

УДК 622.276.031:532.5

Б.А. Григорьев, А.Е. Рыжов, Д.М. Орлов, Н.В. Савченко, А.П. Федосеев

## Особенности фильтрационного течения через нестационарные дисперсные среды, представленные засоленными терригенными породами-коллекторами

**Ключевые слова:**  
дисперсные среды,  
многофазная  
фильтрация,  
нестационарность,  
засолененность.

**Keywords:**  
dispersed media,  
multi-phase filtration,  
nonstationarity,  
salinity.

Как известно, особенности фильтрации тесно связаны с особенностями строения пустотного пространства дисперсных сред. В зависимости от типа пустотного пространства (поровый, порово-трещинный, каверново-поровый и др.) и его характеристик (пористости, извилистости, среднего радиуса пор и т.д.) проявляются различные особенности фильтрационного течения. Так, фильтрация в тонкопоровых коллекторах подчиняется нелинейному закону фильтрации с предельным градиентом давления, течение через трещиноватую пористую среду может иметь пульсационный характер [1]. Особый интерес представляют нестационарные дисперсные среды, параметры которых изменяются во времени по определенным законам. В случае перманентного или периодического изменения структуры пустотного пространства (а следовательно, и параметров, характеризующих фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС)) отмечается нестационарный характер дисперсной среды. Такой характер дисперсные среды могут приобрести в процессе фильтрации через них реагирующих с веществом дисперсной среды флюидов (например, разбухание глин при фильтрации воды, коагуляция, вымывание солей из скелета породы и т.д.).

Исследование особенностей фильтрационного течения через нестационарные дисперсные среды выполнялось на примере фильтрации воды через засоленные породы-коллекторы терригенного типа. Для засоленных природных систем характерны неоднородное в пространстве распределение соли и, следовательно, дискретное проявление эффекта нестационарной пустотной среды при фильтрации. Данные исследования сфокусированы на изучении локального эффекта нестационарной дисперсной среды, но в будущем планируется оценить интегральный эффект с учетом неоднородности природных систем.

В качестве нестационарной дисперсной среды использовался керновый материал Чайнинского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), приведенный к природным термобарическим условиям в специальной установке двухфазной фильтрации.

К особенностям коллекторов Чайнинского НГКМ следует отнести:

- неоднородность литологического состава;
- неравномерное постседиментационное засоление [2, 3];
- невыдержанность ФЕС и их неравномерное распространение по площади и разрезу.

Отложения продуктивных горизонтов существенно различаются по интенсивности засоления пород по площади и разрезу. Так, содержание солей в поровом пространстве пород колеблется от долей до 20–35 %. Изучение пород (рис. 1) показало [4], что интенсивнее всего подвержены засолению слои (содержание соли – от 5 до 20–35 %), сложенные грубозернистыми плохосортированными разностями обломочных пород. Пористость таких засоленных пород составляет от первых единиц до 8 %, редко более 10 %.

Для исследования особенностей фильтрационных процессов в засоленных породах-коллекторах Чайнинского НГКМ выполнялось физическое моделирование вытеснения нефти водой. Минерализация воды составляла 3 %. Предполагалось, что закачиваемая в пласт вода будет иметь меньшую минерализацию в сравнении

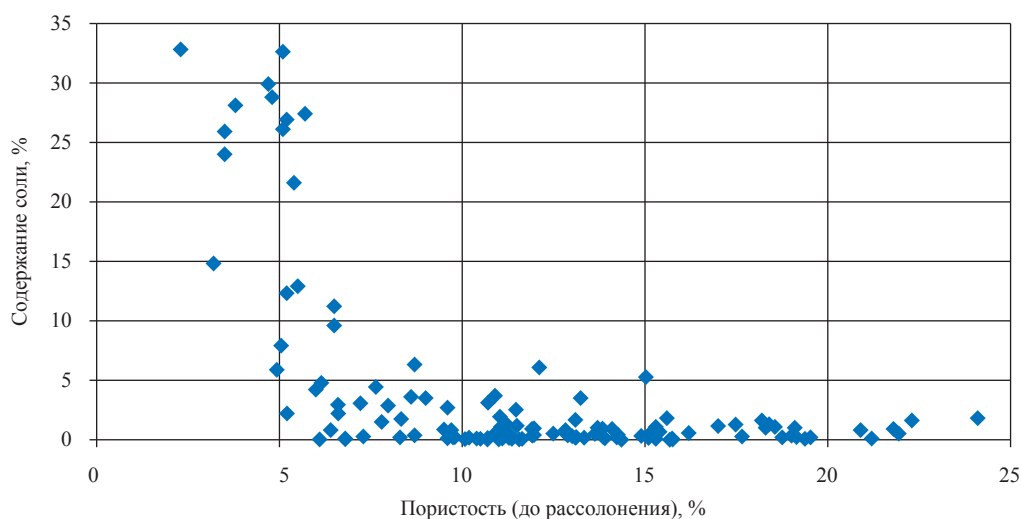


Рис. 1. Зависимость содержания соли от пористости пород-коллекторов Чайядинского НГКМ

