

На правах рукописи



Усанина Анна Сергеевна

**ДИНАМИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ ФОРМЫ
КАПЕЛЬ И ПУЗЫРЬКОВ ПРИ ТЕЧЕНИИ
ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2011

Работа выполнена на кафедре прикладной газовой динамики и горения ГОУ ВПО "Томский государственный университет" и в отделе газовой динамики и физики взрыва НИИ ПММ ТГУ

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Архипов Владимир Афанасьевич

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки и образования РФ,
доктор технических наук
Бошнятов Борис Владимирович

доктор физико-математических наук,
профессор
Бубенчиков Алексей Михайлович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт теоретической и прикладной
механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск

Защита состоится 23 сентября 2011 г. в 10 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ГОУ ВПО "Томский государственный университет" по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, корпус 10.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан "___" августа 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Ю. Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Процессы динамического взаимодействия жидкости с любой другой несмешивающейся средой (жидкость, газ, твердое тело), сопровождающиеся ее искривлением на границе раздела фаз, в частности, движение капельно-пузырьковых сред, являются предметом интенсивных фундаментальных и прикладных исследований. Это связано с широким применением получаемых результатов в различных сферах жизнедеятельности человека. В качестве примеров можно привести образование атмосферных осадков, нанесение различного рода покрытий на конструкционные материалы, процессы смазки и пропитки в машиностроении, процессы флотации, гидроподавления пыли, барботажа и т.д. Наиболее значимые результаты в этой области получены Лордом Рэлеем, В.Г. Левичем, А.П. Тишиным, А.А. Шрайбером, Дж. Бэтчелором, Р. Хоффманом, Р.И. Нигматулиным, И.М. Васениным, О.В. Воиновым и рядом других ученых.

На сегодняшний день ряд вопросов требует дополнительных исследований, что подтверждается многочисленными публикациями в научной периодике последних лет. В частности, не получено экспериментального подтверждения потери устойчивости формы дисперсной фазы при числах Рейнольдса $Re < 1$ за счет возникновения неустойчивости Рэлея-Тейлора, для численных задач со свободной поверхностью требуется априорная зависимость динамического краевого угла от свойств жидкости и скорости движения линии трехфазного контакта, требуется разработка более точных методов измерения смачиваемости порошковых материалов и т.д.

Объект исследования – жидкости с различными физическими свойствами (дистиллированная вода, водно-глицериновый раствор, масла, раствор глицерин- $ZnCl_2$), а также процессы на границе раздела жидкости с любой другой несмешивающейся средой.

Предмет исследования – условия потери устойчивости формы капли и пузырька; эволюция формы свободной поверхности капли, растекающейся на горизонтальной поверхности, и поведение динамических характеристик процесса (динамического краевого угла капли, скорости движения линии контакта трех фаз).

Целью работы является:

– исследование механизма потери устойчивости формы дисперсной фазы при $Re < 1$, определение условий возникновения и характера деформации границы раздела фаз путем проведения прямого тщательного эксперимента.

– исследование эволюции формы свободной поверхности капли жидкости при ее растекании на твердой горизонтальной поверхности при малых скоростях столкновения, а также динамических характеристик процесса, определяющих искривление жидкости на границе с воздухом.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов. В работе использован общий метод экспериментального исследования, основой которого является визуализация процесса при помощи современных способов высокоскоростной видеосъемки. Высокая скорость видеосъемки (свы-

ше 1000 кадров в секунду) и малые времена экспозиции (менее 0.1 мс) позволяли получить четкую и контрастную картину исследуемых процессов. Достоверность полученных результатов основывается на том, что в работе приведены результаты непосредственного наблюдения (фоторяды) процессов на границе раздела фаз, сходимостью полученных экспериментальных данных с результатами, полученными другими авторами в пересекающихся диапазонах исследований, и проведением статистической обработки результатов экспериментов. Достоверность результатов теоретического исследования основывается на строгом физическом обосновании физико-математической модели и согласовании результатов расчетов с полученными экспериментальными данными.

Положения, выносимые на защиту.

1. Способ исследования потери устойчивости формы капли, движущейся в другой несмешивающейся жидкости, при числах Рейнольдса $Re < 1$.
2. Экспериментальная установка для исследования механизма потери устойчивости формы капли при достижении критического значения числа Бонда в области $Re < 1$.
3. Физико-математическая модель движения капли в закрученном потоке вязкой жидкости с учетом ее гравитационного осаждения.
4. Результаты экспериментального исследования динамики и потери устойчивости формы капли при движении в поле центробежных массовых сил.
5. Результаты экспериментального исследования потери устойчивости сферической формы пузырька воздуха при всплывании в вязкой жидкости.
6. Закономерности потери устойчивости границы раздела фаз в области $Re < 1$.
7. Результаты экспериментального исследования процесса растекания одиночной изначально сферической капли жидкости на твердой горизонтальной поверхности при малых числах Вебера We .
8. Способ и результаты определения смачиваемости порошковых материалов.

Научная новизна.

1. Предложен новый способ исследования потери устойчивости формы капли в области чисел Рейнольдса $Re < 1$ по механизму Рэлея-Тейлора, заключающийся в замене ускорения свободного падения на ускорение центробежных массовых сил.
2. Разработана и запатентована экспериментальная установка для исследования устойчивости формы капли, движущейся в закрученном потоке вязкой жидкости в области $Re < 1$.
3. Впервые получены результаты экспериментального исследования процесса потери устойчивости формы капли, движущейся в поле центробежных массовых сил при $Re < 1$, по механизму Рэлея-Тейлора.

4. Впервые показано, что критическое значение числа Бонда, соответствующее началу потери устойчивости фазы дисперсной фазы, существенно зависит от режима движения (от числа Рейнольдса).

5. Впервые предложено обрабатывать результаты по потери устойчивости формы капель и пузырьков единой зависимостью $Bo/We=f(Re)$.

6. Предложен новый способ определения смачиваемости порошковых материалов, основанный на непосредственном измерении краевого угла смачивания капли, помещенной на спрессованный по специальной технологии брикет из частиц порошка.

7. Получены новые данные по характеристикам смачиваемости угольных порошков различных месторождений Азиатского региона.

Практическая значимость работы.

1. Разработано устройство для исследования потери устойчивости формы капли, техническая новизна которого подтверждена патентом РФ №2394649 от 27.04.2009 г.

2. Полученные экспериментальные данные по физике процессов на границе раздела капли жидкости с другой несмешивающейся средой могут быть использованы для расчетов эволюции облака жидко-капельных аэрозолей. Данная задача имеет практическую значимость при распространении токсичных компонентов при разделении ступеней ракет-носителей, авиационном тушении пожаров, распылении удобрений и ядохимикатов на поверхности листьев растений и т.д.

3. Полученные данные по смачиваемости частиц угольных порошков могут быть использованы для повышения эффективности таких технологических процессов, как гидроподавление угольной пыли в шахтах путем орошения жидкостью, флотация при обогащении угля и т.д.

