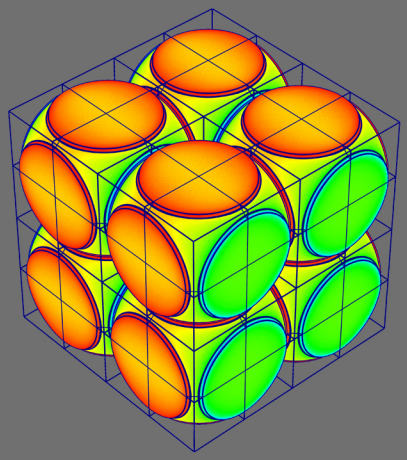
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Федюшкин А.И., Рожков А.Н. Моделирование коалесценции капель. Математическое моделирование и численные методы, 2020, № 2, с. 46–58.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/221/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.216.140
11.11.2026 14:51:27

УДК 532.2 DOI: 10.18698/2309-3684-2020-2-4658

Моделирование коалесценции капель

© А.И. Федюшкин, А.Н. Рожков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, 119526, Россия

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.

Ключевые слова: *коалесценция, численное моделирование, эксперимент*

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 нано-технологиях, в электронной, атомной и авиационной промышленностях, 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] был проведён анализ времён 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 численных 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 сил поверхностного натяжения и 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 и 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 формирования 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 [7-10, 14, 15] указывается на существование осциллирующих режимов изменения формы результирующей капли при коалесценции двух капель.

Целью данной работы является изучение динамики слиянии двух капель одной жидкости в воздухе, изменения форм капель и мостика между ними во времени.

Постановка задачи. 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 показана увеличенная зона соприкосновения капель в начальный момент в расчётной области математической модели. В математической модели предполагается, что в начальный момент времени между каплями сформировался мгновенно минимальный мостик, например, радиус начального мостика для капель диаметром d=1 мм был равен $r_m(t=0) = 5 \cdot 10^{-4}$ мм (рис. 3).

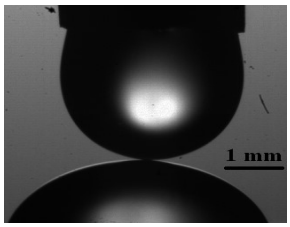


Рис. 1. Начальное расположение капель в эксперименте [2, 3]

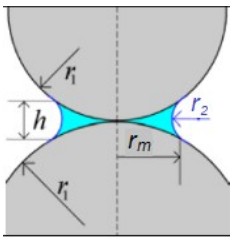


Рис.2. Схема мостика в эксперименте [2, 3]

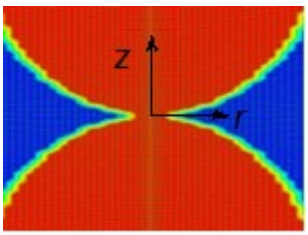


Рис.3. Схема начального расположения капель в математической модели

Математическая модель и численный метод решения задачи. Математическая модель основана на решении системы двумерных уравнений Навье-Стокса в осесимметричном приближении. Рассматривается коалесценция двух капель одной и той же жидкости в воздухе без учета силы тяжести ($g = 0$). В цилиндрической системе

координат, без учета вращения для двухфазной системы «газ-жидкость» в приближении модели «смеси» [1, 10] можно записать в виде (1–3).

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1}+\frac{u_1}{x_1}+\frac{\partial u_2}{\partial x_2}=0, \tag{1}$$

$$\frac{d(\rho u_1)}{dt}=-\frac{\partial p}{\partial x_1}+\frac{1}{x_1}\frac{\partial}{\partial x_1}\left(x_1\mu\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right)+\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\mu\frac{\partial u_2}{\partial x_2}\right)-\mu\frac{u_1}{x_1^2}+F_1, \tag{2}$$

$$\frac{d(\rho u_2)}{dt}=-\frac{\partial p}{\partial x_2}+\frac{1}{x_1}\frac{\partial}{\partial x_1}\left(x_1\mu\frac{\partial u_2}{\partial x_1}\right)+\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\mu\frac{\partial u_2}{\partial x_2}\right)+F_2, \tag{3}$$

где $df/dt=\partial f/\partial t+v_r\partial f/\partial r+v_z\partial f/\partial z$ — субстанциональная производная $x_1\equiv r$, $x_2\equiv z$ — радиальная и осевая координаты, $u_1\equiv v_r$, $u_2\equiv v_z$ — компоненты вектора скорости $\mathbf{u}(u_1,u_2)$, t — время, p — давление, ρ — плотность, μ — коэффициент динамической вязкости, F_1,F_2 — радиальная и осевая компоненты внешней силы $\mathbf{F}(F_1,F_2)$, действующей в узкой зоне вдоль интерфейса «газ - жидкость».

