,1	0,036
5,1–6,0 (5,64)	38,1	0,002
6,1–7,0 (6,84)	64,4	0,002
7,1–8,0 (7,75)	46,3	0,027
8,1–9,0 (8,48)	31,8	0,004

ТАБЛИЦА 9.

Залежь 3, обсадные трубы ПНД110 × 18

Дебит при откачке Q_0 ($Q_{оср}$), м³/час	Среднее коли- чество импуль- сов, ед./мин	Дебит единич- ного удара $Q_{1уд}$, м³/уд
0 – 1,0 (0,79)	3,8	0,008
1,1 – 2,0 (1,3)	4,7	0,005

Примечание: количество скважин для проведения анализа по скважинам составило по залежи 1–20 скважин, по залежи 2–19 скважин, по залежи 3–4 скважины. Статические уровни пластовой жидкости составляли: залежь 1–110 м (средняя глубина скважин 215 м); залежь 2–200 м (80 м), залежь 3–230 м (130 м). Динамика восстановления производительности при эрлифтной прокачке скважин приведена в табл. 10.

(шланг из полиэтилена низкого давления (ПНД) армированный полипропиленовой нитью). В качестве воздушной колонны используется шланг типа ПНД-25. Использование шлангов позволяет исключить газовую кольматацию фильтра и ПФЗ при выполнении прокачки. Поинтервальное перемещение торцевого входного отверстия водоподъемной колонны при прокачке вдоль фильтра обеспечивает полное удаление кольматанта из ПФЗ по всей его длине. Метод реализован в установках УОС (установка освоения скважин) и УПОС (установка промывки и освоения скважин), монтируемых на автомобильных шасси высокой проходимости [5]. Следует также отметить, что такой способ эрлифтной прокачки обеспечивает высокие скорости движения пластовой жидкости на входе в фильтр, которые могут существенно превышать скорости движения рабочих растворов при эксплуатации скважин. Это обеспечивает вынос из обрабатываемого интервала прифильтровой зоны мелких фракций песков продуктивного водоносного горизонта, что исключает суффозионные явления на стадии эксплуатации.

А.2.1. Пневмоимпульсная обработка фильтров и ПФЗ.

Этот вид обработки был разработан с участием Вольницкой Э.М., суть которого заключается в воздействии знакопеременных ударных импульсов на ПФЗ и широко описан в литературе [4, 5 и др.].

Указанный вид обработки является одним из видов РВР, выполняемых установкой «Гидропульс» производства фирмы «TLM hydropuls GmbH» (Германия). Технические характеристики установок пневмоимпульсной обработки АСП – ПВ и «Гидропульс», а также механизм обработки приведены в работе Иванова А.Г. и др. [7]. Опыт применения пневмоимпульсного метода обработки ПФЗ технологических скважин показал, его эффективность только для разрушения продуктов химической кольматации, которые затем удаляются из скважины эрлифтной прокачкой. Метод непригоден для удаления мелких продуктов кольматации поскольку при его реализации ударный импульс в направлении из фильтра в водоносный горизонт имеет большую мощность по сравнению с возвратным импульсом в направлении из водоносного горизонта в фильтр. Т. е. применение такого метода приводит к оттеснению частиц кольматанта в водоносный горизонт. Форма импульсов приведена на рис. 7.

А.2.2. Механическая импульсная обработка.

Этот вид обработки является универсальным и отличается от пневмоимпульсной обработки значительно более высокой эффективностью. Метод проходил испытания в конце 1990 г. на одном из уранодобывающих предприятий в Республике Казахстан. Механизм его работы описан в одной из статей [8]. На рис. 8 приведены графики изменения производитель-

ности скважин после пневмоимпульсной обработки скв. 10-2-15 и 12-2-4а и после механической импульсной обработки скв. 12-2-13.

На рис. 9 приведен график формы ударных импульсов при механической импульсной обработке фильтров и прифильтровых зон.

