

УДК 622.276

**ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ ФИЛЬТРАЦИИ
ПРИ СОВМЕСТНОМ ДВИЖЕНИИ ДВУХ ФЛЮИДОВ**

**COMMON PROBLEMS FILTRATION THEORY
FOR THE JOINT MOTION OF THE TWO FLUIDS**

Стрекалов А.В., Баталов Д.А.

**ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый
университет», г. Тюмень, Российская Федерация**

A.V. Strekalov, D.A. Batalov

**FSBEI NPE “Tyumen State Oil and Gas University”,
Tyumen, the Russian Federation**

e-mail: iq-tyumen@mail.ru

Аннотация. Известно, что при фильтрации нефти и воды или любых других флюидов кроме классической закономерности внутрипорового вязкостного трения (закон Дарси) возникает целый ряд эффектов, требующих описания дополнительных закономерностей. Движение двух сред сопровождается:

- их смешиванием и взаимодействием на уровне межмолекулярных сил и взаимного вязкостного трения;
- различным взаимодействием сред с материалом стенок поровых каналов на молекулярном уровне в виде Ван-дер-ваальсовых сил;
- механическим сопротивлением поровых каналов малого проходного сечения молекулам сред имеющих сопоставимые с ними размеры (например молекул нефти и микрокапилляры с размером менее 0,01 мкм);
- структуризацией внутрипоровых потоков в виде эмульсий;
- перемежающейся сменой характера вытеснения от поршневого до струйного и смешанного.

К сожалению, на данный момент теория двухфазной (и более) фильтрации ограничивается описанием вышеупомянутых явлений в виде кривых относительных фазовых проницаемостей (ОФП), градиента начала фильтрации и кривых капиллярных давлений. Последние, чаще всего тем или иным образом дублируются в ОФП.

При проведении вычислительных и лабораторных экспериментов выяснено, что нелинейные участки фильтрационных законов проявляются как при высоких, так и при сверхнизких скоростях фильтрации. Выявление функций относительных фазовых проницаемостей (ОФП) также требует моделирования на микроуровне. Закон фильтрации, являющейся, по сути, законом, объединяющим вязкостное трение, трение о стенки каналов, силы молекулярного взаимодействия, адгезии, эффекты преобразования гидравлической энергии в тепловую и др., требует обоснования вычислительными экспериментами на уровне микрокапиллярных моделей. В свою очередь это требует решения уравнений, подобных Навье-Стоксу (с модификацией) и пересмотра закона вязкостного трения Ньютона для условий течения в микрокапиллярах

Abstract. It is known that during the filtration of oil and water or any other fluids other than the classical patterns of interstitial viscous friction (Darcy's law) raises a number of effects that require the description of additional laws. The movement of the two media is accompanied by:

- Their mixing and interaction at the level of the intermolecular forces and mutual viscous friction;
- Interaction of different media with the material of the walls of the pore channels at the molecular level in the form of van der Waals forces;
- Mechanical resistance of the pore channels of small flow cross section of the medium molecules having comparable dimensions to them (eg oil molecules and microtubules in a size smaller than 0.001 mm);
- Structuring of interstitial flow in the form of emulsions;

- Intermittent change in the nature of the displacement of the piston to the jet and mixed.

Unfortunately at the moment the theory of two-phase (or more) filtering limited to the description of the above phenomena in the form of curves relative permeabilities, the beginning of the gradient filter and capillary pressure curves. Last often one way or another are duplicated in the relative permeabilities.

When conducting computational and laboratory experiments found that nonlinearities filtration laws appear at both high and at very low filtration rates. Identify functions relative permeabilities also requires modeling at the micro level. Filtration law, which is, in fact, by law, unifying viscous friction, the friction against the walls of the channels, the molecular interaction forces, adhesion, the effects of the conversion of hydraulic energy into thermal energy, etc., Requires justification computational experiments at microcapillary models. In turn, this requires the solution of equations similar to the Navier-Stokes equations (with modification) and the revision of the law of viscous friction Newton flow conditions in microcapillaries

Ключевые слова: закон Дарси, проницаемость, модель коллекторов, межмолекулярные силы, вязкостное трение.

