

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ**

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

А.И. ФЕДЮШКИН, А.Н. РОЖКОВ

КОАЛЕСЦЕНЦИЯ КАПЕЛЬ НЬУТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ

Препринт № 1087

Москва 2014

УДК 532.22

А.И. Федюшкин, А.Н. Рожков

Коалесценция капель ньютоновской жидкости - Препринт ИПМех РАН,
№ 1087, Москва, 2014, 27с.

Аннотация

В работе рассматривается динамика слияния двух капель ньютоновской жидкости. С помощью численного моделирования для двухфазной системы «жидкость – воздух» показано изменение форм капель во времени для разных свойств жидкостей. Данные численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными.

Данная работа была поддержана российским фондом фундаментальных исследований, грант №. 12-08-00067

Abstract

The paper considers the dynamics of the coalescence of two drops of Newtonian fluid. Changing forms drops in time for the different properties of liquids it is shown using numerical simulation for two-phase system of «liquid – air». The results of the numerical simulation are compared with experimental data.

The research was supported by the Russian Foundation of Basic Research. Grant No. 12-08-00067

ISBN 978-5-91741-127-9

055(02)2 © Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской Академии Наук, 2014

Содержание

1.	Введение.....	4
2.	Постановка задачи.....	6
3.	Математическая модель	7
4.	Результаты математического моделирования.....	11
	Выводы	18
	Литература.....	19
	Приложение.....	21

1. Введение

Исследование слияния капель имеет большое фундаментальное научное значение для изучения закономерностей многофазной гидродинамики в различных физических процессах и явлениях, поскольку процессы коалесценции капель имеют широкий диапазон приложений, например, в метеорологии, металлургии, энергетике, в микро- и в нанотехнологиях, в электронной, атомной и авиационной промышленности, в процессах кипения, конденсации, сушки, сварки, пенообразования, при струйной и 3D печати и других областях.

Пионерской работой по исследованию сил поверхностного натяжения в процессах слияния капель была работа советского ученого Я.И. Френкеля, опубликованная в 1945 году [1]. В работе [1] проведен анализ для времени слияния капель, указаны этапы спекания капель металла, что заложило научную основу для порошковой металлургии.

За последние годы возросла мощность компьютеров, появились новые методы вычислительной математики и усовершенствовались оптические средства – все это способствовало появлению большого количества теоретических и экспериментальных работ по исследованию коалесценции капель при различных условиях. Из этих работ можно указать некоторые следующие работы [2-9].

Динамика слияния капель существенным образом зависит от реологических свойств жидкости. В работах [2,3] приводятся результаты

исследования коалесценции капель неньютоновских жидкостей в сравнении с ньютоновскими жидкостями.

Важным условием является то, в каком окружении находятся сливающиеся капли. Много исследований проведено по коалесценции капель в вакууме или в воздухе. Работа [4] посвящена исследованию коалесценции пузырьков газа и капель жидкости в нефти и в рассоле (в более плотной среде, чем воздух). В [4] показано, когда при коалесценции капель в жидкости важна вязкость окружающей жидкости.

Работа [5] посвящена исследованию формированию мениска на начальной стадии слияния капель, приводятся корреляционные зависимости для случаев вязких и невязких жидкостей.

В [6] исследуется коалесценция капель идеальной жидкости без влияния окружающей среды. Приводятся результаты исследования формирования мениска, используя метод интегральных граничных уравнений, показана возможность образования тороидального мостика.

В работе [7] дан обзор теоретических и экспериментальных работ по коалесценции, дается анализ масштабных факторов и аппроксимационных выражений для времени слияния капель и приводится сравнение с экспериментом двух различных математических моделей. В работах [7-9] указывается на существование осциллирующих режимов изменения формы результирующей капли при коалесценции двух капель.

Целью данной работы является изучение динамики изменения формы капель ньютоновских жидкостей при их слиянии в воздухе.

2. Постановка задачи

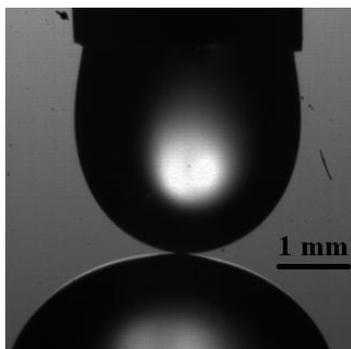


Рис. 1. Фотография начального расположения капель в эксперименте [2, 3]

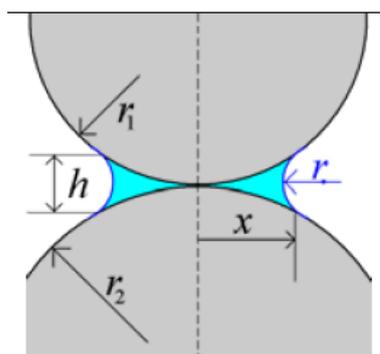


Рис.2 Схема мостика в начальный момент расположения капель в эксперименте [2, 3]

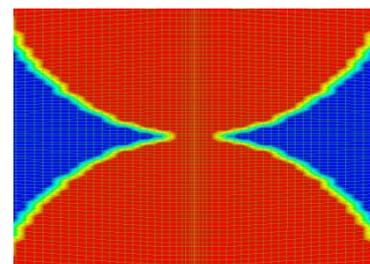


Рис.3. Схема начального расположения капель в математической модели

В начальный момент две капли жидкости соприкасаются в воздухе. и рассматривается динамика изменения формы капель и мостика между каплями. На рис. 1 и рис.2 показаны фотография начального расположения капель и в эксперименте и схема мостика в начальный момент расположения капель в эксперименте (рисунки взяты из работы [2]. На рис. 3 показан участок соприкосновения капель в начальный момент в математической модели. В математической модели предполагается, что мостик в начальный момент времени сформировался мгновенно и радиус начального мостика для капель с диаметром $d=1\text{мм}$ был равен $R_m=x=5 \cdot 10^{-4}\text{мм}$ (см. рис. 2,3).

3. Математическая модель

Математическая модель основана на решении уравнений Навье-Стокса (1)-(2), уравнений для двухслойных жидкостных систем «жидкость-воздух» без учета силы тяжести ($\mathbf{g}=0$).