Для описания двухфазной системы «газ - жидкость» использовалась система уравнений (1–3) с одним уравнением для переноса импульса в предположении модели «смеси» [10] с усреднёнными скоростями $\mathbf{u}=\varepsilon\mathbf{u}_{gas}+(1-\varepsilon)\mathbf{u}_{liquid}$, плотностью $\rho=\varepsilon\rho_{gas}+(1-\varepsilon)\rho_{liquid}$, и вязкостью $\mu=\varepsilon\mu_{gas}+(1-\varepsilon)\mu_{liquid}$, где величины с индексом *gas* относятся к газу, а с индексом *liquid* — к жидкости. ε — объемная доля жидкости $(0<\varepsilon<1)$ определялась из решения уравнения переноса: $\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+u_1\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_1}+u_2\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_2}=0$.

Граничные условия на поверхности раздела «газ - жидкость» определялись из условия равновесия поверхностных сил и давления (4) [10]:

$$(p_1-p_2+\sigma\kappa)n_i=(\tau_{1ij}-\tau_{2ij})n_j \tag{4}$$

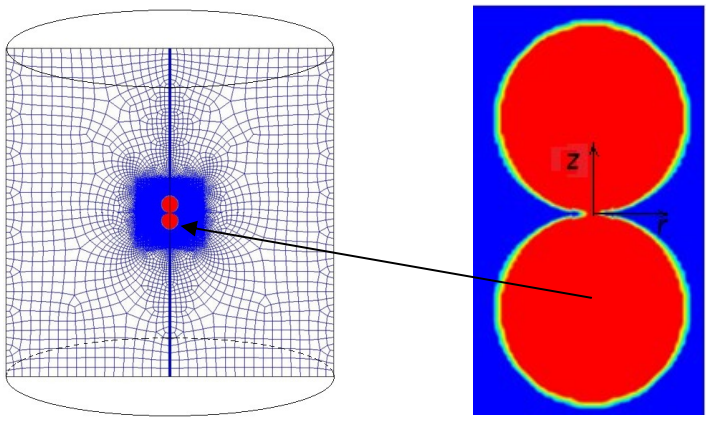
где σ — коэффициент поверхностного натяжения предполагается постоянным, p_1, p_2 — давление жидкости и газа, $\kappa=1/R_1+1/R_2$ — кривизна поверхности, где R_1,R_2 — радиусы кривизны для жидкости и газа, $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали, направленный внутрь второй жидкости, $\tau_{\alpha ij}$ — тензор вязких напряжений, индекс α обозначает: $\alpha=1$ — жидкость, $\alpha=2$ — воздух. Условие (4) записано для

постоянного коэффициента поверхностного натяжения, в случае учёта изменения поверхностного натяжения (капиллярной конвекции), необходимо в правой части выражения (4) учесть тангенсальную силу равную $f_\sigma = \mathrm{grad}\sigma$.

На внешних границах расчётной области ставится условие отсутствия трения, на оси условие симметрии, а на границе двухфазной системы «жидкость-воздух» условие (4). Моделирование изменения формы границы раздела «газ-жидкость» 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 объём (ячейка расчётной сетки), где не проходит интерфейс, содержит жидкость с объёмной долей ($0 < \varepsilon < 1$). Граница раздела определялась *VOF* методом с повышенным разрешением и учетом поверхностных сил по методу CSF (Continuum Surface Force) [11]. Метод CSF позволяет убрать сингулярность в случае обращения в ноль радиуса кривизны поверхности интерфейса и увеличить точность расчётов [11]. При решении задачи условие (4) на межфазной границе учитывалось через дополнительную локальную объёмную силу F в правой части уравнения переноса импульса (2–3). Сила F действует только в очень узкой зоне, заключённой вдоль линии интерфейса l шириной Δh. В каждой точке l_s линии интерфейса l при устремлении Δh к нулю силу F можно записать в виде $\mathbf{F}(l_s) = \sigma\hat{e}(l_s)\mathbf{n}(l_s)$, где $\hat{e}(l_s)$ — кривизна интерфейса в точке l_s, $\mathbf{n}(l_s)$ — нормаль к площадке в точке интерфейса l_s [11].

