

03

## Экспериментальное исследование влияния скоростей движения и размеров капель жидкостей на характеристики их деформации в воздухе

© Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: pavelspa@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 30 апреля 2014 г. В окончательной редакции 20 ноября 2014 г.)

Выполнена скоростная (задержка между кадрами кросскорреляционной камеры менее  $1 \mu\text{s}$ ) регистрация деформаций капель воды, керосина и этилового спирта при прохождении ими в воздухе расстояний до  $1 \text{ m}$  с варьируемыми скоростями ( $1-5 \text{ m/s}$ ). Установлен циклический характер последовательного изменения форм капель. Выделено несколько десятков „циклов деформации“, характеризующихся определенными временами, протяженностью, амплитудами изменения размеров капель и числом их форм. Установлено влияние на характеристики „циклов деформации“ капель жидкостей скоростей их движения и размеров. Эксперименты в системе „капля жидкости–воздух“ проведены при умеренных числах Вебера ( $We < 10$ ).

### Введение

По результатам экспериментальных и теоретических исследований [1–7] закономерностей „колебательных режимов“ движения капель в жидкостях с различной вязкостью и газовых средах под действием аэродинамических сил, акустического излучения и других „возмущающих эффектов“ установлено, что процесс движения капель представляет определенную последовательность „деформационных циклов“, характеризующихся повторением их форм. Например, в [4] выделено шесть характерных конфигураций водоглицериновых капель при их свободном падении в воздухе [4]. При анализе закономерностей дробления капель нередко для характерных времен „деформационных циклов“  $\tau_d$  используют термины „времена индукции“ или „времена собственных колебаний“ [3,4], т.е. „интервалы времени между ближайшими сходственными фазами деформации осциллирующих капель“ [4]. Предприняты попытки вывода выражений (размерных и безразмерных) для времен  $\tau_d$  в зависимости от физических свойств (вязкость, плотность, поверхностное натяжение) жидкостей и размеров капель. Так, например, установлено [4], что изменение в 1.5–2 раза численных значений основных характеристик водоглицериновых составов (за счет повышения концентрации глицериновых включений в них) умеренно (менее 8%) влияет на времена  $\tau_d$ . В то же время увеличение размеров капель в диапазоне от 2.1 до 5.9  $\mu\text{m}$  приводит к кратному росту времен  $\tau_d$  [4]. Анализ результатов обработки видеogramм экспериментов [8–12], посвященных исследованию процессов дробления и коагуляции капель различных жидкостей в газовом потоке, позволяет сделать вывод о том, что на характеристики деформации капель (в частности, на времена  $\tau_d$ ) могут достаточно существенно влиять скорости движения последних. Представляет интерес оценка влияния этого фактора на условия деформации капель, широко используемых в

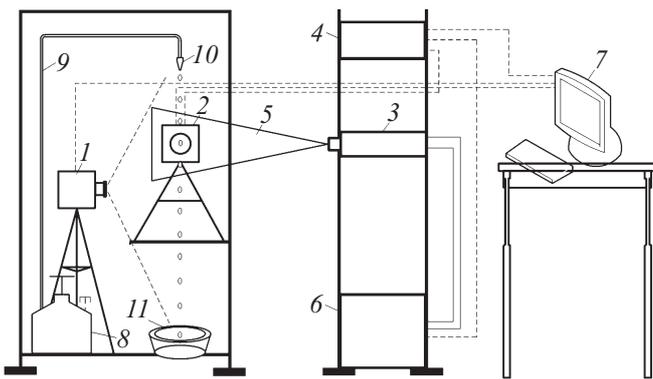
различных приложениях жидкостей (например, вода, керосин, этиловый спирт). Эксперименты [9] показали, что при  $We > 10$  характерные времена деформации капель очень малы вследствие интенсивного дробления и распыления. Последнее достаточно существенно затрудняет анализ закономерностей реализации „деформационных циклов“. В [13–15] в качестве таких предельных чисел Вебера приведены значения  $We_{lim} = 8-10$ . Поэтому целесообразно размеры и скорости движения капель жидкостей выбирать исходя из условия  $We < We_{lim}$ .

Цель настоящей работы — экспериментальное изучение влияния на основные характеристики деформации капель жидкостей в газовой среде (при  $We < We_{lim}$ ) скоростей их движения и размеров.

### Экспериментальный стенд и методы исследований

Эксперименты выполнены на стенде (рис. 1), схема которого аналогична применяемому при проведении исследований испарения капель воды в высокотемпературной (более 1000 К) газовой среде [16–18] с использованием оптических методов „Particle Image Velocimetry“ (PIV) [19–21] и „Interferometric Particle Imaging“ (IPI) [22,23].

Стенд включает в качестве основных элементов [16–18] регистрационную аппаратуру кросскорреляционную камеру 2 (с форматом изображения  $2048 \times 2048$  пикселей, минимальной задержкой между двумя последовательными кадрами не более  $5 \mu\text{s}$ ), двойной импульсный твердотельный лазер 3 (с активной сферой „алюмоиттриевый гранат“ и добавками неодима, имеющий длину волны 532  $\text{nm}$ , энергию в импульсе не менее 70  $\text{mJ}$ , длительность импульса не более 12  $\text{ns}$ , частоту повторений не более 15  $\text{Hz}$ ) и синхронизирующий процессор 4 (с дискретизацией сигналов не более 10  $\text{ns}$ ). В отличие



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда: 1 — высокоскоростная видеокамера, 2 — кросскорреляционная камера, 3 — двойной твердотельный импульсный лазер, 4 — синхронизатор персонального компьютера (ПК), кросскорреляционной камеры и лазера, 5 — световой «нож», 6 — генератор лазерного излучения, 7 — ПК, 8 — емкость с водой, 9 — канал подачи воды, 10 — дозатор, 11 — уловитель.

