

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В ВОДОНОСНОМ ПЛАСТЕ-ПРИЕМНИКЕ ЗАКАЧИВАЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

А.Ф. Соколов, О.М. Монахова

Наиболее распространенным технико-технологическим решением утилизации производственных сточных вод газодобывающих предприятий в соответствии с требованиями природоохранных норм является захоронение жидких отходов производства в водоносных пластах [1].

Основную часть производственных сточных вод образует вода (пластовая и конденсационная), поступающая через добывающие скважины из продуктивного пласта эксплуатационного объекта вместе с газом. Кроме того, в состав закачиваемой в пласт-приемник жидкости могут входить талые и дождевые воды, механические примеси и примеси различных технологических жидкостей (метанол, буровой раствор, компрессорное масло, углеводородный газовый конденсат). Содержание экологически опасных примесей в закачиваемой жидкости регламентируется санитарно-экологическими нормами [1, 2].

При закачке производственных сточных вод в пласт-приемник особенно важно знать, насколько изменится приемистость нагнетательной скважины, если однофазная фильтрация водного потока (с небольшими эмульгированными примесями, например нефтепродуктов) трансформируется в двухфазную фильтрацию смеси воды и жидких углеводородов.

Были проведены исследования в форме физического моделирования и натурального эксперимента применительно к условиям разрабатываемого месторождения углеводородов – Заполярного НГКМ.

В экспериментах использовали физические модели пласта длиной более 300 мм. На таких моделях влияние «концевых эффектов» на результаты экспериментов было в пределах точности измерений (не более $\pm 3\%$) [3]. Основные данные о моделях пласта, использовавшихся при изучении процессов фильтрации водоконденсатной смеси, представлены в таблице.

Основные данные о моделях пласта Заполярного НГКМ

№ п/п	Параметры модели	Эксперимент		
		первый	второй	третий
1	Длина L , см	30,6	100,2	45,0
2	Площадь поперечного сечения F , см ²	5,228	11,76	5,228
3	Пористость m , %	38,8	37,2	38,4
4	Объем пор V_p , см ³	62,17	438,49	92,16
5	Проницаемость k , мД	51,6	19,61	30,6
6	Содержание глинистых минералов в породе, % масс.	12,7, в том числе 3,8 – монтмориллонит и гидрослюда		

Согласно данным таблицы собранные модели обладали характеристиками, близкими к соответствующим характеристикам натурного пласта-приемника производственных сточных вод. Содержание глинистых минералов в насыпном образце породы было близко к среднему для данного объекта ($\sim 4\%$). Отобранные и использовавшиеся пробы пластовой воды пласта-приемника Заполярного полигона являлись представительными для этого пласта.

В отличие от фильтрации одной фазы или вытеснения флюида другим, с ним смешивающимся, в экспериментах по фильтрации водоконденсатной смеси в модель пласта подавали практически одновременно две не смешивающиеся друг с другом жидкости – водную основу производственных сточных вод и углеводородный конденсат как «примесь».

Всего было выполнено три «программных» эксперимента: первый и второй моделировали процесс вытеснения пластовой воды сеноманским конденсатом Заполярного НГКМ и отличались размерами моделей пласта, а также рабочими давлениями; в третьем в качестве примеси углеводородной жидкости (УВЖ) исследовали

н-декан. Это давало возможность получить информацию, которая позволила бы сделать выводы о влиянии состава углеводородной примеси на фильтрацию смеси.

Следует отметить, что в первом и третьем экспериментах после закачки определенного количества смеси вода + УВЖ (сеноманский конденсат, вода) в модель пласта подавали пластовую воду без примеси углеводородов, в первом эксперименте также добавили период, когда в модель закачивалась водная фаза производственных сточных вод (без примеси).

Как и предполагалось, при закачке в пласт водоуглеводородной смеси приемистость пласта снижалась по сравнению с приемистостью для воды без примесей. Для оценки масштабов такого снижения были рассчитаны относительные фазовые проницаемости для водной фазы производственных сточных вод и для конденсата (как примеси) на этапах относительной стабилизации процесса двухфазной фильтрации.

Для первого эксперимента интервал включал $\sim 7,1-7,7$ объемов пор закачанной смеси, для второго эксперимента – $\sim 8,0-8,7$. Соответствующие водо- и конденсатонасыщенности (S_w и S_k) в этих интервалах составляли 77 и 23 % соответственно для первого эксперимента, 85,5 и 14,5 % – для второго.