4. Исследования диссертационной работы проводились при поддержке грантов РФФИ №08-08-00064-а "Моделирование растекания жидкостей по поверхности твердых и жидких сред с учетом капиллярных эффектов" (2008-2009 г.), №09-08-90700 моб_ст (2009 г.), №10-08-90700 моб_ст (2010 г.) и в рамках программы "Участник молодежного научно-инновационного конкурса" (У.М.Н.И.К.) Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере "Разработка эффективного способа определения характеристик смачиваемости различных порошковых материалов".

Апробация работы. Основные результаты и положения по теме диссертации докладывались и получили положительную оценку на Международных и Всероссийских конференциях, симпозиумах и семинарах: Всероссийская конференция молодых ученых "Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии" (Новосибирск, 2007); Всероссийская конференция "Современная баллистика и смежные вопросы механики" (Томск, 2008, 2009); III Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых "Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения" (Бийск, 2008); Рабочая группа "Аэрозоли Сибири" (Томск, 2006, 2007, 2009); XV Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых

(Кемерово-Томск, 2009); Международная конференция студентов и молодых ученых "Перспективы развития фундаментальных наук" (Томск, 2007, 2010); Всероссийская конференция молодых ученых "Физика и химия высокоэнергетических систем" (Томск, 2007, 2008, 2009); Молодёжная конференция "Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей" (Новосибирск, 2010); VII Международная конференция "Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике" (Новосибирск, 2010); XXII Юбилейный семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Санкт-Петербург, 2010); Всероссийская молодежная конференция "Актуальные проблемы современной механики сплошных сред - 2010" (Томск, 2010); Международная конференция "Методы аэрофизических исследований" (Новосибирск, 2010); Российско-итальянский студенческий Форум в рамках программы "Год России в Италии" (Рим, 2011); Седьмая Всероссийская конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы механики", посвященная 50-летию полета Ю.А.Гагарина и 90-летию со дня рождения основателя и первого директора НИИ ПММ ТГУ А.Д. Колмакова (Томск, 2011).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 34 научные работы, в том числе в изданиях из перечня ВАК: "Прикладная механика и техническая физика", "Инженерная физика", "Авиакосмическое приборостроение", "Известия вузов. Физика".

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 163 наименований. Работа изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели исследований, изложены научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе (Динамика и устойчивость формы капель и пузырьков при течении вязкой жидкости (обзор литературы)) представлен литературный обзор основных результатов по исследованию процесса потери устойчивости формы капель и пузырьков и процесса растекания капли жидкости на твердой горизонтальной поверхности, на основе которого сформулированы цели и задачи исследований.

Во второй главе (Устойчивость формы капли при малых числах Рейнольдса) представлены результаты экспериментального и теоретического исследования движения капли в поле массовых сил при числах Рейнольдса $Re < 1$.

Для исследований была выбрана пара жидкостей: ртуть (материал капли) и раствор хлористого цинка $ZnCl_2$ в глицерине (дисперсионная среда). До и после проведения экспериментов проводились тщательные измерения физических характеристик рабочей жидкости. Результаты измерений показали,

что $\rho_l = (1.27 \pm 0.02) \text{ г/см}^3$, $\sigma = (0.300 \pm 0.015) \text{ Н/м}$. Значения вязкости рабочей жидкости приведены в таблице 1. Для вязкости и плотности ртути использовались табличные значения [1] при температуре 20°C : $\mu_p = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\rho_p = 13.55 \text{ г/см}^3$.

Для оценки возможности потери устойчивости формы капли в области малых значений чисел Бонда и Вебера при $\text{Re} < 1$ были проведены исследования устойчивости формы капли при ее гравитационном осаждении. Экспериментальная установка состоит из прозрачного резервуара размером $50 \times 60 \times 300 \text{ мм}$ с плоскопараллельными стенками, наполненного рабочей жидкостью, устройства для получения капли и системы визуализации.

Таблица 1 – Вязкость растворов хлористого цинка в глицерине

z^*	0.106	0.106	0.108	0.109	0.136
$T_l, ^\circ\text{C}$	20	8	8	8	8
$\mu_l, \text{Па}\cdot\text{с}$	2.2 ± 0.1	6.63 ± 0.08	7.67 ± 0.09	8.8 ± 0.1	15.0 ± 0.3

* – массовая доля ZnCl_2 в растворе

Для исключения влияния нестационарных эффектов видеосъемка капли проводилась на стационарном участке ее движения. По измеренным в эксперименте характеристикам определялись значения чисел Рейнольдса, Бонда и Вебера

$$\text{Re} = \rho_l u_z D / \mu_l, \text{Bo} = g \rho_p (1 - \rho_l / \rho_p) D^2 / \sigma, \text{We} = \rho_l u_z^2 D / \sigma \quad (1)$$

где u_z – квазистационарная скорость гравитационного осаждения капли; g – ускорение свободного падения.

В исследованном диапазоне критериев подобия ($\text{Re} = 0.01 \div 0.051$, $\text{Bo} = 6.4 \div 19.7$, $\text{We} = 6.8 \cdot 10^{-3} \div 7.4 \cdot 10^{-2}$) не было обнаружено деформации капли. Максимальное значение числа Бонда, которое было получено в проведенных экспериментах, составляло $\text{Bo} = 19.7$. Для обеспечения более высоких значений числа Bo необходимо получить исходные сферические капли более крупных размеров, что невозможно, используя обычные способы. Для достижения более высоких значений числа Бонда при числах Рейнольдса $\text{Re} < 1$ необходимо использовать принципиально новую методику исследования.

В связи с этим разработан новый способ исследования потери устойчивости формы капли, позволяющий обеспечить более высокие значения числа Бонда при меньшем диаметре капли. Суть предлагаемого способа заключается в том, что гравитационное осаждение капли в поле ускорения силы тяжести дополняется ее радиальным движением в поле ускорения центробежной силы инерции, возникающей при вращении сосуда с рабочей жидкостью.

При этом входящее в число Бонда (1) ускорение массовых сил ω будет равно

$$\omega = g\sqrt{1+k^2}, \quad (2)$$

где $k = \omega_{цб} / g$ – степень перегрузки; $\omega_{цб}$ – ускорение центробежных массовых сил. При вращении сосуда с большой угловой скоростью можно обеспечить достаточно большие значения $\omega_{цб}$. При этом суммарное ускорение массовых сил $\omega \gg g$ и замена ускорения свободного падения g на суммарное ускорение массовых сил ω позволяет увеличить величину числа Бонда при числах Рейнольдса $Re < 1$ и, тем самым, достичь требуемый режим движения капли.

В рамках предлагаемого способа разработано, запатентовано и отлажено устройство (рисунок 1), состоящее из цилиндрического резервуара, полностью наполненного вязкой жидкостью. Сверху резервуар закрыт прозрачной крышкой, обеспечивающей герметичность конструкции. Резервуар с рабочей жидкостью раскручивается с помощью электродвигателя до необходимой угловой скорости. Затем в резервуар с вращающейся жидкостью поступает исходная сферическая капля, процесс движения и деформация которой регистрируется скоростной видеокамерой.

