ВЛИЯНИЕ КАПИЛЛЯРНЫХ КОНЦЕВЫХ ЭФФЕКТОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАЗРАБОТКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ С СИЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ

А.Н. Михайлов
РГУНГ им. И.М. Губкина

Введение

Известно, что прогнозные показатели разработки месторождений углеводородов определяются на основе моделирования технологических процессов, реализуемых в залежи. В то же время при моделировании используются крупноразмерные ячейки, объёмы которых могут составлять сотни кубических метров. Неоднородность, присущая подавляющему большинству эксплуатационных объектов, учитывается путём введения неких эффективных параметров, характеризующих ячейку. При таком подходе не явным образом пренебрегают локальными эффектами, которые проявляются в небольших объёмах. Одним из таких эффектов является капиллярный концевой эффект. В работе раасматривается специфика проявления капиллярных концевых эффектов при разработке неоднородных пластов.

Анализ существующих представлений о капиллярных эффектах в неоднородных пластах

При рассмотрении случая контакта высокопроницаемого и малопроницаемого пластов (рис. 1). Можно увидеть, что на их границах возникают капиллярные концевые эффекты, обусловливающие скачок насыщенности в окрестности контакта пластов от S1 до S2 в зависимости от хода фильтрации от малопроницаемого к высокопроницаемому или от высокопроницаемого к малопроницаемому пласту.

Область проявления капиллярного концевого эффекта (L) не значительна, по сравнению с областью фильтрации. Поэтому их учёт при моделировании разработки требует проведения специальных исследований.

Специфика капиллярных концевых эффектов в пластах с переменной смачиваемостью

Области резких изменений капиллярного давления могут быть связаны не только с изменением проницаемости, но и с изменениями смачиваемости пласта.

Как показывают данные экспериментальных исследований по определению смачиваемости, представленные на рис. 2, смачиваемость может существенным образом изменяться по глубине. При этом отсутствует корреляция между фильтрационными свойствами и изменениями смачиваемости.

Сильная неоднородность смачиваемости по глубине может быть охарактеризована как текстурная смачиваемость**,** которая требует особого учета при анализе фильтрации, строения переходных зон и показателей разработки неоднородных эксплуатационных объектов.

Текстурная смачиваемость оказывает влияние на зависимости капиллярного давления и относительной фазовой проницаемости по водонасыщенности для гидрофобного и гидрофильного пластов (рис. 3).

Существенные различия функций относительных фазовых проницаемостей и функций капиллярного давления для гидрофильных и гидрофобных пластов обусловливают проявления капиллярных концевых эффектов по смачиваемости. Это предопределило необходимость проведения специальных исследований.

Моделирование вытеснения нефти водой из неоднородного по смачиваемости керна

Для анализа влияния капиллярных концевых эффектов на показатели разработки была использована модель, соответствующая условиям стандартного лабораторного эксперимента по вытеснению нефти водой (рис. 4). Рассматривался составной образец с неизменными значениями проницаемости, но с контрастной смачиваемостью. С использованием симулятора Eclips-100 была составлена мелкомасштабная модель, обеспечивающая возможность корректного учёта капиллярного концевого эффекта в зоне контраста смачиваемости.

Обобщенный результат моделирования показан на рис. 5, где даны зависимости стационарной скорости закачки от перепада давления.

Результаты численного эксперимента оказались неожиданными: вследствие влияния капиллярно-концевых эффектов на границе гидрофильного и гидрофобного регионов возникает сложный тип зависимости скорости от действия перепада давления. Особенности зависимости скорости фильтрации от перепада давления проявляются в

следующем: при малых значениях перепада давления возникает эффект капиллярной блокировки и скорость фильтрации через испытуемый образец равняется нулю.

На графике эта область показана красной пунктирной линией. Далее, начиная с некоторого критического значения перепада гидродинамического давления градиент превосходит градиент давления, возникающий в результате проявления концевых капиллярных эффектов и скорость фильтрации начинает возрастать с ростом перепада давления. Однако из-за проявления концевых капиллярных эффектов, зависимость скорости фильтрации от перепада давления становится нелинейной, что не соответствует закону Дарси.

На рис.5 этот участок показан зеленой пунктирной линией. При дальнейшем росте перепада давления влияние концевых капиллярных эффектов подавляется ростом перепада, и зависимость скорости фильтрации от перепада становится линейной, в соответствии с законом Дарси.

Важно подчеркнуть, что отмеченные аномалии связаны только с проявлением концевых капиллярных эффектов за счет текстурной смачиваемости.

Моделирование на той же сборке, но в случае одинаковой смачиваемости обоих регионов показывает обычную зависимость Дарси для скорости фильтрации. На рис. 5 это показано сплошной зеленой линией.

Отмеченные эффекты проявляются и в зависимости коэффициента вытеснения от перепада давления (рис. 6). Когда имеет место закачка в обратном направлении эти эффекты проявляются в меньшей степени.

Кроме этого, была рассмотрена ситуация с тремя (двумя гидрофильными и одним гидрофобным) регионами смачиваемости и постоянной проницаемостью. Условия численного эксперимента показаны на рис. 7.

