

УДК 622.276.031:532.135.0015

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОРАДИАЛЬНЫХ МИКРОТРЕЩИНАХ

Мамедова М.А.

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

Аннотация. Работа посвящена экспериментальному изучению влияния уровня давления, раскрытости и инерционных сил на процесс восстановления давления при плоскорадиальном движении жидкости в микротрещине в условиях проявления начального градиента давления.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки раскрытости трещин при ГРП с целью повышения эффективности проведенных мероприятий и прогнозирования успешности операций.

Ключевые слова: раскрытость радиальной микротрещины, начальный градиент давления, восстановление давления, направление нагнетания, неньютоновские жидкости

Исследование процесса восстановления давления при фильтрации различных жидкостей в тонких плоских щелях изложено в работах [1 - 3]. Однако вопросы движения жидкостей в тонких плоскорадиальных щелях в условиях проявления различных свойств изучены недостаточно [2, 5].

Данная работа посвящена экспериментальному изучению влияния уровня давления, раскрытости и инерционных сил на процесс восстановления давления при плоскорадиальном движении жидкости в условиях проявления начального градиента давления. Экспериментальное исследование проведено на установке, позволяющей создать радиальные щели различной раскрытости [4].

Конструкция щелевой модели, представленная на рис. 1, имитирует плоско-радиальное движение жидкости в недеформируемой среде.

Модель имеет следующие конструктивные особенности. Кровлей и подошвой щели являются плиты 6 и 2, зажатые между фланцами 1 и 7. Под действием перепада давления, исследуемая жидкость через штуцер 4 поступает во втулку 5, герметизируемую резиновыми уплотнениями 3 кольцевую полость, затем в щель между плитами и далее в систему для замера протекающего объемного количества жидкости и штуцер 8.

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

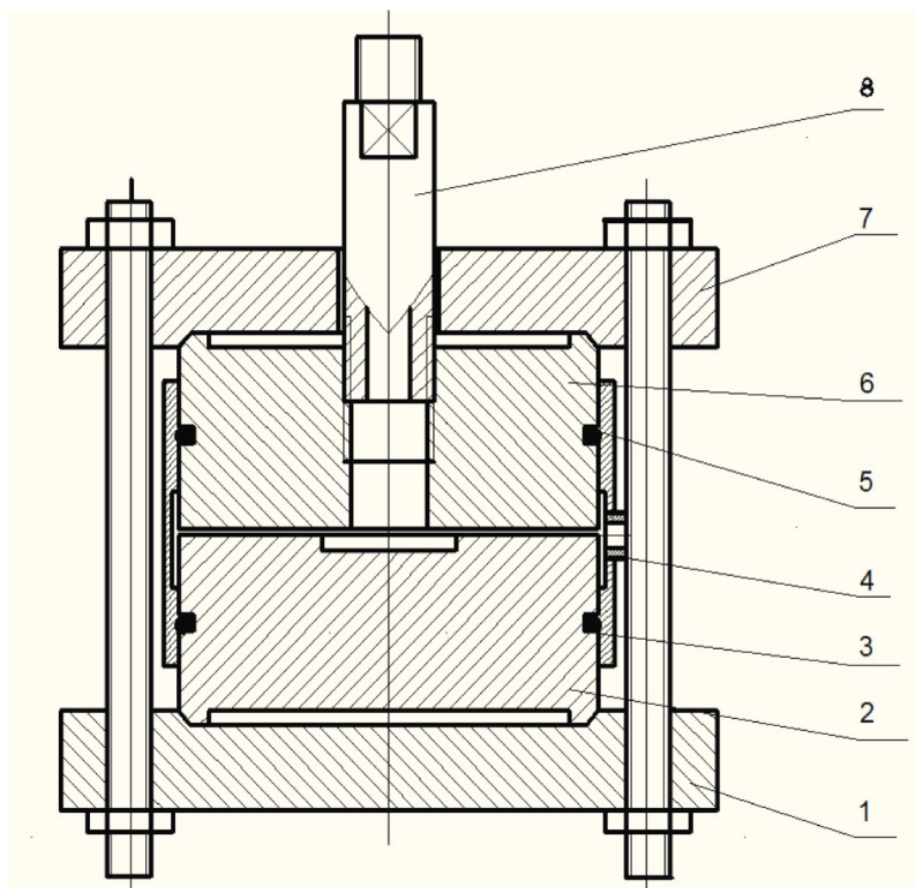


Рис. 1. Модель плоскорадиальной щели

Между плитами с целью получения щели заданной раскрытости были расположены несмачиваемые прокладки размерами 5x7 под углом 120°. Толщина прокладки выбиралась в зависимости от величины требуемой раскрытости щели.