Анализ приведенного графика позволяет сделать вывод о том, что механическое истирание кольматанта в фильтре и прифильтровой зоне с ударным импульсом одинаковой величины как в направлении водоносного горизонта, так и в направлении фильтра позволяет эффективно разрушать любой кольматант с последующим удалением его мелкодисперсных частиц на поверхность. Такой способ позволяет производить обработку фильтра и прифильтровой зоны поинтервально по всей длине фильтра перемещением устройства на буровых трубах. Этот вид обработки хорошо сочетается с эрлифтной прокачкой с парал-

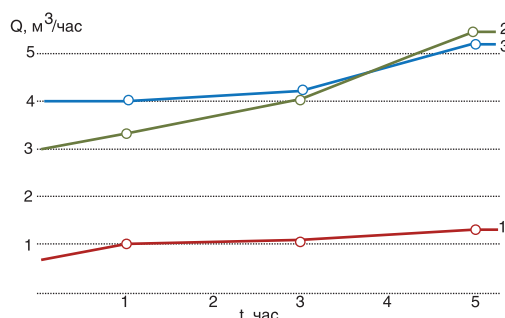


РИС. 6.

Графики повышения дебита скважин при проведении эрлифтных прокачек: 1, 2, 3 – номера скважин

лельным расположением воздушной и водоподъемной колонн, приведенным на рис. 7.

С учетом полученных результатов кафедрой механики и инженерной графики им. Б.М. Ребрика РГГРУ имени Серго Орджоникидзе – МГРИ разработана конструкция устройства разрушения кольматанта (УРК), действующая на принципах механической импульсной обработки фильтров и прифильтровых зон водозаборных и технологических скважин. Основные технические характеристики УРК, показанного на рис. 11, приведены в табл. 11.

Приведенная конструкция позволяет устанавливать два и более дисков, создающих вибрационное воздействие на кольматант как фильтра, так и прифильтровой зоны. Количество дисков и расстояние между ними определяется длиной фильтра. Рекомендуемое максимальное расстояние между дисками составляет 0,4 м. Авторами рекомендуется максимальное расстояние между крайними верхним и нижним дисками 2,0 м.

ВЫВОДЫ

1. Механическая кольматация на стадии сооружения скважин имеет незначительную глубину проникновения в водоносный горизонт и легко удаляется путем поинтервального освоения фильтра и прифильтровой зоны перемещением водоприемного устройства, расположенного в составе обвязки для эрлифтной прокачки с применением гибких воздушной и водоподъемной колонн.

2. Эрлифтная прокачка с применением параллельного расположения воздушной и водоподъемной колонн обеспечивает высокое качество работ и исключает как газовую кольматацию прифильтровой зоны

ТАБЛИЦА 10.

Динамика восстановления дебита скважин и данные визуального контроля откачиваемой пластовой жидкости

Дебит, м³/час	Время, час	Вид раствора
1,2	0,1	Бурые растворы, присутствие мехвзвесей
1,25	0,5	Бурые растворы, присутствие мехвзвесей
1,3	1	Грязные растворы, присутствие мехвзвесей
1,5	1,5	Сизые растворы, присутствие мехвзвесей
1,6	2	Сизые растворы, присутствие мехвзвесей
1,67	2,5	Сизые растворы, присутствие мехвзвесей
1,6	3	Сизые растворы, присутствие мехвзвесей
1,7	3,5	Растворы с осветлением, видимое присутствие мехвзвесей
1,65	4	Растворы с осветлением, видимое присутствие мехвзвесей
1,6	5	Растворы с осветлением, видимое присутствие мехвзвесей
1,67	6	Растворы с осветлением, незначительные мехвзвеси
1,6	7	Растворы с осветлением, весьма незначительные мехвзвеси
1,7	8	Растворы с осветлением, весьма незначительные мехвзвеси
1,65	9	Растворы с осветлением, весьма незначительные мехвзвеси

