

УДК 550.8.014; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2023-3.09>
<https://orcid.org/0000-0002-1067-9163>
<https://orcid.org/0000-0002-1099-5617>
<https://orcid.org/0000-0002-8299-5632>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭТАПОВ ПЕСКОПРОЯВЛЕНИЯ НА НЕГЛУБОКИХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ



А.А. КОЖАГУЛОВА,
PhD, ассистент-профессор,
a.kozhagulova@aogu.edu.kz



А.Д. ШАБДИРОВА,
PhD, ассистент-профессор,
a.shabdirova@aogu.edu.kz



Е.Р. САМЕНОВ,
научный сотрудник,
emazar.samenov@aogu.edu.kz

АТЫРАУСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА ИМ. САФИ УТЕБАЕВА,
Республика Казахстан, 060000, г. Атырау, ул. Баймуханова, 45а

Описывается новый экспериментальный метод и Система консолидации высокого давления (СКВД) для изучения поведения песка в слабых песчаниковых резервуарах. В лабораторных условиях были воссозданы геонапряжения, происходящие при осадконакоплении горных пород, перфорации и пескопроявлении в полевых условиях с использованием крупного искусственного образца. В ходе эксперимента удалось подробно исследовать явление выноса песка, при котором горное и поровое давление полностью контролировались с помощью компьютера.

Система консолидации высокого давления позволяет изучать поведение однофазных и многофазных потоков в пористой среде при реалистичных пластовых давлениях, что позволяет моделировать различные сценарии эксплуатации скважин, включая различные коэффициенты истощения и содержание нефти и воды. В работе приведены результаты комплексного эксперимента на искусственном песчанике с использованием цемента на основе силиката натрия.

Эксперимент был разделен на три последовательные стадии, включая подготовку образцов с цементированием, перфорацию при реалистичном граничном напряжении. Наблюдаемое поведение выноса песка в лаборатории схоже с фактическим поведением на месторождениях, где при достижении критической скорости потока происходит вынос песка, а превышение этой скорости вызывает меньший выброс песка. Снимки скважины, полученные на разных этапах эксперимента, предоставляют ценную информацию о выносе песка на реальных месторождениях и могут помочь в проверке аналитических моделей для прогнозирования объема и поведения пескопроявлений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вынос песка, пескопроявления, экспериментальные геомеханические работы, неустойчивость околоскважинной зоны

ТАЯЗ МҰНАЙ КЕН ОРЫНДАРЫНДА ҚҰМНЫҢ ПАЙДА БОЛУ КЕЗЕҢДЕРІН ЗЕРТТЕУ

А.А. КОЖАГУЛОВА, PhD, ассистент-профессор, АМГУ, a.kozhagulova@aogu.edu.kz
А.Д.ШАБДИРОВА, PhD, ассистент-профессор, АМГУ, a.shabdirova@aogu.edu.kz
Е.Р.САМЕНОВ, АМГУ, ernazar.samenov@aogu.edu.kz

СӘФИ ӨТЕБАЕВ АТЫНДАҒЫ АТЫРАУ МҰНАЙ-ГАЗ УНИВЕРСИТЕТІ
 060000, Баймұханов көшесі 45/а, Атырау, Қазақстан

Бұл мақалада Жоғары Қысымда Нығыздау Жүйесі (ЖҚНЖ) және әлсіз құмтастан құралған мұнай қабаттарындағы құм шығу проблемасын зерттеудің жаңа тәжірибелік әдісі ұсынылған. Зертханалық жағдайларда тау жыныстарының шөгү, перфорация және құм өндіру үдерісі кезіндегі геостресс жағдайлары үлкен жасанды сынамааны пайдаланып қайталанды. Тәжірибе барысында компьютердің көмегімен тау жыныстары мен кеуектер қысымдары толығымен бақыланатын құм шығу құбылысын жан-жақты зерттеу жүргізілді.

