

УДК 622:532.11

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОТРЕЩИННЫХ КАНАЛАХ

Мамедова М.А.

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
Баку, e-mail: mamedova-1944@mail.ru*

Разработаны основы механики жидкостей в микротрещинах и их применение при разработке нефтяных месторождений трещиноватых пород: при движении жидкости в щели с раскрытостью $h < h_{кр}$ в системе «микротрещина – жидкость» проявляются неньютоновские свойства, для вязкой жидкости, и для аномальной жидкости усиливаются реологические свойства, а при $h \geq h_{кр}$ указанные микротрещинные эффекты отсутствуют; полученный микротрещинный эффект для однородной жидкости, очищенной от воздуха или газа, является дополнительным сопротивлением подобно эффекту Жамена и может при течении двух- и трехфазных жидкостей в системах микротрещин более усилить влияние Жамена; установленные критические значения раскрытости трещины составляют для воды 35 и 30 мкм при температурах 293 и 303 К, вязкой и аномальной нефти при температуре 303 К соответственно 130 и 180 мкм. Впервые экспериментально было выявлено, что причиной проявления аномальных свойств вязких жидкостей, в частности воды, и усиление этих свойств для аномальных жидкостей в трещинах является новый микротрещинный эффект системы «микротрещина – жидкость». Для осуществления процесса разработки трещиноватых месторождений рекомендуется учесть выявленный микротрещинный эффект в системе «микротрещина – жидкость». В гидродинамике жидкостей для устранения влияния степени раскрытости трещин, т.е. эффекта «трещина – жидкость», целесообразно оказывать воздействие на систему «микротрещина – жидкость» мощными ультразвуковыми, гидродинамическими, акустическими и другими волнами, что требует изготовления специальных установок.

Ключевые слова: раскрытость, гидравлическое сопротивление, аномальная нефть, эффект «микротрещина – жидкость»

RESEARCH OF THE HYDRODYNAMIC PECULIARITIES OF FLUID MOTIONS IN THE MICRO-CRACKED CHANNELS

Mammadova M.A.

Azerbaijan State University of Oil and Industry, Azerbaijan, e-mail: mamedova-1944@mail.ru

The fluids mechanics foundations in the microcracks and their use during the oil fields development of the fractured rocks have been developed on the basis of the experimental investigations and theoretical generalizations of the Newtonian and non-Newtonian fluids motions in the micro-cracked channels: During fluid motion in the crack with opening $h < h_{cr}$ in the «microcrack-fluid» system the non-Newtonian properties for the viscous fluid are manifested and rheological properties are increased for anomalous fluid but the mentioned microcracked effects are absent at $h \geq h_{cr}$; The obtained micro-cracked effect for gas- or air-free homogeneous fluid is as the additional resistance being similar to Jamin effect and it can increase Jamin effect during two and three phase fluids flow in microcracks systems; The determined critical values of crack opening are 35 and 30 μm for water at 293 and 303 K temperatures and they are 130 and 180 μm for viscous and anomalous oil at 303 K respectively. Firstly it has experimentally been revealed that the reason of the anomalous properties manifestation of the viscous fluids, particularly water and these properties strengthening for anomalous fluids in the cracks is new micro-cracked effect of «microcrack-fluid». For realization of the fractured fields development process it is recommended taking into consideration the detected micro-cracked effect in «microcrack-fluid» system. In fluids hydrodynamics for elimination of the influence of the cracks opening degree, i.e. «crack-fluid» effect it is necessary to have effect on «microcrack-fluid» system by powerful ultrasound, hydrodynamic, acoustic and other waves which requires to make special settings.

Keywords: opening, hydraulic resistance, anomalous oil, «microcrack – fluid» effect

В настоящее время механические свойства жидкостей исследуются в трубах различного размера. Имеются исследования, в которых утверждается, что в трубах малых размеров сопротивление движению жидкости увеличивается по сравнению с расчетными формулами, и это явление объясняется различными качественными факторами.

В настоящее время накоплен значительный материал по изучению движения жидкостей в щелях, проведены многочисленные экспериментальные и теоретические исследования [1–3] и т.д. При этом нет единого мнения о проявлении ано-

мального поведения жидкостей в микротрещинах. Учитывая это положение в области механики жидкостей, нами были проведены эксперименты в специально разработанной установке с различными жидкостями: водой, вязкой и аномальной нефтью [4, 5]. Найденный в ходе проведенных исследований эффект «микротрещина – жидкость» будет учитываться в практике нефтедобычи при извлечении нефти из трещинных пластов и при увеличении коэффициента нефтеотдачи.

