

УДК 532.5

Развитие структурной формы двухкомпонентного однофазного потока в канале

В. С. Волков¹, М. Р. Королева², А. А. Шумихин²

¹ Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Россия, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, 7

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

Аннотация. Данная работа направлена на численное исследование гидродинамики двухкомпонентной эмульсии вода-масло с целью изучения особенностей развития структурной формы потока по длине канала. Исследование проводится на основе математического моделирования потоков двухкомпонентной несжимаемой жидкости в канале смешения. Решение основных уравнений двухкомпонентной среды проводится с использованием алгоритмов openFoam в нестационарной постановке. Показано, что на протяжении всего канала происходит непрерывная перестройка течения. Структура потока меняется от гладкого стратифицированного течения до пробкового режима движения. Полный сценарий развития выглядит следующим образом: гладкое стратифицированное → волновое стратифицированное → смешанное стратифицированное → снарядное. Показано, что на нижней стенке канала формируется тонкий масляный слой переменной толщины. Изменение напряжения трения в данном слое соответствует структурной форме течения. Смешанный стратифицированный и снарядный режимы движения эмульсии вносят пульсации в характер изменения напряжения трения на стенке и давления. Кроме того пробковый режим течения характеризуется уменьшением скорости снижения давления.

Ключевые слова: двухкомпонентная среда, вода, масло, численное моделирование, VOF метод.

✉ Мария Королева, e-mail: koroleva@udman.ru

Dynamics of the Flow Pattern of a Two-Component Single-Phase Flow in a Channel

Vladimir S. Volkov¹, Maria R. Koroleva², Andrey A. Shumihin²

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russian Federation)

² Udmurt Federal Research Center UB RAS (34, T. Baramzina St., Izhevsk, 426067, Russian Federation)

Summary. In the present work the hydrodynamics of a two-component water-oil emulsion – is studied by numerical methods. The dynamics of the flow pattern of the water-oil mixture flow in a channel is investigated. The current study is carried out on the basis of the mathematical modeling of the flows of a two-component incompressible viscous liquid in a mixing T-shape channel. The length of the channel mixing section is 5 meters, and its height is 0.25 meters. The solution of the basic equations of a two-component medium is carried out using the openFoam algorithms in a non-stationary formulation. The solution is based on the SIMPLE algorithm and uses the volume of fluid (VOF) approach including the effect of surface tension. The following assumptions have been made. Firstly, the density and viscosity of water and oil are constant. Secondly, the flow is two-dimensional. Thirdly, the surface tension on the phase boundary between water and oil is constant. And, fourthly, a one-speed model of the emulsion motion is used. The detailed distributions of the main flow parameters (velocity, pressure, volume fraction) have been obtained. The simulation results show a continuous restructuring of the flow throughout the entire channel. The flow structure changes from a smooth stratified flow to a slug flow. Briefly, the scenario of the flow-structure development is as follows: smooth stratified flow → wave stratified flow → mixed stratified flow → slug flow. It is shown that a thin oil layer with variable thickness is formed on the bottom wall of the channel. The change of the velocity profile along the channel was studied. It transforms due to the significant difference between the water and oil viscosity and correlates with the local flow pattern. Also, the wall stress tension and pressure distribution along the bottom channel wall and the channel middle line, respectively, have been obtained. Mixed stratified and slug modes of emulsion introduce pulsations into the wall shear stress and pressure plots. In addition, the slug flow regime is characterized by a decrease in the rate of the pressure drop.

Keywords: two-component medium, water, oil, numerical simulation, VOF method.

✉ Maria Koroleva, e-mail: koroleva@udman.ru

ВВЕДЕНИЕ

Многокомпонентные течения достаточно часто встречаются как в природе, так и технических устройствах. Компоненты потока под действием внешних и внутренних динамических нагрузок могут перемешиваться или разделяться, формируя, таким образом, гомогенные, коллоидные или гетерогенные смеси. Частным случаем многокомпонентных однофазных сред являются двухкомпонентные смеси, к которым относятся, например, водонефтяные и водомасляные эмульсии. Водонефтяная эмульсия образуется во время добычи нефти при подъеме из скважины. Эмульсии воды и масла широко используют в технологиях получения топлив, для увеличения нефтеотдачи пластов, нагнетательных и добывающих скважин, гидравлического разрыва малопроницаемых газо- и нефтенесущих пластов, временной изоляции фильтруемости в призабойной зоне пластов и в процессах бурения скважин [1 – 3]. Кроме этого, водомасляные смеси, соответствующие по своим физическим и механическим характеристикам водонефтяным смесям, используются при калибровке измерительных устройств (расходомеры, влагомеры, плотномеры и т.п.), предназначенных для оценки параметров водонефтяных эмульсий. Показания таких приборов существенно зависят от структурной формы двухкомпонентного потока, т.е. от распределения компонент (вода-масло, вода-нефть и т.д.) в процессе их движения по каналам, которые весьма разнообразны и зависят от скорости смеси, от количественного соотношения и физических свойств компонент, от диаметра и угла наклона трубопровода [4]. От структуры потока, в свою очередь, зависят степень перемешивания, форма поверхности раздела компонент, характер взаимодействия компонент между собой и со стенками трубопровода и, следовательно, скорость относительного движения жидкостей и коэффициент гидравлического сопротивления потока в целом.