При численном решении системы уравнений (1-4) использовался консервативный метод контрольных объёмов с аппроксимацией пространственных производных второго порядка и первого порядка по времени.

На рис. 4а представлены схема осесимметричной расчетной области (r, z) и расчетная сетка с расположением двух одинаковых капель. На рис. 4б представлена увеличенная центральная часть расчетной области с каплями в начальный момент времени. В модели предполагалась осевая симметрия, поэтому расчётная область равнялась половине области, изображенной на рис. 4а и ограничивалась осью симметрии Oz. Для исключения влияния внешних границ, размеры расчетной области были выбраны в 10–20 раз больше диаметра капель, участвующих в слиянии. На рис. 4а показаны капли диаметром 1 мм в начальный момент времени с размерами расчетной области равной: $\{0 \le r \le 10$ мм, $-10 \le z \le 10$ мм$\}$. Для увеличения точности расчетная сетка в центральной части области была прямоугольной и сильно измельчена (рис. 4а).



а *б*

Рис. 4. Сетка и схема расчетной области с каплями в начальный момент времени: *а* ─ общий вид, *б* ─увеличенная часть расчетной области с каплями

Для верификации математической модели и определения точности воспроизведения изменения формы поверхности раздела двух жидкостей, было проведено математическое моделирование изменения уровня интерфейса двухслойной системы «масло-вода», ускоренно вращающейся в цилиндре, и проведено сравнение с экспериментальными данными, опубликованными в работах [12, 13]. При моделировании данной задачи в системе уравнений (2–3) учитывалось наличие окружной скорости и дополнялось уравнением переноса её импульса. Результаты моделирования тестовой задачи об изменении во времени поверхности раздела жидкостей при ускоренном вращении цилиндрического объема приведены в [14] и показали хорошую точность в сравнении с экспериментальными данными [12, 13].

Результаты численного моделирования. На основе численного решения уравнений Навье-Стокса для двухфазной системы «воздух-жидкость» (1) – (5) 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 $T_{visc} = d\mu / \sigma\left[\text{сек}\right]$, а при преобладании поверхностных сил масштабом времени: $T_{inert} = (d\rho^3 / \sigma)^{0.5}\left[\text{сек}\right]$ [7]. Безразмерное число Онезорге $Oh = \mu / (\rho\sigma d)^{0.5}$ — это отношение сил поверхностного

натяжения к инерционным силам (или другими словами — это отношение масштаба времени вязкостных сил T_{visc} к масштабу времени инерционных сил T_{inert}: $Oh = T_{visc} / T_{inert}$).

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

Таблица 1

Характеристики различных жидкостей

Жидкость	Плотность ρ, [кг/м^3]	Вязкость динамическая μ, [кг/(м сек)]	Поверхностное натяжение σ, [10^{-3} н/м]	Масштаб времени $T_{visc} = d\mu/\sigma$, [сек]	Масштаб времени $T_{insert} = (d^3/\sigma)^{0.5}$, [сек]	Число Онезорге $Oh = T_{visc}/T_{insert}$	Число Рейнольдса Re
Ртуть	13529	$1{,}5\cdot10^{-3}$	486,5	10^{-6}	$4\cdot10^{-3}$	$4\cdot10^{-3}$	268
Вода	998	10^{-3}	72,6	10^{-5}	$5\cdot10^{-3}$	3	0,34
Силиконовая жидкость	2000	$1{,}7\cdot10^{-5}$	59,0	10^{-5}	$6\cdot10^{-3}$	$5\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{4}$
Глицерин	1260	0,8	59,4	10^{-2}	$6\cdot10^{-3}$	77	0,01
Силиконовое масло	760	10,0	22,0	10^{-1}	$5\cdot10^{-3}$	$6\cdot10^{-4}$	1680

