

УДК 550.8.01. 550.85

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ МИГРАЦИИ ГЛИНИСТЫХ ЧАСТИЦ И КОЛЬМАТАЦИИ КОЛЛЕКТОРОВ

Алексей Андреевич Чистяков^{1✉}, Анна Константиновна Котцова², Елизавета Викторовна Швальюк³, Пачелли Лидио Хоце Зита⁴

¹ Центр добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий, Московская область, Россия; A.Tchistiakov@skoltech.ru

² Центр добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий, Московская область, Россия; A.Kottsova@tudelft.nl

³ Центр добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий, Московская область, Россия; Elizaveta.Shvalyuk@skoltech.ru

⁴ Дельфтский технический университет, Делфт, Нидерланды; p.l.j.zith@tudelft.nl

Аннотация. Описано влияние различных физико-химических факторов на уменьшение проницаемости терригенных коллекторов, вызванное миграцией глинистых частиц коллектора, спровоцированной закачкой в него воды.

Ключевые слова: миграция глинистых частиц, кольматация, потеря проводимости пласта

Для цитирования: Чистяков А.А., Котцова А.К., Швальюк Е.В., Зита П.Л.Х. Физико-химические факторы миграции глинистых частиц и кольматации коллекторов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 4. С. 104–110.

PHYSICO-CHEMICAL FACTORS OF CLAY PARTICLES MIGRATION AND FORMATION DAMAGE

Alexei A. Tchistiakov^{1✉}, Anna K. Kottsova², Elizaveta V. Shvalyuk³, Pacelli L.J. Zitha⁴

¹ Center for Hydrocarbon Recovery of Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow region, Russia; A.Tchistiakov@skoltech.ru

² Center for Hydrocarbon Recovery of Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow region, Russia; A.Kottsova@tudelft.nl

³ Center for Hydrocarbon Recovery of Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow region, Russia; Elizaveta.Shvalyuk@skoltech.ru

⁴ Delft University of Technology, Delft, The Netherlands; p.l.j.zith@tudelft.nl

Abstract. The article describes the effect of different physico-chemical factors on formation damaged caused by in-situ clay particles migration resulted from water injection into clastic reservoir.

Key words: clay particles migration, permeability impairment, formation damage

For citation: Tchistiakov A.A., Kottsova A.K., Shvalyuk E.V., Zitha L.J. Physico-chemical factors of clay particles migration and formation damage. *Moscow University Geol. Bull.* 2022: 4: 104–110. (In Russ.).

Введение. Снижение приемистости скважин — распространенная проблема при закачке воды на нефтяных и геотермальных месторождениях. К наиболее распространенным причинам снижения проницаемости пород в околоскважинном пространстве относится кольматация порового пространства в результате миграции пластовых (*in situ*) глинистых частиц, спровоцированной либо высокой скоростью закачки, либо изменением физико-химических условий при проникновении в пласт раствора с химическим составом, отличающимся от естественного состава воды формации. Несмотря на сравнительно активное изучение проблем потери проницаемости в последние два десятилетия [Tchistiakov, 2000; Bennion, 2002; Bedrikovetsky, 2014; Kalantarias, 2014; Михайлов и др., 2016; Кожевников, 2016; Civan, 2016], проведение теоретических и экспериментальных исследований остается актуальным для

проектирования системы поддержания пластового давления, закачки низкоминерализованной воды с целью увеличения нефтеотдачи выработанных месторождений, а также для разработки геотермальных резервуаров.

Целью нашей работы были всесторонний теоретический анализ влияния физико-химических факторов на миграцию пластовых глинистых частиц и экспериментальное моделирование процесса их миграции в терригенном коллекторе.

Теория миграции глинистых частиц и кольматации порового пространства. Механизм миграции пластовых глинистых частиц и кольматации порового пространства. Для простоты объяснения механизма миграции глинистых частиц в породе можно представить модель минерального скелета относительно чистого песчаника как систему соединенных между собой песчаных зерен, на поверхности

которых адсорбированы разрозненные глинистые частицы и микроагрегаты. Теоретическую модель порового пространства породы, соответственно, можно представить в виде системы пор, соединенных между собой более узкими поровыми каналами [Priisholm et al., 1987].