Жоғары қысымда нығыздау жүйесі сонымен қатар әртүрлі сарқылу факторлары мен су-мұнай арақатынастарын енгізу сияқты ұңғымаларды пайдаланудың әртүрлі сценарийлерін модельдеу үшін нақты қабат қысымында кеуекті ортадағы бірфазалы және көпфазалы ағынның тәртібін зерттеуге мүмкіндік береді. Мақалада натрий силикаты негізіндегі цементті пайдалана отырып, жасанды құмдақтағы кешенді эксперименттің нәтижелері келтірілді.

Эксперимент цементтеу арқылы сынамааны дайындауды, нақты шекаралық кернеу жағдайында перфорациялауды қамтитын үш жүйелі сатыға бөлінді. Зертханада байқалған құм шығу әрекеті кен орындарындағы нақты құм шығу тәртібіне ұқсайды, мұнда шекті ағын жылдамдығына жету құмның шығуына түрткі болады, ал шекті ағын жылдамдығынан асып кету құмның азырақ шығуына әкеледі. Тәжірибенің әртүрлі кезеңдерінде алынған ұңғыма оқпанының суреттері кен орындарындағы құм шығу туралы құнды мәліметтер береді. Бұл сонымен қатар құм шығу көлемі мен әрекетін болжау үшін аналитикалық модельдерді тексеруге көмектеседі.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: құм шығу, құмның пайда болуы, эксперименттік геомеханикалық жұмыстар, ұңғыма маңындағы тұрақсыздық.

STUDY OF SAND PRODUCTION STAGES IN SHALLOW OIL FIELDS

A.A. KOZHAGULOVA, PhD, assistant-professor, AOGU, a.kozhagulova@aogu.edu.kz
A.D.SHABDIROVA, PhD, assistant-professor, AOGU, a.shabdirova@aogu.edu.kz
E.R.SAMENOV, AOGU, ernazar.samenov@aogu.edu.kz

SAFI UTEBAYEV ATYRAU UNIVERSITY OF OIL AND GAS,
 45a, Baimukhanov str., Atyrau, 060000, Republic of Kazakhstan

This article presents the High Pressure Consolidation System (HPCS) and a new experimental method for studying sand behavior in weak sandstone reservoirs. Under laboratory conditions, geostress conditions during the process of rock sedimentation, perforation, and sand production were replicated using a large artificial sample. A comprehensive investigation of sand production phenomena was conducted, where rock and pore pressures were fully controlled throughout the experiment using a computer. The HPCS also allows the study of single-phase and multiphase flow behavior in porous media at realistic reservoir pressures to model various well exploitation scenarios, such as implementing different depletion factors and water-oil ratios. The study presents the results of a comprehensive experiment on artificial sandstone prepared with a sodium silicate-based binder in three sequential stages involving sample preparation with downhole cementing,

perforation under realistic boundary stress conditions. The observed sand production behavior in the laboratory closely resembled the actual sand production behavior in field locations, where reaching the critical flow rate results in sand production, and exceeding the critical flow rate leads to a smaller sand ejection. Images of the wellbore obtained at different stages of the experiment provide valuable information about sand production in field locations. This can also aid in validating analytical models for predicting the volume and behavior of sand production.

KEY WORDS: sand production, geomechanical experiments, near wellbore region failure

Введение. Поскольку вынос песка (рисунок 1) является известной проблемой на протяжении нескольких десятилетий, в литературе представлено множество экспериментальных подходов. Вынос песка Лабораторные эксперименты проводились на образцах различного размера и материала.

Так, к примеру, Тронволл и др. [1] проводили эксперименты на образцах искусственного песчаника диаметром 100 мм и высотой 150 мм для изучения влияния анизотропии напряжений на вынос песка. В свою очередь Николсон и др. [2] проводили эксперименты на песчаниках с четырех различных горных обнажений, при этом размер образцов составлял 150 мм в диаметре. Папамихос и др. [3] использовали аппарат с полым цилиндром, вмещающий образцы песчаника диаметром 200 мм. Увеличение размеров исследуемых образцов снижает эффект влияния стенок, как граничных условий и позволяет лучшим образом воссоздать полевые условия. В данном исследовании более крупный образец диаметром 300 мм обеспечивает в 2,25 раза большую площадь поверхности по сравнению с образцом диаметром 200 мм и в 9 раз больше, чем наиболее часто встречающийся тип образца диаметром 100 мм. Увеличенная поверхность образца снижает влияние граничных условий на результаты перфорации и выноса песка из скважины.