Для контроля распределения движения вдоль радиуса верхней плиты были проделаны 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.

С целью изучения влияния инерционных сопротивлений на процесс восстановления давления экспериментальное исследование проводилось в две серии. В первой серии моделировалось движение жидкости от скважины по направлению к контуру (при закачке), а во второй – от контура к скважине (при добыче).

В процессе исследования создавались различные уровни давления в первой и второй серии опытов, которые измерялись манометрами, установленными на двух отверстиях вдоль радиуса, в центре и на контуре щели.

Кривые восстановления давления (КВД) снимались также для двух случаев – с притоком и без притока жидкости.

Процесс восстановления с притоком жидкости изучался по следующей методике: создавалась щель определенной раскрытости и производилось насыщение щели исследуемой жидкостью под давлением с одновременным вакуумированием. Затем, поддерживая заданное постоянное давление на входе модели щели, создавался стационарный режим движения. После этого закрывался вентиль на выходе щели (вентиль на входе оставался открытым и давление, поддерживалось постоянным) и снималась КВД на манометрах, установленных на двух отверстиях: вдоль радиуса верхней плиты и выходе щели.

Для проведения опытов без притока, на входе щели создавались определенные давления и производилась фильтрация испытуемой жидкости. Затем одновременно закрывались вентили на входе и выходе модели и снимались кривые изменения давления на обоих концах и двух отверстиях вдоль радиуса щели.

На основе данных КВД оценены время восстановления давления и начального градиента давления при неустановившемся движении неньютоновской жидкости в плоскорадиальной микротрещине. Также на основе экспериментальных данных определено критическое значение раскрытости щели $h_{кр}$, т.е. установлено, что при $h \geq h_{кр}$ практически отсутствует молекулярное взаимодействие между жидкостью и твердой стенкой щели.

Результаты исследования показывают, что изменение уровня давления в системе при движении неньютоновских жидкостей заметно влияет на величину начального градиента давления (ΔP_0) и времени восстановления давления (t) в первой и второй сериях опытов.

На рис. 2 и 3 в качестве примера представлены КВД при движении жидкости от контра к центру при $h = 90$ мкм с притоком и $h = 120$ мкм без притока, соответственно. Как видно из этих рисунков, кривые зависимости P_k, P_0, P_1 и P_2 от t – соответственно определенных в контуре (кривая k), центре (кривая 0), в первом (кривая 1) и втором (кривая 2) отверстиях верхней плиты щелевой модели не совпадают.

С целью определения параметров пласта по кривой восстановления давления были построены кривые зависимости, безразмерных параметров давления $P_1/P_{n1}, P_2/P_{n2}, P_0/P_{n0}, P_k/P_{nk}$ от безразмерной величины времени восстановления давления $\ln t_1/t_{кр}, \ln t_2/t_{кр}, \ln t_0/t_{кр}, \ln t_k/t_{кр}$ при первой и второй серии опытов при различных значениях раскрытости щели.

Отметим, что P_k, P_0, P_1, P_2 и $P_{nk}, P_{n0}, P_{n1}, P_{n2}$ – соответственные давления для различных значений t и начальное давление в контуре, в центре, в первом и втором отверстиях верхней плиты щелевой модели.

t_k, t_0, t_1, t_2 – время восстановления давления соответственно в контуре, в центре, в первом и втором отверстиях верхней плиты щелевой модели.

$t_{кр}$ – время восстановления давления при критическом значении раскрытости щели.