от методик [16–18] для регистрации капель в проведенных экспериментах использовалась скоростная видеокамера 1 (с форматом изображения  $1024 \times 1024$  пикселей, максимальной частотой кадров 100 000 в секунду).

Эксперименты проводились следующим образом. Жидкость (использовались три состава — вода, керосин, этиловый спирт) из емкости 8 по каналу 9 поступала на вход дозатора 10. В соответствии с заданными начальными размерами  $d_0$  и скоростью  $u_0$  из дозатора 10 выходили одиночные капли, которые пролетали через область видеорегистрации (протяженность 1 м) в воздухе до уловителя 11. Процесс движения капель регистрировался видеокамерой 1. Проводилось не менее 10 экспериментов для фиксированных размеров и скоростей капель (при прочих неизменных условиях). После обработки видеogramм на персональном компьютере (ПК) 7 выделялись участки с характерными изменениями конфигурации капель. Другими словами, фиксировались интервалы времени  $\tau_d$ , в течение которых капли завершали «циклы деформации» (последовательно дважды принимали близкую к идентичной форму). При обработке записей видеокамеры 1 расстояние между дозатором 10 и уловителем 11 разделялось на группу участков, характеризующих соответствующие «деформационные циклы», и выполнялись измерения времени  $\tau_d$  и протяженности  $s_d$ .

С использованием кросскорреляционного измерительного блока (камера 2, импульсный лазер 3, синхронизатор 4) для выделенных по результатам обработки записей видеокамеры 1 участков, соответствующих «деформационным циклам», проводилось измерение размеров капель (выполнялись 10 экспериментов с идентичными первому этапу размерами и скоростями капель, но изображения капель фиксировались только для нескольких

последовательных «циклов деформации») и уточнялись значения  $\tau_d$  и  $s_d$ .

Начальные размеры капель воды варьировались в диапазоне 3–6 мм. В качестве начального характерного размера капли принимался ее диаметр ( $d_0$ ) при отрыве от дозатора 10. Эксперименты показали, что в этот момент времени капля имеет форму, близкую к сферической. Поэтому можно диаметр капли в форме сферы вполне обоснованно считать ее характерным начальным размером.

Начальные скорости капель  $u_0$  варьировались в диапазоне от 0 до 3 м/с. Выбор этого диапазона обусловлен тем, что при испускании дозатором 10 капля с такими скоростями в регистрационных областях (рис. 1) видеокамеры 1 и кросскорреляционной камеры 2 скорости движения капель  $u$  изменялись в дозвуковом диапазоне 1–5 м/с.

При максимально возможной плотности газовой среды в рассматриваемых условиях  $\rho_a \approx 1.5 \text{ kg/m}^3$ , ее кинематической вязкости  $\nu_a \approx 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  и коэффициентах поверхностного натяжения воды, этилового спирта и керосина [24–26]  $\sigma_{\text{w}} = 0.0618 \text{ kg/s}^2$ ,  $\sigma_{\text{is}} = 0.0228 \text{ kg/s}^2$  и  $\sigma_{\text{lk}} = 0.0289 \text{ kg/s}^2$  максимальные числа Вебера составили:  $We_{\text{mw}} = u_m^2 d_m \rho_a \sigma_{\text{w}} \approx 3.64$ ,  $We_{\text{ms}} = u_m^2 d_m \rho_a \sigma_{\text{is}} \approx 9.86$ ,  $We_{\text{mk}} = u_m^2 d_m \rho_a \sigma_{\text{lk}} \approx 7.78$ . Можно сделать вывод о том, что в экспериментах выполнялось условие  $We < We_{\text{lim}}$ .

При обработке видеogramм экспериментов рассчитывались основные параметры, характеризующие «циклы деформации»:  $d_x$  — максимальный поперечный (относительно направления движения) размер капли, мм;  $d_y$  — максимальный продольный размер капли, мм;  $d_{\text{max}}$  — абсолютный максимальный размер капли, мм; протяженность цикла  $s_d$ , мм; время цикла  $\tau_d$ , с. Вычислялись изменения за время измерения  $d_x$ ,  $d_y$  и  $d_{\text{max}}$  относительно значения  $d_0$  ( $\Delta_x = (d_x - d_0)/d_0$ ,  $\Delta_y = (d_y - d_0)/d_0$ ,  $\Delta_{\text{max}} = (d_{\text{max}} - d_0)/d_0$ ).

При определении размеров капель каждая видеogramма кросскорреляционной камеры разделялась на расчетные области размерами  $32 \times 32$  пикселей. Согласно рекомендациям [19–21], рассчитывался масштабный коэффициент  $S$  (для видеogramм проведенных экспериментов значения  $S$  изменялись в диапазоне 0.01–0.1 мм/пикс). С использованием базовых процедур алгоритмов [22,23] и методик [16–18] вычислялись условные (так как форма капель соответствует в основном эллипсоидам) максимальные диаметры капель в пикселях. После этого при известном коэффициенте  $S$  выполнялся пересчет характерного размера капли в миллиметры.