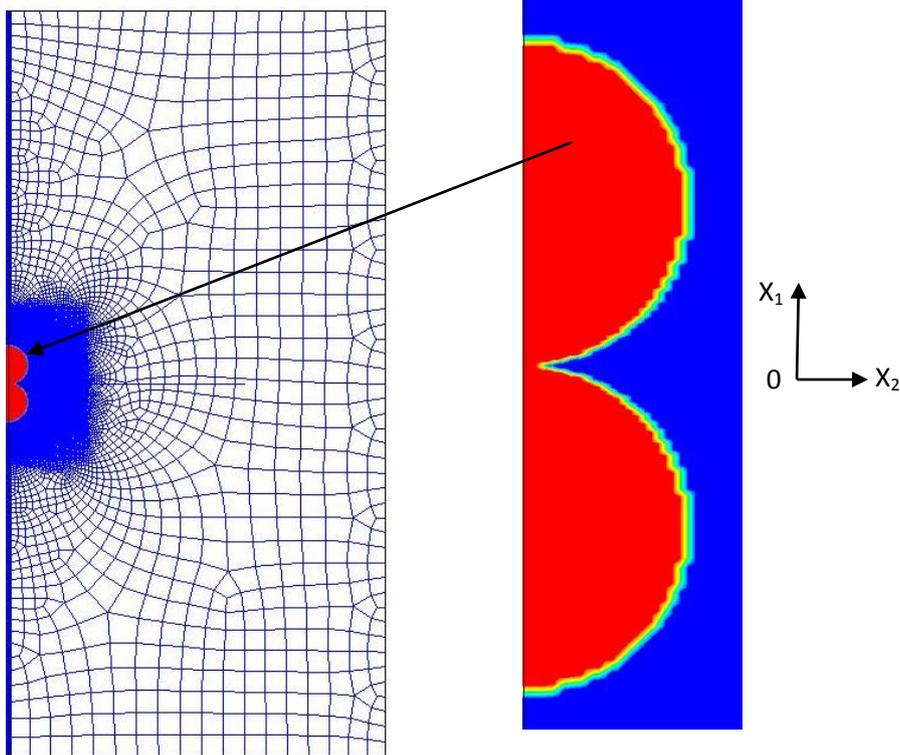


Рис. 4а). Сетка и схема расчетной области с каплями в начальный момент времени

Рис.4б). Увеличенная часть расчетной области с каплями в начальный момент времени

На рис. 4а представлены схема осесимметричной расчетной области (x_1, x_2) и расчетная сетка с расположением двух одинаковых капель диаметром 1мм в начальный момент времени. Размеры расчетной области, изображенной на рис. 4а равны 20мм x 10мм. На рис.4б представлена увеличенная центральная часть расчетной области с каплями в начальный момент времени. Левые границы на рис. 4а и 4б

являются осями симметрии. Чтобы не было влияния внешних границ размеры расчетной области были выбраны в 10-20 раз больше, чем диаметр капель, участвующих в слиянии. Для увеличения точности расчетная сетка в центральной части области была прямоугольной и сильно измельчена (рис. 4а).

Математическая модель основана на системе уравнений Навье-Стокса для многофазной системы, состоящей из α жидкостей. В модели «смеси» можно записать одно уравнение момента для всех α жидкостей системы в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j \quad (1)$$

$$\operatorname{div} u = 0 \quad (2)$$

где u – скорость, плотность и вязкость определяются через объемную долю фракций ε_α , для системы из α жидкостей $u = \sum_\alpha \varepsilon_\alpha u_\alpha$, $\rho = \sum_\alpha \varepsilon_\alpha \rho_\alpha$,

$\mu = \sum_\alpha \varepsilon_\alpha \mu_\alpha$, $\sum_\alpha \varepsilon_\alpha = 1$, например, плотность для двухслойной системы

«воздух-вода» можно записать в виде:

$$\rho = \varepsilon_1 \rho_{\text{air}} + \varepsilon_2 \rho_{\text{water}} = \varepsilon_1 \rho_{\text{air}} + (1 - \varepsilon_1) \rho_{\text{water}}. \quad (3)$$

аналогичное выражение можно записать и для средней по ячейке вязкости. В данной работе рассматривались капли малого размера и сила тяжести в уравнениях (1) не учитывалась $g_j=0$.

Граничные условия на поверхности раздела жидкость ($\alpha = 1$) - воздух ($\alpha=2$) в виде равновесия поверхностных сил и давления можно записать в виде:

$$(p_1 - p_2 + \sigma\kappa) \hat{n}_i = (\tau_{1ik} - \tau_{2ik}) \hat{n}_k + \frac{\partial \sigma}{\partial x_i}, \quad (4)$$

где индекс $\alpha = 1$ – жидкость, индекс $\alpha = 2$ – воздух, $\kappa = 1/R_1 + 1/R_2$ – кривизна, где R_1, R_2 – радиусы кривизны для жидкости и воздуха, \hat{n}_α – единичный вектор нормали, $\tau_{\alpha ik}$ – тензор вязких напряжений для несжимаемых жидкостей можно записать в виде

$$\tau_{\alpha ik} = \mu_\alpha \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right)_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \quad (5)$$

Моделирование изменения формы границы раздела несмешиваемых жидкостей выполнялось, используя модель жидких объемов (VOF – Volume Of Fluid метод) с итерациями по методу Эйлера на каждом шаге по времени. VOF метод предполагает, что каждый контрольный объем (ячейка расчетной сетки), где не проходит интерфейс содержит только одну α жидкость с объемной долей $\varepsilon_\alpha = 1$ (или если содержит границу раздела между жидкостями, то с объемной долей $0 < \varepsilon_\alpha < 1$). Для доли объема α -той жидкости, возможны 3 варианта: $\varepsilon_\alpha = 0$ если ячейка пуста (от α -той жидкости), $\varepsilon_\alpha = 1$ если ячейка полна (α -той жидкости), $0 < \varepsilon_\alpha < 1$ если ячейка содержит границу раздела между жидкостями. Отслеживание границ между несмешиваемыми жидкостями выполняется путем решения уравнения неразрывности для доли объема каждой жидкости, которое в случае отсутствия источников и стоков массы можно записать в виде:

$$\frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

Точность определения границы ограничивается размером ячеек сетки и методами решения. Численное моделирование проводилось на основе решения нестационарных уравнений Навье-Стокса для двухфазной несжимаемой системы «воздух-жидкость» (1)-(6). Окончательные стационарные формы капель были получены по стационарной модели. Использовались методы второго и третьего порядка точности по пространству и второго по времени с неявным матричным (совместным - couple) решением уравнений.

Граница раздела определялась VOF (Volume Of Fluid) методом с повышенным разрешением и учетом поверхностных сил по методу CSF (Continuum Surface Force) [10], в котором баланс поверхностных сил и давления на границе раздела осуществляется введением объемной силы F_j в узкой зоне с обеих сторон от интерфейса. Метод CSF позволяет убрать сингулярность в случае обращения в ноль радиуса кривизны поверхности интерфейса и увеличить точность расчетов [10].

