УДК 622.775:546.791

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ КОЛЬМАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАНА, РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ МЕТОДОМ ПОДЗЕМНОГО СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Чекулаев А.В.

ООО НПЦ «ГеоМИР», Санкт-Петербург, e-mail: Alexchekulaev09@ya.ru

Постепенный рост спроса на энергию приводит к закономерному увеличению доли атомной энергетики в мире. В качестве основного сырья атомных электростанций используется исключительно уран. Вопрос разведки и разработки урановых месторождений остается актуальным. Разработка месторождений урана песчаникового типа осуществляется методом подземного скважинного выщелачивания. Метод подземного скважинного выщелачивания показал себя эффективным, рентабельным, экологически чистым, а также позволяет разрабатывать месторождения с низкими промышленными концентрациями по сравнению с коренными или россыпными месторождениями. Однако технология подземного выщелачивания сопряжена с определенными проблемами, такой как кольматация фильтровой части и отстойников технологических откачных и закачных скважин и, как следствие, падение параметров добычи, скорости отработки и выхода металла. В данной работе рассматриваются условия причины возникновения кольматации технологических как откачных, так и закачных скважин, проведен анализ применяемых методов ремонтно-восстановительных работ, для решения проблемы кольматации и восстановления параметров добычи в целом, а также сроки межремонтных циклов. Применяемые методы ремонтно-восстановительных работ не во всех случаях дают хороший результат, так как для каждого блока, ячейки и отдельно скважины необходимо детальное изучение параметров добычи и геологическое строение разреза. Также приведен расчет скорости осаждения кольматанта в разрезе ствола технологической скважины и предложены рекомендации по откачке раствора из скважины. Тщательный анализ и изучение проблемы кольматации позволит найти решение и в конечном итоге повысить и восстановить эффективность работы технологических скважин, уменьшить время отработки блока и увеличить рентабельность добычи металла.

Ключевые слова: добыча урана, подземное скважинное выщелачивание, кольматация, ремонтно-восстановительные работы

ANALYSIS OF THE WELL COLMATATION PROBLEM ON THE URANIUM FIELDS IN SITU LEACHING DEVELOPMENT

Chekulaev A.V.

OOO NPC «GeoMIR», Saint-Petersburg, e-mail: Alexchekulaev09@ya.ru

The gradual increase in the demand for energy leads to a natural increase in the share of nuclear power in the world. Only uranium is used as the main fuel of nuclear power plants. The issue of exploration and development of uranium deposits remains topical. The development of uranium deposits of sandstone type is carried out by the in situ leach method. The ISL method proved to be efficient, cost-effective, environmentally friendly, and also allows the development of deposits with low economic concentrations in comparison with indigenous or placer accumulation. However, the in situ leaching technology involves certain problems, such as colmatation of the well filter and dib hole of technological pumping and injecting wells, and as a result, the decreasing of rate production parameters, the speed of development and metal extraction. In this paper, the conditions of colmatation formation in both pumping and injecting wells are considered, the analysis of the applied methods of repair and restoration works, the solution of the colmatation problem and recovery of the production parameters in general, and time of interrepair maintenance. The methods of interrepair maintenance work widely used in all cases do not give a good result, so detailed study of the production parameters and the geological structure of the section is necessary for each block, node and well. Also, the calculation of the colmatation settlement in the section of the well is given and recommendations for pumping the solution out of the well are proposed. Careful analysis and study of the colmatation problem could help to find a solution to improve and restore the efficiency of technological wells, reduce the time of the node exploitation and increase the development profitability.

Keywords: uranium development, in situ leaching, colmatation, interrepair maintenance

Для обеспечения большим количеством энергии регионов, не располагающих возможностью использования природных возобновляемых ресурсов, широко применяется ядерная энергетика (атомная энергетика). В настоящее время в качестве такого материала используется исключительно уран. В связи с этим спрос на уран постепенно увеличивается. А значит, требуется применение и дальнейшее развитие эффективных методов поиска, разведки и разработки месторождений урана.