с пластовой водой (37 %). В качестве модели нефти использовался декан ( $C_{10}H_{22}$ ). Эксперименты проводились на установке двухфазной фильтрации при термобарических условиях, приближенных к пластовым для Чайядинского НГКМ. Для моделирования процессов вытеснения применялся керновый материал, представленный различными литологическими разностями коллекторов изучаемых продуктивных отложений. В соответствии с требованиями [5, 6] скорость фильтрации при вытеснении не превышала 5 м/сут.

Первой задачей исследований стало изучение влияния свойств коллекторов (высоко- и низкопроницаемые, сильно- и слабозасолоненные) на характеристики двухфазной фильтрации – коэффициентов вытеснения, проницаемости по нефти в присутствии остаточной воды и проницаемости по воде при остаточной нефти. Особое внимание уделялось изучению процесса вытеснения нефти при фильтрации через сильнозасолоненный коллектор.

Предшествующие исследования показали следующее [7].

1. Вытеснение нефти водой носит «поршневой характер»: коэффициент вытеснения линейно растет со временем до своего максимального значения, соответствующего моменту прорыва фронта вытеснения через образцы керна, и далее сохраняет это значение при прокачке через породу пяти и более поровых объемов воды.

2. В большинстве экспериментов (независимо от содержания соли) достижения стационарной фильтрации воды при остаточной нефти

достигнуто не было. При этом динамика вытеснения (изменение гидравлического сопротивления в зависимости от прокачанного через породу объема воды) была разной. Для сильнозасолоненных пород наблюдалось резкое снижение перепада давления на керновой модели в послепрорывный период времени и более медленное в последующие периоды времени. Для слабозасолоненных пород после выхода фронта вытеснения из керновой модели наблюдался либо монотонный рост перепада давления, либо его непродолжительный спад с последующим медленным ростом.

3. Чтобы снизить воздействие на структуру порового пространства в процессе подготовки образцов керна к опытам ряд экспериментов был выполнен при нулевой остаточной водонасыщенности. Сравнение характеристик двухфазной фильтрации, полученных в присутствии и отсутствии остаточной воды в образцах керна пород-коллекторов, относящихся к одной литологической группе с близкими ФЕС, показало, что остаточная вода не оказывает влияния на эти характеристики.

На рис. 2 представлены зависимости относительной проницаемости по нефти ( $K_{ro}$ ), нормированной на абсолютную проницаемость ( $K_{abs}$ ), в присутствии остаточной воды от  $K_{abs}$  и пористости ( $m$ ).

Данные разбиты на две группы в зависимости от содержания соли в коллекторе. Согласно рис. 2, с улучшением ФЕС и снижением содержания солей в коллекторах относительная проницаемость по нефти при остаточной

