

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №2, Том 12 / 2020, No 2, Vol 12 <https://esj.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/73NZVN220.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Порошин М.А., Тананыхин Д.С., Григорьев М.Б. Анализ лабораторных методов исследования процесса пескопроявления при разработке нефтяных месторождений // Вестник Евразийской науки, 2020 №2, <https://esj.today/PDF/73NZVN220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Poroshin M.A., Tananykhin D.S., Grigorev M.B. (2020). Analysis of laboratory methods for studying the process of sand production during the development of oil fields. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 2(12). Available at: <https://esj.today/PDF/73NZVN220.pdf> (in Russian)

УДК 622.276

Порошин Максим Александрович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург, Россия
Аспирант кафедры «Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений»
E-mail: seniorsolt@ya.ru

Тананыхин Дмитрий Сергеевич

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург, Россия
Доцент кафедры «Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: Tananykhin_DS@pers.spmi.ru

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56149440000>

Григорьев Максим Борисович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург, Россия
Магистрант кафедры «Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений»
E-mail: makcum1298@mail.ru

**Анализ лабораторных методов
исследования процесса пескопроявления
при разработке нефтяных месторождений**

Аннотация. При разработке слабokonсолидированных коллекторов проблема пескопроявления становится все более актуальной. При этом сложность механизма разрушения коллектора и выноса песка не позволяет полагаться лишь на опыт разработки аналогичных месторождений. Основой для проектирования систем борьбы с пескопроявлением должны быть лабораторные эксперименты. В данной статье авторами проанализирована совокупность экспериментальных методов исследования процесса пескопроявления, доступных компаниям при составлении программы исследований для проектирования систем борьбы с выносом песка. В статье приведены методики, основные преимущества и недостатки описанных экспериментов, ссылки на статьи и конкретные практические кейсы, а также рекомендации для составления программы исследований.

Ключевые слова: пескопроявление; вынос песка; слабokonсолидированный коллектор; слабосцементированный коллектор; лабораторные эксперименты; скрин тесты; фильтрационные исследования; фильтры

Введение

В процессе добычи нефти и газа на месторождениях со слабоконсолированными коллекторами частым осложнением при работе скважин становится пескопроявление. Пескопроявлением называют комплексный процесс, включающий в себя разрушение коллектора, вынос песка в скважину и транспорт твердых частиц по её стволу. В естественных условиях пласт, не затронутый разработкой, находится в равновесии: напряженное состояние, давление, температура относительно стабильны во времени. Во время бурения и дальнейшей эксплуатации скважины происходит изменение напряжений и фильтрационно-емкостных свойств в призабойной зоне. Поток нефти, воды и газа увлекает за собой частицы песка, разрушая матрицу и цемент породы. Объемы пескопроявления могут варьироваться от 10 мг/л до экстремальных 50 г/л, например, при обрушении стенок скважины. Последствия выноса песка включают в себя эрозию подземного и наземного оборудования, снижение продуктивности скважин в результате образования песчаных пробок на забое скважины, забивки фильтров и засорения призабойной зоны. При этом согласно данным, приведенным в работе [1], около 30 % всех песчаных коллекторов склоны к пескопроявлению. Есть свидетельства, что вынос твердых частиц может происходить и в карбонатных коллекторах, сложенных оолитом [2].

Для решения проблемы пескопроявления было предложено множество способов, включая установку фильтров-хвостовиков, гравийных фильтров, расширяющихся фильтров, устройств управления потоком (inflow control device – ICD), укрепление призабойной зоны химическими составами, ограничение дебитов, оптимизация траектории скважины и технологии перфорации. Стоимость некоторых решений может быть соизмерима со стоимостью скважины. Но сложность процесса пескопроявления и многообразие пластовых условий не позволяет разработать универсальное решение или четкие критерии для выбора средств борьбы с выносом песка. В каждом отдельном случае необходимо проводить серию лабораторных экспериментов, которые являются базисом для настройки математических моделей [3] и выбора оптимального технологического решения.

