

УДК 532.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ КАПЛИ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ПОТОКЕ ГАЗА

А. А. Шебелева^{*,**}, А. В. Минаков^{*,**}, М. Ю. Чернецкий^{*},
П. А. Стрижак^{***}

* Сибирский федеральный университет, 660041 Красноярск, Россия

** Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

*** Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия

E-mails: an_riv@mail.ru, Aminakov@sfu-kras.ru, micch@ya.ru, pavelspa@tpu.ru

Проведено экспериментальное исследование процесса деформации капли органоводоугольного топлива в потоке газа. На основе полученных экспериментальных данных разработана методика, с использованием которой численно исследованы интегральные характеристики деформации капель органоводоугольного топлива диаметром 4,5 мм при скорости движения потока газа 2 м/с, температуре 298 К. Выявлены характерные изменения площади продольного и поперечного сечений капель органоводоугольного топлива при их гравитационном осаждении во времени. Показано, что теоретические и экспериментальные данные удовлетворительно согласуются.

Ключевые слова: органоводоугольное топливо, капля, деформация, эксперимент, математическое моделирование, VOF-метод.

DOI: 10.15372/PMTF20180411

Введение. Одними из перспективных альтернативных видов топлива для производства энергии являются дисперсные системы, состоящие из воды, измельченного угля или горючего отхода его переработки, химических добавок, а также отходов нефтепереработки. Такие топлива называются органоводоугольными (ОВУТ) [1] или композиционными жидкими (КЖТ). Разработка эффективного способа сжигания данных видов топлива позволяет использовать низкокачественные горючие ископаемые и решить проблему утилизации производственных отходов, загрязняющих окружающую среду.

Перспективным способом сжигания ОВУТ является его предварительное распыление в камере сгорания, что позволяет значительно увеличить площадь реагирования топлива с окислителем и тем самым повысить эффективность процесса горения. При этом одной из основных технических задач является оптимизация процесса распада струи, который включает деформацию капель и их вторичный распад. Установление взаимосвязей между процессами, имеющими место при распаде струи, осуществляется путем численного моделирования.

В настоящее время разработаны подходы к моделированию двухфазных течений [2–4], в частности процессов формирования капель, их деформации (трансформации поверхности), распада (дробления), коагуляции, столкновения и испарения. Однако для использо-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 15-19-10003) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-38-00565).

© Шебелева А. А., Минаков А. В., Чернецкий М. Ю., Стрижак П. А., 2018

вания данных подходов при изучении движения ОБУТ требуются их совершенствование и верификация.

Авторам известна одна работа [5], посвященная расчету процессов деформации и распада капли ОБУТ с использованием численной методики VOF — LES (volume fluid method — large eddy simulation). Рассмотренные в работе [5] сложные структурные изменения формы капли, которые происходят при ее движении с относительной скоростью $30 \div 90$ м/с, не позволяют оценить точность предлагаемой в работе методики.

Для тестирования методики расчета необходимо проведение натурных экспериментов, позволяющих исследовать поведение ОБУТ и сравнить данные расчетных и натурных измерений с высокой точностью. Одним из таких экспериментов может быть визуализация деформации капли ОБУТ в потоке газа.

Целями настоящей работы являются разработка методики расчета процесса деформирования капель ОБУТ в потоке газа с использованием метода жидкости в ячейках (VOF) и ее тестирование. Для этого экспериментально исследуется процесс деформации капли ОБУТ в потоке газа, проводится сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными о динамике формирования, форме свободной поверхности капли, амплитуде и периоде колебаний.

Математическая модель. В настоящее время для описания газок капельных течений предложен широкий спектр математических моделей (см., например, [2–4]), которые различаются способами описания движения газа и частиц, применяемыми допущениями и ограничениями в использовании. Модель выбирается, как правило, с учетом имеющейся информации о структуре течения и требуемой точности его описания.

По типу используемой сетки все численные алгоритмы отслеживания положения границы можно разделить на три группы [3]: лагранжевы, эйлеровы и бессеточные. В бессеточных методах не используется расчетная сетка или применяется только поверхностная сетка.

