

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ППАЗМЫ

Сергей Викторович СТЕПАНОВ¹

Георгий Сергеевич БЕМБЕЛЬ²

Алексей Юрьевич МАКСИМОВ³

УДК 662.5

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ УПРОЩЕННОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ФИЛЬТРАЦИИ НЕФТИ И ВОДЫ ЧЕТОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ В КАПИЛЛЯРНЫХ КАНАЛАХ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

¹ доктор технических наук, старший эксперт,
Тюменский нефтяной научный центр;
профессор кафедры прикладной и технической физики,
Тюменский государственный университет
svstepanov@tnnc.rosneft.ru

² ведущий специалист,
Тюменский нефтяной научный центр
gsbembel@rosneft.ru

³ ведущий инженер, CompMechLab® LLC,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
maksimov@compmechlab.ru

Цитирование: Степанов С. В. Анализ применимости упрощенной численной модели фильтрации нефти и воды четочной структуры потоков в капиллярных каналах переменного сечения / С. В. Степанов, Г. С. Бембель, А. Ю. Максимов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 2. С. 71-88.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-71-88

Аннотация

Для гидродинамического моделирования разработки месторождений обеспеченность и корректность функций относительных фазовых проницаемостей (ОФП) — одна из важнейших проблем, требующая эффективного решения. Использование исключительно лабораторных потоковых исследований в данном вопросе зачастую невозможно по причине недостаточного количества данных. В качестве источника дополнительной информации повсеместно используются расчетные методы определения ОФП, зависящие от представлений о течении флюидов в поровом пространстве.

Представленная работа нацелена на исследование упрощенного моделирования двухфазного течения в капиллярных каналах как основы для создания вычислительно эффективного и физически содержательного метода расчета ОФП, а также на анализ области применения полученной методики и границ, в которых справедливы используемые допущения.

Для проверки корректности вычислений с использованием представленной модели было проведено сравнение результатов расчета со значениями, полученными аналитически для простейших случаев течения в каналах, и с результатами вычислений, выполненных с использованием программного пакета ANSYS Fluent для более сложных случаев, не имеющих аналитического решения.

Ключевые слова

Относительная фазовая проницаемость, кривая капиллярного давления, двухфазный поток нефти и воды, четочное течение, смачиваемость, поровое пространство, капиллярный канал.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-71-88

Введение

Описание решаемой проблемы, основные положения предлагаемого решения

Главный аспект проектирования разработки месторождений углеводородов — гидродинамическое моделирование, которое во многом основано на достоверности данных функций относительных фазовых проницаемостей (ОФП). Один из наиболее широко применяемых методов увеличения количества данных, предоставляемых лабораторными исследованиями, — использование расчетных (численных) методов описания процессов течения флюидов в пористой среде (капиллярные эффекты, извилистость и связность каналов, сложная картина смачиваемости и т. д.).

Существует несколько подходов к численному моделированию (микромоделированию) многофазных течений в пористых средах для получения ОФП. Обзор таких подходов сделан в работе [9]. Важнейшей проблемой для численного микромоделирования многофазных течений в пористых средах является то, что большинство из применяемых подходов характеризуются чрезвычайной вычислительной ресурсоемкостью. Исключением является порово-сетевой

метод, однако недостатком этого метода является чрезмерное упрощение геометрии области течения, вследствие чего снижается физическая содержательность в описании многофазного течения.

Известно, что расчеты с использованием физически содержательных методов микромоделирования, например метода функционала плотности [4], для фрагментов пористых сред — кубиков с ребром 1 мм могут занимать от нескольких дней до нескольких недель, причем с использованием специализированной высокопроизводительной вычислительной техники. Следовательно, актуальным направлением является разработка таких вычислительных технологий, которые не требовали бы огромных ресурсов, но при этом были физически содержательными.

Многофазное течение в поровом пространстве часто рассматривают как струйное — флюиды движутся в различных капиллярах (возможно присутствие пленок смачивающей фазы у стенок канала). Однако еще М. Леверетт и М. Маскет приводили принципиально иной вариант движения флюидов в пористой среде, характерный для низких значений насыщенности несмачивающего флюида, — в виде чередующихся капель (четок). Характерной особенностью указанного вида течения является зависимость фильтрационных сопротивлений от диспергирования флюидов — при одних и тех же значениях насыщенности сопротивления могут существенно отличаться. В представленной работе рассматривается именно капельный (четочный) вид течения в пористой среде: в отличие от струйного течения он долгое время оставался недостаточно изученным. Это связано в первую очередь со сложностями, возникающими при попытках гидродинамического моделирования подобного течения аналитическими методами из-за сложной зависимости характеристик течения от свойств флюидов и их взаимодействия с породой [5]. Точные численные расчеты требовали слишком больших временных и вычислительных затрат. Проведение приближенных расчетов тоже было связано с большими сложностями: не было средств для проверки корректности сделанных допущений.

Факт четочного течения подтверждается во многих публикациях с результатами лабораторных исследований. Приведем некоторые примеры. Так, при изучении влияния многомерности системы капилляров на характер течения в стеклянных моделях пористой среды [12] исследователи пришли к выводу, что механизм движения капель во многом определяет течение в поровом пространстве. Процесс формирования капель (предрасположенность к отрыву капель), по наблюдению авторов статьи [12], зависит от обводненности потока и капиллярного числа.