При изменении физико-химических свойств порового флюида в результате закачки в пласт внешнего раствора может происходить распад микроагрегатов, а также отрыв отдельных глинистых частиц и микроагрегатов от песчаных зерен. В результате этого они мигрируют вместе с фильтрующимся раствором и переотлагаются в более узких поровых каналах, что приводит к существенному уменьшению проницаемости породы в околоскважинном пространстве [Vaidya, Fogler, 1990]. Процессы диспергации микроагрегатов и десорбции глинистых частиц от поверхности песчаных зерен определяются коллоидными взаимодействиями. Соответственно, этот механизм потери проницаемости пласта логично выделить в отдельный коллоидный тип повреждения пласта [Tchistiakov, 2000].

При интенсивной закачке отрыв и переотложение глинистых частиц и микроагрегатов могут быть также спровоцированы высокой скоростью потока в поровом пространстве даже без изменения физико-химических свойств флюида. Такой тип потери проницаемости по физике преобладающего процесса — гидродинамический [Vaidya, Fogler, 1990; Bennion, 2002]. Степень кольматации пласта в результате гидродинамической миграции частиц зависит от скорости фильтрации флюида, а также от морфологии и поверхностного заряда глинистых минералов и песчаных зерен. Поверхностный заряд определяется минеральным составом песчаной и глинистой фракции, а также физико-химическими свойствами порового раствора.

К наиболее значимым физико-химическим факторам, влияющим на коллоидную кольматацию пласта, относятся минеральный состав породы, концентрация и состав солей в закачиваемом растворе, его pH и температура [Vaidya, 1990; Fogler, 1990; Rosenbrand et al., 2015]. Соответственно, в теоретической части статьи мы подробно рассматриваем влияние каждого из этих факторов. Для простоты изложения при описании механизма миграции мы используем в дальнейшем общий термин «глинистые частицы» как для микроагрегатов, так и для отдельных частиц, учитывая, что такое разделение часто имеет чисто теоретическую значимость.

Формирование двойного электрического слоя вокруг глинистых частиц в водном растворе. Изоморфные замещения катионов Si^{4+} на катионы меньшей валентности (Al^{3+} , Mg^{2+} или др.) в кристаллической структуре глинистых минералов приводят к формированию на их базисных поверхностях избыточного отрицательного заряда, который компенсируется положительно заряженными

обменными катионами [Osipov, Sokolov, 1978, 2013; Kumar et al., 2017].

В водных растворах происходит гидратация обменных катионов, что приводит к формированию двойного электрического слоя (ДЭС) вокруг глинистых частиц. ДЭС состоит из отрицательно заряженной поверхности глинистой частицы и слоя противоположно заряженных катионов в окружающем ее растворе. При этом слой катионов ДЭС в свою очередь состоит из адсорбционного слоя, непосредственно прилегающего к поверхности глинистой частицы, и диффузного слоя, формирующегося на некотором удалении от минеральной поверхности в результате диссоциации катионов в водной среде. Катионы адсорбционного и диффузного слоев притягиваются к поверхности глинистых частиц электростатическими силами и уравновешивают их поверхностный отрицательный заряд (рис. 1).

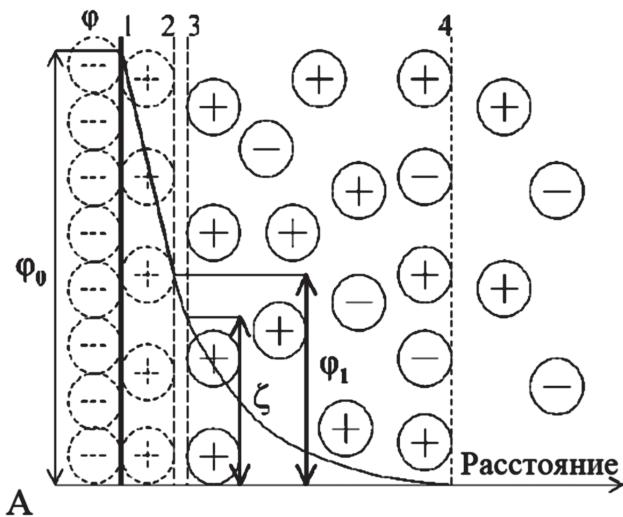
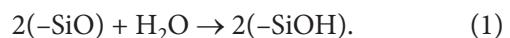


Рис. 1. Строение двойного электрического слоя на границе поверхности глинистой частицы с водным раствором, Φ_0 — поверхностный потенциал, Φ_1 — потенциал Штерна, ξ — потенциал: 1 — поверхность глинистой частицы, 2 — граница адсорбционного слоя, 3 — плоскость скольжения, 4 — граница диффузного слоя

ξ -потенциал представляет собой разность потенциалов дисперсионной среды и неподвижного слоя жидкости, окружающего частицу. Взаимодействие между заряженными частицами определяется в первую очередь перекрытием их диффузных слоев, поэтому ξ -потенциал представляет собой важный параметр для определения типа взаимодействия частиц, а именно их стремления к коагуляции или диспергированию.