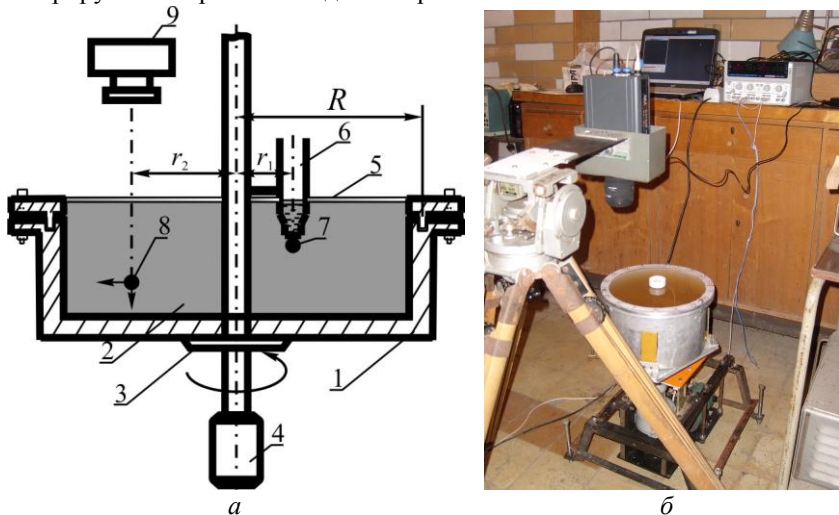


Рисунок 1 – Принципиальная схема (а) и фотография (б) установки для исследования устойчивости формы капли: 1 – цилиндрический резервуар; 2 – рабочая жидкость; 3 – основание; 4 – электродвигатель; 5 – прозрачная крышка; 6 – устройство для получения капель; 7 – начальная капля; 8 – движущаяся капля; 9 – скоростная видеокамера

Для обеспечения требуемого режима движения капли ($Re < 1$, $Bo = Bo_{кр}$), необходимо использовать каплю определенного размера, рабочую жидкость с определенным значением коэффициента динамической вязкости и вращать

резервуар с определенной угловой скоростью. Оценка этих параметров проводилась с помощью следующих аналитических выражений, соответственно:

$$D = \sqrt{\frac{\sigma \text{Bo}}{(\rho_p - \rho_l) g \sqrt{1+k^2}}}, \quad \mu_l > \left[\frac{\rho_l (\rho_p - \rho_l) D^3}{18} g \sqrt{1+k^2} \right]^{0.5},$$

$$n = \frac{1}{2\pi\sqrt{r}} \left\{ \left(\frac{\sigma \text{Bo}}{(\rho_p - \rho_l) D^2} \right)^2 - g^2 \right\}^{0.25},$$

где r – радиальная координата капли.

Для оперативного выбора параметров эксперимента применительно к предложенному выше экспериментальному устройству разработана физико-математическая модель движения капли в закрученном потоке вязкой жидкости с учетом ее гравитационного осаждения.

Постановка задачи: Цилиндрический резервуар, закрытый сверху крышкой и полностью заполненный вязкой жидкостью, постепенно раскручивается против часовой стрелки до некоторого значения угловой скорости $\bar{\Omega}$ ($|\bar{\Omega}| = 2\pi n$). При $|\bar{\Omega}| = \text{const}$ аксиальная и радиальная компоненты вектора скорости жидкости в неподвижной цилиндрической системе координат z, r, φ (рисунок 2) равны нулю ($V_z = V_r = 0$), а радиальное распределение тангенциальной компоненты соответствует квазитвердому вращению:

$$V_\varphi(r) = |\bar{\Omega}| r = 2\pi n r. \text{ При достижении заданной}$$

постоянной угловой скорости вращения в сосуд с вязкой жидкостью в момент времени $t = t_0$ вводят каплю ртути диаметром D на некотором расстоянии r_1 от оси вращения Oz . При этом начальные значения аксиальной и радиальной компонент вектора скорости капли в неподвижной системе координат равны нулю ($u_z = u_r = 0$), а начальное значение тангенциальной компоненты $u_\varphi = |\bar{\Omega}| r_1$. Положение капли A в любой момент времени определяется ее радиус-вектором \vec{r}_p с координатами z_p, r_p, φ_p . Необходимо определить значение скорости и положение капли (траекторию движения) в любой момент времени $t > t_0$.

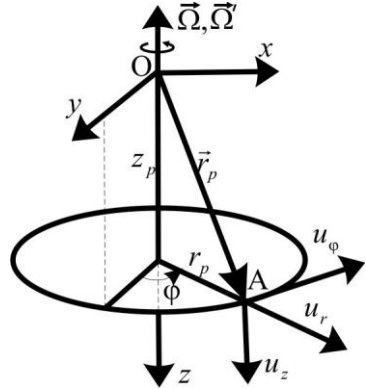


Рисунок 2 – Цилиндрическая (z, r, φ) и декартова (x, y, z) системы координат

Система уравнений, описывающая движение капли в поле центробежных массовых сил, для стоксовского режима движения ($Re < 1$, $C_D = 24/Re$) имеет вид

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{du_z}{dt} &= g \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right) - \frac{18\mu_l}{\rho_p D^2} u_z, \\ \frac{du_r}{dt} &= \frac{1}{r} \left(u_\varphi^2 - \frac{\rho_l}{\rho_p} V_\varphi^2 \right) - \frac{18\mu_l}{\rho_p D^2} u_r, \\ \frac{du_\varphi}{dt} &= -\frac{u_\varphi u_r}{r} + \frac{18\mu_l}{\rho_p D^2} (V_\varphi - u_\varphi). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

В системе уравнений (3) учитываются внешние силы, обусловленные градиентом давления среды и силы инерции, обусловленные вращением капли вокруг оси Oz . Силы инерции рассмотрены для неинерциальной системы координат, вращающейся вокруг оси Oz с угловой скоростью капли $\bar{\Omega}'$, которая в отличие от угловой скорости резервуара $\bar{\Omega} = const$ может изменяться по модулю за счет отставания капли от вращающейся жидкости ($u_\varphi \leq V_\varphi$).

Для расчета траектории движения капли система уравнений (3) дополнялась кинематическими соотношениями:

$$u_z = dz_p / dt, \quad u_r = dr_p / dt, \quad u_\varphi = r_p^{-1} d\varphi_p / dt. \quad (4)$$

где $\vec{r}_p(z_p, r_p, \varphi_p)$ – радиус-вектор капли. Для численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (3) и (4) использовалась неявная по правым частям разностная схема первого порядка точности. Расчет проводился при следующих начальных условиях:

$$t = t_0 : \begin{cases} z_p = 0, r_p = r_1, \varphi_p = 0, \\ u_z = 0, u_r = 0, u_\varphi = 2\pi n r_1. \end{cases}$$

Для учета внутреннего течения жидкости в капле при $Re < 1$ в коэффициент сопротивления вводилась поправка, полученная из решения Рыбчинского-Адамара для задачи вязкого обтекания сферической капли $C_D = 24/Re[(3\mu^* + 2)/(3 + 3\mu^*)]$ (где $\mu^* = \mu_p / \mu_l$).