При изучении течения эмульсий в капиллярах с помощью микроскопа А. Т. Ахметов с соавторами [1, 2] наблюдал капельное движение фаз в пористой среде. С уменьшением скорости потока на протяжении всего канала образовывались капли воды, размер которых был сопоставим с величиной диаметра капилляра. Течение приняло вид капельной, чередующейся структуры и перешло в поршневого режим.

Предоставленная экспериментами информация, указывающая на существование капельного течения в поровом пространстве, а также малая изученность подобного движения пластовых флюидов указывают на необходимость в применении и разработке физико-математических моделей, описывающих указанное явление. При этом можно допустить, что конфигурация области течения (капиллярных каналов) имеет форму осесимметричных каналов непостоянного сечения. Важность рассмотрения течения именно в таких каналах можно проиллюстрировать цитатой из статьи Д. Е. Игошина: «Подход на основе периодических структур обладает рядом преимуществ: для определения фильтрационно-емкостных свойств моделируемой среды достаточно, зная геометрию одной характерной поры, описать течение флюида в ней на основе аналитических оценок либо по результатам численного решения системы уравнений гидродинамики. <...> Среди периодических моделей пористых сред особое место занимают модели, образованные осесимметричными каналами и каналами, имеющими вращательную симметрию. Высокая симметрия таких каналов позволяет моделировать динамику капель несмачивающей фазы при прохождении через сужения» [6, с. 169-170].

В рамках представленной работы авторы стремились создать физически содержательную математическую модель, в то же время отличающуюся вычислительной эффективностью, с использованием которой можно было бы изучить механизм движения капель в капиллярах и оценить влияние сил межфазного взаимодействия на характеристики течения в каналах переменного сечения.

В основе представленной модели лежит система уравнений, состоящая из уравнения неразрывности и уравнения Навье — Стокса. Компоненты скорости, направленные не параллельно оси капилляра, считаются пренебрежительно малыми, таким образом, течение в каждом из поровых каналов можно считать одномерным. Данное предположение может быть обосновано спецификой проведения лабораторных потоков исследований: приток и отток флюидов происходит только через торцевые поверхности образца керна — существует выделенное направление движения. Благодаря данному допущению становится возможной запись уравнений с осредненной скоростью (объемный расход жидкости в канале, деленный на площадь поперечного сечения).

В указанной осредненной скорости также учитывается профиль скоростей в поперечном сечении капилляра. Таким образом, отвечающий за вязкость член уравнения импульсов может быть разложен на две составляющие.

В основании представленной модели также лежит выполнение следующих условий:

- осесимметричность непересекающихся капилляров,
- постоянство суммарного расхода флюидов через каждый канал,
- рассмотрение флюидов как несмешиваемых и несжимаемых,
- рассмотрение течения в изотермической постановке при достаточно низких значениях числа Рейнольдса (безынерционность течения).

Перечисленные выше допущения необходимы для создания вычислительно эффективной модели, т. к. без них невозможно было бы обойтись без численного решения уравнений с подробной детализацией каналов (во всех направлениях, в том числе и поперек) для учета нескольких компонент скорости.

Сделанные допущения легли в основу физико-математической модели, которая позволяет вычислять ОФП [3] и определять функцию межфазного взаимодействия [8]. Отметим, что наиболее близкая к рассматриваемой модели постановка представлена в работе [19].

Физико-математическая модель. Результаты тестирования

Изучение возможности численной имитации четочного двухфазного течения в капиллярных каналах на основе разработанной физико-математической модели было проведено путем сравнения результатов расчетов со значениями, полученными аналитически для простейших случаев течения в каналах, и с результатами вычислений, выполненных с использованием программного пакета ANSYS Fluent [10] для более сложных случаев, не имеющих аналитического решения. Прежде чем переходить к описанию результатов тестирования, остановимся коротко на используемых уравнениях. Более подробно выкладки изложены в статье [3].

Исходная система уравнений Навье — Стокса имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}. \quad (2)$$

Для случая квазиодномерного стационарного безынерционного течения система уравнений перезаписывается в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\mu v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \mu v}{\partial r} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (4)$$

Разделение слагаемого $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \mu v}{\partial r} \right)$ в уравнении импульсов может быть проведено с помощью нахождения среднего значения скорости по радиусу капилляра при помощи уравнений, описывающих течение Пуазейля:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) = \frac{8Q}{\pi R^4}, \quad (5)$$

где приняты обозначения: Q — объемный расход жидкости в капилляре; R — радиус капилляра.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \alpha v}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2(vv)}{\partial x^2} + v \frac{8Q}{\pi R^4} - \frac{\partial \left(\frac{p}{\rho^0} \right)}{\partial x} - \frac{\partial p_c / \rho_o^0}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

где приняты обозначения: v — кинематическая вязкость, вычисляемая в соответствии с тем, какой флюид находится на данном участке капилляра; p_c — капиллярное давление; α — объемная доля флюида.