Для эффективной, рентабельной и экологически чистой разработки месторождений урана инфильтрационного типа применяется метод подземного скважинного выщелачивания (ПСВ). Подземное выщелачивание – метод добычи урана путем избирательного его растворения химическими реагентами из руд на месте их залегания и последующего извлечения из урансодержащих растворов [1]. Выщелачивание в целом – сложный гетерогенный процесс взаимодействия кислотного раствора с твердым

веществом – рудой. В качестве кислотного раствора чаще всего используется серная кислота, так как она самая распространенная, самая дешевая, малолетучая.

Скорость и эффективность выщелачивания зависит от многих факторов: типа вскрываемых минералов, вида и концентрации выщелачивающего реагента, величины удельной поверхности вскрываемого минерала, режимов работы технологических скважин.

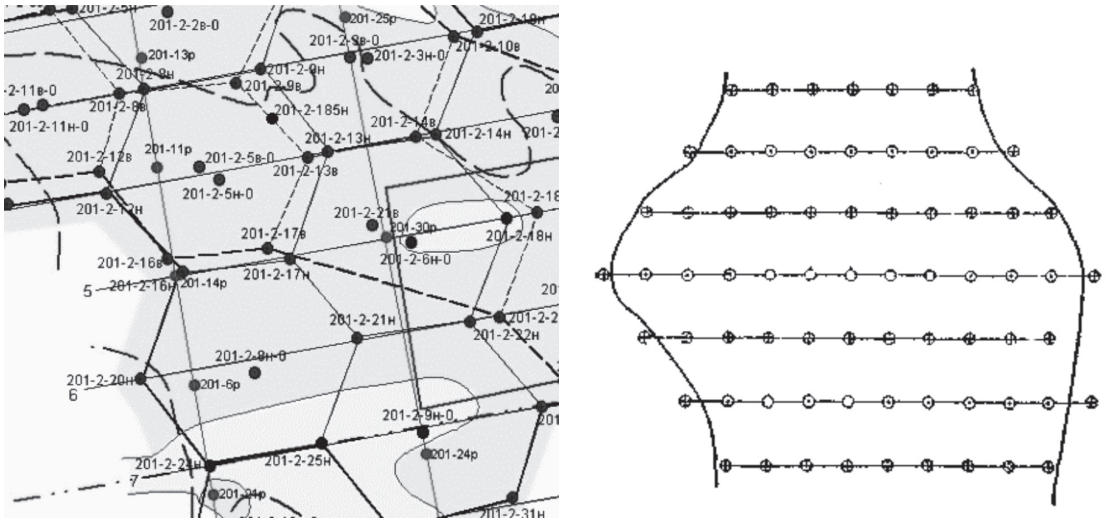
Однако не всегда удается достичь постоянных режимов работы технологических скважин. В процессе разработки ухудшается приёмистость закачных скважин и дебит откачных скважин, падает содержание металла в пробах. Причин этому несколько – постепенная кольматация фильтров и прифильтровой зоны скважин, неправильное расположение скважинных фильтров в продуктивных пластах из-за слабой изученности геологического разреза, уменьшение проницаемости межскважинного пространства. [2] На рис. 2 представлен режим работы откачной скважины. Процесс кольматации происходит по возрастающей кривой, дебит откачной скважины, как правило, уменьшается в 3–4 раза за счет уменьшения проницаемости среды с 10–12 м^3/час до 3–4 м^3/час и постоянно требуются ремонтно-восстановительные работы (РВР). Как видно из графика, срок межремонтных циклов (МРЦ) применяемых методов ремонтно-восстановительных работ составляет 10–20 дней. Это говорит о недостаточной эффективности этих РВР.