При сравнении результатов моделирования для двух и трех регионов смачиваемости видно, что они качественно и количественно совпадают (рис 8).

Влияние капиллярных концевых эффектов на особенности разработки эксплуатационных объектов, содержащих аномально-проводящие пласты в сочетании с аномальным изменением смачиваемости. В качестве примера такого пласта приведено строение гидрофобного коллектора с суперколлектором посередине (рис 9).

Проведен расчет следующих технологических показателей разработки на срок 28 лет:

- Динамика дебитов и накопленной добычи нефти и воды по добывающим скважинам.
- Динамика обводненности по добывающим скважинам.
- Динамика расхода и накопленная закачка воды в нагнетательную скважину.
- Динамика коэффициента извлечения нефти (КИН) по элементу разработки.
- Динамика компенсации отборов.

На основании проведенных расчетов были сделаны следующие выводы:

- Смачиваемость в сочетании с сильной фильтрационной неоднородностью эксплуатационного объекта оказывает значительное влияние на показатели разработки и коэффициент извлечения нефти.
- Эффект текстурной смачиваемости проявляется в уменьшении КИН на несколько пунктов.
- Положение и количество суперколлекторов в эксплуатационном объекте оказывают значительное влияние на КИН и обводнение.
- Сочетание аномальной проводимости и гидрофобности приводит к аномально быстрому обводнению.

Исследование влияния капиллярных концевых эффектов на характеристики переходных водонефтяных зон

Строение переходных зон в неоднородных по фильтрационным свойствам разрезах.

На практике пласты, формирующие эксплуатационные объекты, характеризуются высокой степенью неоднородности по фильтрационно-емкостным свойствам и структуре порового пространства. Проявление неоднородности обусловливает изменение закономерностей строения переходных зон по отношению к однородным пластам. Рассмотрим особенности этих изменений.

Особенности изменения капиллярного давления в переходных зонах неоднородных пластов.

Если пласт сложен из одних и тех же пород – песчаника, известняка и т.д., – то, как показывают экспериментальные исследования, на форму ККД для однородного пласта основное влияние оказывает в основном проницаемость и, в меньшей степени,

пористость, поэтому для неоднородных пластов можно рассмотреть только влияние проницаемости на распределение капиллярного давления и водонасыщенности. При определении капиллярного давления в неоднородных пластах будем исходить из предположений, которые были приняты при определении $P_к$ в однородных пластах:

1. Система вода – нефть в порах коллектора находится в состоянии термодинамического равновесия.

2. Между водонасыщенностью и капиллярным давлением в каждом пропластке существует та же зависимость, что и в однородном пласте с соответствующей проницаемостью.

В неоднородном разрезе рассмотрим систему из двух пластов: нижнего – более проницаемого (1) и верхнего – менее проницаемого (2) (рис. 10).

На рис. 10а представлено распределение капиллярного давления по водонасыщенности, а на рис. 10б, распределение капиллярного давления по высоте Н.

Непрерывной величиной при переходе через границу раздела двух сред является, как это следует из рисунка 10б максимальное значение капиллярного давления ($P_к$). Но в верхнем, менее проницаемом пропластке, разброс капиллярного давления в общем меньше, чем в нижнем, т.к. при данном максимальном $P_к$ в верхнем пропластке часть воды является фазово-подвижной, для которой не существует дисперсия капиллярного давления, в то время как в нижнем пропластке уже вся вода является фазово-неподвижной. За счет этого дисперсия $P_к$ нижнего пропластка на контакте несколько уменьшается. Это явление распространяется на расстояние, соизмеримое с характерными размерами пор для данного пласта. В этой области водонасыщенность должна быть меньше $kв^1_0$, т.к. уменьшение дисперсии $P_к$ происходит при том же максимальном $P_к$, при котором в однородном пласте водонасыщенность становится равной $kв^1_0$. Происходит своеобразная осушка нижнего пропластка верхним. Отсюда можно заключить, что в неоднородных пластах в переходной зоне формируются скачки водонасыщенности, зависящие от контрастности фильтрационно-емкостных свойств.

Особенности строения переходных зон в неоднородных пластах

На рис. 4а рассмотрим распределение $P_к$ в кусочно-однородном пласте, где верхний пропласток (1) более проницаем. Верхний пропласток имеет проницаемость $К_1 > К_2$.

Определим зависимость капиллярного давления от высоты H. Рассмотрим ситуацию, когда $H^{(2)}$ больше $H^{(1)}_{\min}$ и меньше $H^{(2)}_{\min}$. До границы раздела двух сред $P_к$ приблизительно пропорционально Н. Капиллярное давление на контакте определяется нижним пропластком, а не верхним. Однако в верхнем более проницаемом, пропластке в соответствии с принятыми предположениями $P_к$ меньше, чем в нижнем.

Переход капиллярного давления совершается скачкообразно в области, соизмеримой с характерным размером пор (рис. 11б).

Это скачкообразное изменение капиллярного давления обусловлено теми же причинами, которые вызывают существование неоднозначной зависимости $P_к$ от H в однородном пласте, т.е. в конечном итоге скачок $P_к$ в рассматриваемом случае является следствием независимости $P_к$ от высоты H в нефтяной зоне однородного пласта в зависимости от фильтрационно-емкостных свойств.