К тому же, в предыдущих исследованиях, действие гравитации на вертикальную транспортировку песка в добыче не учитывается, так как используется экспериментальная установка с донной песколовкой для улавливания полученного песок из образца [3–6]. Поэтому в нашем исследовании рассматривается вертикальное направление потока.

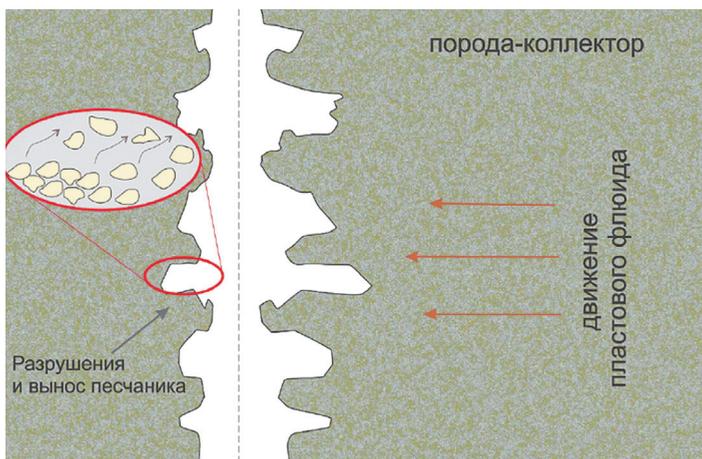


Рисунок 1 – Иллюстрация выноса песка из нефтяных скважин

Многие предыдущие схемы экспериментов по выносу песка обычно разделяют основные этапы подготовки образцов, перфорации и производства песка. К сожалению, нарушение между разделением этих стадий вызывает образование трещин в слабом песчанике в условиях снятия напряжения из-за разрыва локализации между этими стадиями [7,8]. Таким образом, важной особенностью нового оборудования, представленного в данной работе, является ограниченное воздействие на материал во время перехода между основными этапами: подготовка образца (консолидация и цементация), насыщение, перфорация на месте и образование песка. Другим ограничением предыдущих экспериментов было то, что перфорация образца не рассматривалась. Эксперименты по выносу песка в основном проводились с использованием полого цилиндра, а центральное отверстие было создано путем помещения металлического стержня в центр литейной формы и извлечения после завершения процесса отверждения [9]. Этот метод подготовки образца ограничивает зону повреждения около отверстия, что в значительной степени влияет на объем выноса песка [10]. Следовательно, создание перфорационного канала путем непосредственной перфорации образца должна быть включена в конструкцию аппарата.

Преимуществом представленного в данном исследовании аппарата также является возможность работы с двухфазным потоком жидкости, ведь режим добычи нефти и песка зависит от физических свойств разных жидкостей, присутствующих в околоскважинной зоне и их взаимодействия между собой [2,3,11]. Предыдущие эксперименты проводились с одной жидкостью, как соляной раствор воды [12–14], парафиновое масло [3], дизельное топливо [15], вода [11,16] и керосин [2].

Представленная в данной работе Система Консолидации Высокого Давления (КВД) позволяет изучение поведения выноса песка из слабоконсолидированных коллекторов, склонных к пескообразованию. Аппарат разработан таким образом, что напряжения и давления жидкости можно контролировать на протяжении всего процесса пробоподготовки, консолидации материала и диагенеза, перфорации и выноса песка в условиях как однофазного, так и многофазного потока жидкости. Так как, зачастую, механические свойства слабоконсолидированных пород-коллекторов не позволяют качественную пробоподготовку, были использованы образцы искусственного песчаника, с сопоставимыми реальным механическими и фильтрационными свойствами. Для сведения к минимуму нарушения слабого материала, образцы были далее использованы для изучения перфорации и выноса песка в той же экспериментальной установке. В данной работе представлены конструкция и функции Система КВД, процедура тестирования и производительность системы в экспериментальной работе, которая имеет ряд следующих основных преимуществ:

1. Ограниченное непреднамеренное нарушение образца и постепенный переход между основными этапами эксперимента (подготовка образца, цементация, насыщение, перфорация и вынос песка).