Для обеспечения нормальных и эффективных режимов работы скважин требуется тщательный подход и анализ применяемых методов РВР. Широко применяются такие методы РВР, как:

– Эрлифтная прокачка (ЭР);
– Гидродинамическая обработка (ГДО);
– Гидросвабирование (ГС);
– Пневмоимпульсная обработка (ПО);
– Химическая обработка Бифторид аммония (БФА);
– Установка освоения скважин (УОС);
– Установка роторного бурения (УРБ);
– Комплексная обработка – применение пневмоимпульсной прокачки, и после эрлифтной прокачки для выноса шламовой смеси с забоя скважины (К-1).

Опытным путем доказана эффективность применения методов РВР для разных типов скважин: закачные скважины чаще всего обрабатываются ПО, ЭР и К1. Откачные в свою очередь обрабатываются методами ГДО, ГС, ЭР и БФА. УОС и УРБ применяются в случае критической зашламленности отстойника и фильтра скважин.

Для расчета МРЦ для каждого метода был взят средний показатель для каждого вида ремонтных работ скважин (месторождение Центральный Мынкудук), за каждый месяц 2016 г. Проанализировав применяемые методы РВР, рассчитали средний МРЦ для каждого из них. (см. табл. 1).



а) *б)*

Рис. 1. План технологического блока 201-2. Восточный Мынкудук (респ. Казахстан). а) гексагональные ячейки разработки блока. В центре ячеек гексагональной формы расположены откачные скважины, в углах ячейки закачные скважины; б) рядовая схема отработки. Ряд откачных скважин чередуется рядом закачных скважин

Рис. 2. Режим работы откачной скважины месторождения Инкай

Таблица 1

Средний МРЦ по всем видам РВР за 2016 г.

Вид РВР	Средний МРЦ за год
Эрлифтная прокачка (ЭП)	21,5
Гидросвабирование (ГС)	20,4
Гидродинамическая обработка (ГДО)	19,7
Пневмообработка (ПО)	19,2
Химобработка – бифторид аммония (Х/О – БФА)	28,6
Комплекс-1 (К-1)	19,6
Гидросвабирование + химобработка (ГС + Х/О)	48,8
Гидродинамическая обработка + химобработка (ГДО + Х/О)	53,8
Установка роторного бурения (УРБ + ЭП)	22,8

Изучение отстойников технологических скважин показало, что большинство отстойников заполнены глинистым и песчаным кольматантом практически полностью или наполовину. Хотя в этих скважинах применяются меры по прокачке и выносу этого кольматанта из отстойной части, зачастую они недостаточно эффективны, и весь глинистый раствор остается на забое скважины и постепенно уплотняется. А в некоторых случаях и сам фильтр забит этим песчано-глинистым кольматантом на несколько метров. Согласно регламентам, протяженность отстойной части технологических скважин составляет 11 метров. Длина фильтра зависит от мощности вскрываемого рудного тела и может колебаться от 6 до 12 метров. Вскрываемые породы – мелко-среднезернистые Пески с многочисленными прослойками глин и гравия. Коэффициент фильтрации отдельных водоносных слоев колеблется в более узком диапазоне – от 2,2 до 18,7 м/сут. [3].

Был выполнен расчет минимальной скорости откачки раствора, необходимого для поднятия частиц на поверхность.

В любой материальной среде скорость падения будет меньше из-за сопротивления среды движению падающего тела. Если принять, что зерно минерала имеет форму шара и что падение его происходит в спокойной среде, то на зерно будут действовать три силы – сила тяжести Q, выталкивающая сила среды (Архимеда) $Q_{выт}$ и сила сопротивления среды R.