Осушка менее проницаемым пропластком более проницаемого осуществляется вне зависимости от взаимного расположения пропластков. Однако, когда более проницаемый пропласток является нижним, то осушка происходит при неизменном максимальном $P_к$, в то время как во втором случае, когда верхний пропласток более проницаем, изменялось само значение максимального $P_к$. В первом случае в верхнем пропластке появляется фазово-подвижная вода, а во втором – изменение максимального значения $P_к$ обеспечивает возможность появления фазово-подвижной воды при последующем контакте с менее проницаемым пропластком.

Наличие скачка объясняется требованием непрерывности капиллярного давления на границах переходной зоны в пластах с различными фильтрационными свойствами.

Таким образом формируются сложные переходные зоны в неоднородных по проницаемости пластах.

Отсюда следует, что формирование скачка насыщенности в переходной зоне определяется взаиморасположением пластов с различными фильтрационными свойствами.

Результаты моделирования

Было проведено моделирование на универсальном **симуляторе Eclipse –100.**

В качестве исходных параметров была задана гидродинамическая модель, содержащая два пласта разной смачиваемости и проницаемости (высокопроницаемый пласт К1=1.5D и низкопроницаемый пласт К1=50mD).

Рассмотрим случай, когда контактируют два гидрофобных пласта.

В начале процесса сегрегации начинается разделение воды и нефти и частичное формирование переходной зоны. Через 5 лет после начала капиллярно-гравитационной сегрегации устанавливается следующая равновесная ситуация (рис. 12).

В результате действия капиллярных сил в переходной зоне возникают области полностью водонасыщенные и нефтенасыщенные, чередующиеся друг с другом.

Далее данный случай показан более подробно в виде зависимости (рис. 13).

Из рисунка видно, что нефтенасыщение в неоднородном пласте, включающем гидрофобный пропласток постепенно увеличивается с последующим скачкообразным падением до минимального значения, держится на этом уровне, затем скачкообразно возрастает, после чего постепенно увеличивается до максимального нефтенасыщения.

Выводы:

Выявлен новый тип концевых капиллярных эффектов, связанных с контрастной смачиваемостью.

Установлены особенности фильтрации и вытеснения нефти водой из систем с контрастной смачиваемостью.

Показано влияние текстурной смачиваемости на показатели разработки неоднородных эксплуатационных объектов.

Показаны влияние капиллярных концевых эффектов на аномалии в строении переходных зон и наличие чередующихся водонефтяных контактов, а также выработки из них запасов.

Формирование скачка насыщенности в переходной зоне определяется взаиморасположением пластов с различными фильтрационными свойствами.

В неоднородных пластах имеет место суперпозиция переходных зон для пластов с различными фильтрационно-емкостными свойствами.

В неоднородных пластах насыщенность в переходных зонах претерпевает разрыв, что приводит к немонотонности строения переходной зоны и к скачкообразному изменению положения условного ВНК.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Петерсилье В. И., Белов Ю. Я. и др.* К вопросу оценки параметров переходной зоны с использованием кривых капиллярного давления. М.: ВНИГНИ, 1976. Вып. 242.

2. *Толстолыткин И.П.* Анализ геологической эффективности промыслово-геофизических методов при изучении особенностей разработки нефтяных месторождений Западной Сибири: Дисс. на канд.геол.-минер.наук. МИНХ и ГП, 1970.

\3. *Крэйг Ф.Ф.* Разработка нефтяных месторождений при заводнении: Пер. с англ. под ред. проф. В. Л. Данилова. М: Недра, 1974. 192 с.

4. *Morrow N.R.* The retention of connate water in hydrocarbon reservoirs // J. Can. Pertol. Technol. 1971. January-March.

5. *Комаров С.Г.* Геофизические методы исследования скважин. М.: Гостоптехиздат, 1963. 404 с.

6. *Leverett M.C.* Capillary Behavior in Porous solids // Trans. AIME: 194.1142. P.152.

7. *Пирсон С.Д.* Учение о нефтяном пласте. М.: Гостоптехиздат, 1961. 570 с.

8.*Соколова Т.Ф., Василевская Г.Р., Изюмова Е.А.* Обоснование положения водонефтяного контакта в верхнеюрских пластах в условиях фациальной изменчивости // Нефт. хоз-во, 2011. –N1.С. 24-27.

9. *Тульбович Б.И.* Нефтенасыщенность и коллекторские свойства терригенных пород некоторых месторождений Пермской области // Геология нефти и газа1975. 1. С.61-64.

10. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1971. 260 с.

11. *Амикс Дж., Басс Д., Уайтинг Р.* Физика нефтяного пласта. М.: Гостоптехиздат, 1962. 572 с.

12. *Березин В.М., Винницкий Ю.С., Голубев Ю.В.* Сопоставление коэффициентов нефтенасыщенности, определяемых различными методами // Геология нефти и газа. 1976. С.44-47.

13. *Berg R.R.* Capillary pressures in stratigraphic traps // AAPQ Bull. 1975. V.59. P.939-956.

