

15 - Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы. Инженерная механика

Асылкаев Артур Марселевич, 3 курс
Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, физический
Исследования ударно-волнового сжатия с использованием синхротронного излучения
Константин Алексеевич Тен, к.ф.-м.н.
e-mail: a.asylkaev@gsu.ru стр. 204

Афанасьев Михаил Олегович, 4 курс
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, Институт авиационных технологий и материалов
Изучение механизма адсорбции и структуры микроэмульсии
Замула Юрий Сергеевич
e-mail: afaninho5@mail.ru стр. 205

Аюпов Артур Русланович, 4 курс
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт
Экспериментальное исследование вынужденной конвекции эмульсионной системы в канале прямоугольного сечения
Мусин Айрат Ахматович, к.ф.-м.н.
e-mail: aupov195@gmail.com стр. 206

Булатова Айгузель Загировна, магистрант 2 года обучения
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт
Численное изучение течений вязкой жидкости в микроканалах с тупиковыми порами
Солнышкина Ольга Александровна, к.ф.-м.н.
e-mail: bulatova29@yandex.ru стр. 207

Валиуллина Вилен Ильшатовна, аспирант 2 года обучения
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технологический институт
Экспериментальное исследование и математическое моделирование течения суспензий в прямоугольном канале
Ковалева Лиана Ароновна, д.т.н.
e-mail: vilenches@gmail.com стр. 208

Галеев Рушан Ринатович, магистрант 1 года обучения
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт
Экспериментальное изучение динамики капель воды в эмульсии под действием неоднородного электрического поля при гидродинамическом потоке
e-mail: galeevr93@gmail.com стр. 210

Гарифуллин Искандар Шамилович, магистрант 1 года обучения
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт
Разработка микрофлюидной платформы для изучения мобилизации остаточной нефти
Батыршин Эдуард Сафаргалиевич, к.ф.-м.н.
e-mail: is@bgutmo.ru стр. 211

Карачурин Артур Ибрагимович, 4 курс
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт
Влияние осаждения механической примеси на поток флюидов в стволе скважины
Закиров Марат Финатович, к.т.н.
e-mail: karachurin95@bk.ru стр. 212

Каримова Гульназ Римовна, 3 курс
Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра РАН
Отражение и преломление косой волны на границе раздела «вода-песок, насыщенный водой или газогидратом»
Галиакбарова Эмилия Вильевна, д.ф.-м.н.
e-mail: gulnazkar69@gmail.com стр. 213

Мамаева Зилия Зайтовна, 4 курс
Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра РАН
Диагностика коллекторских характеристик призабойной зоны скважины по динамике собственных колебаний столба жидкости в НКТ
Башмаков Рустэм Абдрауфович, к.ф.-м.н.
e-mail: zilia16@mail.ru стр. 214

Мухарямова Гульшат Ильдаровна, молодой ученый
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, Физико-технический институт
Электромагнитное воздействие как один из методов улучшения реологических свойств нефтей
Ковалева Лиана Ароновна, д.т.н.
e-mail: gulshat-karimova-1993@mail.ru стр. 215

Мухутдинова Айгуль Айратовна, инженер-исследователь
Уфа, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН
Численное исследование течения вязких жидкостей в каналах кольцевого типа
Урманчеев Саид Федорович, д.ф.-м.н.
e-mail: muhutdinova18@gmail.com стр. 216

Сафиуллин Аскар Русланович, 4 курс
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, информатики и робототехники
Исследование характеристик акустической волны в зависимости от параметров среды
Галимзянов Марат Назипович, к.ф.-м.н.
e-mail: safiullinak@mail.ru стр. 217

Фазлетдинов Спартак Уралович, магистрант 1 года обучения
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт
Численное моделирование заземления нефти в поросетевых микромоделях
Питюк Юлия Айратовна, к.ф.-м.н.
e-mail: spartak.fazlet@gmail.com стр. 219

Фарвазов Ленар Эрикович, 4 курс
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт
Экспериментальное исследование фильтрации различных нефтей в модели пористой среды
Зиннатуллин Расул Рашитович, к.т.н.
e-mail: farvazovlenar@gmail.com стр. 220

Фаткуллина Назгуль Байтулловна, магистрант 2 года обучения
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт
Численное изучение особенностей течения жидкости в микромоделю пористой среды
Солнышкина Ольга Александровна, к.ф.-м.н.
e-mail: nazgulbay@mail.ru стр. 222

Фаттахов Салават Радикович, 4 курс
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, информатики и робототехники
Исследование динамики волн давления в канале с пузырьковым кластером
Галимзянов Марат Назипович, к.ф.-м.н.
e-mail: salavat232001232001@mail.ru стр. 223

Фатхуллин Артур Ильсурович, магистрант 1 года обучения
Челябинск, Челябинский государственный университет, физический
Сравнение методов расчета движения твердого тела
Замоздра С. Н., к.ф.-м.н.
e-mail: trickster.arthurr@gmail.com стр. 224

Фахретдинова Алсу Леонидовна, 4 курс
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт
Моделирование движения деформируемых частиц в областях с детерминированным боковым смещением
Солнышкина Ольга Александровна, к.ф.-м.н.
e-mail: A.L.Fakhretdinova@yandex.ru стр. 226

Юсупова Рушана Усмановна, 3 курс
Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра РАН
Динамика волн давления в жидкости, содержащей пузырьковую зону полусферической формы
Галимзянов Марат Назипович, к.ф.-м.н.
e-mail: rabota_ru333@mail.ru стр. 227

Исследования ударно-волнового сжатия с использованием синхротронного излучения

Асылкаев Артур Марселевич

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Константин Алексеевич Тен, к.ф.-м.н.

a.asylkaev@ngsu.ru

Для получения больших параметров вещества в экстремальных условиях (при высоких давлениях и температурах) часто используется ударно-волновое сжатие с использованием взрывчатых веществ (ВВ). В таких условиях требуется проведение измерений за очень короткий промежуток времени (доли микросекунд).

В данной работе определение параметров вещества при ударном нагружении основано на измерении проходящего синхротронного излучения (СИ) от ускорителя на встречных электрон-позитронных пучках (ВЭПП-4). Когда излучение проходит через объект исследования, часть излучения поглощается самим объектом. Прошедшее излучение несет информацию о распределении массы сжатого вещества объекта. Ударное сжатие вещества проводилось взрывом цилиндрических зарядов на основе ВВ ТАТБ (Триаминотринитробензол) диаметром 40 мм.

СИ возникает при движении электронов с ускорением по орбите накопительного кольца синхротрона. СИ может быть как вредным, так как оно приводит к потере энергии пучка, так и полезным, так как оно дает возможность использовать СИ для исследования внутренней структуры вещества [1]. Увеличить интенсивность СИ можно путем использования специальных устройств, в которых увеличивается локальная индукция магнитного поля. Основным типом таких устройств является вигглеры (змейки).

В настоящий момент на накопительном кольце ускорителя ВЭПП-4 стоит девяти-полюсный вигглер с магнитной индукцией 2 Тл. Благодаря удивительным свойствам СИ стало возможным осуществлять измерения в быстропротекающих (в том числе взрывных) процессах с малыми экспозициями (менее 1 нс). Время между импульсами СИ определяется размерами ускорителя и числом банчей (сгустков электронов), и на ВЭПП-4 составляет 200-1200 нс.

Для изучения динамических экспериментов с использованием СИ необходим детектор, позволяющий измерять проходящее излучение за время, которое меньше, чем интервал между соседними импульсами СИ [2]. В наших опытах для регистрации проходящего излучения используется рентгеновский детектор DIMEX. Он представляет из себя ионизационную камеру (с рабочим газом – ксенон) с электронным усилителем, отделяющим область конверсии рентгеновских фотонов от промежутка, в котором заряд собирается на считывающую полосковую структуру.

В процессе ударного волнового сжатия и последующей разгрузки меняется плотность вещества вдоль СИ, а значит, меняется и спектр поглощения. Чтобы вычислить массу сжатого вещества (в нашем случае пенопласта), была проведена калибровка поглощения детектора DIMEX. Для этого ставилась масса того же вещества перед детектором, все каналы DIMEX при этом калибровались одновременно. Интенсивность, которую детектор зарегистрировал перед проведением эксперимента, можно записать как

$I_{before} = I_0 \exp(-\alpha_1 m_0 + \alpha_2 m_0^2)$, где I_0 – начальный поток СИ, m_0 – начальная масса (до ударного сжатия) вещества вдоль луча СИ, α_1 , α_2 – интерполированные коэффициенты поглощения. Аналогично можно записать

$\ln \frac{I_{exp}}{I_{before}} = g = -\alpha_1 (m_x - m_0) + \alpha_2 (m_x - m_0)^2$, где m_x – масса вещества вдоль луча. Откуда можно получить квадратное уравнение для $\frac{m_x}{m_0}$.

Массив масс m_x , вычисленных для каждого канала детектора, составляет распределение массы пенопласта за фронтом ударной волны.

В эксперименте с помощью данной методики было измерено относительное изменение интенсивности вдоль оси пенопласта после сжатия сильной ударной волны (Рис. 1). Благодаря калибровке можно восстановить массу сжатого вещества вдоль СИ. Предложенный метод позволяет сквозным образом получить динамику плотности вещества после сильного ударного сжатия, то есть получить уравнение состояния вещества, с помощью которого можно проводить компьютерное моделирование.

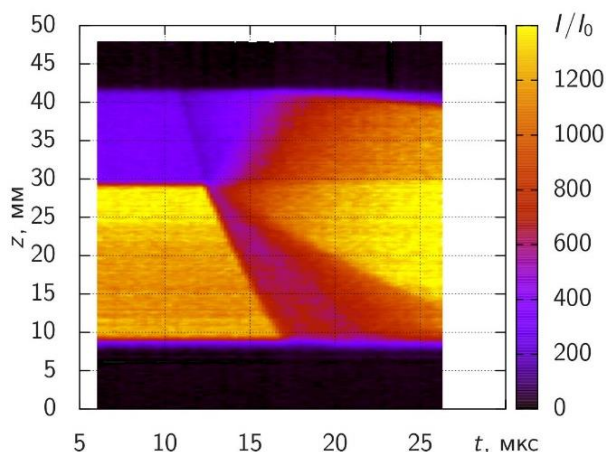


рис.1. Распределение интенсивности при ударном сжатии пенопласта

Список публикаций:

- [1] Серый А., Серая Е. Изобретая инструменты науки будущего. Ускоряющая наука ТРИЗ //М.: Едиториал УРСС. – 2016. – С. 45.
- [2] Титов В. М., Тен К. А., Прууэл Э. Р., Толочко Б. П., Лукьянчиков Л. А., Мерзиевский Л. А., Жуланов В. В., Шехтман Л. И. Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов //Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47. – №. 6. – С. 6.

Изучение механизма адсорбции и структуры микроэмульсии

Афанасьев Михаил Олегович

Замула Юрий Сергеевич, Батыриин Эдуард Сафаргалиевич, Питюк Юлия Айратовна

Уфимский университет науки и технологий

Замула Юрий Сергеевич

afaninho5@mail.ru

Микроэмульсии (МЭ) – это термодинамически устойчивые микрогетерогенные системы, образованные несмешивающимися жидкостями в присутствии мицеллообразующих ПАВ [1]. Микроэмульсии нашли широкое распространение в пищевой и нефтегазовой промышленности, фармацевтике, синтезе наночастиц и др. [2]. В некоторых случаях необходимо присутствие дополнительного ПАВ (соПАВ) для образования микроэмульсии. Характерный размер капель в таких системах составляет 10-100 нм. Микроэмульсии оптически прозрачные или слабо опалесцирующие жидкости.

В данной работе для приготовления микроэмульсии были использованы анионный ПАВ – додецилсульфат натрия и соПАВ – н-бутанол. В качестве масляной фазы использовался н-гептан. Водная фаза представляла собой 4% (по массе) водный раствор NaCl [3]. Эксперименты проводились при комнатной температуре 25⁰ С.

Практическая часть состояла в следующем: Очистка поверхности происходила путем расщепления слюды с помощью липкой ленты (скотча), при этом образовывалась поверхность, имеющая отрицательный заряд высокой плотности. Далее на свежеччищенную пластинку слюды наносилась МЭ с помощью дозатора. После адсорбции на поверхность слюды в течение 1 минуты образец промывался водой Milli-Q, остатки воды выдувались сжатым воздухом и высушивались при 105⁰С в течение 20 минут.

Эксперименты по изучению структуры МЭ проводились на АСМ Agilent 5500AFM в полуконтактном режиме кантилевером NSG30 (TipsNano), радиус кривизны острия <10 нм. Размер скана 5×5 мкм с разрешением 256×256 точек.

Для подтверждения адсорбции микроэмульсии предварительно были получены следующие топографии поверхностей подложек слюды: подложки слюды после очистки с помощью скотча; после ополаскивания деионизированной водой; после нанесения и смывки раствора ПАВ/соПАВ в воде. При этом изменений в топографии поверхности не наблюдалось.

Результаты сканирования поверхности слюды после нанесения микроэмульсии с различным процентным содержанием компонентов при постоянном процентном содержании ПАВ/соПАВ представлены на рис.1.