В начальный момент времени скорость осаждения зерна частицы мала, поэтому сила сопротивления вмещающей среды также мала и сила тяжести превышает силу сопротивления среды и архимедову силу, частица движется с ускорением. Со временем происходит увеличение скорости осаждения, сила сопротивления также увеличивается и быстро устанавливается равновесие сил:

$$\frac{\pi d^3}{6}\rho_ч \cdot g = \frac{\pi d^3}{6}\rho_ч \cdot g + \zeta \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_{ср} W_{ос}^2}{2}, \quad (1)$$

$$\frac{\pi d^3}{6}(\rho_ч - \rho_{ср})g = \zeta \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_{ср} W_{ос}^2}{2}, \quad (2)$$

где d – диаметр идеальной шаровой частицы, м;

$\rho_ч$ и $\rho_{ср}$ – плотности частицы и среды, кг /м^3;

g – ускорение силы тяжести (9,81м / с^2);

ζ – коэффициент сопротивления среды.

Из данного равенства можно вывести предельную скорость осаждения

$$W_{ос} = \sqrt{\frac{4g}{3\zeta} d \frac{\rho_ч - \rho_{ср}}{\rho_{ср}}}. \quad (3)$$

Для определения скорости осаждения зерна частицы необходимо знать величину коэффициента сопротивления, который, в свою очередь, является однозначной функцией критерия Рейнольдса. Существуют три различных режима движения частиц в среде. Каждому из трех режимов соответствует определенный характер зависимости коэффициента сопротивления от критерия Рейнольдса [4]:

Таблица 2

Зависимость коэффициента сопротивления от критерия Рейнольдса

Область Стокса	Переходная область	Автомодельная область
$Re = 10^{-4} – 2$	$Re = 2 – 500$	$Re = 500 – 2·10^5$

В данном случае был рассмотрен Автомодельный режим – область действия квадратичного закона сопротивления Ньютона, имеет место при $Re = 500 – 2·10^5$. Здесь коэффициент сопротивления можно принять постоянным: $\varsigma = 0,44$. Полученное уравнение предельной скорости осаждения подходит для частиц миллиметровых размеров:

$$W_{ос} = 5,45\sqrt{d\frac{\rho_ч - \rho_{ср}}{\rho_{ср}}}. \quad (4)$$

Минералогический и гранулометрический анализ осадков, полученный во время прокачки закачных скважин, показывает, что они состоят из песка тонко – мелко – среднезернистого кварцевого, с примесью алевритоглинистого материала. Размер частиц в основном от 0,25 мм до 0,05 мм. В пробах из отдельных скважин были обнаружены частицы диаметром более 1 мм. Все пробы содержат глинистые частицы (менее 0,05 мм) от 5 до 45 %. Для расчета был взят средний максимальный размер (0,25 мм), так как эти частицы имеют большую скорость осаждения, чем меньшие по диаметру. Плотность частицы = 2,46 г/см^3; плотность флюида = 1,032 г/см^3.

Таким образом, $W_{ос}$ = 11,40 см/сек, для частиц формы идеального шара.

Скорость осаждения частиц неправильной формы будет меньше:

$$W'_{ос} = \varphi W_{ос}, \quad (5)$$

где φ – коэффициент формы, представляющий собой отношение поверхности равновеликого шара к реальной поверхности частицы. Для овальных частиц $\varphi \approx 0,77$, для угловатых $\varphi \approx 0,66$, для продолговатых $\varphi \approx 0,58$, для пластинчатых $\varphi \approx 0,43$.

Таблица 3

Рассчитанная скорость осаждения для каждого типа частиц

Тип частиц	Скорость осаждения, м/сек
Овальные	0,0781
Угловатые	0,0669
Продолговатые	0,0588
Пластинчатые	0,0436

Получаем, что минимальная скорость осаждения частиц 4,36 см/сек, максимальная 7,81 см/сек.

Объём скважины стандартной технологической откачной скважины = 4,311 м^3. Найдем минимальный объемный поток:

$$V_{min} = WS, \quad (6)$$

где скорость течения жидкости W равна максимальной скорости осаждения $W_{ос}$.

Площадь поперечного сечения S примем для диаметра 169 мм, так как для меньшего сечения понадобится меньшая скорость. Верхняя часть ПВХ 195/13, соответственно площадь = 0,0224 м^2.

