УДК 532.135.001

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДИКАТОРНЫХ КРИВЫХ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ В ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЙ МИКРОТРЕЩИНЕ

Мамедова М.А.

Азербайджанская государственная нефтяная академия, Баку, e-mail: aliabas@rambler.ru

В данной работе исследованы влияния раскрытости инерционных сопротивлений трещин на особенности движения неньютоновских жидкостей в радиальных щелях с проявлением начального градиента давления. Установлено, что причиной усиления аномального явления неньютоновских жидкостей в микрокапилярных щелях является величина раскрытости щели. Проявление и усиление аномальных эффектов является молекулярным взаимодействием между жидкостью и твердой стенкой щели. Определены критические величины раскрытости щели, при которых вышеуказанные изменения в свойствах жидкостей практически исчезают. Индикаторные линии, полученные в нагнетании и добыче, существенно отличаются друг от друга при больших перепадах давления. Это объясняется влиянием инерционных сил, которые возникают в результате изменения величины скорости жидкости в радиальном направлении и направлении скорости жидкости при нагнетании и отборе. На основе полученных зависимостей расхода жидкости от перепада давления качественно оценен характер индикаторных кривых при различных значениях раскрытости трещин. Что дает возможность правильно выбирать параметры и направления нагнетания при заводнении продуктивных пластов, состоящих из трещиноватых пород, а также косвенно судить о состоянии призабойной зоны, что имеет большое значение для повышения успешности различных методов воздействия на ПЗП.

Ключевые слова: раскрытость микротрещины, индикаторные кривые, начальный градиент давления, направление нагнетания, неньютоновские жидкости, предельное напряжение сдвига

INVESTIGATIONS OF INDICATOR DIAGRAMS OF NON-NEWTONIAN FLUID AT PLANE-RADIAL FLOW IN MICROFISSURES

Mamedova M.A.

Azerbaijan State Oil Academy, Baku, e-mail: aliabas@rambler.ru

In the given article influencings of opening of inertial resistance of fractures on features of move of non-Newtonian liquids in radial cracks with appearance of an original pressure gradient are investigated. It is erected that the reason of beefing-up of the abnormal phenomenon of non-Newtonian liquids in microcapillary cracks is the magnitude of opening of a crack. Appearance and beefing-up of anomalistic effects is molecular interplay between fluid and solid wall of a crack. Extreme magnitudes of opening of a crack at which one the above-stated variations in condition of fluidss practically disappear are instituted. The indicator lines received in injection and extraction, essentially differ from each other at the big pressure differentials. It speaks influencing of inertial forces which one result from variation of magnitude of velocity of fluid in a radial direction and a direction of velocity of fluid at injection and culling. On the basis of the received dependences of rate of flow on pressure differential nature of indicator curves is qualitatively valued at various values of opening of fractures. That gives the chance to choose correctly arguments and injection directions at water flood of the productive strata consisting of crumbling rocks, and also obliquely to judge a state of a bottom-hole zone that is of great importance for increase of success of various methods of affecting to bottomhole formation zone.

Keywords: microfissure opening, indicator diagrams, initial pressure gradient, a flow direction, non-Newtonian fluid (liquid), shear stress

Несмотря на то, что залежи нефти в трещиноватых породах имеют все большее значение в мировой добыче нефти, исследование особенности движения жидкости и вопросы их разработки изучены все еще недостаточно. В связи с этим разработка гидродинамических основ технологии добычи ньютоновских и неньютоновских нефтей месторождений трещиноватых пород является весьма актуальным.

Опыт разработки нефтегазовых месторождений показывает, что на продуктивные пласты влияют различные факторы, которые осложняют процессы нефтеизвлечения. Оценка степеней влияния этих факторов и разработка мер, безусловно, будет способствовать рациональной разработке залежей нефти. Для рациональной разработки таких месторождений с учетом сведения о процессах, происходящих в трещиноватых коллекторах, необходимо устанавливать влияние раскрытости трещины на реологические свойства как ньютоновских, так и неньютоновских жидкостей. Однако к настоящему времени отсутствует учет в технологии разработки трещиноватых пластов, влияния раскрытости трещин на реологические параметры пластовых жидкостей. В связи с этим при разработке продуктивных пластов с микротрещинными коллекторами большое количество нефти остается неизвлеченным.