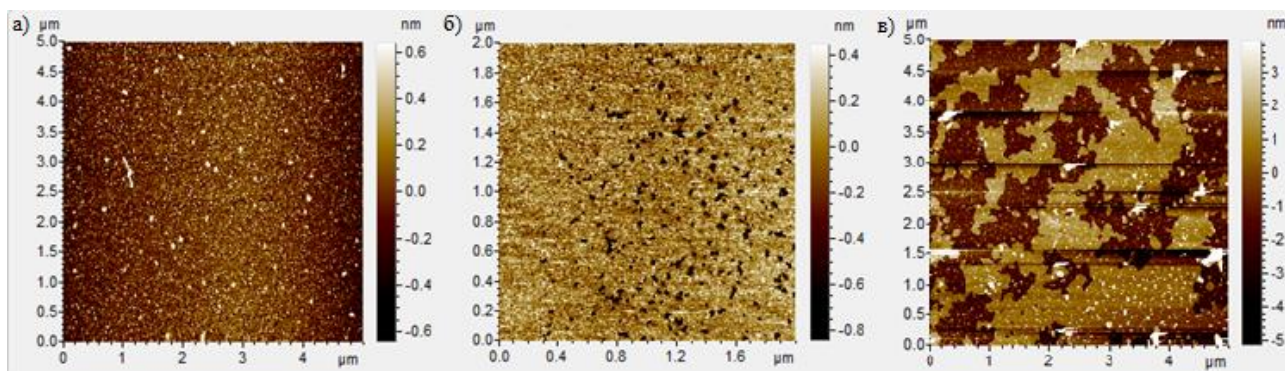


рис.1 АСМ топографии поверхности слюды после взаимодействия с МЭ с одинаковым процентным содержанием ПАВ. ПАВ+соПАВ/гептан/раствор: а) 57,33/4,76/37,90; б) 57,33/19,05/23,62; в) 57,33/26,19/16,48

На полученных топографиях поверхностей можно наблюдать качественные различия в структуре. В зависимости от состава микроэмульсии могут наблюдаться следующие характерные картины: локализованные углубления, отдельные частицы, а также сложные структуры с развитой морфологией. В дальнейшем планируется изучение реологических характеристик микроэмульсий, изучение структуры адсорбционного слоя при добавлении наночастиц в микроэмульсии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта No 21-79-10212.

Список публикаций:

- [1] Миттел К. Л., Мукерджи П., Принс Л. М. и др // Мицеллообразование, солюбилизация и микроэмульсии / Ред. К. Миттел. - М. : Мир, 1980. - 597 с.
 [2] Holmberg K. et al. // Polymers in aqueous solution. – New York : Wiley-Blackwell, 2002.
 [3] Bellocoq A. M. et al. Three—dimensional phase diagram of the brine-toluene-butanol-sodium dodecyl sulfate system //Journal of Colloid and Interface Science. 1980. V. 74. No. 2. P. 311-321.

Экспериментальное исследование вынужденной конвекции эмульсионной системы в канале прямоугольного сечения

Аюпов Артур Русланович

Валиуллина Вилена Ильшатовна, Мусин Айрат Ахматович

Уфимский университет науки и технологий

Ковалева Лиана Ароновна

aupov195@gmail.com

За последние десятилетия наблюдается большой интерес к изучению конвективных течений. Этот обусловлено тем, что процессы тепломассопереноса играют важную роль в природе и технике. В частности, стоит выделить такое явление, как вынужденная конвекция. Данный процесс зачастую используется в различных системах, таких как оптимизация поверхности аппаратов для улучшения тепломассопереноса, канал охлаждения, ядерная энергетическая система. Также следует отметить, что вынужденная конвекция имеет место и в нефтяной промышленности, а именно при транспортировке и перекачке нефти [1].

В настоящей работе был исследован процесс возникновения и развития вихревого потока эмульсионной системы в прямоугольном канале при вынужденной конвекции. Экспериментальное исследование проводилось на специально построенной лабораторной установке (рис. 1). Основным элементом установки являлась ячейка прямоугольного сечения, имеющая отверстие для заполнения внутренней полости жидкостью, а также два отверстия для слива. Приток и отток эмульсии происходил при помощи двух шприцевых насосов. Объектом исследования являлась модельная эмульсия типа «вода в масле», стабилизированная поверхностно-активным веществом Span80 [2]. Дисперсионной средой было выбрано вазелиновое масло. Процесс течения дисперсной системы в ячейке фиксировался на фотокамеру каждые 10 с. Обработка и анализ полученных данных производились методом PIV (Particle Image Velocimetry).



рис.1. Схема экспериментальной установки

В самом начале изображения были подвержены предварительной обработке, состоящей из гамма-коррекции: настройки яркости и контрастности, и выполнении бинаризации. Позже устанавливалась интересующая система координат и проводилась пост-обработка. Заключительным этапом была кросскорреляционная очистка. В результате исследования были получены мгновенные поля скорости при различных расходах жидкости, по которым были рассчитаны статистические характеристики потока жидкости: средняя скорость и отдельные ее компоненты, значения завихренности. Установлено, что все параметры увеличивают свое значение пропорционально увеличению расхода жидкости.

Исследование поддержано РФФ №19-11-00298.

Список публикаций:

- [1]. Lindstedt M., Karvinen R. Optimization of isothermal plate fin arrays with laminar forced convection //Journal of Enhanced Heat Transfer. – 2012. – Т. 19. – №. 6.
 [2]. Valiullina V. I. et al. Experimental study of the stratification of polydisperse emulsions in a cell with heated walls //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2057. – №. 1. – С. 012041.

Численное изучение течений вязкой жидкости в микроканалах с тупиковыми порами

Булатова Айгузель Загировна

Фаткуллина Назгуль Байтулловна

Уфимский университет науки и технологий

Солнышкина О.А., к.ф.-м.н.

bulatova29@yandex.ru

Развитие технологий микрофлюидных систем привело к пониманию особенностей течения жидкости в микромасштабе. Как правило, основными компонентами микроустройств являются микроканалы, в которых поток жидкости происходит за счет градиента давления. Области применения таких систем включают нефтяную промышленность, медицину и фармацевтику, биохимию, авионику и робототехнику и др. Поэтому прогнозирование поведения потоков жидкостей и описание их режима течения в микроустройствах, в которых используются такие структуры, является важной задачей для определения характеристик многофазных процессов в таких отраслях.

Данная работа посвящена численному исследованию гидродинамических потоков в микроканале с тупиковыми порами – неровностями на стенках каналов. Рассматривается периодическое течение вязкой несжимаемой жидкости внутри плоского канала прямоугольного поперечного сечения. Предполагается, что течение жидкости достаточно медленное ($Re \ll 1$), что позволяет пренебречь инерционными членами в расчетах. Таким образом, динамика данной системы описывается уравнениями Стокса. На стенках канала скорость потока равна нулю. Все процессы рассматриваются при изотермических условиях и без учета межмолекулярных сил Ван-дер-Ваальса. Более подробное описание математической постановки задачи можно в работе [1].

Численный подход основан на методе граничных элементов (МГЭ), ускоренного как за счет высокоэффективного масштабируемого алгоритма FMM, так и за счет использования гетерогенных вычислительных архитектур (многоядерные CPU и графические процессоры) [2]. Алгоритм ускоренного МГЭ позволяет проводить расчеты в областях со сложной геометрией с высокой дискретизацией поверхности. Предложенный подход впервые был успешно применен в работе [3] для изучения течений в микроканалах произвольных форм.

В ходе исследования была разработана качественная триангуляция микроканалов с неровностями в форме квадрата и равностороннего треугольника (рис. 1.). Поверхность каждого канала покрывалась треугольной сеткой с количеством расчетных узлов N_{Δ} от 30640 до 84928 в зависимости от сложности канала.

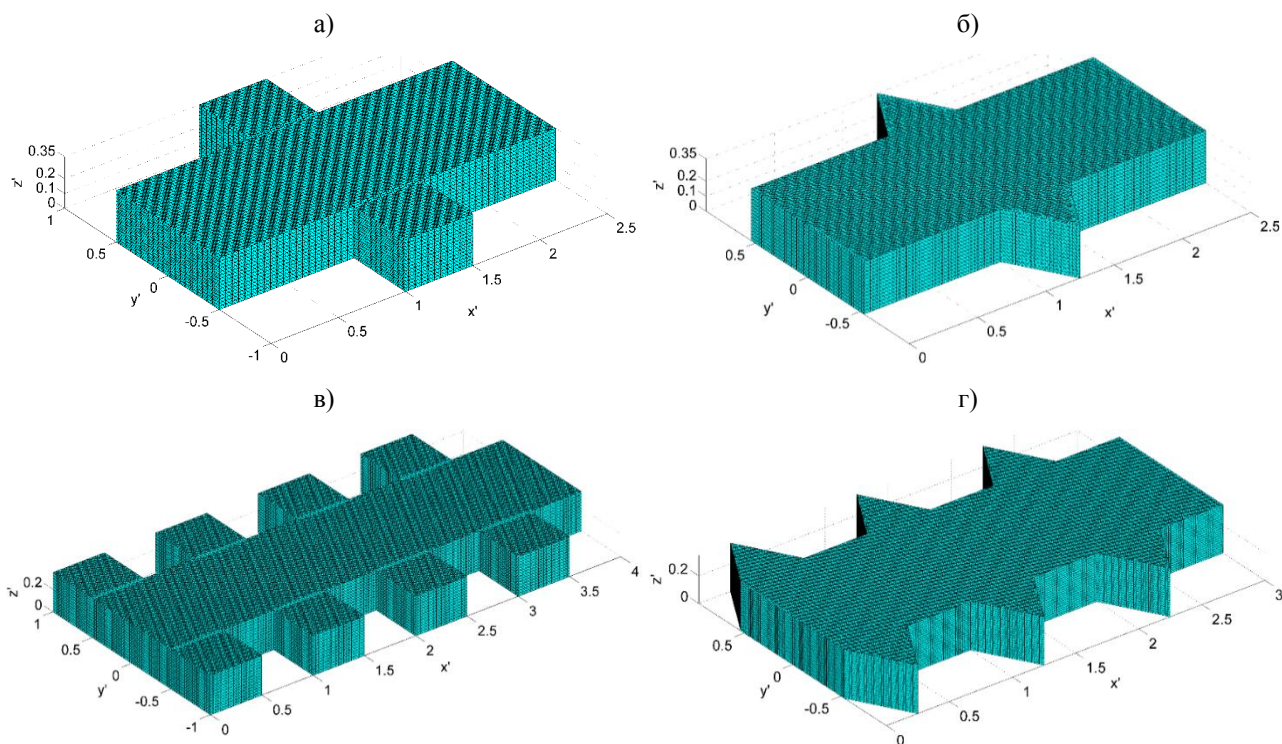


рис.1. Триангуляция каналов с неровностями в виде квадрата и равностороннего треугольника. Количество узлов сетки: а) $N_{\Delta} = 32524$, б) $N_{\Delta} = 30640$, в) $N_{\Delta} = 58256$, г) $N_{\Delta} = 84928$.

Исследовалось влияние размера, формы неровностей на характеристики потока при течении вязкой несжимаемой жидкости. Была визуализирована картина потока, а также рассчитаны продольная и поперечная компоненты скорости по длине фрагмента каналов. Также были получены профили скорости в плоскости yz для узкой и широкой части каналов и профили скорости вдоль длины канала (в плоскости xz) при изменении расстояния до стенок. Показано, что геометрия и форма значительно влияют на структуру потока внутри микроканала. Результаты данных исследований важны при изучении динамики дисперсных систем в моделях пористых сред, а также при оценке эффективности захвата и сортировки частиц в микрофлюидных устройствах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-79-10212.

Список публикаций:

- [1] Solnyshkina O.A., Fatkullina N.B., Bulatova A.Z. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1675. P. 012099.
 [2] Абрамова О.А., Иткулова Ю.А., Гумеров Н.А., Ахатов И.Ш. // *Вычислительные методы и программирование.* 2013. Т. 14. С. 438-450.
 [3] Itkulova Y.A., Solnyshkina O.A., Gumerov N.A. // *Proc. of ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.* 2012. V. 7. P. 873-881.

Экспериментальное исследование и математическое моделирование течения суспензий в прямоугольном канале

Валиуллина Вилена Ильшатовна

Юлмухаметова Регина Рафисовна, Аюпов Артур Русланович, Мусин Айрат Ахматович

Уфимский университет науки и технологий

Ковалева Лиана Ароновна

valiullina.vilena@mail.ru

Течение дисперсных систем в каналах разной геометрии играет важную роль в природных и промышленных процессах, например, суспензии широко используются в фармацевтической, пищевой отраслях и т.д. Немаловажную роль они занимают и в нефтяной отрасли при применении одной из популярных технологий повышения нефтеотдачи – гидравлический разрыв пласта, который заключается в закачке жидкости под высоким давлением, с последующим раскрытием естественных и образованием искусственных трещин. Для расклинивания трещин закачивается песчано-жидкостная смесь (жидкость переноса и проппант) [1].

Несмотря на популярность данной тематики, существует ряд вопросов, требующих дальнейших экспериментальных исследований и численного моделирования [2, 3].

В данной работе исследуется течение суспензии в плоском вертикальном канале прямоугольной формы методами экспериментального и численного моделирования. Экспериментальное исследование суспензии проводилось на специально построенной лабораторной установке, основным элементом которой является экспериментальная ячейка, представляющая собой вертикальный прямоугольный канал с отверстиями для перекачки жидкости. Приток и отток осуществлялся с помощью двух шприцевых насосов. Объектом исследования являлась модельная суспензия. В качестве дисперсионной среды было использовано вазелиновое масло, диспергированной фазой являлись твердые сферические частицы. Геометрические характеристики этих частиц были определены с помощью оптического микроскопа Olympus IX71, а полученные изображения обработаны с помощью программного обеспечения ImageJ и Matlab. Процесс течения дисперсной системы в ячейке фиксировался на фотокамеру каждые 10 с. Обработка и анализ полученных данных производились методом PIV (Particle Image Velocimetry).