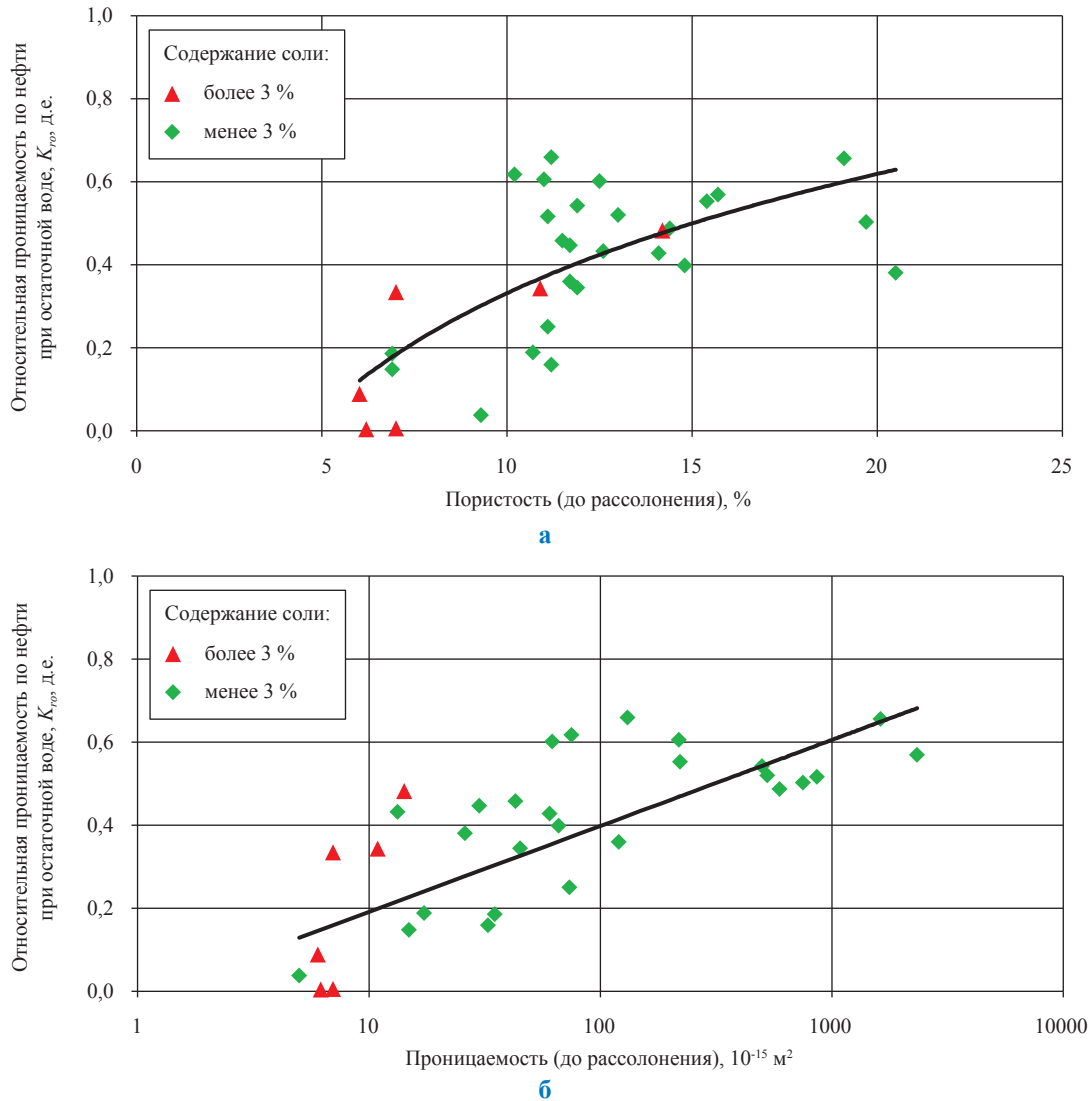


Рис. 2. Зависимость проницаемости по нефти в присутствии остаточной воды от ФЕС пород-коллекторов: а – пористости; б – проницаемости

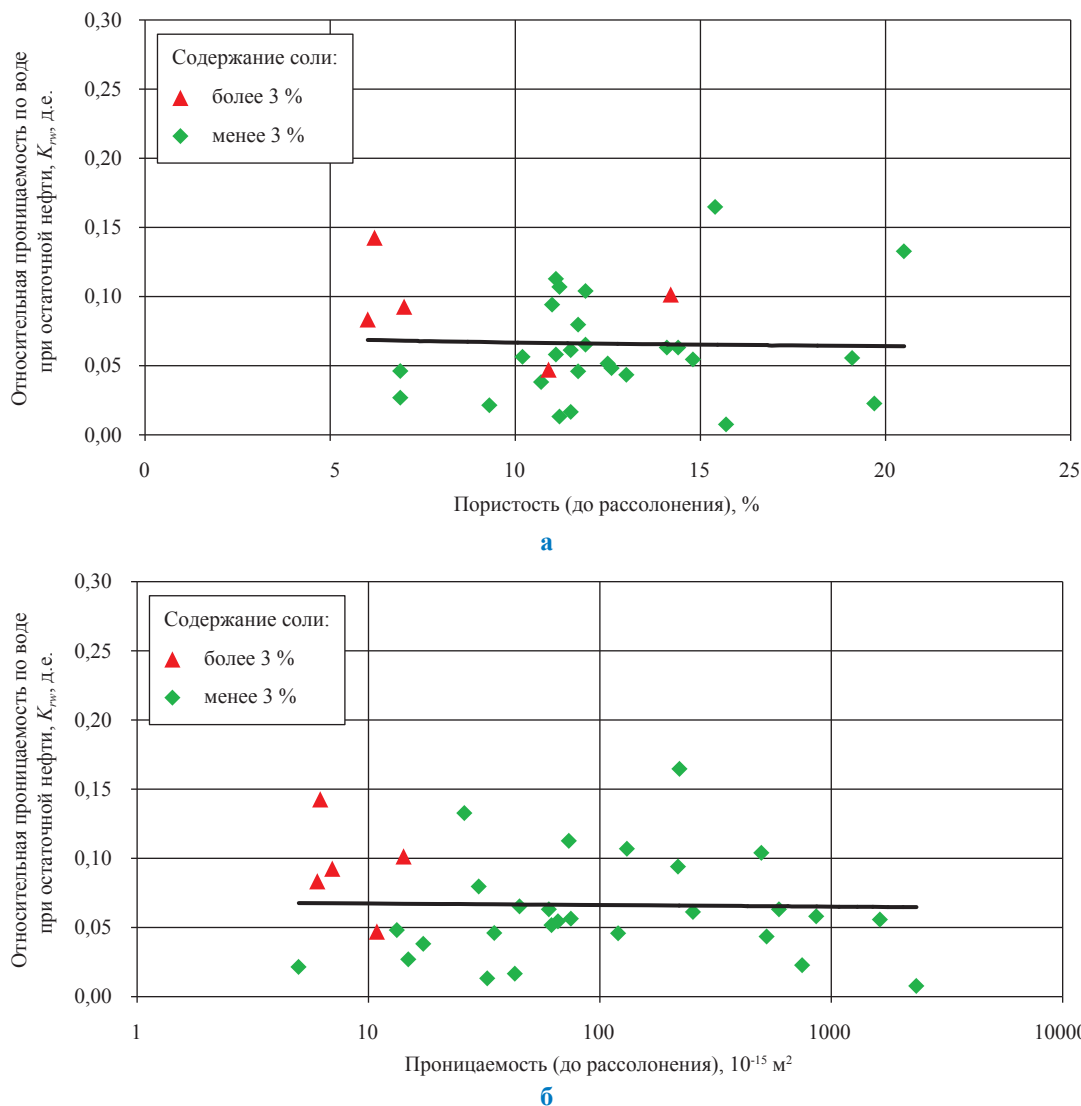
водонасыщенности растет, а доля засоленных коллекторов падает. Также можно заметить, что наличие соли в поровом пространстве коллектора приводит к более резкому снижению относительной проницаемости по нефти с ухудшением ФЕС.