В связи с этим нами были проведены комплексы экспериментальных исследований по изучению стационарного и нестационарного движения жидкостей в плоскорадиальных щелях с проявлением начального градиента давления [5, 6]. Также изучены

влияния инерционных сопротивлений на форму индикаторных кривых при движении ньютоновских жидкости в радиальных щелях с проявлением начального градиента давления [4].

Выявлено, что раскрытость трещин является одним из основных показателей, характеризующих фильтрационные свойства жидкости в трещиноватых коллекторах. Изучение и оценка влияния раскрытости на свойства жидкостей в плоскорадиальной микротрещине дает возможность научно обоснованно разработать технологию добычи нефти. В этих условиях для более полного извлечения остаточной нефти следует изучить особенности движения ньютоновских и неньютоновских жидкостей в микротрещинах.

Установлено, что при движении ньютоновских жидкостей в тонких щелях проявляются неньютоновские свойства, по мере увеличения раскрытости щели неньютоновские свойства уменьшаются, а при движении неньютоновских жидкостей усиливаются аномальные свойства, которые по мере увеличения раскрытости щели уменьшаются до первоначального значения.

Указанное явление объясняется тем, что при движении жидкостей в тонких щелях с раскрытостью $h \le h_{кр}$ под действием поля твердой фазы формируется граничные слои жидкости со свойствами, значительно отличающимся от свойств жидкости в объеме.

Анализ многочисленных индикаторных кривых, полученных при исследовании добывающих и нагнетательных скважин, показал, что движение ньютоновских жидкостей в трещиноватых коллекторах зависит как от фильтрационных параметров самого пласта, так и от физико-химических свойств жидкости [2, 3].

В частности, на форму индикаторных кривых влияет изменение проницаемости среды, вязкости и плотности жидкости, режим фильтрации, режим разработки пласта, неустановившиеся процессы, связанные с проявлением упругости жидкости в пласте, инерционные сопротивления [2, 3] и раскрытость трещин [4].

В данной работе исследованы влияния раскрытости и инерционных сопротивлений на особенности движения неньютоновских жидкости в радиальных щелях с проявлением начального градиента давления. На основе полученных экспериментальных зависимостей качественно оценен характер индикаторных кривых при различных раскрытостях трещин.

С целью изучения влияния инерционных сопротивлений на процесс движения жидкости экспериментальное исследование проводилось в двух сериях. В первой серии моделировалось движение жидкости от скважины к контуру (аналогично процессу при закачке жидкости в пласт), а во второй серии – от контура к скважине (аналогично процессу при добыче жидкости из пласта). В обеих сериях эксперименты проводились стационарном режиме движения жидкости. Экспериментальное исследование проведено на установке, позволяющей создать радиальные щели различной раскрытости. Конструкция щелевой модели, имитирующая плоскорадиальное течение жидкости в недеформируемой среде, представлена в работе [6].

С целью обеспечения недеформируемости щели плит, изготовленных из стали 40Х, имеют после термообработки ТВЧ поверхностную твердость 40–50 единиц по Реквеллу. Внутренняя поверхность плит обработана и отшлифована с точностью, соответствующей 10 классу.

Между плитами с целью получения щели заданной раскрытости были расположены несмачиваемые прокладки размерами 5×7 под углом 120°. Толщина прокладки выбиралась в зависимости от величины требуемой раскрытости щели.

Для контроля распределения движения вдоль радиуса верхней плиты были проделаны по два отверстия под углом 120°. Радиусы окружностей, на которых расположены отверстия, равняются 34 и 57 мм. Кроме того, вблизи этих отверстий на расстояниях 43 мм от центра трещины было расположено еще по одному отверстию.

В процессе опытов создавались различные перепады давления на щелевой модели и при этом замерялись соответствующие объемные расходы жидкости Q. В качестве исследуемой жидкости использовалась высокосмолистая неньютоновская нефть с содержанием 72 % смолы (НГДУ «Ширваннефть»).