Key words: Darcy's law, filtration, model collectors, intermolecular forces, viscous friction.

Рассмотрим некоторые чисто теоретические аспекты представления ОФП. Закон Дарси был выявлен в лабораторных условиях на искусственном коллекторе, малых перепадах давления при фильтрации воды. Поэтому в законе фильтрации в качестве одной из характеристик присутствует площадь фильтрации – F в виде полной площади поперечного сечения коллектора (т.е. по наружному периметру) (рисунок 1).

$$\Delta p = \mu \frac{q \cdot L}{F \cdot k} \quad (1.1)$$

где q – объемный расход, $\frac{м^3}{с}$;

L – длина образца, м;

k – абсолютная проницаемость коллектора, $м^2$;

μ – динамическая вязкость, Па·с;

Δp – перепад давления, Па.

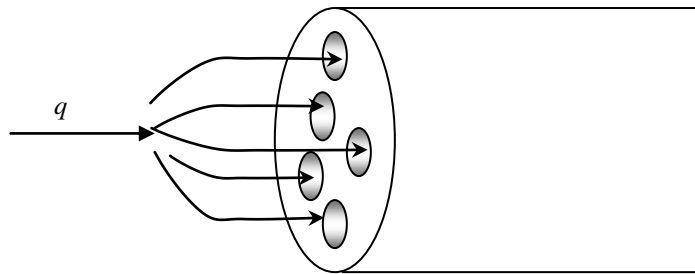


Рисунок 1. Схема представления о фильтрации в законе Дарси

Согласно физике процесса поток разделяется по поровым каналам на входе в рассматриваемый образец и площадью движения потока является суммарная площадь просвета всех поровых каналах. В этой связи учитывая основные факторы вязкостного трения в формуле (1.1) вместо площади поперечного сечения коллектора должна стоять суммарная средняя площадь просвета поровых каналов – F_p . Эту площадь легко вычислить, перемножив площадь образца на открытую пористость:

$$F_p = F \cdot m \quad (1.2)$$

Естественно проницаемость в (2.1) уже будет иметь физический смысл разорванный с емкостным параметром – m . В подземной гидродинамике и геологии давно известно, что корреляция между проницаемостью и пористостью наблюдается крайне редко, из-за структуры порового пространства и геометрии поровых каналов [1]. В этой связи произойдет

вполне "физичный" отрыв проницаемости от площади коллектора, включающего твердую непроницаемую часть скелета пласта.

Если сказать более критично, то трудно себе представить, что в гидравлике при расчете гидравлических сопротивлений в трубах брали бы внешний диаметр трубы вместо внутреннего.

Так, закон фильтрации для условий течения одной среды будет выглядеть в виде:

$$\Delta p = \mu \frac{q \cdot L}{F \cdot m \cdot k} \quad (1.3)$$

В системе фильтрации более одной среды задача усложняется, во-первых, тем, что динамическая вязкость характеризует флюид, как капельную жидкость, частицы которой не имеют размеры. На месторождениях Юрских и более ранних отложений доля микрокапилляров достигает 60–70% с приведенным диаметром менее 0,01 мкм, что приближает часть из них к наноуровню, т.е. уровню размеров молекул нефти (до 60 нм) (рисунок 2).