Для первой модели исходная абсолютная проницаемость по пластовой воде – 51,6 мД, относительные проницаемости в указанном интервале закачки для водной фазы производственных сточных вод и конденсата составили 0,1896 и 0,0664. Суммарная относительная проницаемость для смеси – 0,2560 (или $0,2560 \cdot 51,6 = 13,21$ мД).

Для второй модели соответствующие величины составили соответственно 19,61, 0,2284 и 0,1224 мД. Суммарная относительная проницаемость для смеси – 0,3508 (или $0,3508 \cdot 19,61 = 6,88$ мД).

Таким образом, по сравнению с приемистостью для пластовой воды приемистость пласта-приемника для смеси может снизиться в 3–4 раза, если содержание конденсата в промышленных сточных водах будет составлять ~ 10 %.

Естественно, и при меньшем количестве конденсата как примеси будет наблюдаться эффект задержки пористой средой углеводородов, но размер зоны «улавливания» соответственно количе-

ству примесей уменьшится (следует отметить, что «насыщение» ближайшей к нагнетательной скважине зоны произойдет сравнительно быстро даже при небольшом количестве примесей, поскольку через эту зону будет профильтрован огромный объем смеси, в пересчете на объемы пор зоны).

Для того чтобы представить, как соотносятся полученные относительные фазовые проницаемости с данными других исследователей, была построена усредненная диаграмма проницаемостей для исследовавшихся систем «вода – нефть» (для систем «вода – конденсат» имеются данные только для образцов цементированных плотных коллекторов, с которыми, очевидно, некорректно сравнивать данные результаты).

На рис. 1 приведены усредненные зависимости соответствующих кривых, полученных на насыпных песках [4]. Здесь же нанесены единичные результаты. Согласно рисунку в условиях пласта-приемника Заполярного полигона область наименьшей приемистости для водоконденсатной смеси исследованного состава смещена существенно в сторону меньших конденсатонасыщенностей, что следует рассматривать как предостережение при закачке производственных сточных вод даже с небольшим количеством примесей конденсата.

Сравнительный анализ удобно делать, расположив графики всех трех экспериментов один под другим (рис. 2).

Согласно рис. 2 до закачки приблизительно одного порового объема жидкости ($V_{зжк} = 0,933$) никакой разницы в графиках нет. К концу этого этапа в поровом пространстве в среднем содержится 10 % УВЖ (в третьем эксперименте – 9,33 % н-декана). До закачки 0,933 объема пор смеси во всех трех экспериментах идет накопление средой УВЖ до величины 9,33 % объема пор (кривая 3).

В эксперименте с вододекановой смесью (см. рис. 2в) обнаружено появление УВЖ на выходе модели пласта (кривая 2). Аналогичный этап (извлечения наряду с водой УВЖ) наступает в первом эксперименте после закачки 2,551 объема пор, во втором – после закачки 1,864 объема пор смеси. С этого момента или вскоре после наступления этого момента во всех трех экспериментах прекращается увеличение средней насыщенности модели пласта УВЖ. Максимальная насыщенность модели УВЖ при за-

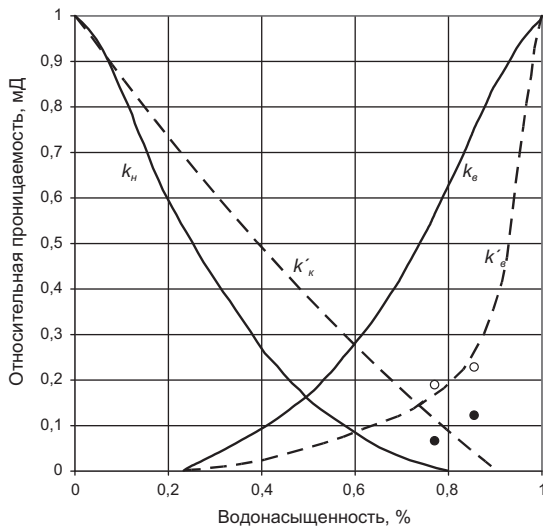


Рис. 1. Графики относительных фазовых проницаемостей песчаников и песков для УВЖ и воды: k_w и k_g – осреднение трех диаграмм, опубликованных в работе [3] (песчаник; нефть, вода); $k'_k(\bullet)$ и $k'_e(\circ)$ – экспериментальные данные А.Ф. Соколова (песок водоносного пласта-приемника Заполярного полигона)

качке смеси составила соответственно в первом, втором и третьем экспериментах ~ 27, 19, 10 % (см. кривые 1 на рис. 2 а, б, в).