На основе экспериментальных данных определено критическое значение раскрытости щели $h_{кр}$, т.е. установлено, что при $h \ge h_{кр}$ изменения в реологических свойствах жидкости практически исчезают. Установлено, что при движении неньютоновской нефти в плоскорадиальной, так же как и плоскопараллельной трещинах, с увеличением раскрытости предельное напряжения сдвига и структурная вязкость нефти уменьшаются до определенного значения раскрытости трещины. При значениях раскрытости 180 мк при температуре 303 К как в первых, так и во вторых сериях опытов предельное напряжения сдвига не зависит от h и остается постоянным.

Таким образом, экспериментально установлено, что существует критическое значение величины раскрытости, ниже которого с проявлением граничного эффекта предельное напряжение сдвига увеличивается. На рис. 1 приводятся зависимости Q от ΔP, полученные в первой и второй серии опытов, при значениях раскрытости щели, равных соответственно 90 мкм (кривая 1,1′), 120 мкм (кривая 2.2′), 160 мкм (кривая 3.3′) и 180 мкм (кривая 4,4′). На рисунке кривые 1′, 2′, 3′ и 4′ соответствуют первой серии, а 1, 2, 3 и 4 – второй серии опытов при температуре 303К.

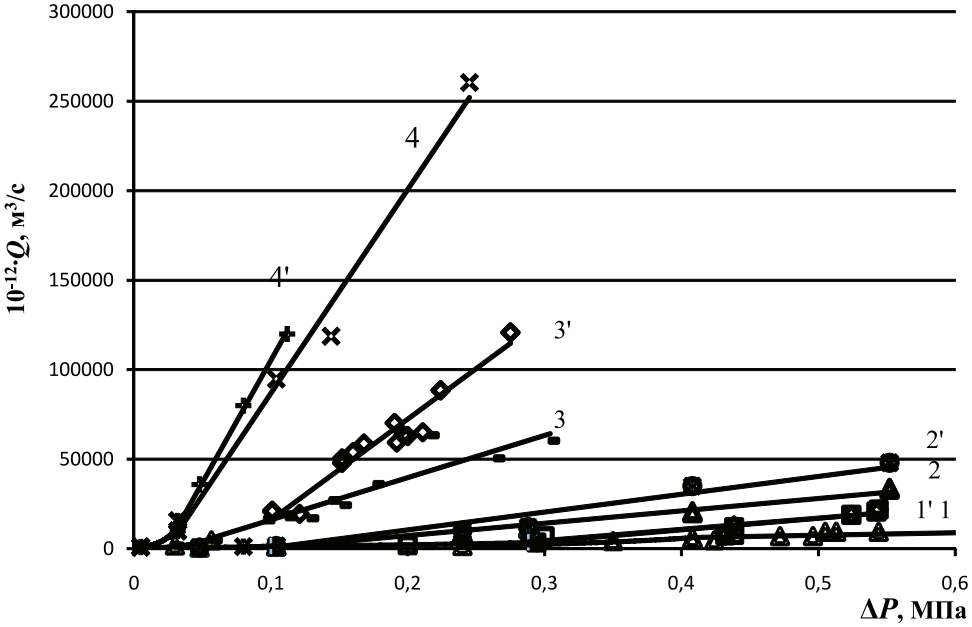


Рис. 1. Зависимость Q от ΔP при плоскорадиальном движении неньютоновской жидкости в тонких щелях при значениях раскрытости, мкм: 90 (кривые 1,1'), 120 (кривые 2,2'), 160 (кривые 3,3') и 180 (кривые 4,4')

Как видно из рисунка, индикаторные линии, полученные в отборе (кривые 1, 2, 3 и 4) и закачек (кривые 1′, 2′, 3′ и 4′) существенно отличаются друг от друга при больших перепадах давления. Это объясняется влиянием инерционных сил, которые возникают в результате изменения величины скорости жидкости в радиальном направлении и направлении скорости жидкости при нагнетании и отборе.