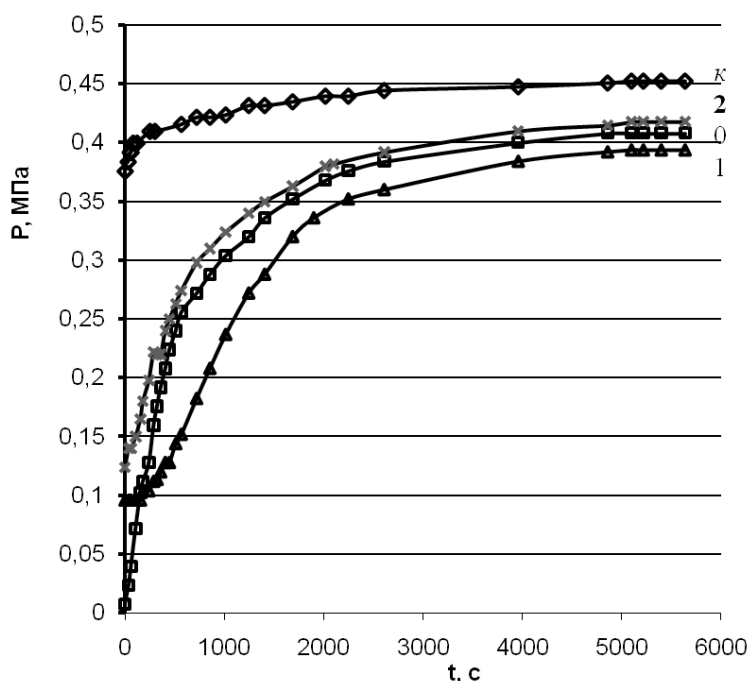


Рис. 2. КВД с притока жидкости в плоскорадиальной микротрещине во второй серии опытов при $h = 90$ мкм и температуре 303 К:

κ , 0, 1 и 2 – соответственно в контуре, центре, в первом и втором отверстиях верхней плиты

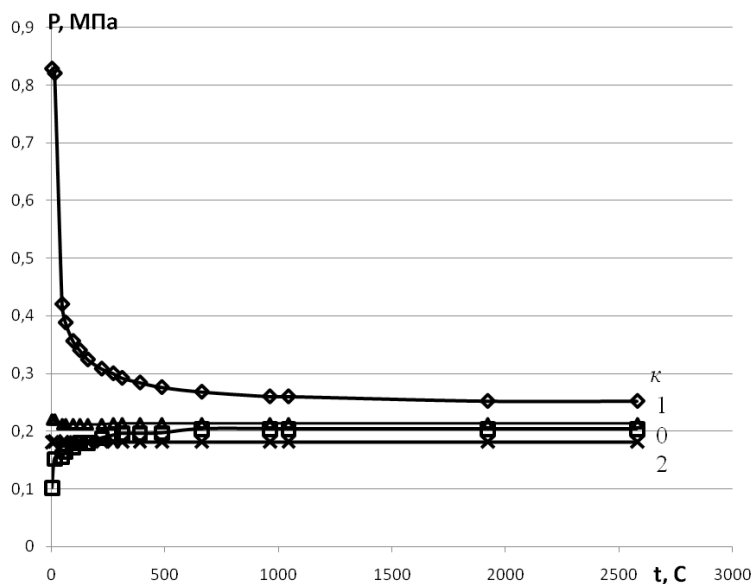


Рис. 3. КВД без притока жидкости в плоскорадиальной микротрещине во второй серии опытов при $h = 120$ мкм и температуре 303 К:

κ , 0, 1 и 2 – соответственно в контуре, центре, в первом и втором отверстиях верхней плиты

На рис. 4 приведены зависимости безразмерных параметров давления P_0/P_{n0} , P_1/P_{n1} , P_2/P_{n2} , от безразмерной величины времени восстановления давления $\ln t_0/t_{кр}$, $\ln t_1/t_{кр}$, $\ln t_2/t_{кр}$, при второй серии опытов для раскрытости щели 90 мкм при температуре 303 К. Как видно из рис. 4 значения этих безразмерных параметров, определенных в центре (прямая 0), в первом (прямая 1) и втором (прямая 2) отверстиях, расположенных вдоль радиуса радиальных щелей, не укладываются в одну общую прямую.

Рост уровня давления в щелевой модели способствует уменьшению величины начального градиента давления и времени восстановления давления жидкости.