Результаты экспериментального исследования движения и деформации капель ртути в закрученном потоке вязкой жидкости на описанной выше установке получены для следующего диапазона значений определяющих параметров: $D=(4\div 6)$ мм, $n=(4\div 9)$ оборотов в секунду, $Re=0.01\div 4$, $Bo=6.4\div 456$, $We=0.01\div 20$.

Обнаружено, что после введения капли ртути в резервуар с вязким раствором, она движется по спирали, расширяющейся в направлении оси Oz (рисунок 3). При этом практически на всей траектории капля движется в режиме, близком к квазистационарному. Вид спирали зависит от параметров эксперимента: D , μ_l и n .

Радиальная u_r и тангенциальная u_ϕ компоненты скорости капли линейно возрастают с увеличением радиальной координаты (рисунок 4). Было обнаружено отставание капли от несущего потока, которое уменьшается с увеличением вязкости рабочей жидкости и уменьшением диаметра капли.

По мере движения капли к периферии резервуара, значения чисел Рейнольдса, Вебера и Бонда возрастают. Критерии подобия вычислялись для условий конкретных экспериментов по следующим формулам:

$$\text{Re} = \frac{\rho_l \sqrt{u_z^2 + u_r^2 + (V_\phi - u_\phi)^2} D}{\mu_l}, \quad \text{We} = \frac{\rho_l [u_z^2 + u_r^2 + (V_\phi - u_\phi)^2] D}{\sigma},$$

$$\text{Bo} = \rho_p D^2 |\vec{\omega}| / \sigma. \quad (5)$$

Поскольку капля одновременно движется в аксиальном, радиальном и тангенциальном направлении, то суммарное ускорение массовых сил $|\vec{\omega}|$, входящее в выражение для числа Бонда (5) складывается из трех компонент:

$$|\vec{\omega}| = \sqrt{|\vec{\omega}_z|^2 + |\vec{\omega}_r|^2 + |\vec{\omega}_\phi|^2},$$

где $|\vec{\omega}_z| = g(\rho_p - \rho_l) / \rho_p$, $|\vec{\omega}_r| = (u_\phi^2 - V_\phi^2 \rho_l / \rho_p) / r$, $|\vec{\omega}_\phi| = u_r u_\phi / r$.

Начиная с некоторого критического набора параметров D , n и μ_l начинается деформация капли, причем степень деформации увеличивается с возрастанием радиальной координаты (таблица 2). Во всех проведенных экспериментах качественная картина деформации была одинаковой и характеризовалась образованием осесимметричной «вмятины» со стороны, противоположной направлению суммарного вектора ускорения капли $\vec{\omega}$. В зависимости от начальных параметров эксперимента было обнаружено отклонение ориентации «вмятины» от радиального направления (от оси Or), вызванное действием силы Кориолиса.

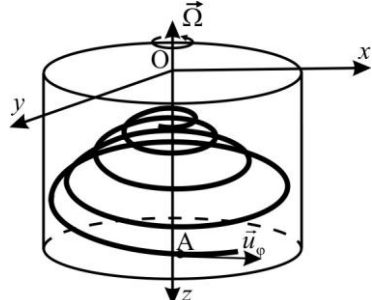


Рисунок 3 –Траектория движения капли

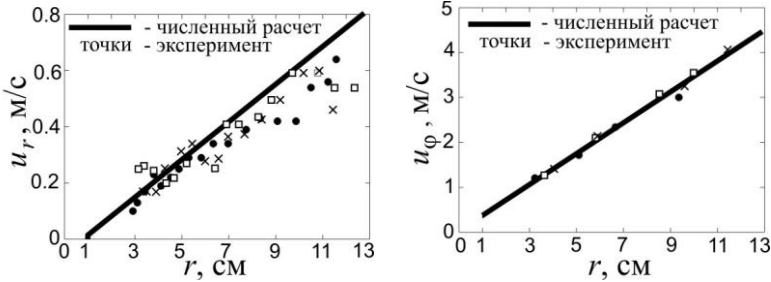


Рисунок 4 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных по компонентам вектора скорости капли: $D=6$ мм, $n=5.94$ об/с, $\mu_l=6.63$ Па·с

При анализе условий потери устойчивости формы капли показано, что критическое значение числа Бонда, соответствующее началу деформации капли в области $Re < 1$, существенно зависит от вязкости рабочей жидкости (или числа Рейнольдса). Из рисунка 5 видно, что значение $Bo_{кр}$ аппроксимируется с погрешностью не более 8% эмпирической формулой (сплошная линия)

$$Bo_{кр} = 3.8 \exp(2.3 / (Re + 0.5)).$$

Для анализа механизма, по которому происходит потеря устойчивости формы капли, проведена оценка действующих на каплю сил. Анализ экспериментальных данных показал, что для проведенных экспериментов потеря устойчивости формы капли связана с механизмом Рэлея-Тейлора.

Поскольку на основном участке траектории капля движется в квазистационарном режиме, то, учитывая уравнение движения капли, записанное в проекции на ось вектора ускорения массовых сил $\vec{\omega}$, для квазистационарного режима, получим

$$Bo = 3C_D We / 4. \quad (6)$$

При равенстве конкурирующих сил, действующих на каплю, найдены граничные значения числа Бонда и Вебера $Bo_* = 6$, $We_* = 8$. С учетом зависимости (6) для стоксовского режима ($C_D = 24 / Re$) соответствующее граничное значение числа Рейнольдса Re_* , отделяющее области с разным механизмом потери устойчивости капли, равно

$$Re_* = 18 We_* / Bo_* = 24.$$

При $Re \ll Re_*$ потеря устойчивости капли происходит по механизму Рэлея-Тейлора, а при $Re \gg Re_*$ – по механизму Кельвина-Гельмгольца.

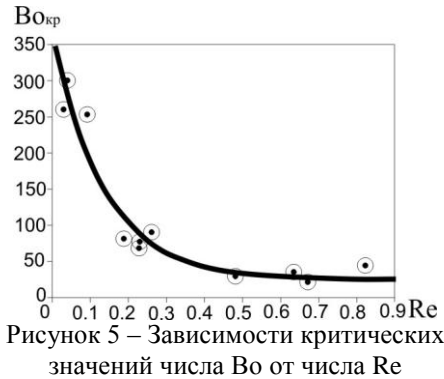
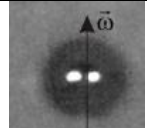
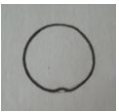
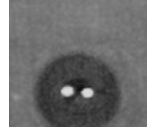

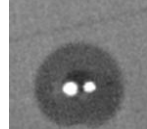

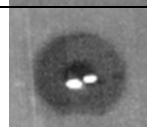

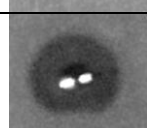

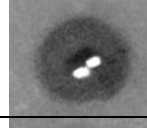

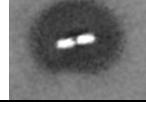



Рисунок 5 – Зависимости критических значений числа Bo от числа Re

Таблица 2 – Форма капли в зависимости от радиальной координаты ($D=6$ мм, $\mu_l=7.67$ Па·с, $n=6.06$ об/с)

Форма капли		Bo	Re	We	r , см
Фото	Схема				
		79	0.18	0.85	3.85
		120	0.28	1.9	5.9
		142	0.34	2.79	7
		162	0.38	3.5	8
		182	0.43	4.6	9
		192	0.46	5.1	9.5
		227	0.54	6.92	11.2

На рисунках 6, 7 приведена зависимость (6), полученная при различных выражениях для коэффициента сопротивления C_D : 1 – по Стоксу; 2 – по Рыбчинскому-Адамару; 3 – по Клячко.