Отметим, что при нагнетании в пласт заданного количества жидкости требуется значительно меньший перепад давления, чем при отборе из пласта того же количества жидкости.

Такое отличие объясняется возникновением местных сопротивлений и характером потока при нагнетании и отборе.

Для преодоления инерционных сопротивлений необходимо создать дополнительные перепады давления. Направление действия дополнительного перепада давления, возникшего в результате изменения величины скорости, будет зависеть от направления движения жидкости. При движении жидкости от забоя в пласт дополнительный перепад давления будет направляться в сторону приложенного перепада давления и при обратном движении в противоположную сторону.

Дополнительный перепад давления, необходимый для преодоления инерционного сопротивления и возникающий по причине изменения величины скорости жидкости в радиальном направлении, действует в одну сторону с приложенным перепадом давления в случае пробной закачки и в противоположную в случае пробной откачки.

При малых расходах сопротивления трению во много раз больше, чем инерционные сопротивления. Индикаторные кривые при малых расходах имеют одинаковый, а при больших расходах – существенно различный характер.

Обработка результатов экспериментального исследования плоскорадиального движения жидкости в тонких щелях представлены на рис. 2. Как видно из этого рисунка, индикаторные кривые выпрямляются в координатах $\Delta P/Q$ и Q. Это указывает на то, что зависимости дебита от перепада

давления ($h < h_{кр}$) носят квадратичный характер, и индикаторные кривые для этих исследований описываются следующими формулами:

в первой

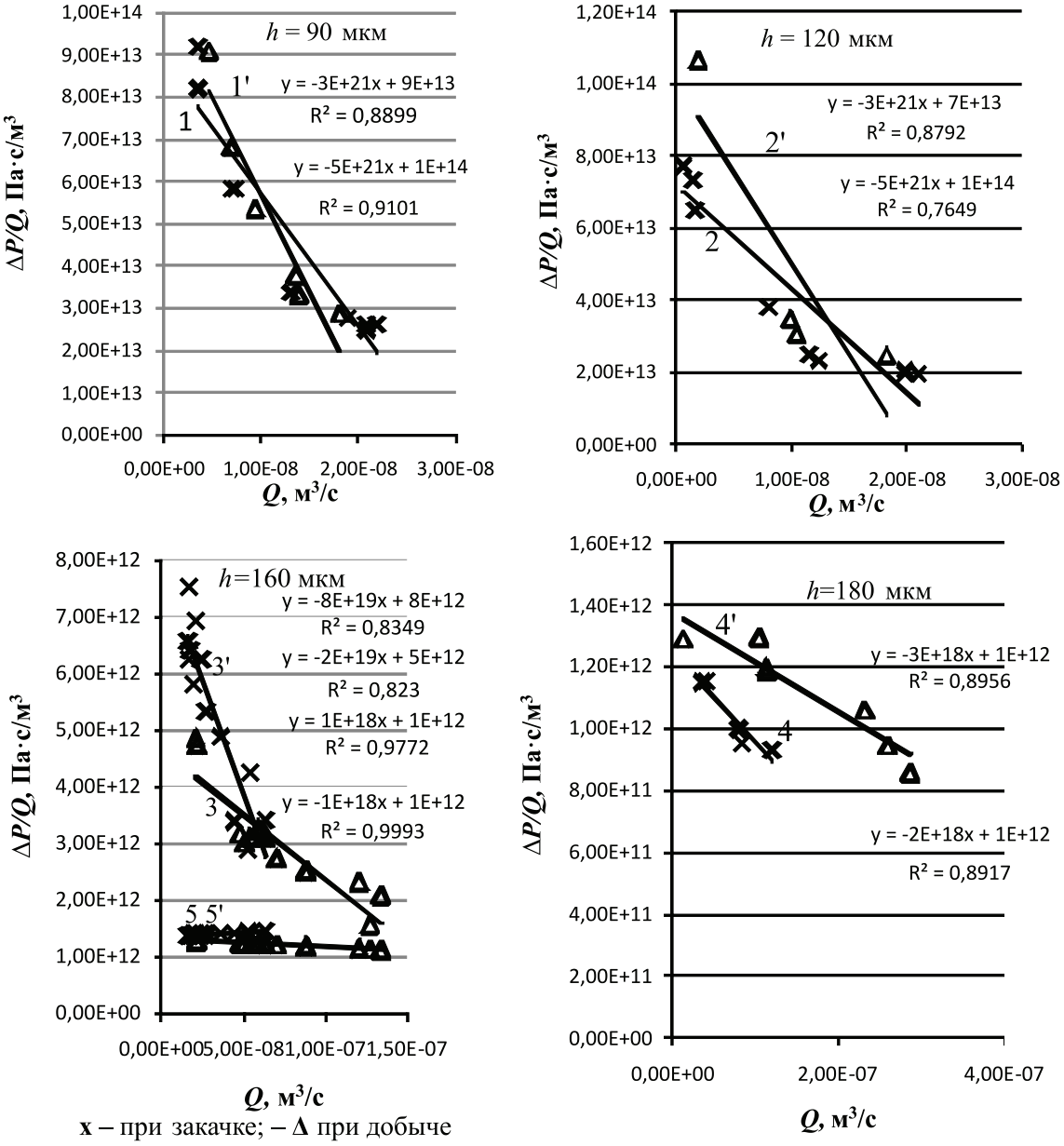
$$\Delta P = AQ + B_1Q^2 - B_2Q^2; \qquad (1)$$