Для верификации математической модели и определения точности воспроизведения в модели изменения формы поверхности раздела двух жидкостей, было проведено математическое моделирование изменения уровня интерфейса двухслойной системы «масло-вода», вращающейся в цилиндре, и проведено сравнение с экспериментальными данными, опубликованными в работах [11, 12]. Результаты моделирования изменения свободной поверхности показали хорошую точность. Описание данной тестовой задачи и результаты математического моделирования представлены в Приложении данной работы на стр. 20.

4. Результаты математического моделирования

На основе численного решения уравнений Навье-Стокса для двухфазной системы «воздух-жидкость» (1)-(6) проведено моделирование коалесценции капель жидкости для разных свойств.

Были рассмотрены процессы коалесценции двух одинаковых капель следующих жидкостей: вода, глицерин, ртуть, силиконовое масло и силиконовая жидкость (свойства приведены в таблице 1). Время и характер слияния капель характеризуется свойствами жидкости, точнее соотношением вязких и поверхностных сил. В данной работе в качестве масштаба длины выбран диаметр капли. Процесс коалесценции может характеризоваться двумя масштабами времен: при преобладании сил вязкости масштабом времени $T_{\text{visc}} = d \mu / \sigma$ [сек], а при преобладании поверхностных сил масштабом времени: $T_{\text{inert}} = (d \rho^3 / \sigma)^{0.5}$ [сек] [7]. Безразмерное число Онезорге $Oh = \mu / (\rho \sigma d)^{0.5}$ - равно отношению сил поверхностного натяжения к инерционным силам (или отношению масштаба времени вязкостных сил T_{visc} к масштабу времени инерционных сил T_{inert}).

В таблице 1 приведены: свойства ньютоновских жидкостей, использованные при моделировании в данной работе и для капель с диаметром $d=1\text{мм}$ приведены масштабы времени T_{visc} и T_{inert} , значения числа Онезорге (Oh) и числа Рейнольдса ($Re = (d \sigma \rho)^{0.5} / \mu$)/.

Таблица 1

Жидкость	Плотность ρ [кг/м ³]	Вязкость динамическая μ [кг/(м сек)]	Поверхностное натяжение σ [10 ⁻³ н/м]	Масштаб времени $T_{\text{visc}} = d \mu / \sigma$ [сек]	Масштаб времени $T_{\text{inert}} = (d \rho^3 / \sigma)^{0.5}$ [сек]	Число Онезорге Oh Oh = $T_{\text{visc}} / T_{\text{inert}}$	Число Рейнольдса Re
Ртуть	13529	0,001523	486,5	10 ⁻⁶	4 10 ⁻³	4 10 ⁻³	268
Вода	998	0,001003	72,6	10 ⁻⁵	5 10 ⁻³	3	0,34
Силиконовая жидкость	2000	1,72 10 ⁻⁵	59	10 ⁻⁵	6 10 ⁻³	5 10 ⁻⁵	2 10 ⁴
Глицерин	1259,9	0,799	59,4	10 ⁻²	6 10 ⁻³	77	0,01
Силиконовое масло	760	10	22	10 ⁻¹	5 10 ⁻³	6 10 ⁻⁴	1680

В математической модели предполагается, что в начальный момент времени капли уже соприкасаются на небольшом участке, но без мениска, как твердые сферы (мениск и радиус кривизны определялся только размером ячейки сетки). В начальный момент времени все капли были диаметром $d=1\text{мм}$ и начальный радиус общей части соприкосновения капель (мостика) был одинаковым и был равен приблизительно $R_m=0.0005\text{мм}$. Все скорости в начальный момент были равны нулю, а давление постоянным. При решении уравнений Навье-Стокса (1)-(2) на первых же шагах по времени с учетом выполнения условия на свободной поверхности равновесия сил давления и поверхностных сил (4) быстро

формировалась форма жидкого мостика с мениском, и затем на каждом шаге по времени получали изменения ширины мостика между каплями и изменение формы капель. Расчеты проводились с малым шагом по времени, ограниченным значением числа Куранта равным 2.

Для жидкостей, представленных в таблице 1, было проведено математическое моделирование коалесценции капель диаметром в 1 мм и получены временные зависимости изменения размера жидкого мостика и динамика изменения форм поверхностей капель.

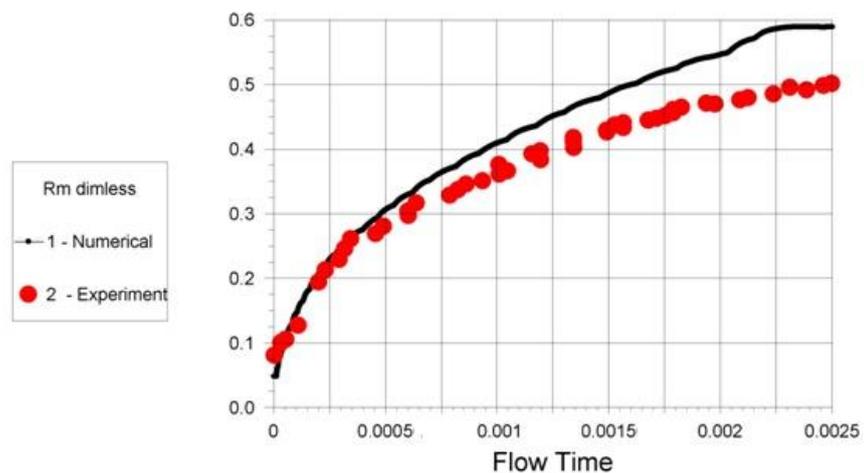


Рис. 5. Изменение радиуса мостика при слиянии капель воды от времени
(1 – расчет, 2 – эксперимент)

На рис.5 представлены графики изменения безразмерного радиуса мостика ($Rm_{dimless} = Rm/d$) от времени при слиянии капель воды. На рис.5 линия 1 – это численные результаты, максимальное значение радиуса мостика в сечении $x_1=0$, линия 2 – экспериментальные данные [2].

Результаты математического моделирования показали, что переход от начального до конечной стационарной формы капель (жидкостей с

небольшой вязкостью) носит периодический затухающий характер, что показано на рис.6.