Капиллярная сила в уравнении (7) представлена членом $\frac{\partial p_c / \rho_o^0}{\partial x}$, изменение капиллярного давления в котором записывается через δ -функцию Дирака (традиционно капиллярное давление описывается с помощью функции Хэвисайда — δ -функция является ее производной).

Деформирование капли во время движения флюидов приводит к появлению добавочного перепада давления δp_c (способствующего дальнейшему движению капли в канале или препятствующего ему). Это действие капиллярной силы носит название эффекта Жамена. Численно эффект Жамена для отдельной капли может быть выражен в виде:

$$\delta p_c = 2\sigma \left(\frac{\cos \theta_1}{R_1} - \frac{\cos \theta_2}{R_2} \right), \quad (8)$$

где фигурируют разные краевые углы смачивания θ для отступающего и наступающего менисков, а также учтено изменение радиуса капилляра R .

Уравнение неразрывности (6) в представленной модели используется в первую очередь для отслеживания границы раздела фаз. В данном случае целесообразно, как и в методе объема флюидов (volume of fluid method, или VOF-метод), представлять границу раздела не размытой, а четкой. По этой причине для численного решения уравнения была применена схема, минимизирующая диссипацию решения (для контроля дисперсии в разностную схему была внесена искусственная вязкость).

Наличие четких границ раздела фаз в квазиодномерной постановке также налагает некоторые условия на детальность дискретизации поровых каналов. Размеры ячейки должны быть приблизительно равны размерам менисков, поэтому описание порового пространства априорно задается с высокой детализацией.

При решении уравнения (7) подобных сложностей и ограничений не возникает.

Далее рассмотрим результаты тестирования реализованного численного метода на основе разработанной физико-математической модели четочного течения.

Сопоставление с аналитическими решениями

В работе [18] представлена аналитическая зависимость для перепада давления при движении капли в жидкости в капилляре постоянного сечения:

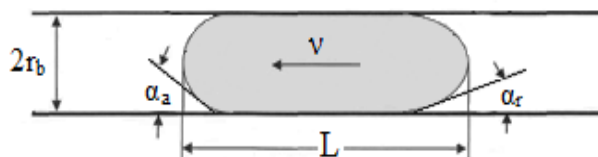


Рис. 1. Схема задачи, представленной в [18]

Fig. 1. Schematic representation of the problem in [18]

$$\Delta p = \frac{2\sigma(\cos \alpha_r - \cos \alpha_a)}{r_b} + \frac{8\mu L v}{r_b^2}. \quad (9)$$

Значения параметров капилляра (рис. 1), а также свойств флюида и скорости течения принимались следующими: $r_b = 10^{-5}$ м; $\mu_b = 1$ мПа · с; $\mu_n = 5$ мПа · с; $L = 7,8 \cdot 10^{-3}$ м; $v = 4,78 \cdot 10^{-5}$ м/с; $\cos \alpha_r = 0,85$; $\cos \alpha_a = 0,65$; $\sigma = 0,06$ Н/м. Значение перепада давления, полученное с использованием аналитической методики: 2 549,7 Па. Результат расчета представленной модели: 2 546,2 Па.

В книге [7] автором рассматривалось движение мениска двух несмешивающихся жидкостей. Аналитически было выведено соотношение, связывающее скорость течения и перепад давления:

$$v = \frac{\Delta p a^2}{8[\mu_b x' + \mu_n (l - x')]} \quad (10)$$

Характеристики канала (рис. 2), флюидов и скорость течения задавались следующими значениями: $a = 10^{-5}$ м; $\mu_b = 1$ мПа · с; $\mu_n = 5$ мПа · с; $x' = 3,3 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 6,9 \cdot 10^{-3}$ м; $v = 4,78 \cdot 10^{-5}$ м/с. Значение перепада давления, полученное с использованием аналитической методики: 77 Па. Результат расчета представленной модели: 76,9 Па.

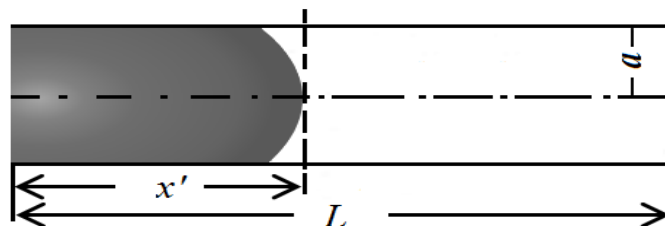


Рис. 2. Схема задачи, представленной в [7]

Fig. 2. Schematic representation of the problem in [7]

Сопоставление с численными решениями в пакете ANSYS Fluent

Рассмотрим двумерный осесимметричный капилляр с синусоидальной формой стенки (рис. 3). Радиус капилляра зависит от координаты, изменяющейся вдоль оси канала:

$$r(x) = \frac{r_{\max} + r_{\min}}{2} + \frac{r_{\min} - r_{\max}}{2} \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right), \quad (11)$$

где приняты обозначения: x — координата вдоль оси капилляра; r_{\min} , r_{\max} — минимальное и максимальное значения радиуса капилляра; L — полупериод косинуса, такой, что весь капилляр можно разделить на две идентичные части, ограниченные с обоих концов сечением наибольшего радиуса.