и во второй серии опытов

$$\Delta P = AQ + B_1Q^2 + B_2Q^2, \qquad (2)$$

где A – коэффициент гидравлического сопротивления, характеризующий трение; B_1 и B_2 – коэффициент гидравлического сопротивления, характеризующий соответственно молекулярные взаимодействия и инерционные силы.

Кривые зависимости для различных значений раскрытости щели, соответственно первая и вторая серии опытов, аппроксимированы следующими уравнениями:



x – при закачке; – **Δ** при добыче

Рис. 2. Зависимость ΔP/Q от Q при движении неньютоновской нефти в плоскорадиальной щели: 1'–4' и 1–4 соответственно при первой и во второй серии опытов

При h = 90 мкм

$$y = -3E + 21x + 9E + 13; \qquad (3)$$

$$y = -5E + 21x + 1E + 14. \qquad (4)$$

При h = 120 мкм

$$y = -3E + 21x + 7E + 13; \qquad (5)$$

$$y = -5E + 21x + 1E + 14. \qquad (6)$$

При h = 160 мкм

$$y = -2E + 19x + 5E + 12; \quad (7)$$

$$y = -8E + 19x + 8E + 12. \quad (8)$$

При h = 180 мкм

$$y = -3E + 18x + 1E + 12; \quad (9)$$

$$y = -2E + 18x + 1E + 12. \quad (10)$$

Как видно из этих уравнений, коэффициенты A, B_1 и B_2, полученные при нагнетании и отборе, разные.

Экспериментальные данные были обработаны также согласно формулам, предложенным в работе [1]. В качестве примера на рис. 2. представлены зависимости $\Delta P/Q$ от Q, построенные по результатам расчетов при значениях раскрытости щели 160 мкм (кривые 5,5′). Отметим, что отличия кривых 5 и 5′ от экспериментальных 3 и 3′ связаны с тем, что в данных теоретических формулах не учтены силы для преодоления инерционного сопротивления, возникшие при изменении направления скорости жидкости.

Индикаторные линии также снимались в двух отверстиях, просверленных вдоль радиуса под углом 120° верхней плиты щелевой модели.

Результаты опытов в дальнейшем обрабатывались в координатах γ – τ, где γ – средний градиент скорости; τ – касательное напряжение сдвига.

В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости γ от τ при движении неньютоновской нефти в трещине с раскрытостью h = 90 мкм, полученные при второй серии опыта.

Как видно из рис. 3, значения этих параметров, определенных в центре (прямая 0), в первом (прямая 1) и втором (прямая 2) отверстиях, расположенных вдоль радиуса радиальных щелей, существенно отличаются друг от друга при всех значениях скоростей сдвига, т.е. не укладываются в одну общую прямую.