По результатам обработки видеogramм экспериментов при фиксированных значениях  $\tau_d$  и  $s_d$  рассчитывались скорости движения капель  $u$  в рамках каждого из характерных «деформационных циклов». Так как в таком случае скорости движения  $u$  получались не в результате прямых измерений, то дополнительно для уточнения их значений проводились эксперименты по непосредственному измерению  $u$  с использованием оптического метода PIV [20–22] и методик [16–18]. В этом случае

в жидкость добавлялись (аналогично методикам [16–18] около 0.5% по массе) частицы нанопорошка диоксида титана. Выбор порошка TiO<sub>2</sub> в качестве „трассеров“ обусловлен тем, что его частицы не растворяются в применявшихся (вода, керосин, этиловый спирт) в экспериментах жидкостях [27]. При достаточно малых относительных массовых концентрациях (0.5%) частицы TiO<sub>2</sub> не могут существенно повлиять и на процессы деформации капель. Измерение мгновенного поля скорости основано на регистрации перемещения „трассеров“ за фиксированный интервал времени (100 ns в соответствии с методиками [19–21]). Обработка видеоизображений капель, содержащих „трассеры“, основана на кросскорреляционном алгоритме, представляющем метод быстрого преобразования Фурье с использованием условий выполнения корреляционной теоремы [19–21]. Корреляционная функция вычислялась для каждой расчетной области видеоработы. Максимум корреляционной функции соответствовал наиболее вероятному сдвигу частиц в рабочей области [19–21]. При известных временных задержках между вспышками лазера и наиболее вероятных перемещениях частиц (определенных по максимуму корреляционной функции) в расчетных областях видеокладов определялись мгновенные скорости „трассеров“ [19–21]. Аналогично [16–18] по скоростям „трассеров“ вычислялись скорости движения капель  $u$ .

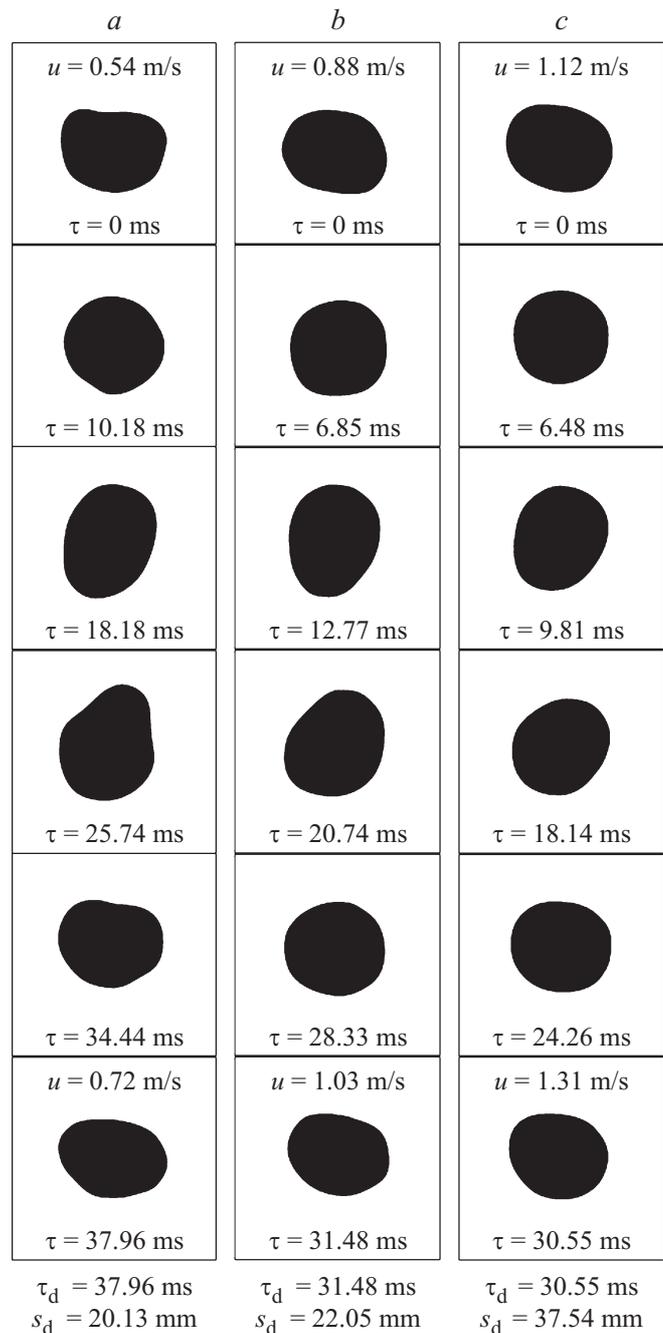
Систематические погрешности измерения размеров капель, определенные по методикам [22,23], составили не более  $10^{-5}$  м. Для скоростей движения капель эти погрешности, определенные по методикам [19–21], составили не более 0.01 м/с. Систематические погрешности определения времен  $\tau_d$  и расстояний  $s_d$  с использованием кросскорреляционной камеры при  $S = 0.01–0.1$  мм/пикс не превышали  $10^{-5}$  с и  $10^{-4}$  м (использовались оценочные методики [28,29]).

Выполненные эксперименты показали, что максимальные случайные погрешности (характеризуют повторяемость результатов экспериментов в сериях при идентичных начальных условиях) определения  $d_x, d_y$  и  $d_{max}$  составили 5.8%, времен  $\tau_d$  — 4.1%, протяженностей  $s_d$  — 6.7%.