Лабораторные методы исследования процесса пескопроявления

Лабораторные методы исследования процесса пескопроявления можно разделить следующим образом:

1. Геомеханические тесты для определения прочностных характеристик породы.
2. Скрин тесты, проводимые на фильтр-прессах для подбора апертуры фильтра.
3. Фильтрационные эксперименты на естественном образце керна или насыпной модели пласта.
4. Фильтрационные эксперименты, направленные на изучение механизма формирования песчаных арок.

Геомеханические тесты

Одним из основных факторов разрушения призабойной зоны является перепад давления. Когда он достигает критического значения – предела упругости – порода начинает необратимо пластически деформироваться. Для оценки максимальной депрессии на пласт, при которой не будет пескопроявления, используются геомеханические модели. В качестве исходных данных такие модели требуют прочностные характеристики породы: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел упругости, предел прочности и другие. Для определения этих характеристик

существует несколько основных методов: метод одноосного сжатия (Unconfined Compressive Strength – UCS), тест на толстостенном цилиндре (Thick-Walled Cylinder – TWC). Метод одноосного сжатия является довольно простым и дешевым, но он не учитывает поровое и боковое горное давление. Установка для одноосного сжатия представляет собой пресс и систему датчиков линейных деформаций. Тест на толстостенном цилиндре более реалистично воспроизводит процессы разрушения породы в пластовых условиях, но требует более крупных образцов керна и является более трудоемким. При этом дизайн эксперимента имитирует нагружение ствола скважины или перфорационного канала. Основной компонент установки – камера Хоека, в которую вставляется полый цилиндрический образец керна. При этом эксперимент может предполагать нагружение образца и одновременную прокачку флюида. Схема установки приведена на рисунке 1.

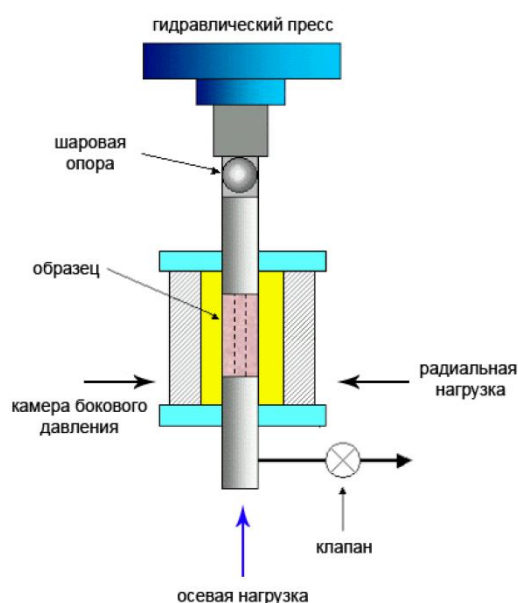


Рисунок 1. Схема камеры Хоека (составлена авторами)

Также встречаются и другие методы определения прочностных характеристик по косвенным данным: метод контролируемого царапания (Scratching Resistance Strength – SRS) [4], молоток Шмидта [5], метод Бринелля. Суть этих методов близка – пересчет твердости породы в прочность через аналитические формулы и корреляции, что по точности естественно уступает прямому замеру прочности при сжатии, но имеет свои преимущества: например, метод контролируемого царапания является экспресс-методом и позволяет построить непрерывный профиль прочности (UCS) всего метража керна без необходимости выпиливания цилиндрических образцов (рисунок 2).