Заряд боковых сколов в водной среде образуется в результате их гидратации с образованием SiOH -групп:



Соответственно, в зависимости от pH среды на сколах формируется положительный или отрицательный заряд, который определяет стабильность глинистых частиц [Tchistiakov et al., 2001]. Более

подробно этот эффект описан в соответствующем разделе.

Баланс сил, действующих на глинистую частицу, адсорбированную на поверхности песчаного зерна. Стабильность глинистой частицы, т. е. ее адсорбция или десорбция с поверхности песчаного зерна контролируется балансом следующих сил [Tchistiakov et al., 2000]:

$$F_{tot}(h) = F_{LVA}(h) + F_{DLR}(h) + F_{BR}(h) + F_{HR}(h) + F_{IHL}, \quad (2)$$

где F_{tot} — результирующая сила взаимодействия глинистой частицы с поверхностью минерального скелета (имеет положительный знак, если преобладают силы отталкивания, и отрицательный знак, если преобладают силы притяжения); F_{LVA} — сила Лондона–Ван-дер-Ваальса; F_{DLR} — сила электростатического отталкивания, вызванная перекрытием ДЭС одноименно заряженной поверхности глинистой частицы поверхностью минерального скелета; F_{BR} — сила отталкивания Борна (имеет существенное влияние на расстояниях менее 5 Å); F_{HR} — гидродинамическая сила (зависит от скорости движения флюида в породе); F_{IHL} — сила взаимодействия слоев связной воды между глинистой частицей и поверхностью минерального скелета (оказывает расклинивающее воздействие); h — расстояние между частицей и поверхностью минерального скелета. В работе [Bedrikovetsky, Caruso, 2014] предложено также рассматривать гравитационную силу в уравнении равновесия. При этом отметим, что ее вклад в баланс действующих сил определяется взаимной ориентировкой глинистой частицы и поверхности песчаного зерна. Согласно [You et al., 2015] значение гравитационной составляющей на 2–4 порядка меньше по сравнению с гидродинамической силой и силой электростатического отталкивания.

Влияние минерализации порового раствора. Электрокинетический потенциал — один из ключевых параметров, определяющих стабильность глинистых частиц и суммарный баланс сил их взаимодействия с поверхностью минерального скелета [Khilar, Fogler, 1987; Rosenbrand et al., 2015]. Теоретически при постоянстве других параметров (например, температуры и pH) увеличение концентрации ионов в растворе вызывает переход части катионов из диффузного слоя в адсорбционный за счет возникающего градиента концентрации. Это в свою очередь приводит к снижению ξ -потенциала частиц [Осипов и др., 1989].

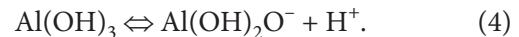
Уменьшение минерализации и, соответственно, увеличение ξ -потенциала приводит к повышению электростатического отталкивания между глинистыми частицами и поверхностями песчаных зерен, к которым они были адсорбированы в процессе осадконакопления. Соответственно, закачка опресненной воды в песчаные коллекторы может вызвать отрыв глинистых частиц от минеральных стенок пор. Последующая миграция глинистых частиц

вместе с движущимся потоком может привести к их переотложению в более узких поровых каналах, закупорке последних и, соответственно, к снижению проницаемости породы в целом [Vaidya, Fogler, 1990; Davis et al., 1978; Tchistiakov et al., 2001].

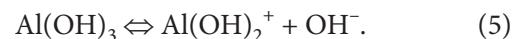
Влияние pH порового раствора. В зависимости от pH водной среды заряд сколов глинистых частиц может меняться [Osipov, Sokolov, 1978; Davis et al., 1978; Tchistiakov et al., 2001]. В соответствии с существующими представлениями в щелочной среде происходят частичная диссоциация гидроксила и его переход в раствор, при этом на сколах формируется избыточный отрицательный заряд:



Если ион Si^{4+} замещен на ион Al^{3+} , группа $(-\text{AlOH})^-$ также способна к диссоциации в зависимости от уровня pH. В щелочной среде группа диссоциирует с образованием протона