В лагранжевых алгоритмах расчетные узлы и ячейки движутся вместе со сплошной средой. Этот подход позволяет максимально точно описывать контактную границу и учитывать сложные граничные условия на ней, например силу поверхностного натяжения. Однако при использовании лагранжева подхода необходим пересчет сетки на каждом временном шаге, что требует больших временных затрат. Кроме того, вследствие сложности формы подвижной границы и траектории ее движения использование лагранжевых методов может привести к существенному искривлению расчетных ячеек и значительным погрешностям результатов расчета.

В эйлеровых методах для расчетов используется неподвижная (часто ортогональная и равномерная) расчетная сетка. При этом отслеживание перемещения межфазной границы осуществляется с помощью дискретных лагранжевых или непрерывных эйлеровых маркеров. По способу отслеживания перемещения контактной границы эйлеровы методы можно разделить на три группы: методы с использованием дискретных точечных маркеров, дискретных или непрерывных поверхностных маркеров, непрерывных объемных маркеров.

Наибольшее распространение получили методы с использованием непрерывных маркеров, а среди них — эффективный и простой в реализации VOF-метод [5], хорошо зарекомендовавший себя для расчета течений со свободной поверхностью [6, 7]. Суть этого метода заключается в том, что жидкость и газ рассматриваются в качестве единой двухкомпонентной среды, пространственное распределение фаз в пределах расчетной области определяется с помощью специальной функции маркера $F(x, y, z, t)$. Объемная доля жидкой фазы в расчетной ячейке принимается равной $F(x, y, z, t) = 0$, в случае если ячейка пустая, $F(x, y, z, t) = 1$, в случае если ячейка полностью заполнена жидкостью, $0 < F(x, y, z, t) < 1$, в случае если через ячейку проходит граница раздела фаз [6, 7].

Поскольку свободная поверхность движется вместе с жидкостью, отслеживание перемещения свободной границы в пространстве осуществляется путем решения уравнения переноса объемной доли жидкой фазы в ячейке

$$\frac{dF}{dt} + \mathbf{V} \cdot \nabla F = 0, \quad (1)$$

где \mathbf{V} — вектор скорости двухфазной среды, найденный из решения системы гидродинамических уравнений, состоящей из уравнения сохранения массы, или уравнения неразрывности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla(\rho \cdot \mathbf{V}) = 0, \quad (2)$$

и уравнений движения, или закона сохранения импульса:

$$\frac{d\rho\mathbf{V}}{dt} + \nabla(\rho\mathbf{V} \times \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla(\tau) + \mathbf{F}, \quad (3)$$

τ — тензор вязких напряжений; \mathbf{F} — вектор объемных сил; p — статическое давление; ρ — плотность двухфазной среды.

Составляющие тензора вязких напряжений τ_{ij} находятся по формуле

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{dU_i}{dx_j} + \frac{dU_j}{dx_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{dU_k}{dx_k} \right), \quad (4)$$

где μ — динамическая вязкость двухфазной среды; U_{ij} — компоненты вектора скорости.

Плотность и молекулярная вязкость рассматриваемой двухкомпонентной среды находятся с учетом объемной доли жидкости в ячейке по правилу смеси:

$$\rho = \rho_1 F + (1 - F)\rho_2; \quad (5)$$

$$\mu = \mu_1 F + (1 - F)\mu_2 \quad (6)$$

($\rho_1, \mu_1, \rho_2, \mu_2$ — плотность и вязкость жидкости и газа соответственно). Величины ρ, μ входят в уравнения движения и определяют физические свойства двухфазной среды.

В случае течений жидкости с границей раздела большое внимание уделяется изучению явления поверхностного натяжения. Исследование течений, контролируемых силами поверхностного натяжения, представляет собой сложную самостоятельную задачу, поэтому преимуществом VOF-метода является также обстоятельство, что он позволяет достаточно просто моделировать влияние этих сил.

Наиболее часто для моделирования поверхностного натяжения с использованием VOF-метода применяется CSF-алгоритм [8], предполагающий введение в уравнения движения дополнительной объемной силы F_S , которая находится из соотношения

$$F_S = \sigma k \nabla F, \quad (7)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; k — кривизна свободной поверхности, определяемая как дивергенция вектора нормали:

$$k = \nabla(\mathbf{n}/|\mathbf{n}|). \quad (8)$$

Нормаль к свободной поверхности вычисляется, в свою очередь, как градиент объемной доли жидкой фазы в ячейке:

$$\mathbf{n} = \nabla F. \quad (9)$$

При этом на твердой стенке значение вектора нормали определяется по величине угла смачивания θ :

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_w \cos \theta + \boldsymbol{\tau}_w \sin \theta, \quad (10)$$

где $\mathbf{n}_w, \boldsymbol{\tau}_w$ — нормальный и тангенциальный к стенке векторы.