Второй период экспериментов (после появления УВЖ на выходе) характеризуется постепенной стабилизацией средней насыщенности модели пласта УВЖ. Во всех трех экспериментах этот практически стабилизировавшийся уровень оказался существенно ниже максимальной зафиксированной насыщенности и составил соответственно в первом, втором и третьем экспериментах 19,77; 14,5; 7 % объема пор. В течение этого второго периода наблюдалась и постепенная стабилизация состава извлекаемой из модели жидкости – он достаточно быстро приблизился к «номинальному» составу смеси, закачиваемой в модель.

При закачке водоконденсатной смеси насыщенность в пористой среде установилась на уровне, в 1,5–2 раза превышающем «номинальное» содержание конденсата в закачиваемой смеси, а при закачке вододекановой смеси – в 1,5 раза меньшем.

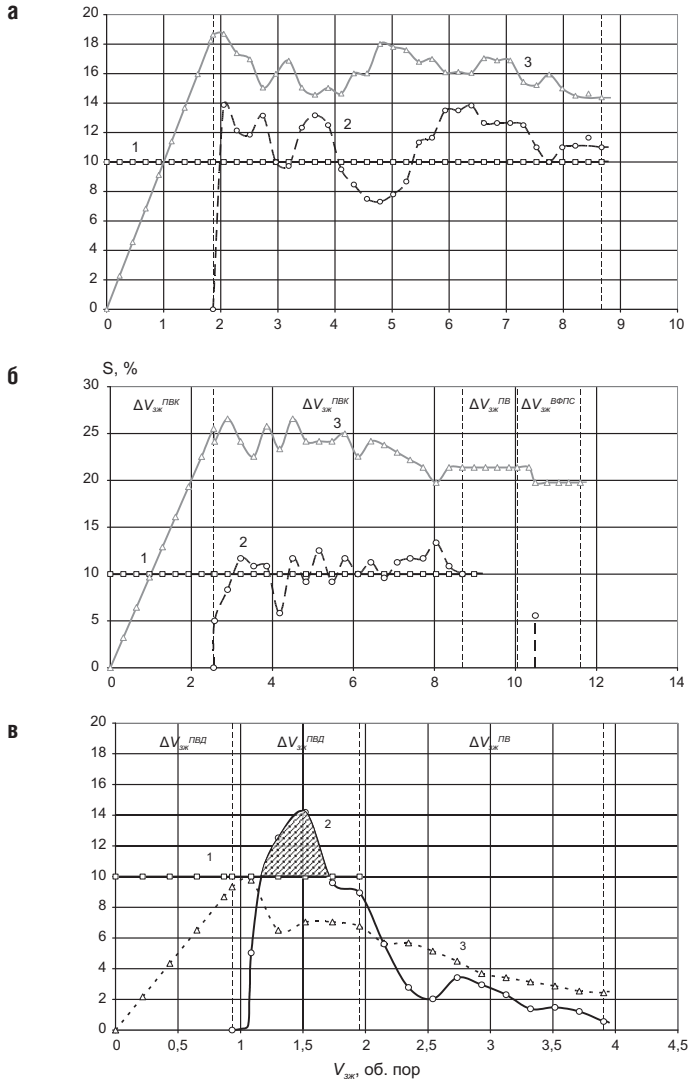


Рис. 2. Динамика закачки (кривые 1, % об. пор) и извлечения УВЖ (кривые 2, % об. пор), насыщенности порового пространства УВЖ (кривые 3, % об. пор) при вытеснении пластовой воды смесью УВЖ (10 %) и воды (90 %). УВЖ: а – сеноманский конденсат (модель пласта длиной $L = 0,306$ м); б – сеноманский конденсат (модель пласта длиной $L = 1,002$ м); в – н-декан (модель пласта длиной $L = 0,459$ м). Периоды нагнетания: $\Delta V_{зж}^{пвк}$ – смеси пластовой воды (ПВ) (90 %) и конденсата (10 %); $\Delta V_{зж}^{пв}$ – ПВ; $\Delta V_{зж}^{вфлпс}$ – водной фазы производственных сточных вод

Эти различия можно объяснить особенностями межмолекулярного взаимодействия разных по составу УВЖ со стенками порового пространства водонасыщенного пласта [5, 6, 7].