14. *Михайлов А.Н.* Текстурная смачиваемость эксплуатационных объектов // VIII Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 80-летию Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина, «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России»: тез. докл. М:, РГУНГим. И.М. Губкина, 2010. Ч. 1. С. 158.

15. *Михайлов А.Н.* Влияние капиллярных концевых эффектов на распределение нефтенасыщенности в переходных зонах неоднородных пластов // Конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России»: тез. докл. М., 2012. Ч.1. С.72-73.

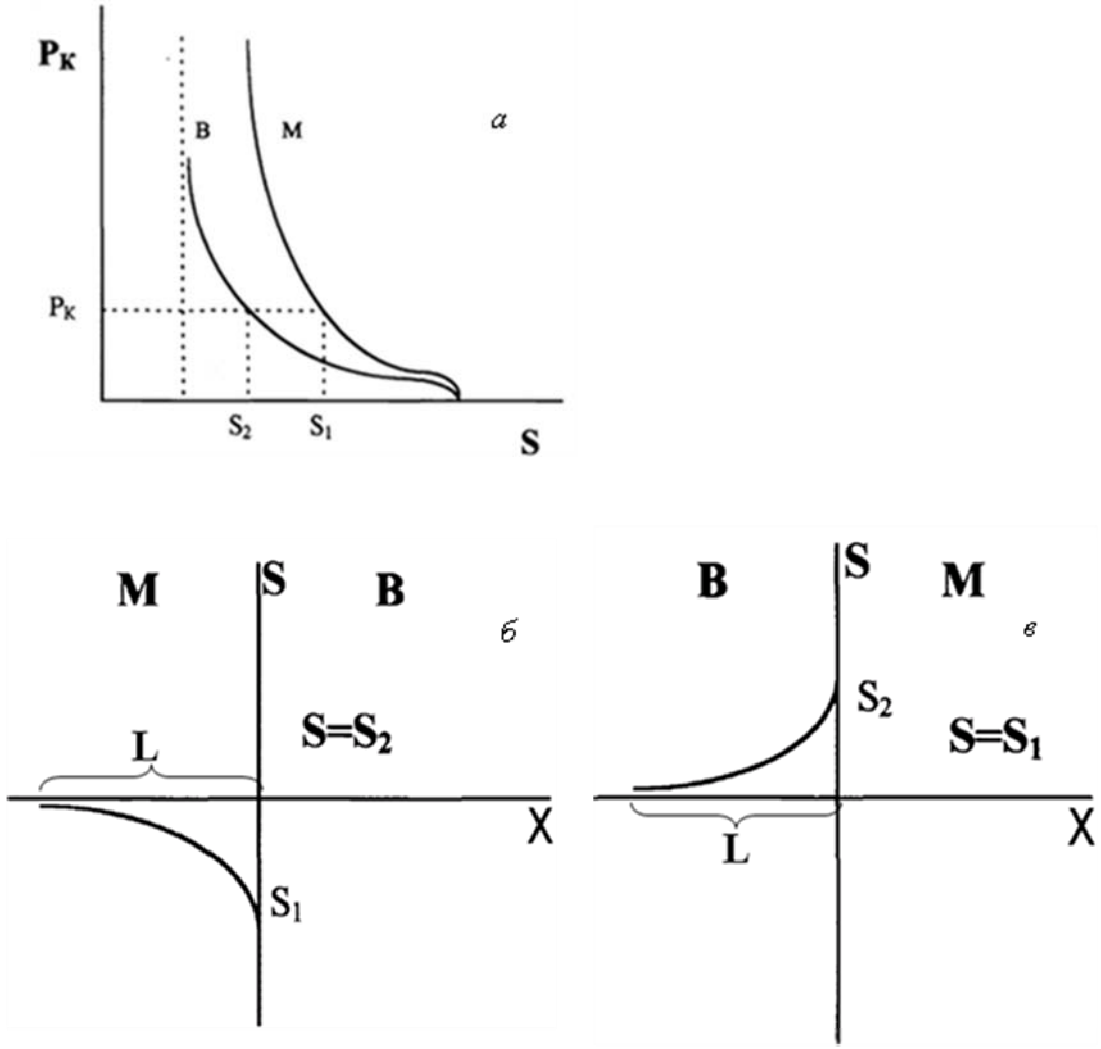

Рис. 1. Схема формирования капиллярного концевого эффекта (а); распределение насыщенностей на контакте малопроницаемого (б) и высокопроницаемого пластов (в)