## Результаты и обсуждение

При обработке видеоработ экспериментов установлено непрерывное изменение форм капель в течение всего периода времени, соответствующего их движению от дозатора до уловителя. Такой вывод можно сделать для всего диапазона скоростей (0–5 м/с) и размеров капель от 3 до 6 мм. Этот результат наглядно иллюстрирует интенсивную циклическую деформацию капель в рассматриваемых условиях.

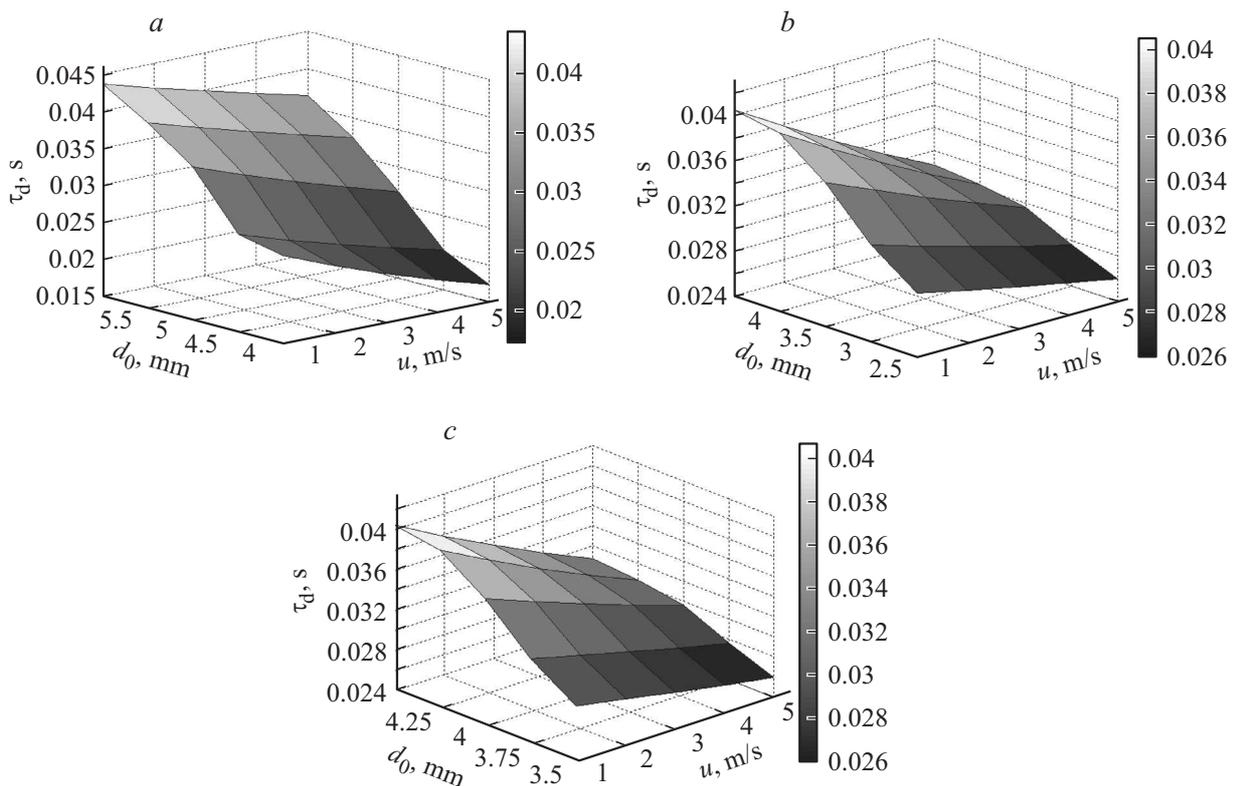
На рис. 2 приведены типичные изображения капли одной из рассматриваемых жидкостей (этиловый спирт) для нескольких последовательных „циклов деформации“. В качестве первого цикла выбран характерный участок



**Рис. 2.** Изображения капли этилового спирта ( $d_0 = 5$  мм) в течение нескольких „циклов деформации“ при свободном падении: *a* — первый цикл, *b* — второй цикл, *c* — третий цикл.

траектории движения капли после отрыва от дозатора (рис. 2, *a*). Видеокадры представлены для случая свободного падения капли с целью возможного сопоставления с известными результатами экспериментального исследования таких процессов (в частности, [4]).

При анализе последовательности видеокадров с изображениями капель водоглицеринового раствора [4] определены шесть характерных форм (авторами [4] исполь-



**Рис. 3.** Времена „циклов деформации“ в зависимости от размеров и скоростей движения капель: *a* — вода, *b* — керосин, *c* — этиловый спирт.

зовано выражение „шесть фаз колебаний“). При дискретизации кадров (в рамках первого „цикла деформации“) в выполненных экспериментах (рис. 2, *a*) зарегистрированы такие же формы капель. Можно отметить хорошую корреляцию с [4] и временных интервалов между основными формами, их последовательности, а также геометрических особенностей (в частности, положений осей симметрии капель). В то же время можно заметить, что между представленными для первого „цикла деформации“ формами капель (рис. 2, *a*) зафиксировано еще достаточно много индивидуальных форм, которые в [4] не зарегистрированы. Последнее, скорее всего, можно объяснить ограниченными возможностями измерительной аппаратуры [4].