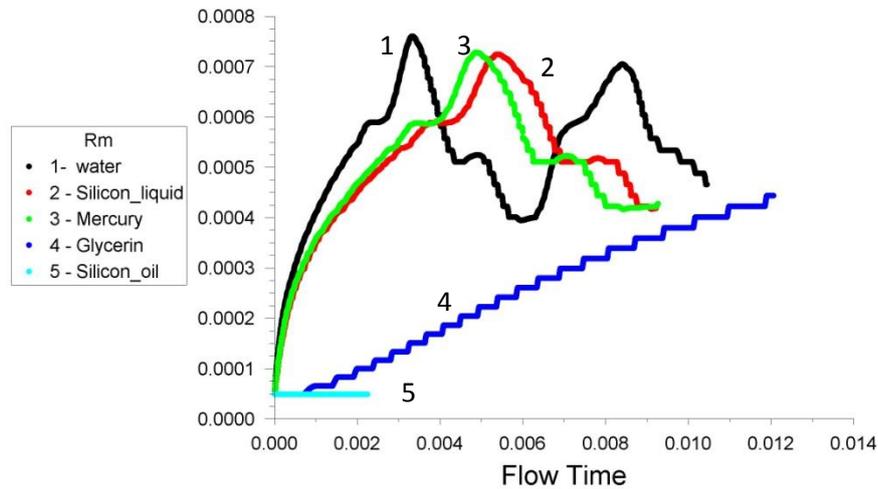
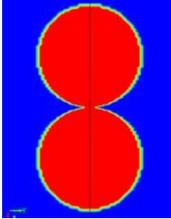
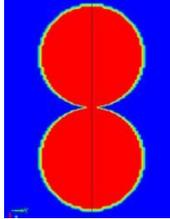
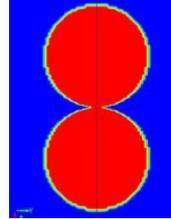
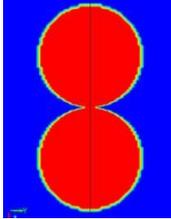
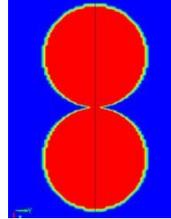
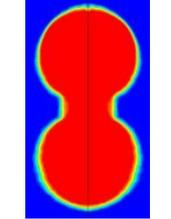
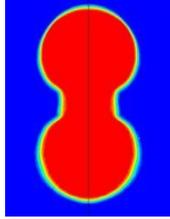
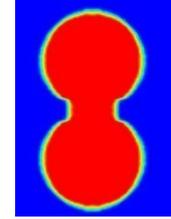
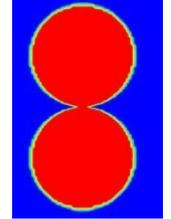
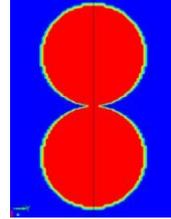
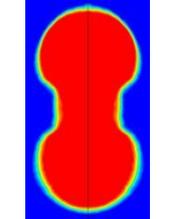
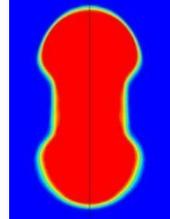
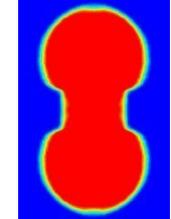
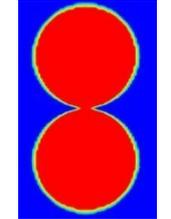
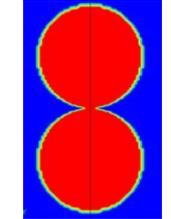
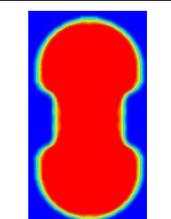
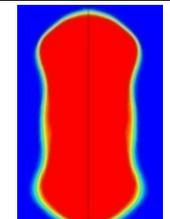
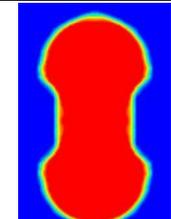
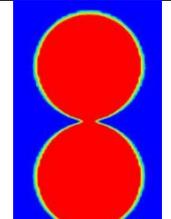
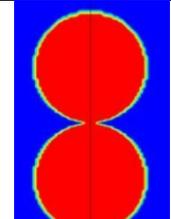
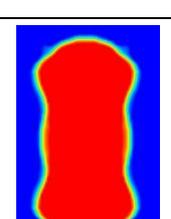
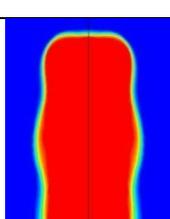
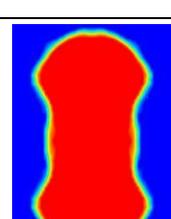
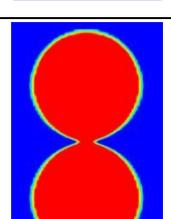
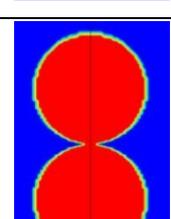
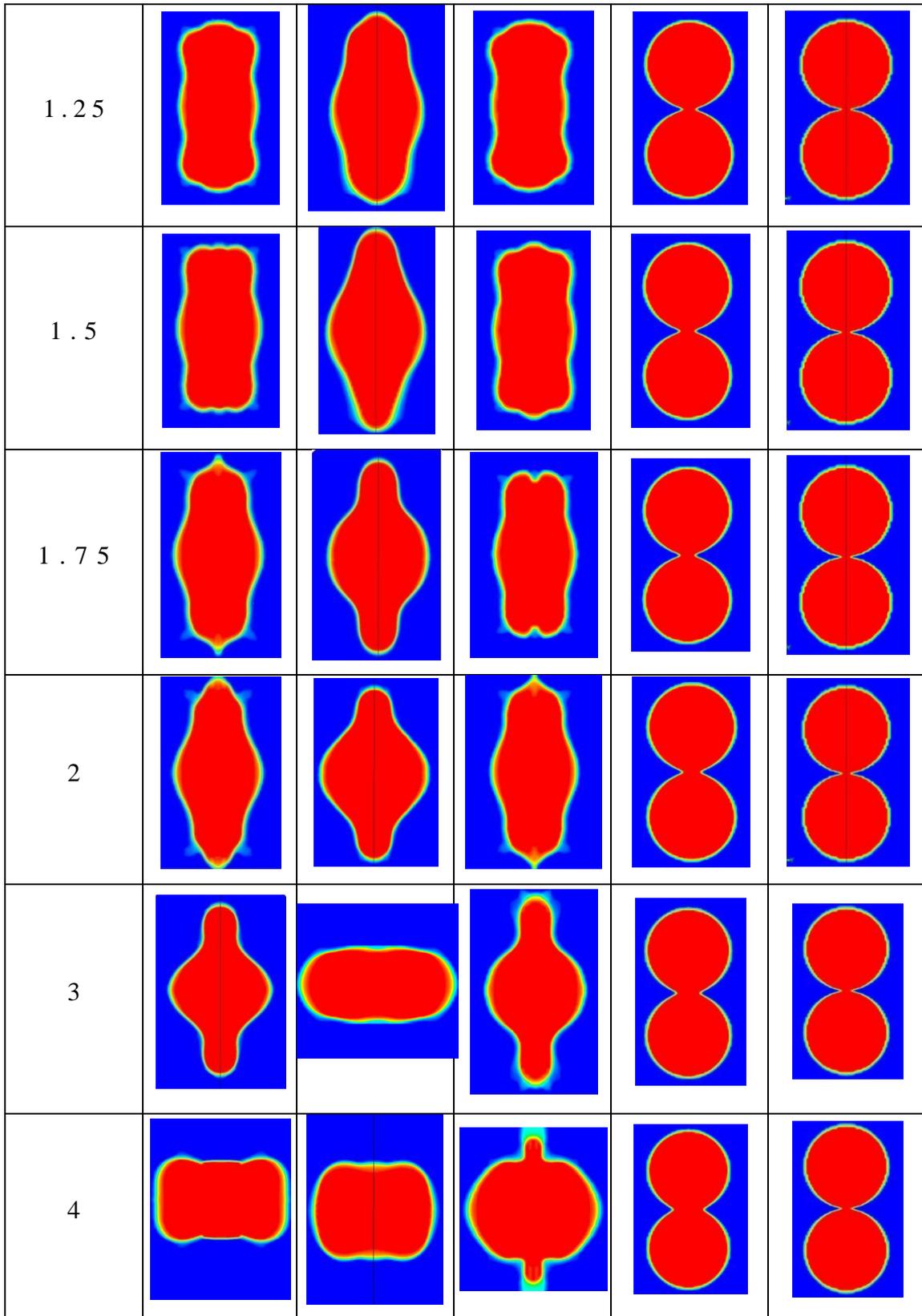