Зависимость относительной проницаемости по воде ( $K_{rw}$ ), нормированной на  $K_{abs}$ , в присутствии остаточной нефти от  $K_{abs}$  и  $m$  отражена на рис. 3. Данные также разбиты на две группы по содержанию соли в коллекторе. В целом, можно отметить слабую зависимость относительной проницаемости по воде от ФЕС и принять для всех разностей величину проницаемости  $K_{rw}$  в 6–7 % от  $K_{abs}$ . Тем не менее, для более засоленных пород значения относительной проницаемости по воде в среднем оказались выше, чем для менее засоленных.

Зависимость коэффициента вытеснения нефти водой от  $K_{abs}$  и  $m$  представлена на рис. 4. Данные также разбиты на две группы. Для всей совокупности данных наблюдается явно выраженная тенденция к росту коэффициента вытеснения с улучшением ФЕС коллекторов.

Для более наглядной иллюстрации влияния содержания соли на характеристики двухфазной фильтрации на рис. 5 в экспоненциальном виде представлена зависимость коэффициента вытеснения нефти от количества соли, содержащейся в породе, которая может использоваться для прогноза коэффициента вытеснения нефти водой для коллекторов с различным содержанием соли.

Следует отметить, что с увеличением количества соли в исследуемых породах-коллекторах и уменьшением пористости, обусловлен-



**Рис. 3. Зависимость проницаемости по воде в присутствии остаточной нефти от ФЕС пород-коллекторов: а – пористости; б – проницаемости**

ным засолонением (см. рис. 1), происходит снижение эффективности вытеснения нефти водой.

Второй задачей исследований являлось изучение влияния вымывания соли на ФЕС пород. При выполнении экспериментов по вытеснению нефти водой обеспечивалась прокачка через пористую среду значительного объема слабоминерализованной воды (до 10 поровых объемов и более), что приводило к частичному или полному удалению солей из порового пространства породы-коллектора.

Фильтрационно-емкостные свойства образцов керна измерялись до обводнения и после него: пористость – газоволюметрическим методом; абсолютная проницаемость – методом стационарной фильтрации. Процедура исследований заключалась в следующем. Сначала выполнялась соответствующая подготовка коллекции

образцов керна: экстрагирование безводными растворителями, сушка, контроль веса. Далее определялись пористость и абсолютная проницаемость на «непромытых» образцах. Затем производилась закачка воды в нефтенасыщенные образцы керна в процессе исследования характеристик двухфазной фильтрации. После завершения экспериментов по вытеснению нефти водой выполнялись повторная подготовка коллекции образцов керна и последующее определение пористости и абсолютной проницаемости на «промытых» образцах.