Получение эмульсий со стабильными физико-химическими характеристиками перед измерительными устройствами является актуальной задачей. Это позволит повысить точность измерений. Так, например, точность измерения обводненности нефти с использованием влагомеров, напрямую влияет на экономическую эффективность эксплуатации скважины. На основе показателя обводненности зависит показатель объема добываемого сырья. При этом данный показатель меняется в зависимости от месторождения, а также по мере эксплуатации отдельно взятой скважины. На показания приборов влияет режим движения эмульсии. В случае ламинарного слоистого течения показания влагомеров будут существенно отличаться от показаний при развитом турбулентном течении. На характер течения оказывает влияние место расположения влагомера в трубе. К этому добавляется тот факт, что измерения проводятся дискретно. В результате осредненные показатели далеки от реальных характеристик.

Учет влияния всех возможных внешних факторов на течение двухкомпонентных сред практически невозможен. Для равномерного перемешивания компонент в независимости от первоначальной структурной формы потока перспективным видится применение специальных устройств – диспергаторов, или их разновидностей, гомогенизаторов. Они измельчают и делают эмульсию однородной по всему объёму без риска дальнейшего расслоения. Установка такого оборудования позволит стабилизировать состав двухкомпонентной среды, а также проводить измерения обводненности в непрерывном режиме. Механические диспергаторы должны эффективно работать с любой исходной структурной формой потока.

Данная работа направлена на численное исследование гидродинамики двухкомпонентной эмульсии вода-масло с целью изучения особенностей развития структурной формы эмульсии. Исследование проводится на основе математического моделирования потоков двухкомпонентной несжимаемой жидкости канале смешения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Оценка структурной формы течения двухкомпонентной эмульсии вода-масло проводилась на основе течения смеси в Т-образном смешивающем канале (рис. 1). Подвод воды и масла осуществлялся через отдельные подводные каналы, таким образом можно было контролировать скорость подачи каждого компонента смеси. Общая протяженность канала составила 6 м, участки подвода имели длину 1 м, высота канала равнялась 0.025 м. Физические свойства, плотность и вязкость воды и масла соответственно: 1000 кг/м³, 1 мм²/с; 889 кг/м³, 120 мм²/с. Коэффициент поверхностного натяжения на поверхности вода-масло 0.024 Н/м [5].

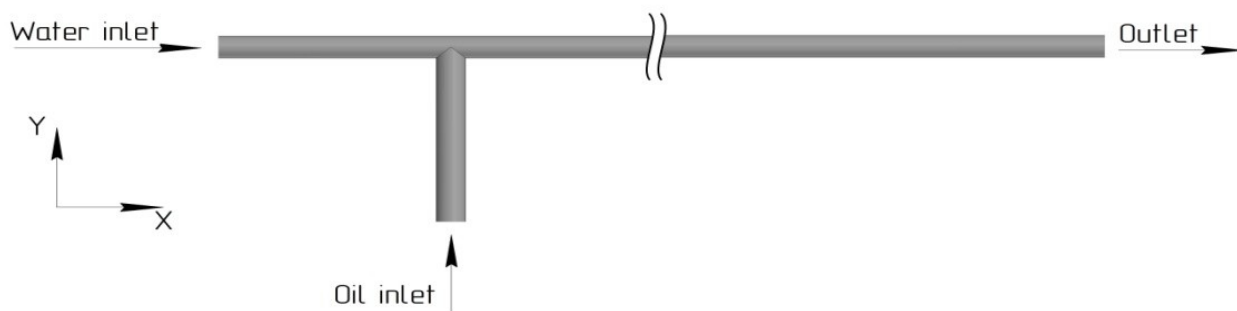


Рис. 1. Схема Т-образного канала

Fig. 1. T-shape channel

Исследование проводилось с использованием односкоростной модели течения эмульсии, на основе интегрирования уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой среды, расширенной слагаемыми, учитывающими двухкомпонентность среды:

$$\nabla \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p_{rg} + \rho \mathbf{g} + \nabla \tau + \mathbf{f}, \quad (2)$$

где $\mathbf{v}$ – вектор скорости жидкости, ρ – плотность жидкости, p – статическое давление, τ – тензор вязких напряжений, компоненты которого определяются согласно обобщенному закону Ньютона [6] с учетом динамического μ или кинематического ν коэффициентов вязкости, $\mathbf{g}$ – вектор ускорения свободного падения, направленный вниз, $\mathbf{f}$ – сила поверхностного натяжения, возникающая на поверхности раздела компонент смеси.