Основные свойства топливных суспензий ОВУТ

γ , %	ρ , кг/м ³ ($T = 298$ К)	W , %	μ , мПа·с
30	1069	83,05	2
50	1115	71,75	35
65	1150	63,28	77
85	1200	51,20	140

Методика решения уравнений (1)–(10) и основные особенности численных исследований описаны в работах [9, 10]. Разностный аналог конвективно-диффузионных уравнений находился с помощью метода конечного объема для структурированных многоблочных сеток, применение которого обеспечивало консервативность полученной схемы. Для аппроксимации конвективных членов уравнений гидродинамики (3) использовалась противоположная схема второго порядка QUICK, для аппроксимации нестационарных слагаемых уравнений гидродинамики — неявная схема первого порядка. Диффузионные потоки и источниковые члены аппроксимировались со вторым порядком точности. Связь между полями скорости и давления реализовывалась с помощью SIMPLEC-процедуры на совмещенных сетках. Такой подход позволял решить проблему отслеживания положения подвижной межфазной границы раздела. Полученная система разностных уравнений решалась итерационным методом с применением многосеточного решателя.

Экспериментальный стенд и методы исследований. Экспериментальный стенд и методика исследований аналогичны представленным в работе [11]. В отличие от работы [11], в которой исследовалась вода, в настоящей работе эксперименты проведены для ОВУТ на основе смеси воды, кека (отхода флотации каменного угля) и пластификатора (смачивателя) “Неолас”, массовая доля которого в составе ОВУТ составляла 0,5 % (такой доли достаточно для обеспечения сегментарной стабильности (отсутствия расслоений в композициях ОВУТ в течение 5–7 сут)). Применялся сухой кек каменного угля марки “К” (обоганительная фабрика “Северная” Кемеровской области). Массовая доля кека марки “К” в суспензии варьировалась в диапазоне $\gamma = 30 \div 85$ %. Результаты технического и элементного анализа кека, а также свойства пластификатора приведены в работе [12]. Кек марки “К” в исходном влажном состоянии (после получения с обоганительной фабрики) содержал 56,5 % сухого вещества (43,5 % — вода). В таблице приведены свойства смесей воды и кека марки “К” (W — влажность ОВУТ).

При проведении экспериментов для генерации капель ОВУТ применялась система [11], состоящая из емкости, находящейся под действием атмосферного давления, гибкой трубки, роликового регулятора и полого наконечника. Капля ОВУТ формировалась на выходе наконечника. При достижении диаметра, приблизительно равного 4,5 мм, капля отрывалась от наконечника и продолжала движение сверху вниз под действием силы тяжести. Процесс гравитационного осаждения капли регистрировался с помощью высокоскоростной видеокамеры “Phantom V411” (максимальное разрешение 1200×1200 пикселей, максимальная частота съемки — 10^5 кадр/с) [11]. Видеограммы экспериментов обрабатывались с использованием программного комплекса “Тема Automotive” с функцией непрерывного слежения за перемещающимся объектом. При обработке регистрировалась форма капель ОВУТ, а также динамика изменения площади продольного (вдоль направления движения) и поперечного сечений капли. Полученные в ходе экспериментов данные сравнивались с результатами численного расчета.