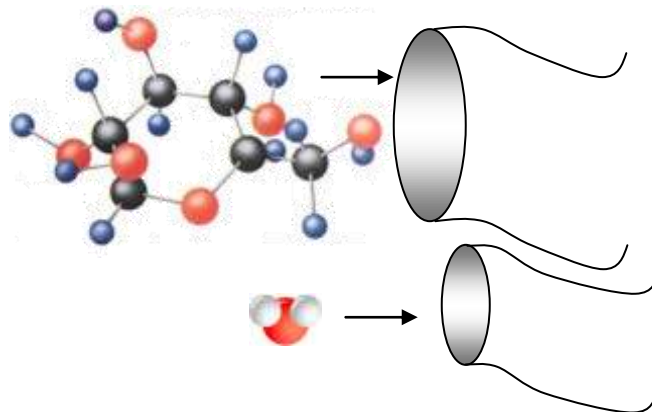


Рисунок 2. Схема капилляров и молекул воды и бензина

Другой проблемой описания совместной фильтрации является естественная конкуренция флюидов за площадь движения в каждом поровом канале. Рассмотрим совместное движение нефти и воды в одном

поровом канале (рисунок 3). В зависимости от ситуации: сколько воды и нефти уже находится в поровом канале, зависит гидравлическое сопротивление, создаваемое со стороны насыщенной части порового канала [3]. Назревает вполне очевидный вывод о том, что к площади просвета следует приписать коэффициент насыщенности – σ_n рассматриваемой фазы (нефти или вода):

$$\Delta p = \mu \frac{q \cdot L}{\sigma_n \cdot F \cdot m \cdot k} \quad (1.4)$$

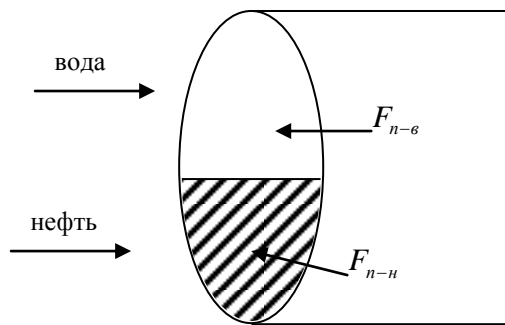


Рисунок 3. Схема движения нефти и воды в одном поровом канале

Все это справедливо для дифференциальной записи закона Дарси:

$$\text{grad} p = -\mu \frac{\omega_{\text{ист}}}{k}, \quad (1.5)$$

где $\omega_{\text{ист}} = \frac{\omega}{m \cdot \sigma_n}$ – средняя скорость течения нефти в поровых каналах коллектора, вместо – ω (скорость фильтрации не связанная ни с площадью просвета ни с площадью потока, занимаемой данной фазой) в классическом понимании закона Дарси.

Иначе, предложенное выше описание закона фильтрации будет правильнее с позиции физики процесса и позволит отделить

геометрические факторы порового пространства от молекулярных свойств фильтруемых сред [4].

Так как классическое применение закона Дарси доминирует при решении большинства задач гидромеханики и гидрогеологии для корректировки базового закона используются, как было сказано выше ОФП.

На рисунке 4 показана ОФП, построенная из положения о том, что вода и нефть имеют одинаковые размеры молекул и их размеры не больше молекул тестового флюида применяемого для изучения абсолютной проницаемости. Также вода и нефть не испытывают Ван-дер-Ваальсовых сил между собой и со стенками поровых каналов.

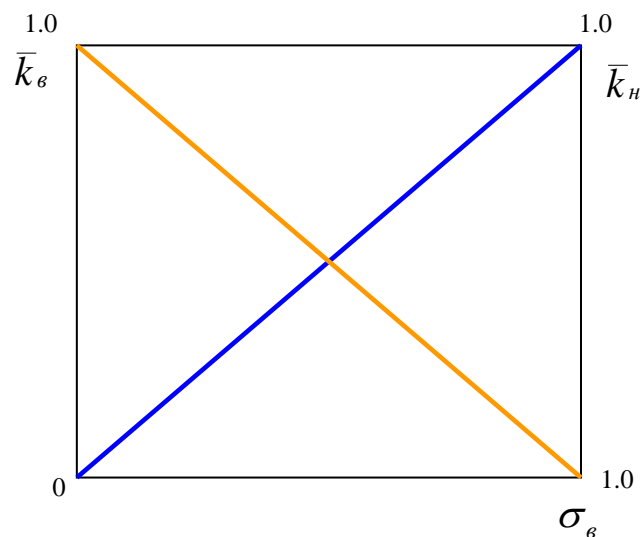


Рисунок 4. Идеальные кривые ОФП в системе вода-нефть

Прямые ОФП представляют собой крест и выражают конкуренцию флюидов за площадь фильтрации. Т.е. когда насыщенность по воде равна нулю, и она занимает нулевую площадь, то ее потенциальная скорость:

$$\omega_e = \frac{q}{F \cdot m \cdot \sigma_e} \quad (1.6)$$

будет стремиться к бесконечности, как и модуль градиента давления, что

свидетельствует о бесконечном сопротивлении и невозможности фильтрации. Тем не менее, это далеко не всегда выражает природу явления. Вполне естественно, что отсутствующая вода не может в этом случае фильтроваться, но если в поровый канал поступает новая порция воды из смежной поры, то тогда эта логика построения ОФП работать не будет. Действительно ОФП не подходят для поршневого вытеснения, однако такой тип вытеснения постоянно перемежается со смешанным движением внутри сети поровых каналов. Возникает вопрос, каким образом использовать ОФП в гидродинамических моделях, где размеры контрольных объемов гораздо больше размеров поровых каналов [5]. Для этого чаще всего проводят осреднение гидросопротивлений, что ведет в дальнейшем к размазыванию величин насыщения порового пространства разными средами (водой и нефтью) [6].

Более того следует отметить факт адаптации ОФП к задачам геологии и подземной гидромеханики для учета капиллярных явлений в виде горизонтальных участков ОФП, отражающих предельно остаточные запасы (рисунок 5).

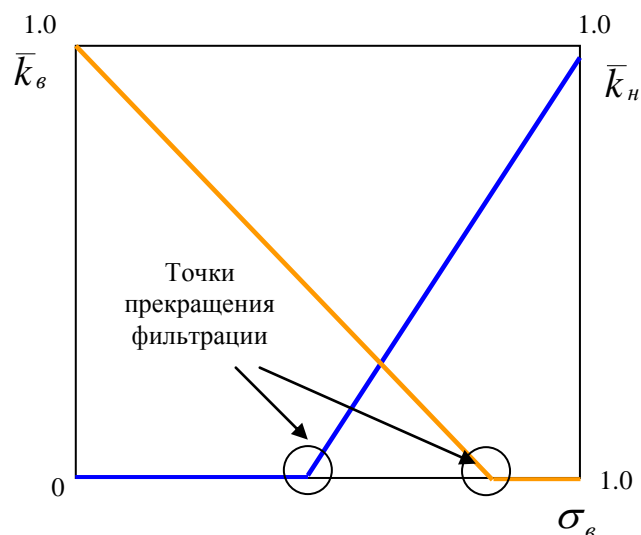


Рисунок 4. ОФП для учета связанной воды и нефти

Как видно линии ОФП пересекают ось насыщенности в ненулевых точках, что говорит о прекращении фильтрации при насыщенностях ниже критической (долей связанных запасов). Вместе с тем совершенно ясно, что дальнейшее внедрение любого из флюидов должно быть возможным при поршневом вытеснении [7].

Понимание перехода на режим поршневого вытеснения весьма относительно, так как часть каналов может находиться в этом режиме, а часть в режиме смешивания или фильтрации одного флюида.

На рисунке 6 показан частный случай вытеснения нефти водой демонстрирующий характер расчета гидросопротивлений. Данный пример так же следует учитывать в ОФП.