Содержание компонент определялось методом VOF [7] на основе объемной доли каждой компоненты эмульсии – воды (α_w) и масла (α_o). Уравнение переноса объемной доли α соответствует уравнению сохранения массы веществ:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + \nabla(\alpha_w \mathbf{v}) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_o}{\partial t} + \nabla(\alpha_o \mathbf{v}) = 0. \quad (4)$$

Содержание объемных долей веществ подчиняется уравнению: $\alpha_w + \alpha_o = 1$. При этом плотность и вязкость эмульсии определяются исходя из значений "чистых" жидкостей с учетом их объемной доли следующим образом

$$\rho = \alpha_w \rho_w + \alpha_o \rho_o, \quad (5)$$

$$\mu = \rho(\alpha_w \nu_w + \alpha_o \nu_o). \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) плотности и коэффициенты вязкости исходных веществ являются постоянными величинами.

Влияние поверхностного натяжения, возникающего на границе раздела между водой и маслом, оценивается согласно неразрывной модели силы поверхностного натяжения [8]:

$$\mathbf{f} = \sum_i \sum_{j \neq i} \sigma_{ij} k_{ij} \mathbf{d}_{ij}, \quad (7)$$

где σ_{ij} – поверхностное натяжение между i и j компонентами смеси. Кривизна границы раздела между компонентами определяется соотношением

$$k_{ij} = -\nabla \frac{\alpha_j \nabla \alpha_i - \alpha_i \nabla \alpha_j}{|\alpha_j \nabla \alpha_i - \alpha_i \nabla \alpha_j| + sf}, \quad (8)$$

где sf – это стабилизирующий коэффициент, который учитывает неравномерность вычислительной сетки $sf = \varepsilon / (\sum_{n=1}^N V_n / N)^{1/3}$, N – число расчетных ячеек, V_n – объем n ячейки, ε – малая величина порядка 10^{-8} .

Величина $\mathbf{d}_{ij} = \alpha_j \nabla \alpha_i - \alpha_i \nabla \alpha_j$ в уравнении (7) является индикаторной функцией, контролирующей проявление силового воздействия только вблизи поверхности раздела компонентов смеси.

Решение основных уравнений двухкомпонентной среды (1)–(8) проводилось с использованием алгоритмов Ansys, openFoam [9, 10] в плоской нестационарной постановке. Используемый при численном моделировании код multiphaseInterFoam является частью набора библиотек C++ OpenFOAM, предназначенных для решения многофазных задач механики жидкости и газа. Тестирование данного кода и его производных проводилось на примере решения тестовой задачи вращения твердого тела диска с надрезом [11], при моделировании генерации и коалесценции капель с использованием микрокапилляров в процессе эмульгирования [12], для решения задачи растекания сферической капли под действием сил поверхностного натяжения [13]. Все проведенные исследования показали, что данный метод является качественным инструментом исследования многокомпонентных сред.

Для идентификации структурной формы течения эмульсий необходимо определить положение поверхности раздела жидкостей, что во многом определяется качеством расчетной сетки. Граница контакта при использовании VOF метода определяет внутри каждой ячейки. Качество отображения поверхности раздела на сетках различной мощности хорошо видно на рис. 2. Далее все представленные результаты соответствуют сетке, состоящей из 1300000 ячеек.

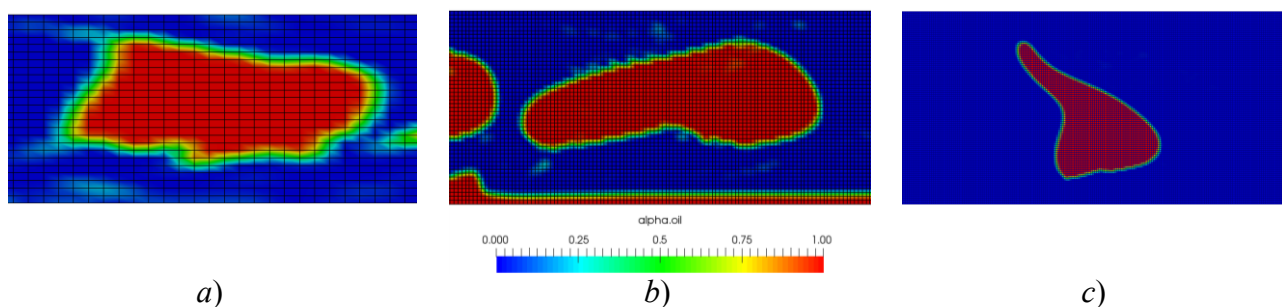


Рис. 2. Отображение поверхности раздела сред на сетках: а) 66000, б) 1300000, в) 2000000 ячеек