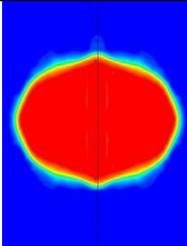
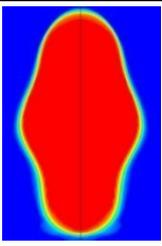
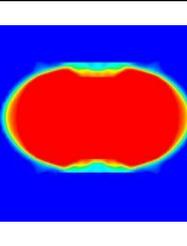
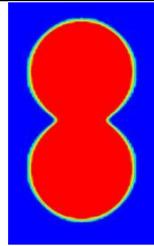
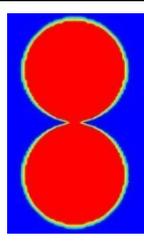
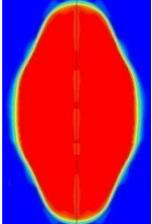
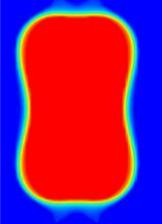
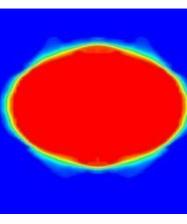
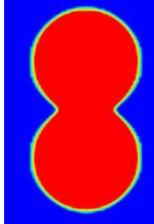
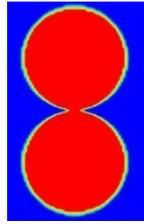
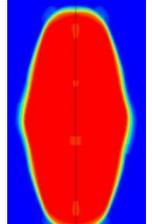
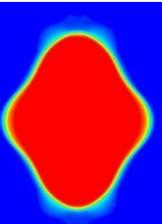
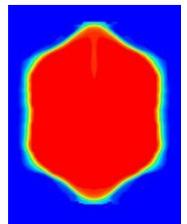
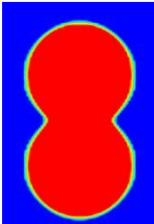
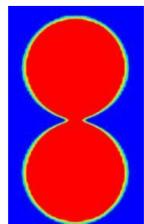
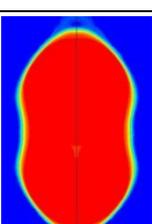
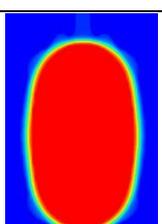
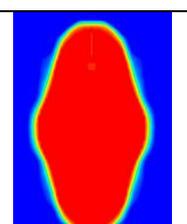
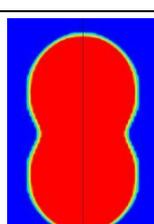
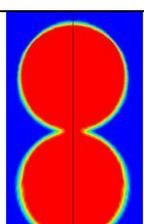
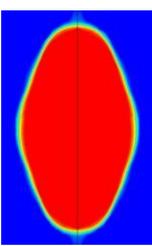
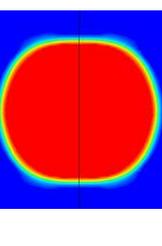
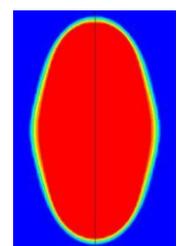
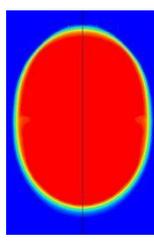
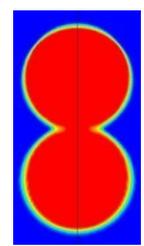
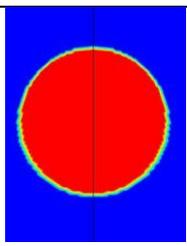
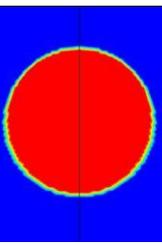
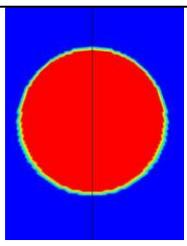
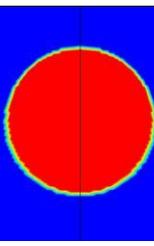
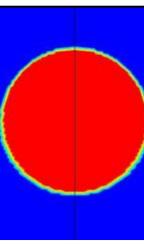
Рис.6. Изменение во времени радиуса мостика (в сечении $x_1=0$) при слиянии капель.