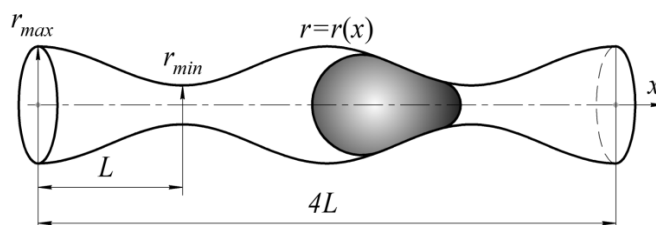


Рис. 3. Форма канала, используемого в расчетах ANSYS Fluent

Fig. 3. Shape of the channel used in ANSYS Fluent calculations

Численное решение уравнений проводилось на сетке с четырехугольными ячейками со сгущением вблизи границы для более точного моделирования смачивающей пленки. Моделирование движения двух несмешивающихся жидкостей осуществлялось с помощью метода жидкости в ячейках (VOF-метод) [16].

Для отслеживания межфазной границы, двигающейся по направлению движения потока, решается уравнение переноса объемной доли флюида в ячейке расчетного домена и используется схема Geo-Reconstruct [20] для ее последующей реконструкции. Скорость и давление были связаны с помощью алгоритма SIMPLE, для проведения интерполяции давления использовалась схема Body Force Weighted, при аппроксимации конвективных членов уравнений импульса применялась схема QUICK [17].

Расчеты проводились для следующих значений параметров геометрии канала: $r_{\min} = 5$ мкм, $r_{\max} = 10$ мкм, $L = 80$ мкм. Свойства жидкостей для воды и нефти приняты равными следующим значениям соответственно: плотность $\rho_{\text{water}} = 998$ кг/м³ и $\rho_{\text{oil}} = 830$ кг/м³; динамический коэффициент вязкости $\mu_{\text{water}} = 1$ мПа · с, $\mu_{\text{oil}} = 5$ мПа · с; коэффициент поверхностного натяжения на границе «вода — нефть» $\sigma = 0,025$ Н/м. Из-за наличия смачивающей пленки у стенок капилляра угол смачивания в расчетах с использованием ANSYS Fluent принимался равным нулю.

В представленной в работе модели нет смачивающей пленки, поэтому углы смачивания задаются теми же, что и в остальных расчетах. На стенке капилляра задавалось граничное условие прилипания. На границе вход/выход ставилось периодическое граничное условие. В начальный момент времени задавалось процентное содержание нефти, равное 25, 50, 75% от объема капилляра $V = 5,967 \cdot 10^{-14}$ м³. В программном продукте ANSYS Fluent отсутствует возмож-

ность задания течения с постоянным расходом через канал — вместо этого задавался постоянный перепад давления между входным и выходным сечениями капиллярного канала, при котором капля нефти начинала движение слева направо. Перепад давления подбирался таким образом, чтобы капля не застревала в сужениях.

На рис. 4 представлены зависимости массового расхода жидкости (смеси нефти и воды) при разных значениях доли воды в потоке (обводненности). Видно, что зависимость массового расхода от времени носит периодический характер при условии, что на границах расчетной области задается постоянный перепад давления. Это объясняется капиллярными эффектами, замедляющими и ускоряющими каплю жидкости в соответствии с изменениями формы канала.

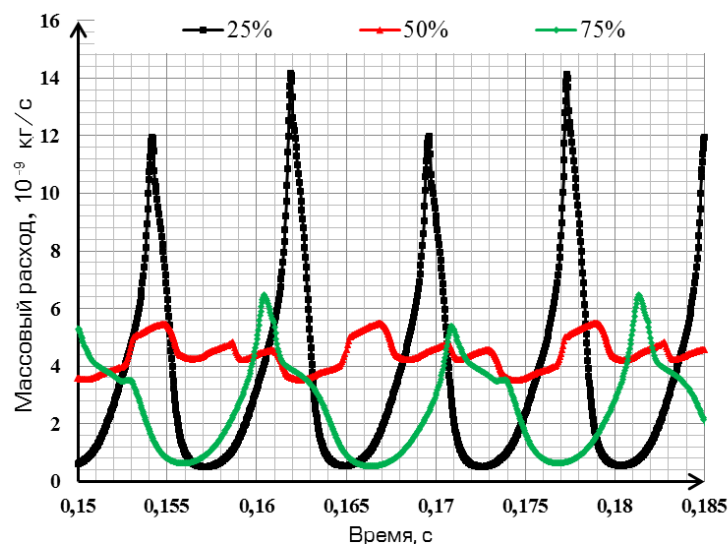


Рис. 4. Зависимость массового расхода от времени при разных значениях обводненности. Результаты расчетов ANSYS Fluent

Fig. 4. Mass flow rate vs time for various water fractions in the flow. Data evaluated with use of ANSYS Fluent

Данные проведенного расчета позволяли вычислить средний объемный расход жидкости (осреднение проводилось за один период из расчета: суммарный объем нефти и воды, разделенный на величину периода), который в дальнейшем задавался в качестве исходных данных для представленной в работе модели.

Таким образом, значение расхода жидкости через капилляр в представленной модели поддерживалось постоянным и равным найденному среднему с помощью изменения перепада давления на концах капиллярного канала (рис. 5).