2. Проведение перфорации in-situ.

3. Возможность реализации однофазного или двухфазного потока.

4. Восходящее направление оттока добываемой смеси флюида и песка.

5. Большой размер образца: 300 мм в диаметре.

Материалы и методы исследования. Система КВД способна воспроизводить полевые условия с точки зрения нагрузки и резервуарного давления, а уплотнение ма-

териала, в свою очередь, достигается вертикальной нагрузкой. По мере увеличения вертикального напряжения во время сжатия, для имитации напряжения вышележащей породы, а горизонтальное напряжение увеличивается из-за предотвращения бокового расширения, что похоже на состояние напряжения в аппарате Rowe Cell [17]. По мере достижения целевой вертикальной нагрузки, что подтверждается датчиком нагрузки, вертикальное напряжение поддерживается управляемой компьютером системой нагружения. Фиксированное горизонтальное напряжение пропорционально вертикальному напряжению, подобно процессу диагенеза в естественных условиях.

Описание СКВД. СКВД оснащена сервогидравлической сжимающей рамой грузоподъемностью 5000 кН (рисунок 2) для приложения вертикальной сжимающей силы к образцу заданного диаметра, помещенному в жесткую цилиндрическую форму. Образец при вертикальном сжатии зажат между верхней и нижней плитами внутри жесткой цилиндрической стенки. Нижняя плита и крышка образуют полую форму, которая толкается снизу вверх с помощью гидравлического цилиндра силовой рамы, так что образец внутри сжимается верхней крышкой, соединенной с неподвижной верхней частью силовой рамы. Таким образом образец подвергается вертикальному сжатию внутри силовой рамы. Процесс сжатия может применяться с контролируемым напряжением или контролируемым напряжением с определенной скоростью до тех пор, пока не будет достигнуто целевое напряжение покрывающей породы.

Схема устройства показана на рисунке 2. Система КВД полностью управляется компьютером для контроля нагрузки и порового давления. На принципиальной схеме камера сжатия для образцов (2) соединена с гидроприводом (3) и подключена к компьютеру (4); после того, как образец правильно установлен в системе, оператору нужно только указать целевое значение вертикального напряжения и скорость увеличения в программном обеспечении, и нагружение будет выполняться автоматически. Камера сжатия (2) связана с проточной системой, где она расположена



Рисунок 2 – Схема Системы Консолидации Высокого Давления (КВД)

между резервуаром подачи жидкости (5) и резервуаром оттока (6). Входящий поток нагнетается многофазным насосным агрегатом (7) и подается в образец через ряд портов, установленных на дне и сбоку образца, тогда как выходной поток направляется вверх и в выпускной резервуар. Поток в образец можно управлять с помощью блока управления клапаном (8) для имитации различных направлений потока. Поток жидкости можно нагнетать через разные отверстия на стенке камеры и на нижней плите, так что, несмотря на то, что радиальный поток может происходить из отверстий в стенке, вертикальный поток может происходить от нижних отверстий к центральному вертикальному отверстию. Кроме того, порты на стенках и на дне могут активироваться независимо, чтобы обеспечить только одно направление потока (радиальное или вертикальное) или оба направления. Для моделирования многофазного потока с помощью СКВД из разных резервуаров могут подаваться разные жидкости. В условиях многофазного потока образец можно пропитать маслом с помощью цилиндра давления воздуха/жидкости, а отдельный насос высокого давления можно использовать для нагнетания воды в нефтенасыщенный образец во время производства песка. Насос высокого давления также может поддерживать многофазный поток, когда на входе в насос можно смешивать различные жидкости из разных резервуаров для более сложных условий испытаний. Скорость оттока можно непрерывно измерять с помощью узла расходомера (сog1-потока), и это измерение можно использовать в качестве информации обратной связи для многофазного насосного агрегата (4) с целью регулировки входного давления. Также он обеспечивает скорость потока в режиме реального времени при испытании с контролируемым давлением жидкости. Образовавшиеся частицы песка отфильтровываются и система измерения песка (10), а вода после фильтрации может быть возвращена в систему водоснабжения или может быть сброшена в резервуар оттока.