В математической модели предполагается, что в начальный момент времени капли находились уже в соприкосновении на небольшом участке, как твёрдые сферы (в начальный момент мениск и радиус кривизны определялся только размером ячейки сетки, а формирование мениска происходило во время счёта в течение первой микросекунды). В начальный момент времени все капли были диаметром $d = 1$ мм и начальный радиус общей части соприкосновения капель (мостика) был одинаковым, равным приблизительно $r_m(t = 0) = 0{,}05$ мм. Все скорости в начальный момент были равны нулю, а давление постоянное, равное атмосферному. Шаг расчётной сетки вблизи мостика был не более 10^{-3} мм. Для увеличения точности расчета границы раздела «воздух-жидкость» расчеты проводились с малым шагом по времени, ограниченным значением числа Куранта равным 2. Результаты численного моделирования показали, что формирование естественной

конфигурации жидкого мостика с мениском (согласно выполнению условия равенства сил давления и поверхностных сил (4)) происходит очень быстро (на первых же шагах по времени до 10^{-7} с). В дальнейшем численное решение показало, что ширина мостика меняется монотонно, как показано на рис. 6. Таким образом на каждом шаге по времени получали изменения ширины мостика между каплями и изменение формы капель.

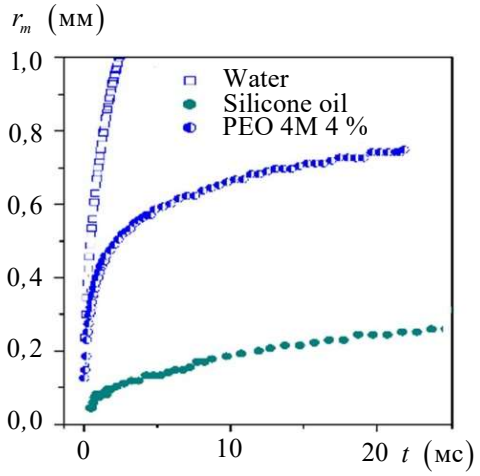


Рис. 5. Экспериментальные зависимости радиуса жидкого мостика r_m (мм) от времени t (мс)

Для жидкостей со свойствами, представленными 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.

На рис. 5 показаны экспериментальные зависимости радиуса жидкого мостика r_m (мм) от времени t (мс). На рис. 5 представлены данные для трёх жидкостей: воды, силиконового масла и 4% раствора потиленоксида (PEO) с вязкостью, близкой к вязкости силиконового масла. Экспериментальные данные показывают очень быстрое формирование мостика на начальном этапе коалесценции капель после чего начинается движение основных масс капель. Это свойство коалесценции капель подтверждается численными расчётами рис. 6 и 7. Ширина мостика изменяется от времени аппроксимируются зависимостью степенной зависимостью с показателем $1/2$. На рис. 5 показано влияние поверхностно активных добавок (4% PEO) на коалесценцию капель. Полимерные добавки замедляют коалесценцию капель через некоторое время после начала коалесценции [2, 3].

На рис. 6 представлены графики изменения радиуса мостика r_m от времени на начальном этапе слияния капель воды до времени $t < 2{,}5$ мкс. На рис. 6 линия 1 — это численные результаты, максимальное значение радиуса мостика в сечении $z = 0$, 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. 7.

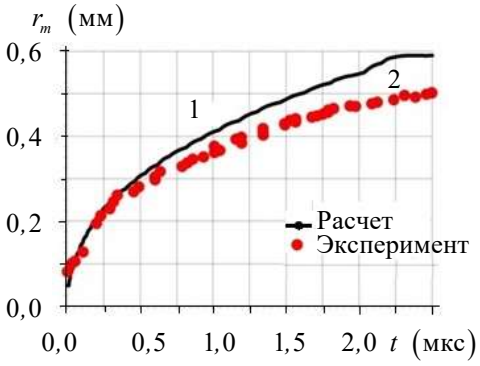


Рис. 6. Изменение радиуса мостика r_m (мм) при слиянии капель воды от времени t (мкс):
1 — расчет, 2 — эксперимент