Тогда

$$V_{min} = 0,00175 \text{ м}^3/\text{сек} = \\ = 6,303 \text{ м}^3/\text{час} = 151,27 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Таким образом, минимальный объемный поток должен составлять не менее 6,303 м^3/час или 151,27 м^3/сут. Оборудование и насосы, используемые для откачки флюида из скважины, как технологические, так и ремонтно-восстановительные, должны обладать скоростью откачки более 150 м^3/сут. В противном случае осадка кольматанта и его последующее уплотнение в отстойнике скважины неизбежны. Регулярные геофизические исследования технологических скважин наглядно показывают, что отстойная часть скважин постепенно кольматируется, а в некоторых случаях закольматирована часть фильтровой колонны.

Контрольные измерения состояния фильтровой части технологических скважин проводятся при помощи расходометрии. Применяется вертушечный скважинный расходомер, диаметром 42 мм. Перед проведением измерений проводится токовый каротаж для детальной привязки фильтровой части по глубине, а также для уточнения глубины отстойной части. После этого расходомер опускается ниже зоны фильтра, затем включается подача раствора в скважину с устья до уровня «зеркала». Измерения расходомера проводятся при подъеме. Привязка данных расходометрии осуществляется по данным токового каротажа (см. рис. 3).

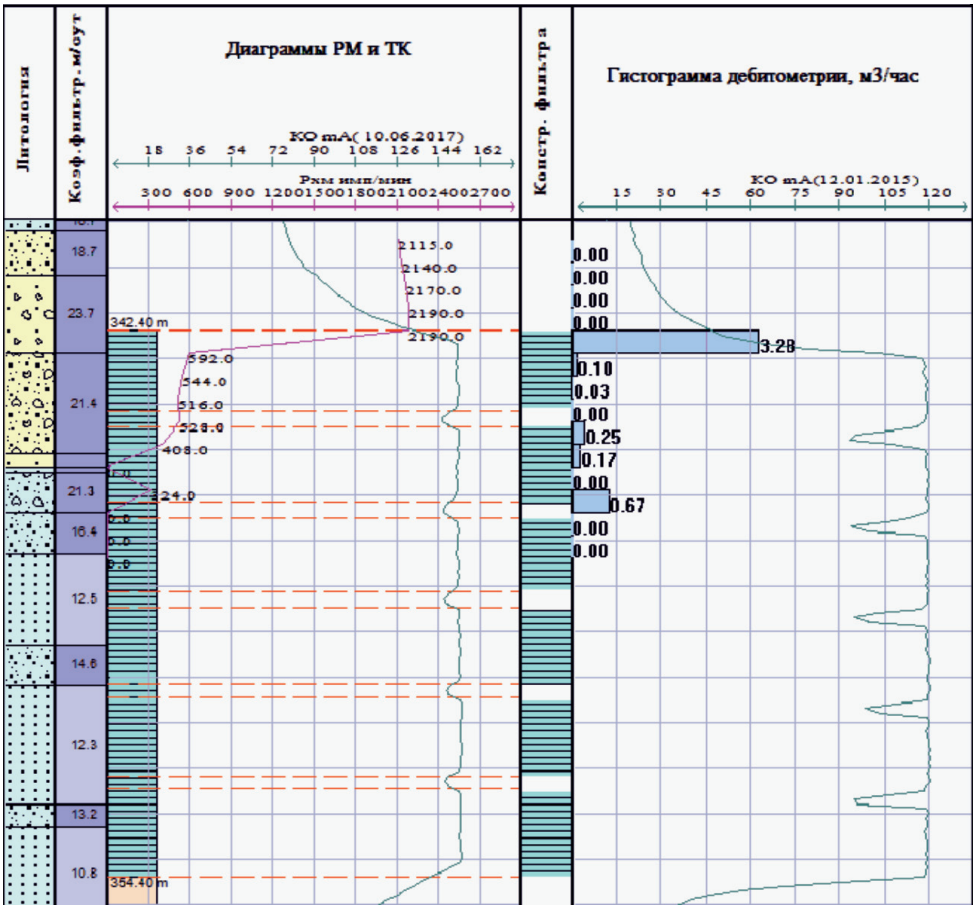


Рис. 3. Данные расходометрии и токового каротажа на одной из технологических скважин