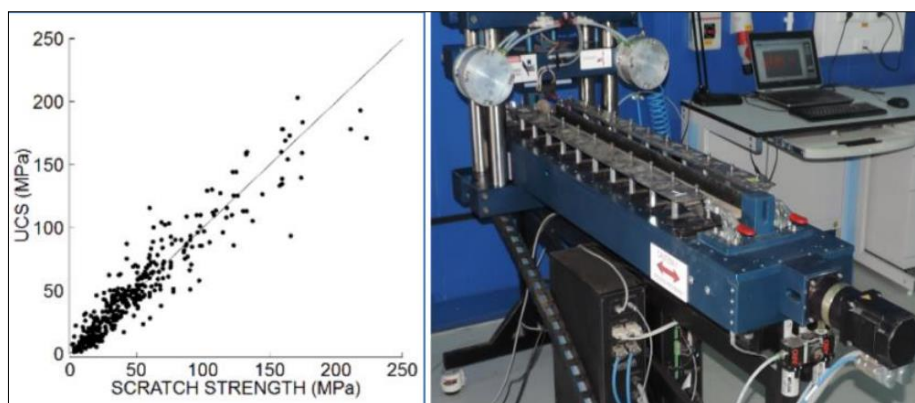


Рисунок 2. Определение прочности методом контролируемого царапания [6]

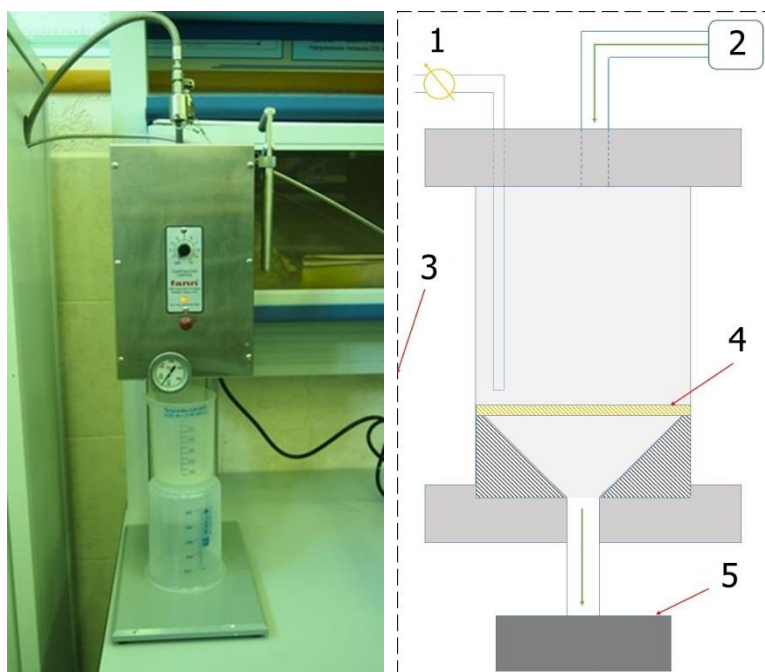
Используя данные с керна и совмещенное геомеханическое и гидродинамическое моделирование в работе [7] авторы оценили минимальную прочность породы на Русском месторождении, при которой возможно создание безопасных депрессий на пласт, 7 МПа. Реальная прочность породы оказалась меньше 2 МПа. Таким образом, с самого начала эксплуатации пласт находится в области пластических деформаций и избежать пескопроявления простым ограничением дебита или оптимальной технологией проводки скважин невозможно.

В другой работе [8] авторы, используя керновые данные, а также данные геофизических исследований и мини-гидроразрыва пласта (мини-ГРП), скорость поперечной волны и корреляционные зависимости, оценили критические депрессии на месторождении Кикинда. Верификация модели по результатам промысловых исследований показала её удовлетворительную прогнозную способность.