Раскрытость трещин характеризует коэффициент трещинной пористости и их

фильтрационные свойства. Уменьшение раскрытости трещин значительно ухудшает фильтрационные характеристики ПЗС, что приводит к снижению производительности скважин. Поэтому предварительное определение раскрытости трещин позволяет повысить эффективность воздействия на призабойную зону, а также избежать проведения необоснованных мероприятий.

Целью работы является исследование эффекта «микротрещина – жидкость» при движении жидкостей в трещинах с микронной раскрытостью и в низкопроницаемых пористых средах, и попытка использования эффекта в различных областях техники и технологии.

Материалы и методы исследования

Ниже представлены результаты исследования влияния раскрытости трещин на реологические свойства ньютоновских и неньютоновских жидкостей при движении в плоскопараллельных и плоскорадиальных трещинах с микронной раскрытостью.

Сделано обобщение результатов экспериментальных исследований движения вязких жидкостей в плоскопараллельных и плоскорадиальных микротрещинах [4, 5].

Экспериментальные исследования проведены на установках с плоскопараллельными и плоскорадиальными трещинами с различной раскрытостью h [4, 5].

Конструкция плоскорадиальной трещинной модели представлена на рис. 1. Верхняя и нижняя границы являются плитами диаметром 168 мм (6 и 2), зажатыми между фланцами 1 и 7. Под действием перепада давления исследуемая жидкость через штуцер 4 поступает во втулку 5, герметизирующую резиновыми уплотнениями 3 кольцевую полость, затем в трещину между плитами и далее в систему для замера протекающей жидкости в штуцер 8.

Трещины заданной толщины были получены установкой между плитами несмачиваемых прокладок размерами 5×7 мм, которые расположены в точках плоскорадиальной трещины с центральными углами 120° . Толщина прокладок выбиралась в зависимости от величины, требуемой толщины трещины. При этом погрешность определения величины раскрытости равна $0,1$ мкм.

Для контроля деформации трещины использовался индикатор часового типа, причем в процессе эксперимента деформация отсутствовала.

С целью контроля распределения давления по длине по радиусу верхней плиты, кроме отверстия в центре, в контуре также были просверлены отверстия. Отметим, что длина трещины равна 84 мм.

Плоскопараллельная трещина, имитирующая трещиноватый коллектор, представляет собой две пластины толщиной $4 \cdot 10^{-2}$ м, каждая из которых изготовлена из нержавеющей стали. Между плитами укладывается несмачиваемая прокладка, вырезанная так, что она, во-первых, служит для герметизирующей модели, а во-вторых, образует прямоугольную трещину размером $0,3 \times 4 \cdot 10^{-2}$ м.

Экспериментальные исследования в плоскопараллельных и плоскорадиальных трещинах проводились на модели, находящейся в термованне при установленном режиме движения жидкости в изо-

термических условиях. Постоянство температуры поддерживалось ультратермостатом, снабженным контактным термометром, установленным непосредственно в термованне. Для исключения различных эффектов насыщения трещины исследуемой жидкостью производилось под небольшим давлением с одновременным вакуумированием.

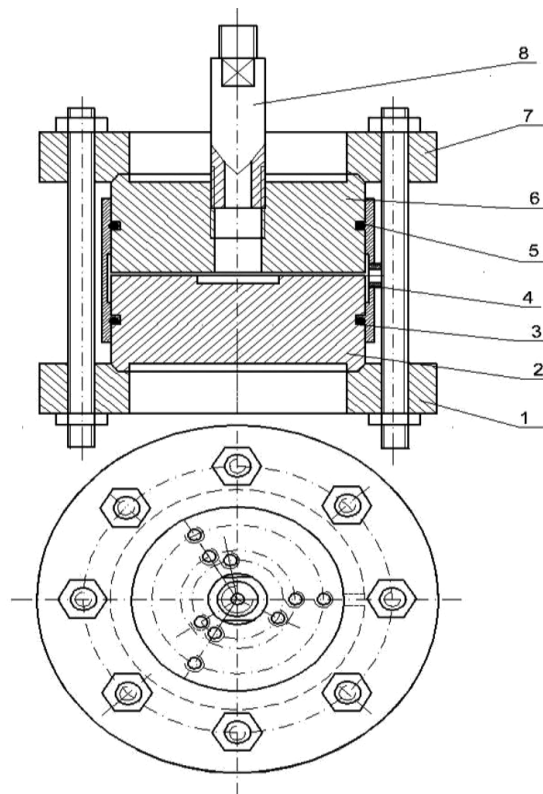


Рис. 1. Модель плоскорадиальной трещины

Исследованы особенности движения жидкости в микротрещине различной раскрытости, создавались различные перепады давления с использованием образцовых манометров с погрешностью $\delta = (0,2 \div 0,35)\%$ и по достижению установившегося режима фильтрации замерялись соответствующие объемные расходы жидкости Q .