В [4] приведены результаты обработки видеogramм только для первого „цикла деформации“ (т.е. сразу после отрыва капль от дозатора). При этом характерные амплитуды ( $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$ ,  $\Delta_{\max}$ ) деформации капль и протяженность ( $s_d$ ) цикла не описаны в [4] (их можно только достаточно приближенно определить по представленным видеogramмам). Поэтому количественное сравнение результатов экспериментов с данными [4] можно выполнить только по временам  $\tau_d$ . Так, например, для капль воды без глицерина с характерными размерами 5.1 mm время первого „цикла деформации“ составило [4] около 38 ms. С использованием рассматриваемого экспериментального стенда (рис. 1) для капль

воды при идентичных параметрах установлено время  $\tau_d$  около 36 ms.

Анализ обзорной работы [30] показал, что исследованию условий отрыва капль жидкостей от дозаторов и распылителей посвящено достаточно много публикаций. Установлены [30] типичные формы капль в момент отрыва и их многообразие в зависимости от условий отрыва от дозаторов и распылителей. Выявленные в проведенных экспериментах особенности отрыва капль от дозатора хорошо коррелируют с данными [30]. Так, например, при обработке результатов выполненных экспериментальных исследований выделены два характерных режима деформации капль, которые определяются условиями отрыва от дозатора. Результаты анализа этого эффекта представлены в [31]. В соответствии с первым режимом деформации [31] капль из начального состояния (близкого к сферическому) „сплющивается“ и приобретает форму „блина“, а затем вытягивается в направлении движения (далее эти формы циклически повторяются). Второй режим [31] можно назвать „вращательным“ (зарегистрировано вращение капль в форме эллипсоида относительно своего центра масс в процессе движения). Установлено [31], что при подаче их дозатором с частотой более одной в секунду реализуется вращательный режим деформации. При наличии даже небольшого отклонения (более  $2^\circ$ ) угла наклона дозатора относительно нормали к основанию уловителя

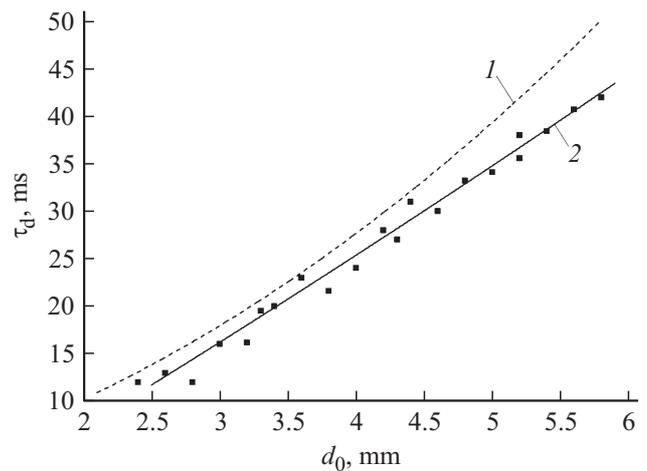
реализуется второй режим [31]. Во всех остальных случаях стабильно реализовывался первый режим деформации [31].

Из анализа экспериментальных данных [31] можно сделать вывод о том, что довольно сложно обеспечить удовлетворительную повторяемость (среднеквадратичные отклонения не более 10%) результатов при 7–10 экспериментах в идентичных условиях для второго режима деформации. Как правило, необходимо до 15–17 экспериментов. Поэтому в настоящей работе исследования проведены с использованием данных экспериментов при реализации первого режима деформации. К тому же в обзорных работах [2,30] все заключения сделаны с использованием конфигураций капель, соответствующих первому режиму деформации [31].

В проведенных экспериментах каждый последующий „цикл деформации“ отличался по основным характеристикам от предыдущего достаточно значительно. Так, например, на рис. 2 хорошо видны изменения  $\tau_d$ ,  $s_d$  и форм капель для трех рассматриваемых циклов. С каждым последующим циклом значения  $\tau_d$  и число индивидуальных форм капель уменьшаются, а параметр  $s_d$  возрастает. Выделенные особенности связаны с ростом скоростей капель  $u$  (на рис. 2 приведены значения скоростей капель на „входе“ и „выходе“ из цикла). При увеличении  $u$  возрастает действие сил поверхностного трения и сопротивления. Увеличение массовых и инерционных сил, действующих на каплю, приводит к интенсификации процессов ее деформации. Это, в свою очередь, вызывает снижение характерных времен  $\tau_d$ . Так как значения скоростей увеличиваются более существенно, чем уменьшаются времена  $\tau_d$ , то и значения  $s_d$  повышаются.

При анализе результатов обработки видеogramм установлены масштабы влияния и размеров капель на характеристики „деформационных циклов“. Так, например, на рис. 3 приведены зависимости, иллюстрирующие влияние  $d_0$  и  $u$  на время  $\tau_d$ . Видно, что размеры капель оказывают сопоставимое со скоростями их движения влияние на длительность „циклов деформации“. Увеличение размеров капель приводит к росту их массы и, как следствие, замедляет процессы изменения формы — времена  $\tau_d$  повышаются.