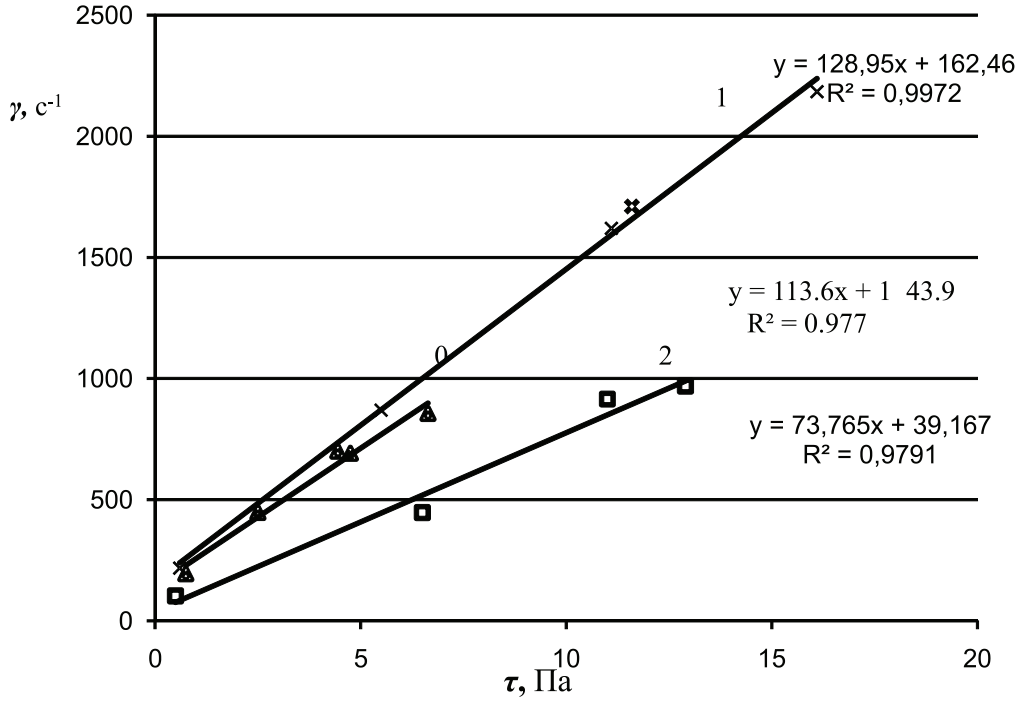


Рис. 3. Зависимость γ от τ при движении неньютоновской нефти в трещине с раскрытости h = 90мкм: кривые 0, 1 и 2 – соответственных определенных этих зависимости в центре, в первой и второй отверстиях верхней плиты щелевой модели при второй серии опыта

Это объясняется возникновением инерционного сопротивления в результате сужения потока при движении жидкости в радиальном направлении от контра к центру. Таким образом, исследования показывают, что инерционные сопротивления при движении жидкости в трещиноватой среде могут быть большими. Они в основном должны возникать вблизи скважины. На основе результатов экспериментальных исследований можно придти к выводу, что при разработке месторождений с трещинными коллекторами большой запас нефти может остаться в неподвижном состоянии, если не учесть особенностей движения их в тонких щелях.

Отметим, что влияние инерционного сопротивления на форму индикаторных кривых при плоскорадиальном движении неньютоновской жидкости в трещине особенно характерно при $h < h_{кр}$.

В зависимости от значения коэффициентов $B_1 - B_2$ индикаторные кривые могут иметь различные формы при нагнетании: прямолинейные при $B_1 - B_2 = 0$; вогнутые к оси перепада давления при $B_1 - B_2 > 0$ и к оси расхода при $B_1 - B_2 < 0$ [1, 4]. Результаты обработки индикаторных кривых в этих координатах, полученных при движении ньютоновских жидкости в радиальной микротрещине, в первой и второй серии опытов все перечисленные случаи имеют место в работе [4]. Однако при движении неньютоновской жидкости в отличие от ньютоновской жидкости во всех значениях раскрытости трещины значения коэффициентов при первой и во второй сериях опытов получены $B_1 - B_2 < 0$. Это, по-видимому, связано с реологическими константами неньютоновских свойств высоковязких жидкостей.