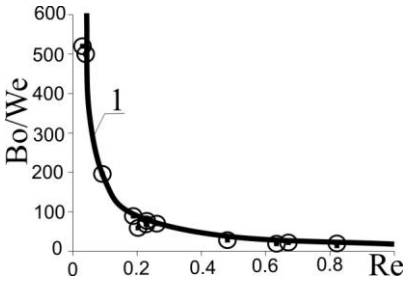


Рисунок 6 – Зависимость Bo/We от Re для стоксовского режима: 1– зависимость (6); точки – экспериментальные данные по критическим значениям чисел Bo и We

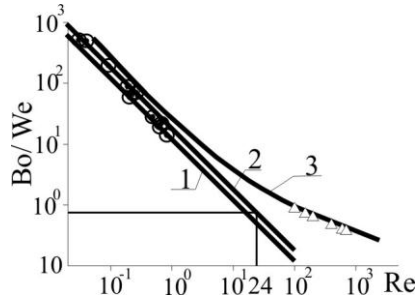


Рисунок 7 – Зависимость Bo/We от Re для разных C_D : точки – экспериментальные данные настоящей работы при $Re < 1$; Δ – экспериментальные данные при $Re > 100$ [2]

Третья глава (Устойчивость формы пузырька при малых числах Рейнольдса) посвящена экспериментальному исследованию режимов деформации одиночного пузырька воздуха при его всплытии в вязкой жидкости при числе Рейнольдса $Re < 1$. Данное исследование дополняет рассмотренное в предыдущей главе исследование деформации капли в потоке вязкой жидкости.

В экспериментах использовались водно-глицериновые растворы ВГР (таблица 3). Экспериментальная установка состоит из прозрачного резервуара размером $150 \times 150 \times 600$ мм с плоскопараллельными стенками, наполненного вязкой жидкостью, устройства для получения пузырьков, расположенного внизу резервуара, и системы визуализации. Регистрация скорости всплытия и формы пузырька проводилась на стационарном участке траектории.

Таблица 3 – Физические характеристики ВГР

Содержание глицерина, масс. %	87		
	100		
$T_l, ^\circ\text{C}$	+21	+10	+22.5
$\mu_l, \text{Па}\cdot\text{с}$	0.19 ± 0.01	4.1 ± 0.2	1.02 ± 0.05
$\rho_l, \text{г}/\text{см}^3$	1.23 ± 0.02	1.27 ± 0.02	1.26 ± 0.02
$\sigma_{жг}, \text{Н}/\text{м}$	0.065	0.064	0.063

В проведенных экспериментах эквивалентный диаметр, скорость всплытия пузырька и значения основных критериев подобия варьировались в следующих диапазонах: $D_e = (0.1 \div 4.8)$ см, $u_b = (0.6 \div 19.2)$ см/с, $Re = 0.01 \div 35$, $Bo = 0.2 \div 450$, $We = 10^{-3} \div 10^2$.

Результаты видеосъемки показали, что в зависимости от значений чисел Re , Bo и We , сразу же после ввода воздуха в жидкость формируется пузырек определенной конфигурации – сфера (рисунок 8а), сферический сегмент с секущей плоскостью, расположенной ниже (рисунок 8б, в) или выше (рисунок 8г) диаметральной плоскости.

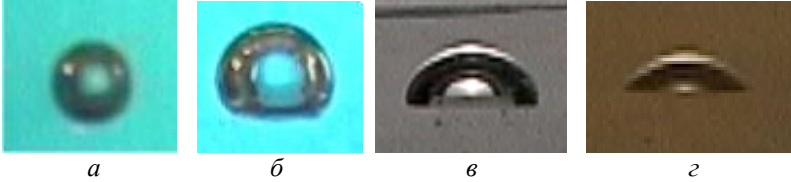


Рисунок 8 – Зависимости формы пузырька от критериев подобия:
 а – $Re=0.03$, $Bo=12$; б – $Re=0.24$, $Bo=56$; в – $Re=4.2$, $Bo=57$;
 г – $Re=34$, $Bo=54$;

Экспериментально показано, что критическое значение числа Бонда, соответствующее началу деформации пузырька, зависит от вязкости раствора.

В пересекающемся диапазоне критериев подобия обнаружено качественное совпадение деформированной формы пузырьков и капель. В обоих случаях на поверхности частицы дисперсной фазы появляется «вмятина». Из сравнительного анализа условий потери устойчивости формы капель и пузырьков в зависимости от вязкости жидкости (рисунок 9) следует, что начало потери устойчивости поверхности раздела фаз (то есть значения $Bo_{кр}$) любой двухфазной системы определяется режимом движения – числом Рейнольдса Re (или вязкостью дисперсионной среды).

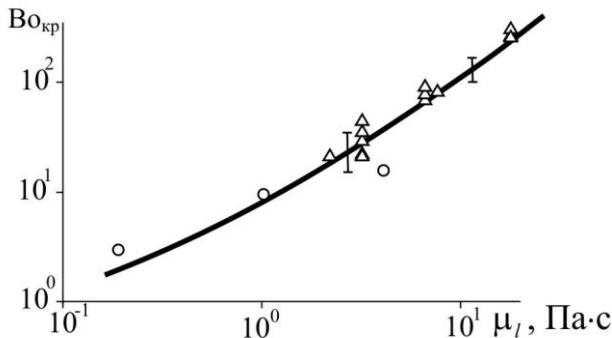


Рисунок 9 – Зависимость $Bo_{кр}$ от вязкости раствора (точки – эксперимент; сплошная линия – аппроксимационная кривая):
 ○ – пузырек; Δ – капля

Четвертая глава (Растекание капель с учетом эффекта смачивания) посвящена экспериментальному исследованию эволюции формы свободной

поверхности капли жидкости, растекающейся на твердой горизонтальной поверхности, при малых числах Вебера $We \approx 0$.

В качестве испытуемых жидкостей были выбраны дистиллированная вода, силиконовое (марки ПМС-100) и трансформаторное масло (таблица 4). В качестве подложки использовалось акриловое стекло. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 10.