На рис. 3 видно, что кривая токового каротажа четко отображает муфты фильтровой колонны, тем самым позволяя сделать точную привязку фильтра по глубине, и, соответственно, привязать данные других измерений. Также следует отметить, что кривая ТК зачастую позволяет обнаружить нарушение колонны. Кривая расходометрии (розовая линия) показывает, что значительная часть объема раствора уходит в верхней части колонны. Это обусловлено такими причинами, как общая закольматированность фильтра и высокопроницаемые крупнозернистые породы в верхней части фильтровой колонны. Удельный расход раствора на момент измерения составляет 4,5 м^3/час. Этот показатель достаточно мал, так как максимальная приёмистость (в данном случае это удельный расход) должна составлять порядка 10–12 м^3/час. Таким образом, из 12 метров интервала фильтра, работает лишь верхние 4 метра, что негативно сказывается на режиме работы скважин и на скорости отработки залежи в целом.

Анализ исследований технологических скважин наглядно показывает необходимость использования специальных методов РВР в скважинах для прочистки фильтровой и отстойной частей колонны, а также применения мер для предотвращения кольматации откачных и закачных скважин. Представленные расчеты по оседанию разнодисперсных частиц кольматанта позволят выбирать насосное и ремонтно-восстановительное оборудование для успешного решения проблемы кольматации скважин.

Список литературы

1. Носков М.Д. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – 83 с.

2. Темирханова Р.Г. Дополнительные задачи геофизических методов исследования скважин при отработке месторождений урана методом подземного выщелачивания / Р.Г. Темирханова // Проблемы и перспективы развития геол. кластера: Образование – Наука – Производство. – 2014. – С. 257–260.

3. Язиков В.Г., Легавко А.В. Особенности проведения геофизических исследований в скважинах при изучении и освоении инфильтрационных (гидрогенных) месторождений урана. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 95 с.

4. Тураев Н.С., Жерин И.И. Химия и технология урана: учебное пособие для вузов. – М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2005. – С. 83–89.

5. Горбатенко О.А. Некоторые аспекты механической кольматации при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания / О.А. Горбатенко // Актуальные проблемы урановой промышленности. – 2014. – С. 197–208.

References

1. Noskov M.D. Dobycha urana metodom skvazhinnogo podzemnogo vyshhelachivanija. Seversk: Izd-vo STI NIJaU MIFI, 2010. 83 p.

2. Temirhanova R.G. Dopolnitelnye zadachi geofizicheskih metodov issledovanija skvazhin pri otrabotke mestorozhdenij urana metodom podzemnogo vyshhelachivanija / R.G. Temirhanova // Problemy i perspektivy razvitija geol. klastera: Obrazovanie-Nauka-Proizvodstvo. 2014. pp. 257–260.

3. Jazikov V.G., Legavko A.V. Osobennosti provedenija geofizicheskih issledovanij v skvazhinah pri izuchenii i osvoenii infiltracionnyh (gidrogennyh) mestorozhdenij urana. Tomsk: Izd-vo TPU, 2012. 95 p.

4. Turaev N.S., Zherin I.I. Himija i tehnologija urana: uchebnoe posobie dlja vuzov. M.: CNIIATOMINFORM, 2005. pp. 83–89.

5. Gorbatenko O.A. Nekotorye aspekty mehanicheskoj kolmatacii pri dobyche urana metodom podzemnogo skvazhinnogo vyshhelachivanija / O.A. Gorbatenko // Aktualnye problemy uranovoj promyshlennosti. 2014. pp. 197–208.