Пробоподготовка. Изготовление образцов непосредственно в камере было достигнуто путем смешения песка и цементного материала. В данной работе цементация была активирована путем подачи углекислого газа из баллона с промышленным газом в камеру через отверстия для нагнетания жидкости. Газообразный диоксид углерода вводился в образец и нагнетался в поровое пространство образца в течение 40-60 минут, когда выпускной клапан был оставлен открытым, со скоростью 5 л/мин и под давлением 500 кПа. Радиальные напряжения росли по сравнению со значениями в конце этапа консолидации, в то время как вертикальное напряжение не менялось, так как оно поддерживалось системой нагружения, управляемой компьютером. Цементные связи были созданы в виде кремниевой кислоты, образующейся в результате химической реакции между силикатом натрия и газообразным диоксидом углерода [7], которую можно представить как:



Мольное соотношение раствора силиката натрия и углекислого газа равно их массовому соотношению. Приблизительно 293 г или 148 л CO₂ необходимо для реакции с 2,3 кг раствора силиката натрия, смешанного внутри образца, что может быть обеспечено поддержанием давления газа CO₂, вводимого в образец, когда выпускной клапан закрыт в течение 25-30 минут. Измерения радиального напряжения колебались, когда поток газа был запущен, а стабилизировался во время процесса

цементирования. Более высокое значение остаточного напряжения было достигнуто в конце цементации, что может отражать тенденцию к объемному расширению, связанной с межгранулярной цементацией. С другой стороны, вертикальное напряжение было постоянным на протяжении всего процесса, так как оно поддерживалось системой управления гидравлической рамой. Процесс цементации считался завершенным, когда все показания становились стабильными.

Система КВД изготовлена из высокопрочных и антикоррозионных материалов для сохранения целостности в условиях испытаний под высоким давлением и защиты от абразивных материалов мелкозернистого песка и агрессивных химикатов, когда в эксперименте исследуются рассолы и различные виды сырой нефти.

Цементацию можно активировать при любом выбранном уровне напряжения, а отверждение происходит при сохранении условия граничного напряжения. Таким же образом можно тестировать выбуренные керны при условии обрезки до точных размеров камеры, однако для таких образцов потребуются специальные методы извлечения в полевых условиях.

Результаты и обсуждение. Поток жидкости был запущен с небольшим расходом 0.92-1 л/мин для подъема и удаления песчаных обломков, образовавшихся во время перфорации, перед первой стадией выноса песка. На первом этапе было приложено вертикальное напряжение 1000 кПа, а затем было применено понижение давления в 100 кПа, что обеспечило установившийся расход жидкости в 1.2 л/мин в течение примерно 20 минут, однако песка не наблюдалось. Давление понижения было увеличено до 400 кПа, а затем до 800 кПа, и испытания продолжались аналогичным образом, но при расходе до 2.7 л/мин песка все еще не наблюдалось. В связи с этим авторы пришли к выводу, что при таком уровне горного напряжения и в этом диапазоне давления, сравнимом с аналогичным на месторождении, песок не выносятся. Поток был медленно остановлен, а вертикальное напряжение было увеличено до 2000 кПа на следующем этапе. Были применены различные давления при понижении давления, однако аналогичным образом при скорости жидкости до 2.6 л/мин песок не выносился. Поток снова был остановлен, а вертикальное напряжение увеличили до 3000 кПа, во время которого сначала был собран песок весом 1.1 г при скорости потока 2.4 л/мин, а еще один вынос песка массой 0.8 г был получен при увеличении скорости потока до 2.8 л/мин. Была получена картина выноса песка аналогичная той, что обычно наблюдается