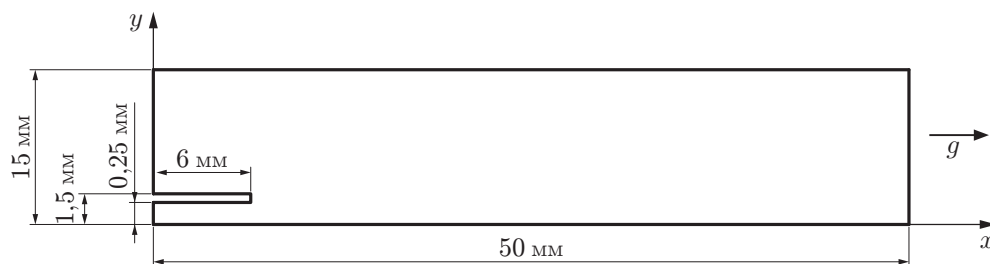


Рис. 1. Геометрия задачи

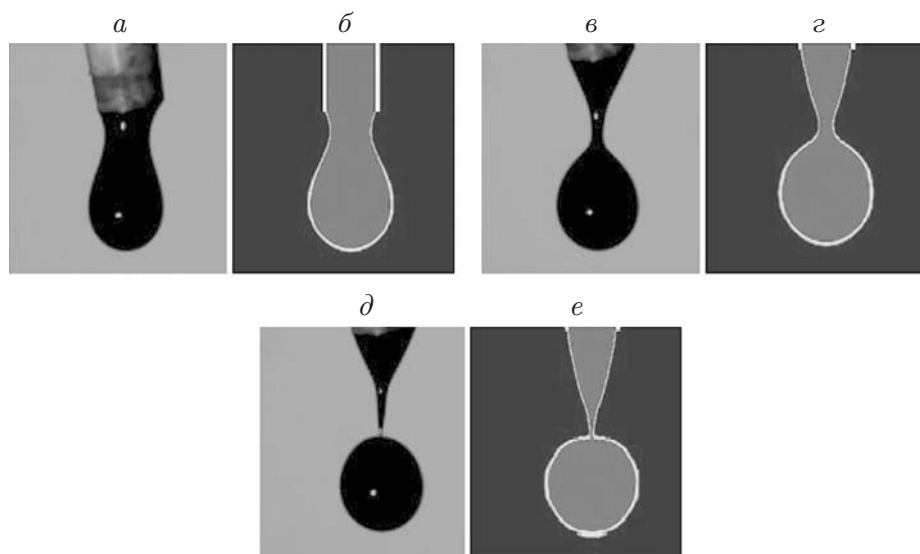


Рис. 2. Эволюция поведения капли ОВУТ (70 % — вода, 30 % — кефир марки “К”) на начальном этапе в различные моменты времени:

$a, б$ — $t = 0,11$ с, $в, г$ — $t = 0,12$ с, $д, е$ — $t = 0,13$ с; $a, в, д$ — эксперимент, $б, г, е$ — расчет

Постановка задачи и результаты численного моделирования. На рис. 1 показана геометрия расчетной области — прямоугольное сечение емкости и трубки, из которой вытекает ОВУТ. Задача решалась в осесимметричной постановке. Внутренний диаметр сопла дозатора составлял 2,5 мм. Применявшаяся прямоугольная сетка состояла из 150 узлов по радиусу и 600 узлов по длине и сгущалась по направлению к трубке и области движения капель. В качестве граничных условий на входе в сопло дозатора задавался массовый расход жидкости, необходимый для формирования капель размером 4,5 мм. На остальных границах расчетной области задавались условия свободного выхода. Физические свойства суспензии задавались в соответствии с данными таблицы. Коэффициент поверхностного натяжения принимался равным $\sigma = 0,072$ Н/м.

Процесс движения капель характеризуется определенной последовательностью “деформационных циклов” [11, 12], которой свойственно повторение форм этих капель. Наиболее сложным является моделирование формирования капель на начальном этапе истечения струи из сопла. Для адекватного описания этого процесса необходимо учитывать геометрию сопла, скорость дозирования жидкости, величину краевого угла смачивания.

На рис. 2 представлены результаты математического моделирования и эксперимента при массовой доле кефира марки “К” в суспензии 30 % (на этапе формирования капель). Видно, что они хорошо согласуются.