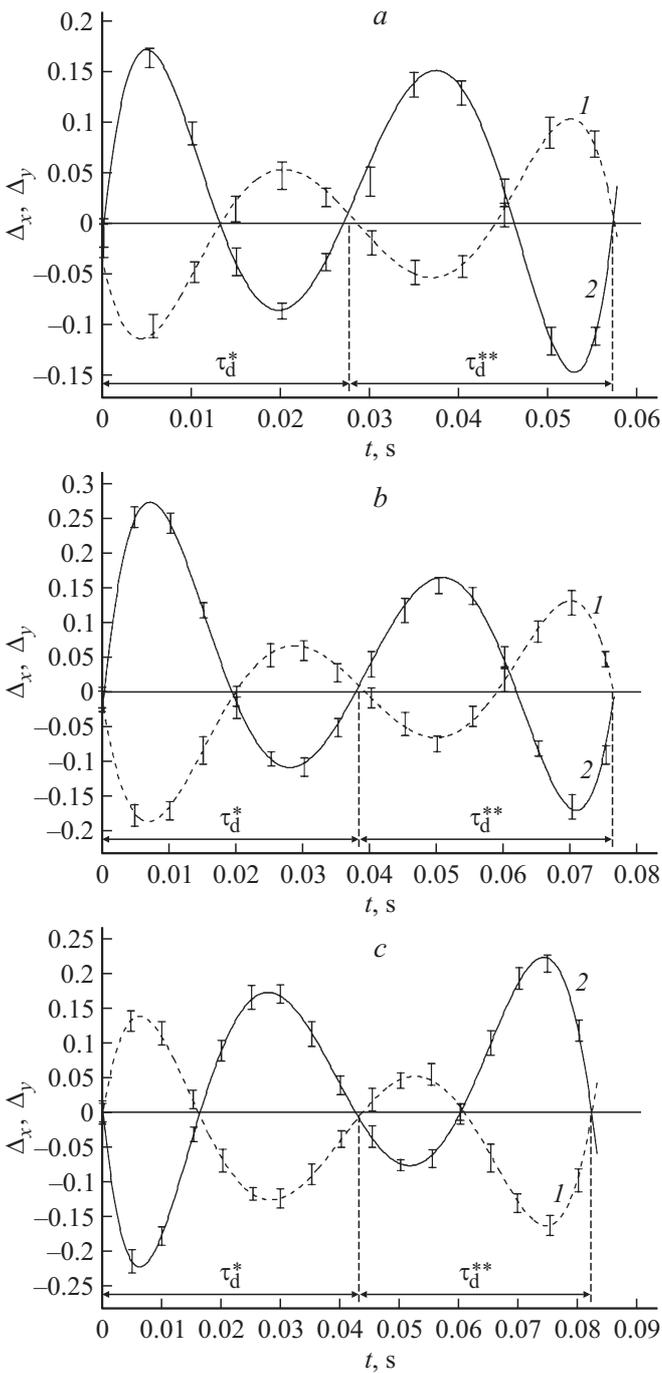
На рис. 4 представлены результаты сопоставления данных экспериментов [4] и проведенных опытов (для первого „цикла деформации“ при свободном падении капель воды). Можно сделать вывод об удовлетворительном соответствии функций  $\tau_d = f(d_0)$ . Однако сопоставление рис. 3 и 4 позволяет также сделать вывод и о существенном изменении функций  $\tau_d = f(d_0)$  при росте скоростей движения капель  $u$ . Этот результат иллюстрирует ограниченность применимости математических выражений для  $\tau_d$ , представленных в [4], как функций, не учитывающих скорости перемещения капель.



**Рис. 4.** Зависимость времени первого „цикла деформации“ при свободном падении капли воды от ее размера: 1 — аппроксимационная экспериментальная кривая [4], 2 — аппроксимационная зависимость для выполненных экспериментов, ■ — результаты выполненных экспериментов.

На рис. 5 и 6 приведены изменения амплитуд ( $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  и  $\Delta_{max}$ ) деформации капель рассматриваемых жидкостей в течение нескольких „деформационных циклов“ с соответствующими временами  $\tau_d$ . Можно отметить несимметрию изменений размеров капель по двум координатам плоскостей видеogramм ( $\Delta_x \neq \Delta_y$ ). Установленные особенности являются основанием для заключения о пространственной (трехмерной) деформации капель. Также можно отметить непрерывное изменение формы капель в течение достаточно малых интервалов времени ( $\tau_d \ll 1$  s). Этот результат, в частности, позволяет сделать вывод о том, что не вполне обоснованно при численном моделировании процессов движения капель жидкостей использовать подходы, основанные на предположениях о постоянстве их формы (сфера, эллипсоид, „блин“ или, например, вытянутый цилиндр). Целесообразна разработка моделей движения капель, учитывающих изменение коэффициента аэродинамического сопротивления во времени в соответствии с возможными „циклами деформации“.

Установленные при обработке результатов экспериментов отличия основных характеристик ( $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$ ,  $\Delta_{max}$ ,  $\tau_d$ ) „деформационных циклов“ (рис. 3, 5, 6) для капель воды, керосина и этилового спирта при идентичных скоростях движения и размерах капель обусловлены различием [24–26] физических свойств этих жидкостей (в частности, вязкости  $\nu$ , плотности  $\rho$  и поверхностного натяжения  $\sigma$ ). Так, например, установлено, что значения  $\tau_d$  и  $s_d$  для капель керосина и этилового спирта отличаются не более чем на 5%. В то же время можно отметить, что времена  $\tau_d$  для керосина ниже и, как следствие, значения  $s_d$  больше, чем для этилового спирта во всех экспериментах (т.е. можно сделать вывод о некоторой закономерности). Вязкости