Математическая модель процесса построена в одножидкостном приближении и включает уравнение неразрывности для суспензии, систему уравнений движения суспензии и уравнение сохранения массы объемной концентрации частиц. Считается, что жидкость несжимаема, сферические частицы одного размера. Система уравнений решается методом контрольного объема в трехмерной постановке в программном комплексе OpenFOAM. На рис. 1 представлены графики стационарного распределения концентрации твердых частиц в канале шириной 2 мм при перепадах давления 20 кПа и 40 кПа. Видно, что с уменьшением перепада давления наблюдается увеличение объемной концентрации частиц, которые осели вдоль канала. При заданных значениях перепада давления скорость течения жидкости соизмерима со скоростью оседания частиц, поэтому в этом случае они успевают осесть вдоль канала.

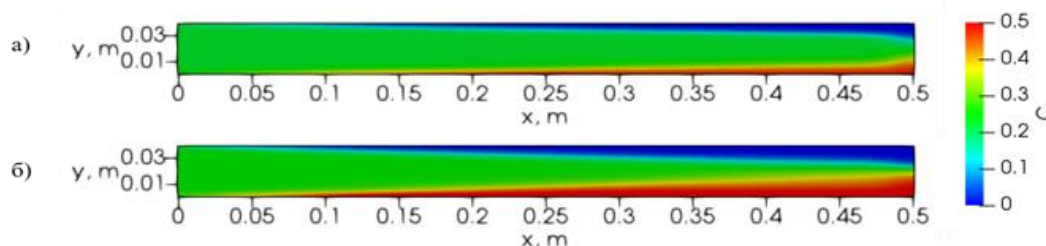


рис.1. Распределение концентрации частиц в канале при перепадах давления 40 (а) и 20 кПа (б).

Получены экспериментальные результаты исследования движения суспензии в условиях вынужденной конвекции в прямоугольной ячейке. Анализ полученных данных показал, что форма потоков меняется в зависимости от скорости течения жидкости через конвективную ячейку, которая задается перепадом давления. Проведено численное исследование динамики распределения частиц в потоке и осаждения по длине канала в зависимости от значений скорости закачки суспензии. Полученные результаты могут быть использованы для проведения оценочных вычислений продвижения фронта частиц в зависимости от скорости нагнетания суспензии.

Список публикаций:

- [1]. Аксаков А.В., Борщук О.С., Желтова И.С., Дедурин А.В., Калуджер З., Пестриков А.В., Торопов К.В. Корпоративный симулятор гидроразрыва пласта: от математической модели к программной реализации // Нефтяное хозяйство. — 2016. — №11. — С. 35-40.
- [2]. Замула Ю.С., Валиуллина В.И., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Экспериментальное моделирование динамики осаждения твердых сферических частиц, диспергированных в вязкой жидкости // Вестник Башкирского университета. — 2019. — Т. 24. — №. 4. — С. 794-798.
- [3]. Юлмухаметова Р. Р., Мусин А. А., Валиуллина В. И., Ковалева Л. А. Математическое моделирование течения суспензии в системе пересекающихся трещин // Сибирский журнал индустриальной математики. — 2023. — Т. 26. — № 1. — С. 201–211.

Экспериментальное изучение динамики капель воды в эмульсии под действием неоднородного электрического поля при гидродинамическом потоке

Галеев Рушан Ринатович

Муллаянов Альмир Ильфирович, Мусин Айрат Ахматович

Уфимский университет науки и технологий

Ковалева Лиана Ароновна

galeevr93@gmail.com

Одним из эффективных методов деэмульсации является использование электрического поля разной частоты. Работы по разделению эмульсий с применением электромагнитного воздействия связаны с термическим воздействием на водную фазу. При этом воздействие в низкочастотном диапазоне связано с возникновением диэлектрофоретической силы, заставляющей капли воды перемещаться в области более высокой напряженности электрического поля, создавая тем самым условия для более успешного расслоения эмульсии на отдельные фазы[1].

Для изучения динамики капель эмульсии под действием неоднородного электрического поля при наличии гидродинамического потока была создана экспериментальная установка на базе оптического микроскопа Olympus IX71, с интегрированной высокоскоростной камерой Photron FASTCAM SA5. Экспериментальная ячейка устанавливалась на стол оптического микроскопа. Для генерации электрического поля в ячейке использовался генератор сигналов Agilent 33522A, усиленный усилителем TaborElectronics 9100. Ячейка представляла с собой ячейку Хеле-шоу с вытравленной на одной из подложек пилообразной микроэлектродной системой.

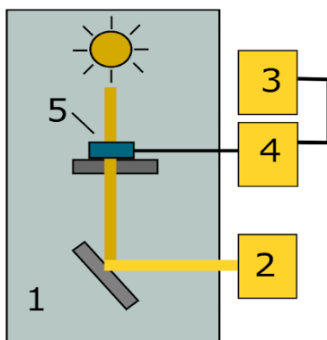


рис.1. Схема экспериментальной установки: 1-микроскоп; 2-камера; 3-генератор сигналов; 4-усилитель; 5-экспериментальная ячейка

Эмульсию (1 мл) прокачивали через ячейку, где на нее воздействовали неоднородным переменным электрическим полем с частотой 500 кГц и напряжением 300 В течение всех испытаний. На выходе эмульсия собиралась в тарированный дренажный контейнер. После пропускания эмульсии через ячейку были получены отдельные фазы воды и масла.

На основе полученных данных были построены зависимости объема отделившейся водной фазы от объемного расхода жидкости и от скорости потока. Разница в количестве оставшейся воды имело место вследствие того, что с увеличением объемного расхода увеличивалась и скорость потока, что приводило к высокому сдвиговому потоку. В таком случае капли сильно деформировались, и коалесценция могла не произойти. Наблюдалось образование вторичных капель из-за сильной деформации крупных капель, которая заключалась в растяжении вдоль потока и распаде на несколько мелких капель. Полученные результаты могут быть полезны для совершенствования существующих технологий разделения эмульсий или создания новых комбинированных методов

Исследование поддержано РФФ №19-11-00298.

Список публикаций:

[1] L. Kovaleva, R. Zinnatullin, A. Musin, A. Gabdrafikov, R. Sultanguzhin, V. Kireev//Influence of radio-frequency and microwave electromagnetic treatment on water-in-oil emulsion separation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 614 2021. 126081

Разработка микрофлюидной платформы для изучения мобилизации остаточной нефти

Гарифуллин Искандар Шамилевич
Уфимский университет науки и технологий
Батыришин Эдуард Сафаргалиевич
is@bgutmo.ru

При разработке месторождений более 50% нефти остается не мобилизованной [1]. Дальнейшее извлечение нефти возможно с применением поверхностно активных веществ (ПАВ). Изучение эффективности новых методов увеличения нефтеотдачи может проводиться с использованием микрофлюидных чипов (МФЧ) [2]. Изготовление микрожидкостных устройств из стекла проводится в несколько этапов: подготовка заготовок, формирование микроканалов в подложке, изготовление ответных подложек, склейка. Каждый этап должен завершаться контролем качества проведенных процедур.

Разрабатывается микрофлюидная платформа для изучения мобилизации остаточной нефти при помощи ПАВ заводнения. Центральный элемент платформы - микрофлюидный чип. В работе описаны методы изготовления и влияние различных параметров производства чипа на его характеристики. Микрофлюидные устройства изготавливались из стекла СП-2-ЛЮКС методом фотолитографии с использованием фоторезиста ФП-3515, геометрия чипа представляет собой прямой канал прямоугольного сечения с боковыми тупиковыми порами.

Для получения микроструктуры чипа использовался метод мокрого травления, в частности, буферизированный раствор 40% фторида аммония NH_4F и 49% фтороводородная HF , склейка стеклянных поверхностей производилась по методу активации поверхности стекла [3]. Изучено влияние температуры дубления чипа на геометрию микроканалов, глубину и профиль каналов. Также рассмотрено влияние концентрации нейтрального детергента на прочность склеивания.

Профиль полученных каналов изучался с помощью оптического и электронного микроскопа. Для определения прочности склеивания была собрана экспериментальная установка (рис.1).

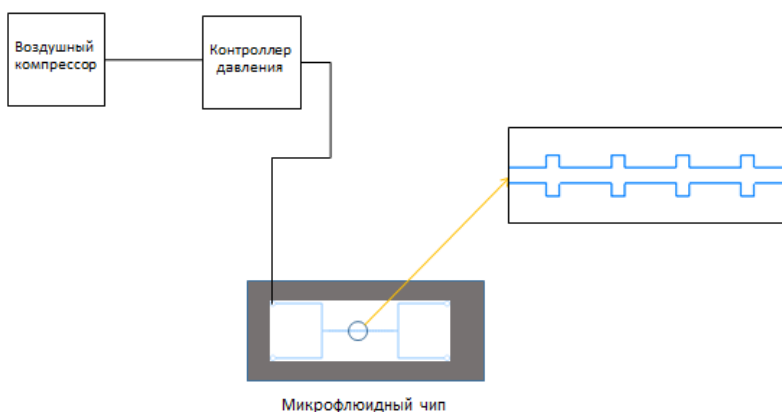


рис.1. Схема экспериментальной установки

Определены оптимальные режимы для изготовления микрофлюидных чипов: время травления, температура дубления, время активации поверхности. В дальнейшем МФЧ будет использован для изучения мобилизации остаточной нефти при помощи ПАВ заводнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-79-10212.

Список публикаций:

[1] Сургучев М.Л. // Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов 1985. 309 с.

[2] Батыришин Э.С., Солнышкина О.А., Питюк Ю.А. // Изучение особенностей проточки сред с двумя масштабами пористости. Журнал Технической физики, 2021, 4, 553-557.

[3] F. Shunichi, O. Nobutoshi, T. Yo // A simple and reversible glass-glass bonding method to construct a microfluidic device and its application for cell recovery. The Royal Society of Chemistry. 2021. 11 с.

Влияние осаждения механической примеси на поток флюидов в стволе скважины

Карачурин Артур Ибрагимович

Уфимский университет науки и технологий

Закиров Марат Финатович, к.т.н.

karachurin95@bk.ru

При работе добывающей скважины в стволе скважины могут наблюдаться многофазные потоки флюидов с механическими примесями. Природа возникновения примесей различна: как от естественного происхождения в результате разрушения призабойной зоны пласта, так и искусственные, например, вынос проппанта при выполнении гидроразрыва пласта [3]. Таким образом, механические примеси представляют из себя сложную структуру, состоящую из парафино-смолистых отложений, мелких частиц горной породы и т.д. Осаждение механических примесей на стенках скважины осложняют работу подземного оборудования и при определённых условиях возникает осаждение механических примесей на стенке скважины. Возникает необходимость прогноза и анализа влияния осаждения механических примесей при проведении промыслово-геофизических исследований при различных профилях ствола скважины. В данной работе приводится попытка учёта осаждения механических примесей при термометрических исследованиях скважины.

Рассмотрим пример осаждения механических примесей в вертикальных и горизонтальных скважинах. По данному рисунку видно, что осаждение механической примеси приводит к уменьшению диаметра, но для вертикального и горизонтального она осаждается по-разному (рис. 1). Возникновение осадка накопления приводит тому, что флюид проходящий через трубу взаимодействует с горной породой не металл - горная порода, а металл - осаждённая механическая примесь - горная порода. Соответственно прямому теплообмену между горной породой и флюидом будет добавляться механическая примесь со своими теплопроводными свойствами.

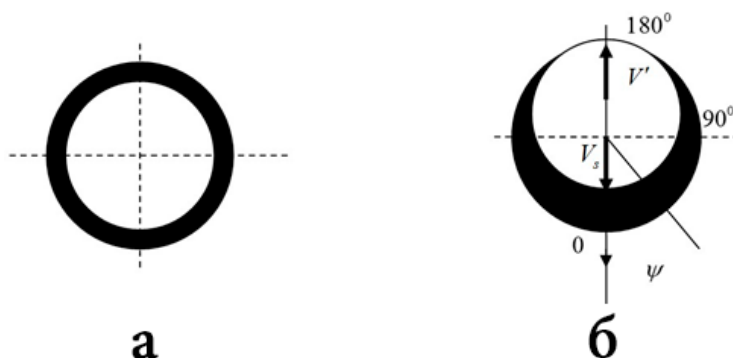


рис.1. Картина осаждения частиц в вертикальных (а) и горизонтальных трубах (б) [3].

К качественным признакам осаждения механических примесей по термометрическим исследованиям относятся изменения градиентов и соответственно наличие термоаномалий. Это связано с изменением условий теплообмена, например, из-за: 1) увеличение теплопроводности стенки, вследствие осаждения механических примесей, 2) уменьшение проходного сечения и соответственно увеличение скорости флюида. Действие таких эффектов приводит к изменению конвективного теплообмена. Влияние осаждения также приводит к изменению показаний методов расходомерии (РГД и СТИ). На участках осаждения будет наблюдаться увеличение скорости потока вследствие сужения ствола скважины.