Скрин тесты

Самый распространенный способ борьбы с пескопроявлениями – установка скважинных фильтров. На рынке представлено множество конструкций – гравийные, щелевые, провололочные, перфорированные, сетчатые, комбинированные, а также премиальные. Основной параметр, определяющий способность фильтра удерживать песок, – проходное отверстие или апертура фильтра. Если размер отверстия будет слишком маленьким, то это приведет к закупориванию фильтра и снижению продуктивности скважины. Если слишком большим – фильтр не будет эффективно удерживать песок от попадания в скважину, что может привести к пересыпанию забоя и полной потере продуктивности скважины с риском невозможности её промывки и, соответственно, к потере всей скважины. В литературе встречается множество критериев подбора фильтров на основании размеров частиц или степени неоднородности гранулометрического состава [9; 10]. Но консенсус в этом вопросе по-прежнему не достигнут. Например, в работе [11] авторы пришли к выводу, что распределение частиц по размерам никак не влияет на работу фильтра, и достаточно использовать критерии, основанные на максимальном размере частиц. Чтобы не полагаться на критерии без привязки к конкретному месторождению, для подбора оптимального фильтра необходимо проводить скрин-тесты (Production Screen Test – PST) на фильтр-прессе. Изначально прибор был спроектирован для подбора жидкости для заканчивания скважины с установкой фильтра. Но в некоторых работах [7; 12] прибор PST был использован для подбора апертуры фильтра. Вместо жидкости для заканчивания скважины авторы использовали смесь из пластовой нефти, воды и дезинтегрированного керна. Смесь прокачивали через купон фильтра и фиксировали время прокачки и толщину глинистой корки. В результате авторы смогли оценить максимальный размер апертуры, при которой происходит резкое снижение проницаемости фильтра, и подобрать оптимальный.

Подобные скрин-тесты проводят на базе лаборатории Санкт-Петербургского горного университета. Фото и схема установки представлены на рисунке 3. Дизайн эксперимента позволяет протестировать различные купоны фильтров, используя как модельные флюиды, так и полноценные пробы нефти и пластовой воды с месторождения. При этом, если породы, слагающие коллектор, характеризуются высокой неоднородностью, рекомендуется проводить серию экспериментов с использованием различного гранулометрического состава. К недостаткам скрин тестов можно отнести невозможность создать термобарические условия, приближенные к реальным. Процесс выноса песка при этом также носит условный характер. Цель скрин-теста – оценить способность фильтра удерживать песок и сохранять при этом удовлетворительную проницаемость.



1 – датчик давления; 2 – насос для подачи жидкости; 3 – граница термошкафа; 4 – купон фильтра; 5 – емкость для сбора жидкости и частиц, прошедших фильтр

Рисунок 3. Фильтр-пресс для тестирования фильтров (составлено авторами)

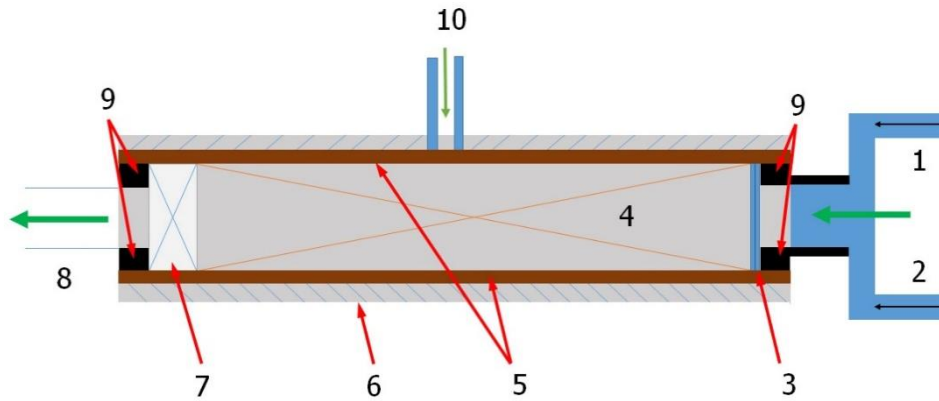
Фильтрационные эксперименты на естественном образце керна или насыпной модели пласта

Более совершенной модификацией скрин тестов, описанных выше, являются полноценные фильтрационные эксперименты на керне или насыпной модели пласта. Цель этих экспериментов не только протестировать фильтр на предмет его способности удерживать песок, но и воссоздать процесс разрушения породы и выноса песка через фильтр с учетом пластовых условий.