Таблица 4 – Физические характеристики исследуемых жидкостей

Характеристики процесса	Жидкость		
	ПМС-100	Трансформаторное масло	Дистиллированная вода
$\rho_p, \text{ кг/м}^3$	971±4	886±3	998±3
$\sigma_{ЖГ}, 10^{-3} \text{ Н/м}$	39.00±0.04	41.00±0.04	72.28*
$\mu_p, 10^{-3} \text{ Па·с}$	98±2	22.0±0.3	1*

* - табличное значение [1]

Результаты видеосъемки показали, что с момента соприкосновения капли с поверхностью в единственной точке до установления ее равновесной формы для капель дистиллированной воды реализуется колебательный характер растекания (рисунок 11), а для капель более вязких жидкостей наблюдается монотонное растекание (рисунок 12). При этом при растекании капли воды наблюдаются три характерных режима установления равновесной формы. Первый характеризуется хаотическими колебаниями формы (рисунок 11а), второй – одновременным растеканием и затухающими вертикальными колебаниями капли (рисунок 11б). В начале третьего режима вертикальные колебания капли сохраняются, но рост радиуса пятна контакта капли прекращается (рисунок 11в).

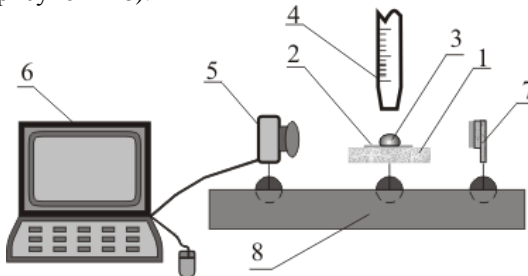


Рисунок 10 – Принципиальная схема установки для исследования динамического взаимодействия капли жидкости с твердой поверхностью:

1 – юстировочный столик; 2 – подложка; 3 – капля; 4 – устройство для получения капель; 5 – скоростная видеокамера; 6 – компьютер; 7 – система подсветки; 8 – оптическая скамья

Сравнение экспериментальной и численно рассчитанной [3] равновесной формы капли показало хорошую корреляцию данных.

Показано что для капель дистиллированной воды зависимость динамического краевого угла от капиллярного числа имеет колебательный характер,

а для ПМС-100 – соответствует аппроксимациям Р. Хоффмана и О.В. Воинова (рисунок 13).

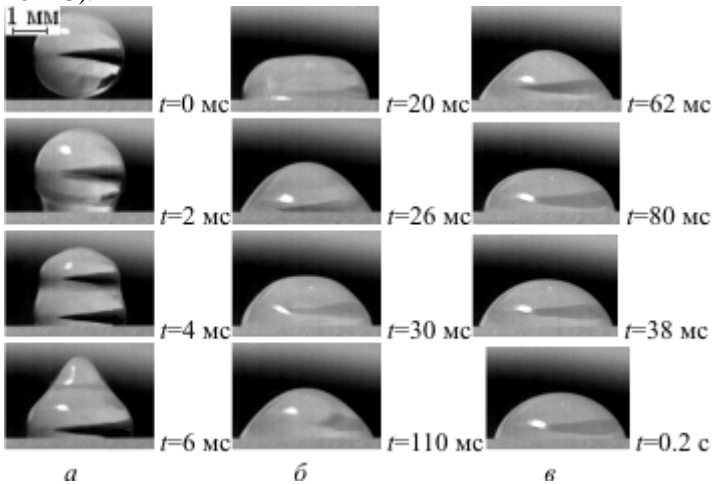


Рисунок 11 – Характерная картина растекания капли дистиллированной воды на акриловой подложке: *а* – формирование сферического сегмента; *б* – растекание сферического сегмента; *в* – формирование равновесного краевого угла

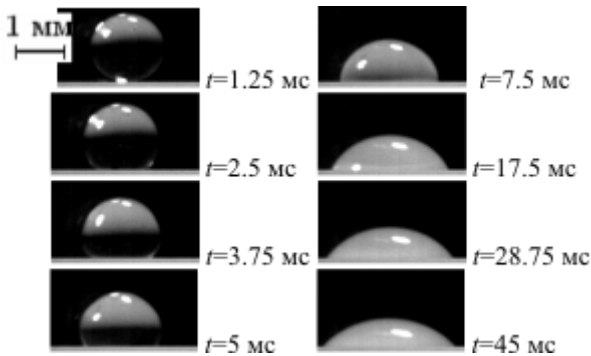


Рисунок 12 – Характерная картина растекания капли трансформаторного масла на акриловом стекле

В рамках исследования процесса растекания капли на твердой горизонтальной поверхности изучена смачиваемость угольных порошков различных месторождений Азиатского региона. Для исследований угольный порошок (со средним объемным диаметром частиц $d=25.5$ мкм) прессовался в таблетки цилиндрической формы диаметром 20 мм и высотой 5 мм. Давление прессования порошка равно $p=1000$ МПа. Экспериментально показано, что усилие прессования частиц угольного порошка слабо влияет на величину краевого угла. Измерения угла смачивания проводились на описанной выше установке.

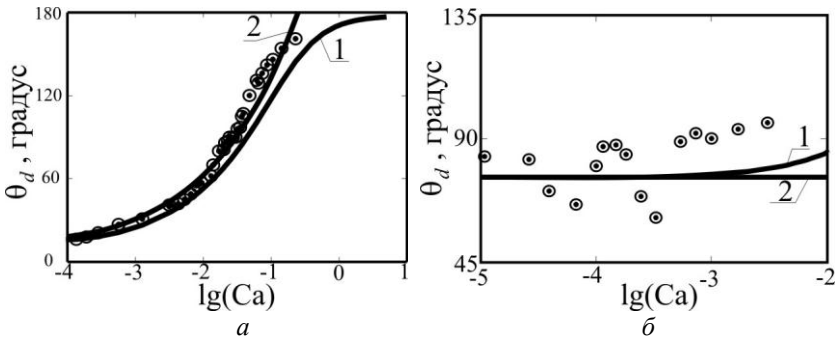


Рисунок 13 – Зависимость θ_d от Ca (1 – кривая Р. Хоффмана; 2 – кривая О.В. Воинова): а – ПМС-100 ($D=1.69$ мм); б – дистиллированная вода ($D=3$ мм)

Для каждого образца угля проведен элементный анализ. Экспериментально показано, что с увеличением содержания углерода в образце от 70% до 90% и водорода от 4% до 5.5% значение краевого угла монотонно возрастает от 55° до 90° , а с увеличением содержания суммы элементов O+N+S в образце от 5% до 30% значение угла смачивания монотонно уменьшается от 85° до 50° .

На основе проведенных экспериментальных исследований процесса растекания капли на твердой горизонтальной поверхности, литературного и патентного анализа предложен новый способ определения смачиваемости порошковых материалов.

Суть предлагаемого способа определения смачиваемости порошковых материалов заключается в непосредственном измерении краевого угла смачивания капли, помещенной на прессованный брикет из частиц порошка, имеющий цилиндрическую форму.

При этом проблема просачивания жидкости через прессованный образец решается путем:

- приготовления брикета диаметром и высотой, соответственно, $D_b \leq 2D$, $h_b = 0.1D$, (где D – диаметр капли);
- выбором порошка с максимальным диаметром частиц не более 100 мкм;
- прессования частиц в матрице специальной формы (рисунок 14) при давлении не менее 400 МПа.