Fig. 2. Displaying the interface between media on the meshes: a) 66000, b) 1300000, c) 2000000 cells

Для описания характера движения двухкомпонентной смеси использовалась классификация, приведенная в работе [5]. Схемы структурных форм потока приведены на рис. 3. В общем случае все формы можно разбить на 6 укрупненных видов: снарядное течение (slug flow & plug flow), стратифицированное течение (smooth stratified flow & wavy stratified flow), смешанное стратифицированное течение (three layer flow & stratified mixed flow), дисперсионное течение масло в воде (dispersion of oil in water and water & dispersion of oil in water flow), дисперсионное течение вода в масле (dispersion of water in oil and water & dispersion of water in oil flow) и кольцевое течение (core annular flow & wavy annular flow).

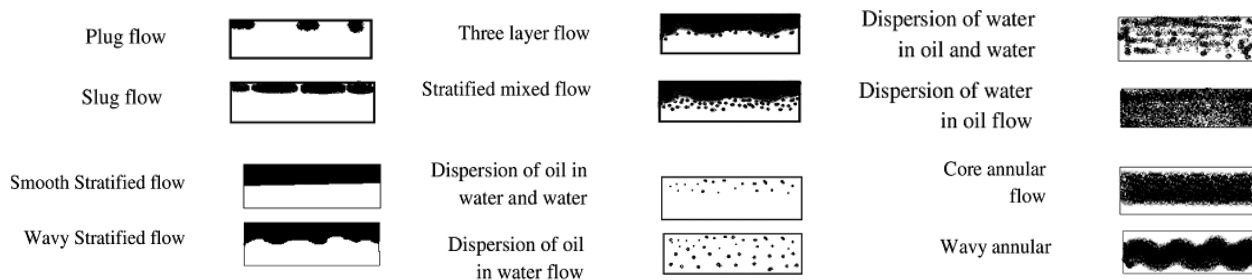


Рис. 3. Схемы структурных форм потока [5]

Fig. 3. Flow patterns of a two-component single-phase flow [5]

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для расчетной области (рис. 1) была построена блочно-структурированная сетка, содержащая 1300000 элементов. В качестве граничных условий на соответствующих входных границах задавалась скорость воды и масла, равные 0.3 и 0.2 м/с соответственно, на выходной границе – атмосферное давление. В начальный момент времени Т-образный канал был полностью заполнен водой, а граничные условия обеспечивали подачу масла снизу через вертикальный подводящий канал. Числа Рейнольдса на входе для воды и масла составили 7500 и 41.67 соответственно.

Полученная в результате проведенных исследований динамически изменяющаяся конфигурация течения в смешивающем канале показана на мгновенной картине течения (рис. 4).

Первоначально, начиная с точки соединения потоков, формируется гладкое стратифицированное течение (рис. 4, а). Здесь присутствует четкая горизонтальная граница раздела фаз между маслом снизу и водой сверху. Далее эта поверхность под действием сил поверхностного натяжения теряет устойчивость и формируется волновое стратифицированное течение (рис. 4, а). Затем течение перестраивается и можно наблюдать уже смешанное стратифицированное течение, в котором происходит всплытие отдельных объемов масла в верхнюю часть трубопровода (рис. 4, с-е). Этот участок самый протяженный и составляет примерно 3 метра. Видно, что нижний сплошной слой масла постепенно теряет свою однородность и начинает интенсивно перемешиваться с водой (рис. 4, f). На последних 2-х метрах канала формируются масштабные масляные пробки и на выходе течение приобретает пробковую конфигурацию (рис. 4 g, h).

Вдоль нижней стенки канала присутствует тонкий масляный слой, сформировавшийся в результате разрушения основного масляного слоя в зоне стратифицированного течения. Кинетической энергии масляного слоя недостаточно для преодоления сил сцепления со стенкой. Периодически возникающие гребни сразу прижимаются обратно к стенке. В результате этот слой имеет неравномерную толщину по длине, и фактически его динамика сравнима с волновым стратифицированным течением.