В кислой среде диссоциация происходит с выделением иона OH^-



Таким образом, соотношение ионов OH^- и H^+ в растворе влияет на тип и степень диссоциации и, соответственно, определяет заряд боковых сколов. Увеличение pH (т.е. увеличение концентрации ионов OH^-) приводит к увеличению отрицательного заряда на боковых сколах глинистых частиц. Если породообразующий минерал представлен кварцем, заряд поверхности которого в естественных природных условиях отрицательный, увеличение pH выше изоэлектрической точки глинистых частиц будет вызывать их диспергацию с поверхности песчаных зерен и, соответственно, уменьшение проницаемости пласта [Kottsova et al., 2021]. Уменьшение pH ниже изоэлектрической точки приводит к возникновению положительного заряда на боковых сколах глин из-за эффекта протонирования. Это в свою очередь способствует стабилизации глинистых частиц на кварцевых зернах, у которых смена поверхностного заряда на положительный происходит при $\text{pH} < 3,5$, что не типично для известных резервуаров [Kottsova et al., 2021].

В течение долгого времени считалось, что зарядке подвержены лишь боковые сколы глинистых минералов. Сравнительно недавно было установлено, что базальные поверхности глинистых частиц также подвержены влиянию pH, причем эффект от увеличения pH может отличаться для силикатной (тетраэдрической) и алюминиевой (октаэдрической) сетки. В частности, выявлено, что силикатные поверхности каолинита приобретают отрицательный заряд при $\text{pH} > 4$, в то время как алюминиевые поверхности заряжены отрицательно только при $\text{pH} > 9$ [Kumar et al., 2017]. Возможно, разницей в изоэлектрических точках тетраэдрического и окта-

эдрического слоев можно объяснить существенные различия в опубликованных значениях изоэлектрической точки для одного и того же минерала.

Влияние температуры. Повышение температуры приводит к увеличению ξ -потенциала, что в свою очередь способствует диспергированию частиц [Rodríguez, Araujo, 2006; Rosenbrand et al., 2015]. В то же время гидродинамическое воздействие на адсорбированную частицу уменьшается из-за уменьшения вязкости флюида. Более того, расклинивающий эффект слоя связанный воды также уменьшается [Tchistiakov, 2000а, б]. Опубликованные данные свидетельствуют о том, что суммарный эффект роста температуры все же способствует десорбции глинистых частиц, их миграции и последующему уменьшению проницаемости породы [You et al., 2015; Ноздратенко, 2015]. Однако при интерпретации экспериментальных данных следует учитывать, что уменьшение проницаемости при росте температуры может быть также обусловлено термическим расширением скелета породы и смыканием поровых каналов [Cheng, Milsch, 2020].

Материалы и методы и исследования. Для изучения эффекта влияния снижения минерализации на проницаемость терригенного коллектора была проведена серия фильтрационных экспериментов на образцах песчаника из формации Бентхаймер. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, песчаная фракция породы представлена почти полностью кварцем, глинистая фракция — каолинитом. Доля кварца в общем составе породы равна 98%, а каолинита, соответственно, 2%. Длина образца составляла 17 см, диаметр 3,8 см. Для моделирования эффекта снижения минерализации на миграцию глинистых частиц использовался раствор NaCl с минерализацией 5 г/л, который замещался в процессе эксперимента на деминерализованную воду.

В процессе фильтрационного эксперимента вдоль образца на трех равных интервалах изменился перепад давления с целью мониторинга изменения проницаемости в процессе фильтрации жидкости. Перед кернодержателем был установлен фильтр 0,5 мкм для очистки от случайных примесей в закачиваемом растворе. Выходящую из образца жидкость (фильтрат) отбирали в кюветы для последующего анализа взвешенных частиц. Объем каждой пробы составлял 0,2 порового объема образца. Мутность фильтрата измеряли методом нефелометрии, а распределение взвешенных частиц по размерам определяли методом динамического светорассеяния.

Эксперимент состоял из нескольких этапов: насыщение керна солевым раствором, измерение проницаемости, закачка деминерализованной воды с различной скоростью потока, измерение проницаемости. Параметры закачки приведены в табл. 1. Объем закачки на каждой стадии был равен 10 поровым объемам. В статье мы приводим результаты лишь одного наиболее репрезентативного теста, однако

аналогичные закономерности были выявлены и в других экспериментах.

Таблица 1
Параметры эксперимента

Этап эксперимента	1	2	3	4	5	6
Расход деминерализованной воды, мл/мин	1,18	2,36	4,72	7,08	9,95	11,81

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты измерения проницаемости при первоначальном насыщении образца раствором хлорида натрия приведены в табл. 2. Близкие значения проницаемости во всех секциях образца свидетельствуют о его однородности, что делает возможным сравнительный анализ значений перепада давления, измеряемого в них во время последующей фильтрации деминерализованной воды.