Помимо этого, предлагаемый способ требует обеспечить мини-



Рисунок 14 – Схематичное изображение матрицы для прессования частиц порошка

мальную скорость столкновения капли с поверхностью ($u_c \leq 1$ см/с), чтобы исключить погрешность в определении краевого угла за счет изменения состава газовой фазы при испарении капли. При этом промежуток времени, через который можно проводить измерения краевого угла, равен $t=(0.2 \div 6)$ с.

Предлагаемый способ апробирован на эталонном материале – кварцевом песке. В качестве смачивающей жидкости использовалась дистиллированная вода. Полученное значение краевого угла ($\theta = 74^\circ$) согласуется с литературными данными [4, 5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый способ исследования потери устойчивости формы капли в области $Re < 1$, заключающийся в замене ускорения свободного падения на ускорение центробежных массовых сил. Для реализации этого способа разработана установка для исследования устойчивости капли ртути в закрученном потоке вязкой жидкости.
2. Разработана физико-математическая модель движения капли в закрученном потоке вязкой жидкости с учетом ее гравитационного осаждения, на основе которой проанализированы режимы движения капли и получены исходные данные для проведения экспериментов в заданных диапазонах критериев подобия $Re=0.01 \div 4$, $Bo=6.4 \div 460$, $We=0.01 \div 20$. Показана необходимость учета силы Кориолиса при расчете суммарного ускорения капли.
3. На разработанной установке проведена серия экспериментов по анализу характеристик движения и деформации капли ртути в вязкой жидкости (раствор хлористого цинка в глицерине с $\mu_l \leq 15$ Па·с). Впервые экспериментально обнаружена потеря устойчивости сферической формы капли при $Re < 1$, проявляющаяся в образовании осесимметричной «вмятины» со стороны, противоположной направлению суммарного вектора массовых сил.
4. Получены экспериментальные результаты по устойчивости формы одиночного пузырька при всплытии в вязкой жидкости в диапазоне $Re < 1$.
5. Сравнительный анализ результатов по потере устойчивости формы капель и пузырьков позволил сделать следующие выводы.
 - В области малых чисел Рейнольдса ($Re < 1$) потеря устойчивости формы капли (пузырька) происходит по механизму Рэлея-Тейлора при достижении некоторого критического значения числа Бонда.
 - Критическое значение числа Бонда, соответствующее началу деформации границы раздела фаз, существенно зависит от режима движения (числа Рейнольдса) и монотонно уменьшается от 15.8 до 3.0 в диапазоне $Re=0.04 \div 1.4$ для пузырьков и от 300 до 21 в диапазоне $Re=0.03 \div 0.84$ для капель.
 - Показано, что результаты по потере устойчивости формы капель и пузырьков при $Re < 1$, обработанные в координатах Re , Bo/We , удовлетворительно описываются единой зависимостью $Bo/We=f(Re)$, которая позволяет выделить граничное значение числа Рейнольдса $Re_*=24$, разделяющее области с

разным механизмом потери устойчивости формы капли (пузырька) – механизм Рэлея-Тейлора (при $Re \ll Re_*$) и Кельвина-Гельмгольца (при $Re \gg Re_*$).

6. Разработана экспериментальная установка для исследования динамики процесса растекания капли на твердой горизонтальной поверхности и проведена серия экспериментов по измерению динамического краевого угла (ДКУ) для вязких и маловязких жидкостей. Исследование данного процесса с помощью высокоскоростной видеосъемки позволяет получить адекватные данные по ДКУ в зависимости от скорости движения линии трехфазного контакта, которые могут быть использованы в качестве граничных условий для численного расчета формы свободной поверхности капли жидкости при ее растекании.

7. Предложен и апробирован новый способ определения смачиваемости порошковых материалов, основанный на непосредственном измерении краевого угла смачивания капли, помещенной на спрессованный по специальной технологии брикет из частиц порошка.

8. Получены новые данные по характеристикам смачиваемости порошков из углей ряда месторождений Азиатского региона. Экспериментально показано, что с увеличением содержания углерода в образце от 70% до 90% и водорода от 4% до 5.5% значение краевого угла монотонно возрастает от 55° до 90° , а с увеличением содержания суммы элементов O+N+S в образце от 5% до 30% значение угла смачивания монотонно уменьшается от 85° до 50° .

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Архипов В.А. Исследование характеристик растекания капли при малых числах Вебера / В.А. Архипов, А.С. Усанина // Инженерная физика. – 2010. – № 5. – С. 38-42.

2. Архипов В.А. К механизму потери устойчивости одиночного пузырька при малых числах Рейнольдса / В.А. Архипов, И.М. Васенин, А.С. Усанина // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, № 3. – С. 51-59.

3. Архипов В.А. Численное моделирование эволюции аэрозольного облака при аварийном сбросе авиационного топлива / В.А. Архипов, А.П. Березиков, А.С. Ткаченко, А.С. Усанина // Авиакосмическое приборостроение. – 2011. – № 5. – С. 33-38.

4. Пономарева М.А. Расчет равновесных форм капли, расположенной на горизонтальной поверхности / М.А. Пономарева, В.А. Якутенок, А.С. Усанина // Известия вузов. Физика. – 2009. – Т. 52, № 7/2. – С. 162-166.

5. Архипов В.А. Метод оценки условий потери устойчивости капли в закрученном потоке / В.А. Архипов, И.М. Васенин, А.С. Ткаченко, А.С. Усанина // Известия вузов. Физика. 2010. – Т. 55, № 12/2. – С. 14-21.

6. Архипов В.А. Обобщенная модель распространения жидкокапельного облака при аварийном сбросе авиационного топлива / В.А. Архипов, А.П. Березиков, А.С. Ткаченко, А.С. Усанина // Известия вузов. Физика. 2010. – Т. 55, № 12/2. – С. 10-13.

патент РФ

7. Устройство для исследования устойчивости движения капель : пат. Российская Федерация : МПК В01L 99/00 / Архипов В.А., Березиков А.П., Васенин И.М., Трофимов В.Ф., **Усанина А.С.**, Шрагер Г.Р. – № 2394649 ; заявл. 27.04.2009 ; опубл. 20.07.2010, электронный бюл. «Изобретения. Полезные модели». № 33.

публикации в других научных изданиях

8. **Усанина А.С.** Деформация и устойчивость капли в потоке при малых числах Рейнольдса / А.С. Усанина // Студент и научно-технический прогресс : материалы XLV Международной научной студенческой конференции. – Новосибирск, 2007. – С. 43-44.

9. Архипов В.А. Моделирование загрязнения окружающей среды токсичными компонентами в районах разделения ступеней ракет / В.А. Архипов, **А.С. Усанина**, У.М. Шереметьева // XI Международная Научная конференция, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева : материалы конференции – Красноярск, 2007. – С. 132-133.

10. Архипов В.А. Стационарная форма и краевой угол капли ртути на горизонтальной поверхности / В.А. Архипов, В.А. Ермаков, **А.С. Усанина** // Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения : тезисы докладов III Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых – Бийск, 2008. – С. 13.

11. **Усанина А.С.** Методика исследования устойчивости капли ртути при малых числах Рейнольдса / А.С. Усанина // Студент и научно-технический прогресс : материалы XLVII Международной научной студенческой конференции, посвященной 50-летию НГУ. – Новосибирск, 2009. – С. 54.