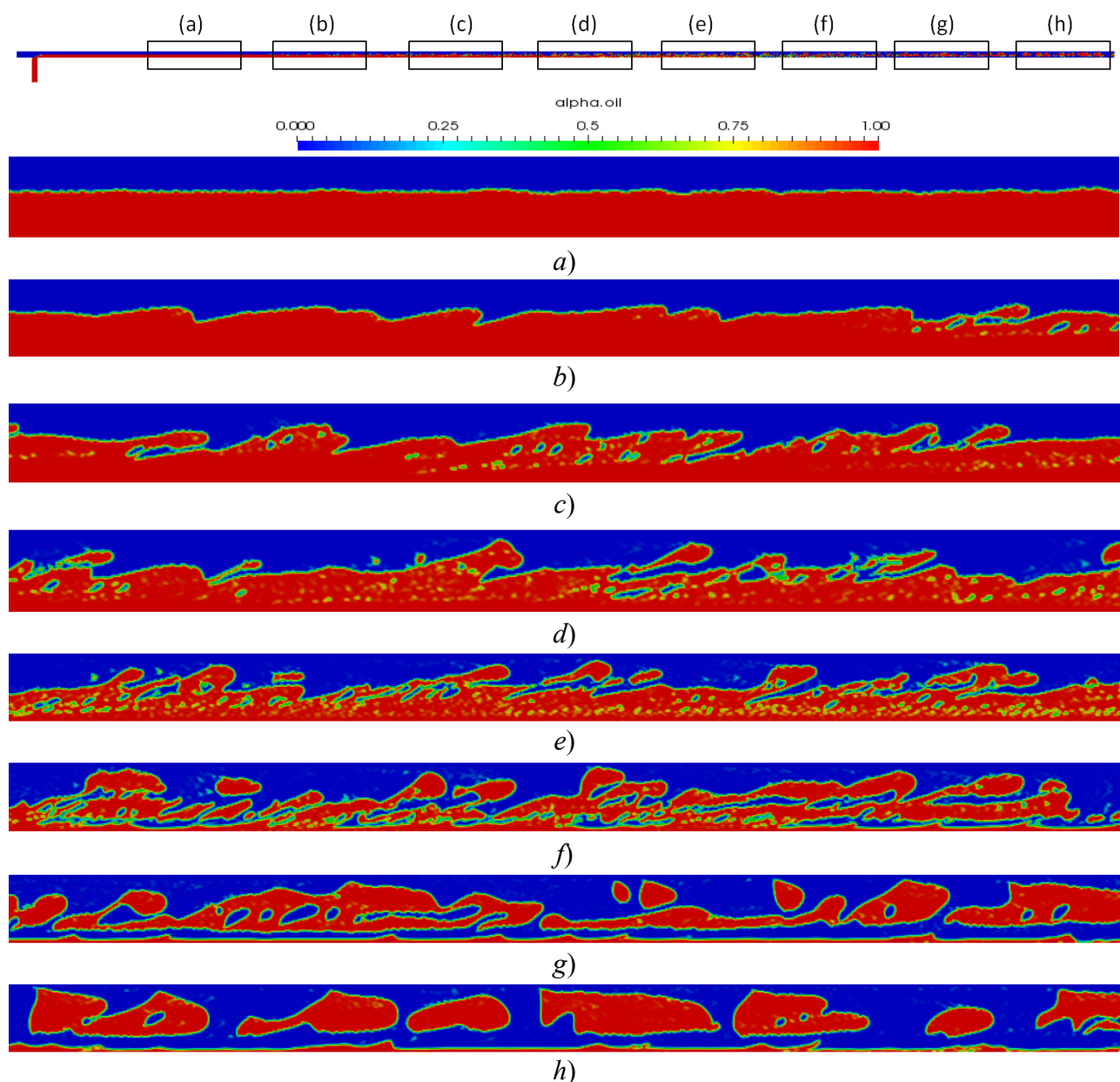


Рис. 4. Изменение структуры течения двухкомпонентного потока

Fig. 4. Changing the structure of a two-component flow

Неравномерная структурная форма течения влияет на скорость движения среды. На рис. 5 показаны поперечные мгновенные профили скорости в различных сечениях по длине канала и распределение скорости в окрестности приведенных сечений. Максимальная скорость эмульсии в канале составляет 0.798 м/с, данное значение скорости является характерным на этом участке трубопровода. Менее вязкая по сравнению с маслом вода движется с большей скоростью. Таким образом, максимум скорости смещается к верхней стенке канала. На рис. 5, *b* четко видно ядро течения на кривой соответствующей сечению, расположенному на расстоянии 1 м от левого входа. Далее ступенчатый профиль переходит в параболический (сечение на расстоянии 2 м от входа), а скорость воды увеличивается с 0.68 м/с до 0.78 м/с. При этом, скорость масла немного падает. К выходному сечению скорости масляных образований и воды выравниваются, и вновь формируется ступенчатый профиль эмульсии.