Список публикаций:

[1] Валиуллин Р.А. Термогидродинамические исследования пластов и скважин нефтяных месторождений: учебное пособие. 2015. С. 213.

[2] Закиров М.Ф., Шарафутдинов Р.Ф., Валиуллин Р.А., Низаева И.Г. Моделирование скорости осаждения механических примесей в стволе горизонтальной скважины. // EAGE: 4-я научно-практическая конференция «Горизонтальные скважины 2021 проблемы перспективы». 2021. С. 4.

[3] Келбалиев Г.И., Гусейнова Л.В., Расулов С.Р., Сулейманов Г.З. Моделирование процессов осаждения частиц различной природы на поверхности трубопроводов // Журнал "Нефтепромышленное дело". 2014. №5. С. 25 – 29.

Отражение и преломление косо́й волны на границе раздела «вода – песок, насыщенный водой или газогидратом»

Каримова Гульназ Римовна

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН

Галиакбарова Эмилия Вильевна, д.ф.-м.н.

gulnazkar69@gmail.com

Интересным способом исследования дна морских водоемов является метод, основанный на особенностях отражения и прохождения акустических волн при нормальном и косом падении на границу раздела двух сред [1, 2, 3, 4,5].

В настоящей работе построена математическая модель отражения и прохождения звуковой волны на границе раздела «вода – песок, насыщенный водой или газогидратом метана». Предполагается, что волна падает и отражается от плоскости раздела $z=0$, механическое состояние не зависит от координаты оси y , то есть отсутствует горизонтальное поперечное смещение и источник звука расположен вдали от границы раздела (рис.1). Фронт падающей волны к поверхности раздела расположен под углом $\theta \leq 90^\circ$. Считаем, что верхняя полуплоскость – вода (f), сжимаемая в акустическом приближении, а нижняя полуплоскость песок (s) – упругое изотропное тело. Для каждой из областей записаны основные уравнения потенциалов для падающей, отраженной, прошедшей продольной и поперечной волн, вектора смещения частиц среды, компоненты тензоров напряжений. Эти уравнения дополнены граничными условиями при $z=0$, где составляющие смещений в воде и пористой среде равны, скорости равны, касательные напряжения равны нулю.

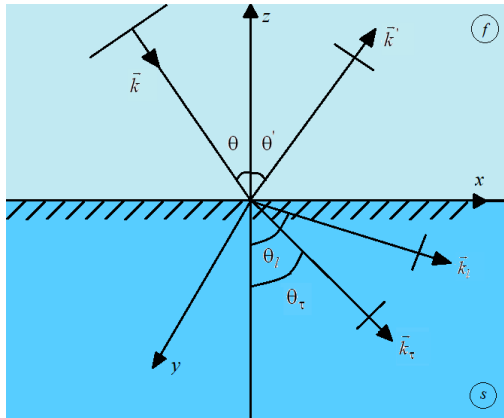


рис.1. Схема распространения падающей, отражённой и проходящих волн на границе раздела воды и пористой среды

На основе экспериментальных данных [6] значений скоростей продольных и поперечных волн получены зависимости углов преломления продольной и поперечной волн от угла падения (рис.2), а также зависимости модулей коэффициентов отражения, прохождения продольной и поперечной волн от угла падения при насыщенности $S=0.2$, где S – доля объема пор, занимаемая флюидом (водой или газогидратом) в пористой среде. В песке, насыщенного водой при любых насыщенностях будет существовать прошедшая продольная и поперечная волны. Для песка, насыщенного гидратом образуются углы, где происходит полное внутреннее отражение и поэтому можно рекомендовать проводить обследование грунта на наличие газогидрата при углах падения, находящихся между углами с полным внутренним отражением.

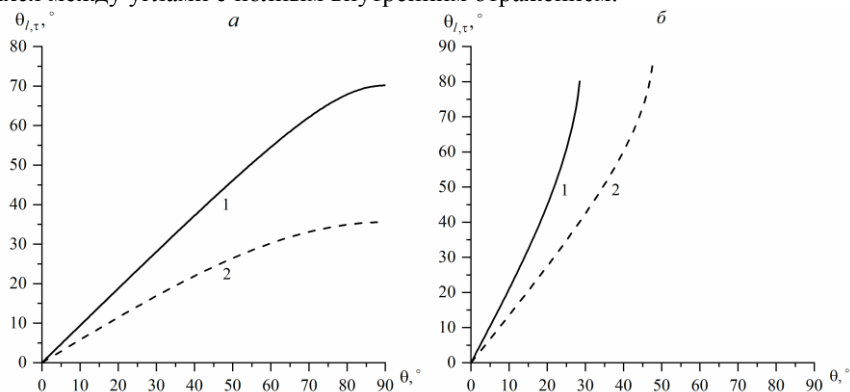


рис.2. Зависимость углов преломления продольной θ_l (1) и поперечной θ_t (2) волн от угла падения θ для песка, насыщенного водой (а) и газогидратом (б)

Исследования выполнены при финансовой поддержке средствами госбюджета по госзаданию 0246–2019–0052.

Список публикаций:

- [1] Лепендин Л. Ф. Акустика // Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1978.
- [2] Исакович М. А. Общая акустика // Исакович М.А. М.: Наука, 1973.
- [3] Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. М.: Наука, 1986.
- [4] Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. Москва: Наука, 1973.
- [5] Шагапов В. Ш., Сарапулова В. В. Особенности отражения и преломления акустических волн на границе раздела между газом и дисперсной системой // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56. № 5(333). С. 119-129.
- [6] Дучков А. Д., Дучков А. А., Дугаров Г. А., Дробчик А. Н. Скорости ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду, лёд или гидраты метана и тетрагидрофурана // Доклады академии наук. 2018. Т. 478, №1. С. 94-99.

Диагностика коллекторских характеристик призабойной зоны скважины по динамике собственных колебаний столба жидкости в НКТ

Мамаева Зилия Заитовна

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН

Башмаков Рустэм Абдрауфович, к.ф.-м.н.

zilia16@mail.ru

Нефтяная промышленность – это крупнейшая отрасль, развитие которой является неотъемлемой частью всей мировой промышленности. На сегодняшний день добыча углеводородов считается сложным процессом, нуждающийся в исследованиях и доработках. Основными причинами усложнения считается повышение доли трудноизвлекаемых запасов нефти, снижение продуктивности скважин и износ технической составляющей. Для устранения данных проблем необходимо проводить контроль за состоянием скважин и диагностику параметров призабойной зоны пласта, вследствие чего разрабатываются и применяются различные геофизические методы исследования скважин (ГИС) (электрические, радиоактивные, акустические, магнитные, термические и др.) [1, 2]. Акустическая спектроскопия скважин – один из методов ГИС, который предполагает возбуждение собственных колебаний столба жидкости в скважине [3], и в дальнейшем по полученным волновым характеристикам позволяет определить протяженность столба жидкости, диаметр скважины, коллекторские характеристики пласта, примыкающей к скважине.

В представленной работе решена задача о динамике собственных колебаниях столба жидкости в вертикальной скважине, возбужденных посредством гидроудара. Построена математическая модель данного процесса, в которой были использованы уравнения сохранения масс и импульсов в области скважины, уравнения сохранения масс в области открытого участка скважины, уравнение для описания упругого режима фильтрации в сообщающемся со скважиной пласте [4].

Используя решение уравнения в виде стоячих волн с учетом граничных и начальных условий получено характеристическое уравнение [4] для определения частоты, декремента и коэффициента затухания колебаний. Исходя из данного уравнения проведен анализ влияние основных параметров скважины на изменение частоты колебания, декремента и коэффициента затухания, и исследовано динамика давления в различных точках скважины.

Представлены зависимости собственной частоты Ω (а), коэффициента затухания δ (б), а также декремента затухания Δ (в) от проницаемости пласта при различных значениях протяженности зоны перфорации скважины (рис.1). Видно, что с увеличением протяженности зоны перфорации уменьшается частота колебаний в диапазоне проницаемости $k_p=10^{-14}\div 10^{-11}$ м². Заметим, что зависимость коэффициента и декремента затухания от проницаемости имеет немонотонный характер, и в отмеченном выше диапазоне проницаемости пласта оба параметра увеличиваются с ростом значения протяженности зоны перфорации.

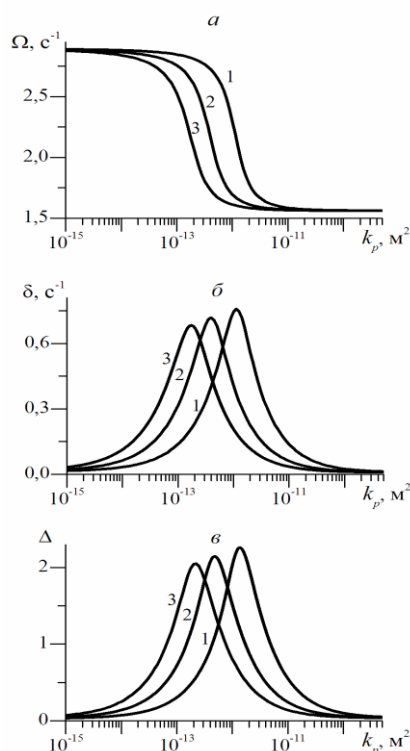


рис.1. Зависимость собственной частоты (а), коэффициента затухания (б), декремента затухания (в) от коэффициента проницаемости пласта при различных значениях протяженности зоны перфорации скважины: 1 – $l_h = 2$ м, 2 – $l_h = 5$ м, 3 – $l_h = 10$ м.

Исследования выполнены при финансовой поддержке средствами госбюджета по госзаданию 0246–2019–0052.

Список публикаций:

- [1] Косков В. Н. Геофизические исследования скважин: Учеб. Пособие / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь. 2004.
 [2] Горбачев Ю. И. Геофизические исследования скважин. Москва: Недра, 1990.
 [3] Горное дело: Терминологический словарь / ред. К. Н. Трубецкой, Д. Р. Каплунова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Горная книга, 2016 – 635с.
 [4] Шагапов В. Ш., Башмаков Р. А., Рафикова Г. Р., Мамаева З. З. Затухающие собственные колебания жидкости в скважине, сообщающейся с пластом //Прикладная механика и техническая физика. 2020. № 4. С. 5-14.

Электромагнитное воздействие как один из методов улучшения реологических свойств нефтей

Мухарямова Гульшат Ильдаровна

Зиннатуллин Расуль Рашитович, Киреев Виктор Николаевич

Уфимский университет науки и технологий

Ковалева Лиана Ароновна, д.т.н.

gulshat-karimova-1993@mail.ru

В связи с истощением легкоизвлекаемых запасов нефти, наблюдается повышение интереса к добыче, транспорту и переработке так называемых трудноизвлекаемых высоковязких нефтей. В связи с этим актуальной становится задача управления качеством таких нефтей. Одним из перспективных методов улучшения реологических свойств высоковязкой нефти является электромагнитная (ЭМ) обработка.

В рамках данной работы выполнены экспериментально-аналитические исследования по анализу высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного(СВЧ) электромагнитных воздействий на реологические свойства ряда высоковязких нефтей. В результате проведенных исследований выявлено, что электромагнитная обработка снижает вязкость исследованных высоковязких нефтей в интервале температур от 0°С до 20°С. Установлено, что эффективность влияния электромагнитной обработки на реологические свойства существенно зависит от компонентного состава нефти. Чем более вязкая нефть, чем больше в ней асфальтенов, парафинов, смол, тем выше эффективность ЭМ методов воздействия, причем СВЧ ЭМ метод воздействия

наиболее эффективен для нефтей с большим содержанием асфальтенов и смол, ВЧ метод – для нефтей с высоким содержанием парафинов.

С целью аппроксимации полученных экспериментальных данных зависимостей вязкости нефти μ от температуры T было применено уравнение Филонова-Рейнольдса [1] в виде кусочно-непрерывной функции:

$$\mu(T) = \begin{cases} \mu_1 e^{-u_1 T}, & T \leq T_* \\ \mu_2 e^{-u_2 T}, & T > T_* \end{cases} \quad (1)$$

где μ_1, μ_2, u_1, u_2 – экспериментально установленные постоянные коэффициенты для каждого из образцов нефти,

$$T_* = \frac{\ln(\mu_1 / \mu_2)}{u_1 - u_2} \quad (2)$$

Все полученные в экспериментах данные хорошо описываются выбранной экспоненциальной зависимостью. Степень достоверности аппроксимации составляет более 98 процентов.

В результате проведенных в работе экспериментально-аналитических исследований высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитных воздействий на реологические свойства ряда высоковязких нефтей выявлены причины, отвечающие за характер изменения реологических свойств указанных нефтей после ЭМ воздействий. Показано, что результаты ЭМ воздействий зависят от состава нефтей, в частности от содержания асфальтенов, парафинов и смол. Получены аппроксимационные зависимости вязкости исследованных нефтей от температуры без обработки, после ВЧ и после СВЧ обработок, эти уравнения могут найти широкое применение в практике эксплуатации и проектирования нефтепроводов для данных нефтей при проведении гидравлических расчетов, подборе насосно-силового оборудования, определении режимов работ.

Список публикаций:

[1] Тугунов П.И., Новоселов В.Ф. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов. – М.: Недра, 1981. – 177 с.