В работе [13] описан опыт подбора щелевых, проволочных и сетчатых фильтров для установки на добывающих скважинах на месторождениях со слабоконсолидированным коллектором и высоковязкой нефтью, разрабатываемые по технологии парогравитационного дренажа (Steam-assisted Gravity Drainage – SAGD). Методика предполагает классический дизайн фильтрационного эксперимента, отличающийся тем, что на выходном конце керна устанавливают купон фильтра. В ходе эксперимента фиксируют расход жидкости, перепад давления и объем выносимого песка. Авторы утверждают, что выводы, сделанные в результате таких экспериментов, хорошо согласуются с промысловыми данными.

В работе [12] проводился аналогичный эксперимент, но дополнительно рассчитывалась проницаемость. В результате было установлено, что при фильтрации на депрессиях, моделирующих внутрискважинные условия, происходит разрушение и миграция глинистой фракции породы, что приводит к закупориванию поровых каналов в фильтрационном слое на фильтре, при этом степень коагуляции увеличивается с возрастанием депрессии.

Аналогичные эксперименты проводятся на базе лаборатории Санкт-Петербургского горного университета. Дизайн эксперимента позволяет использовать как естественный образец керна, так и насыпную модель пласта. Установка обеспечивает возможность подачи нефти и воды в заданных пропорциях для исследования влияния обводненности продукции на процесс пескопроявления (рисунок 4).



1 – подача нефти; 2 – подача воды; 3 – сетчатый фильтр и шайба; 4 – ядро (насыпная модель пласта); 5 – резиновые манжеты для обжима ядра; 6 – корпус ядеродержателя; 7 – купон фильтра; 8 – выходной канал для жидкости с песком; 9 – буферные кольца; 10 – подача жидкости для создания давления обжима

Рисунок 4. Фильтрационная установка для определения эффективности фильтра с моделированием пластовых условий (составлена авторами)

Фильтрационные эксперименты, направленные на изучение механизма формирования песчаных арок

Первый эксперимент по изучению песчаных арок был проведен в 1936 г. [14]. В нем автор использовал простой металлический резервуар, заполненный песком, с небольшим отверстием в днище и наблюдал, что при открытии отверстия песчинки образуют структуру, оказывающую сопротивление прикладываемой сверху нагрузке, что позволило ему сделать вывод: устойчивость песчаной арки зависит от касательных напряжений в песчинках и сил когезии. Несмотря на простоту конструкции, в дальнейших работах использовались аппараты, схожие по принципу действия.

Один из самых наглядных экспериментов по изучению механизма формирования арок представлен в работе [15]. В нем авторы использовали две установки, отличающиеся способом нагружения образца – одна оказывала одноосное сжатие (рисунок 5А), другая более реалистично моделировала напряженное состояние породы, оказывая всестороннее сжатие (рисунок 5Б). Для мониторинга плотности, пористости и насыщенности песчаной арки использовали компьютерную томографию. Серия экспериментов включала одно- и двухфазную фильтрацию на разных режимах. Любопытно, что образец, насыщенный на 100 % керосином, не образовывал песчаные арки ни при каких режимах.