Результаты изменения ФЕС представлены на рис. 6 и 7. Отражено, что с уменьшением первоначальной (до вымывания соли) пористости и абсолютной проницаемости степень их изменения растет. Это хорошо согласуется с тем, что в породах, пористость которых

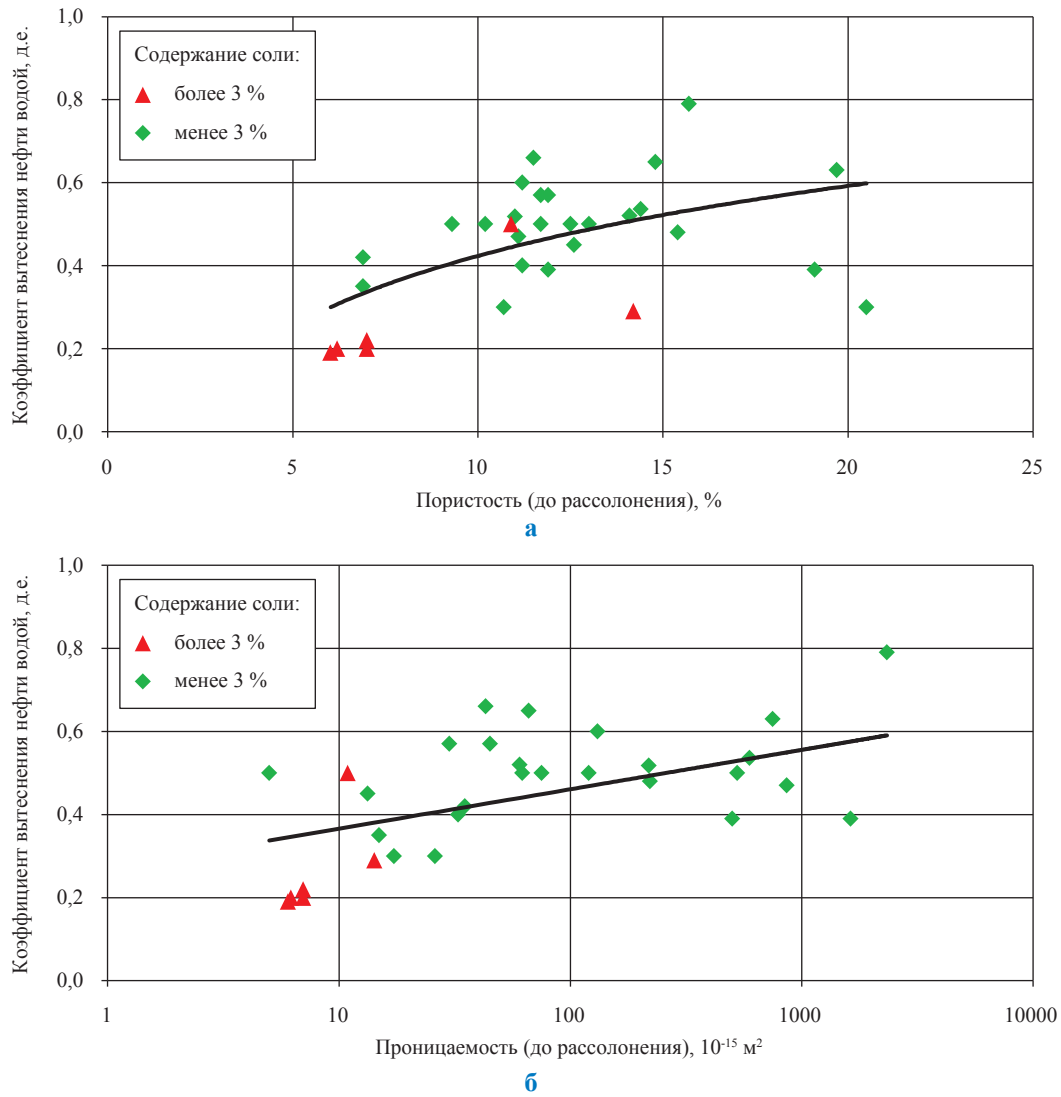


Рис. 4. Зависимость коэффициента вытеснения нефти водой от ФЕС пород-коллекторов: а – пористости, б – проницаемости