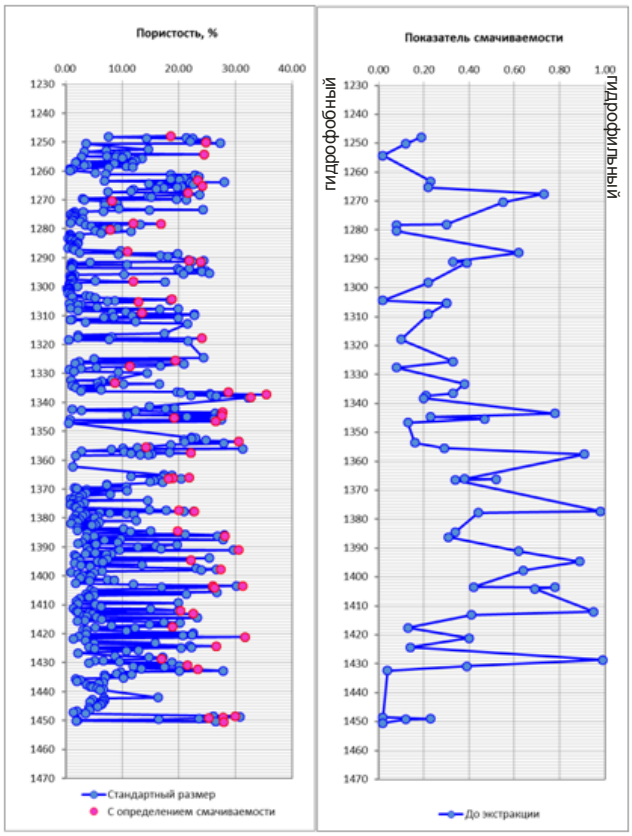

Рис. 2. Изменения показателей смачиваемости и открытой пористости по глубине (по данным анализа керна)

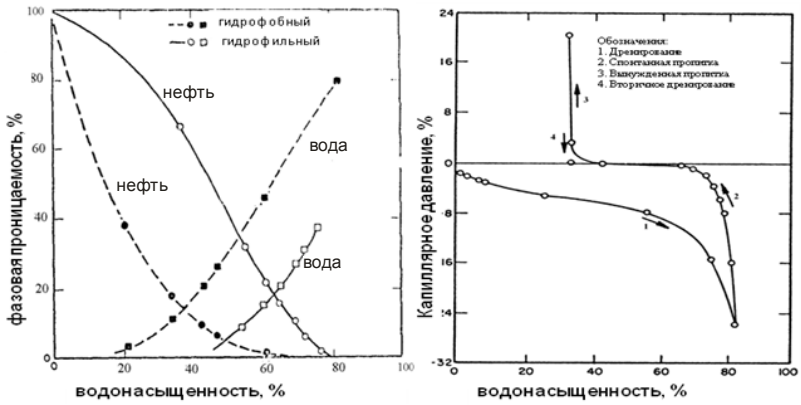

Рис. 3. Экспериментальные зависимости относительных фазовых проницаемостей и капиллярного давления в гидрофобных пластах

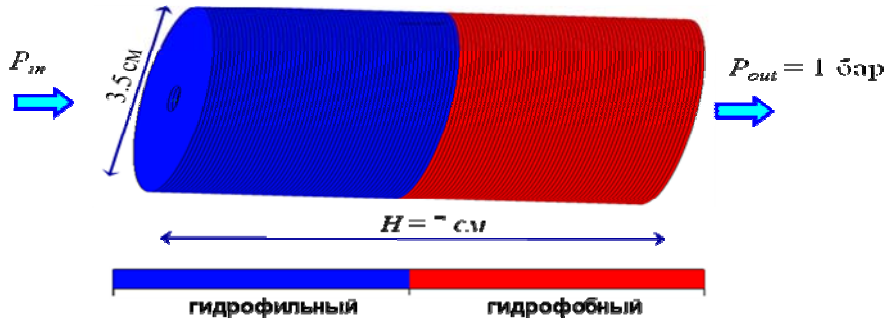

Рис. 4. Моделирование вытеснения нефти водой из неоднородного по смачиваемости керна: два региона смачиваемости.