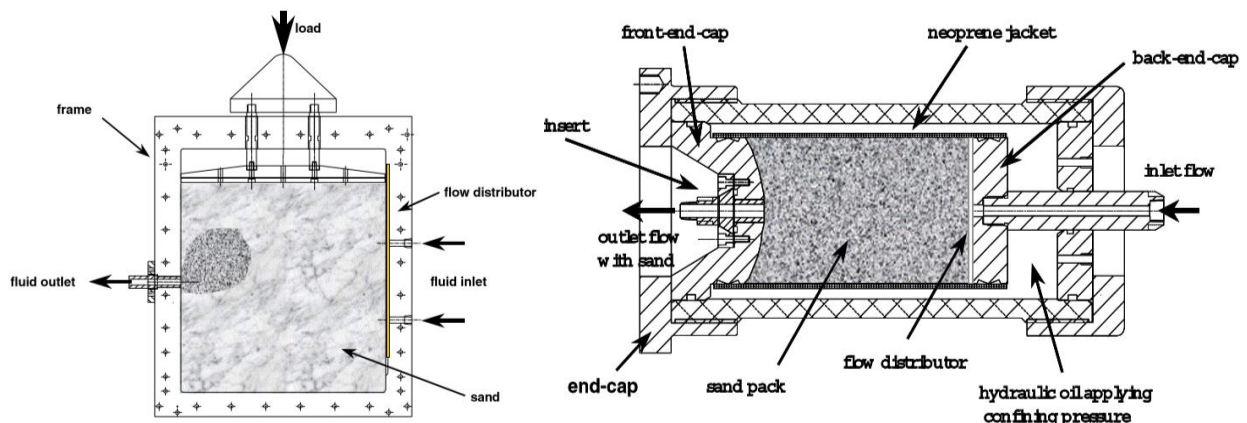


Рисунок 5. Установки для моделирования образования песчаных арок: А (слева) – для одноосного сжатия; Б (справа) – для всестороннего сжатия [15]

Ограничения лабораторных исследований

Лабораторные эксперименты всегда являются аппроксимацией реальных процессов, происходящих в системе скважина-пласт, и это в полной мере касается экспериментов по исследованию процессов разрушения коллектора и выноса песка. Одно из основных допущений в большинстве лабораторных экспериментов это допущение о подобии реальной системы и моделируемой. При этом известно, что в ходе геомеханических тестов при изменении размеров образца наблюдается объемный и поверхностный эффекты масштаба: с увеличением объема образца прочность снижается [16].

Чтобы избежать эффекта масштаба, в работе [17] был протестирован почти кубический блок слабоконсолидированной породы (0.7 м x 0.7 м x 0.81 м), который был вырезан из обнажения песчаного пласта. В лаборатории была смоделирована целая скважина, включая обсадную колонну, цементирование и перфорацию. В камере трехосного сжатия воспроизводилось горное и поровое давление. В ходе экспериментов авторы получили довольно реалистичные результаты, им удалось получить эффекты, наблюдаемые в реальной практике: рост выноса песка при увеличении депрессии, обводнённости, снижении пластового давления (увеличения эффективного напряжения), рост продуктивности скважины при выносе песка. Но, к сожалению, подобные эксперименты требуют огромных затрат, к тому же невозможно вырезать крупный блок породы непосредственно из пласта.

При экспериментальном моделировании процессов разрушения коллектора, выноса песка, образования песчаных арок или засорения фильтров требуются репрезентативные образцы породы, слагающие продуктивный пласт. Но отбор керн из слабо консолидированного коллектора является нетривиальной задачей. Может потребоваться стабилизация отобранного керна заморозкой, гипсом или пеной. В лабораторных экспериментах зачастую используется фиксированный гранулометрический состав. При этом гранулометрический состав породы может широко варьироваться в пределах даже одной скважины. В качестве примера приведен сводный график кривых гранулометрического состава в пределах одной скважины (рисунок 6) месторождения Западной Сибири. На уже пробуренных скважинах можно воспользоваться пробами вынесенной породы. Однако, гранулометрический состав керна, пробы с забоя скважины, пробы с приемной сетки погружного насоса и пробы с поверхности могут разительно отличаться за счет постепенного разделения фракций: мелкие частички уносятся потоком, крупные остаются в пласте, оседают на забой или удерживаются фильтром. В экспериментах по изучению механизмов образования арок зачастую используется речной песок или синтетический аналог. Это также является существенным упрощением.