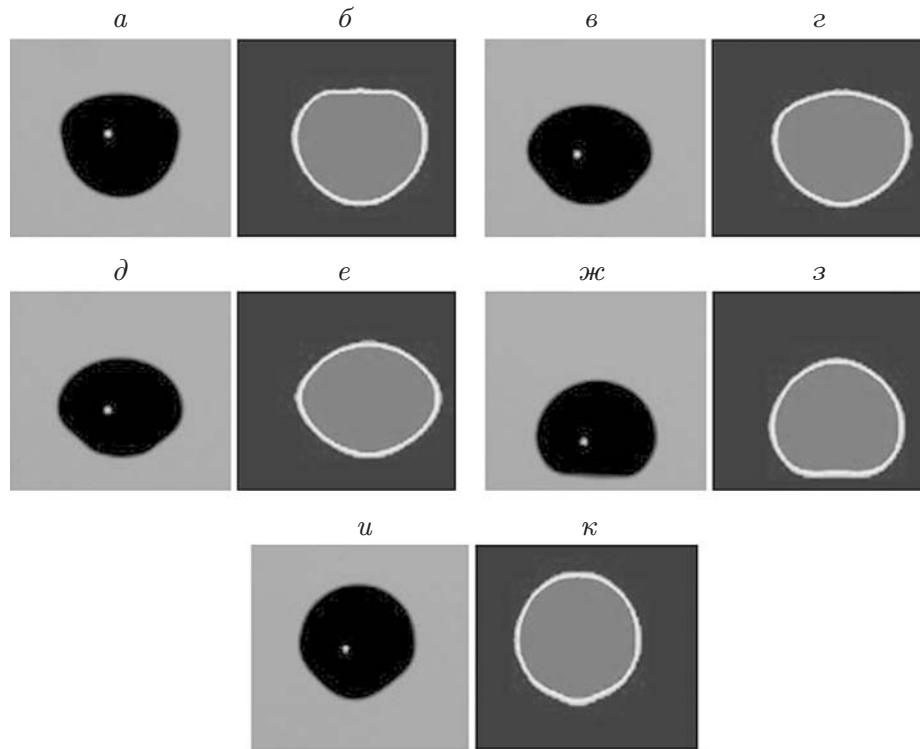


Рис. 3. Экспериментальные (*a, в, д, ж, и*) и расчетные (*б, г, е, з, к*) формы поверхности каплей ОВУТ (70 % — вода, 30 % — кека марки “К”) в различные моменты времени:

a, б — $t = 0,130$ с, *в, г* — $t = 0,132$ с, *д, е* — $t = 0,135$ с, *ж, з* — $t = 0,140$ с,
и, к — $t = 0,142$ с

После того как капля сформировалась, ее движение в потоке сопровождается периодическими колебаниями формы. Расчетная и экспериментальная формы поверхности капли в различные моменты времени показаны на рис. 3. Заметим, что в расчете капля визуализировалась в плоском сечении, в эксперименте капля видна “в перспективе”, вследствие чего форма капли может визуально искажаться [11]. Однако в целом формы капель в расчете и эксперименте хорошо согласуются.

Для описания характеристик теплообмена необходимо учитывать поведение площади поверхности капли. На рис. 4 представлены зависимости от времени площади продольного сечения капли при ее гравитационном осаждении. Видно, что площадь поверхности при массовой доле кека 30 % совершает практически гармонические колебания с периодом, приблизительно равным 0,04 с. Максимальное значение площади поверхности соответствует моменту времени, когда капля ОВУТ максимально вытянута в направлении движения. Минимум соответствует моменту, в который форма капли наиболее близка к сферической. На рис. 4 видно, что значения частоты и амплитуды колебаний в расчете и эксперименте хорошо согласуются.

Аналогичные исследования проведены при большей массовой доле кека марки “К” в топливных суспензиях. На рис. 5 показано образование капли при массовой доле кека 65 %. Сравнение результатов моделирования при массовой доле кека 30 % (см. рис. 2) и 65 % (см. рис. 5) показывает, что во втором случае капля перед отрывом от сопла является более вытянутой, чем в варианте с меньшей массовой долей кека марки “К”, когда ее форма близка к сферической.

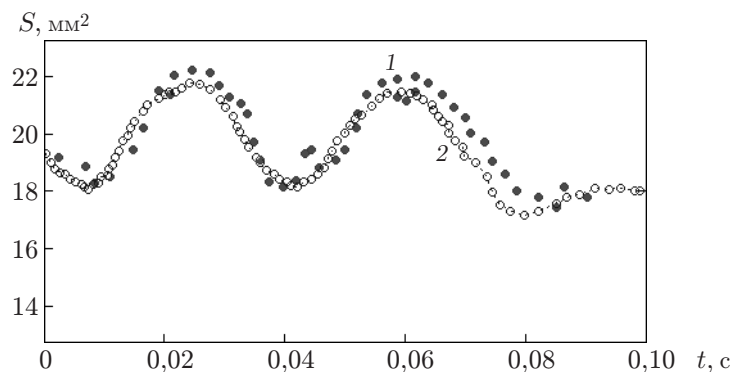


Рис. 4. Зависимость от времени площади продольного сечения капли ОБУТ (70 % — вода, 30 % — кек марки “К”) при ее гравитационном осаждении:
1 — расчет, 2 — эксперимент