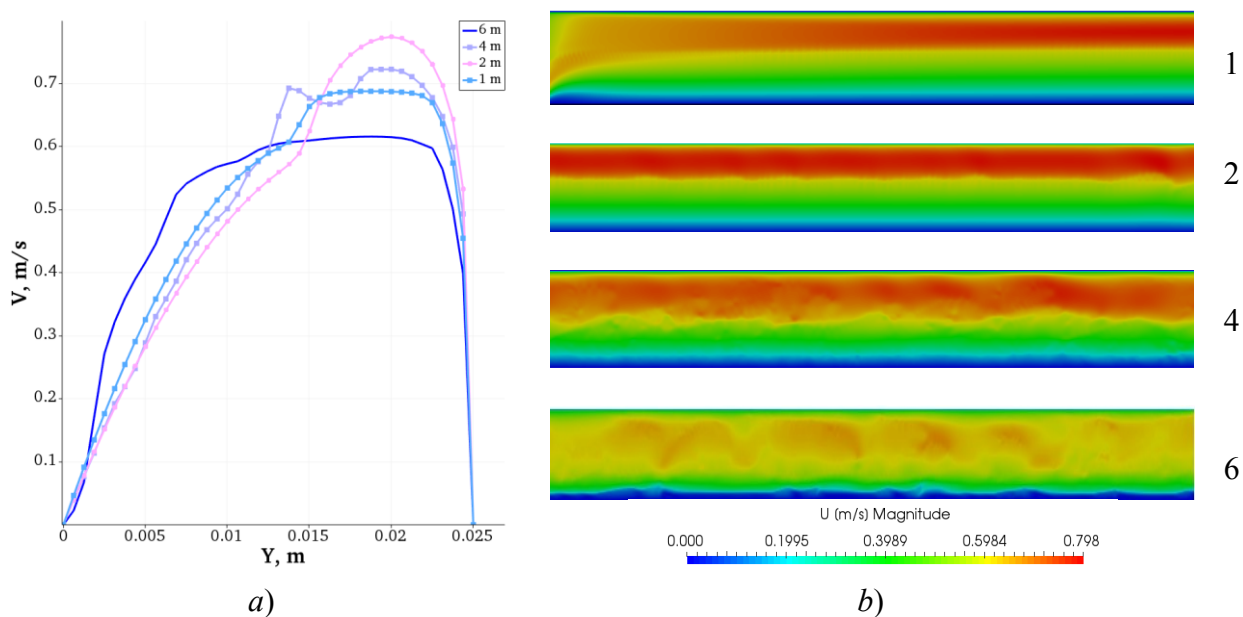


Рис. 5. Профили скорости (a) и фрагменты распределения модуля скорости (b)
 Fig. 5. Velocity profiles (a) and fragments of the distribution of the velocity magnitude (b)

Графики изменения напряжения трения на нижней стенке и давления вдоль средней линии по длине канала показаны на рис. 6. Характер пульсаций на линиях соответствует переходу одной конфигурации течения в другую.