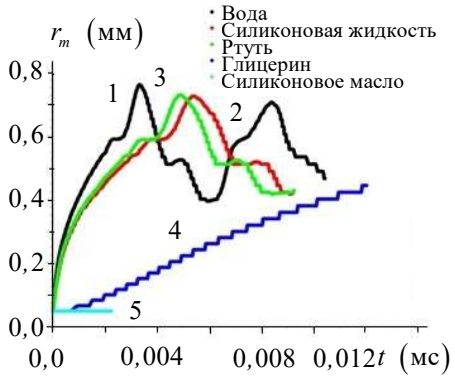


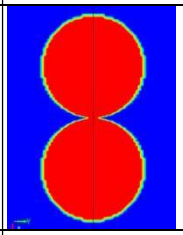
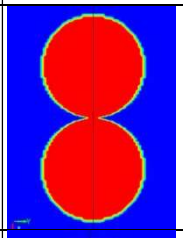
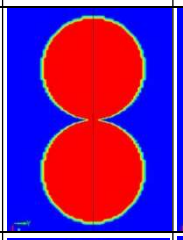
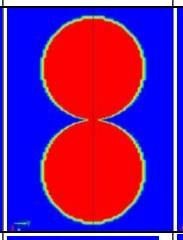
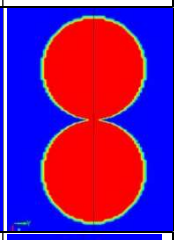
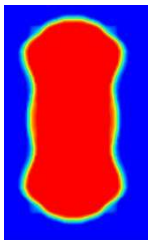
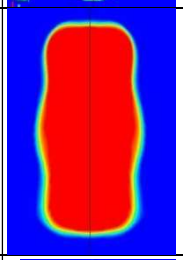
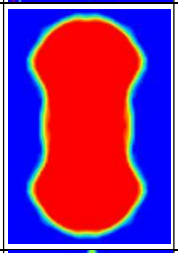
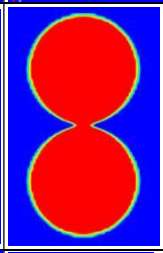
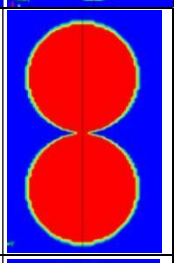
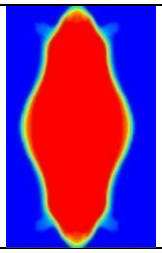
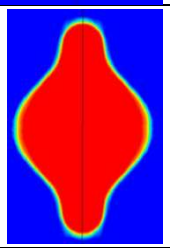
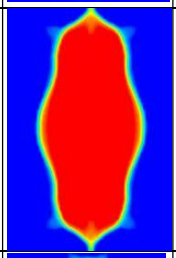
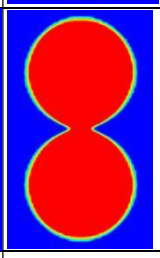
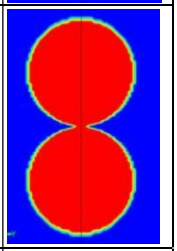
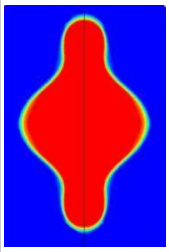
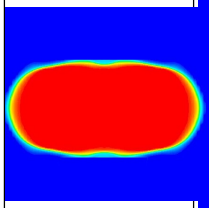
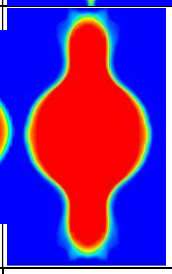
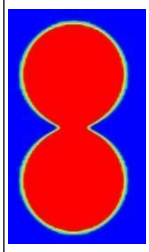
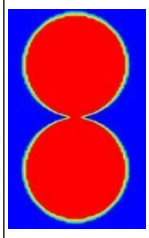
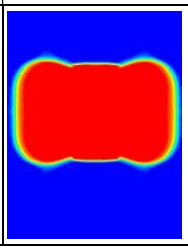
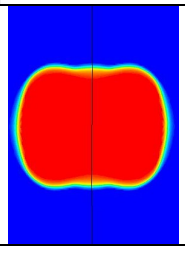
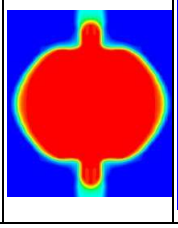
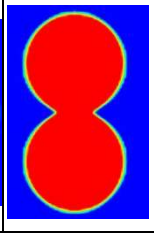
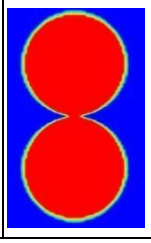
Рис. 7. Изменение во времени t (мс) радиуса мостика r_m (мм) при слиянии капель разных жидкостей

Изменение форм капель во времени представлено на рисунках в таблице 2 (в первом столбце таблицы 2 указано время t (мс). На рисунках в таблице 2 представлены формы капель для различных жидкостей и в разные моменты времени в интервале $t = 0...50$ мс. Более подробные картины изменения форм капель представлены в работе [14].