Таблица 2
Проницаемость керна до и после фильтрационных экспериментов

Секция	Исходная проницаемость керна, $\text{мкм}^2 \times 10^3$	Конечная проницаемость керна, $\text{мкм}^2 \times 10^3$	Снижение исходной проницаемости, %
Общая	1900	1600	15%
1	1780	1660	7%
2	1930	1620	16%
3	1860	1510	19%

При вытеснении раствора хлорида натрия деминерализованной водой уже на первой минимальной ступени расхода, равной 1,18 мл/мин, было зафиксировано повышение перепада давления последовательно во всех секциях образца (рис. 2). В фильтрате, выходящем из образца, взвешенные частицы обнаружены непосредственно после замещения первого порового объема деминерализованной водой (рис. 3). При этом отметим, что их концентрация постепенно возрасла, достигая своего максимума на момент прохождения первых 5-ти поровых объемов воды, после чего снижалась и достигала минимума при прокачке через образец последнего 10-го порового объема.

Увеличение расхода деминерализованной воды до 2,36 мл/мин на второй стадии эксперимента приводило к увеличению перепада давления во всех интервалах образца, начиная примерно с 4-го прокаченного порового объема. На графике зависимости мутности выходящей из образца воды выделяются два пика концентрации взвешенных частиц (рис. 3). Первый пик соответствует прохождению первого порового объема при увеличенном расходе. Второй всплеск концентрации взвешенных частиц в фильтрате начинается после прохождения 4-го порового объема, что хорошо коррелирует с упомянутым ранее ростом перепада давления в образце (рис. 4). На основании этих данных можно предположить, что при расходе 2,36 мл/мин, со-

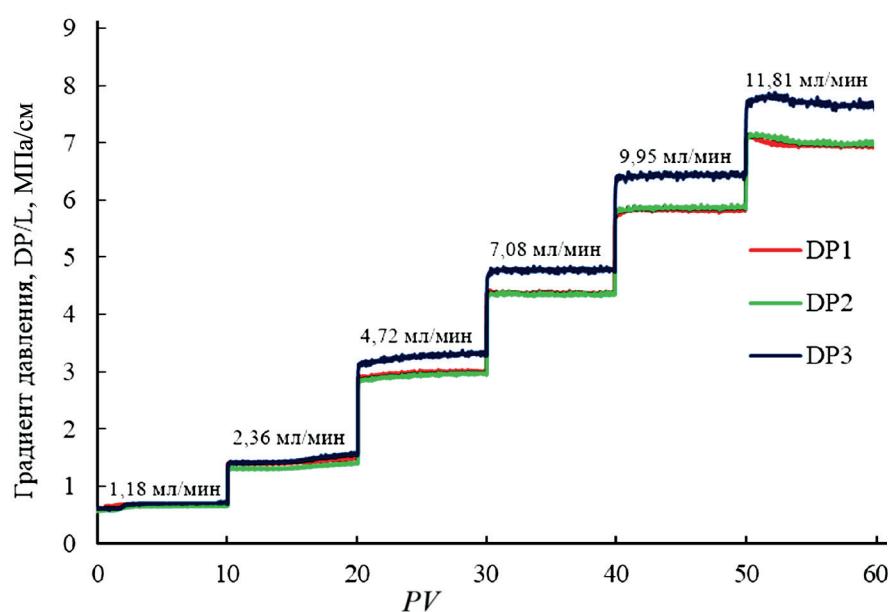


Рис. 2. Градиент перепада давления в зависимости от объема прокачанной жидкости на различных этапах эксперимента