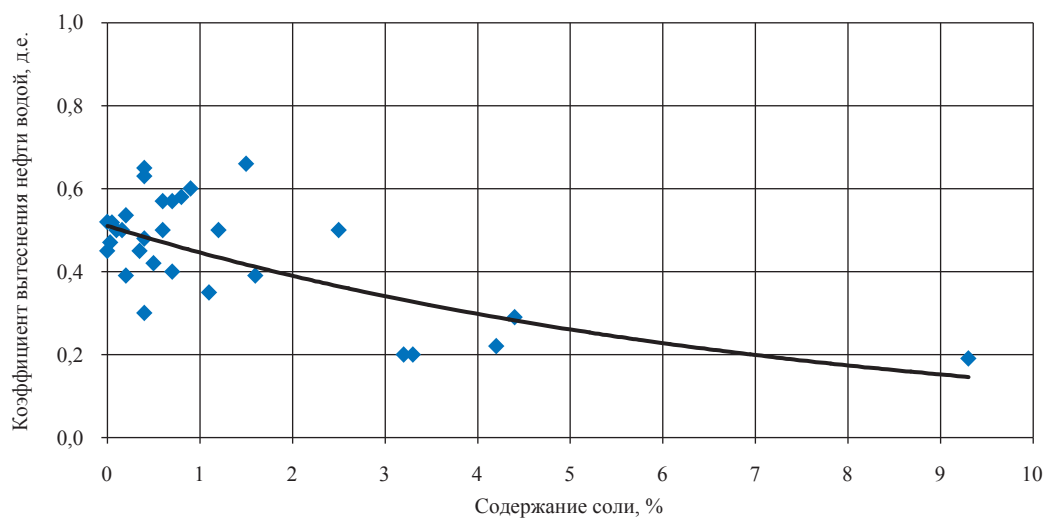


Рис. 5. Зависимость коэффициента вытеснения нефти водой от содержания соли

снижена засолонением, происходит улучшение ФЕС (возрастают пористость и абсолютная проницаемость) за счет вымывания солей.

После вымывания солей абсолютная проницаемость изменяется сильнее, чем пористость. Полученные зависимости могут быть использованы для прогноза максимального изменения ФЕС в засолоненных коллекторах Чайнинского НГКМ.

С целью изучения непосредственного влияния рассолонения на структуру пустотного пространства было выполнено сравнение результатов исследования структуры методами ртутной порометрии и полупроницаемой мембраны. При изучении структуры пустотного пространства методом ртутной порометрии не происходит вымывания соли, а распределение пор по размерам соответствует первоначальному состоянию породы-коллектора до нача-

ла фильтрации воды. В случае использования метода полупроницаемой мембраны образец ядра насыщается пластовой водой, а в процессе получения кривых капиллярного давления происходит вытеснение из образца воды в количестве до одного порового объема. В этом случае в процессе измерения происходит вымывание соли, а полученная структура пустотного пространства характеризует частично (или полностью) рассолоненный коллектор. Результаты определения структуры пустотного пространства двумя методами представлены на рис. 8.

Следует отметить, что после рассолонения горных пород происходит увеличение размеров фильтрующих поровых каналов, а распределение пор по размерам смещается в область более крупных пор. Изменение структуры пустотного пространства после рассолонения является