Численное исследование течения вязких жидкостей в каналах кольцевого типа

Мухутдинова Айгуль Айратовна

Уфимский федеральный исследовательский центр РАН

Урманчиев С.Ф.

muhutdinova18@gmail.com

В данной работе рассматривается течение термовязкой несжимаемой жидкости в канале кольцевого типа, образованном двумя соосными цилиндрами, на поверхностях которого заданы условия конвективного теплообмена. Течение жидкости происходит под действием постоянного перепада давления Δp .

Введем цилиндрическую систему координат, ось z которой направлена вдоль оси цилиндров. Кольцевой канал имеет длину L , радиус внутреннего цилиндра – r_0 , а радиус полости внешнего цилиндра – R , причём $R > r_0$ (рис.1). Будем считать канал сильно удлиненным ($L \gg [R - r_0]$).

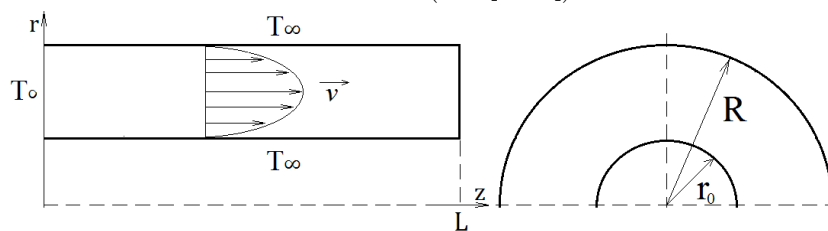


рис. 1. Схема канала

Математическая модель состоит из уравнений неразрывности, Навье-Стокса и сохранения энергии, записанных в цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии [1] в безразмерном виде.

Рассматриваются два вида зависимостей вязкости жидкости от температуры: монотонная и аномальная. При монотонной зависимости вязкость убывает с ростом температуры, что характерно для большинства капельных жидкостей [2-3]. В случае аномальной зависимости, вязкость немонотонно меняется в определенном температурном диапазоне [4]. Такими свойствами обладает ряд полимерных жидкостей, применяемых в химических технологиях, например, в качестве потокоотклоняющих реагентов.

Система уравнений математической модели решалась численно с использованием метода контрольного объема и алгоритма SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) [5], модифицированного для учета переменного коэффициента вязкости. Оригинальный компьютерный код реализован на языке программирования C++ в кроссплатформенной среде разработки Qt Creator.

В результате численного моделирования были получены графики скоростей и распределения температуры и вязкости в различных сечениях кольцевого канала. Было установлено, что области повышенной вязкости формируются в зависимости от интенсивности теплообмена, который определяет поток жидкости в канале и скорость его течения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке средствами госбюджета по госзаданию 0246–2019–0052.

Список публикаций:

- [1] Кочин Н. Е., Кибель И.А., Розе Н.В. // Теоретическая гидромеханика. Часть 2 М.: Физматлит. 1963. С. 728.
- [2] Френкель Я.И. // Кинетическая теория жидкостей Издательство "Наука", Ленинградское отделение, с. 592,1975
- [3] Nizamova A. D., Kireev V. N., Urmancheev S. F. // On stability of thermoviscous liquids laminar flow, Bulletin of Tyumen State University: Ecology and Nature Management, vol 1, № 2, p 104, 2015.
- [4] Urmancheev S. F., Kireev V. N. // Steady flow of a liquid with a temperature anomaly of viscosity, Doklady Physics, vol 49, № 5, p 328-33, 2004.
- [5] Патанкар С. В. // Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: МЭИ, 1984. С. 145.

Исследование характеристик акустической волны в зависимости от параметров среды

Сафиуллин Аскар Русланович

Уфимский университет науки и технологий

Галимзянов Марат Назипович, к.ф.-м.н.

safiullinak@mail.ru

Из литературы известно, что физико-химические свойства жидкостей в метастабильном состоянии в основном определяются наличием в их составе различных включений, например газовых пузырьков или твердых частиц [1]. В данном случае рассмотрены особенности распространения звука и развития неустойчивости в перегретой жидкости, содержащей газовые зародыши, в зависимости от степени ее перегрева, определяемой как $\Delta T_0 = T_0 - T_s(p_0)$.

Пусть в жидкости, находящейся при температуре T_0 и при давлении p_0 , имеются сферические пузырьки радиусом a_0 , которые содержат пар и нерастворимый в жидкой фазе газ. Рассмотрим двумерные акустические волны. Вертикальную ось Ox направим перпендикулярно к плоскости раздела между однофазной и двухфазной средами в сторону жидкости, а начало координат положим на границе раздела. Горизонтальная ось Oy направлена вдоль границы раздела (рис. 1).

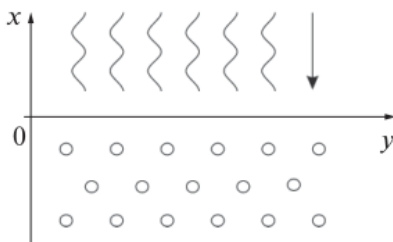


рис. 1. Схематическое изображение расчетной области

Для описания свойств акустических волн примем следующую систему уравнений, состоящую из приведенного закона сохранения массы, уравнений импульсов, уравнения Рэлея-Ламба, уравнения теплопроводности и диффузии [2, 3]:

$$\frac{1}{c_l^2} \frac{\partial p_l}{\partial t} + \rho_{l0}^0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - 3\rho_{l0}^0 \frac{a_0}{a_0} \frac{\partial a}{\partial t} = 0,$$

$$\rho_{l_0}^0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p_l}{\partial x} = 0, \rho_{l_0}^0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p_l}{\partial y} = 0,$$

$$\rho_{l_0}^0 a_0 \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} + 4 \frac{\rho_{l_0}^0 v_l^\mu}{a_0} \frac{\partial a}{\partial t} = p_g - p_l + \frac{2\sigma}{a_0^2} a,$$

$$\rho_{l_0}^0 c_g \frac{\partial T_g'}{\partial t} = \frac{\lambda_g}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_g r^2 \frac{\partial T_g'}{\partial r} \right) + \frac{\partial p_g}{\partial t}, \frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{D}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial k_i'}{\partial r},$$

где индексы $i = l, v, a$ относятся к параметрам жидкости, пара и газа, а нижний индекс (0) соответствует начальному состоянию, u и v – скорости среды, a – радиус пузырьков, C_l – скорость звука в жидкости, α_0 – объемное содержание пузырьков, v_l^μ – кинематическая вязкость жидкости, σ – коэффициент поверхностного натяжения, D – коэффициент диффузии.

Для пузырьковой жидкости, описанной выше, определено [2] условие для границы устойчивых и неустойчивых состояний:

$$\alpha_0 = \left(\frac{2}{3} \frac{\sigma}{\rho_{g0} a_0} - (1 - k_0) H_a \right) \frac{\beta}{k_0 \gamma} \quad (1)$$

В случае отсутствия газа в пузырьках получим:

$$\alpha_0 = \frac{2}{3} \frac{\sigma}{\rho_{l_0}^0 a_0 c_L^2}, \quad C_L = \frac{\rho_{g0}^0 L}{\rho_{l_0}^0 \sqrt{c_{l_0}^0}} \quad (2)$$

На основе данных уравнений, были проведены численные расчеты. Результаты представлены на рисунке 2. Обозначения 1, 2, 3 отвечают за значение давления $p_0 = 0.1, 1$ и 10 МПа, один, два и три штриха обозначают перегрев $\Delta T_0 = 10^{-2}, 10^{-1}$ и 1 К.

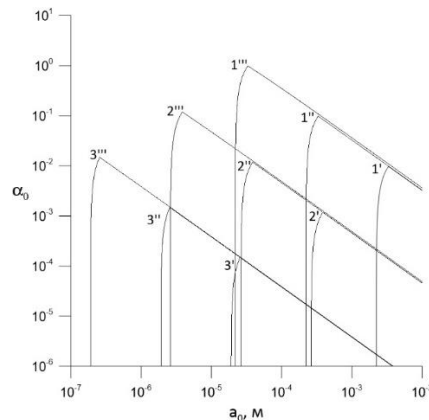


рис.2. Границы раздела устойчивых и неустойчивых состояний перегретой воды с паровоздушными пузырьками. Зависимость $\alpha_0 = \alpha_0(a_0)$

Кривые состоят из двух частей. Первая часть – восходящая – вычислена по формуле (1) и соответствует концентрации пара $k_0 < 1$. На нисходящем участке концентрация $k_0 = 1$ и объемное содержание вычисляется по формулам (2). Зоны внутри кривых соответствуют неустойчивым состояниям, снаружи – устойчивым. Чем меньше перегрев, тем правее находится кривая и, следовательно, больше зона устойчивости.

Список публикаций:

- [1] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. - М.: Наука, 1987, Т. 1, 2.
 [2] Шагапов, В. Ш. Особенности устойчивости и акустических свойств перегретой жидкости с газовыми зародышами при повышении давления / В. Ш. Шагапов, М. Н. Галимзянов, И. И. Вдовенко // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57, № 5. – С. 748-754.
 [3] Шагапов, В. Ш. Особенности отражения и прохождения акустических волн на границе "чистой" и пузырьковой жидкостей при прямом их падении / В. Ш. Шагапов, М. Н. Галимзянов, И. И. Вдовенко // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57, № 2. – С. 284-290.

Численное моделирование заземления нефти в поросетевых микромоделях

Фазлетдинов Спартак Уралович¹

Питюк Юлия Айратовна^{1,2}, Саметов Сергей Павлович^{1,2}

¹Уфимский университет науки и технологий

²ООО «РН-БашНИПИнефть»

Питюк Юлия Айратовна

spartak.fazlet@gmail.com

В настоящее время часто используются образцы керна с участков нефтяных пластов для понимания и исследования фильтрационных процессов. Однако, присутствуют ряд недостатков экспериментов по заводнению керна, таких как непрозрачность образца, специфичность отобранного участка, неоднозначность экспериментальных параметров. Данные особенности препятствуют проведению фундаментальных исследований в лабораторных условиях. Использование микромоделей вместо образцов керна позволяет наблюдать за течением двухфазной жидкости на масштабе пор и изучать процессы, протекающие на микроуровне.

Микромоделей с различной геометрией микроканалов использовались для изучения потоков жидкостей с 1980-х годов [1,2]. Геометрия каналов, размер, структура пор разрабатывается таким образом, чтобы можно было изучить конкретное явление. В целом, геометрию порового пространства микромоделей можно разделить на три основных типа: сеть с упорядоченным распределением пор [3], сеть со случайным распределением пор [4] и сеть, отображающая структуру пор реального керна [5]. В настоящей работе использовалась поросетевая модель, состоящая из пор и каналов со случайным распределением (рис. 1 б), каналы в которой распложены под углом 45° к горизонтальной оси.

Численная модель (рис.1 а) была построена на основе экспериментальной модели, рассматривалась область в верхнем левом углу микрофлюидного чипа, включающая 3-4 поры по вертикальной оси, и 6-7 пор – по горизонтальной оси (рис.2 б). В начальный момент времени вся модель была заполнена нефтью (плотность $\rho_o = 800 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\mu_o = 60 \text{ мПа} \cdot \text{с}$), кроме входной части, которая заполнялась вытесняющим агентом – водой (плотность $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\mu_w = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$). Слева закачивалась вода с постоянной скоростью $v = 0.1 \text{ мм/с}$, на правой границе поддерживалось постоянное давление. Коэффициент поверхностного натяжения равен $\sigma = 0.0271 \text{ Н/м}$.

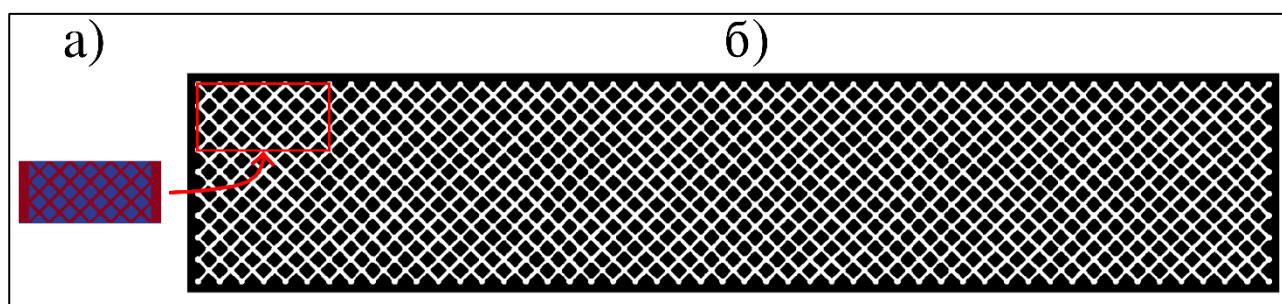


рис 1. Геометрия численной модели (а) и геометрия экспериментальной модели (б)

Для численного моделирования использовался решатель hybridPorousInterFoam [6] открытой интегрируемой платформы OpenFOAM. Для описания многофазного течения внутри каналов использовались уравнения Навье-Стокса.

Проведены расчеты вытеснения нефти водой из поросетевой модели для гидрофобной и гидрофильной поверхностей. На рис. 2 представлены характерны картины вытеснения нефти водой в различные моменты времени. Из рисунка видно, что вода движется преимущественно по верхним порам и в гидрофобном (рис. 2 б), и в гидрофильном (рис. 2 а) случаях, но в первом случае происходит захват нефти в части каналов и пор. Данный эффект можно объяснить тем, что в гидрофобном случае капиллярные силы направлены против течения, а в гидрофильном – по течению. Избежать такого захвата можно путем уменьшения капиллярных сил. Добиться этого можно, например, за счет уменьшения коэффициента поверхностного натяжения с применением различных агентов вытеснения [7], или за счет изменения контактного угла смачивания с применением наночастиц [8].