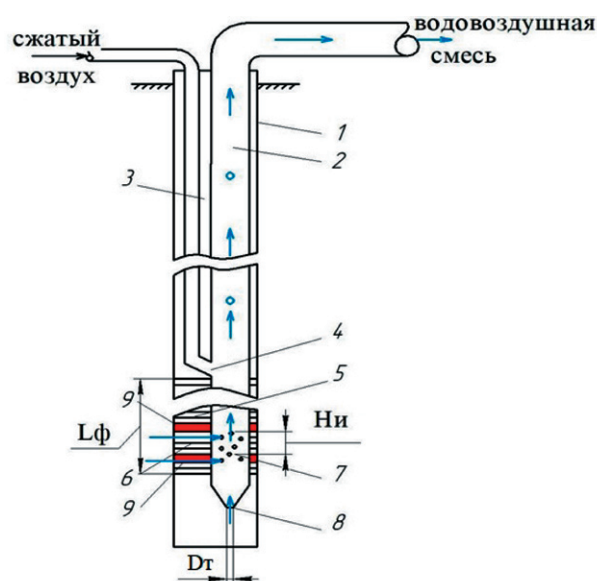


Рис. 7.

Схема эрлифта с параллельным расположением воздушной и водоподъемной колонн: 1 – эксплуатационная колонна; 2 – водоподъемная колонна из полимерного шланга; 3 – воздушная колонна из полимерного шланга; 4 – смеситель; 5 – фильтр; 6 – осваиваемый интервал фильтра и прифильтровой зоны; 7 – перфорация водоприемной части водоподъемной колонны из мягкого пористого материала; 8 – торцевое отверстие водоприемной части водоподъемной колонны; 9 – ограничители водопритока по высоте фильтра. Параметры: L_f – длина фильтра, H_i – высота осваиваемого интервала, D_t – диаметр торцевого отверстия водоприемной части водоподъемной колонны

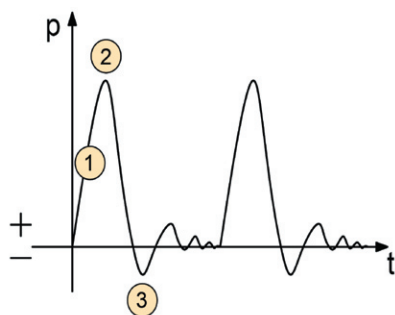


Рис. 8.

Форма ударных импульсов при пневмоимпульсной обработке фильтров и прифильтровых зон: 1 – график ударных импульсов; 2 – максимальный импульс в направлении от фильтра в водоносный горизонт; 3 – максимальный импульс в направлении из водоносного горизонта в фильтр

на стадии сооружения скважины, так и суффозионные явления в прифильтровой зоне в процессе эксплуатации скважин.

3. Применение эрлифтной прокачки для освоения скважин и при выполнении ремонтно-восстановительных работ с использованием эксплуатационной колонны недопустимо, поскольку данный вид обработки ведет к разрушению любых видов резьбовых соединений полимерных обсадных труб.

А.С. БАБКИН, А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ, Е.Ю. МЕШКОВ, Н.А. ЧЕРНОБРОВКИН, А.А. ОРЕХОВ, Р.И. ТАВРИЛОВ
КОЛЬМАТАЦИЯ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

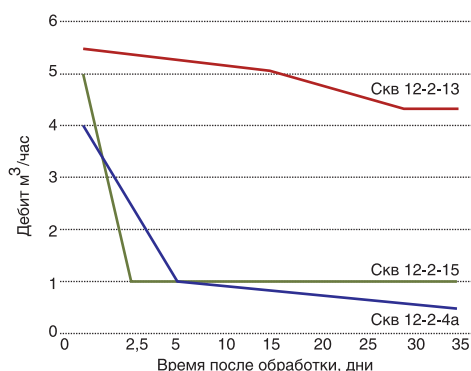


Рис. 9.

Графики изменения производительности обработанных скважин

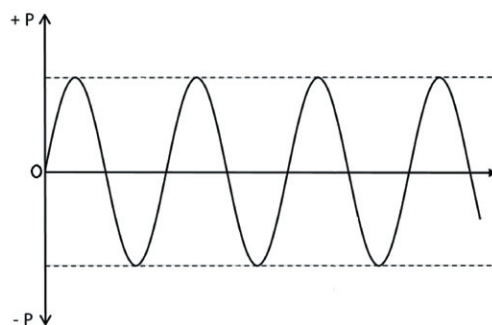


Рис. 10.