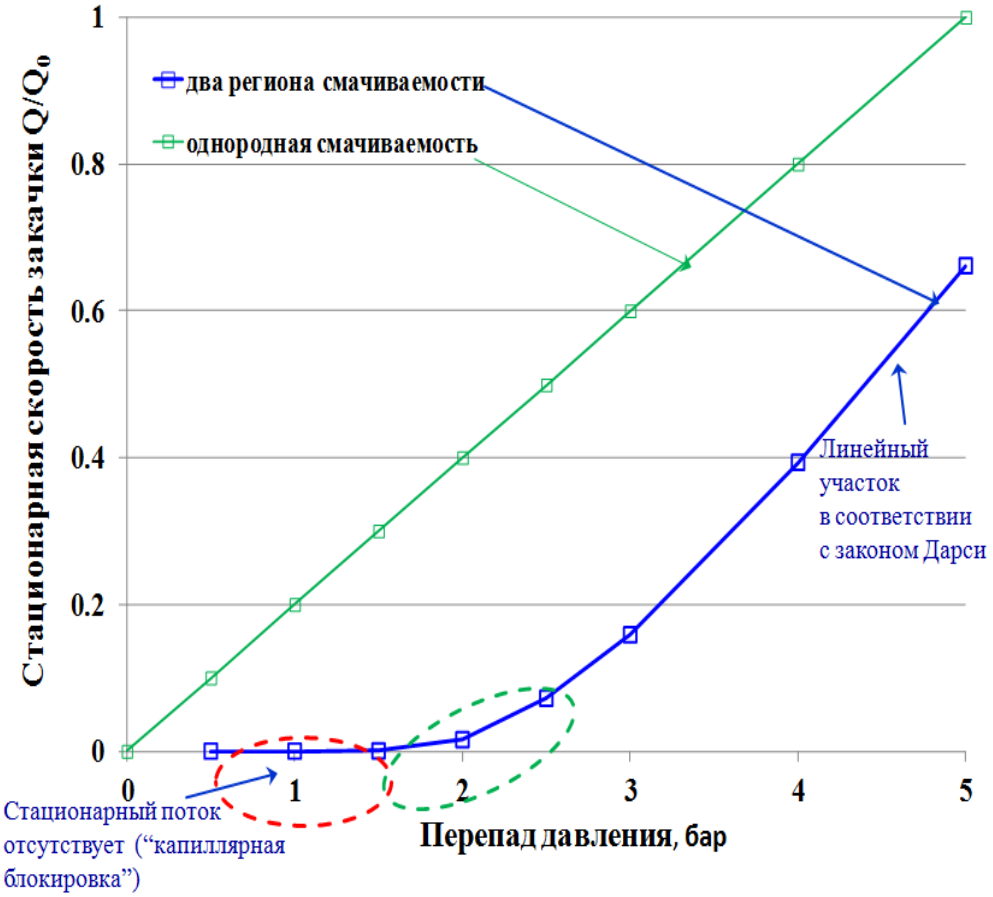

Рис. 5. Результаты моделирования закономерностей фильтрации воды в нефтенасыщенных образцах с текстурной смачиваемостью

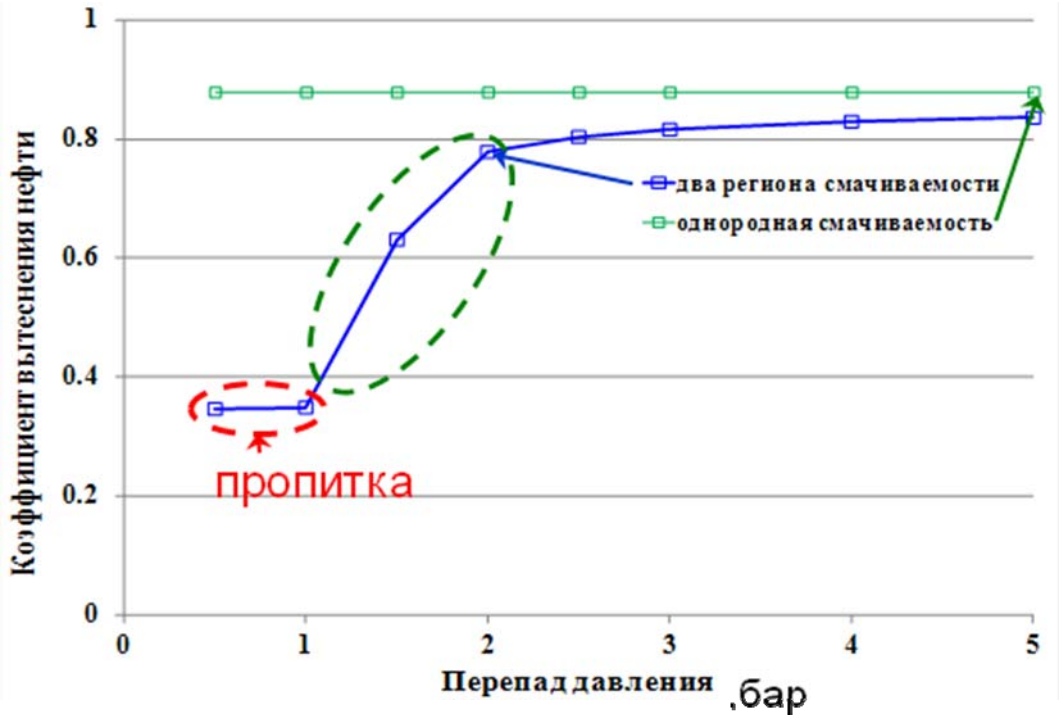

Рис. 6. Зависимость коэффициента вытеснения от перепада давления

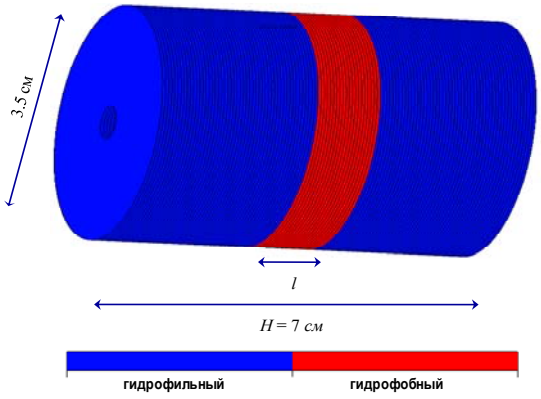

Рис. 7. Моделирование вытеснения нефти водой из неоднородного по смачиваемости керна: три региона смачиваемости