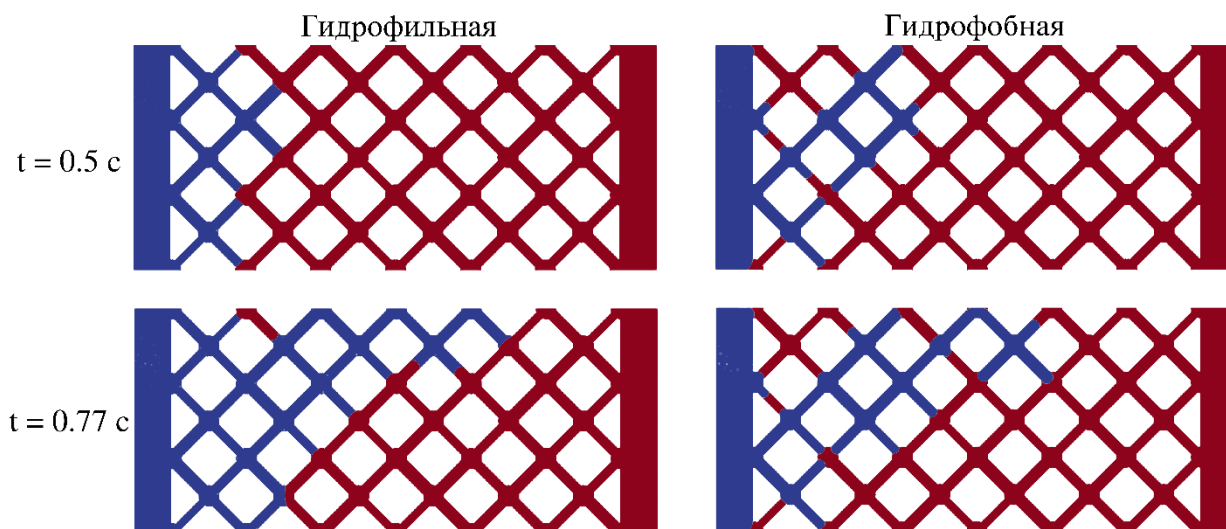


рис.2. Результаты расчетов вытеснения нефти в поросетевой модели для гидрофильной и гидрофобной поверхностей в моменты времени $t=0.5$ с и $t=0.77$ с.

Таким образом, целью данной работы являлось численное моделирование вытеснения нефти водой в поросетевой микромодели. В дальнейшем планируется изучить процессы вытеснения в представленной поросетевой модели с использованием различных агентов вытеснения для снижения остаточной нефтенасыщенности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-79-10212).

Список публикаций:

- [1] Koplík J. et al. *Immiscible fluid displacement in small networks* // *Journal of Colloid and interface Science*. – 1985. – Т. 108. – №. 2. – С. 304-330
- [2] Lenormand R., Touboul E., Zarcone C. *Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media* // *Journal of fluid mechanics*. – 1988. – Т. 189. – С. 165-187
- [3] Hsu S. Y., Zhang Z. Y., Tsao C. W. *Thermoplastic micromodel investigation of two-phase flows in a fractured porous medium* // *Micromachines*. – 2017. – Т. 8. – №. 2. – С. 38
- [4] Rangel-German E. R., Kovscek A. R. *A micromodel investigation of two-phase matrix-fracture transfer mechanisms* // *Water resources research*. – 2006. – Т. 42. – №. 3
- [5] Kovscek A. R., Tang G. Q., Radke C. J. *Verification of Roof snap off as a foam-generation mechanism in porous media at steady state* // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2007. – Т. 302. – №. 1-3. – С. 251-260
- [6] Carrillo F. J., Bourg I. C., Soulaire C., *Multiphase flow modeling in multiscale porous media: an open-source micro-continuum approach* // *Journal of Computational Physics: X*. 2020. Т. 8. – С. 100073. DOI:10.48550
- [7] Yiya Wang, Xinlu Han, Jinyu Li et al. // *Review on Oil Displacement Technologies of Enhanced Oil Recovery: State-of-the-Art and Outlook*. *Energy Fuels* 2023, 37, 4, 2539–2568. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c03625>
- [8] Rostami, P., Sharifi, M., Aminshahidy, B. et al. // *The effect of nanoparticles on wettability alteration for enhanced oil recovery: micromodel experimental studies and CFD simulation*. *Pet. Sci.* 16, 859–873 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12182-019-0312-z>

Экспериментальное исследование фильтрации различных нефтей в модели пористой среды

Фарвазов Ленар Эрикович

Уфимский университет науки и технологий

Зиннатуллин Расул Рашитович, к.т.н.

farvazovlenar@gmail.com

В современном мире нефть является одним из ключевых источников энергии, и ее добыча и переработка являются важными задачами для нефтяной промышленности. Однако, традиционные методы добычи нефти часто связаны с негативным воздействием на окружающую среду и уменьшением запасов природных ресурсов. В связи с этим, поиск новых технологий добычи нефти становится все более актуальным.

Одним из перспективных направлений в области добычи нефти являются экспериментальные исследования использования электромагнитного поля для добычи нефти из пласта. Этот метод основан на

принципе, что нефтенасыщенная порода является полярной диэлектрической средой, что позволяет использовать электромагнитное поле для диэлектрического разогрева нефти [1].

В настоящей работе была исследована фильтрация двух видов нефти с различными физико-химическими свойствами через модель пористой среды. Модель пористой среды представляет собой ячейку с фильтрационной областью, заполненной стеклянными шариками (рис.1): 1 – фитинги, 2 – скрепляющие болты, 3 – прокладки, 4 – электроды, 5 – фильтрационная область.

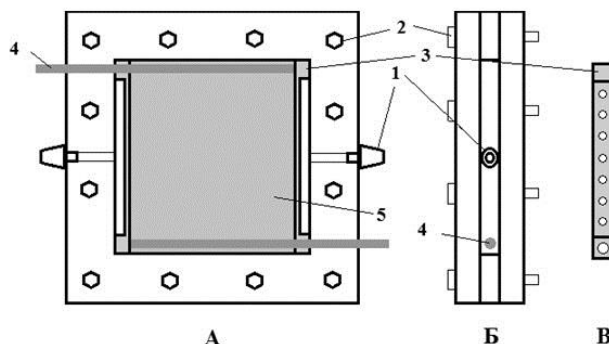


рис.1 Схематическое изображение ячейки: вид сверху (А), вид сбоку (Б); прокладка (В)

Экспериментальная установка состояла из воздушного безмасляного компрессора, посредством которого нагнеталось давление, контроллера давления, сосуда с фильтруемой жидкостью, ячейки с электродами, сосуда, установленного на прецизионных электронных весах. Элементы установки были последовательно соединены прозрачными трубками. Воздействие ВЧ электромагнитного поля осуществлялось генератором/усилителем электромагнитных полей, подсоединенного клеммами к электродам ячейки. Сосуд на весах и трубка между этим сосудом и ячейкой была заполнена водой. Измерение проводилось на весах с использованием программы RsWeight.

В ходе экспериментов с двумя видами нефти были получены следующие результаты: расход нефти с вязкостью $\mu=6.54$ сПз не изменяется при воздействии ВЧ поля; расход нефти с вязкостью $\mu=10.63$ сПз уменьшается при воздействии ВЧ поля (рис.2).

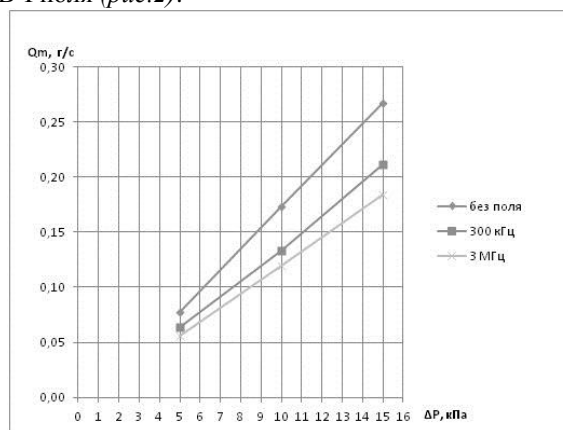


рис.2 Зависимость расхода нефти с вязкостью $\mu=10.63$ сПз

На основе этих данных можно предложить, что течению вязкой жидкости мешают подемоторные силы ввиду того, что, из-за расположения электродов, напряженность поля направлена перпендикулярно направлению фильтрации жидкости.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №22-11-20042).

Список публикаций:

[1] Зиннатуллин Р. Р., Ковалева Л. А. Исследования диэлектрических свойств нефтяных дисперсных систем в зависимости от соотношения асфальтосмолистых веществ // Письма в ЖТФ. – 2022. – Т. 48. – №. 4. – С. 41.

Численное изучение особенностей течения жидкости в микромодели пористой среды

Фаткуллина Назгуль Байтулловна

Булатова Айгузель Загировна

Уфимский университет науки и технологий

Солнышкина Ольга Александровна, к.ф.-м.н.

nazgulbay@mail.ru

Изучение течения жидкостей в пористых средах является актуальной задачей для нефтяной промышленности, тесно связанной с добычей углеводородов из карбонатных коллекторов. Зональную неоднородность таких пластов учитывает модель двойной пористости, в которой предполагается, что пласт состоит из матрицы, являющейся пористой средой, и твердых включений с аномально низкой проницаемостью. Кроме того, данная задача имеет прикладное значение при производстве микротеплообменников, используемых в радиочастотной электронике и биомедицинских устройствах. Эффективность микротеплообменников зависит от характеристик жидкости, материала, из которого изготавливается чип и от его геометрических параметров, которые необходимо учитывать при моделировании течения жидкости в пористых средах. Известны два основных подхода к описанию пористой среды – капиллярная модель, представленная в виде сети микроканалов, и структурная, состоящая из множества микроразмерных столбиков.

Рассматривается течение вязкой несжимаемой жидкости вокруг неподвижных недеформируемых элементов внутри плоского микроканала, которые в совокупности представляют собой структурную модель двойной пористости. На входе в канал задается объемный расход Q . Все процессы протекают при малых числах Рейнольдса ($Re < 1$) и изотермических условиях. Такие течения описываются стационарными уравнениями Стокса

$$-\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

где p – давление, которое включает в себя гидростатический компонент, μ – динамическая вязкость жидкости, \mathbf{u} – вектор скорости.

Задача решается при следующих граничных условиях: на поверхности недеформируемых столбиков и на стенках микроканала задается условие прилипания, а на входе и выходе микроканала задается условие периодичности.

Геометрия расчетной области представлена недеформируемыми цилиндрическими элементами, расположенными поперек потока внутри прямоугольного микроканала. Для формирования второго масштаба пористости при равном количестве столбиков изменялось их пространственное распределение – выделялись группы по 9 элементов, расположенных под углом 45 градусов (пористость 0.67) или 90 градусов (пористость 0.8) к направлению потока жидкости. Для оценки гидравлического радиуса образованных поровых каналов используется отношение ширины широких поровых каналов (w_b) к узким (w_s): $k = w_b/w_s$. Для рассматриваемых в данной работе вариантов структур коэффициент k варьируется от 1 до 2.5. На рисунке 1 показан переход от структур с одним характерным пространственным масштабом к структурам с двумя масштабами, угол наклона массива столбиков – 90 градусов.

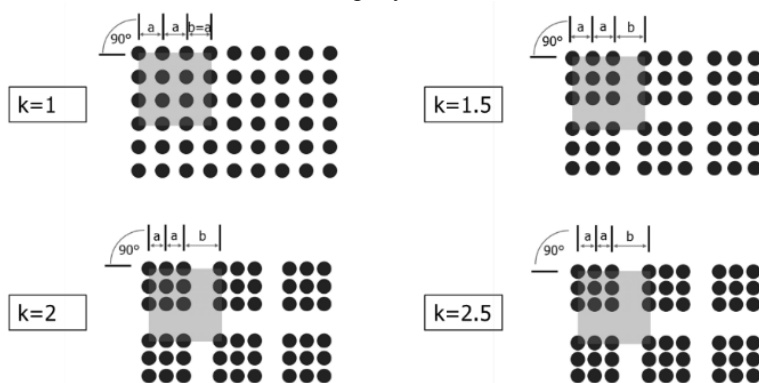


рис. 1. Схематическое изображение пространственного распределения недеформируемых цилиндрических элементов в микромодели двойной пористости.

Для решения задачи использовался численный подход, основанный на трехмерном методе граничных элементов, ускоренном быстрым методом мультиполей на гетерогенных вычислительных архитектурах [1]. Впервые такой подход к моделированию процессов в каналах со сложной геометрией был применен в [2].

В рамках данной работы проведено исследование влияния параметров микромоделли двойной пористости на структуру потока жидкости на основе эффективного численного подхода. Показано, что при увеличении соотношения гидравлического радиуса широких поровых каналов к узким распределение скоростей меняется. Основной поток жидкости происходит в широких каналах вдоль потока, а в области модели с узкими каналами скорость течения жидкости существенно уменьшается. Максимальная скорость течения жидкости наблюдается в поровых каналах вдоль оси Ox параллельно потоку. Сравнение результатов моделирования течения жидкости в микромоделли двойной пористости с углом наклона массивов столбиков в 45 градусов с экспериментальными данными проведено в [3].