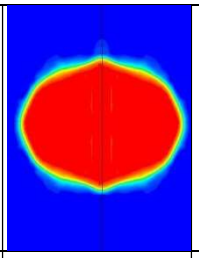
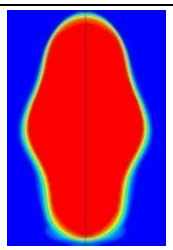
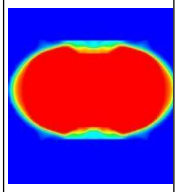
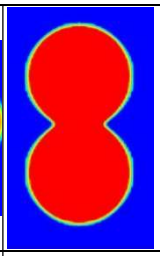
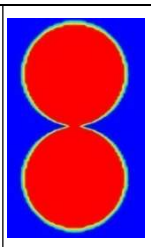
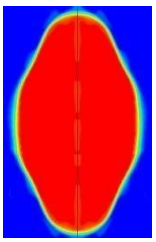
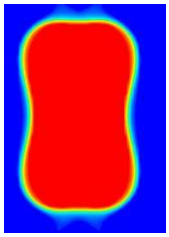
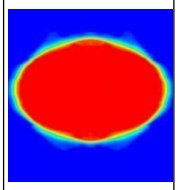
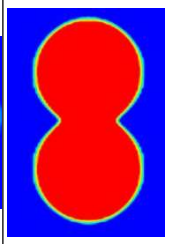
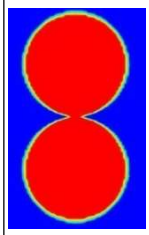
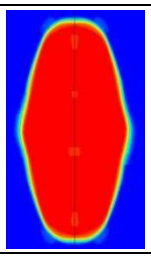
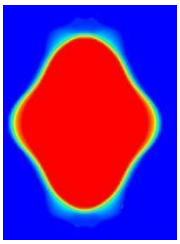
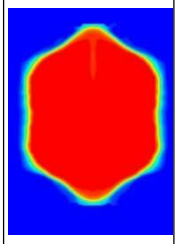
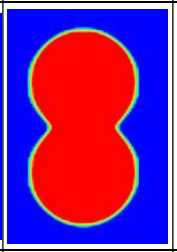
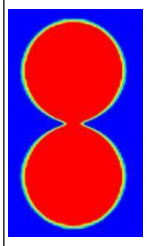
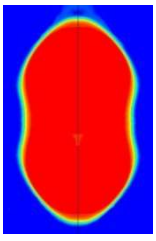
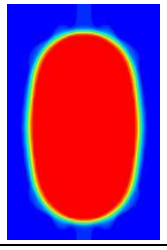
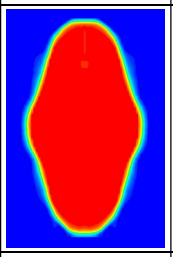
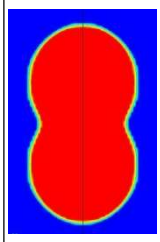
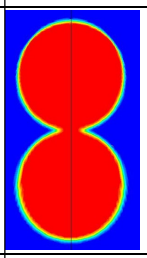
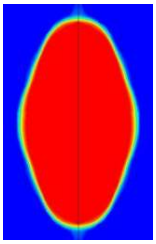
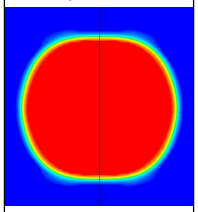
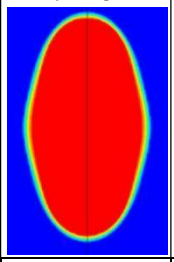
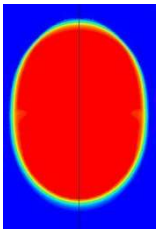
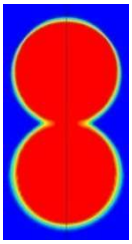
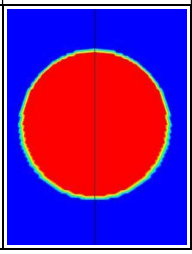
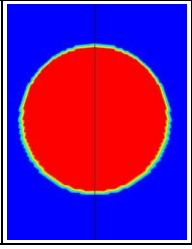
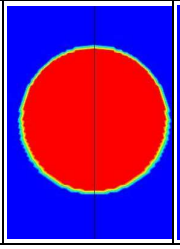
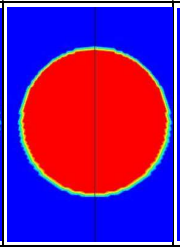
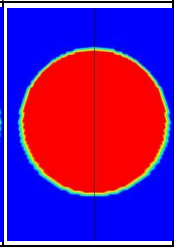
В последней строке таблицы 2 представлены формы результирующей капли на стационаре, а в предпоследней строке — промежуточные формы для $t > 10$ мс. Из результатов, представленных на рисунках таблицы 2 видно, что на поверхностях сливающихся капель жидкости с небольшой вязкостью образуются осциллирующие волны, которые приводят к колебательному характеру динамики формирования поверхностей результирующих капель, что иллюстрируется также зависимостями на рис. 7 и согласуется с экспериментальными результатами [2, 3, 15]. В работе [15] были представлены фотографии, показывающие периодические изменения форм капель при коалесценции двух капель дибутилфтолата, левитирующихся в растворе поваренной соли.