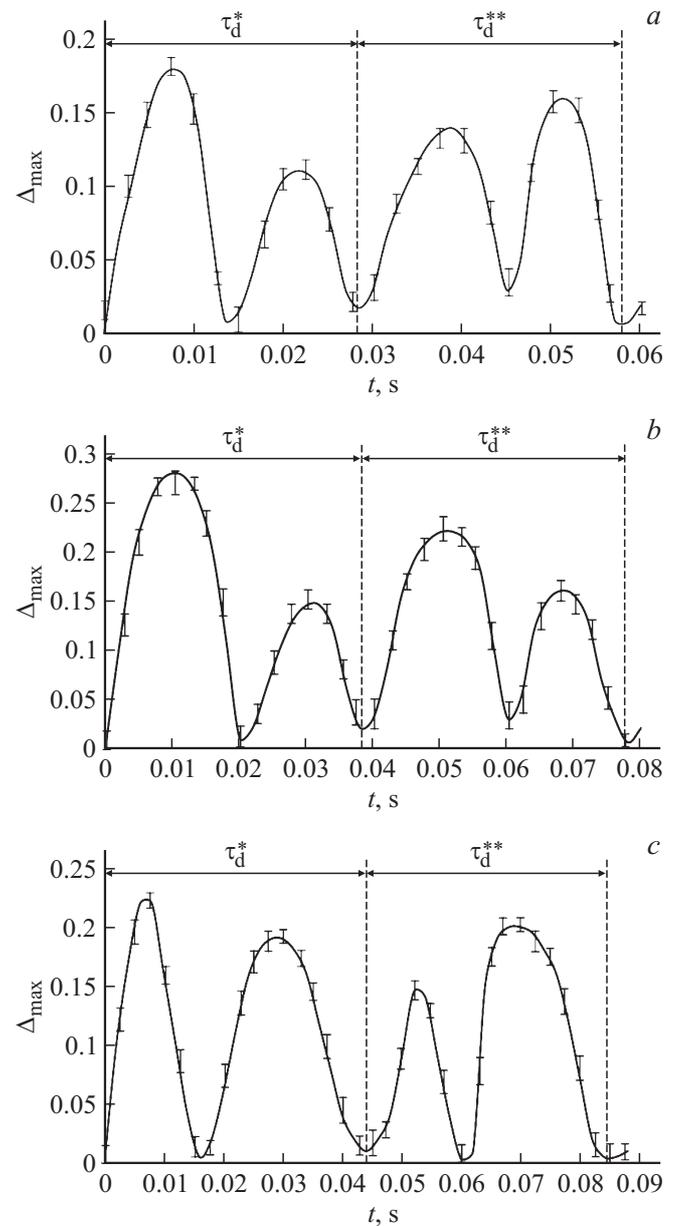


**Рис. 5.** Значения  $\Delta_x$  (1) и  $\Delta_y$  (2) при  $u = 1 \text{ m/s}$  и  $d_0 = 4.5 \text{ mm}$  в течение двух характерных „циклов деформации“ капле жидкостей при общем времени их движения в воздухе около  $70 \text{ ms}$  ( $\tau_d^*$  — первый из рассматриваемых цикл,  $\tau_d^{**}$  — последующий цикл): *a* — вода, *b* — керосин, *c* — этиловый спирт.

и плотности этих жидкостей довольно близки (отличия 4–7%). Небольшое снижение  $\tau_d$  для капле керосина по сравнению с этиловым спиртом можно объяснить тем, что спирт имеет коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  на 17–25% больше, чем у керосина. Для воды параметр  $\sigma$  в 2–3 раза превышает значения  $\sigma$  керосина

и этилового спирта. Как следствие, времена  $\tau_d$  в экспериментах с водой существенно меньше, чем значения  $\tau_d$  для капле спирта и керосина при идентичных условиях (рис. 3).

При сравнении амплитуд деформации капле рассматриваемых трех жидкостей (рис. 5, 6) также можно сделать вывод о довольно близких значениях  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  и  $\Delta_{\text{max}}$  для керосина и спирта, а также меньших по сравнению с этими жидкостями значениях амплитуд деформации водяных капле. Установленная закономерность также обусловлена кратно большими значениями  $\sigma$  воды по сравнению со спиртом и керосином [24–26].



**Рис. 6.** Значения  $\Delta_{\text{max}}$  при  $u = 1 \text{ m/s}$  и  $d_0 = 4.5 \text{ mm}$  в течение двух характерных „циклов деформации“ капле жидкостей при общем времени их движения в воздухе около  $70 \text{ ms}$  ( $\tau_d^*$  — первый из рассматриваемых цикл,  $\tau_d^{**}$  — последующий цикл): *a* — вода, *b* — керосин, *c* — этиловый спирт.

Достаточно умеренное влияние вязкости и плотности жидкостей на характерные времена „циклов деформации“ было установлено в экспериментах [4] с водоглицериновыми каплями (плотность изменялась в 1.5 раза, а вязкость на несколько порядков за счет повышения массовой концентрации частиц глицерина в каплях воды). Поэтому, исходя из анализа результатов выполненных исследований и данных [6], можно сделать вывод о том, что определяющую роль в процессе деформации капель играют силы поверхностного натяжения жидкости.

При реализации фазовых превращений в системе „капля жидкости — газовая среда“ процессы движения капель достаточно существенно усложняются и требуются далеко нетривиальные (например, [32–40]) подходы к моделированию и анализу их закономерностей. Учет в этих и других известных моделях непрерывного изменения форм капель в процессе движения через газовую среду в соответствии с выделенными „деформационными циклами“ может позволить существенно приблизить результаты моделирования к реальным.