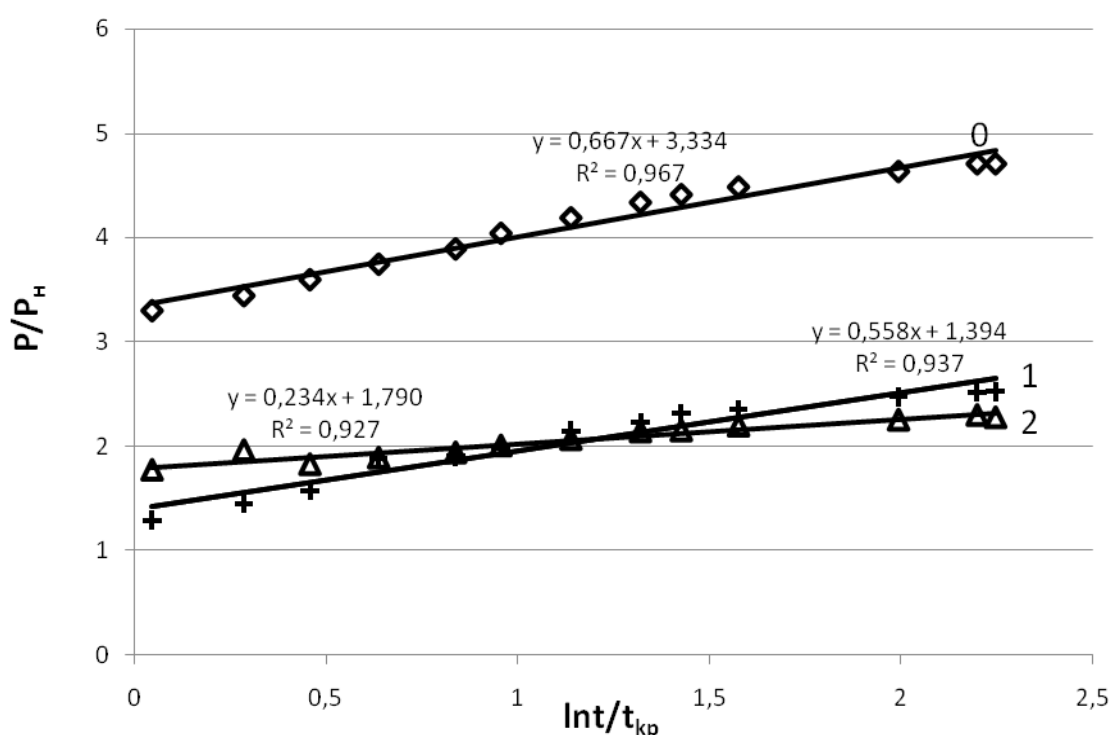


Рис. 4. Зависимости P/P_n от $\ln t/t_{кр}$ при $h = 90$ мкм и $t = 303$ К движения неньютоновской нефти в плоскорадиальной микротрещине во второй серии опытов:

0, 1 и 2 – соответственно в центре, в первом и втором отверстиях верхней плиты

На рис. 5 и 6 приводятся соответственно зависимости ΔP_0 от h и P_0 от h для неньютоновской нефти во второй серии опытов. Кривые зависимостей 0, 1 и 2 – соответственно определены в центре, в первом и втором отверстиях верхней плиты щелевой модели. Как видно из этих рисунков, по мере увеличения раскрытости щелевой модели перепад и начальный градиент давления заметно уменьшаются и при достижении некоторого значения раскрытости практически становятся постоянными. Критическое значение раскрытости $h_{кр}$ составляет 180 мкм. Уста-

новлено, что при снятии КВД для исследуемых жидкостей (при $h \geq h_{kp}$) начальный градиент давления для неньютоновских систем приобретает значения, равное значению в объёме. Отметим, что кривые зависимости ΔP_0 от h и P_0 от h практически не совпадают с определением этих зависимостей в центре, в первом и втором отверстиях при закачке и откачке жидкости в щель.

Результаты исследования показывают, что с ростом расстояния от центра (при закачке – от скважины) перепад давления увеличивается. Это объясняется тем, что по мере продвижения жидкости от скважины к контуру площадь поперечного сечения увеличивается, следовательно, скорость жидкости непрерывно уменьшается, что приводит к падению давления, которое влечет за собой увеличение перепада давления жидкости на контуре. В случае движения жидкости к скважине (при отборе) по мере уменьшения поперечного сечения скорость жидкости непрерывно возрастает и способствует увеличению перепада давления жидкости в скважине.

Анализ результатов исследования показывает, что во всех отверстиях расположенных на различных расстояниях от центра радиальной трещины, перепад давления ΔP и P_0 при пробной откачке больше, чем при закачке. Это объясняется возникновением инерционного сопротивления [4] в результате изменения величины и направления скорости движения жидкости в радиальном направлении. Для преодоления инерционных сопротивлений требуется создание дополнительного перепада давления, направление действия которого зависит от направления движения жидкости. В случае закачки направление дополнительного перепада давления совпадает с направлением приложенного перепада давления, а при отборе эти направления не совпадают. Поэтому перепад давления при пробной откачке больше, чем при закачке. Это объясняется тем, что часть перепада давления при пробной откачке уходит на преодоление инерционных сопротивлений.