Массовый расход жидкости определялся на электронных весах с точностью $0,001$ мг. При определении полной относительной погрешности для градиента скорости и предельного напряжения сдвига с толщиной трещины $10 \div 240$ мкм составляют соответственно $\gamma = (2 \div 3)\%$ и $\tau = (0,2 \div 1,2)\%$.

В качестве исследуемых жидкостей применялись вода, вязкая и аномальная нефть.

Результаты исследования и их обсуждение

Проводились эксперименты по описанной выше методике при разных перепадах давления. По полученным данным строился график зависимости $Q = Q(\Delta P)$.

Обработка экспериментальных данных заключается в определении зависимости

между средним градиентом скорости γ и касательным напряжением сдвига τ . Такое построение целесообразно с точки зрения выявления особенностей поведения исследуемых жидкостей в микротрещинах.

Зависимость между средней скоростью сдвига и напряжением сдвига на стенках трещины применительно к условиям радиального течения и имеет вид [6]:

$$v(\tau_w) = \frac{Q}{4\pi r h^2} = \frac{1}{\tau_w^2} \int_0^{\tau_w} \tau f(\tau) d\tau, \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{Q}{4\pi r h^2}, \quad (2)$$

$$\tau_w = \frac{\Delta P h}{L}. \quad (3)$$

Известно, что расход жидкости в плоскопараллельной трещине записывается в следующем виде:

$$Q = \frac{F h^2 \Delta P}{12 \mu l}, \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{Q}{4\pi r h^2}, \quad (5)$$

$$\tau_w = \frac{\Delta P h}{l}, \quad (6)$$

где l , h и F – соответственно длина, ширина, раскрытость и площадь поперечного сечения трещины.

Для сопоставительного анализа эти кривые были аппроксимированы моделью Шведова – Бингама и определены применения в данном диапазоне градиента скоростей значения предельного напряжения сдвига τ_0 и структурной вязкости μ .

Экспериментальное исследование показывает, что предельное напряжение сдвига при движении различных сред в микротрещинах зависит от раскрытости трещины и свойства жидкостей.

По результатам экспериментальных исследований воды, вязкой и аномальной нефти в микротрещинах выявлен новый эффект – критическая раскрытость микротрещины h_{kp} , так называемый эффект «микротрещина – жидкость», без которого невозможно осуществить технологические расчеты для различных процессов промышленности, медицины и т.д.

Установлено, что при движении вязкой однопараметрической жидкости в каналах с раскрытостью меньше критической $h < h_{kp}$, вязкая жидкость ведет себя как аномальная, т.е. становится двухпараметрической, а при

движении в каналах $h \geq h_{kp}$ жидкость становится однопараметрической. Для аномальных жидкостей в каналах $h < h_{kp}$ реологические параметры жидкости усиливаются, а в каналах $h \geq h_{kp}$ остаются без изменений.

Отмеченное приводит к тому, что в реальных трещиноватых пластах большая часть нефти, находящаяся в микротрещинах, либо вообще не течет при градиентах вытеснения разрабатываемого пласта, либо создает добавочное сопротивление фильтрации в пласте нефти. В конечном счете следствием этого является значительное увеличение количества остаточной нефти и естественно, уменьшение конечной нефтеотдачи пласта.

Определено критическое значение раскрытости трещин h_{kp} , т.е. установлено, что при $h \geq h_{kp}$ при движении жидкостей влияние эффекта «микротрещина – жидкость» практически отсутствует. С установлением этих факторов создается новый раздел в механике жидкости, газа и плазмы «механика жидкости в микротрещинных каналах», который позволит создать новые технические и технологические процессы.

Опытные данные пересчитанного по формулам (2), (3) при движении воды в плоскорадиальных и (5), (6) вязкой нефти в плоскопараллельных микротрещинах при различной раскрытости трещины и температуре 303 К построены графики зависимости $\gamma = f(\tau)$, приведенные соответственно на рис. 2 и 3.

Как видно из этих рисунков, при плоскорадиальном, а также и при плоскопараллельном течении исследованных жидкостей микротрещины имеет место проявление предельного напряжения сдвига. При раскрытости $h < 30$ и $h < 160$ мкм кривые течения соответственно для воды (рис. 2, кривые 1–3) и вязкой нефти (рис. 3, кривая 1) описываются нелинейными уравнениями, которые характерны для неньютоновских систем. А зависимости $\gamma = f(\tau)$, построенные по данным, раскрытостью $h \geq h_{kp}$, описываются линейными уравнениями, проходящих через начало координат. При $h \geq h_{kp}$ для различных величин раскрытости трещины все точки зависимостей $\gamma = \gamma(\tau)$ для воды (рис. 2, прямые 4 и 5) укладываются на одной прямой. Это доказывает достоверность установленных критических значений раскрытости трещины.