Изменение форм капель во времени представлено на рисунках в таблице 2 (в первом столбце таблицы 2 время указано в $1\text{мсек}=10^{-3}\text{сек}$). На рисунках в таблице 2 представлены формы капель для различных жидкостей и в разные моменты времени в интервале от $t=0$ до 10 мсек. В последней строке таблицы 2 представлены формы результирующей капли на стационаре, а в предпоследней строке промежуточные формы для $t>10\text{мсек}$. Из рисунков таблицы 2 видно, что на поверхностях сливающихся капель жидкости с небольшой вязкостью образуются осциллирующие волны, которые приводят к колебательному характеру динамики формирования поверхностей результирующих капель, что иллюстрируется также графиками на рис. 6.

Таблица 2

В р е м я (мсек)	Р т у т ь	В о д а	С и л и к о н liquid	Г л и ц е р и н	С и л и к о н oil
0					
0.25					
0.5					
0.75					
1					



5					
6					
7					
10					
	$t = 11$	$t = 12$	$t = 13$	$t = 20$	$t = 50$
$t > 10$					
Стационарная форма капель					

Выводы

Описана математическая модель и проведена ее верификация на решении задачи об изменении уровня интерфейса двухслойной системы «масло-вода», вращающейся в цилиндре. Сравнение с экспериментальными данными [11, 12] показало хорошую точность результатов моделирования.

Для начальных моментов слияния капель воды проведено сопоставление численных и экспериментальных данных [2] изменения ширины мостика, показавшее хорошее согласие результатов.

Показан периодический характер изменения форм капель во времени для жидкостей с небольшой вязкостью.

Для одинаковых моментов времени показаны картины изменения форм капель для разных жидкостей в процессе их коалесценции.

Литература

1. J. Frenkel, “Viscous flow of crystalline bodies under the action of surface tension,” *Journal of Physics* 9, pp. 385-391 (1945).
2. A. Rozhkov, V. Mitkin, and T. Theofanous, “The dynamics of visco-elastic bridges in drop coalescence,” XXII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics. Adelaide. Australia. 24–29 August, 2008, 2с, ISBN 978-0-9805142-0-9.
3. Рожков А.Н., Mitkin V., Theofanous T. Коалесценция упруговязких капель // 24 Симпозиум по реологии. Тезисы докладов. Карачарово. 3-7 июня 2008 г. С. 5.
4. Joseph D. Paulsen¹ Re’mi Carmigniani¹, Anerudh Kannan¹, Justin C. Burton¹ & Sidney R. Nagel Coalescence of bubbles and drops in an outer fluid. *NATURE COMMUNICATIONS* | 5:3182 | DOI: 10.1038/ncomms4182 (2014). pp.1-7, www.nature.com/naturecommunications
5. Eggers, J., Lister, J. R. & Stone, H. A. Coalescence of liquid drops. *J. Fluid Mech.* 401, pp.293–310, (1999).
6. L. Duchemin, J. Eggers, and C. Josserand, “Inviscid coalescence of drops,” *J. Fluid Mech.* 487, pp.167–178 (2003).
7. J. E. Sprittles and Y. D. Shikhmurzaev. Coalescence of liquid drops: Different models versus experiment. *PHYSICS OF FLUIDS* 24, 122105 (2012), 27p. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4773067>
8. E. Becker, W.J. Hiller, T.A. Kowalewski, Experimental and theoretical investigation of large-amplitude oscillations of liquid droplets. *J. Fluid Mech.* 231, 1991, pp. 189-210.

9. Tadashi Watanabe. Nonlinear oscillations and rotations of a liquid droplet. *Int. journal of geology*, Issue 1, Volume 4, 2010, pp.5-13.
10. J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach. "A Continuum Method for Modeling Surface Tension". *J. Comput. Phys.* 100. pp.335–354. 1992.
11. Sugimoto, T. and Iguchi, M., Behavior of Immiscible Two Liquid Layers Contained in Cylindrical Vessel Suddenly Set in Rotation, *ISIJ Int.*, 42, pp. 338-343, 2002.
12. Sugimoto, T. and Iguchi, M., Rapid Mixing and Separation of Molten Slag and Metal Using Cylindrical and Baffled Vessels Suddenly Set in Rotation *ISIJ Int.*, Vol. 43 (2003), No. 12, pp. 1867–1874

Приложение

Моделирование изменения уровня интерфейса двухслойной системы: «масло-вода», вращающейся в цилиндре

Целью данного теста является определение возможностей воспроизведения нестационарных эффектов изменения формы границы раздела двухслойных жидкостных систем в цилиндре на основе сравнения численных результатов по методу VOF с экспериментальными данными Sugimoto and Iguchi [11, 12].

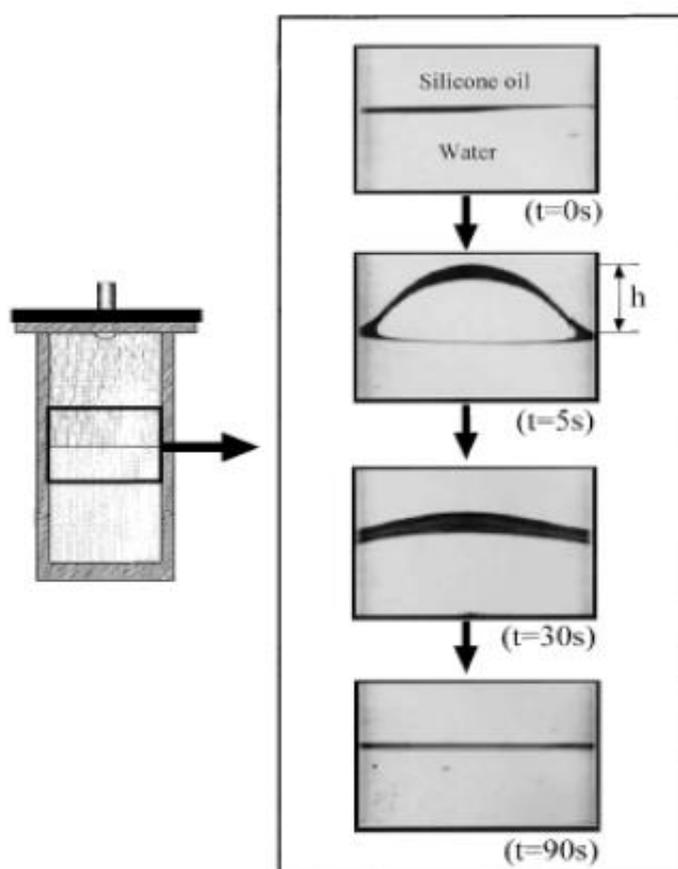


Рис.1 Схема экспериментальной установки (слева) и изменение формы интерфейса (справа) между силиконовым маслом и водой. $Re=74$ (рисунок взят из работы [11]).