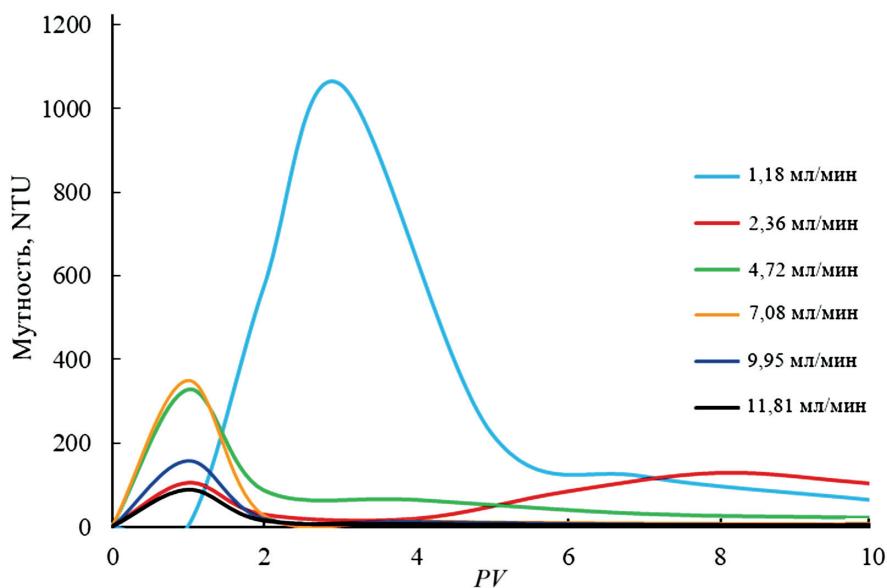


Рис. 3. Мутность истекающего из керна раствора на различных этапах эксперимента

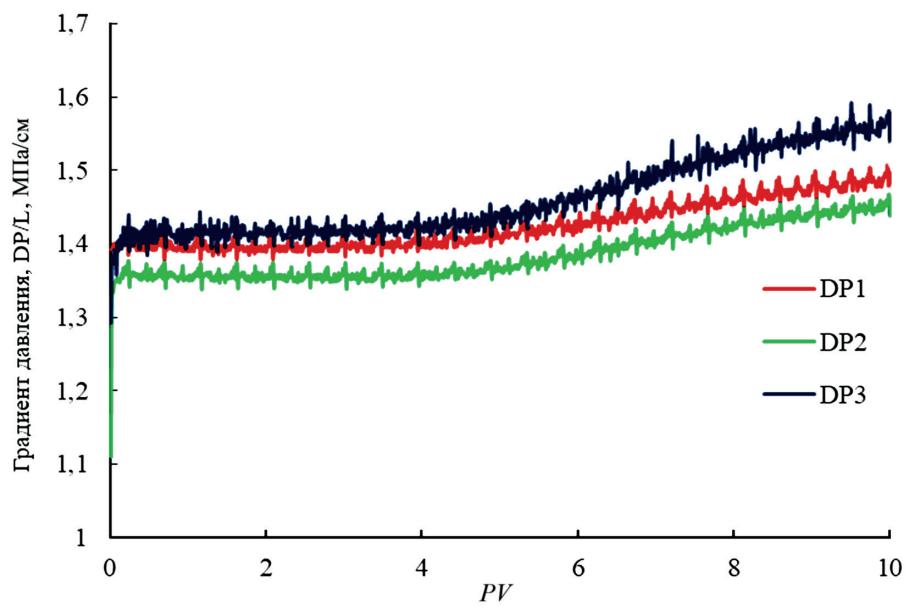


Рис. 4. Градиент перепада давления на стадии закачки деминерализованной воды при расходе 2,36 мл/мин