Проявление эффекта «микротрещина – жидкость» можно было бы объяснить, как аналогию эйлеровой устойчивости стержня. В трещине микронной толщины система «жидкость – трещина» под действием сил, приложенных на концах щели в условиях сравнительно малых средних скоростей

сдвига, жидкость может вести себя как сжатый устойчивый стержень и имеет в щели известную форму равновесия. Устойчивая стержневая форма равновесия жидкости зависит от толщины щели. Если толщина тонкой щели невелика, то приложенные на концах щели силы прижимают жидкий стержень к стенкам трещины. Происходят изменения в свойствах жидкой струи за счет изменения его структуры и сил трения по стенкам. По мере увеличения толщины трещины микротрещинный эффект исчезает. Между этими двумя состояниями равновесия существует так называемое критическое равновесие, при котором жидкость может сохранить первоначальное свойство.

Нашими исследованиями установлено, что освоение запаса нефти в дренаж-

ной зоне скважин происходит в два этапа: первый этап – освоение нефти из активной зоны (ПЗС) скважин, это составляет примерно 30÷33 % запаса ПЗС, а вторым этапом является потенциально активная зона нефти в (ПЗС) скважине. В этой потенциально активной зоне скважин, в микротрещинных каналах, а также в сильно малопроницаемых пористых средах содержится изолированная нефтяная область, около 70 %.

Отметим, что существующими технологическими методами осваивать это не представляется возможным. Нужны новые технологические процессы.

Наиболее эффективным направлением следует считать воздействие на ПЗС и на пласты мощных физических энергетических полей [7, 8] и т.д.

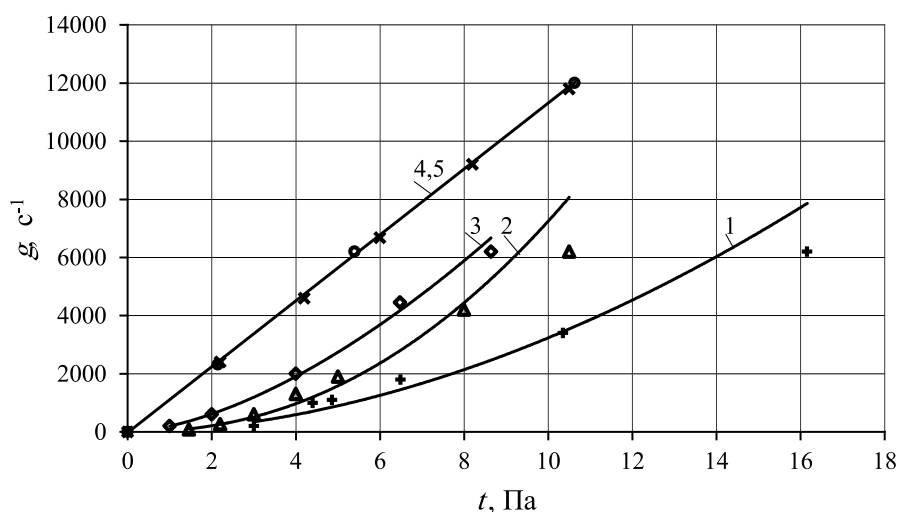


Рис. 2. Зависимость γ от t при движении воды в плоскорадialных микротрещинах при значениях раскрытости, мкм: 10 (кривая 1), 15 (кривая 2), 20 (кривая 3), 30, 35 (прямая 4, 5), $T = 303\text{ K}$