То, что подобное поведение характеристик течения связано с капиллярными эффектами, явно следует из сравнения расчетов для случая 50% нефти в потоке с результатами для 25 или 75%. И в расчетах с использованием пакета ANSYS Fluent, и в данных, полученных с помощью представленной модели, колебания

параметров для течения с 50% нефти практически отсутствуют (особенно по сравнению с другими вариантами расчета). Это связано с тем, что вся нефть в потоке представлена единой каплей. Влияние капиллярных эффектов для капли таких размеров значительно ослабляется. Здесь нет противоречия с представленными ранее данными, согласно которым функция межфазного взаимодействия достигает максимума в интервале насыщенностей, близких к значению 50%.

Действительно, в расчетах зависимости функции межфазного взаимодействия от капиллярного числа и значений вязкости вычисления проводились для кластера капиллярных каналов, в каждом из которых было свое распределение капель флюидов — размеры капель в большинстве случаев были значительно меньше 50% объема канала. Таким образом, представленные моделируемые ситуации оказываются принципиально разными.

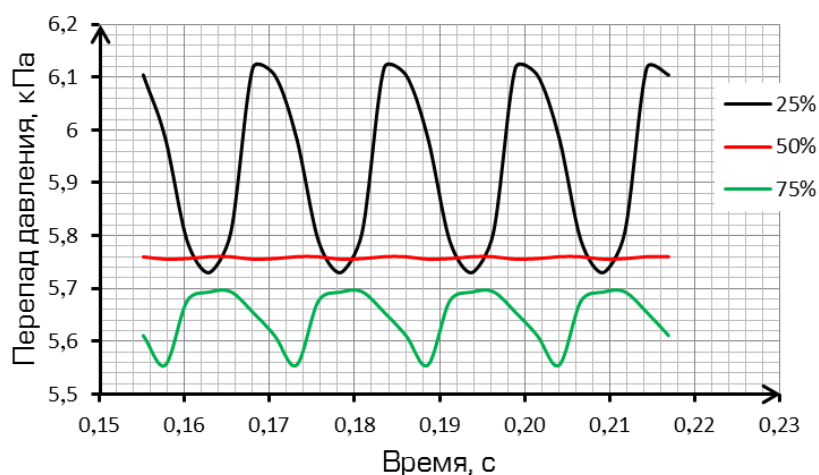


Рис. 5. Зависимость перепада давления от времени. Результаты представленной модели

Fig. 5. Pressure drop vs time acquired with the presented model results

Кажется возможным возражение: при доле нефти в потоке 75% размеры капли еще больше, однако в данном случае каплей корректнее считать водную фазу. Действительно, на графиках для случая минимального перепада давления отчетливо видно, что максимальные сопротивления течению для объемной доли нефти 25% совпадают с минимальными сопротивлениями для доли нефти 75% (рис. 5). Капля смачивающей фазы испытывает противоположное воздействие тому, какое испытывает капля несмачивающей фазы в том же положении в капилляре, — это следует из эффекта Жамена. Соответственно, для существования поршнеобразного характера течения необходима не определенная доля смачивающей или несмачивающей фазы, а дисперсность среды. Результаты сравнения приведены в таблицах 1-4.

Таблица 1

Сравнение результатов расчетов для 25% нефти в потоке

Table 1

Comparison of evaluated values for 25% of oil in the flow

Расчет с использованием ANSYS Fluent		Расчет с использованием предложенной методики
Заданный перепад давления, кПа	Средний вычисленный массовый расход смеси, 10^{-9} кг/с	Средний вычисленный перепад давления, кПа
5,5	3,61	5,92
8	8,74	8,49
12	15,61	13,31
18	22,02	18,74

Таблица 2

Сравнение результатов расчетов для 50% нефти в потоке

Table 2

Comparison of evaluated values for 50% of oil in the flow

Расчет с использованием ANSYS Fluent		Расчет с использованием предложенной методики
Заданный перепад давления, кПа	Средний вычисленный массовый расход смеси, 10^{-9} кг/с	Средний вычисленный перепад давления, кПа
5,5	4,41	5,76
8	6,99	8,82
12	10,66	14,09

Таблица 3

Сравнение результатов расчетов для 75% нефти в потоке

Table 3

Comparison of evaluated values for 75% of oil in the flow

Расчет с использованием ANSYS Fluent		Расчет с использованием предложенной методики
Заданный перепад давления, кПа	Средний вычисленный массовый расход смеси, 10^{-9} кг/с	Средний вычисленный перепад давления, кПа
5,5	2,42	5,65
8	4,41	9,12
12	7,53	14,18
18	11,83	21,51

Таблица 4

**Относительная погрешность
расчетных данных представленной
модели для разных вариантов
течения**

Table 4

**Relative deviations of the evaluated
data for various flow regimes**

Доля нефти в потоке, %	Перепад давления, кПа	Относительная ошибка, %
25	5,92	7,68
	8,49	6,15
	13,31	10,92
	18,74	4,10
50	5,76	4,69
	8,82	10,27
	14,09	17,38
	—	—
75	5,65	2,68
	9,12	13,99
	14,18	18,19
	21,51	19,51

Наилучшее соответствие результатов наблюдается для случая перепада давления 5,5 кПа для любой доли нефти в потоке (рис. 6). Необходимо отметить, что рост доли нефти и перепада давления ухудшает сходимость результатов. Это связано со сменой режима течения при низких значениях капиллярного числа (что соответствует малому перепаду давления в канале, т. е. меньшим скоростям течения, меньшему влиянию вязкости на характеристики потока) на так называемый ползучий режим течения. Для него характерно влияние капиллярных эффектов на течение. Для высоких скоростей течения со значительной долей нефти в потоке определяющую роль играют вязкостные силы.