На рис. 7 приводятся зависимости t от h при закачке жидкости в щели. Кривые 0, 1 и 2 соответствуют определению зависимости в центре, в первом и втором отверстиях верхней плиты щелевой модели. Как видно из рисунка, зависимости t от h , определенные в этих отверстиях, также практически не совпадают и при прочих равных условиях с увеличением раскрытости время восстановления давления уменьшается. Восстановление давления при закачке происходит быстрее, чем при добыче. Это объясняется наличием местных сопротивлений и характером потока при нагнетании (расширяющийся поток) и отборе (сужающийся поток). При таком изменении направления скорости жидкости при прохождении ее через щели проявляются инерционные сопротивления.

Анализ опытных данных показывает, что время восстановления давления зависит от раскрытости h , критической раскрытости h_{kp} , предельного напряжения сдвига τ_{0h} и структурной вязкости μ_h , то есть

$$t = f(h, h_{kp}, \tau_{0h}, \mu_h).$$

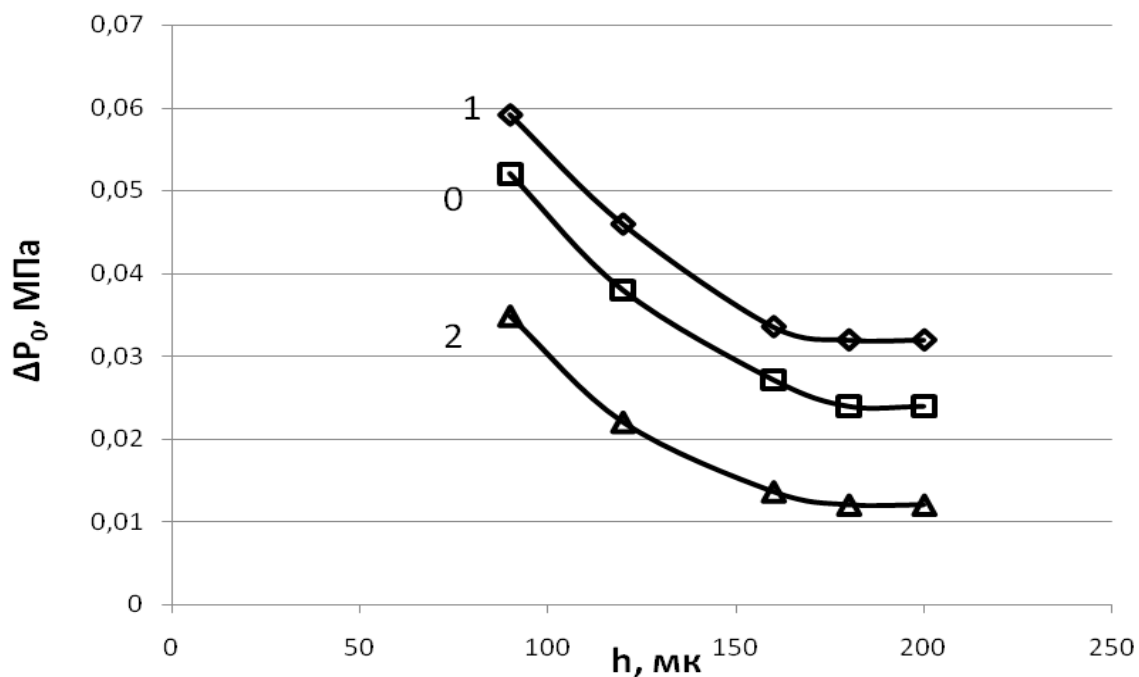


Рис. 5. Зависимость ΔP_0 от h при движении неньютоновской нефти:
0, 1 и 2 – соответственно в центре, в первом и втором отверстиях верхней плиты