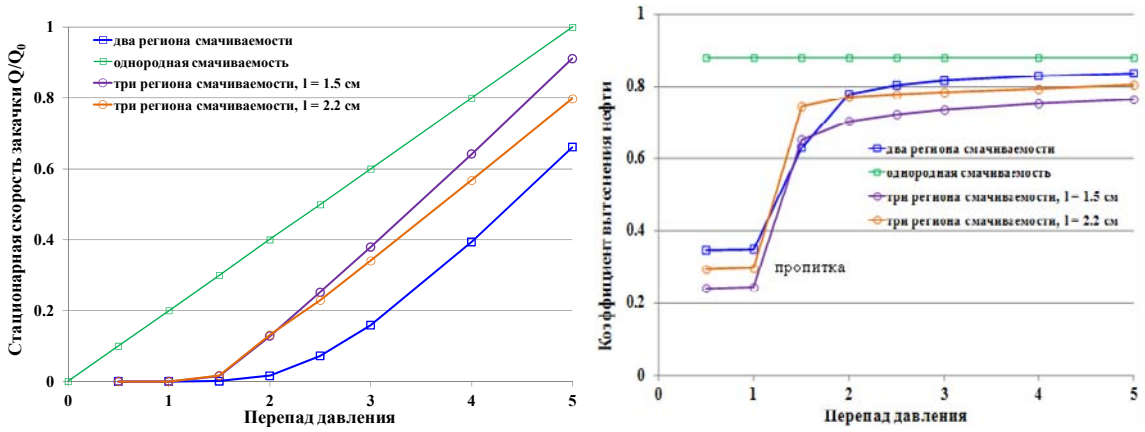

Рис. 8. Обобщенные графики для результатов моделирования выполненного для двух и трех регионов смачиваемости

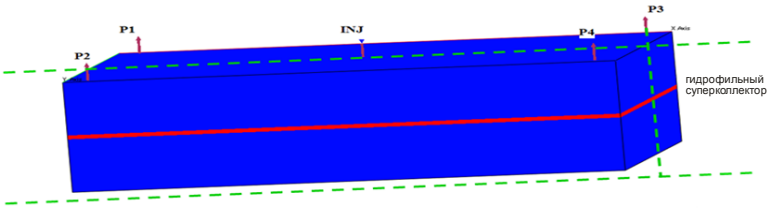

Рис. 9. Строение гидрофобного коллектора с суперколлектором посередине

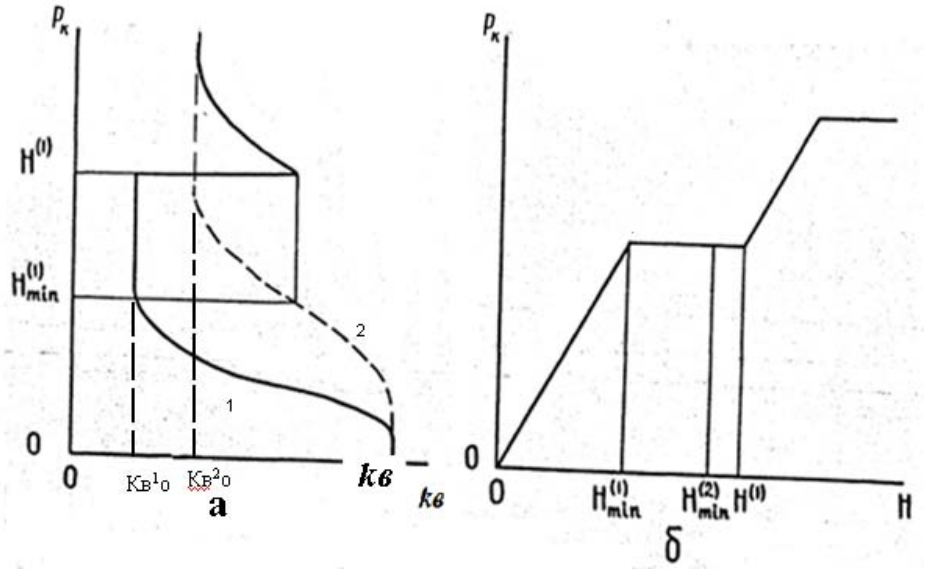

Рис. 10. Распределение водонасыщенности (*а*) и капиллярного давления (*б*) в кусочно-однородном пласте