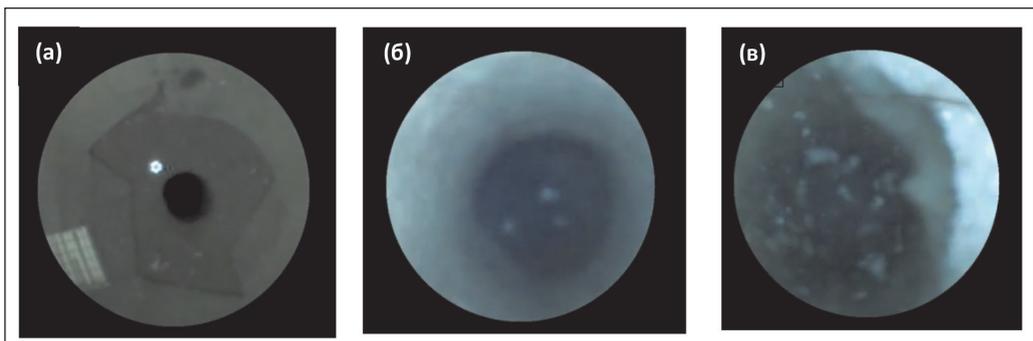


Рисунок 3 – Стадии изменения перфорации
а) до; б) во время; в) после эксперимента по выносу песка

на нефтяных месторождениях: увеличение дебита приводит к увеличению накопленного пескопроявления с меньшим приростом с каждым последующим увеличением.

Экспериментальные результаты оборудования Системы КВД можно использовать для разработки аналитических моделей для прогнозирования выноса песка [18]. Свойства материала того же цементированного песчаника, который был получен в результате серии трехосных испытаний [19] использовались для прогнозирования разрушения материала. Результаты могут быть объединены с измерениями массы песка и скорости выноса песка в экспериментах по выносу песка для разработки и калибровки аналитических моделей для прогнозирования начала и объема выноса песка с точки зрения диапазона скоростей потока жидкости, напряжений твердого тела и снижения давления в этом исследовании.

На *рисунке 3* представлены стадии изменения перфорации до, во время и после эксперимента по выносу песка. Как видно, на определенном этапе, начинают образовываться так называемые полосы сдвига. После инспекции экструдированного образца после испытания видно, что вынесенный песок поступал из перфорации и зоны пластичности вокруг полости, что было связано с распределением приложенного напряжения и взаимодействием с гидродинамическими силами потока жидкости в этой зоне. Извлеченный образец можно использовать для дальнейшего анализа микроструктурных изменений внутри образца в результате образования песка.

Заключение. В данной статье представлена Система КВД и новый экспериментальный метод для изучения поведения песка в резервуарах из слабого песчаника. В лабораторных условиях были воспроизведены условия геонапряжений во время процесса осадконакопления горных пород, перфорации и пескопроявления в полевых условиях с использованием большого искусственного образца. Удалось провести всестороннее исследование явления выноса песка, где горное и поровое давление полностью контролировались на протяжении всего эксперимента с помощью компьютера. Система КВД также позволяет изучать поведение как однофазных, так и многофазных потоков в пористой среде при реалистичных пластовых давлениях для моделирования различных сценариев эксплуатации скважины, например, путем реализации различных коэффициентов истощения и/или водонефтяного содержания.

Выводы. В работе представлены результаты комплексного эксперимента на искусственном песчанике, приготовленном с вяжущим веществом на основе силиката натрия, в трех последовательных стадиях подготовки образцов с внутрислоевым цементированием, перфорацией в условиях реалистичного граничного напряжения. Наблюдаемое поведение выноса песка в лаборатории были аналогичны фактическому поведению выноса песка на местных месторождениях, где при достижении критической скорости потока, создается вынос песка, а последующее превышение критической скорости потока вызывает еще один, хотя и меньший, его выброс. Снимки ствола скважины, полученные на различных этапах эксперимента, представляют ценную информацию о выносе песка на местных месторождениях. Это также может помочь в валидации аналитических моделей прогнозирования объема и поведения пескопроявления. 