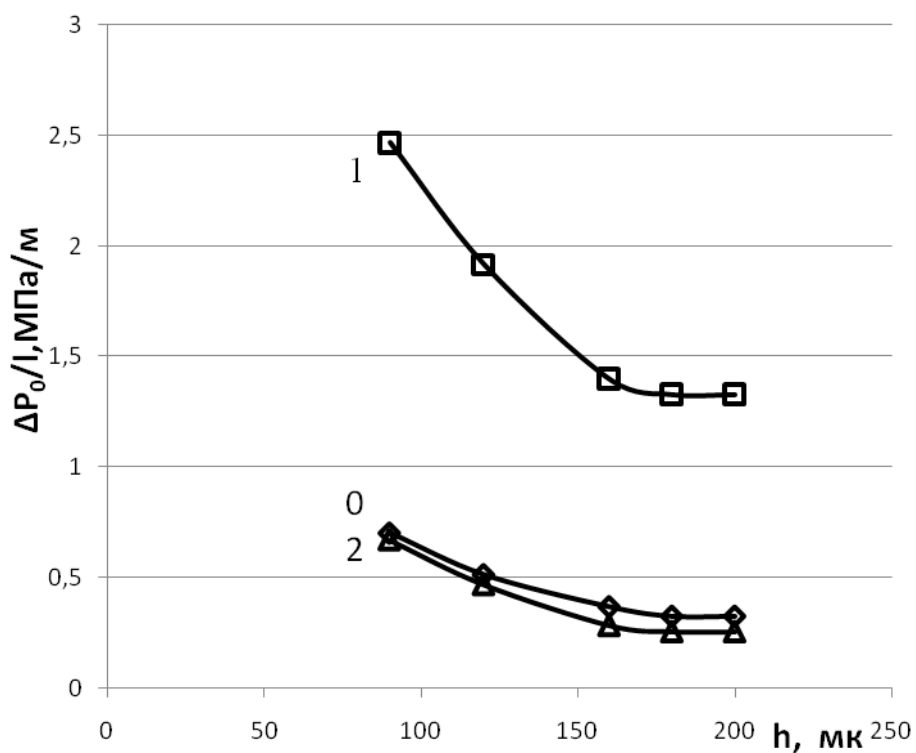


Рис. 6. Зависимость $\Delta P_0/l$ от h при движении неньютоновской нефти:
0, 1 и 2 – соответственно в центре, в первом и втором отверстиях верхней плиты щелевой модели

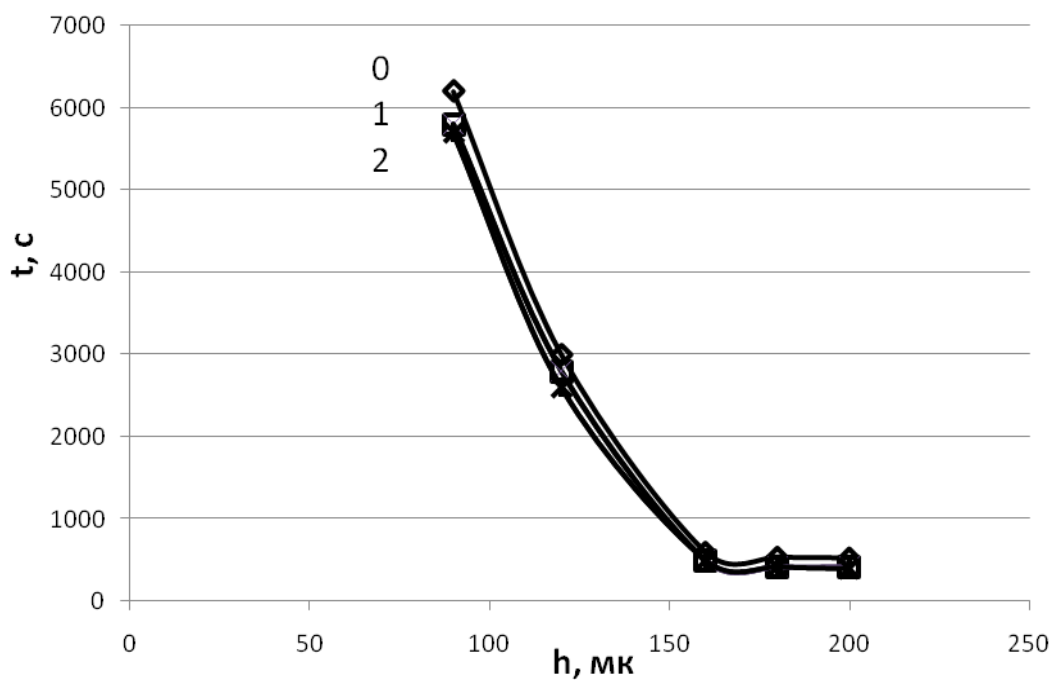


Рис. 7. Зависимость t от h при движении неньютоновской нефти:
0, 1 и 2 – соответственно в центре, в первом и втором отверстиях
верхней плиты щелевой модели