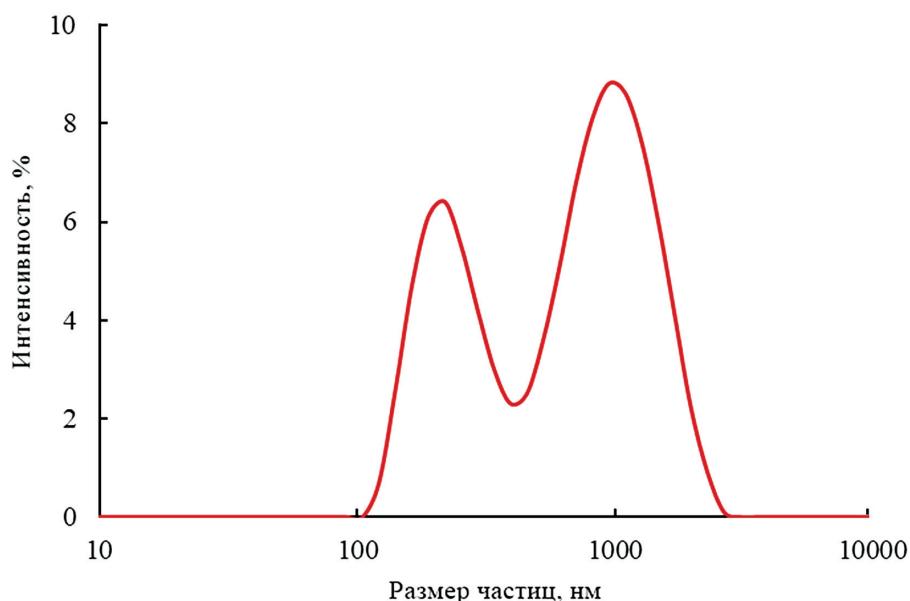


Рис. 5. Распределение частиц каолинита по размеру

ответствующем линейной скорости потока 0,2 см/мин, было достигнуто ее критическое значение для частиц каолинита в исследуемом песчанике, это и привело к гидродинамическому отрыву части из них от поверхности минерального скелета и уменьшению проницаемости породы. Важно отметить, что на каждой последующей ступени расхода жидкости в выходной секции керна наблюдалось все более существенное увеличение перепада давления по сравнению с входной и средней секциями образца, что можно объяснить постепенным накоплением в ней частиц, мигрирующих из первых двух секций. Рассчитанные значения снижения проницаемости по сравнению с исходной (табл. 2) для трех секций образца также свидетельствуют о закономерном уменьшении конечной проницаемости по направлению движения потока жидкости.

Анализ мутности фильтрата показал, что каждое увеличение расхода жидкости выше критического (2,36 мл/мин) вызывало отрыв дополнительного количества глинистых частиц и увеличение мутности фильтрата, уменьшающейся в процессе прохождения нескольких поровых объемов воды. При этом пиковая концентрация мутности фильтрата наблюдалась в момент выхода 1-го порового объема жидкости. Начиная с четвертой ступени расхода, равной 7,08 мл/мин, частицы каолинита на выходе из образца фиксировались лишь при прокачке первых 2,3 порового объема, при этом общее количество выносимых из образца частиц уменьшалось на каждой новой ступени расхода.

Анализ размера дисперсных частиц каолинита в фильтрате показал наличие двух пиков, соответствующих диаметру частиц 0,2 и 1 мкм. Максимальный диаметр взвешенных частиц составил около 5 мкм. Соответственно, все частицы большего диаметра удерживались в породе. При этом диаметр поровых каналов в породе, согласно данным ртутной порометрии, колебался от 10 до 30 мкм (рис. 5).

Выводы. 1. Снижение минерализации с 5 до 0 г/л NaCl вызывает миграцию внутренних глинистых частиц и, как следствие, приводит к уменьшению проницаемости породы. Степень снижения проницаемости возрастает в направлении движения жидкости от входной к выходной секции образца из-за закупоривания поровых каналов частицами, движущимися с потоком.

2. Количественный анализ мутности фильтрата показывает, что она постепенно увеличивается после начала замещения раствора хлорида натрия деминерализованной водой, достигает своего максимума на момент прохождения первых 5-ти поровых объемов воды, после чего снижается. Теоретически постепенное нарастание концентрации взвешенных частиц в фильтрате можно объяснить комбинацией нескольких факторов, а именно неодновременным отрывом глинистых частиц от песчаных зерен, разным временем приобретения ими скорости потока жидкости, результатом разницы их размера, формы и, соответственно, гидравлической крупности, а также различной скоростью водного потока на микроуровне и частичным задерживанием в поровых сужениях.

3. Критическое значение расхода деминерализованной воды для частиц каолинита в песчанике из формации Бентхаймер достигается при расходе 2,36 мл/мин и соответствующей ему скорости движения потока 0,2 см/мин. Это значение установлено на основе измерений перепада давления вдоль образца керна и анализа мутности фильтрата, выходящего из него.

4. Каждое увеличение скорости потока выше критического значения приводит к отрыву дополнительного количества каолинитовых частиц под воздействием гидродинамической силы. При этом амплитуда пиков мутности фильтрата уменьшается с каждым последующим увеличением расхода деминерализованной воды.

5. Сравнительный анализ графиков мутности позволяет сделать вывод о том, что для исследованной породы увеличение электростатического отталкивания в результате уменьшения минерализации вызывает более массовую миграцию глинистых частиц по сравнению с миграцией, обусловленной ростом скорости гидродинамического потока.

Благодарности. Авторы благодарят Дельфтский технологический университет и Центр до-

бычи углеводородов Сколковского института науки и технологий за предоставленную возможность провести экспериментальные исследования.

Финансирование. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2020-119 в рамках программы развития НЦМУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кожевников А.В. Влияние минерализации пластовых вод на проницаемость и нефтеотдачу коллекторов // Научный форум. Сибирь — Естественные науки. 2016. № 3. С. 64–66.

Михайлов Д.Н., Рыжиков Н.И., Шако В.В. Экспериментальное исследование процесса переноса и накопления суспензии твердых частиц и взвеси глины в образцах горных пород // Механика жидкости и газа. 2015. № 5. С. 557–559.