График формы ударных импульсов при механической импульсной обработке фильтров и прифильтровых зон: +P – ударный импульс в направлении из фильтра в водоносный горизонт; -P – ударный импульс в направлении из водоносного горизонта в фильтр

4. Для разрушения и удаления продуктов механической и химической коагуляции наиболее перспективным является применение устройств механической импульсной обработки фильтров и прифильтровых зон типа УРК с последующей эрлифтной прокачкой при условии параллельного расположения воздушной и водоподъемной колонн.

ЛИТЕРАТУРА

1. АЛЕКСЕЕВ В.С., ТЕСЛЯ В.Г. Критерии проектирования фильтров водозаборных скважин // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. №11. С. 21–29.
2. БАБКИН А.С., ИВАНОВ А.Г., МИХАЙЛОВ А.Н., ГУРУЛЕВ Е.Н., АЛЕКСЕЕВ Н.А. и др. Восстановление производительности технологических скважин при скважинном подземном выщелачивании урана // Московский экономический журнал. 2019. №2. С. 84–100.
3. БЕЛЕЦКИЙ В.И., ДАВЫДОВА А.Г., ДОЛГИХ П.Ф. и др. Методы исследований при подземном выщелачивании руд: Учебное пособие // М.: МГРИ. 1982. 109 с.

ТАБЛИЦА 11.

Основные технические характеристики УРК

Характеристика	Значение
Внутренний диаметр эксплуатационной колонны: минимальный, мм максимальный, мм,	75 220
Расход рабочего агента, дм ³ /С	Регулируемый до 10
Амплитуда колебаний дисков рабочего органа, мм	Регулируемая до 20
Частота колебаний дисков рабочего органа, Гц	Регулируемая до 50
Энергия рабочего удара, Н × м	Регулируемая до 80
Перепад давления в вибраторе, МПа	до 1,5
Габаритные размеры, мм: длина диаметр корпуса диаметр дисков	Определяет количество дисков(до 2 м) До 65 70–210
Масса, кг	До 30 кг, вес определяет удельный вес материалов изделия



РИС. 11.

Модель конструкции устройства разрушения кольматанта УРК

4. Вольницкая Э.М. Разработка и внедрение импульсно-волновой технологии интенсификации притоков в гидрогеологических скважинах // Автореферат дисс. на соискание уч. ст. к.т.н. Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по взрывным методам геофизической разведки. 1990. 19 с.
5. Геотехнология урана (российский опыт): монография // Под ред. Солодова И.Н., Камнева Е.Н. М.: «КДУ», «Университетская книга». 2017. 576 с.
6. Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Иванов Д.А., Назаров А.П. Влияние содержания твердой фазы в глинистом растворе на кольматацию песков при вскрытии водоносных горизонтов // Разведка и охрана недр. 2023. №9. С. 48–51.
7. Иванов А.Г., Михайлов А.П., Алексеев Н.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. 40–44.
8. Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Орехов Д.Д., Гаврилов Р.И. О некоторых особенностях механической импульсной обработки фильтров и прифильтровых зон технологических скважин подземного выщелачивания урана // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2025. №1. С. 41–52.
9. Пенкевич С.В. Методические указания к расчету

эрлифта при откачке из гидрогеологических скважин // М.: МГРУ им. С. Ораджоникидзе (МГРИ). 2003. 20 с.

10. Прусова Н.А. Исследование процесса закупоривания проницаемых пород дисперсной фазой различных буровых растворов и разработка очистительных устройств // Автореферат дисс. на соискание уч. ст. к.т.н. Всесоюзный научно-исследовательский институт буровой техники. 1988. 24 с.
11. Справочник по геотехнологии урана. Под ред. Д.И. Скороварова. М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ. 1997. С. 216–218.