Таблица 2

Формы результирующей капли на стационаре, промежуточные формы капли

Время (мс)	Ртуть	Вода	Силиконовая жидкость	Глицерин	Силиконовое масло
$t = 0$					
1					
2					
3					
4					

Продолжение таблицы 2

5					
6					
7					
10					
$t > 10$	$t = 11$ 	$t = 12$ 	$t = 13$ 	$t = 20$ 	$t = 50$ 
Равно-весная форма капель					

Заключение. Представлены зависимости изменения во времени радиусов мостиков между коалесцирующими каплями для различных жидкостей. Показано сильно влияние малых полимерных добавок на коалесценцию капель. 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 представлены картины изменения форм капель для разных жидкостей в процессе их коалесценции, показывающие нестационарный характер и масштабы времени коалесценции капель.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы АААА-А20-120011690131-7.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Frenkel J. Viscous flow of crystalline bodies under the action of surface tension. *Journal of Physics*, 1945, № 9, pp. 385–391.
[2] Rozhkov A., Mitkin V., Theofanous T. The dynamics of visco-elastic bridges in drop coalescence. *Proceedings of XXII International Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, 2 p.
[3] Рожков А.Н., Mitkin V., Theofanous T. Коалесценция упруговязких капель. *Материалы 24 Симпозиума по реологии,* 2008, 5 с.
[4] Paulsen J.D., Carmigniani R., Kannan A., Burton J.C., Nagel S.R. Coalescence of bubbles and drops in an outer fluid. *Nature Communications*, 2014, № 5, art. № 3182.
[5] Eggers, J., Lister, J. R. & Stone, H. A. Coalescence of liquid drops. *J. Fluid Mech*, 1999, vol. 401, pp. 293–310.
[6] Duchemin L., Eggers J., Josserand C. Inviscid coalescence of drops. *J. Fluid Mech*, 2003, vol. 487, pp. 167–178.
[7] Sprittles J.E., Shikhmurzaev Y.D. Coalescence of liquid drops: Different models versus experiment. *Physics of Fluids*, 2012, vol. 24, iss. 12, 27 p.
[8] Becker E., Hiller W.J., Kowalewski T.A. Experimental and theoretical investigation of large-amplitude oscillations of liquid droplets. *J. Fluid Mech, 1991,* vol. 231, pp. 189–210.
[9] Watanabe T. Nonlinear oscillations and rotations of a liquid droplet. *Int. Journal of Geology*, 2010, vol. 4, iss. 1, pp. 5–13.
[10] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика.* Москва, Физматлит, 2015, 728 с.
[11] Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.A Continuum Method for Modeling Surface Tension. *J. Comput. Phys.*, 1992, vol. 100, pp. 335–354.
[12] Sugimoto, T., Iguchi M. Behavior of Immiscible Two Liquid Layers Contained in Cylindrical Vessel Suddenly Set in Rotation. *ISIJ International*, 2002, vol. 42, iss. 4, pp. 338–343.
[13] Sugimoto T., Iguchi M. Rapid Mixing and Separation of Molten Slag and Metal Using Cylindrical and Baffled Vessels Suddenly Set in Rotation. *ISIJ International*, 2003, vol. 43, iss. 12, pp. 1867–1874.
[14] Федюшкин А.И., Рожков А.Н. Коалесценция капель ньютоновской жидкости. *Препринт ИПМех РАН*, 2014, № 1087, 27 с.
[15] Бабалян Г.А. *Физико-химические процессы в добыче нефти.* Москва, «Недра», 1974, 200 с.