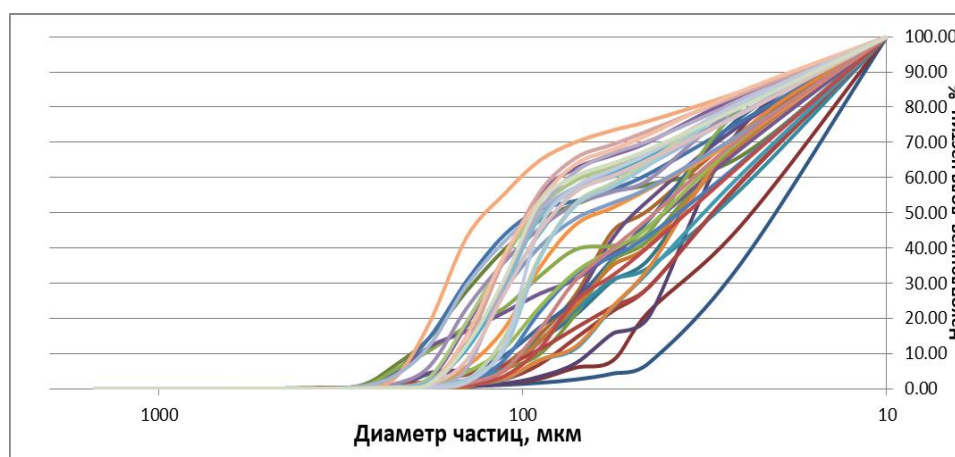


Рисунок 6. Гранулометрический состав породы в пределах одной скважины (составлен авторами)

Следующий фактор, являющийся источником погрешности в лабораторных экспериментах, связан с использованием ограниченных комбинаций двухфазных потоков (сырая нефть и минерализованная вода). При этом влияние свойств газодонефтяной смеси на процесс пескопроявления неоднозначно. Вода может растворять цемент и снижать капиллярное давление, увеличивая вынос песка, но также способствует образованию более устойчивых арок. Также есть данные, что в ходе фильтрационных экспериментов могут образовываться вязкие эмульсии [12]. Если аналогичный процесс будет происходить в призабойной зоне, с ростом влекущей силы потока будет увеличиваться вынос песка [18].

Заключение

Анализ литературы показал, что многообразие пластовых условий и сложность механизма пескопроявления приводит к тому, что разные авторы приходят порой к противоположным выводам, оценивая влияние различных факторов на разрушение коллектора. Этим обуславливается необходимость проведения серии собственных лабораторных экспериментов на каждом рассматриваемом объекте.

На данный момент лабораторные эксперименты по исследованию процесса пескопроявления не стандартизированы. Компании разрабатывают собственные «протоколы» [13; 19], в соответствии с которыми рекомендуется проводить:

- литофациальный анализ с фокусом на гранулометрическом составе пород;
- отбор репрезентативных образцов керна для каждой фации;
- анализ PVT-свойств пластовых флюидов для определения репрезентативных условий для дальнейших экспериментов;
- комплексный анализ прочностных и упругих характеристик породы;
- фильтрационные эксперименты на керне или скрин тесты, включающие анализ гранулометрического состава частиц, вынесенных потоком, а также изучение структуры фильтрационной корки и механизма её образования.

Современные лаборатории выполняют множество работ, связанных с пескопроявлением. При формировании программы исследований необходимо отталкиваться от моделей, которые используются для оценки вероятности пескопроявления и прогнозирования объемов выноса песка [20]. Также нужно учитывать те неопределенности, которые несут в себе лабораторные эксперименты в силу причин, рассмотренных в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Walton, I.C., Atwood, D.C., Halleck, P.M., Bianco, C.B., Perforating unconsolidated sands: an experimental and theoretical investigation // SPE Drill. Complet. 2002, 17 (3), 141–150.
2. Susilo, Y., Hendra, Y.S., Wulan, R.S. Development strategies of soft-friable carbonate gas reservoirs through horizontal open hole gravel packed completions: APN field – Offshore West Java // Proceedings of the International Petroleum Technology Conference, 2007.
3. Rahmati, H., Jafarpour, Review of sand production prediction models // J. Pet. Eng. 2013, 1–16.
4. Носиков А.В., Торопецкий К.В., Применение метода контролируемого царапания для исследования механических свойств горных пород // Экспозиция нефть газ, 2018, с. 30–35.