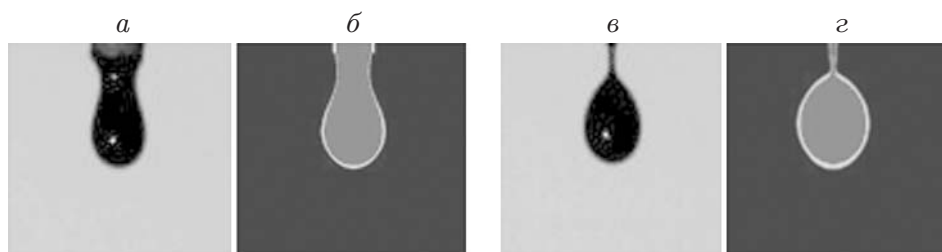


Рис. 5. Эволюция поведения капли ОБУТ (35 % — вода, 65 % — кек марки “К”) на начальном этапе в различные моменты времени:
а, б — $t = 0,126$ с, в, г — $t = 0,164$ с; а, в — эксперимент, б, г — расчет

На рис. 6 показана эволюция поведения падающей капли в расчете и эксперименте при массовой доле кека марки “К” 65 %. В отличие от случая, когда массовая доля кека равна 30 %, колебания капли вследствие большей вязкости быстро затухают и прекращаются (см. рис. 6,а) приблизительно в течение 0,01 с. Затем форма капли практически не отличается от сферической.

Динамика изменения площади продольного сечения капли ОБУТ при массовой доле кека марки “К” 65 % показана на рис. 7. Видно, что при $t > 0,01$ с площадь продольного сечения капли практически перестает меняться и становится приблизительно равной площади поперечного сечения сферы.

На рис. 8 показана динамика образования и отрыва от сопла капли ОБУТ с массовой долей кека марки “К” 85 %. С увеличением массовой доли кека, а также вязкости наблюдается значительное растяжение капли в продольном направлении перед отрывом (см. рис. 2, 5, 8).

Следует отметить, что с увеличением массовой доли кека уменьшается толщина жидкой перемычки, связывающей каплю с соплом, перед отрывом от него (см. рис. 8). После того как капля отрывается от сопла, эта перемычка разрывается на более мелкие капли (рис. 9). Для численного моделирования этих капель требуется очень мелкая сетка. Однако разрешающая способность разработанной численной методики достаточно высока и позволяет наблюдать эти капли даже на относительно грубой сетке (см. рис. 9).

Анализ поведения формы капли и площади ее поперечного сечения (рис. 10) в расчете и эксперименте показывает, что при массовой доле кека марки “К” 85 % форма капли при падении практически не меняется.

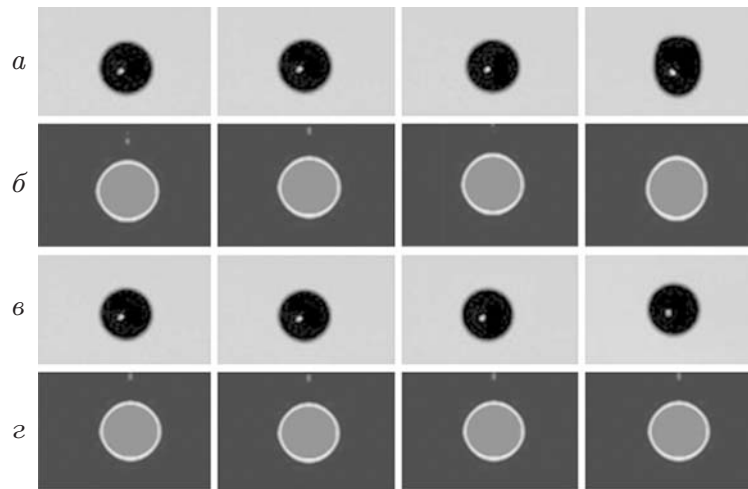


Рис. 6. Экспериментальные (*а, в*) и расчетные (*б, г*) формы поверхности каплей ОВУТ (35 % — вода, 65 % — кек марки “К”) (интервал между кадрами 0,002 с)