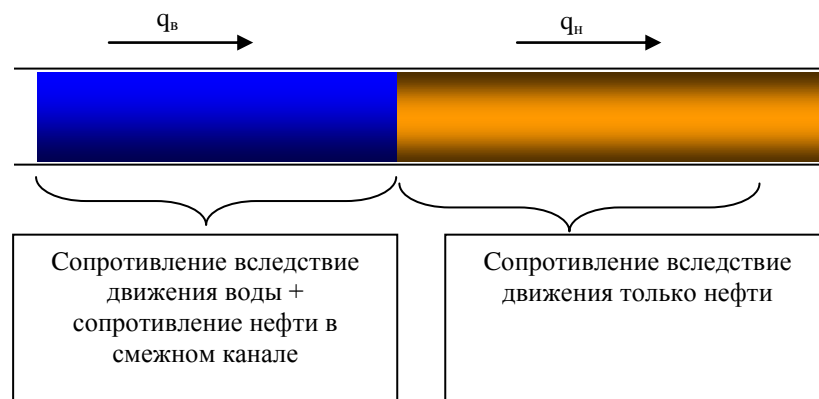


Рисунок 6. Схема поршневого вытеснения нефти водой

При вытеснении нефти водой, вода (слева) (рисунок 6) вторгается в зону справа, где вода отсутствует или ее насыщенность ниже остаточной. В этом случае вода движется в зоне слева под действием сопротивления в условиях соответствующих фильтрации только воды, а в правой части вода должна испытывать сопротивление при фильтрации только нефти. Данное обстоятельство в классических ОФП не учитывается [8].

Конечно, это можно обойти проверкой направления фильтрации, а затем переключится на обычный закон Дарси. Однако по каждой фазе и в сочетании может возникнуть несколько ситуаций, требующих алгоритмов с элементами дискретной математики [9].

Такую ситуацию также вполне можно описать с помощью предлагаемого здесь подхода: в режиме, когда фаза преодолевает барьер предельной насыщенности, то ОФП начинает отражать ОФП другой фазы (рисунок 7). В процессе расчета фильтрации по любой из фаз в случае если происходит исток, т.е. вытекание фазы из контрольного объема, то при достижении предельной – остаточной насыщенности течение принудительно прекращается. Однако в режиме притока фазы в контрольный объем ее ОФП начинает расти по принципу (как на графиках рисунок 7): чем меньше этой фазы, тем ближе ее ОФП к ОФП "конкурента".

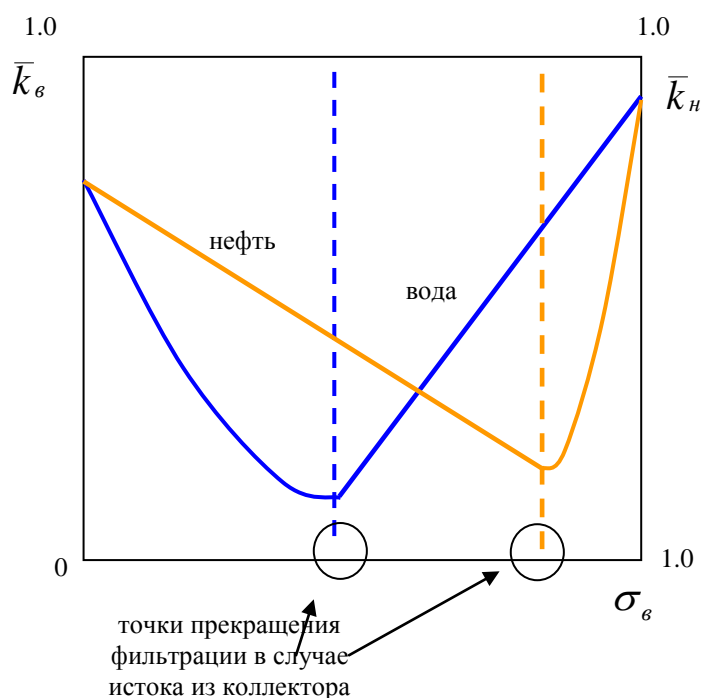


Рисунок 7. Модифицированные ОФП системы вода-нефть в условии разных взаимодействий со стенками поровых каналов

Список используемых источников

1 Стрекалов А.В. Математические модели гидравлических систем для управления системами поддержания пластового давления. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. 586 с.