5. Taylor, P.G. and Appleby, R.R. Integrating Quantitative and Qualitative Rock Strength Data in Sanding Prediction Studies: An Application of the Schmidt Hammer Method // SPE/IADC Indian Drilling Technology Conference and Exhibition, 2006.
6. Самохвалов А.Ф. Schlumberger: Новые методы геомеханического исследования кернового материала // материалы технической конференции SPE Нефтегазовая геомеханика, 27–28 марта 2017. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://rca.spe.org/files/5514/9121/4435/3._Samokhvalov_rus.pdf (Дата обращения к документу 20.04.2020).
7. Болычев Е.А., Константинова Н.В., Процесс выбора и испытания методов нижнего заканчивания скважин для условий слабосцементированных пород Русского месторождения // SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition, 2012.
8. Лежнев К., Тимофеева Т., Практическое применение геомеханического моделирования для расчета критических депрессий в задаче выноса песка на месторождении Кикинда // SPE Russian Petroleum Technology Conference, 2017.
9. Tiffin D.L., King G.E. New Criteria for Gravel and Screen Selection for Sand Control // SPE Formation Damage Control Conference, 1998.
10. Bennett C., Gilchrist J.M., Design Methodology for Selection of Horizontal Open-Hole Sand Control Completions Supported by Field Case Histories // SPE European Petroleum Conference, 2000.
11. Furgier J.N., Viguerie B., Stand Alone Screens: what key parameters are really important for a successful design? // SPE European Formation Damage Conference & Exhibition, 2013.
12. Бетехтин А.Н., Костин Д.К., Лабораторные исследования систем контроля выноса песка // SPE Russian Petroleum Technology Conference, 2017.
13. Romanova U.G., Piwowar M., Sand control for unconsolidated heavy oil reservoirs: a laboratory test protocol and recent field observations // International Symposium of the Society of Core Analysts, 2015.
14. Terzaghi, K. Stress distribution in dry and unsaturated sand above a yielding trap door // Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1936.
15. Bianco, L.C., Halleck, P.M., Mechanisms of Arch Instability and Sand Production in Two-Phase Saturated Poorly Consolidated Sandstones // SPE European Formation Damage Conference, 2001.
16. Зайцев Д.В., Кочанов А.Н., Влияние масштабного эффекта и неоднородности горных пород при определении их прочностных свойств // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2016, №11, с. 208–215.
17. Koosijman, A., Halleck, P. Large-scale laboratory sand production test // Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1992.
18. Hu, Z., Zhang, Y. & Yang, Z. Suffusion-induced deformation and microstructural change of granular soils: a coupled CFD-DEM study // Acta Geotech. №14, 795–814, 2019.
19. Chengyun Maa, Jingen Denga, A new laboratory protocol to study the plugging and sand control performance of sand control screens // Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 184, 2019.
20. Тананыхин Д.С., Максютин А.В., Султанова Д.А., Анализ моделей прогнозирования пескопроявления при эксплуатации слабосцементированных коллекторов // Современные проблемы науки и образования, № 1 (часть 1), 2015.

Poroshin Maksim Aleksandrovich

Saint Petersburg mining university, Saint Petersburg, Russia
E-mail: seniorsolt@ya.ru

Tananykhin Dmitry Sergeevich

Saint Petersburg mining university, Saint Petersburg, Russia
E-mail: Tananykhin_DS@pers.spmi.ru

Grigorev Maksim Borisovich

Saint Petersburg mining university, Saint Petersburg, Russia
E-mail: makkum1298@mail.ru

Analysis of laboratory methods for studying the process of sand production during the development of oil fields

Abstract. During the development of weakly consolidated reservoirs the problem of sand production is becoming increasingly important. At the same time, the complexity of the mechanism of formation failure and withdrawal of sand does not allow us rely solely on the experience of development of similar reservoirs. Laboratory experiments should be the basis for the design of sand control systems. In this article, the authors analyzed a set of experimental methods for studying the process of sand production that are available to companies in compiling a research program for the design of sand control systems. The article describes the methods, the main advantages and disadvantages of the described experiments, links to articles and specific practical cases, as well as recommendations for compiling a research program.

Keywords: sand control screens; sand production; plugging simulation; sand-retention test; sand retaining media; weakly consolidated sandstone; experimental study