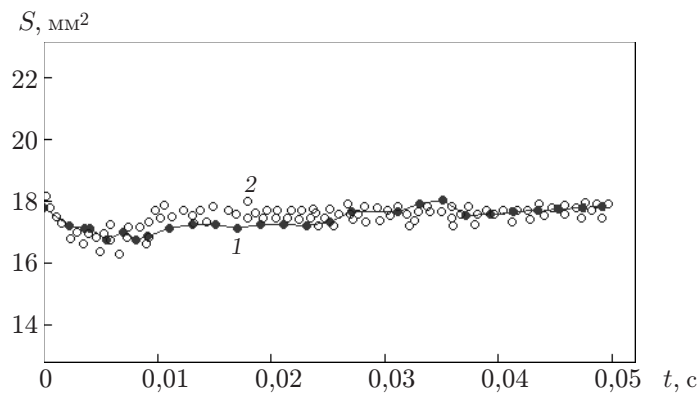


Рис. 7. Зависимость от времени площади продольного сечения капли ОВУТ (35 % — вода, 65 % — кек марки “К”) при ее гравитационном осаждении: 1 — расчет, 2 — эксперимент

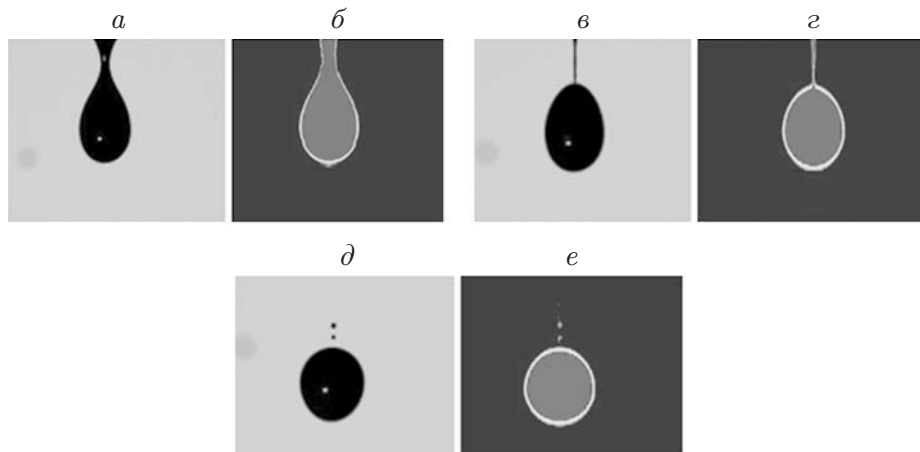


Рис. 8. Эволюция поведения капли ОВУТ (15 % — вода, 85 % — кек марки “К”) на начальном этапе в различные моменты времени:

а, б — $t = 0,176$ с, *в, г* — $t = 0,198$ с, *д, е* — $t = 0,203$ с; *а, в, д* — эксперимент, *б, г, е* — расчет

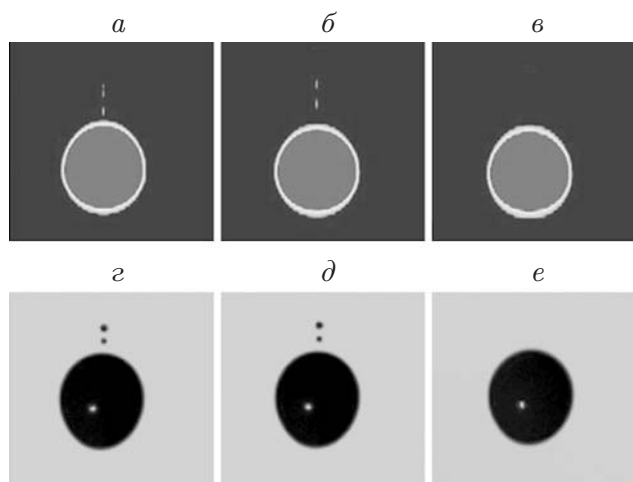


Рис. 9. Расчетные (*a–в*) и экспериментальные (*z–e*) формы поверхности капель ОВУТ (15 % — вода, 85 % — кефир марки “К”) в различные моменты времени: *a, z* — $t = 0,203$ с, *б, д* — $t = 0,205$ с, *в, e* — $t = 0,208$ с

