

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

Габышев Дмитрий Николаевич, н.с.

Тюмень, Тюменский государственный университет, Институт экологической и сельскохозяйственной биологии

**Колебания жидких гидрометеоров при движении с терминальной скоростью**

e-mail: [gabyshev-dmitrij@rambler.ru](mailto:gabyshev-dmitrij@rambler.ru) стр. 106

Ильин Владимир Алексеевич, доцент

Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет, физический

**Режимы электроконвекции в маломодовой модели при низких и высоких частотах электрического поля**

e-mail: [ilin1@psu.ru](mailto:ilin1@psu.ru) стр. 107

Мухутдинова Айгуль Айратовна, аспирант 1 года обучения

Уфа, Институт механики Уфимского ФИЦ РАН, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Математическое моделирование процесса гравитационного осаждения полидисперсной эмульсии**

Киреев Виктор Николаевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [muhutdinova18@gmail.com](mailto:muhutdinova18@gmail.com) стр. 109

Фазлетдинов Спартак Уралович, 4 курс

Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Численное моделирование заземления остаточной нефти в модели порового дублета**

Питюк Юлия Айратовна, к.ф.-м.н.

e-mail: [spartak.fazlet@gmail.com](mailto:spartak.fazlet@gmail.com) стр. 110

Фахретдинова Алсу Леонидовна, 3 курс

Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Численное моделирование сортировки частиц по размеру в областях с детерминированным боковым смещением**

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

e-mail: [A.L.Fakhretdinova@yandex.ru](mailto:A.L.Fakhretdinova@yandex.ru) стр. 111

Хисамов Артур Альфирович, аспирант 2 года обучения

Уфа, Башкирский государственный университет, ООО РН БашНИПИнефть, Физико-технический институт

**Моделирование неустановившейся фильтрации в системе пласт - трещина ГРП**

Хабибуллин Ильдус Лутфурахманович, д.ф.-м.н.

e-mail: [khisamovartur@list.ru](mailto:khisamovartur@list.ru) стр. 113

Шахмаев Ришат Рафикович, аспирант 1 года обучения

Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Электрогидродинамические процессы в водном мостике**

Шайхитдинов Рамиль Зайниевич

e-mail: [arteban2014@gmail.com](mailto:arteban2014@gmail.com) стр. 114

## Колебания жидких гидрометеоров при движении с терминальной скоростью

*Габышев Дмитрий Николаевич*

*Сзакалл Миклош, Шербаков Дмитрий Васильевич, Федорец Александр Анатольевич, Дьячков Сергей Михайлович*

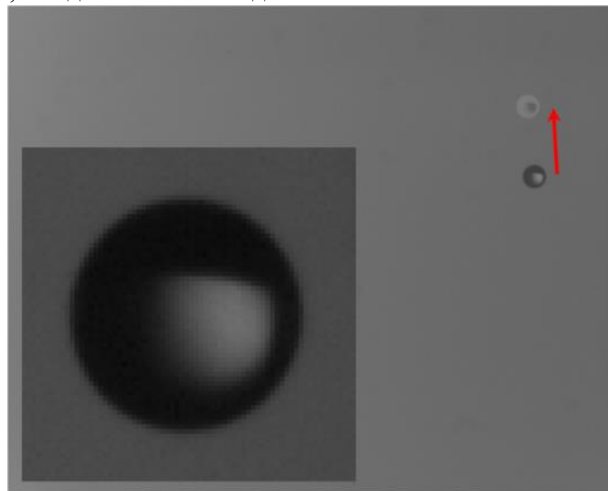
*Тюменский государственный университет*

*[gabyshev-dmitrij@rambler.ru](mailto:gabyshev-dmitrij@rambler.ru)*

Мельчайшие капли воды в земной атмосфере с числом Бонда менее единицы особенно чувствительны к сопротивлению воздуха. При этом такие капли встречаются повсеместно: образуются в больших количествах над океанами на естественных кристаллах морской соли и над индустриальными центрами на частицах антропогенных аэрозолей; формируют явление, известное как сухой дождь; переносят бактерии и споры вторичными микрокаплями при бомбардировке почвы крупными каплями дождя; обуславливают «запах дождя» при разнесении элементов почвы по аналогичному механизму; срываются с гидрофобных поверхностей листьев растений при капельной конденсации; генерируются человеческим организмом при чихании и кашле и т.д. Два основных последствия состоят в нежелательной облачности, снижающей инсоляцию и видимость объектов, а также в возможности распространения болезнетворных бактерий и вирусов. Отсюда важно как можно лучше понимать динамику микрокапель в атмосферном воздухе.

Для изучения поведения субмикронных капель воды диаметром от 400 до 700 мкм (который соответствует виду осадков, называемому моросью) была использована вертикальная аэродинамическая труба, расположенная в Университете Майнца, Германия [1]. В ней капли при температуре 21 °С левитировали в направленном вертикально вверх воздушном потоке с терминальной скоростью от 1.67 до 3.06 м/с, а число Рейнольдса в наблюдениях варьировалась, соответственно, от 46 до 162. Положение капель в пространстве фиксировалось скоростной видеокамерой (Motion ProX, Redlake, Inc.) с частотой 1000 fps (рис. 1). Данные наблюдений через облачный сервис отправлялись в Тюменский государственный университет, где с помощью специально написанной компьютерной программы (интерфейс C#, открытая библиотека OpenCV на C++) удалось распознать 8 из 14 видеозаписей: изображение левитирующей капли иногда было слишком размытым, так как та выходила из фокуса камеры слишком далеко. Тем не менее, даже такая небольшая выборка позволила получить некоторые предварительные выводы.

Капли остаются сферическими во все время наблюдений из-за поверхностного натяжения (исследование Рэлеевских осцилляций формы приведено в [2]). Координаты капли в пространстве — горизонтальная  $x$  и вертикальная  $y$ , соответственно, поперек и вдоль набегающего потока — анализировались с помощью быстрого дискретного преобразования Фурье. Точность анализа ограничивалась пикселизацией изображения (рис. 1), поэтому значимыми могли считаться только те пики на спектрах, которые превосходили своей высотой величину одного пикселя (которой соответствовало разрешение на уровне 12 мкм). По итогу в каждом наблюдении были обнаружены преимущественно одиночные пики, соответствующие частотам от 11.76 до 50.98 Гц с погрешностью  $\pm 1.96$  Гц, без выраженной зависимости от числа Рейнольдса. Амплитуда вертикальных колебаний оказалась неожиданно большой — дюжина и более пикселей, в то время как горизонтальные колебания совершались с амплитудой лишь несколько единиц пикселей. Присутствие вертикальных колебаний означает, что капля движется вдоль потока небольшими, но все же, рывками вблизи своей терминальной скорости, что довольно неожиданно.



*рис.1. Смещение капли диаметром 609 мкм в поле зрения видеокамеры за 0.1 с (по красной стрелке; негатив наложен на позитив) и типичная анализируемая капля с пикселизацией (увеличенный фрагмент).*

Далее к данным о положении капли в пространстве было применено преобразование Гильберта. Анализ устойчивости мгновенной частоты показал нам, что в пределах исследуемых экспериментальных диапазонов частота горизонтальных колебаний все же немного в среднем растет с увеличением числа Рейнольдса. Однако частота вертикальных колебаний снова не зависела от числа Рейнольдса и в среднем была почти постоянной, что, очевидно, наблюдалось из-за статистически довольно малой совокупности наблюдений.

Таким образом, капли дождя, выпадающие на землю, а также все иные микрокапли, образуемые вблизи земной поверхности в результате описанных в начале процессов, совершают колебания. Данные колебания обусловлены потоком среды, обтекающей капли, и именуется в англоязычной литературе “vortex- and flow-induced vibrations”. Полученные нами характерные значения частот этих колебаний составляют несколько десятков герц с амплитудой в десятки и даже более сотни микрометров. Такая прибавка к поступательному движению вдоль в среднем гладкой траектории приводит к тому, что движение мельчайших капель является неравномерным даже при достижении терминальной скорости. Это достаточно нетривиальный и до сих пор не встречающийся в литературе вывод. По результатам исследования подготовлена рукопись, находящаяся на этапе рецензирования [3]. На будущее требуется радикально увеличить количество проб наблюдений, чтобы преодолеть статистические ограничения и более надежно выяснить зависимость частоты колебаний капли от ее размера и числа Рейнольдса.

Исследование было выполнено при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (МК-332.2022.1.2) и Министерства науки и высшего образования РФ (AAAA-A20-120051490005-9).

Список публикаций:

- [1] Diehl K., Mitra S. K., Szakáll M., Blohn N., Borrmann S., and Pruppacher H. R. *The Mainz Vertical Wind Tunnel Facility — a Review of 25 Years of Laboratory Experiments on Cloud Physics and Chemistry // Wind Tunnels: Aerodynamics, Models and Experiments (ed. by J.D. Pereira), Nova Science Publ., New York, 2011. Pp. 69–92.*
- [2] Szakáll M., Mitra S. K., Diehl K., Borrmann S. // *Atmos. Res.* 2010. V. 97. No. 4. P. 416.
- [3] Gabyshev D. N., Szakáll M., Shcherbakov D. V., Fedorets A. A., Dyachkov S.M. *Oscillatory Signatures in the Raindrop Motion with a Terminal Velocity Relative to the Air Medium (на рецензии).*

## **Режимы электроконвекции в маломодовой модели при низких и высоких частотах электрического поля**

**Ильин Владимир Алексеевич**

*Пермский государственный национальный исследовательский университет*

[ilin1@psu.ru](mailto:ilin1@psu.ru)

Движение слабопроводящих жидкостей в электрическом поле привлекает внимание тем, что представляет собой способ прямого преобразования энергии электрического поля в энергию движения жидкой среды [1–3]. Поведение гидродинамических систем в электрическом поле имеет ряд особенностей, связанных с характером возникновения заряда в жидкости и взаимодействием его с внешним полем. Электрическое поле может привести к резонансным явлениям, связанным с резким понижением порога конвекции, усилением или ослаблением её интенсивности. С практической точки зрения знание законов действия электрического поля на конвективные течения актуально в связи с проблемой эффективного управления конвекцией, тепло- и массопереносом в различных технологических ситуациях, в частности, в электрогидродинамических насосах.

Основоположником электрогидродинамики в нашей стране принято считать Г. А. Остроумова [1]. На сегодняшний день вопросами электрогидродинамики занимается множество исследователей. Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ в этой области вплоть до настоящего времени объяснение электрогидродинамических эффектов недостаточно изучено, что порождает необходимость их дальнейшего изучения [3]. Непредсказуемость этих эффектов обусловлена нелинейным и сложным характером физико-химических процессов, что вызывает трудности их исследования.

В настоящей работе рассматривается действие электрокондуктивного механизма зарядообразования, вызванного зависимостью электропроводности жидкости от температуры. Считается, что границы конденсатора идеально тепло- и электропроводны, и нагреты до разной температуры. При рассмотрении поведения слабопроводящей жидкости в электрическом поле использовалось электрогидродинамическое приближение, в котором магнитные эффекты пренебрежимо малы по сравнению с электрическими.

В работе [4] получена восьмимодовая модель электроконвекции слабопроводящей жидкости, находящейся в переменном электрическом поле горизонтального слоя со свободными граничными условиями. В случае, когда время релаксации заряда много меньше характерного гидродинамического времени (заряд

мгновенно рассасывается в жидкости), получается пятимодовая модель электроконвекции. Настоящая работа является продолжением исследований [4].

Параметры жидкости при исследовании случая невесомости выбраны следующие [4]:  $Pr = 100$ ; волновое число  $k = 0.962$ , соответствующее минимуму нейтральной кривой, даёт значения геометрических параметров:  $b = 2.077$ ,  $d = 2.56$ . Система уравнений решалась численно методом Рунге-Кутты с постоянными начальными условиями или методом продолжения по параметру для различных значений электрического параметра  $e$  и частоты электрического поля  $\nu$ .

Первая часть исследования проведена для низких частот электрического поля. Вначале вычисления были проведены с постоянными начальными условиями. Например, при  $\nu = 0.05$  ниже критического значения электрического числа жидкость находится в равновесии, а при  $e = 67.81$  колебательным образом возникает конвекция и устанавливается периодический режим движения жидкости. Колебания состоят из отдельных «всплесков». Все частоты Фурье-спектра являются комбинацией внешней частоты и могут быть обобщены формулой:  $(2n+1)\nu$ , где  $n$  – целое число. Т. е. в спектре содержится частота внешнего поля и её нечётные гармоники. Это синхронные колебания. С ростом электрического параметра амплитуда синхронного режима растёт, затем он исчезает и устанавливается равновесие. При  $e = 69.38$  возникает синхронный режим второго типа, в его спектре содержатся чётные гармоники внешней частоты:  $2n\nu$ . Затем в некотором интервале параметров существует периодический режим, в спектре которого присутствует частота, равная половине внешней частоты, и её нечётные гармоники – это субгармонический режим. Вычисления с постоянными начальными условиями показали, что этот режим переходит в синхронный режим 2 типа.

При дальнейшем увеличении электрического параметра происходит бифуркация удвоения периода – возникает частота в два раза меньше, затем происходит ещё одно удвоение и так происходит до тех пор, пока не возникнет хаос. Это сценарий Фейгенбаума – переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода. При  $e = 69.87$  происходит переход к хаосу, при котором спектр Фурье становится сплошным.

После расчётов методом продолжения по параметру были обнаружены гистерезисные переходы между тремя режимами. Оказалось, что первый синхронный режим продолжает существовать при больших значениях параметра  $e$ . Затем он переходит к хаотическому режиму через перемежаемость.

В интервале параметров электрического числа от 67.81 до 68.58 существует только 1 режим, от 68.59 до 69.37 конкурируют 1 режим и равновесие, от 69.38 до 69.56 сосуществуют режим 1 и 2. В интервале от 69.57 до 69.61 конкурируют 3 режима: два синхронных (1 и 2 режима) и один субгармонический (3 режим). Переход к хаосу в 3 субгармоническом режиме происходит при  $e = 69.607$  по сценарию Фейгенбаума. В интервале от 69.62 до 69.94 конкурируют 1 и 2 синхронные режимы. При 69.95 режим 2 переходит в режим 1.

Вторая часть исследования проведена для относительно высоких частот электрического поля. В этом случае картина поведения меняется. При расчётах с разными частотами были обнаружены различные области с субгармоническим поведением. Подробнее была исследована область, в которой частоты подчиняются закономерности:  $\nu_n = \nu_0(2n-1)/2$ , где  $n$  – целое число. Т. е. в спектре содержится частота равная половине внешней частоты и её высшие гармоники.

При частоте, например,  $\nu = 5$  на границе устойчивости конвекция возникает квазипериодическим образом, затем квазипериодический режим колебаний сменяется субгармоническим режимом колебаний, который сменяется квазипериодическим режимом, а затем возникает хаос через квазипериодичность. При другой частоте при переходе из субгармонических колебаний хаос возникает через перемежаемость.

Список публикаций:

- [1] *Остроумов Г. А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М.: Физматгиз. 1972. 292 с.*
- [2] *Болога М. К., Гросу Ф. П., Кожухарь И. А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.*
- [3] *Жакин А. И. Электродинамика// УФН. 2012. Том 182, №5. С. 495–520.*
- [4] *Картавых Н. Н., Смородин Б. Л., Ильин В. А. Параметрическая электроконвекция слабопроводящей жидкости в горизонтальном плоском конденсаторе// Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2015. Т. 148, вып. 1 (7). С. 178–189.*

## Математическое моделирование процесса гравитационного осаждения полидисперсной эмульсии

**Мухутдинова Айгуль Айратовна**

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН,*

*Башкирский государственный университет*

*Киреев Виктор Николаевич, к.ф.-м.н.*

[muhutdinova18@gmail.com](mailto:muhutdinova18@gmail.com)

В настоящее время эмульсии встречаются во многих отраслях промышленности. Например, водонефтяные эмульсии, которые образуются самопроизвольно в процессе добычи нефти [1]. Вследствие экономических и эксплуатационных причин нефтяные эмульсии необходимо отделять друг от друга, для извлечения как водной, так и (нефтяной) масляной фазы. Для разработки более эффективного оборудования по обработке эмульсий важно хорошо понимать факторы, влияющие на образование и стабильность эмульсии. Адекватное понимание факторов и механизмов, влияющих на размер капель, стабильность и осаждение, все еще требует новых разработок, исследований и открытий. Это показывает, как важно изучать и улучшать методы разрушения эмульсий. Для нахождения решения рассматриваемых задач большое значение имеют физико-химические свойства о природе дисперсных систем и поверхностных явлений происходящих в них.

В работе рассматривается процесс гравитационного осаждения обратных монодисперсных и полидисперсных эмульсий типа вода в масле. Математическая модель состоит из уравнения неразрывности и уравнений Навье – Стокса, в которых учитывается сила поверхностного натяжения на поверхности капель [2], уравнения переноса.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{u} &= 0, \\ \rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) &= -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g} + \vec{F}_{st}, \\ \vec{F}_{st} &= \sigma k \nabla \alpha, \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \alpha &= 0 \end{aligned}$$

где  $p$  - давление,  $\rho$  - плотность жидкости,  $u$  - вектор скорости жидкости,  $\alpha$  - значение фазы,  $\mu$  - динамическая вязкость,  $g$  - ускорение свободного падения,  $k$  - кривизна поверхности.

Для численного решения уравнений математической модели используется открытая интегрируемая платформа OpenFOAM [3]. Метод Volume of fluid method позволяет отслеживать форму и положение поверхности в целом.

В результате численного моделирования обнаружено, что при концентрации дисперсной фазы меньше 2% время полного расслоения монодисперсных и полидисперсных эмульсий с каплями одинакового диаметра практически одинаково. Под диаметром капель в случае полидисперсной эмульсии понимается среднеобъемный диаметр капель. При больших концентрациях дисперсной фазы полидисперсная эмульсия расслаивается медленнее, чем соответствующая монодисперсная (Рис. 1). Из Рис. 1 также видно, что для крупнодисперсных эмульсий (диаметр капель 800 мкм) наибольшее время расслоения наблюдается для пятипроцентных эмульсий. При дальнейшем увеличении концентрации интенсифицируется процесс коалесценции капель и время расслоения обоих типов эмульсий уменьшается.

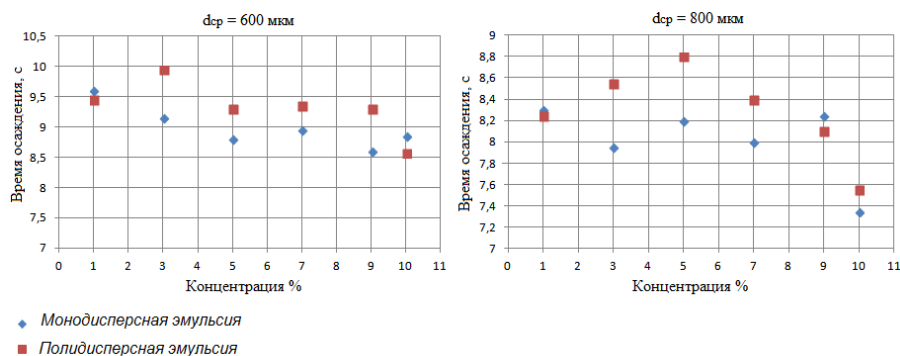


рис. 1. Зависимость времени осаждения от концентрации эмульсии и диаметра капель

Список публикаций:

- [1] Crabtree M. Eslinger D. Fletcher P. Miller M. Johnson A. King G. *Fighting Scale // Oilfield*. 1999. P. 15  
[2] Левич В.Г. *Физико-химическая гидродинамика*. М.: Институт компьютерных исследований, 2016. – 708 с.  
[3] *Openfoam programmer's guide*. <http://www.foamfd.org/Nabla/guides/ProgrammersGuide.html>, 2007.

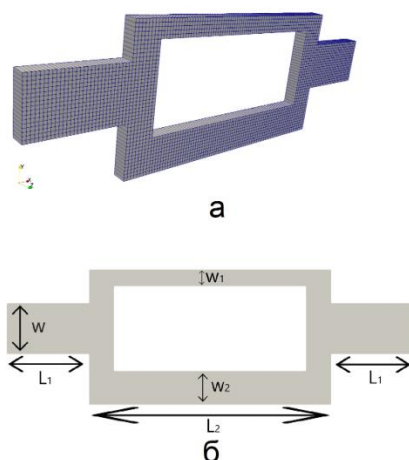
## Численное моделирование защемления остаточной нефти в модели порового дублета

**Фазлетдинов Спартак Уралович**  
Баширский государственный университет  
Питюк Юлия Айратовна  
[spartak.fazlet@gmail.com](mailto:spartak.fazlet@gmail.com)

Как известно, вытеснение из пористой среды одной фазы другой несмешивающейся фазой происходит под действием капиллярных и вязких сил. Соотношение этих сил определяет мобильность остаточной нефти в сети поровых каналов. Многие авторы использовали модель порового дублета для объяснения захвата остаточной нефти и распределения жидкости в сети порового пространства [1-3]. Практическое применение результатов этих исследований включает определение относительной проницаемости коллектора, оценку параметров заводнения для эффективного вытеснения изначально связанной нефти и мобилизацию захваченной остаточной нефти в гидрофильных коллекторах.

Данная работа посвящена численному исследованию эффекта захвата остаточной нефти в модели порового дублета. Для численного моделирования использовался пакет OpenFOAM с многомасштабным решателем hybridPorousInterFoam [4]. Суть многомасштабности решателя заключается в том, что математическая модель включает уравнение Навье-Стокса для описания многофазного течения в микроканалах пористой среды и уравнение Дарси для описания многофазной фильтрации в пористых областях между микроканалами. Данные области определяются заданием пористости  $\varphi$  в расчетных ячейках, так, для микроканала задается  $\varphi = 1$ , для матрицы пористой среды определяется  $0 < \varphi < 1$ . Такой подход позволяет моделировать многофазную фильтрацию в моделях цифрового ядра, включая образцы двойной пористости.

Рассматривалась двухфазная фильтрация в модели порового дублета [5]. На *рис.1* представлена 2D геометрия порового дублета и дискретизация расчетной области. Общая длина дублета  $L = 2L_1 + L_2 = 1480$  мкм, длина отрезков  $L_1 = 300$  мкм,  $L_2 = 880$  мкм, ширина входного и выходного каналов  $w = 180$  мкм, размеры ответвленных каналов в центральной части  $w_1, w_2$  варьировались в отношении 1:2, 1:3 и 1:4 (*рис.1,б*). Пористость внутренней части порового дублета задавалась равной 1, на боковых и внутренних границах канала задавались условие прилипания на скорость и условие симметрии на давление. Скорость на входном сечении канала задавалась постоянной и равной  $v = 0.0093$  м/с, на выходном сечении канала поддерживалось постоянное давление.



*рис.1. Геометрия (б) и дискретизация расчетной области (а) модели порового дублета.*

Изначально модель была заполнена нефтью (плотность  $\rho_o = 800$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость  $\mu_o = 60$  мПа·с), которая вытеснялась водой ( $\rho_w = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu_w = 1$  мПа·с). На *рис. 2* представлены результаты численного моделирования защемления нефти в канале меньшей ширины для соотношения ширины каналов

$w_1/w_2$  равной  $1/2$  (рис.2(а)) и  $1/4$  (рис.2(б)). Из рисунка видно, что при уменьшении соотношения размеров поровых каналов дублета большее количество вытесняемой жидкости остается заблокированной в более узком канале. Это связано с увеличением влияния капиллярных сил в узком канале.

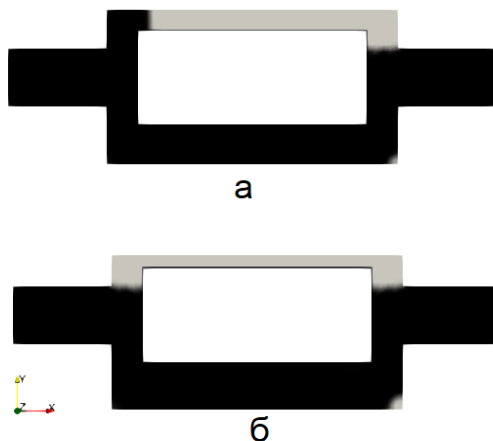


рис.2. Вытеснение нефти (серый цвет) водой (черный цвет) в поровом дублете для  $w_1/w_2 = 1/2$  (а) и  $w_1/w_2 = 1/4$  (б)

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

Список публикаций:

- [1] Moore, T. F., and Slobod, R. L. // *Dependence of Residual Oil Mobilization on Wetting and Roughness*, *Prod. Monthly* 20, 20 (1956).
- [2] Rose, W., and Witherspoon, P. A. // *Trapping oil in a pore doublet*, *Prod. Monthly* 21, 32 (1956).
- [3] Stegemeier, G. L. // *Relationship of trapped oil saturation to petrophysical properties of porous media*, SPE 4754, presented at the SPE-AIME Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, OK, April 22-24, 1974
- [4] Francisco J. Carrillo, Ian C. Bourg, Cyprien Soulaire // *Multiphase flow modeling in multiscale porous media: An open-source micro-continuum approach*, *Journal of Computational Physics: X* (Volume 8, September 2020),
- [5] Ehrlich, R., and Crane, F. E. // *The effect of pore-structure on hysteresis in relative permeability and capillary pressure: Pore-level modeling*, *Soc. Pet. Eng. J.* 9,221 (1969).

## **Численное моделирование сортировки частиц по размеру в областях с детерминированным боковым смещением**

**Фахретдинова Алсу Леонидовна**

*Киселева Анна Александровна*

*Башкирский государственный университет*

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

[A.L.Fakhretdinova@yandex.ru](mailto:A.L.Fakhretdinova@yandex.ru)

Микрофлюидика – технология, с помощью которой возможны манипуляции с жидкостями на микроуровне, где такие явления, как диффузия, сопротивление жидкости и ламинарный поток, могут влиять на производительность микрофлюидных систем [1]. С помощью микрофлюидных платформ возможно выделение, фракционирование и очистка клеток. В области сортировки частиц и клеток микрофлюидика может предложить точные и высокопроизводительные методы, которые сопоставимы с обычными методами. Их можно классифицировать как активные и пассивные сортировки. Активные методы основаны на внешних силовых полях, таких как акустические или магнитные, в то время как пассивные методы полагаются только на геометрию канала и присущие гидродинамические силы для функциональности.

В данной работе будет рассматриваться одна из разновидностей пассивных методов - детерминированное боковое смещение (DLD). Детерминированное боковое смещение является мощным механизмом для высокоточной непрерывной сортировки по размеру, оно полагается только на геометрию канала и присущие гидродинамические силы. Устройство состоит из массивов столбов, через которые частицы меньшего, чем критический радиус,  $R_k$ , движутся вместе с потоком (слева на рис. 1 поток огибает столб и ограничена пунктирными линиями), а частицы большего, чем критический радиус, движутся в направлении, определяемом устройством. Для твердых сферических частиц работа устройства проста, однако в реальности



частицы могут являться мягкими и несферическими, и их деформируемость и форма влияют на траектории частиц в устройствах DLD. Критический радиус,  $R_c$ , в свою очередь, зависит от геометрии массива, а эффективный размер несферической частицы,  $R_{эфф}$ , зависит от ее ориентации при прохождении между двумя столбами. В [3] изучалось влияние изменения доли сдвига и зазора на критический размер частиц.

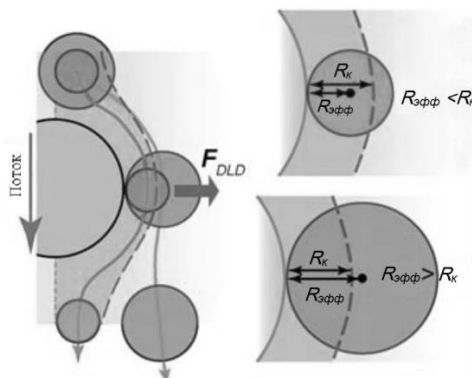


рис.1. Механизмы разделения частиц в структурах DLD [2].

Примерами применения DLD являются фракционирование компонентов крови, выделение раковых клеток из клеток крови, отделение паразитов, выделение внеклеточных везикул, сортировка на основе деформируемости в эритроцитах и тромбоцитах. Эти возможности позволяют нам работать с широким спектром приложений DLD. Так, например, в [4] использовалась модель DLD с открытым каналом и бумажного капиллярного насоса для выделения деформируемых раковых клеток.

Данная работа посвящена численному исследованию особенностей сортировки деформируемых частиц в потоке вязкой жидкости в микроканалах с DLD. Динамика системы описывается уравнениями Стокса. 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 найти численное решение этого уравнения.

В рамках данного исследования проведены расчеты течения вязкой жидкости в системе детерминированного бокового смещения с использованием ускоренного метода граничных элементов. Варьировалась форма элементов, составляющих DLD, их пространственное расположение. Рассмотрены случаи столбиков круглого и шестиугольного поперечного сечения. Получены соответствующие картины течений, распределение продольной и поперечной скоростей при изменении угла воздействия потока (рис. 2).

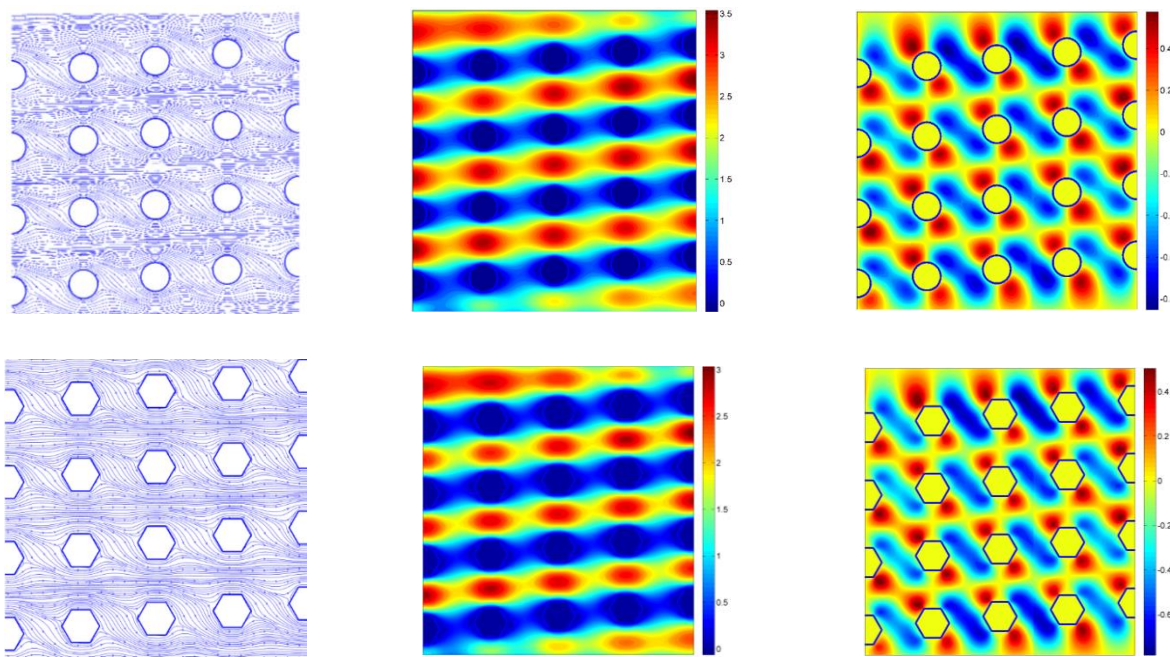


рис.2. Линии тока, продольная и поперечная компоненты скорости (слева направо) в DLD структуре с цилиндрическими и шестиугольными элементами.



Список публикаций:

- [1] J.McGrath, M.Jimenez, H.Bridle. // *Deterministic lateral displacement for particle separation: a review. Lab Chip*, 2014, 14(21), 4139–4158
- [2] J.P.Beech, S.H.Holm, K.Adolfsson, J.O.Tegenfeldt. // *Sorting Cells by Size, Shape and Deformability, Lab Chip*, 2012, 12, 1048–1051
- [3] David W. Inglis, John A. Davis, Robert H. Austinb and James C. Sturm // *Critical particle size for fractionation by deterministic lateral displacement. Lab on a Chip*, 2006, 6(5), 655–658
- [4] Trung S. H. Tran. // *Deterministic Lateral Displacement for Cell Sorting*, 2017

## **Моделирование неустановившейся фильтрации в системе пласт - трещина ГРП**

**Хисамов Артур Альфирович**

*Башкирский государственный университет*

*ООО «РН-БашНИПИнефть»*

*Хабибуллин Ильдус Лутфурахманович, д.ф.-м.н.*

*[khisamovartur@list.ru](mailto:khisamovartur@list.ru)*

Гидравлический разрыв пласта, заключающийся в создании трещин, пересекающихся со скважинами, в настоящее время является одним из основных методов интенсификации добычи трудноизвлекаемых запасов углеводородов. Наличие трещин гидроразрыва приводит к существенным изменениям геометрии и динамики процесса фильтрации. Поэтому является актуальным математическое моделирование процессов фильтрации в пласте с трещиной гидроразрыва. Эти модели достаточно полно разработаны в стационарном приближении. Нестационарные процессы распределения давления исследованы в основном применительно к гидродинамическим методам исследования скважин, которые охватывают ограниченный интервал пространственно-временных изменений давления (расстояния порядка радиуса скважины и времени намного меньше, чем характерное время фильтрации). Коллектора с трудноизвлекаемыми запасами, как правило, характеризуются малой проницаемостью и большой вязкостью нефти. В таких коллекторах, в которых в основном и реализуется гидроразрыв пласта, продолжительность нестационарных процессов перераспределения давления может быть одного порядка с характерным временем фильтрации между скважинами [1]. Поэтому представляет интерес развитие теории нестационарной фильтрации в пластах с трещинами ГРП. В работе представлены новые аналитические решения задачи о нестационарном распределении давления в пласте, пересеченной вертикальной трещиной гидроразрыва при краевых условиях первого, второго и третьего рода на скважине. Решения задач построены методом преобразований Лапласа.

Создание в пласте вертикальных трещин, пересекающихся со скважинами, является одним из эффективных методов интенсификации добычи нефти и газа из малопроницаемых коллекторов. Гидродинамическая связь пласта и скважины, как правило, реализуется только через трещину гидроразрыва. В зависимости от соотношений проницаемостей пласта и трещины, соотношений длины трещины и характерного размера пласта меняются геометрия и интенсивность фильтрационного потока в системе пласт-трещина-скважина. Модели таких фильтрационных потоков достаточно полно развиты в приближении стационарной фильтрации. Нестационарные аналитические модели рассматриваются в основном применительно к задачам гидродинамического исследования скважин и пластов, в которых определяются зависимости от времени дебита скважины или давления на забое скважины, распределения давления в трещине и в пласте не рассматриваются. В то же время, в коллекторах с трудноизвлекаемыми запасами, за счет малой проницаемости пласта и большой вязкости нефти, продолжительность нестационарных процессов распределения давления может быть одного порядка с характерным временем процесса фильтрации. Поэтому актуальным является исследование нестационарных моделей фильтрации в системе пласт-трещина с точки зрения развития общей теории этих процессов, а также для развития методов гидродинамических исследований пластов, методов оценки дебита скважин с трещиной гидроразрыва [2-5].

Представлены новые аналитические решения, описывающие нестационарную фильтрацию жидкости в пластах с вертикальной трещиной гидроразрыва. Полученные решения позволяют исследовать распределения давления и скорости фильтрации в системе пласт-трещина при задании на скважине граничных условий первого, второго и третьего родов. Эти решения и их асимптотические представления имеют значимость для теоретического обоснования методов гидродинамических исследований пластов и для оценки дебита скважин с трещиной гидроразрыва. По полученным в работе выражениям можно построить типовые кривые, описывающие изменение давления на забое скважины или дебита скважины со временем. Сопоставительный анализ этих кривых с данными скважинных исследований позволяет определять коллекторские свойства

трещины и пласта. Использование решений в случае нагнетательных скважин позволяет описать динамику заводнения пластов с трещинами

Список публикаций:

- [1] Cinco-Ley H., Samaniego V.F. Transient Pressure Analysis for fractured wells // *J. Petrol. Technol.* – 1981. –V.33, N9. – P. 1749-1766.
- [2] Хабибуллин И.Л., Хисамов А.А. Моделирование нестационарной фильтрации вокруг скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва // *Вестник Башкирского университета*. 2017. Т. 22. №2. С. 309-314.
- [3] Хабибуллин И.Л., Хисамов А.А. К теории билинейного режима фильтрации в пластах с трещинами гидроразрыва // *Вестник Башкирского университета*. 2018. Т. 23. №4. С. 958-963.
- [4] Нагаева З.М., Шагапов В.Ш. Об упругом режиме фильтрации в трещине, расположенной в нефтяном или газовом пласте // *ПММ*. 2017. том 81, вып. 3. С. 319-329.
- [5] Хабибуллин И.Л., Хисамов А.А. Нестационарная фильтрация в пласте с трещиной гидроразрыва // *Механика жидкости и газа*, Известия Российской академии наук, номер 5, 2019 г.

## Электрогидродинамические процессы в водном мостике

**Шахмаев Ришат Рафикович**

*Башкирский государственный университет*

*Шайхитдинов Рамиль Зайниевич, д.ф.-м.н.*

[arteban2014@gmail.com](mailto:arteban2014@gmail.com)

Объектом исследования является водный мост (ВМ), возникающий между двумя стеклянными чашами с дистиллированной воды под действием приложенного постоянного высоковольтного напряжения между электродами, погруженными в жидкость [1]. В результате исследования, выявлен ряд характеристики водного моста (ВМ). Так, например, мост диаметром от 1 до 3 мм и длиной до 25 мм стабильно существует около часа в атмосфере воздуха, кислорода и азота, а в среде гелия и углекислого газа наблюдаются только разрывы разряда между стеклянными чашами [2]. Одной из экспериментально наблюдаемых особенностей ВМ является транспортировка жидкости через мостик; причем, с применением лазерного доплеровского анемометра обнаружено винтовое вращение внешнего слоя воды вдоль продольной оси. Установлено, что после формирования ВМ первоначально общий поток жидкости через мостик направлен от анода к катоду. По истечению нескольких минут направление потока меняется на противоположное и далее наблюдается периодический повтор инверсии за все время существования ВМ. Это периодическое реверсирование потока является установившейся чертой мостика, как полагают [2], обусловлено гидростатическим давлением, возникающим из-за разных уровней воды в стаканчиках.

Эксперименты проводились на аналогичной установке [1]. Дистиллированная вода объемом 60 г наливалась в чашки Петри, одна из которой была установлена на электронные весы с точностью измерений 0.01 г, а другая – на подставке с регулируемой высотой подъема. Диаметры электродов менялись от 0,2 до 6,0 мм.

На рисунке приводятся графики временных зависимостей изменения массы воды в чашке с катодом (массовый расход) при различных диаметрах электродов. Как видно, в рассматриваемом временном интервале наблюдаются области монотонного (кривая 1) и немонотонного (кривая 2) изменений массообмена между чашками. Как показывают эксперименты, если при одинаковых диаметрах электродов (симметричная система) поток воды через ВМ сразу после его формирования направлен в сторону катода, то для несимметричной системы электродов в начальном временном интервале жидкость течет от электрода с меньшим диаметром к электроду с большим диаметром независимо от их полярности.

Для симметричной системы электродов направленность потока в катодную часть мостика можно объяснить следующим образом. Очевидно, что процесс массопереноса обусловлен электропроводностью жидкости, т.е. наличием в среде ионов и действием на них электрического поля. Носителями тока в водной среде являются ионы гидроксония  $\text{H}_3\text{O}^+$  (протоны  $\text{H}^+$ ) и гидроксила  $\text{OH}^-$ , образованные диссоциацией воды по схеме  $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$  с переходом протона от одной молекулы к другой. Поскольку подвижность  $\text{H}_3\text{O}^+$  почти вдвое превышает подвижность  $\text{OH}^-$ , то следует ожидать, что при симметричных электродах после формирования ВМ общий поток воды будет направлен в сторону катода. Направленность потока от электрода меньшего диаметра к электроду с большим диаметром мы объясняем тем, что напряженность электрического поля, как известно, зависит от диаметра цилиндра  $d$  примерно  $E \sim d^{-1}$ , вследствие чего эмиссия зарядов облегчена в области сильных электрических полей. Однако дрейфовое движение ионов не может обеспечить массоперенос жидкости в объеме, наблюдаемом в экспериментах. Действительно, как показывают проведенные нами расчеты, силы, действующие на молекулы воды при бомбардировке их протонами, рассчитанные на основе закона сохранения импульса, примерно на 4 порядка меньше сил, действующих со стороны

электрического поля на ионы  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{OH}^-$ . Поэтому можно утверждать, что если электропроводность в дистиллированной воде обусловлена протонами, то за транспорт жидкости через ВМ отвечают ионы гидроксония и гидроксид-анионы. Это также подтверждается тем, что измеренный нами массовый расход жидкости  $\Delta m/\Delta t$  имеет значение порядка  $10^{-2}$  г/с, в то время как рассчитанная согласно закону электролиза Фарадея величина равна примерно  $4 \cdot 18^{-8}$  г/с. В таком случае логично предположить, что массоперенос жидкости может быть вызван увлечением молекул жидкости ионами воды. Кроме того, на основании элементарных расчетов нами определена роль и эффективность увлечения молекул анионами и катионами в водной среде. Для этого согласно простой гидродинамической модели в предположении, что ион, имеющий дрейфовую скорость движения  $u_0$ , увлекает за собой молекулы вязкой жидкости перпендикулярно направлению  $z$  определено уменьшение скорости движения увлекаемого слоя жидкости до движущегося с такой же скоростью соседнего иона. Рассчитанные с учетом подвижностей зарядов в водной среде, относительные скорости молекул воды на половине расстояния между двумя параллельно движущимися соседними ионами  $u(l_i/2)/u_0$  равны 0.94 и 0.97 для катионов и анионов соответственно. По этой причине можно утверждать о коллективном характере движения молекул воды, которые увлекаются ионами  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{OH}^-$ , образуя тем самым электрогидродинамическое течение жидкости. Обратный поток обусловлен аномально быстрым уходом протонов на катод, вследствие чего в чашке с катодом возникает избыточный отрицательный объемный заряд, а у электрода – слой положительного заряда. Это приводит к инверсии потока от катода к аноду.

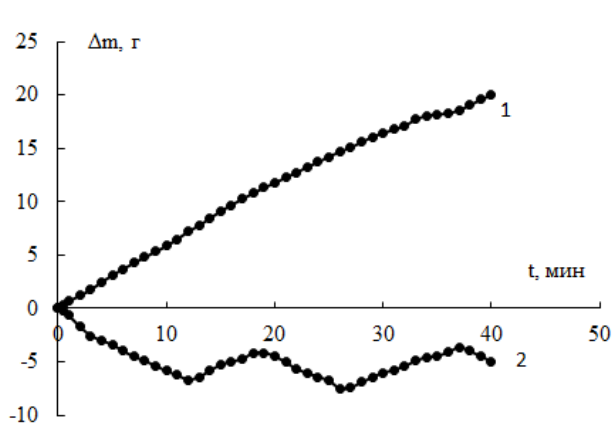


рис. Зависимость массы воды, перетекающей через ВМ, от времени при различных диаметрах электродов, мм:  
 1 -  $r_a=1,4$  и  $r_k=1,8$ ; 2 -  $r_a=1,8$  и  $r_k=1,4$ .

В случае несимметричной системы электродов активным является электрод меньшего диаметра, поскольку у его поверхности напряженность электрического поля больше. Вследствие этого сразу после формирования ВМ поток жидкости направлен к электроду большего диаметра независимо от полярности напряжения между электродами.

Инверсию массопереноса через мостик можно объяснить следующим образом. В процессе токопрохождения из-за аномальной электропроводности протоны быстро достигают поверхности катода, где они, нейтрализуясь, выделяются в виде водорода. Действительно, в процессе проведения экспериментов на поверхности катода появлялись пузырьки газа независимо от направления массопереноса жидкости, что наблюдалось и в других работах [1, 2]. Вследствие быстрого ухода протонов на отрицательный электрод жидкость в емкости с катодом приобретает избыточный отрицательный объемный заряд, что подтверждается повышением показателя pH воды в катодном стакане [1]. С инверсией массопереноса меняется направление осевой составляющей тангенциальной скорости вращения внешнего слоя ВМ в сторону анода. Таким образом, прямой поток А→К вызывается увлечением молекул воды ионами гидроксония, а обратный – ионами гидроксила. Наблюдаемое реверсирование потока жидкости через ВМ обусловлено периодическим образованием объемного заряда в емкости с катодом и его нейтрализации пространственным перераспределением зарядов.

Список публикаций:

- [1] E.C. Fuchs, K. Gatterer, G. Holler and J. Woisetschläger // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V.41, P. 185502.  
 [2] Fuchs, E.C.; Woisetschläger, J.; Wexler, A.D.; Pecnik, R.; Vitiello, G. // *Water* 2021. V 13, P. 602.