Полученные результаты могут быть использованы для верификации моделей, описывающих течения в средах с двойной пористостью. Подобные модели используются для описания фильтрации в горных породах, технологических процессов изготовления волокнистых композитов и микротеплообменников. Кроме того, изучение течений в подобных структурах является важной задачей, связанной с повышением эффективности теплообменников для микроэлектронных устройств.

Список публикаций:

- [1] Абрамова О.А., Иткулова Ю.А., Гумеров Н.А., Ахатов И.Ш. // *Вычислительные методы и программирование*. 2013. Т. 14. № 4. С. 438-450.
 [2] Itkulova Y.A., Solnyshkina O.A., Gumerov N.A. // *ASME international mechanical engineering congress and exposition, proceedings (IMECE)*. 2012. Vol. 7. 873-881 pp.
 [3] Солнышкина О.А., Батыришин Э.С., Питюк Ю.А. // *Известия российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2021. № 4. С. 9-18.

Исследование динамики волн давления в канале с пузырьковым кластером

Фаттахов Салават Радикович

Уфимский университет науки и технологий

Галимзянов Марат Назипович, к.ф.-м.н.

salavat232001232001@mail.ru

Особенности распространения волн в пузырьковой жидкости связаны с совокупным взаимодействием нелинейных, дисперсионных и диссипативных эффектов. В жидкости с пузырьками свойства практически несжимаемой жидкости, являющейся несущей фазой, кардинально меняются при небольшом по объему (а тем более по массе) добавлении газа (пузырьков), являющегося дисперсной фазой. Особенность пузырьковых жидкостей обусловлена их высокой статической сжимаемостью при сохранении высокой плотности, близкой к плотности жидкости, что в свою очередь приводит к малой равновесной скорости звука. Интересной особенностью пузырьковой жидкости в динамических процессах является проявление инерции жидкости при изменении объема смеси за счет сжатия или расширения пузырьков [1]. К настоящему времени одномерные волны в пузырьковой жидкости хорошо изучены [1–3] и на данный момент активно исследуются двумерные волны. Одной из интереснейших задач волновой динамики пузырьковой жидкости, в которой ярко проявляются многомерные эффекты является взаимодействие ударной волны с пузырьковым кластером в жидкости.

Пусть в канале, заполненном жидкостью, находится прилегающая к одному из торцевых границ канала пузырьковая зона в форме сферы (Рис. 1). Рассмотрим двумерные волновые возмущения. Такая ситуация может реализоваться, например, при воздействии на систему граничным давлением ($p = p^0(r, t)$ при $z = z_0$, где R_{cl} - характерный радиус пузырьковой области, R_c – радиус канала, L_c – длина канала, ΔP_0 – амплитуда волны давления).

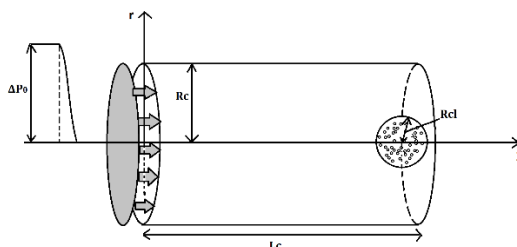


рис. 1. Схематическое изображение расчетной области

Для описания движения пузырьковой жидкости при обычных для таких систем допущениях примем систему, состоящую из уравнений масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках в односкоростном приближении [1]:

$$\frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (i=l, g), \quad \frac{dn}{dt} + n \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0, \quad \rho \frac{du}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial x} = 0, \quad \rho \frac{dv}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial y} = 0, \quad \rho = \rho_g + \rho_l,$$

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a_0} q, \quad w = \frac{da}{dt}, \quad \left(\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right), \quad \alpha_l + \alpha_g = 1, \quad \rho_l = \rho_l^0 \alpha_l, \quad \alpha_g = \frac{4}{3} \pi n a^3,$$

где a – радиус пузырьков, p_i – давления фаз, q – интенсивность теплообмена, n – число пузырьков в единице объема, w – радиальная скорость пузырьков, ρ_i^0 – истинные плотности фаз, γ – показатель адиабаты для газа, α_i – объемные содержания фаз. Скорости u и v соответствуют движению по координатам x и y . Нижними индексами $i=l, g$ отмечены параметры жидкой и газовой фаз.

В ходе численного эксперимента были получены результаты, представленные на рисунках 2 и 3. В расчетах радиус пузырькового кластера Rcl_i принимал следующие значения: 0.025м, 0.05м, 0.075м, 0.1м. Объемное содержание пузырьков в кластере $\alpha_i = (0.001, 0.0025, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05)$. В расчетах начальный радиус пузырьков брался равным 1 мм. На рисунках представлены показания мнимых датчиков, которые располагались в середине пузырьковой области (рисунок 2) и на торцевой стенке за кластером на оси симметрии (рисунок 3).

Как видно из рисунков 2 и 3, можно подобрать такую комбинацию радиуса кластера и начального объемного содержания пузырьков, для известной амплитуде начального волнового воздействия, при которой возможно как ослабление, так и усиление волны давления при падении на торцевую твердую стенку (рисунок 3). Здесь стоит также отметить, что предмет, помещенный внутрь пузырьковой завесы, при определенных параметрах может быть защищен от внешнего волнового воздействия (рисунок 2).

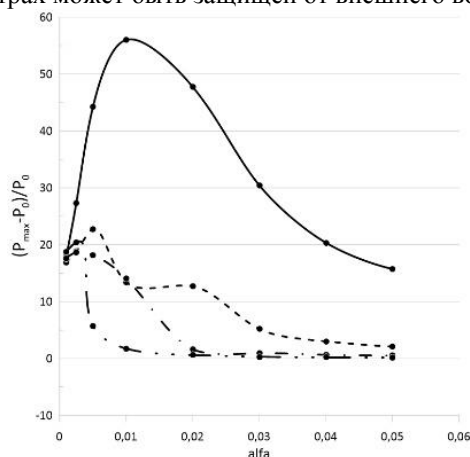


рис. 2. Максимальное отношение разности давлений к начальному давлению в центре завесы при радиусе завесы $Rcl = 0.025$ м. (сплошной), 0.05м. (пунктир), 0.075м. (точка-тире), 0.1 (тире две точки)

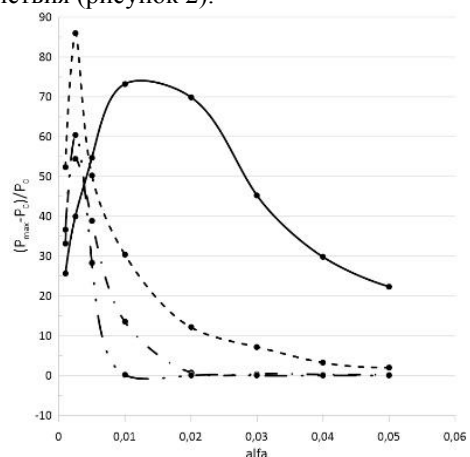


рис. 3. Максимальное отношение разности давлений к начальному давлению на дне канала при радиусе завесы $Rcl = 0.025$ м. (сплошной), 0.05м. (пунктир), 0.075м. (точка-тире), 0.1 (тире две точки)

Список публикаций:

- [1]. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. - М.: Наука, 1987, Т. 1, 2.
 [2]. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
 [3]. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 248 с: ил.

Сравнение методов расчета движения твердого тела

Фатхуллин Артур Ильсурович

Челябинский государственный университет

Замоздра С. Н, к.ф.-м.н.

trickster.arthurr@gmail.com

Система уравнений движения твердого тела, представленного совокупностью N материальных точек, относительно неподвижной системы координат, содержит $N + 3$ векторных дифференциальных уравнений, а так же 2 или 1 алгебраическое уравнение. Прямое оперирование такой системой равным образом неудобно как

в аналитических решениях, так и при численном моделировании, что мотивирует использовать альтернативные, менее громоздкие подходы. Ныне применяются различные «вращательные формализмы» – наборы величин и правил оперирования с ними, однозначно задающих положение твердого тела. Это позволяет ограничить число дифференциальных уравнений ценой добавления алгебраических соотношений. В докладе представлены следующие методы описания вращения твердого тела:

1. «Непосредственный»: получающийся из законов механики [1], §31 и §34;
2. Углы Эйлера, напр. [1], §35 или [2] §2.5;
3. Вектор конечного поворота Родрига [2], §3.1;
4. Кватернионы [2], §3.2 или [3];
5. Матрицы поворота [2], §2.1 или [4];
6. Матрица поворота, составленная из компонент кватерниона – «комбинированный» [2], §3.2.

Цель работы – сравнить эти методы по скорости и точности.

С помощью методов 1, 3, 4, 5, 6 решалась задача о свободном вращении (без поступательного движения) твердого тела с $N=7000$. Тело вращается 1000 секунд модельного времени с начальной угловой скоростью $2\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, т. е. совершает ~ 1000 оборотов. Сравниваются (см. таблицу) время счёта t и относительные погрешности δ расчета кинетической энергии E , длины радиус-вектора $\|\vec{r}\|$, определителя матрицы поворота Δ , модуля кватерниона $\|q\|$. В методе (3) рассмотрено 2 варианта с разным ограничением на модуль вектора Родрига $\|\vec{\vartheta}\|$. Для удобства сравнения величины представлены в характерных единицах. Прочерк означает, что вычисление величины невозможно или нецелесообразно.

Величины		Метод					
Обозн.	Единица измерения	1	3 $\ \vec{\vartheta}\ < 3$	3 $\ \vec{\vartheta}\ < 10$	4	5	6
t	42.6 сек.	6.73	8.86	8.68	7.86	1	1
$\delta\Delta$	7E-5	-	2E-10	4.76E-10	1	1.78	1
$\delta\ q\ $	4.63E-6	-	-	-	1	-	1
δE	2.52E-5	1.42	6.98	52.38	1	17.86	3.52
$\delta\ \vec{r}\ $	9.26E-6	1.58	1E-10	5.4E-10	1	1.44	1.08

Выводы

Метод (3) имеет наименьшую скорость расчета. При условии $\|\vec{\vartheta}\| < 10$ также хуже всех сохраняет энергию. При условии $\|\vec{\vartheta}\| < 3$ погрешность вычисления энергии уменьшается почти на порядок, при дальнейшем уменьшении максимального $\|\vec{\vartheta}\|$ практически не меняется. В обоих случаях, подход демонстрирует высочайшую точность сохранения длины вектора / определителя матрицы, характеризующей данное вращение – следствие того, что формула Родрига *всегда* задает чистый поворот, без растяжения.

Метод (4) немного медленнее метода (1), но лучше сохраняет энергию и длину вектора – отставание в скорости могло бы быть скомпенсировано выбором чуть большего шага.

Метод (5), при своих достоинствах – высокой скорости счета и уникальной возможности быстро рассчитать тензор инерции – сохраняет энергию в 17 раз хуже, чем (4), а остальные величины – примерно в 1.5 раза хуже, что может сделать его медленнее при интегрировании с переменным шагом.

Отсутствие однозначно лучшего подхода среди рассмотренных приводит к идее их комбинации. Метод (6) – матрица поворота, составленная из компонент кватерниона – сочетает быстроту расчета алгебраических соотношений и малую погрешность, претендуя на звание наилучшего в задаче о вращении твердого тела, представленного большим числом материальных точек.

Список публикаций:

[1] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Т.1 Механика. Москва: «Наука», 1988.

[2] Лурье А.И. Аналитическая механика. Москва: Физ. Мат. лит, 1961. Глава 3.

[3] Н.И. Амелькин. Кинематика и динамика твердого тела. <https://mipt.ru/upload/medialibrary/dc2/amlkin-n.i.-dinamika-tverdogo-tela.pdf>

[4] Fumio Hamano. Derivative of Rotation Matrix – Direct Matrix Derivation of Well-Known Formula. <https://arxiv.org/abs/1311.6010>

Моделирование движения деформируемых частиц в областях с детерминированным боковым смещением

Фахретдинова Алсу Леонидовна

Уфимский университет науки и технологий

Солнышкина Ольга Александровна, к.ф.-м.н.

A.L.Fakhretdinova@yandex.ru

Разделение частиц в области медицины и биологии является необходимым этапом в подготовительных и аналитических процессах. Так как в данном случае ведется работа с малыми объектами, на помощь приходят микрофлюидные устройства, где сортировка/разделение частиц возможны двумя методами: активными, которые основаны на внешних силовых полях (акустические, оптические и т.д.) и пассивными, полагающимися на геометрию канала и гидродинамические силы.

Данная работа посвящена одной из разновидностей пассивных методов – детерминированное боковое смещение (DLD), которое является механизмом для непрерывной сортировки по размеру и свойствам, например, деформируемости. Устройство состоит из периодического массива микростолбов различной геометрии, где горизонтальный ряд столбов смещается в сторону на заданное расстояние от предыдущего, что приводит к созданию отдельных гидродинамических потоков. Если частица больше, чем критический радиус, то она движется вместе с потоком, которое является ламинарным и описывается уравнением Стокса, а если меньше – смещается при каждом препятствии в направлении, определяемом устройством. С помощью данного метода в [1, 2] изучалось влияние пространственного расположения столбов, а в [3] – изменение доли сдвига на критический размер частиц.