Ноздратенко С.А., Акульшин А.А., Переверзева В.С. Виды кольматации скважин // Поколение будущего: взгляд молодых ученых. 2015. С. 163–165.

Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.

Bedrikovetsky P., Caruso N. Analytical model for fines migration during water injection // Transp. Porous Media. 2014. Vol. 101, N 2. P. 161–189.

Bennion D.B. An overview of formation damage mechanisms causing a reduction in the productivity and injectivity of oil and gas producing formations // J. Can. Petrol. Technol. 2002. Vol. 41, N 11. P. 29–36.

Cheng C., Milsch H. Permeability variations in illite-bearing sandstone: Effects of temperature and NaCl fluid salinity // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2020. Vol. 125.

Civan F. Reservoir formation damage. Third ed. 2016. 997 p.

Davis J.A., James R.O., Leckie J.O. Surface ionization and complexation at the oxide/water interface: I. Computation of electrical double layer properties in simple electrolytes // J. Colloid Interface Sci. 1978. Vol. 63, N 3. P. 480–499.

Kalantari A., Bedrikovetsky P. Stabilization of external filter cake by colloidal forces in a “well-reservoir” system // Ind. Eng. Chem. Res. 2014. Vol. 53, N 2. P. 930–944.

Khilar K.C., Fogler H.S. Colloidally induced fines migration in porous media. // Rev. Chem. Engineering. 1987. N 4. P. 41–108.

Kottsova A.K., Yegane M., Tchistiakov A.A., Zitha P.L.J. Effect of electrostatic interaction on the retention and remobilization of colloidal particles in porous media. M., 2021.

Kumar N. et al. probing the surface charge on the basal planes of kaolinite particles with high-resolution atomic force microscopy // Langmuir. 2017. Vol. 33, N 50. P. 14226–14237.

Mietta F., Chassagne C., Winterwerp J.C. Shear-induced flocculation of a suspension of kaolinite as function of pH and salt concentration // J. Colloid Interface Sci. Elsevier Inc. 2009. Vol. 336, N 1. P. 134–141.

Mitchel J.K. Fundamentals of soil behaviour // J. Wiley and Sons, Inc. New York-London-Sydney-Toronto, 1976.

Osipov V., Sokolov V. Structure formation in clay sediments // Bull. Assoc. Engineering Geol. 1978. Vol. 18.

Osipov V.I., Sokolov V.N. Clays and their properties // Composition, structure and formation of properties. 2013. 578 p.

Priisholm S., Nielsen B.L., Haslund O. Fines migration, blocking, and clay swelling of potential geothermal sandstone reservoirs, Denmark // SPE Form Eval 2 (02). Pap. Number SPE-15199-PA, 1987. P. 168–178.

Rodríguez K., Araujo M. Temperature and pressure effects on zeta potential values of reservoir minerals // J. Colloid Interface Sci. 2006. Vol. 300, N 2. P. 788–794.

Rosenbrand E. et al. Different effects of temperature and salinity on permeability reduction by fines migration in Berea sandstone // Geothermics. CNR-Istituto di Geoscienze e Georisorse. 2015. Vol. 53. P. 225–235.

Tchistiakov A.A. Colloid chemistry of in-situ clay-induced formation damage // SPE Int. Symp. Form. Damage Control. Lafayette, 2000a. P. 371–379.

Tchistiakov A.A. Physico-chemical aspects of clay migration and injectivity decrease of geothermal clastic reservoirs // Proceed. World Geothermal Congress 2000. Kyushu, Tohoku, Japan, May 28–June 10, 2000b. P. 3087–3095.

Tchistiakov A.A., Sokolov V.N., Osipov V.I., Nguyen Buu-Long. Saponite clay tailing treatment by artificial sedimentation. Proceed. Intern. Symp. on Suction, Swelling, Permeability and Structure of Clays. Shizuoka 2001. Japan, Shizuoka, 11–13 January 2001. P. 475–484.

Vaidya R.N., Fogler H.S. Fines migration and formation damage // Influence of pH and ion exchange. 1990. N 11. P. 125–132.

You Z., Bedrikovetsky P., Badalyan A., Hand M. Particle mobilization in porous media: Temperature effects on competing electrostatic and drag forces: temperature effects on fines migration // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42, N 8.

Статья поступила в редакцию 18.02.2022,
одобрена после рецензирования 09.03.2022,
принята к публикации 31.08.2022