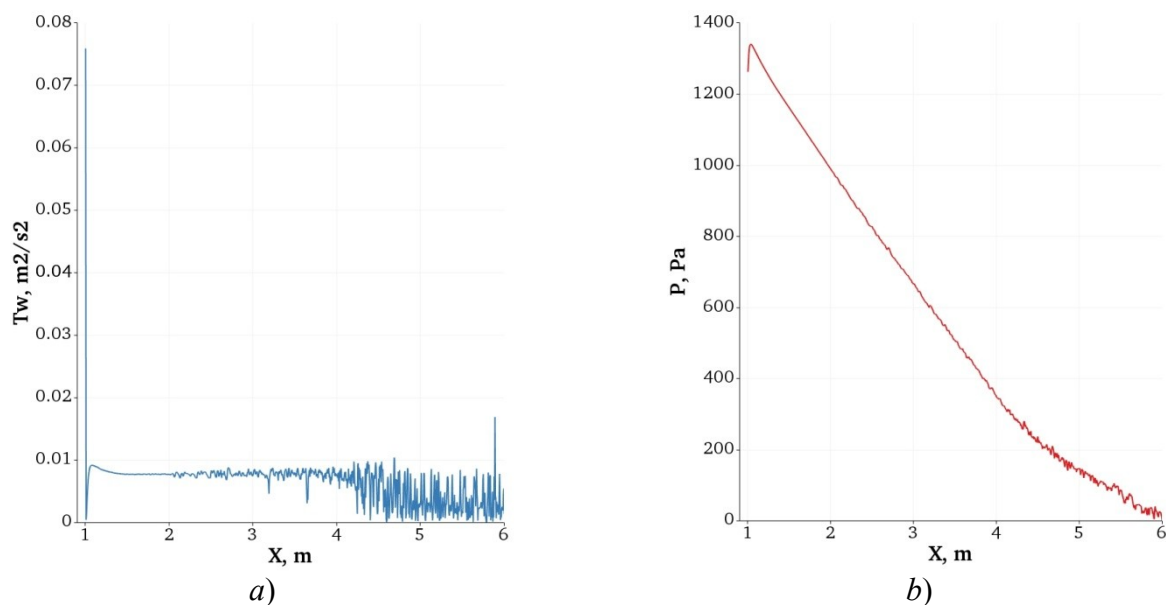


Рис. 6. Изменение напряжения трения (a) и давления по длине канала (b)
 Fig. 6. Plots of the wall shear stress (a) and the pressure (b) along the channel

Наибольшее напряжение реализуется в момент поступления масла в канал, в месте соединения вертикального канала с горизонтальным. На участке гладкого и волнового стратифицированного течения напряжение не меняется. При переходе к участку смешанного стратифицированного течения появляются пульсации напряжений амплитудой до 5 %. Максимальные пульсации напряжений приходятся на пробковый режим движения среды, и возникают в тонком масляном слое, сформировавшемся на нижней стенке канала.

Величина статического давления в смеси по длине канала уменьшается. Пульсации давления коррелируют с пульсациями напряжения трения. На участках стратифицированного течения появляются небольшие пульсации давления, однако сильного влияния на характер изменения давления не оказывают. На участке пробкового течения помимо увеличения амплитуды пульсаций, меняется угол наклона кривой давления, в то время как в однокомпонентной несжимаемой среде наклон остался бы неизменным. Таким образом, наличие масляных пробок в потоке приводит к снижению скорости падения давления. Общие потери давления при движении эмульсии, рассчитанные по разности средней величины давления во входном и выходном сечениях, составляют 1520 Па.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проводится численное исследование гидродинамики двухкомпонентной эмульсии вода-масло в Т-образном канале смешения. Изучение особенностей развития структурной формы эмульсии по длине канала показало, что на протяжении всего канала происходит непрерывная перестройка течения.

Структура потока меняется от гладкого стратифицированного течения до пробкового. Коротко сценарий развития выглядит следующим образом: гладкое стратифицированное → волновое стратифицированное → смешанное стратифицированное → снаряжное → пробковое. Показано, что на нижней стенке канала формируется тонкий масляный слой переменной толщины. Изменение напряжения трения в данном слое соответствует структурной форме течения. Смешанный стратифицированный, снаряжный и пробковый режимы движения эмульсии вносят пульсации в графики изменения напряжения трения на стенке и давления. Кроме того пробковый режим течения характеризуется уменьшением скорости снижения давления.

Дальнейшие исследования направлены на анализ влияния диспергатора на структурную форму течения эмульсии вода-масло при различных входящих формах потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриева З. Т. Вязкоупругие жидкости для нефтедобычи // Междунар. конф. "Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций"; VIII Всерос. НПК "Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа": тезисы докладов. Томск, 2019. С. 686.
<http://dx.doi.org/10.17223/9785946218412/452>
2. Patent EP 1198536, 2003. Water-in-oil microemulsion useful for oil field or gas field applications and methods for using the same / Collins Ian Ralph, Vervoort Isabelle.
3. Дмитриева З. Т. Явление сверхвязкости в водомасляных эмульсиях // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2020. № 9 (105). С. 90-92.
4. Волков В. С. Математическое моделирование двухфазного потока "вода-масло" в трубопроводе // XXVI Всерос. семинар с междунар. участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям: материалы докладов конференции. СПб.: БГТУ "Военмех", 2022. С. 63-64.

REFERENCES

1. Dmitrieva Z. T. Vyazkouprugie zhidkosti dlya nefte dobychi [Viscoelastic fluids for oil production]. *Int. Workshop "Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems"*; VIII All-Russian scientific and practical conf. "Production, preparation, transportation of oil and gas". Abstracts. Tomsk, 2019, p. 686. (In Russian).
<http://dx.doi.org/10.17223/9785946218412/452>
2. Patent EP 1198536, 2003. Water-in-oil microemulsion useful for oil field or gas field applications and methods for using the same / Collins Ian Ralph, Vervoort Isabelle
3. Dmitrieva Z. T. Yavleniye sverkhvyazkosti v vodoneftnyanykh emul'siyakh [The phenomenon of super-viscosity in water-oil emulsions]. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU* [Business Magazine Neftegaz.RU], 2020, no. 9 (105). pp. 90-92. (In Russian).
4. Volkov V. S. Matematicheskoye modelirovaniye dvukhfaznogo potoka "voda-maslo" v truboprovode [Mathematical modeling of two-phase flow "water-oil" in a pipeline]. *XXVI Vseros. seminar s mezhdunar. uchastiyem po struynym, otryvnym i nestatsionarnym techeniyam. Materialy dokl. konf.* [XXVI All-Russian Seminar with Int. participation on jet, tear-off and non-stationary flows. Materials of the conf.]. St. Petersburg: BSTU "Voenmeh" Publ., 2022. pp. 63-64. (In Russian).