Постановка задачи

Вертикальный цилиндрический сосуд, содержит несмешивающуюся силиконовое масло и воду - первоначально находится в покое. Слой силиконового масла находится над водой. Масло и вода имеют близкие плотности, но вязкость масла в 10 раз больше воды: вязкость $\mu_{oil} = 0.0103[\text{kg/m s}]$, плотность $\rho_{oil} = 935 [\text{kg/m}^3]$ находится над водой $\rho_w = 1030 [\text{kg/m}^3]$, $\mu_w = 0.00103[\text{kg/m s}]$. Сверху цилиндрический сосуд закрыт крышкой. Сосуд приводится во вращение с постоянной угловой скоростью ω . Диаметр и высота сосуда - 46мм и 120 мм, соответственно (рис.2).

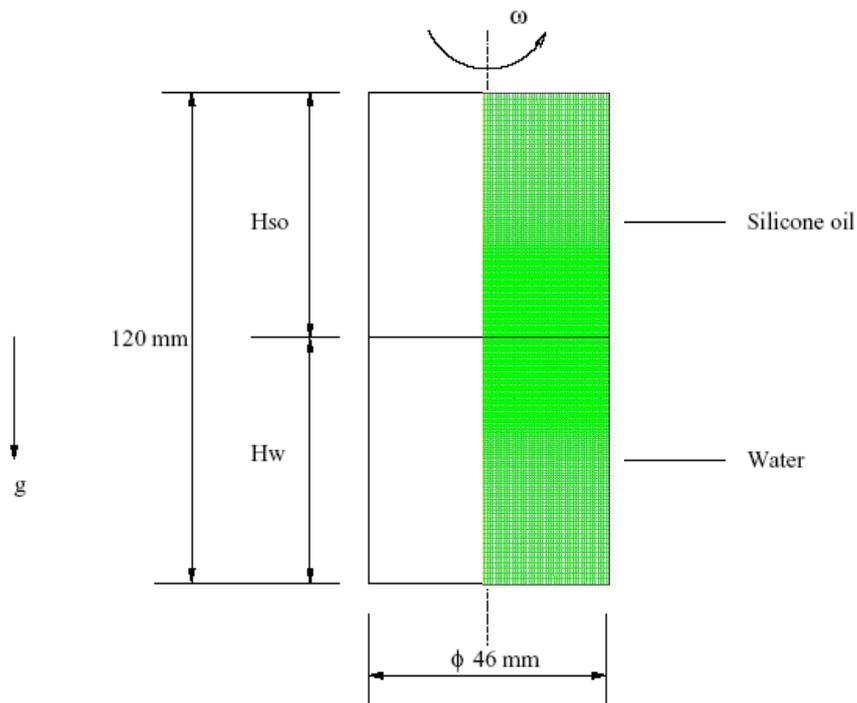


Рис. 2. Расчетная область и сетка

Безразмерные параметры определены следующим образом: число Рейнольдса $Re_\omega = R \left(\frac{\omega}{\nu} \right)^{1/2}$. Безразмерная окружная скорость $\frac{V_{s\omega}}{Re_\omega}$, $VR = \frac{V_\omega}{V_{s\omega}}$ - отношение объемов силиконового масла и воды. В приведенных в данном

отчете результатах расчетов $VR=1$. При моделировании данной задачи использовалась осесимметричная модель.

Для расчета использовались четырехугольные сетки с различным количеством ячеек со сгущением около интерфейса. Следует отметить, что учет свободной поверхности (применение VOF метода) накладывает свои ограничения на величины пространственного и особенно временного шагов и время расчета, так например, для достижения в модели 1 часа физического времени требуется несколько десятков расчетного времени.

Результаты теста.

При мгновенном приведении цилиндра, заполненного маслом и водой во вращательное движение, из-за разности вязкостей масла и воды и как следствие разных масштабов динамических времен, будет происходить изменение поверхности раздела. В начальный момент силиконовое масло (как более вязкое) начнет вытеснять воду у стенки цилиндра, а на оси цилиндра уступать воде. Изменения величины и направления сил давления около стенок цилиндра приводит к изменению направления вектора сил давления в воде у оси цилиндра, где действующие силы складываются, и поэтому на оси цилиндра можно ожидать максимальное отклонение поверхности раздела от ее первоначального равновесного положения.

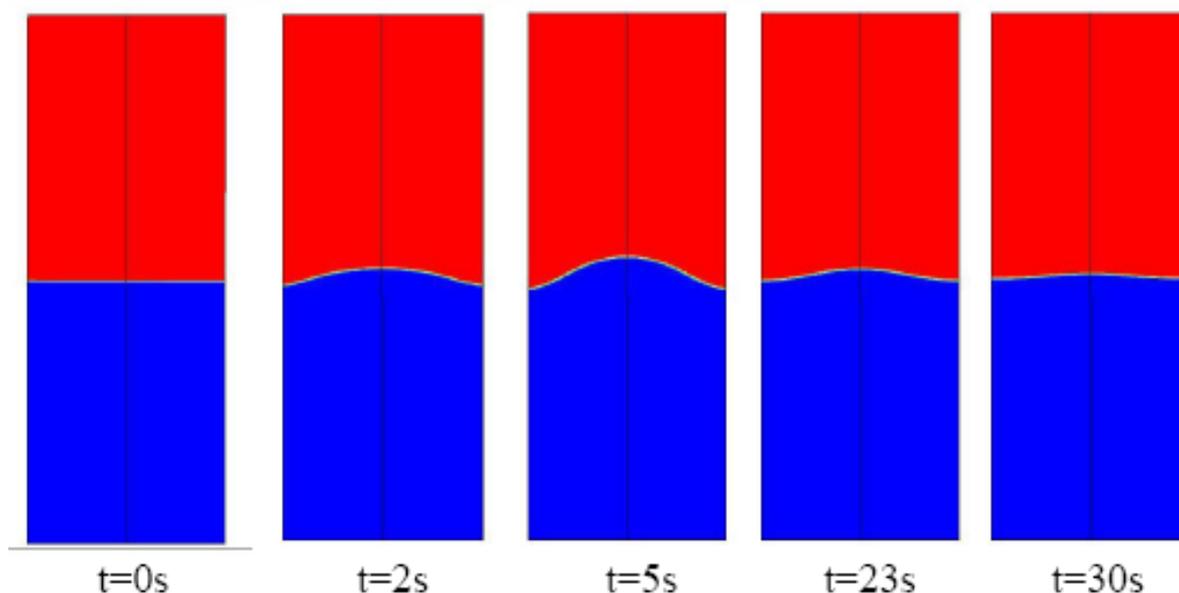


Рис. 3. Изменение расположения интерфейса со временем ($Re=74.9$,
 $\omega=10.6\text{rad/сек}$).