12. Пономарева М.А. Эволюция формы капли при растекании / М.А. Пономарева, **А.С. Усанина** // Перспективы развития фундаментальных наук : труды VII Международной конференции студентов и молодых учёных. – Томск, 2010. – С. 197-199.

13. Архипов В.А. О деформации и устойчивости капли в поле массовых сил / В.А. Архипов, В.Ф. Трофимов, **А.С. Усанина** // Струйные, отрывные и стационарные течения : XXII юбилейный семинар с международным участием. – СПб., 2010. – С. 152-153.

14. Arkhipov V.A. About mechanism of drops and bubbles instability in mass force field / V.A. Arkhipov, I.M. Vasenin, **A.S. Usanina** // Методы аэрофизических исследований : международная конференция – Новосибирск, 2010. – С. 26-27.

15. Архипов В.А. Оценка смачиваемости порошковых материалов по измерениям краевого угла // В.А. Архипов, Д.Ю. Палеев, **А.С. Усанина** // Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика : международная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко. – Новосибирск, 2011. – С. 146-147.

16. Березиков А.П. Устойчивость капли при малых числах Рейнольдса / А.П. Березиков, В.А. Архипов, **А.С. Усанина**, У.М. Шереметьева // Устойчивость течений гомогенных и гетерогенных жидкостей : доклады молодых ученых. – Новосибирск, 2005. – С. 7-10.

17. **Усанина А.С.** Анализ критериев устойчивости капли в потоке / А.С. Усанина, У.М. Шереметьева // Наука и образование : IX Всероссийская

конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2007. – С. 237-238.

18. **Усанина А.С.** Устойчивость капель и пузырьков в потоке при малых числах Рейнольдса / А.С. Усанина // Физика и химия высокоэнергетических систем : сборник материалов III Всероссийской конференции молодых ученых. – Томск, 2007. – С. 222-224.

19. Ермаков В.А. Экспериментальное исследование эффекта консолидации частиц применительно к проблемам экологии / В.А. Ермаков, **А.С. Усанина**, У.М. Шереметьева // Химия и химическая технология в XXI веке : тезисы VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов. – Томск, 2007. – С. 337-338.

20. Архипов В.А. Влияние режимов движения на деформацию пузырьков в вязкой жидкости / В.А. Архипов, А.П. Березиков, В.А. Ермаков, **А.С. Усанина** // Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва : всероссийская конференция : тезисы докладов. – Новосибирск, 2007. – С. 25-26.

21. **Усанина А.С.** Движение пузырьковых сред в вязкой жидкости / А.С. Усанина // Аэрозоли Сибири : XIV рабочая группа : тезисы докладов. – Томск, 2007. – С. 22.

22. **Усанина А.С.** Экспериментальное исследование равновесной формы и угла смачивания капли / А.С. Усанина // Физика и химия высокоэнергетических систем : сборник материалов IV Всероссийской конференции молодых ученых – Томск, 2008. – С. 298-301.

23. Пономарева М.А. Изучение равновесных форм капель на горизонтальной подложке / М.А. Пономарева, **А.С. Усанина** // Наука и образование : XII Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2009. – Ч. 2 : Безопасность жизнедеятельности, технология и предпринимательство. – С. 94-98.

24. **Усанина А.С.** Устойчивость и деформация газовых пузырьков в вязкой жидкости / А.С. Усанина // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : материалы VI Всероссийской научной конференции. – Томск, 2008. – С. 175-176.

25. **Усанина А.С.** Экспериментальное исследование движения гетерогенных сред с учетом капиллярных эффектов / А.С. Усанина // XV Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых. – Кемерово-Томск, 2009. – С. 265.

26. **Усанина А.С.** Методы экспериментального исследования краевого угла / А.С. Усанина // Физика и химия высокоэнергетических систем : сборник материалов V Всероссийской конференции молодых ученых – Томск, 2009. – С. 379-381.

27. Архипов В.А. Динамика взаимодействия капли аэрозоля с твердой поверхностью / В.А. Архипов, **А.С. Усанина** // Аэрозоли Сибири : XVI Рабочая группа : тезисы докладов. – Томск, 2009. – С. 59.

28. Плеханов И.Г. Влияние метеоусловий на осаждение частиц в атмосфере / И.Г. Плеханов, А.С. Ткаченко, В.Ф. Трофимов, **А.С. Усанина**, У.М. Шереметьева // Современная баллистика и смежные вопросы механики : материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора М.С. Горохова – основателя томской школы баллистики. – Томск, 2009. – С. 159-160.

29. Архипов В.А. Анализ режимов движения капли в закрученном потоке / В.А. Архипов, А.С. Ткаченко, **А.С. Усанина**, И.В. Щербакова // Современная баллистика и смежные вопросы механики : материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора М.С. Горохова – основателя томской школы баллистики – Томск, 2009. – С. 125-126.

30. Пономарева М.А. Анализ режимов растекания капли по твердой поверхности при малых скоростях столкновения / М.А. Пономарева, **А.С. Усанина** // Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей : доклады Всероссийской молодежной конференции. – Новосибирск, 2010. – Вып. XII. – С. 266-268.

31. Архипов В.А. Режимы деформации одиночного пузырька в вязкой жидкости / В.А. Архипов, И.М. Васенин, **А.С. Усанина** // Энергетика в глобальном мире : сборник тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса. – Красноярск, 2010. – С. 428.

32. Архипов В.А. Метод исследования устойчивости капли в поле центробежных массовых сил / В.А. Архипов, **А.С. Усанина** // Аэрозоли Сибири : XVII Рабочая группа : тезисы докладов. – Томск, 2010. – С. 83.

33. Архипов В.А. Динамика растекания капли по поверхности образцов угля / В.А. Архипов, **А.С. Усанина** // Аэрозоли Сибири : XVII Рабочая группа : тезисы докладов. – Томск, 2010. – С. 83.

34. **Усанина А.С.** Растекание капли на твердой горизонтальной поверхности / А.С. Усанина // Труды Томского государственного университета. Сер. физико-математическая. – 2010. – Т. 276 : Молодежная научная конференция ТГУ. – С. 216-218.

Список использованной литературы

1. Гороновский И.Т. Краткий справочник по химии / И.Т. Гороновский, Ю.П. Назаренко, Е.Ф. Некряч. – Киев : Наукова думка, 1974. – 984 с.
2. Корсунов Ю.А. Экспериментальное исследование дробления капель жидкости при низких значениях чисел Рейнольдса / Ю.А. Корсунов, А.П. Тишин // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1971. – № 2. – С. 182-186
3. Пономарева М.А. Свидетельство № 2010612178 о государственной регистрации (от 24.03.2010 г.) программы «Определение равновесной формы капли жидкости, расположенной на твердой горизонтальной поверхности. РаФорм-2. Определение равновесной формы» для ЭВМ.
4. Классен П.В. Основы техники гранулирования / П.В. Классен, И.Г. Гришаев. – М. : Химия, 1982. – 272 с.
5. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. – М. : Химия, 1974. – 416 с.

Тираж 100 экз.
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а