Высокомолекулярные компоненты конденсата достаточно активно вытесняют молекулы воды с твердой поверхности, и затем сорбированный слой углеводородов благодаря ван-дер-ваальсовому взаимодействию захватывает еще определенное количество углеводородов, т.е. накопление конденсата обусловлено гидрофобизацией пористой среды.

Н-декан в контакте с частично электрически заряженной поверхностью пор (благодаря наличию активных центров) не выдерживает конкуренции с водой, пористая среда остается гидрофильной, так что при фильтрации смеси воды с деканом последний продвигается по модели пласта в виде эмульгированных, разделенных водой капель.

Таким образом, стабилизировавшийся уровень насыщенности модели УВЖ обусловлен различными механизмами фильтрации смеси в первых двух и в третьем экспериментах.

При фильтрации водоконденсатной смеси сформировался снижающийся уровень конденсата вследствие гидрофобизации поверхности пор и удержания пористой средой части УВЖ в неподвижном состоянии.

При фильтрации вододекановой смеси неподвижная УВЖ в пористой среде, по существу, отсутствует. Установившаяся насыщенность (7 %) определяет количество н-декана, движущегося в эмульгированном состоянии в гидрофильной пористой среде с коэффициентом охвата модели пласта смесью, равным 0,7, – этим обусловлена «нехватка» н-декана по сравнению с «номинальным» его содержанием в нагнетаемой смеси.

Анализ результатов выполненных экспериментов по моделированию процесса вытеснения пластовой воды пласта-приемника производственными сточными водами, содержащими примесь углеводородной жидкости, позволяет сделать следующие выводы.

1. Механизм фильтрации водоуглеводородной смеси в водоносном пласте зависит от состава углеводородов. Если углеводороды не вызывают гидрофобизации пласта, смесь может двигаться в форме эмульсии. Углеводороды, гидрофобизирующие пласт,

сначала будут накапливаться в зоне нагнетания смеси как связанная фаза, и только после достижения порога гидродинамической подвижности этой фазой начнут фильтроваться вместе с водой на фоне неснижающейся насыщенности пласта углеводородами.

2. Для исследованной системы «пласт – производственные сточные воды Заполярного НГКМ» экспериментально установлено, что примесь сеноманского конденсата в закачиваемой жидкости будет способствовать гидрофобизации пласта, вследствие чего на первом этапе закачки вблизи нагнетательной скважины пласт будет удерживать конденсат до достижения уровня гидродинамической подвижности. Этот уровень при моделировании процесса составил 15–20 % объема пор.

3. В случае продолжения закачки в пласт-приемник производственных сточных вод с примесью сеноманского конденсата после достижения в районе нагнетательной скважины уровня гидродинамической подвижности закачанным конденсатом в пласте будет идти двухфазная фильтрация смеси с выходом, в том числе конденсата, в следующие зоны пласта.

4. Из экспериментальной оценки фазовых проницаемостей следует, что вследствие неизбежного образования у забоя нагнетательной скважины «пробки» из УВЖ как примеси в производственных сточных водах приемистость скважины может снизиться в 5–8 раз.

Список литературы

1. Гидрогеологический контроль на полигонах закачки промышленных сточных вод (методическое руководство): РД 51-31323949-48-2000. – М.: ИРЦ Газпром, 2000. – С. 8; с. 46.

2. СТО Газпром 18-2005. Гидрогеологический контроль на специализированных полигонах размещения жидких отходов производства в газовой отрасли. – М.: ИРЦ Газпром, 2005. – С. 27.

3. *Котяхов Ф.И.* О некоторых методах определения коэффициента нефтеотдачи пласта при вытеснении нефти водой / *Ф.И. Котяхов, Ю.С. Мельникова, С.А. Серебренников* // В кн. «Исследование нефтеотдачи пласта»: сб. докл. метод. совещания ВНИИ. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – С. 42–43.

4. *Гиматудинов Ш.К.* Физика нефтяного пласта. – М.: Гостоптехизд, 1963. – С. 26–31.

5. Физический энциклопедический словарь. – Т. I. – М: ГНИ «Советская энциклопедия», 1960. – С. 288–289.

6. *Ахматов А.С.* Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – С. 20–35.

7. *Гольдберг В.М.* Проницаемость и фильтрация в глинах / В.М. Гольдберг, Н.П. Скворцов – М.: Недра, 1986. – С.16–17; 28–35.