Влияние капиллярных сил отчетливо проявляется в результатах расчетов для доли нефти в потоке, равной 25 и 50%, при перепадах давления 5,5 и 8 кПа. Из-за разных размеров капель капиллярные силы значительно различаются, поэтому при малом перепаде давления (5,5 кПа) смесь с 50% нефти движется быстрее, чем смесь с 25%. С ростом скоростей (перепад давления 8 кПа) влияние вязкостных сил также возрастает, что приводит к тому, что смесь с 25% нефти начинает двигаться быстрее 50%-й смеси. Этот эффект можно наблюдать и в расчетах с использованием представленной модели (разработанный алгоритм даже незначительно преувеличивает его).

Лучшая сходимость результатов наблюдается для случая 25% нефти в потоке. Вязкость нефти в рассматриваемом случае в пять раз превышает вязкость воды. Чем больше значение вязкости смеси, тем больше капиллярное число, следовательно, и влияние вязкостных сил. По этой же причине худшая сходимость результатов проявляется в случае 75% нефти в потоке.

При этом необходимо отметить, что, согласно работам [11-15], результаты расчетов, полученные с использованием пакета ANSYS Fluent, достоверно совпадают с экспериментом. Таким образом, в расчетах Максимова была продемонстрирована важность задач определения влияния капиллярных эффектов и сил межфазного взаимодействия на течение флюидов.

Несмотря на меньшую точность определения характеристик течения, представленная модель выгодно отличается от ANSYS Fluent временем расчета. Вычисления для приведенных задач с использованием пакета ANSYS Fluent занимают обычно пару суток, в некоторых случаях до полутора недель. Представленной модели понадобилось меньше пяти минут для расчета течения в капилляре.



Рис. 6. Сравнение результатов расчетов с использованием ANSYS Fluent и представленной модели

Примечания: ■ ● — значения для 25% нефти в потоке, вычисленные ANSYS Fluent и предлагаемым алгоритмом соответственно; ■ ● — значения для 50% нефти в потоке, вычисленные ANSYS Fluent и предлагаемым алгоритмом соответственно; ■ ● — значения для 75% нефти в потоке, вычисленные ANSYS Fluent и предлагаемым алгоритмом соответственно.

Fig. 6. Comparison of the calculated values acquired with ANSYS Fluent and the presented model

Notes: ■ ● — the values for 25% oil in the flow, calculated by ANSYS Fluent and the proposed algorithms, respectively; ■ ● — the values for 50% oil in the flow, calculated by ANSYS Fluent and the proposed algorithms, respectively; ■ ● — the values for 75% oil in the flow, calculated by ANSYS Fluent and the proposed algorithms, respectively.

Заключение

Сравнение работы модели с точными аналитическими расчетами и с работой программного пакета ANSYS Fluent показало, что в случаях ползучего течения (низкие капиллярные числа, низкая скорость потока) сходимость результатов превышает ожидаемую. С ростом скорости влияние капиллярных эффектов уменьшается, допущение о преимущественной направленности течения перестает быть правомерным, что приводит к росту отклонения результатов.

При такой сходимости вычислений представленная модель требует в сотни раз меньше времени на проведение расчета, что приводит к значительному увеличению эффективности исследований.

Расчеты, сделанные с использованием разработанной модели, позволяют изучать и определять зависимости характеристик течения от различных параметров, описывающих свойства системы «флюиды — капилляры» (например, от значения капиллярного числа).

Также в работе были продемонстрированы ограничения, недостатки и, что самое важное, преимущества упрощенных численных моделей течения в пористых средах. Результаты, полученные с помощью представленной методики и через модель, предложенную в работе, можно использовать в новых, более сложных алгоритмах, учитывающих сложную топологию порового пространства и особенности четочного течения капель в капиллярах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметов А. Т. Особенности течения дисперсии из микрокапель воды в микроканалах / А. Т. Ахметов, С. П. Саметов // Письма в журнал технической физики. 2010. Том 36. Выпуск 22. С. 21-28.
2. Ахметов А. Т. Проблемы моделирования течения инвертных водонефтяных дисперсий в капиллярах / А. Т. Ахметов, В. В. Мавлетов, В. В. Глухов // Материалы XVII сессии Международной школы по моделям механики сплошной среды. Казань: Изд-во Казанского математического общества, 2004. Том 27. С. 30-41.
3. Бембель Г. С. Математическое моделирование четочного двухфазного течения в системе капиллярных каналов / Г. С. Бембель, С. В. Степанов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2015. № 6. С. 30-38.
4. Демьянов А. Ю. Основы метода функционала плотности в гидродинамике / А. Ю. Демьянов, О. Ю. Динариев, Н. В. Евсеев. М.: Физматлит, 2009.
5. Добрынин В. М. Фазовые проницаемости коллекторов нефти и газа / В. М. Добрынин, А. Г. Ковалев и др. М.: ВНИИОЭНГ, 1988. 55 с.
6. Игошин Д. Е. Течение двухфазной жидкости в модельной пористой среде, образованной осесимметричными каналами переменного сечения / Д. Е. Игошин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 4. С. 169-180. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-169-180