Это указывает на то, что силы, характеризующие молекулярное взаимодействие при всех случаях превосходят силы инерции.

Таким образом, по результатам сопоставления значений коэффициентов A, B_1 и B_2 найденным при пробной закачке и откачке, а также по знаку величины $B_1 - B_2$, полученной при пробной закачке, можно получить информацию о состоянии призабойной зоны скважин и пластов.

Выводы

1. На основе полученных экспериментальных зависимостей качественно оценен характер индикаторных кривых при различных значениях раскрытости трещин.

2. Полученные результаты дают возможность правильно выбирать параметры и направления нагнетания при заводнении продуктивных пластов, состоящих из трещиноватых пород.

3. На основе результатов исследования при пробной закачке и откачке косвенно можно судить о состоянии призабойной зоны, что имеет большое значение для повышения успешности различных методов воздействия на призабойную зону скважины.

Список литературы

1. Гурбанов Р.С., Абдинов Э.Т., Агаева С.Е. Индикаторные кривые при плоскорадиальной фильтрации несжимаемой вязкой жидкости // Док. АН. Азерб. ССР. –1981. – Т. XXXVII. – № 10. – С. 46–50.

2. Донцов К.М. Разработки нефтяных месторождений. – М.: Изд-во. «Недра», 1977. – 360 с.

3. Майдебор В.Н. Особенности разработки нефтяных месторождений с трещиноватыми коллекторами. – М.: Изд-во «Недра», 1980. – 288 с.

4. Мамедова М.А. Экспериментальные исследования особенностей индикаторных кривых при плоскорадиальном движении несжимаемой вязкой жидкости в тонких щелях. // НИИ «Геотехнологические проблемы нефти, газа и химия». – Баку, 2005. – Т. VI. – С. 214–221.

5. Мамедова М.А. Исследование неустановившегося движения жидкости в плоскорадиальных тонких щелях // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2007. – № 2. – С. 30–32.

6. Мамедова М.А. Исследование движения несжимаемой вязкой жидкости в плоскорадиальной микротрещине // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2007. – № 11–12. – С. 25–28.

References

1. Gurbanov R.S., Abdinov E.T., Agaeva S.E. Indikatorniyekrivie priploskoradialnoy filtratsii neszhimaemoy vyazkoy zhidkosti. // Dok.. AN Azerb. SSR. 1981, Vol.37, no.10, pp. 46–50.

2. Dontsov K.M. Razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy. Moscow: Izd-vo. Nedra, 1977, 360 p.

3. Maydebor V.N. Osobennosti razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy s treshinovatymi kollektorami. .Moscow: Izd.-vo Nedra, 1980, 288 p.

4. Mamedova M.A. Eksperimentalnye issledovaniya osobennostey indikatornikh krivikh pri ploskoradialnom dvizhenii neszhimaemoy vyazkoy zhidkosti v tonkikh shelyakh // NII Geotekhnologicheskie problemi nefti,gaza i khmiya. Baku: 2005, Vol.6, pp. 214–221.

5. Mamedova M.A. Issledovanie neustanovshegosya dvizheniya zhidkosti v ploskoradialnikh tonkikh shelyakh // Azerbaydzhanskoe Neftyanoe khozyaystvo. 2007, no.2, pp. 30–32.

6. Mamedova M.A. Issledovanie dvizheniya neszhimayemoy vyazkoy zhidkosti v ploskoradialnoy mikrotreshine // Azerbaydzhanskoe Neftyanoe khozyaystvo. 2007, no. 11–12. pp. 25–28.

Рецензенты:

Мамедзаде А.М., д.т.н., профессор кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений» АГНА, г. Баку;

Гасымлы А.М., д.т.н., ведущий научный сотрудник, НИПИ «Нефть и газ» ГНКАР, г. Баку.

Работа поступила в редакцию 19.11.2012.