## Выводы

Основные характеристики ( $\tau_d$ ,  $s_d$  и  $\Delta_{\max}$ ) „циклов деформации“ капель трех исследовавшихся жидкостей достаточно существенно изменяются в процессе движения последних через газовую среду. Это, главным образом, вызвано ростом скоростей движения капель  $u$ .

Повышение скоростей движения капель  $u$  вызывает уменьшение числа характерных форм последних в каждом последующем „деформационном цикле“.

Установленная в экспериментах несимметрия форм капель характеризует пространственный (трехмерный) характер их деформации при движении в газовых средах. Этот результат иллюстрирует целесообразность разработки моделей движения капель, учитывающих изменение коэффициента аэродинамического сопротивления во времени в соответствии с возможными „циклами деформации“.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-39-00003).

## Список литературы

- [1] *Ивандаев А.И., Кутушев А.Г., Нигматулин Р.И.* // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Механика жидкости и газа. 1981. Т. 16. С. 209–287.
- [2] *Гонор А.Л., Ривкин В.Я.* // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Механика жидкости и газа. 1982. Т. 17. С. 86–159.
- [3] *Wierzb A.* // Experiments in Fluids. 1990. Vol. 9, N 1. P. 59–64.
- [4] *Дубровский В.В., Подвысоцкий В.В., Шрайбер А.А.* // Инженерно-физический журн. 1990. Т. 58. № 5. С. 804–808.
- [5] *Hsiang L.P., Faeth G.M.* // Int. J. Multiph. Flow. 1993. Vol. 19. N 5. P. 721–735.
- [6] *Shreiber A.A., Podvisotski A.M., Dubrovski V.V.* // Atomization Sprays. 1996. Vol. 6. N 6. P. 667–692.
- [7] *Hwang S.S., Liu Z., Reitz R.D.* // Atomization Sprays. 1996. Vol. 6. P. 353–376.
- [8] *Guildenbecher D.R., Sojka P.E.* // Atomization Sprays. 2011. Vol. 21. P. 139–147.
- [9] *Flock A.K., Guildenbecher D.R., Chen J. et. al.* // Int. J. Multiph. Flow. 2012. Vol. 47. P. 37–49.
- [10] *Sprittles J.E., Shikhmurzaev Y.D.* // Phys. Fluids. 2012. Vol. 24. P. 122 105.
- [11] *Архипов В.А., Васенин И.М., Трофимов В.Ф. и др.* // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2013. № 2. С. 5–14.
- [12] *El-Sayed R. Negeed, Albeirutty M., Takata Y.* // Int. J. Therm. Sci. 2014. Vol. 79. P. 1–17.
- [13] *Гегузин Я.Е.* Капля. М.: Наука, 1973. 161 с.
- [14] *Вольнский М.С.* Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. М.: Знание, 1986. 144 с.
- [15] *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. 464 с.
- [16] *Волков Р.С., Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В. и др.* // Инженерно-физический журн. 2013. Т. 86. № 6. С. 1327–1332.
- [17] *Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 12. С. 11–18.
- [18] *Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 7. С. 15–23.
- [19] *Westerweel J.* // Meas. Sci. Technol. 1997. Vol. 8. P. 1379–1392.
- [20] *Foucaut J.M., Stanislas M.* // Meas. Sci. Technol. 2002. Vol. 13. P. 1058–1071.
- [21] *Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.* // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. № 3. С. 109–131.
- [22] *Damaschke N., Nobach H., Tropea C.* // Exp. Fluids. 2002. Vol. 32. № 2. P. 143–152.
- [23] *Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М.* // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 1. С. 1–13.
- [24] *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: ООО „Старс“, 2006. 720 с.
- [25] *Корольченко А.Я.* Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник. М.: Пожнаука, 2004. Ч. 1. 713 с.
- [26] *Корольченко А.Я.* Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник. М.: Пожнаука, 2004. Ч. 2. 774 с.
- [27] *Ильин А.П., Назаренко О.Б., Коршунов А.В. и др.* Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. 196 с.
- [28] *Шенк Х.* Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972. 381 с.
- [29] *Зайдель А.Н.* Элементарные оценки ошибок измерений. АН СССР. Л.: Наука, 1968. 99 с.
- [30] *Eggers J., Villermaux E.* // Rep. Prog. Phys. 2008. Vol. 71. P. 036 601. 79 p.
- [31] *Volkov R.S., Zhdanova A.O., Strizhak P.A.* // European Physical Journal Web of Conferences. 2014. Vol. 76. P. 01 038.

- [32] Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6. № 3. С. 331–341.
- [33] Яламов Ю.И., Голикова Н.Н. // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 2. С. 30–35.
- [34] Абросимов П.Б., Заплатин П.В., Нагорный В.С. и др. // ЖТФ. 2007. Т. 77. № 11. С. 39–43.
- [35] Анохина Е.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 8. С. 32–37.
- [36] Демьянов А.Ю., Динариев О.Ю., Иванов Е.Н. // Инженерно-физический журн. 2012. Т. 85. № 6. С. 1145–1154.
- [37] Вараксин А.Ю. // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 3. С. 421–455.
- [38] Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Тепловые процессы в технике. 2013. № 6. С. 254–261.
- [39] Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Инженерно-физический журн. 2013. Т. 86. № 1. С. 59–65.
- [40] Стрижак П.А. // Инженерно-физический журн. 2013. Т. 86. № 4. С. 839–848.