2 Минаев Ю.Н., Филимонова О.Ю. Методы и алгоритмы идентификации и прогнозирования в условиях неопределенности. М.: «Горячая линия-Телеком», 2003. 208 с.

3 Фантони И., Лозано Р. Нелинейное управление механическими системами с дефицитом управляющих воздействий М.: «К-Динамика», 2013. 312 с.

4 Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети. Общий графический метод расчета. (Перевод с франц.) М.: «Машгиз», 1962. С. 87-95.

5 Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. М.: «Недра», 1981. С. 248.

6 С. Мекид Повышение структурного интеллекта кластеров датчиков в промышленном производстве: Датчики и системы М.: 2007. №4. С. 50-55.

7 Черри Е., Миллар У. Некоторые новые понятия и теоремы в области нелинейных систем. Автоматическое регулирование: Сб. материалов конференция в Кренфилде 1951г. Под ред. М.З. Литвина-Седого. М.: «Изд-воиностр», 1954. 261 с.

8 Кёниг Г., Блекуэлл В. Теория электромеханических систем. Массачусетс.ЛЛ.: 1965. 424 с.

9 Хасилев В.Я. Элементы теории гидравлических цепей. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1964. № 1. 69 с.

References

1 Strekalov A.V. Matematicheskie modeli gidravlicheskih sistem dlya upravleniya sistemami podderzhaniya plastovogo davleniya. Tyumen: ОАО «Tyumenskiy dom pechati», 2007. 586 с. [in Russian].

2 Minaev Yu.N., Filimonova O.Yu. Metodyi i algoritmyi identifikatsii i prognozirovaniya v usloviyah neopredelennosti. М.: «Goryachaya liniya-Telekom», 2003. 208 s. [in Russian].

3 Fantoni I., Lozano R. Nelineynoe upravlenie mehanicheskimi sistemami s defitsitom upravlyayuschih vozdeystviy M.: «K-Dinamika», 2013. 312 с. [in Russian].

4 Berzheron L. Ot gidravlicheskogo udara v trubah do razryada v elektricheskoy seti. Obschiy graficheskiy metod rascheta. (Perevod s frants.) M.: «Mashgiz», 1962. S. 87-95. [in Russian].

5 Foks D.A. Gidravlicheskiy analiz neustanovivshegosya techeniya v truboprovodah. M.: «Nedra», 1981. S. 248. [in Russian].

6 S. Mekid Povyishenie strukturnogo intellekta klasterov datchikov v promyshlennom proizvodstve: Datchiki i sistemy M.: 2007. №4. S. 50-55. [in Russian].

7 Cherri E., Millar U. Nekotoryie novye ponyatiya i teoremy v oblasti nelineynykh sistem. Avtomaticheskoe regulirovanie: Sb. materialov konferentsiya v Krenfilde. 1951. Pod red. M.Z. Litvina-Sedogo. M.: «Izdvoinostr», 1954. 261 s. [in Russian].

8 KYonig G., Blekuell V. Teoriya elektromehaniicheskikh sistem. Massachusetts.JL.: 1965. 424 s. [in Russian].

9 Hasilev V.Ya. Elementyi teorii gidravlicheskiikh tsepey. Izv. AN SSSR. Energetikaitransport, 1964. № 1. 69 s. [in Russian].

Сведения об авторах

About authors

Стрекалов А.В., д-р техн. наук, проф. кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», ФГБОУ ВПО ТГНГУ, г. Тюмень, Российская Федерация

A.V. Strekalov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair “Development and Exploitation of Oil and Gas Fields”, FSBEI HPE TSOGU, Tyumen, the Russian Federation

Баталов Д.А., аспирант кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», ФГБОУ ВПО ТГНГУ, г. Тюмень, Российская Федерация

D.A. Batalov, Post-graduate Student of the Chair “Development and Exploitation of Oil and Gas Fields”, FSBEI HPE TSOGU, Tyumen, the Russian Federation

e-mail: iq-tyumen@mail.ru