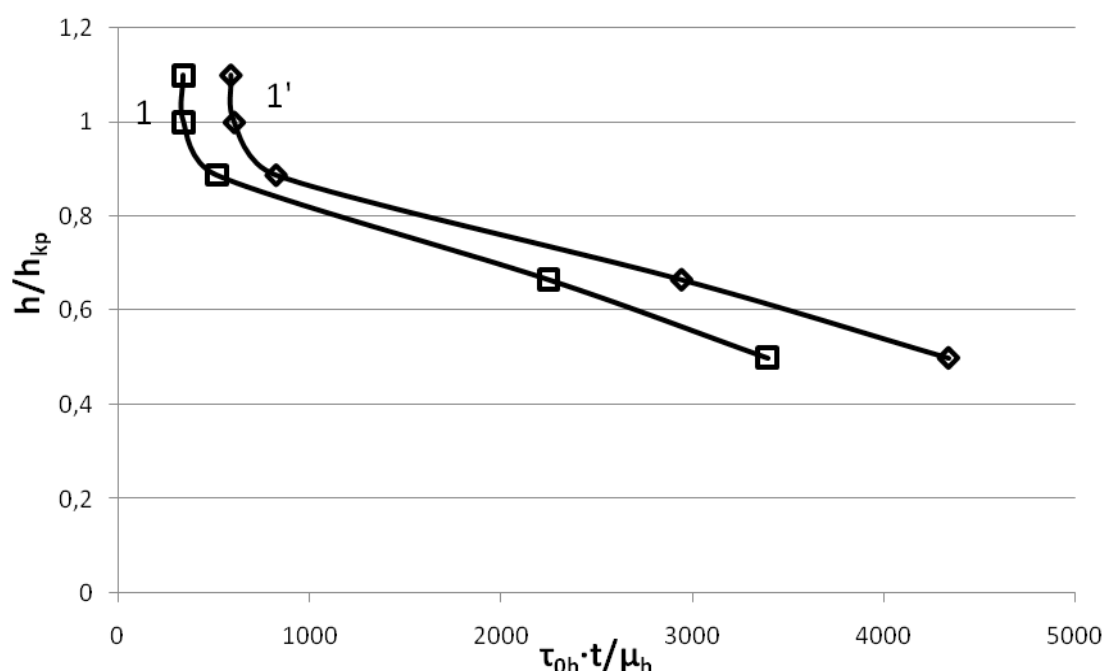


Рис. 8. Зависимость $\tau_{0h} \cdot t / \mu_h$ от h/h_{kp} при движении неньютоновской нефти:
1 и 1' – соответственно в первой и второй сериях опытов

Как видно из рис. 8, с увеличением $h/h_{кр}$ величина безразмерного параметра $\tau_{0h}t/\mu_h$ уменьшается. Это объясняется тем, что при большой раскрытости щели восстановление давления происходит быстрее ввиду ослабления аномальных свойства движущейся жидкости.

При использовании теории размерности и метода наименьших квадратов были получены следующие зависимости при $0 \leq h/h_{кр} \leq 1$ для плоскорадиальной щели:

в первой:

$$\frac{h}{h_{кр}} = 1 - \frac{\tau_{0h}t/\mu_h - 342,86}{1205,5 + 1,977(\tau_{0h}t/\mu_h - 342,86)} ; \quad (1)$$

$$\tau_{0h}t/\mu_h > 400 ;$$

и второй сериях опытов:

$$\frac{h}{h_{кр}} = 1 - \frac{\tau_{0h}t/\mu_h - 606,81}{1525,1 + 1,966(\tau_{0h}t/\mu_h - 606,81)} ; \quad (2)$$

$$\tau_{0h}t/\mu_h > 600 ,$$

где τ_{0h} и μ_h – реологические параметры, которые определяется из зависимостей $\tau_{0h} = \tau_0 + \dot{\gamma} \mu_h$ при различных температурах и раскрытости щели для случаев стационарного режима движения жидкости в плоскорадиальной щели [5]; t – время восстановления давления.

При этом коэффициент корреляции для кривой 1 – $R = 0,9898$, а для кривой 1' – $R = 0,9903$.

Расчеты для определения раскрытости щели по вышеуказанной формуле производятся в следующей последовательности:

1. определяется время восстановления давления по методике, изложенной в [6];
2. для проб нефти, добываемой из соответствующих скважин, определяют на щелевой модели значения τ_{0h} , $\mu_{кр}$, $h_{кр}$, $\tau_{кр}$ и находят принадлежность данной нефти к группам неньютоновской или ньютоновской;
3. из формул раскрытости, полученных при первой (1) и второй (2) серии опытов для плоскорадиальной щели рассчитывается значение раскрытости h ;
4. в результате сравнения h и $h_{кр}$ принимается решение о целесообразности проведения мероприятия по воздействию на ПЗС. Если $h < h_{кр}$ мероприятие по воздействию на ПЗС проводится, а в противном случае нет.