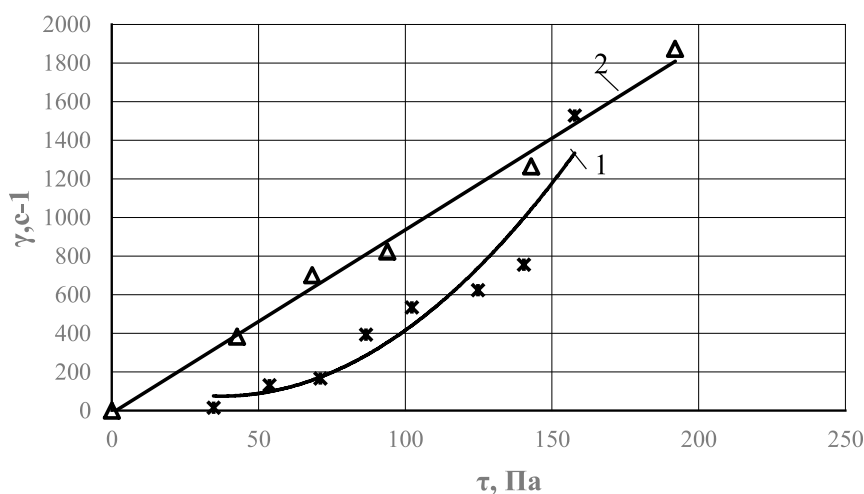


Рис. 3. Зависимость γ от τ при движении вязкой нефти в плоскопараллельных микротрещинах при $h = 130$ (кривая 1, при $h < h_{кр}$) и 160 мкм (прямая 2, при $h = h_{кр}$), $T = 303\text{ K}$

Результаты проведенных исследований требуют учета трещинного эффекта, при оценке параметров системы технологических процессов и технических устройств «микротрещина – жидкость», что имеет научное и практическое значение для различных областей промышленности, машиностроения, приборостроения, химической технологии и в медицине.

Установлено, что вязкие жидкости (вода и нефть) при движении в трещинах, размеры которых $h < h_{кр}$, приобретают характер аномальных жидкостей, а аномальные жидкости еще более усиливают реологические параметры. При движении этих жидкостей в трещинах, размеры которых $h \geq h_{кр}$, их реологические параметры не меняются. Эти явления подтверждены и при движении вязких и аномальных жидкостей в последовательно соединенных каналах с различными микромерами.

Изменение механических свойств жидкостей при движении в каналах, размеры которых $h < h_{кр}$, и их восстановление при движении в каналах, размеры которых $h \geq h_{кр}$, представляют собой эффект «микротрещина – жидкость». Следовательно, для активизации движущихся и покоящихся жидкостей в микротрещинах необходимо размеры каналов из состояния $h < h_{кр}$ привести к состоянию $h \geq h_{кр}$. Это достигается путем использования сильных физических полей.

Выводы

1. На основе экспериментальных и теоретических обобщений о движении различных жидкостей в трещинных каналах разработаны основы «механики жидкостей и газов микротрещинных каналов в сверхмалопроницаемых пористых средах» и применение их в различных отраслях промышленности.

2. Экспериментально установлено, что при движении вязких жидкостей в трещине с раскрытостью $h < h_{кр}$ в системе «микро-

трещина – жидкость» проявляются неньютоновские свойства, а для аномальных жидкостей усиливаются неньютоновские свойства; указанные эффекты имеют место в системе «микротрещина – жидкость» только при $h < h_{кр}$, а при $h \geq h_{кр}$ указанные эффекты отсутствуют.

3. Результаты проведенных исследований требуют учета трещинного эффекта при оценке параметров системы технологических процессов и технических устройств «микротрещина – жидкость», что имеет научное и практическое значение для различных областей промышленности, машиностроения, приборостроения, химической технологии и в медицине.

4. В нефтяной промышленности возможно добиться максимального увеличения нефтеотдачи (средний коэффициент нефтеотдачи по миру около 30%) за счет привлечения в разработку нефти из малопроницаемых зон пластов.

Список литературы

1. Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1966. 284 с.
2. Куштанова Г.Г. Нестационарная фильтрация жидкости в трещиновато-пористом пласте по неравновесному закону фильтрации // Изв. вузов. Нефть и газ. 2008. № 5. С. 25–30.
3. Свалов А.М. Капиллярные эффекты в трещиноватых породах // Нефтяное хозяйство. 2011. № 1. С. 59–63.
4. Gurbanov R.S., Mammadova M.A. Hydromechanical substantiation of the microcrack-fluid effect // *Mechanika*. 2016. Vol. 22 (6). P. 483–488. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.22.6.12649>.
5. Мамедова М.А. Об аномальном поведении жидкостей в микротрещине // Нефтепромысловое дело. 2013. № 2. С. 38–42.
6. Мирзаджанзаде А.Х., Мирзоян А.А., Гевинян Г.М., Сенд-Рза М.К. Гидравлика глинистых и сегментных растворов. М.: Недра, 1966. 298 с.
7. Стреков А.С., Гаджиев А.А. Совершенствование технологии вибровоздействия на призабойную зону нефтедобывающих скважин // Естественные и технические науки. 2009. № 3. С. 211–216.
8. Абдуллаева Э.С. О возможности применения волнового воздействия в комплексе с методами, улучшающими проницаемость призабойной зоны скважин // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2017. № 9. С. 27–30.