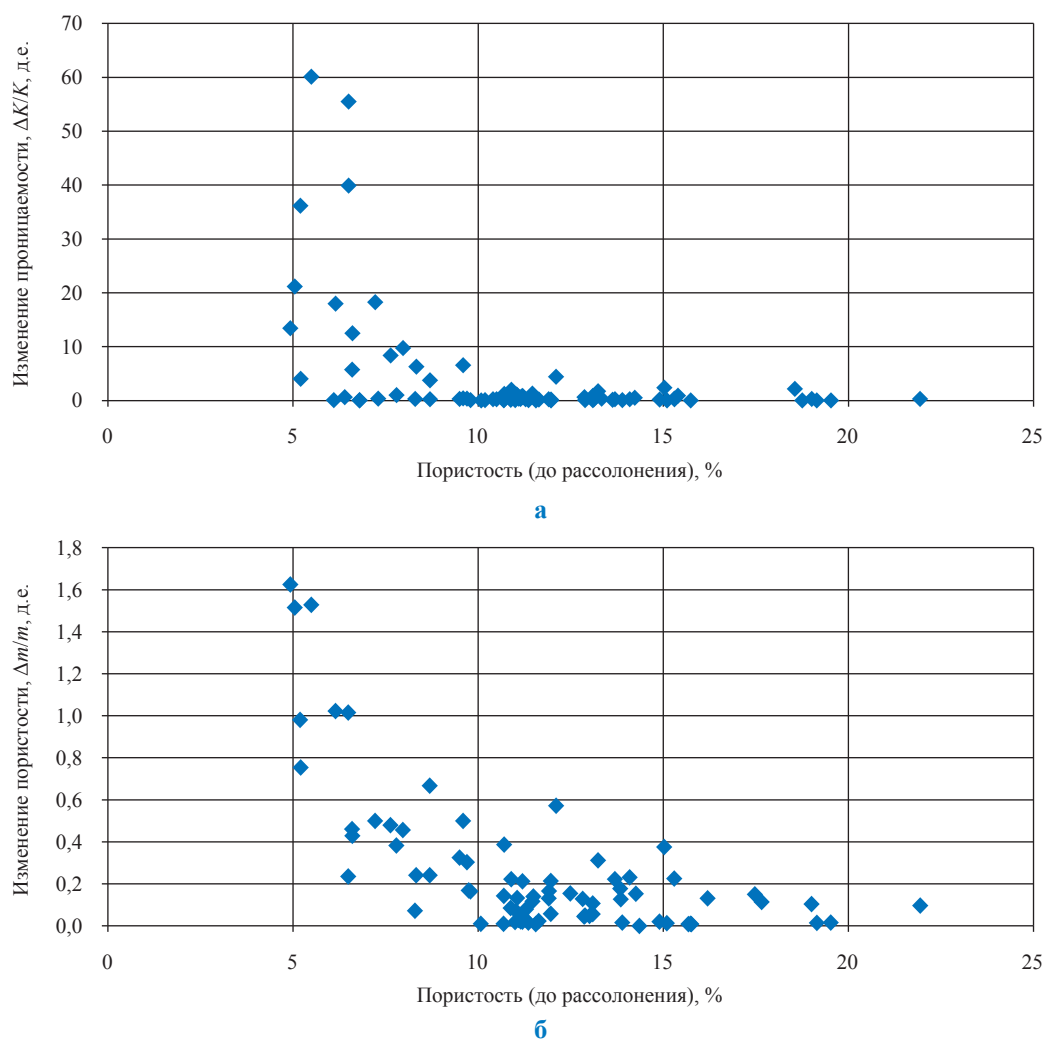
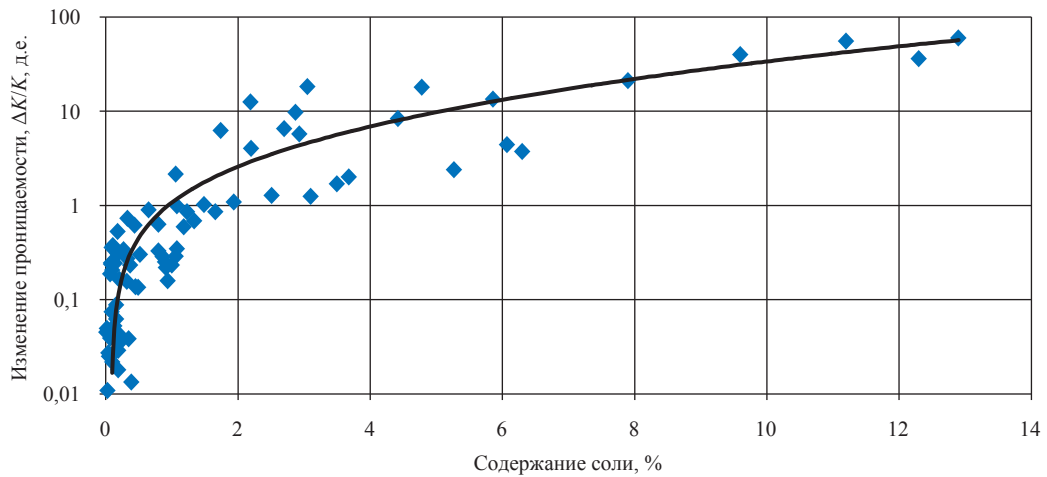
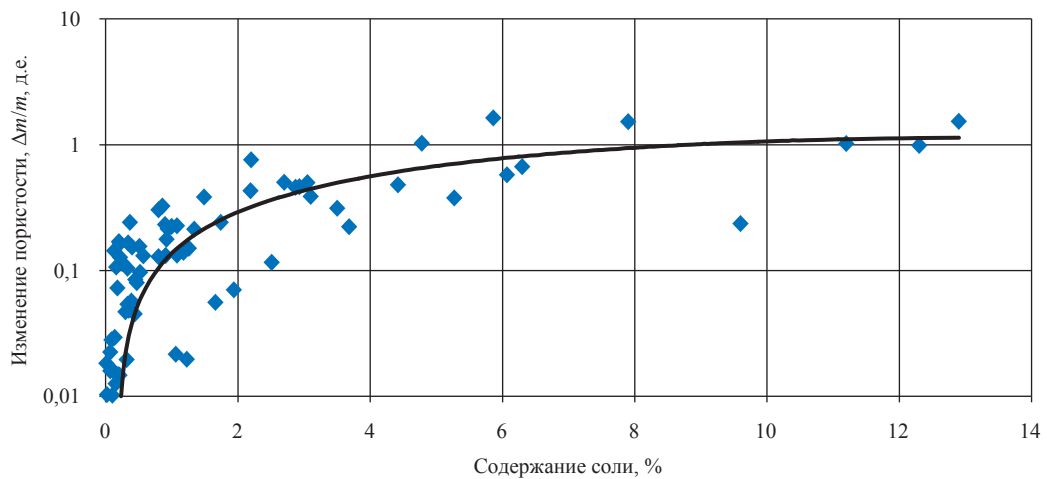


Рис. 6. Зависимости изменения абсолютной проницаемости (а) и пористости (б) от начальной пористости (до вымывания соли)