REFERENCES

1. ALEKSEEV V.S., TESLYA V.G. Criteria for designing filters of water intake wells. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*. 2009;11:21–29. (In Russian).
2. BABKINA S., IVANOVA G., MIKHAILOVA N., GURULEV E.N., ALEKSEEV N.A. ET. AL. Restoring the productivity of process wells during borehole underground leaching of uranium. *Moskovskiy ekonomicheskii zhurnal*. 2019;2:84–100. (In Russian).
3. BELETSKY V.I., DAVYDOVA L.G., DOLGIKH P.F., Methods of research in underground leaching of ores: Textbook. Moscow: MGRI. 1982:109. (In Russian).
4. VOLNITSKAYA E.M. Development and implementation of pulse-wave technology of intensification of tributaries in hydrogeological wells. Avtoref. dis. on the soisk. Uchen. Step. Cand. Tech. Sciences. All-Union. n.-i. and project. -konstr. Institute for Explosive Methods Geophys. Intelligence. 1990:19. (In Russian).
5. Uranium Geotechnology (Russian Experience): Monograph. Ed. by Solodov I.N., Kamnev E.N. Moscow: "KDU". "Universitetskaya kniga". 2017:576. (In Russian).
6. IVANOV A.G., ARSENTYEV YU.A., IVANOV D.A., NAZAROV A.P. Influence of solid phase content in clay

- solution on colmatation of sands during the opening of aquifers. *Razvedka i okhrana nedr.* 2023;9:48–51. (In Russian).
7. **IVANOV A.G., MIKHAILOV A.P., ALEKSEEV N.A., ARSENYEV YU.A., SOLOVIEV N.V., NAZAROV A.P.** Methods and technical means of processing filters and filter zones of technological wells. *Razvedka i okhrana nedr.* 2020;7:40–44. (In Russian).
 8. **IVANOV A.G., ARSENYEV YU.A., OREKHOV D.D., GAVRILOV R.I.** On some features of mechanical pulse processing of filters and filter zones of technological wells of underground uranium leaching. *Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka.* 2025;1:41–52. (In Russian).
 9. **PENKEVICH S.V.** Guidelines for the calculation of air-lift when pumping out of hydrogeological wells. Moscow: MGRI. 2003:20. (In Russian).
 10. **PRUSOVA N.L.** Study of the process of capping permeable rocks with a dispersed phase of various drilling solutions and the development of cleaning devices. All-Union Scientific Research Institute of Drilling Equipment. 1988:24. (In Russian).
 11. Handbook of uranium geotechnology. Moscow: ENERGOATOMIZDAT. 1997:216–218. (In Russian).

Бабкин Александр Степанович,
ветеран ГК «Росатом», пенсионер

✉ e-mail: babkin.a.s@mail.ru

Иванов Александр Георгиевич,
к.т.н., главный специалист АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»

✉ 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 33,
115409, Moscow, Kashirskoe sh., 33
e-mail: ivanov_ag@mail.ru, 8-914-804-18-53

Арсентьев Юрий Александрович,
к.т.н., доцент кафедры механики и инженерной графики им. Б.М. Ребрика Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе – МГРИ

✉ 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117485, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23,
тел.: +7 (985) 145-62-07, e-mail: arsentev1956@yandex.ru

Мешков Евгений Юрьевич,
начальник лаборатории АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»

✉ 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 33,
115409, Moscow, Kashirskoe sh., 33
тел.: +7 (926) 369-75-53, e-mail: eumeshkov@mail.ru

Чернобровкин Николай Антонович,
главный специалист АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»

✉ 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 33,
115409, Moscow, Kashirskoe sh., 33
тел.: +7 (926) 429-07-70,
e-mail: Chernobrovkin.N.A.@rosatom.ru

Орехов Данила Дмитриевич,
студент Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе – МГРИ

✉ 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117485, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23,
тел.: +7 (920) 088-56-88, e-mail: danilaohv@yandex.ru

Гаврилов Руслан Игоревич,
студент Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе – МГРИ

✉ 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117485, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23,
тел.: +7 (985) 145-62-07,
e-mail: supermouse27228@gmail.com