Статья поступила в редакцию 10.02.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:
Федюшкин А.И., Рожков А.Н. Моделирование коалесценции капель. *Математическое моделирование и численные методы,* 2020, № 2, с. 46–58.

Федюшкин Алексей Иванович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. e-mail: fai@ipmnet.ru

Рожков Алексей Николаевич — д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. e-mail: rozhkov@ipmnet.ru

Modeling of droplets coalescence

© A.I. Fedyushkin, A.N. Rozhkov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russia

The paper considers the dynamics of the coalescence of two drops of Newtonian fluid. The 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 numeri-cal simulation are compared with experimental data.

Keywords*: coalescence, numerical simulation, experiment*

REFERENCES

[1] Frenkel J. Viscous flow of crystalline bodies under the action of surface tension. *Journal of Physics*, 1945, № 9, pp. 385–391.
[2] Rozhkov A., Mitkin V., Theofanous T. The dynamics of visco-elastic bridges in drop coalescence. *Proceedings of XXII International Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, 2 p.
[3] Rozhkov A.N., Mitkin V., Theofanous T. Koalescenciya uprugovyazkih kapel' [Coalescence of elastic-viscous drops]. *Proceedings of the 24th rheology Symposium,* 2008, 5 p.
[4] Paulsen J.D., Carmigniani R., Kannan A., Burton J.C., Nagel S.R. Coalescence of bubbles and drops in an outer fluid. *Nature Communications*, 2014, № 5, art. № 3182.
[5] Eggers, J., Lister, J. R. & Stone, H. A. Coalescence of liquid drops. *J. Fluid Mech*, 1999, vol. 401, pp. 293–310.
[6] Duchemin L., Eggers J., Josserand C. Inviscid coalescence of drops. *J. Fluid Mech*, 2003, vol. 487, pp. 167–178.
[7] Sprittles J.E., Shikhmurzaev Y.D. Coalescence of liquid drops: Different models versus experiment. *Physics of Fluids*, 2012, vol. 24, iss. 12, 27 p.
[8] Becker E., Hiller W.J., Kowalewski T.A. Experimental and theoretical investigation of large-amplitude oscillations of liquid droplets. *J. Fluid Mech, 1991,* vol. 231, pp. 189–210.
[9] Watanabe T. Nonlinear oscillations and rotations of a liquid droplet. *Int. Journal of Geology*, 2010, vol. 4, iss. 1, pp. 5–13.
[10] Landau L.D., Lifshitz E.M. *Teoreticheskaya fizika. T.6. Gidrodinamika.* [Theoretical physics. Vol. 6. Hydrodynamics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2015, 728 c.
[11] Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.A Continuum Method for Modeling Surface Tension. *J. Comput. Phys.*, 1992, vol. 100, pp. 335–354.

[12] Sugimoto, T., Iguchi M. Behavior of Immiscible Two Liquid Layers Contained in Cylindrical Vessel Suddenly Set in Rotation. *ISIJ International*, 2002, vol. 42, iss. 4, pp. 338–343.
[13] Sugimoto T., Iguchi M. Rapid Mixing and Separation of Molten Slag and Metal Using Cylindrical and Baffled Vessels Suddenly Set in Rotation. *ISIJ International*, 2003, vol. 43, iss. 12, pp. 1867–1874.
[14] Fedyushkin A.I., Rozhkov A.N. Fedyushkin A.I., Rozhkov A.N. Koalescenciya kapel' n'yutonovskoj zhidkosti [Coalescence of Newtonian liquid droplets]. *Preprint IPMekh RAN* **[***Preprint of IPMech RAS*], 2014, no. 1087, 27 p.
[15] Balabyan G.A. *Fiziko-himicheskie processy v dobyche nefti* [Physical and chemical processes in oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1974, 200 p.

Fedyushkin A.I., Cand. Sc. (Phys. — Math.), Senior researcher of Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS. e-mail: fai@ipmnet.ru

Rozhkov A.N., Dr. Sci. (Phys. — Math.), Chief scientific researcher of Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS. e-mail: rozhkov@ipmnet.ru