Данная работа посвящена численному исследованию особенностей сортировки деформируемых частиц в потоке вязкой жидкости в микроканалах с DLD. Для численного моделирования используется метод граничных элементов, суть которого состоит в преобразовании дифференциального уравнения в частных производных, описывающее поведение неизвестной функции внутри и на границе области, в интегральное уравнение, связывающее только граничные значения, и нахождения численного решения этого уравнения.

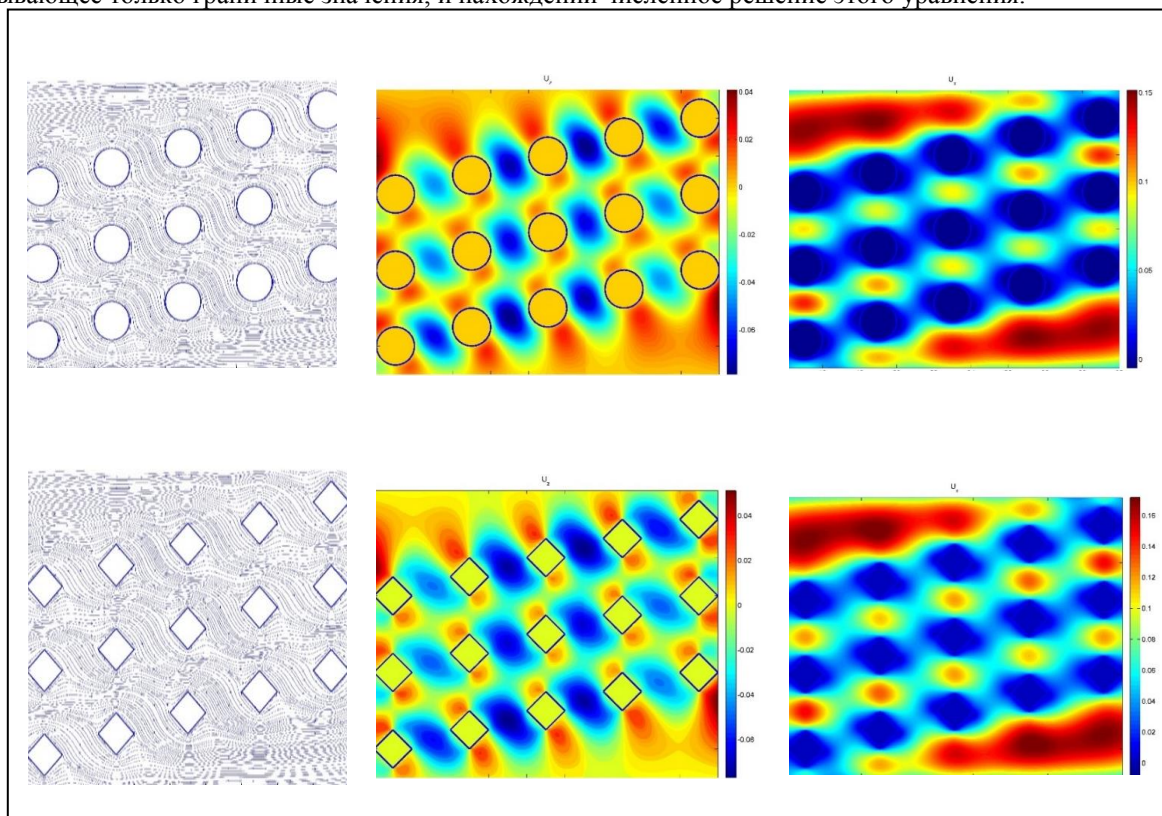


рис.1. Результаты моделирования для линий тока, продольной U_x и поперечной U_z составляющих скоростей (слева направо) в DLD структуре с круглыми и квадратными элементами.

В рамках данного исследования проведены расчеты течения вязкой жидкости в системе детерминированного бокового смещения с использованием ускоренного метода граничных элементов. Изучалось влияние совокупности параметров на поведение жидкости и траектории деформируемых частиц:

пространственное расположение и формы поперечного сечения столбов (квадрат и круг). Получены соответствующие картины течений, распределение продольной и поперечной скоростей при различных формах элементов (рис. 1).

Список публикаций:

[1] Behnam Rezaei, Mahdi Moghimi Zand, Reza Javidi. Numerical simulation of critical particle size in asymmetrical deterministic lateral displacement // *Journal of Chromatography A*. - 2021 - 9.

[2] Kerwin Kwek Zeming, Thoriq Salafi, Chia-Hung Chen, Yong Zhang. Asymmetrical Deterministic Lateral Displacement Gaps for Dual Functions of Enhanced Separation and Throughput of Red Blood Cells // *Scientific Reports*. – 2016.

[3] David W. Inglis, John A. Davis, Robert H. Austin and James C. Sturm. Critical particle size for fractionation by deterministic lateral displacement // *Lab on a Chip*. - 2006. – p. 655-658.

Динамика волн давления в жидкости, содержащей пузырьковую зону полусферической формы

Юсупова Рушана Усмановна

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН

Галимзянов Марат Назипович, к.ф.-м.н.

rabota_ru333@mail.ru

Пузырьковые жидкости имеют особые свойства. При небольшом объемном содержании пузырьков среда, сохраняя плотность, близкую к плотности жидкости, приобретает большую сжимаемость, что приводит к нелинейности среды. Кроме того, пузырьковые среды, главным образом из-за проявления межфазного теплообмена, обладают сильными диссипативными свойствами. Совокупность взаимодействий нелинейных, дисперсионных и диссипативных эффектов вызывает научный интерес к особенности распространения волн в пузырьковой жидкости. К настоящему времени одномерные волны в пузырьковой жидкости хорошо изучены [1–3] и на данный момент активно исследуются двумерные волны. Особое внимание уделяется такой задаче волновой динамики в пузырьковой жидкости как взаимодействие ударной волны с пузырьковым кластером в жидкости.

Пусть в канале, заполненном жидкостью, находится прилегающая к одному из торцевых границ канала пузырьковая зона в форме полусферы (Рис. 1). Рассмотрим двумерные волновые возмущения. Такая ситуация может реализоваться, например, при воздействии на систему граничным давлением ($p = p^0(r, t)$ при $z = z_0$, где R_{cl} - характерный радиус пузырьковой области, R_c – радиус трубы, L_c – длина трубы, ΔP_0 – амплитуда волны давления).

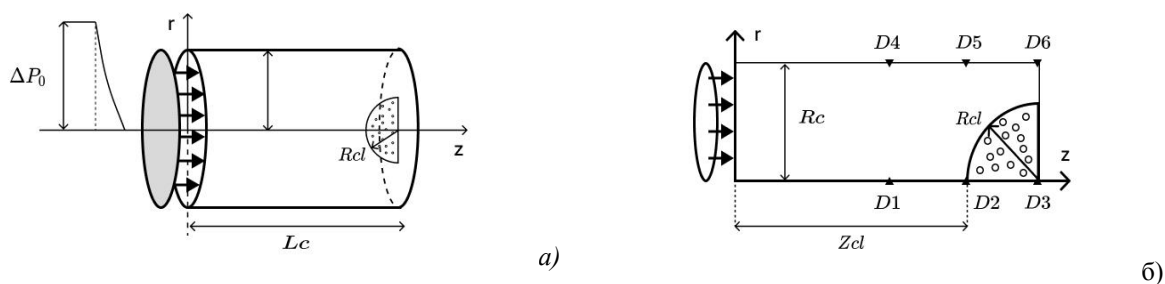


рис. 1. Схематическое изображение задачи (фрагмент а) и расчетной области (фрагмент б), D1-D6 датчики

Для описания движения пузырьковой жидкости при обычных для таких систем допущениях примем систему, состоящую из уравнений масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках в односкоростном приближении [1]:

$$\frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (i = l, g), \quad \frac{dn}{dt} + n \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0, \quad \rho \frac{du}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial x} = 0, \quad \rho \frac{dv}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial y} = 0, \quad \rho = \rho_g + \rho_l,$$

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma P_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a_0} q, \quad w = \frac{da}{dt}, \quad \left(\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right), \quad \alpha_l + \alpha_g = 1, \quad \rho_i = \rho_i^0 \alpha_i, \quad \alpha_g = \frac{4}{3} \pi n a^3,$$

где a – радиус пузырьков, p_i – давления фаз, q – интенсивность теплообмена, n – число пузырьков в единице объема, w – радиальная скорость пузырьков, ρ_i^0 – истинные плотности фаз, γ - показатель адиабаты

для газа, α_i - объемные содержания фаз. Скорости u и v соответствуют движению по координатам x и y . Нижними индексами $i=l, g$ отмечены параметры жидкой и газовой фаз.

В ходе численного эксперимента были получены результаты, представленные на рисунке 2. В расчетах радиус пузырькового кластера Rcl принимал следующие значения: 0.02м, 0.04м, 0.06м, 0.08м, 0.1м. Объемное содержание пузырьков в кластере α_{g0} принимались значения с 0,001 до 0,01 с шагом 0,001. В расчетах начальный радиус пузырьков брался равны 1 мм. Численные эксперименты проводились при следующих геометрических и теплофизических параметрах системы: $C_g = \frac{1006 \text{ Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}$, $\rho_{g0} = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\lambda_g = 0,025 \text{ м} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{К}} \cdot \text{с}^3$, $\gamma = 1,4$, $\rho_l = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $C_l = 1500 \frac{\text{М}}{\text{с}}$, $T_0 = 300 \text{ К}$, $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$, $\Delta p_0 = 0,5 \text{ Мпа}$, $R_c = 0,1 \text{ м}$, $h_{z0} = h_{r0} = 10^{-3} \text{ м}$, $\tau = 10^{-8} \text{ с}$. На рисунке представлены показания датчика D3, которые располагались на торцевой стенке за кластером на оси симметрии.

На рисунке 2 представлены расчетные осциллограммы, регистрируемые датчиком D3, иллюстрирующие динамику волны типа ступенька в трубе, заполненной жидкостью при наличии пузырькового кластера в форме полусферы. Из полученных результатов (левый график) видно, что даже для завесы с максимальным радиусом $Rcl_i = 0.1 \text{ м}$ происходит усиление воздействия на стенку и увеличение амплитуды до 2 МПа для объемного содержания в 1%. Стоит отметить, что в данном случае, с уменьшением радиуса присутствует тенденция к увеличению воздействия, хотя при этом максимальное воздействие происходит при $Rcl_i = 0.08 \text{ м}$. Заметим, что в данном случае максимальное воздействие достигается в первое воздействие на стенку, а в случае третьего взаимодействия. На правом графике видна иная картина. Максимальное воздействие фиксируется при радиусе кластера равного $Rcl = 0.04 \text{ м}$. Во всех остальных случаях видим усиление воздействия, но картины «не такие яркие». Проведя сравнение левого и правого рисунков можем заключить, что скорость распространения импульсного сигнала в пузырьковой области существенно меняет картину течения. Если для объемного содержания пузырьков равного 1% пузырьковая область существенно демпфирует волновое возмущение, то для таких же геометрических размеров завеса с объемным содержанием 0.1%, наоборот, способствует увеличению амплитуды падающей на твердую стенку волны. Отсюда можно сделать вывод, что при волновом воздействии на твердую стенку, в зависимости от параметров (размеров пузырьковой зоны, объемного содержания газа в завесе, радиуса пузырьков) пузырьковая область может существенно уменьшить или увеличить воздействие импульсного сигнала.

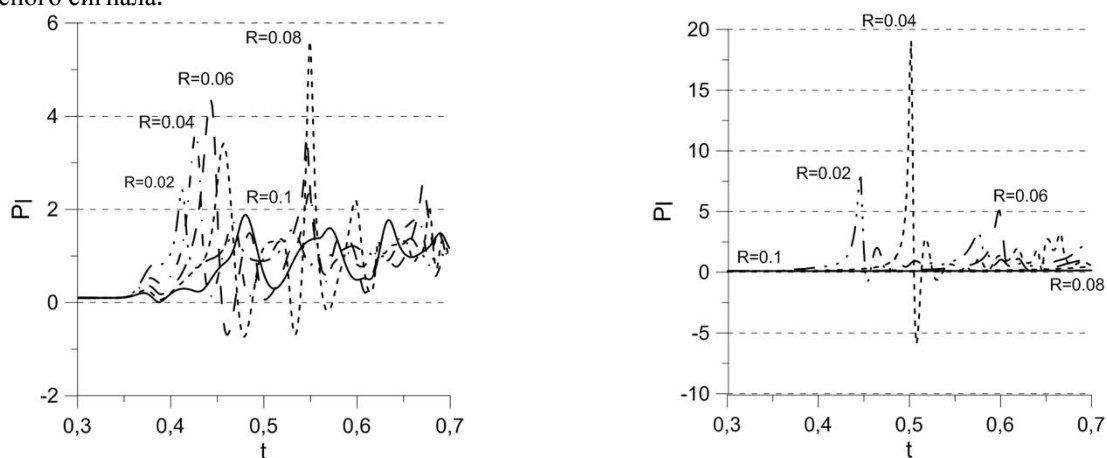


рис. 2. Показания датчика D3 (слева $\alpha_{g0} = 0.001$, справа – $\alpha_{g0} = 0.01$). Радиусе завесы $Rcl = 0.02 \text{ м}$. (тире-три точки), 0.04м. (точка-тире), 0.06м. (тире), 0.08 (пунктир), 0.1 (сплошная)

Список публикаций:

- [1]. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. - М.: Наука, 1987, Т. 1, 2.
- [2]. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
- [3]. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 248 с: ил.