7. Котяхов Ф. И. Физика нефтяных и газовых коллекторов / Ф. И. Котяхов. М.: Недра, 1977. 287 с.
8. Степанов С. В. Вычислительная технология для определения функции межфазного взаимодействия на основе моделирования течения в капиллярном кластере / С. В. Степанов, А. Б. Шабаров, Г. С. Бембель // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 1. С. 63-71. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-63-71
9. Шабаров А. Б. Методы определения функций относительной фазовой проницаемости в задачах многофазной фильтрации / А. Б. Шабаров, А. В. Шаталов, П. В. Марков, Н. В. Шаталова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 1. С. 79-109. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-1-79-109
10. ANSYS Fluent Theory Guide // ANSYS Inc. 2013. URL: <http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/martoran/NotasModelosGrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>
11. Asadolahi A. N. CFD approaches for the simulation of hydrodynamics and heat transfer in Taylor flow / A. N. Asadolahi, R. Gupta, D. F. Fletcher, B. S. Haynes // Chemical Engineering Science. Vol. 66. № 22. Pp. 5575-5584. DOI: 10.1016/j.ces.2011.07.047
12. Avraam D. G. Steady-state two-phase flow through planar and nonplanar model porous media / D. G. Avraam, G. B. Kolonis, T. C. Roumeliotis, G. N. Constantinides, A. C. Payatakes // Transport in Porous Media. 1994. Vol. 16. № 1. Pp. 75-101. DOI: 10.1007/BF01059777
13. Gupta R. CFD modelling of flow and heat transfer in the Taylor flow regime / R. Gupta, D. F. Fletcher, B. S. Haynes // Chemical Engineering Science. Vol. 65. № 6. Pp. 2094-2107. DOI: 10.1016/j.ces.2009.12.008
14. Gupta R. Hydrodynamics of liquid-liquid Taylor flow in microchannels / R. Gupta, S. S. Y. Leung, R. Manica, D. F. Fletcher, B. S. Haynes // Chemical Engineering Science. Vol. 92. Pp. 180-189. DOI: 10.1016/j.ces.2013.01.013
15. Gupta R. On the CFD modelling of Taylor flow in microchannels / R. Gupta, D. F. Fletcher, B. S. Haynes // Chemical Engineering Science. Vol. 64. № 12. Pp. 2941-2950. DOI: 10.1016/j.ces.2009.03.018
16. Hirt C. W. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries / C. W. Hirt, B. D. Nichols // Journal of Computational Physics. 1981. Vol. 39. № 1. Pp. 201-225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5
17. Leonard B. P. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation / B. P. Leonard // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1979. Vol. 19. № 1. Pp. 59-98. DOI: 10.1016/0045-7825(79)90034-3
18. Ma Y. D. Motion effect on the dynamic contact angles in a capillary tube / Y. D. Ma // Microfluidics and Nanofluidics. 2012. Vol. 12. № 1-4. Pp. 671-675. DOI: 10.1007/s10404-011-0894-2
19. Mo F. Pore-scale analysis of flow resistance in tight sandstones and its relationship with permeability jail / F. Mo, Z. Du, X. Peng, Y. Tang, H. Sun // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 44. Pp. 314-327. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.04.024
20. Youngs D. L. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion / D. L. Youngs // Numerical Methods for Fluid Dynamics / ed. by K. W. Morton, M. J. Baines. New York: Academic Press, 1985. Pp. 273-285.

Sergei V. STEPANOV¹
Georgii S. BEMBEL²
Aleksei Yu. MAKSIMOV³

UDC 662.5

**APPLICABILITY ANALYSIS OF A SIMPLIFIED NUMERICAL MODEL
OF WATER AND OIL SLUG FLOW THROUGH CAPILLARY TUBES
OF NON-UNIFORM CROSS-SECTION AREA**

¹ Dr. Sci. (Tech.), Senior Expert,
Tyumen Petroleum Research Center;
Professor, Applied Physics Department,
University of Tyumen
svstepanov@tnc.rosneft.ru

² Lead Specialist, Tyumen Petroleum Research Center
gsbembel@rosneft.ru

³ Lead Engineer, CompMechLab® LLC,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
maksimov@compmechlab.ru

Abstract

In field development, the hydrodynamic simulation sufficiency and correctness of the relative permeability functions are a common concern, which is partly due to the limited amount of experimental data. Alternative (numerical estimation) methods of acquiring relative permeability curves are being developed to overcome these obstacles. The foundation of these methods is the understanding of the inner mechanics of multiphase flow through porous media. The authors study the perspective of simplified modeling of two-phase flow in capillary channels as a basis for the development of an effective and phenomena-oriented method for calculating the relative permeabilities, as well as to analyze the area of applicability of the proposed algorithm and validate the assumptions necessary for the model's correctness.