а



б

Рис. 7. Зависимости изменения абсолютной проницаемости (а) и пористости (б) от содержания соли

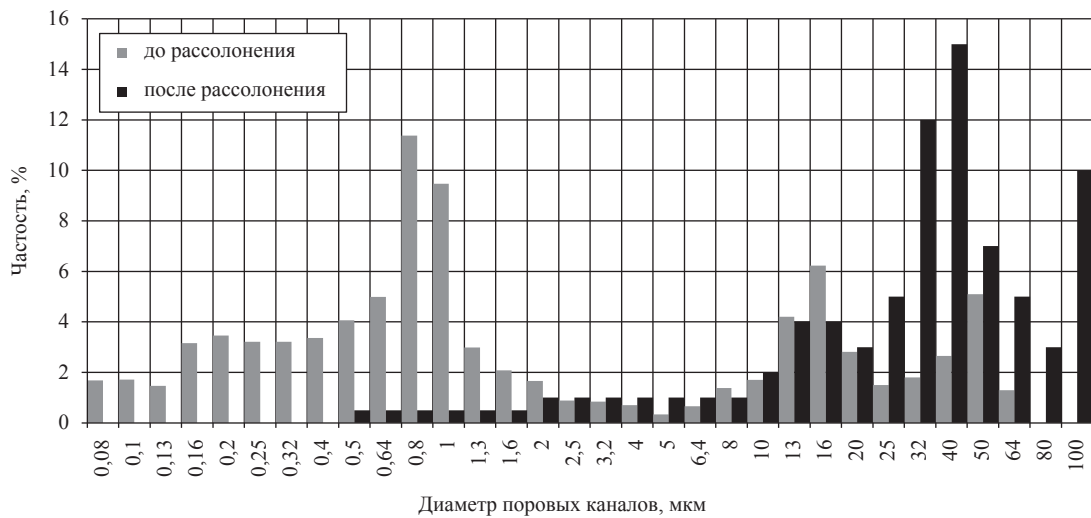


Рис. 8. Изменение структуры пористого пространства до и после рассолонения (пористость увеличивается с 5,7 до 11,2 %, а абсолютная проницаемость – с  $45 \cdot 10^{-15}$  до  $911 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ )

причиной роста пористости и проницаемости породы-коллектора.

В то же время, как показали предыдущие экспериментальные исследования [7], при фильтрации воды через засоленные нефтенасыщенные коллекторы наблюдается рост фильтрационных сопротивлений. Это объясняется миграцией твердых частиц и закупоркой части фильтрующих каналов – кольматацией порового пространства. После экстракции и сушки породы частицы удаляются из пустотного пространства, а пористость и абсолютная проницаемость показывают более высокие значения, чем до рассолонения горной породы.

Таким образом, проведенные многочисленные эксперименты показали, что в процессе од-

нофазной или многофазной фильтрации с участием воды происходит, с одной стороны, улучшение ФЕС за счет изменения структуры пустотного пространства (вымывание соли из породы), а с другой – ухудшение фильтрационных характеристик за счет кольматации (рост фильтрационных сопротивлений и затухание проницаемости по воде при остаточной нефти). Эти эффекты необходимо учитывать в расчетах многофазной фильтрации при прогнозировании показателей разработки нефтяной залежи с применением заводнения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-00340 а.*

### Список литературы

1. Григорьев Б.А. Исследование начальных градиентов давления при фильтрации через низкопроницаемые породы-коллекторы / Б.А. Григорьев, Д.М. Орлов, Н.В. Савченко, А.Е. Рыжов // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – № 1 (12). – С. 119–125.
2. Анциферов А.С. Причины засоления коллекторов нефти и газа в Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции / А.С. Анциферов // Докл. РАН. – 2000. – Т. 370. – С. 80–82.
3. Виноградов И.А. Исследование процесса рассоления при разработке засоленных терригенных коллекторов Верхнечонского месторождения / И.А. Виноградов, А.А. Загоровский, В.А. Гринченко и др. // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 1. – С. 74–77.
4. Рыжов А.Е. Типы и свойства терригенных коллекторов венда Чаяндинского месторождения / А.Е. Рыжов // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – № 1 (12). – С. 145–160.
5. ОСТ 39-195-86. Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. – М.: Миннефтепром, 1986.
6. Методическое руководство по применению газовых и водогазовых методов воздействия на нефтяные пласты. – МНТК «Нефтеотдача», 1991.
7. Рыжов А.Е. Изменение структуры пустотного пространства засоленных пород-коллекторов Чаяндинского месторождения при физическом моделировании закачки воды в пласт / А.Е. Рыжов, Б.А. Григорьев, Н.В. Савченко и др. // Мировые ресурсы и запасы газа и перспективные технологии их освоения (WGRR-2013): тезисы докл. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – С. 66.