Таким образом, данная методика позволяет на основе оценки раскрытости трещин прогнозировать успешность операции по физическому воздействию на ПЗС.

Выводы

1. При движении жидкости в плоскорадиальной микротрещине начальный градиент давления и время восстановления давления в зависимости от раскрытости трещин могут изменяться в широких пределах.
2. Установлена возможность регулирования уровнем давления реологических параметров жидкостей в плоскорадиальной микротрещине.
3. Полученные эмпирические зависимости могут быть использованы при прогнозировании параметров трещиноватых пластов, а также реологических параметров жидкостей в пластовых условиях.
4. Полученные результаты позволяют оценить раскрытость трещин, эффективность проведенных мероприятий, а также прогнозировать успешность операции.

Литература

1. Гурбанов Р.С., Мамедова М.А. Определение раскрытости трещин по данным нестационарного движения жидкостей в тонких щелях // Нефть и газ. 1991. № 3. С. 43 - 47.
2. Мамедова М.А. Исследование неустановившегося движения жидкости в плоскорадиальных тонких щелях // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2007. № 2. С. 30 - 32.
3. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993. 416 с.
4. Гурбанов Р.С., Абдинов Э.Т., Агаева С.Е. Индикаторные кривые при плоско-радиальной фильтрации несжимаемой вязкой жидкости // ДАН Азерб. ССР. 1981. Т. XXXVII. № 10. С. 46 - 45.
5. Мамедова М.А. Экспериментальное исследование движения неньютоновских жидкостей в плоскорадиальной микротрещине // Научное обозрение. 2010. № 5. С. 51 - 58.
6. Мирзаджанзаде А.Х., Ахмедов З.М., Алиев В.А. и др. Особенности разработки месторождений неньютоновских нефтей // М.: ВНИИОЭНГ. 1971. 112 с.

EXPERIMENTAL STUDIES OF UNSTEADY FILTRATION OF THE NON-NEWTONIAN FLUID IN FLAT-RADIAL MICROFISSURES

M.A. Mamedova

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

Abstract. *The present work is devoted experimental studying of influencing of level of pressure, opening and inertial forces on pressure buildup process at flat-radial flow of fluid in the conditions of appearance of an original pressure gradient.*

The results of investigations can be used for an appraisal of opening of fissures at hydraulic fracturing of formation for the purpose of increase of efficiency of the held actions and predicting of operations success.

Keywords: *opening of radial microfissures, original pressure gradient, pressure buildup, direction of injection, non-newtonian fluids*

References

1. Gurbanov R.S., Mamedova M.A. Opredelenie raskrytosti treshchin po danym nestatsionarnogo dvizheniya zhidkosti v tonkikh shchelyakh (Determination of opening cracks according to data of unsteady fluid motion in thin cracks), *Neft' i gaz*, 1991. Issue 3, pp. 43 - 47.
2. Mamedova M.A. Issledovanie neustanovivshegosya dvizheniya zhidkosti v ploskoradial'nykh tonkikh shchelyakh (Investigation of unsteady flow in flat-radial thin cracks), *Azerbaidzhanskoe neftyanoe khozyaistvo*. 2007, Issue 2, pp. 30 - 32.
3. Basniev K.S., Kochina I.N., Maksimov V.M. Podzemnaya gidrodinamika (Underground hydromechanics). Moscow: Nedra, 1993. 416 p.
4. Gurbanov R.S., Abdinov E.T., Agaeva S.E. Indikatornye krivye pri plosko-radial'noi fil'tratsii neszhimaemoi vyazkoi zhidkosti (Indicator curves with flat radial filtration of an incompressible viscous fluid), *Proceedings of the Academy of Sciences of Azerbaijan SSR*, 1981, Vol. XXXVII, Issue 10, pp. 46 - 45.
5. Mamedova M.A. Eksperimental'noe issledovanie dvizheniya nen'yutonovskikh zhidkosti v ploskoradial'noi mikrotreshchine (Experimental study of non-Newtonian fluids motion in a planar radial microcrack), *Nauchnoe obozrenie*, 2010, Issue 5. pp. 51 - 58.
6. Mirzadzhanzade A.Kh., Akhmedov Z.M., Aliev V.A. et al. Osobennosti razrabotki mestorozhdenii nen'yutonovskikh neftei (Features of non-Newtonian oil fields development). Moscow: VNIIOENG. 1971. 115 p.