Citation: Stepanov S. V., Bembel G. S., Maksimov A. Yu. 2019. "Applicability analysis of a simplified numerical model of water and oil slug flow through capillary tubes of non-uniform cross-section area". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 2, pp. 71-88.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-71-88

To evaluate the correctness of the data calculated with the proposed method, the authors compared analytical solutions for simple cases and the numerical simulation results with the data acquired with ANSYS Fluent for more complicated cases, which could not be solved analytically.

Keywords

Relative permeabilities, two-phase flow of oil and water, train flow, wettability, porous media, capillary channel.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-71-88

REFERENCES

1. Akhmetov A. T., Sametov S. P. 2010. "Characteristics of dispersion flow of micro ganglia in micro channels". *Pisma v JTF*, vol. 36, no 22, pp. 21-28. [In Russian]
2. Akhmetov A. T., Mavletov V. V., Glukhov V. V. 2004. "Problems with modeling of flow of inverse water-oil dispersions in capillary tubes". *Proceedings of the 17th International School of Continuum Mechanics Models*, vol. 27, pp. 30-41. Kazan: Izdatelstvo Kazanskogo matematicheskogo obshchestva. [In Russian]
3. Bembel G. S., Stepanov S. V. 2015. "Mathematical modeling of ganglion two phase flow in the system of capillary canals". *Avtomatizatsiia, telemekhanizatsiia i sviaz' v neftianoi promyshlennosti*, no 6, pp. 30-38. [In Russian]
4. Demianov A. Yu., Dinariev O. Yu., Evseev N. V. 2009. *Basics of the Density Functional Theory in Hydrodynamics*. Moscow: Nauka. [In Russian]
5. Dobrynin V. M. Kovalev A. G. et al. 1988. *Phase permeabilities of oil and gas reservoirs*. Moscow: VNIIOENG. [In Russian]
6. Igoshin D. E. 2018. "Two-phase fluid flow in a model porous medium formed by axisymmetric channels of variable cross section". *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 4, no 4, pp. 169-180. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-169-180 [In Russian]
7. Kotiahov F. I. 1977. *Physics of Oil and Gas Reservoirs*. Moscow: Nedra [In Russian]
8. Stepanov S. V., Shabarov A. B., Bembel G. S. 2016. "Computer technology for determination of interphase interaction function based on flow simulation in capillary cluster". *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 2, no 1, pp. 63-71. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-63-71 [In Russian]
9. Shabarov A. B., Shatalov A. V., Markov P. V., Shatalova N. V. 2018. "Relative permeability calculation methods in multiphase filtration problems". *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 4, no 1, pp. 79-109. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-1-79-109 [In Russian]
10. ANSYS Inc. 2013. *ANSYS Fluent Theory Guide*. <http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/martoran/NotasModelosGrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>
11. Asadolahi A. N., Gupta R., Fletcher D. F., Haynes B. S. 2011. "CFD approaches for the simulation of hydrodynamics and heat transfer in Taylor flow". *Chemical Engineering Science*, vol. 66, no 22, pp. 5575-5584. DOI: 10.1016/j.ces.2011.07.047

12. Avraam D. G., Kolonis G. B., Roumeliotis T. C., Constantinides G. N., Payatakes A. C. 1994. "Steady-state two-phase flow through planar and nonplanar model porous media". *Transport in Porous media*, vol. 16, no 1, pp. 75-101. DOI: 10.1007/BF01059777
13. Gupta R., Fletcher D. F., Haynes B. S. 2010. "CFD modelling of flow and heat transfer in the Taylor flow regime". *Chemical Engineering Science*, vol. 65, no 6, pp. 2094-2107. DOI: 10.1016/j.ces.2009.12.008
14. Gupta R., Leung S. S. Y., Manica R., Fletcher D. F., Haynes B. S. 2013. "Hydrodynamics of liquid-liquid Taylor flow in microchannels". *Chemical Engineering Science*, vol. 92, pp. 180-189. DOI: 10.1016/j.ces.2013.01.013
15. Gupta R., Fletcher D. F., Haynes B. S. 2009. "On the CFD modelling of Taylor flow in microchannels". *Chemical Engineering Science*, vol. 64, no 12, pp. 2941-2950. DOI: 10.1016/j.ces.2009.03.018
16. Hirt C. W., Nichols B. D. 1981. "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries". *Journal of Computational Physics*, vol. 39, no 1, pp. 201-225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5
17. Leonard B. P. 1979. "A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 19, no 1, pp. 59-98. DOI: 10.1016/0045-7825(79)90034-3
18. Ma Y. D. 2012. "Motion effect on the dynamic contact angles in a capillary tube". *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 12, no 1-4, pp. 671-675. DOI: 10.1007/s10404-011-0894-2
19. Mo F., Du Z., Peng X., Tang Y., Sun H. 2017. "Pore-scale analysis of flow resistance in tight sandstones and its relationship with permeability jail". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 44, pp. 314-327. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.04.024
20. Youngs D. L. 1985. "Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion". In: Morton K. W., Baines M. J. (eds.). *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, pp. 273-285. New York: Academic Press.