Благодарности. Авторы выражают благодарность гранту МОН РК для молодых ученых ИРН AP13068648, а также профессору Назарбаев Университета Йонг Жао за содействие в проведении лабораторных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Tronvoll J., Skjaerstein A., Papamichos E. Sand production: mechanical failure or hydrodynamic erosion. // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* - 1997. - V. 34, N 465. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00195-0](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00195-0).
- 2 Nicholson E., Goldsmith G., Cook J. Direct observation and modeling of sand production processes in weak sandstone // *Proc. SPE/ISRM Rock Mech. Pet. Eng. Conf.* - 1998. - V. - P. 97–106.
- 3 Papamichos E., Skjaerstein F., Tronvoll J. A volumetric sand production experiment. // *Pacific Rocks.* - 2000. - P. 303–310.
- 4 Skjaerstein A., Stavropoulou M., Vardoulakis I., Tronvoll J. Hydrodynamic erosion; A potential mechanism of sand production in weak sandstones. // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* - 1997. V. 34. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00190-1](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00190-1).
- 5 Nouri A., Vaziri H., Belhaj H., Islam M. Sand-Production Prediction: A New Set of Criteria for Modeling Based on Large-Scale Transient Experiments and Numerical Investigation // *SPE J.* - 2006. - V. 11. P. 227–237. <https://doi.org/10.2118/90273-pa>.
- 6 Fattahpour V., Moosavi M., Mehranpour M. An experimental rock mechanics investigation for sand production in oil fields // *45th US Rock Mech / Geomech. Symp.* - 2011.
- 7 Holt R., Unander T., Kenter C. Constitutive mechanical behaviour of synthetic sandstone formed under stress // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* - 1993. - V. 30. - P. 719–722. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90013-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90013-4).
- 8 Alvarado G., Coop M., Willson S. On the role of bond breakage due to unloading in the behaviour of weak sandstones. // *Géotechnique.* - 2012. - V. 62. - P. 303–316. <https://doi.org/10.1680/geot.8.P.017>.
- 9 Nouri A., Vaziri H., Belhaj H., Islam R. Sand-Production Prediction: A New Set of Criteria for Modeling Based on Large-Scale Transient Experiments and Numerical Investigation // *SPE J.* - 2006. - V. 11. - P. 26–29. <https://doi.org/10.2118/90273-PA>.
- 10 Baxter D., Behrmann L., Grove B., Williams H., Heiland J., Hong L., Khong C., Martin A., Mishra V., Munro J., Safiin N., Suppiah R. Perforating - When failure is the objective. // *Oilf. Rev.* - 2009. - V. 21. - P. 4–17.
- 11 Wu B., Choi S., Denke R., Barton T., Viswanathan C., Lim S., Zamberi M., Shaffee S. A New and Practical Model for Amount and Rate of Sand Production // *Offshore Technol. Conf.* - 2016.
- 12 van den Hoek P., A.P. Kooijman, P. de Bree, C.J. Kenter, Z. Zheng, M. Khodaverdian. Horizontal-wellbore stability and sand production in weakly consolidated sandstones. // *SPE Drill. Complet.* - 2000. - V.15. - P. 274–283.
- 13 Al-Awad M. The Mechanism of Sand Production Caused by Pore Pressure Fluctuations. // *Oil Gas Sci. Technol.* - 2001. - V. 56. - P. 339–345.
- 14 Zivar D., Shad S., Foroozesh J., Salmanpour S. Experimental study of sand production and permeability enhancement of unconsolidated rocks under different stress conditions. // *J. Pet. Sci. Eng.* - 2019. - V. 181. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106238>.
- 15 Fattahpour V., Moosavi M., Mehranpour M. An experimental investigation on the effect of rock strength and perforation size on sand production. // *J. Pet. Sci. Eng.* - 2012. - V. 86–87. - P. 172–189. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.03.023>.
- 16 Wang Y., Papamichos E. Sand prediction by different criteria and validation through a hollow cylinder test // *46th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium - Chicago, IL, USA, 2012.*
- 17 Rowe P., Barden L. A new consolidation cell. // *Geotechnique.* - 1966. - V. 16. - P. 162–170. <https://doi.org/10.1680/geot.1966.16.2.162>.
- 18 Shabdirova A., Khamitov F., Kozhagulova A., Amanbek Y., Minh N., Zhao Y. Experimental and numerical investigation of the plastic zone permeability // *54th U.S. Rock Mech. Symp.* - 2020.
- 19 Kozhagulova A., Minh N., Zhao Y., Fok S., A study on bond breakage behavior of weak Cretaceous Kazakhstani reservoir sandstone analogue. // *Geomech. Energy Environ.* - 2020. - V. 21. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.100159>.