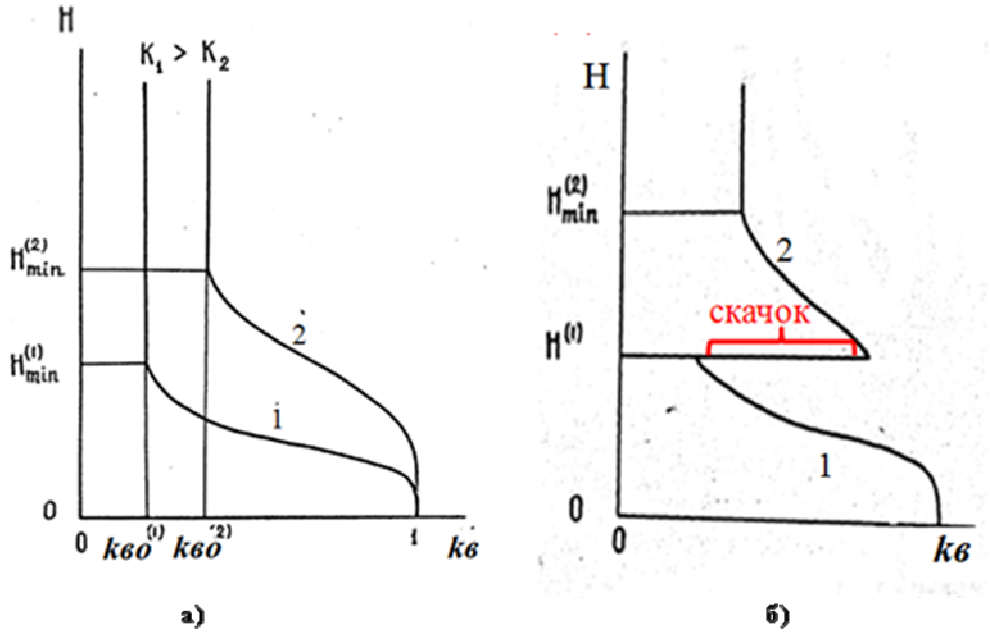

Рис. 11. а – Распределение водонасыщенности в однородных нефтяных пластах с проницаемостями K_1 и K_2; б – Распределение водонасыщенности в кусочно-однородном пласте

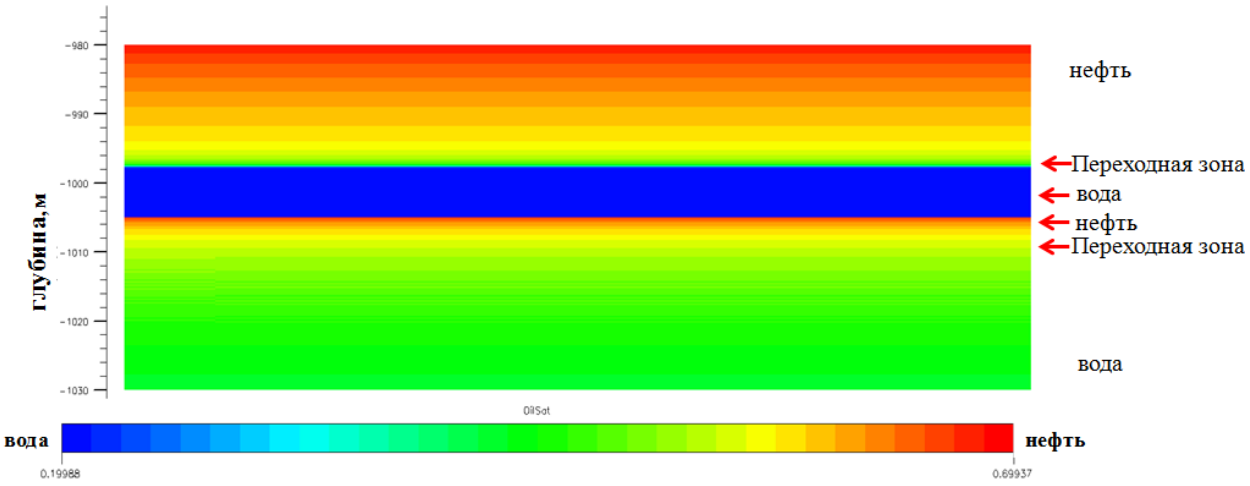

Рис. 12. Равновесное распределение нефтенасыщенности переходной зоны в гидрофобных пластах

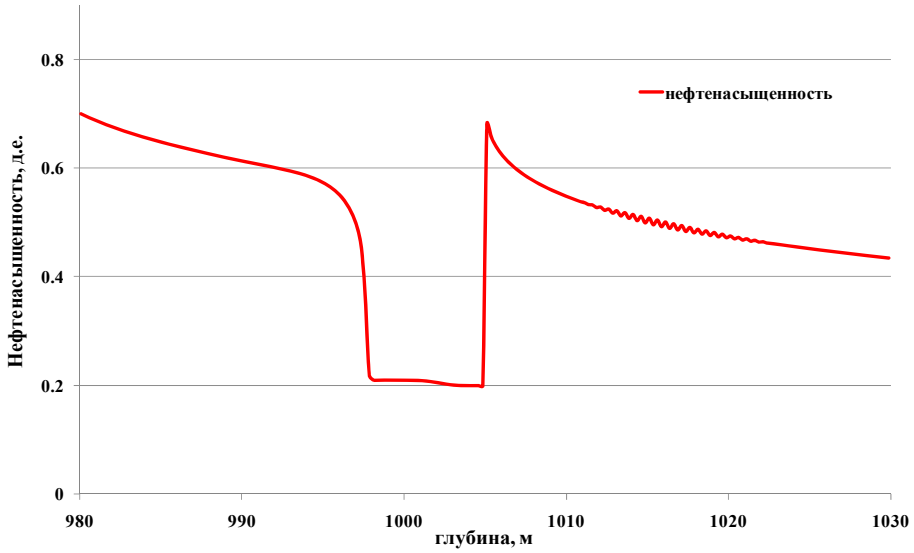

Рис. 13. Детальная структура переходных зон в гидрофобных пластах