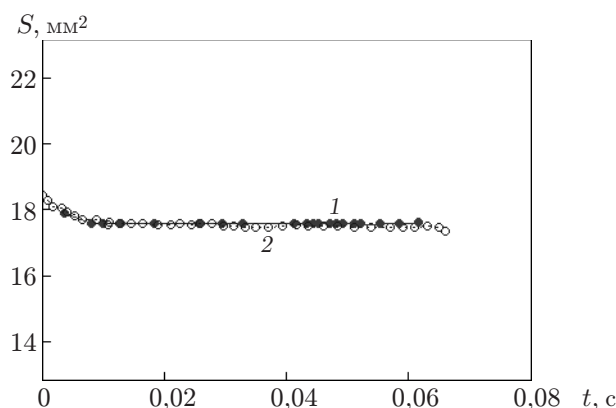


Рис. 10. Зависимость от времени площади поперечного сечения капли ОВУТ (15 % — вода, 85 % — кефир марки “К”) при ее гравитационном осаждении: 1 — расчет, 2 — эксперимент

Заключение. Разработаны и протестированы математическая модель и численная методика расчета процесса деформирования (трансформации поверхности) капель ОВУТ в потоке газа, учитывающие основные свойства органоводоугольных суспензий, поверхностное натяжение и смачивание поверхностей. Расчетный алгоритм не налагает ограничений на форму капель и степень их деформации (адаптируется к реальной геометрии любого сопла).

Определены интегральные характеристики периода и амплитуды колебаний капель в зависимости от массовой доли в них твердых частиц. В экспериментах и расчетах выявлено постепенное затухание амплитуды деформации капли. Установлено также, что с увеличением в примеси массовой доли кефира марки “К” деформация капли становится более монотонной. Показано, что при массовой доле кефира марки “К” 85 % капля имеет сферическую форму и практически не деформируется.

Проведено сравнение результатов моделирования с данными эксперимента о динамике формирования капли, форме свободной поверхности капли, амплитуде и периоде колебаний и установлено, что они удовлетворительно согласуются.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лиштван И. И., Фалюшин П. Л., Смолячкова Е. А., Коврик С. И.** Топливные суспензии на основе мазута, торфа, древесных отходов и древесного угля // Химия твердого топлива. 2009. № 1. С. 3–7.
2. **Aggarwal S. K., Peng F.** A review of droplet dynamics and vaporization modeling for engineering calculations // J. Engng Gas Turbines Power. 1995. V. 117. P. 453–461.
3. **Франк А. М.** Дискретные модели несжимаемой жидкости. М.: Физматлит, 2001.
4. **Minakov A. V.** Numerical algorithm for moving boundary fluid dynamics problems and its testing // Comput. Math. Math. Phys. 2014. V. 54, N 10. P. 1560–1570.
5. **Hirt C. W., Nichols B. D.** Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys. 1981. N 39. P. 201–226.
6. **Minakov A. V., Pervukhin M. V., Platonov D. V., Khatsayuk M. Y.** Mathematical model and numerical simulation of aluminum casting and solidification in magnetic fields with allowance for free surface dynamics // Comput. Math. Math. Phys. 2015. V. 55, N 12. P. 2066–2079.
7. **Shebeleva A. A., Minakov A. V., Yagodnitsina A. A., Andyuseva V. G.** Numerical simulation of two-component flow fluid — fluid in the microchannel T-type // J. MATEC Web Conf. 2015. V. 23. 01043.
8. **Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. A.** Continuum method for modeling surface tension // J. Comput. Phys. 1992. V. 100. P. 335–354.
9. **Gavrilov A. A., Minakov A. V., Dekterev A. A., Rudyak V. Y.** A numerical algorithm for modeling laminar flows in an annular channel with eccentricity // J. Appl. Industr. Math. 2011. V. 5, iss. 4. P. 559–568.
10. **Minakov A. V., Rudyak V., Dekterev A., Gavrilov A.** Investigation of slip boundary conditions in the T-shaped microchannel // J. Heat Fluid Flow. 2013. V. 43. P. 161–169.
11. **Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 85. P. 1–11.
12. **Glushkov D. O., Shabardin D. P., Strizhak P. A., Vershinina K. Yu.** Influence of organic coal-water fuel composition on the characteristics of sustainable droplet ignition // Fuel Proc. Tech. 2016. V. 143. P. 60–68.

*Поступила в редакцию 5/VI 2017 г.,
в окончательном варианте — 11/IX 2017 г.*