Тестовые расчеты, проведенные для различных чисел Рейнольдса, показали хорошее совпадение с экспериментальными данными, опубликованными в работах [11,12].

На рис.3 синим (темным) цветом показана область, занимаемая водой, а красным (светлым) цветом показана область, занимаемая силиконовым маслом в разные моменты времени при вращении $\omega=10.6\text{ rad/сек}$ ($Re=74.9$). Максимальное изменение поверхности раздела жидкостей в расчетах наблюдается на оси и для параметров $Re = 74.9$, $\omega=10.6\text{ rad/сек}$ и $VR = 1$ на пятой секунде, после чего, осциллируя во времени, медленно выравнивается.

Результаты расчетов и сравнение их с экспериментальными данными показали хорошую воспроизводимость нестационарного изменения поверхности, моделируемую методом VOF.

На рис. 4 показана зависимость максимума изменения высоты интерфейса от первоначального плоского. Из графиков рисунка 4 видно хорошее согласие расчета с экспериментом [11,12].

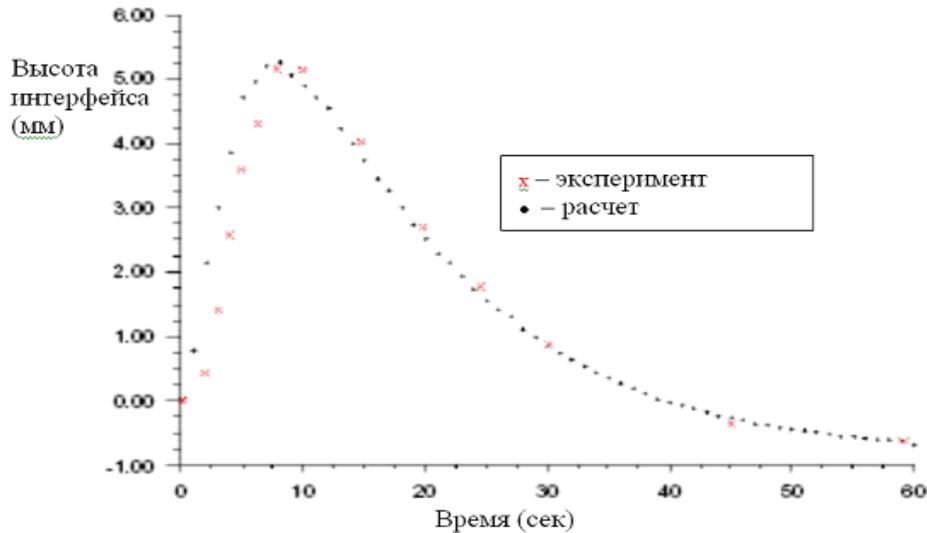


Рис. 4. Изменение во времени вертикального размера межфазной границы раздела силиконовое масло – вода на оси от времени ($Re = 74.9$)

Расчеты были проведены вплоть до физического времени равного $t=60$ секунд. Получены анимационные картины поведения интерфейса и течения жидкостей. Течение жидкости является сложным, многовихревым, колебательным, с тонкими пограничными слоями на стенках цилиндра и около интерфейса. Из-за разных свойств жидкостей структуры течений в силиконовом масле и воде разные. Это можно видеть, например, на рис.5, где показаны для момента времени $t=5$ сек поля плотности, модуля скорости, функции тока, треки и изобары. На этом рисунке видна тонкая структура течения около интерфейса,

различная структура течения в воде и масле, а также разное распределение давления в силиконовом масле и воде в момент времени .

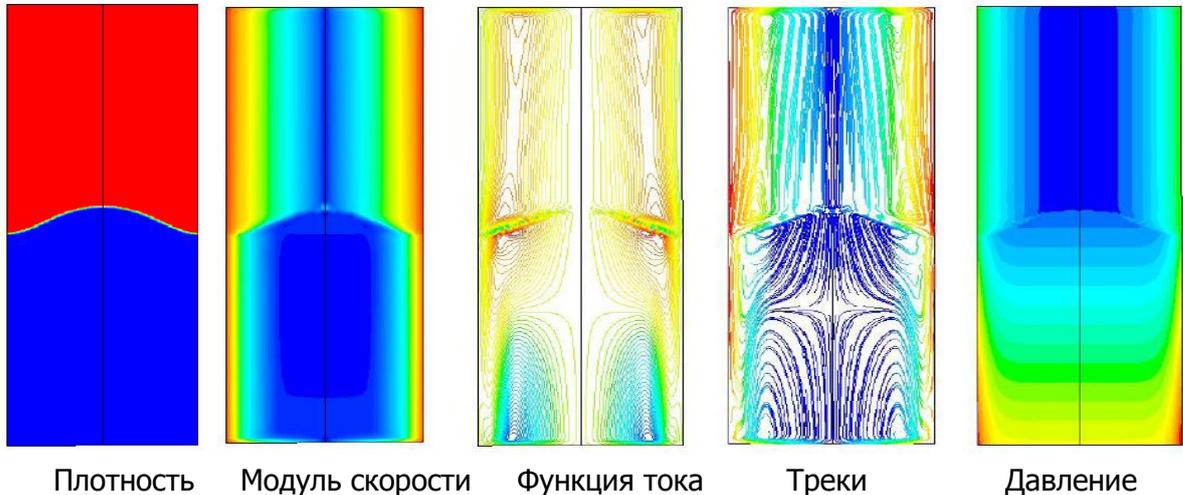


Рис. 5. Распределение плотности, скорости, функция тока, треки и общее давление в момент максимального отклонения интерфейса от первоначального ($Re = 74.9$) $time=5сек$)

Выводы по результатам тестового расчета

Выполнены тесты математической модели и метода для численного исследования двухслойных систем с изменяемой формой межфазной границы в предположении осевой симметрии.

Представлены данные о структуре течения, вызванного вращением в предположении осевой симметрии, высоты и формы межфазной границы.

Показана возможность описания течения в двухслойной системе с изменяемой поверхностью и показана точность воспроизведения в математической модели изменения формы поверхности между двумя жидкостями

Федюшкин Алексей Иванович

Рожков Алексей Николаевич

КОАЛЕСЦЕНЦИЯ КАПЕЛЬ НЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ



Подписано к печати 02.12.2014 Заказ № 41–2014 Тираж 30 экз.

Отпечатано в Федеральном Государственном
Бюджетном Учреждении науки
Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
119526, Москва, пр-т Вернадского, 101, корп.1