5. Dasari A., Desamala A. B., Dasmahapatra A. K., Mandal T. K. Experimental studies and probabilistic neural network prediction on flow pattern of viscous oil–water flow through a circular horizontal pipe // *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, vol. 52, iss. 23, pp. 7975-7985. <https://doi.org/10.1021/ie301430m>
6. Валландер С. В. Лекции по гидроаэромеханике. Учеб. пособие. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 296 с.
7. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // *Journal of Computational Physics*, 1981, vol. 39, pp. 201-225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
8. Personnetaz P., Beckstein P. Landgraf S., Köllner T., Nimitz M., Weber N., Weier T. Thermally driven convection in Li||Bi liquid metal batteries // *Journal of Power Sources*, 2018, vol. 401, pp. 362-374. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.069>
9. Ansys Fluent Fluid Simulation Software. URL: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> (дата обращения 01.03.2022).
10. OpenFOAM. URL: <https://www.openfoam.com/> (дата обращения 01.02.2022).
11. Zalesak S. T. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithm for fluids // *Journal of Computational Physics*, 1979, vol. 31, iss. 3, pp. 335-362. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(79\)90051-2](https://doi.org/10.1016/0021-9991(79)90051-2)
12. Patel V. Numerical and Experimental Study of Droplet Generation and Coalescence using Microcapillaries in an Emulsification Process: Thesis for: Master of Science In Process Engineering and Energy Technology. 2016. 123 p. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26624.23047>
13. Karapetsas G., Craster R. V., Matar O. K. Surfactant-driven dynamics of liquid lenses // *Physics of Fluids*, 2011, vol. 23, pp. 122106(1-16). <https://doi.org/10.1063/1.3670009>
5. Dasari A., Desamala A. B., Dasmahapatra A. K., Mandal T. K. Experimental studies and probabilistic neural network prediction on flow pattern of viscous oil–water flow through a circular horizontal pipe. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, vol. 52, iss. 23, pp. 7975-7985. <https://doi.org/10.1021/ie301430m>
6. Wallander S. V. *Lektsii po gidroaeromekhanike. Ucheb. posobiye* [Lectures on hydroaeromechanics. Textbook]. Leningrad: Leningrad University Publ., 1978. 296 p.
7. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 1981, vol. 39, pp. 201-225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
8. Personnetaz P., Beckstein P. Landgraf S., Köllner T., Nimitz M., Weber N., Weier T. Thermally driven convection in Li||Bi liquid metal batteries. *Journal of Power Sources*, 2018, vol. 401, pp. 362-374. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.069>
9. *Ansys Fluent Fluid Simulation Software*. URL: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> (accessed March 1, 2022).
10. *OpenFOAM*. URL: <https://www.openfoam.com/> (accessed February 1, 2022).
11. Zalesak S. T. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithm for fluids. *Journal of Computational Physics*, 1979, vol. 31, iss. 3, pp. 335-362. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(79\)90051-2](https://doi.org/10.1016/0021-9991(79)90051-2)
12. Patel V. *Numerical and Experimental Study of Droplet Generation and Coalescence using Microcapillaries in an Emulsification Process*: Thesis for: Master of Science In Process Engineering and Energy Technology. 2016. 123 p. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26624.23047>
13. Karapetsas G., Craster R. V., Matar O. K. Surfactant-driven dynamics of liquid lenses. *Physics of Fluids*, 2011, vol. 23, pp. 122106(1-16). <https://doi.org/10.1063/1.3670009>

Поступила 22.04.2022; после доработки 04.05.2022; принята к опубликованию 25.05.2022
Received 22 April 2022; received in revised form 04 May 2022; accepted 25 May 2022

Информация об авторах

Волков Владимир Сергеевич, аспирант, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», Ижевск, Российская Федерация, e-mail: volkov0995@mail.ru

Королева Мария Равилевна, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: koroleva@udman.ru

Шумихин Андрей Александрович, кандидат физико-математических, научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация

Information about the authors

Vladimir S. Volkov, Post Graduate Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: volkov0995@mail.ru

Maria R. Koroleva, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: koroleva@udman.ru

Andrey A. Shumihin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation