

УДК 532.5, 621.4  
DOI: 10.15372/PMTF202315441

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЭМУЛЬСИИ ФОРСУНКОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА

П. А. Данилов, А. С. Лебедев\*, Р. В. Толстогузов\*,  
А. С. Северин\*, В. М. Дулин\*,\*\*

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

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

\*\* Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Новосибирск, Россия

E-mails: p.d4nilov@gmail.com, anatoly.lebedev1994@gmail.com,  
enot.roman@gmail.com, a.severin@alumni.nsu.ru, vmd@itp.nsc.ru

Для случая распыления однокомпонентной жидкости (воды) из форсунки центробежного типа представлены зависимости среднего размера, средней скорости и частоты регистрации капель от давления и способа подачи рабочей жидкости в каналы форсунки, полученные локально-времяпролетным методом с использованием прибора SpraySpy. С помощью метода теневой визуализации проведен анализ влияния добавления не смешивающейся на молекулярном уровне с водой жидкости (керосина) на структуру конуса распыления и его распад. Обнаружено, что двухкомпонентная эмульсия распадается практически мгновенно в непосредственной близости от среза сопла распылителя, что приводит к значительной деформации конуса распыления.

**Ключевые слова:** многофазные дисперсные потоки, спреи, эмульсии, форсунка центробежного типа, оптические методы исследования потоков, локально-времяпролетный метод, прибор SpraySpy, теневая визуализация

**Введение.** В настоящее время органическое топливо является важнейшим источником энергии. Современные энергетические установки и двигатели внутреннего сгорания достаточно надежны, имеют большой коэффициент полезного действия и характеризуются относительно низким уровнем выбросов. Несмотря на это, экологические требования к таким установкам и двигателям постоянно возрастают, что обуславливает необходимость разработки новых технологий эффективного сжигания топлива.

Известно, что эффективность сгорания топлива можно увеличить за счет увеличения эффективной площади поверхности капель. Одним из наиболее перспективных методов является применение форсунок и других распылителей для смесей двух не смешивающихся на молекулярном уровне жидкостей — эмульсий. В работе [1] показано, что использование смеси дизельного топлива и воды позволяет уменьшить температуру капли за счет испарения воды, что, в свою очередь, приводит к понижению температуры внутри цилиндров

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 22-79-10246). Проведение эксперимента обеспечено финансированием в рамках государственного задания Института теплофизики СО РАН.

двигателя и уменьшению интенсивности образования углеродного остатка до 94 %. В ряде случаев применение, например, эмульсии топлива и воды может вызвать вторичный распад капли, что актуально при использовании дизельных двигателей с прямым впрыском. Перегрев воды внутри капли топлива приводит к микровзрыву или паффингу, что, в свою очередь, обусловливает мгновенный распад капли топлива на более мелкие.

В работе [2] показано, что микровзрывной распад капель позволяет существенно увеличить суммарную площадь поверхности капель и равномерность их распределения на некотором расстоянии от форсунки, что способствует повышению эффективности горения топливной эмульсии на 40 %. В [3] приведено математическое описание и выполнено численное моделирование процесса микровзрыва, включающего несколько стадий роста пузырька из перегретой жидкости. Установлено, что управляемый процесс микровзрыва может быть использован для увеличения эффективности сгорания. В работе [4] показано различие паффинга и микровзрыва, описано влияние распределения температуры в капле и процессов конвекции на микровзрыв, а также рассматривается возможность предсказания начала этого процесса. Кроме того, в [4] сделан вывод, что распределение температуры определяет зарождение микровзрыва или паффинга.

В работе [5] проводится сравнение результатов расчетов по математической модели и экспериментальных данных о процессе микровзрыва. Показано, что математическая модель достаточно точно описывает реальный процесс (погрешность не превышает 14 %). Согласно этой модели микровзрыв происходит в момент времени, когда температура капли достигает значения температуры кипения воды.

Разработка новых математических моделей сложных турбулентных многофазных течений зависит от наличия экспериментальной информации. Для адекватного описания сложных течений обычно применяются модели, в которых используется подробная информация об их структуре. В настоящее время имеется большой объем экспериментальных данных о различных струйных дисперсных течениях [6, 7], в частности о распылении жидкости [8, 9] и о дисперсных характеристиках. В данной работе представлены данные о формировании эмульсий и распылении полученной эмульсии при подаче двух несмешивающихся жидкостей с помощью одной центробежной форсунки.

**1. Схема распылителя.** Распыление рабочей жидкости проводилось с помощью распечатанной на 3D-принтере форсунки центробежного типа, в конструкции которой предусмотрена возможность независимой подачи двух жидкостей. Внутренняя геометрия объекта представляет собой цилиндрическую вихревую камеру и два симметричных тангенциальных впускных канала. Камера диаметром 3,4 мм и высотой 1,69 мм (рис. 1) служится под углом 45° до диаметра  $D_c = 0,8$  мм и продолжается в виде цилиндра длиной 1 мм, концом которого является выходное отверстие распылителя. Впускные каналы представляют собой цилиндры с внутренним диаметром 1,2 мм и длиной 5,97 мм, оси симметрии которых располагаются на расстоянии 3,3 мм от плоскости среза выходного сопла форсунки. Далее цилиндры расширяются под углом 45° до диаметра, равного 2,4 мм, и продолжаются в виде цилиндра длиной 24,8 мм. Внешняя геометрия форсунки позволяла установить ее на специально разработанное и напечатанное крепление для осуществления визуального наблюдения с помощью высокоскоростной камеры Photron FASTCAM NOVA S12.

**2. Эксперимент.** Эксперименты включали два этапа. На первом этапе изучалось распыление однокомпонентной жидкости (вода — вода) и проверялась корректность работы напечатанной на 3D-принтере форсунки центробежного типа путем установления соответствия полученных характеристик теоретическим данным. На первом этапе установка имела следующий вид (рис. 2): рабочая жидкость под постоянным давлением  $p = 3, 4, 5$  атм с помощью разветвителя (тройника) поступает в каналы форсунки, смешивает-

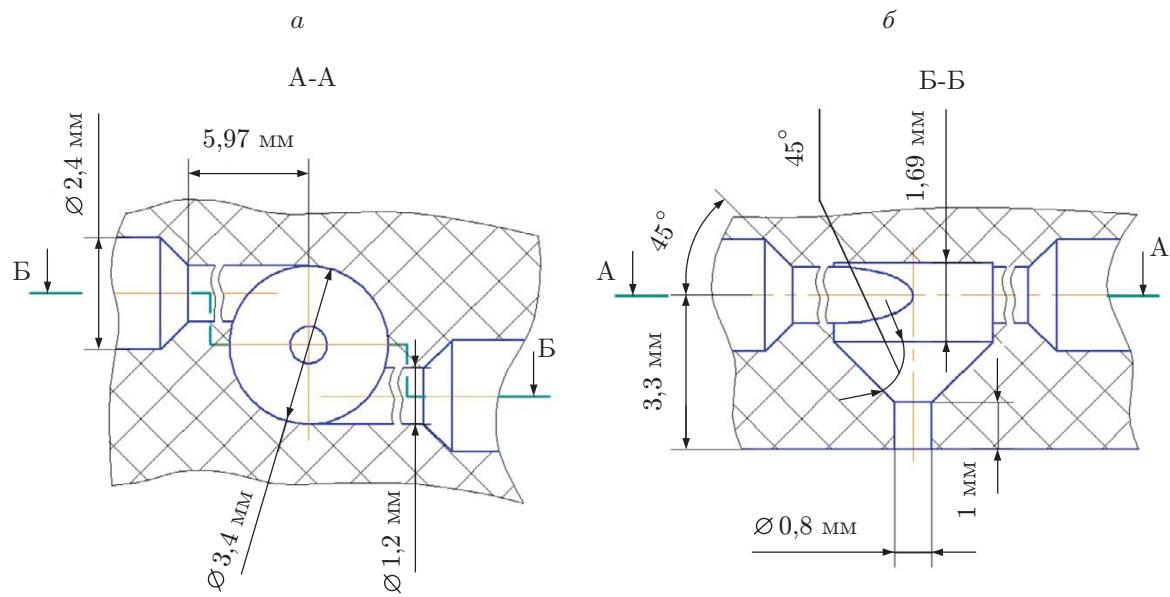


Рис. 1. Внутренняя геометрия и основные размеры форсунки центробежного типа:  
а — вид сверху, б — вид спереди

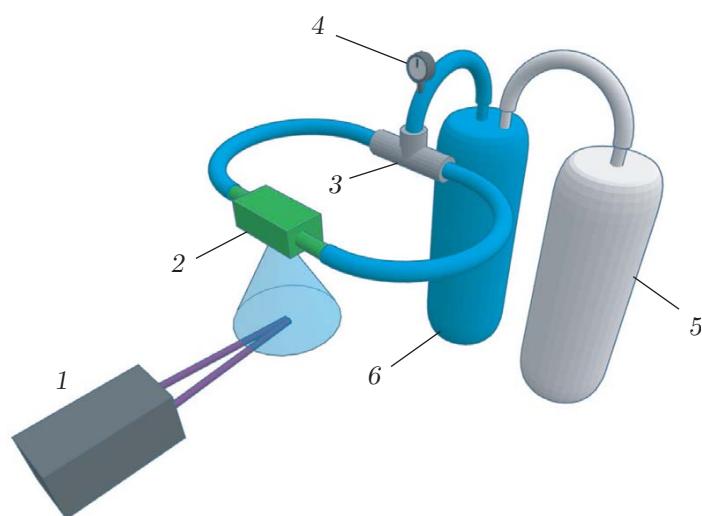


Рис. 2. Схема экспериментальной установки, используемой на первом этапе:  
1 — устройство SpraySpy, 2 — форсунка центробежного типа, 3 — тройник, 4 — манометр, 5 — баллон с воздухом, 6 — баллон с водой

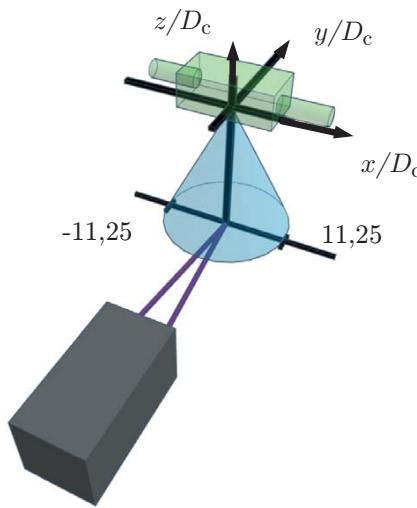


Рис. 3. Схема перемещения измерительного прибора и перемычки лазерного излучения при измерениях локально-времяпролетным методом с использованием устройства SpraySpy

ся внутри вихревой камеры и распыляется из выходного сопла форсунки в виде спрея. Полученная дисперсная смесь анализируется локально-времяпролетным методом на базе устройства SpraySpy (AOM-Systems GmbH). Данный метод основан на анализе луча света, отраженного и преломленного каплями, проходящими через сфокусированный лазерный луч [10].

Измерения проводились вдоль отрезка  $x/D_c \in [-11,25; 11,25]$  с шагом 1,25,  $y/D_c = 0$ ,  $z/D_c = -25$ , где  $z/D_c = 0$  — положение плоскости среза выходного сопла форсунки (рис. 3). Перемещение измерительного прибора и перемычки лазерного излучения осуществлялось с помощью координатного устройства позиционирования. Выбор такого отрезка по  $x$ -направлению обусловлен тем, что частота регистрации капель вне этого отрезка, составившая  $f_{\text{хар}} < 500$  шт./с, значительно меньше частоты регистрации капель на срезе выходного сопла форсунки. Фактически границы данного диапазона характеризуют границы конуса распыления в конкретном сечении  $z = \text{const}$ , а частицы, оказавшиеся вне этого диапазона, соответствуют случайным частицам, вылетевшим под большим углом из сопла.

На втором этапе исследовался процесс распыления двухкомпонентной смеси (керосин — вода) и проводился анализ трехфазной дисперсной смеси и характерных изменений при добавлении дополнительной жидкости в поток. Для создания двухкомпонентной смеси требовалось осуществить подачу двух независимых жидкостей в каналы форсунки. Для этого был сконструирован аналог поршневого насоса с двумя емкостями для жидкостей. Путем создания одинакового давления в обеих емкостях жидкости впрыскиваются в оба канала форсунки и смешиваются в вихревой камере, после чего из выходного сопла форсунки распыляется дисперсная смесь.

До проведения анализа распыления двухкомпонентной смеси установка для подачи жидкости тестировалась для однокомпонентной жидкости (вода — вода) с помощью локально-времяпролетного метода (рис. 4). Анализ исследуемого течения проводился с помощью метода теневой визуализации, применяемого для диагностики дисперсных потоков [8, 9], при этом использовались скоростная камера Photron FASTCAM NOVA S12, микроскоп Infinity DistaMax K2 и диод с рассеивающей линзой (рис. 5). Теневая визуализация проводилась в режиме 12 800 кадр/с с разрешением  $1024 \times 1024$  пикселей и пространствен-

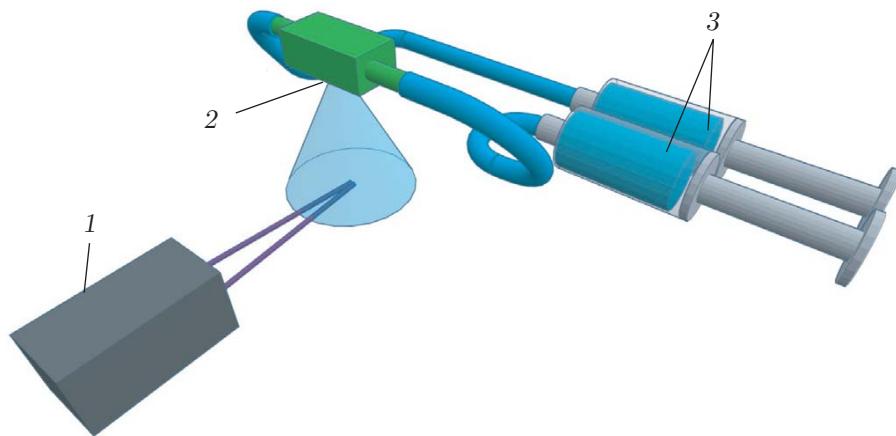


Рис. 4. Схема экспериментальной установки, используемой на втором этапе для распыления смеси вода — вода:

1 — устройство SpraySpy, 2 — форсунка центробежного типа, 3 — поршневой насос с водой

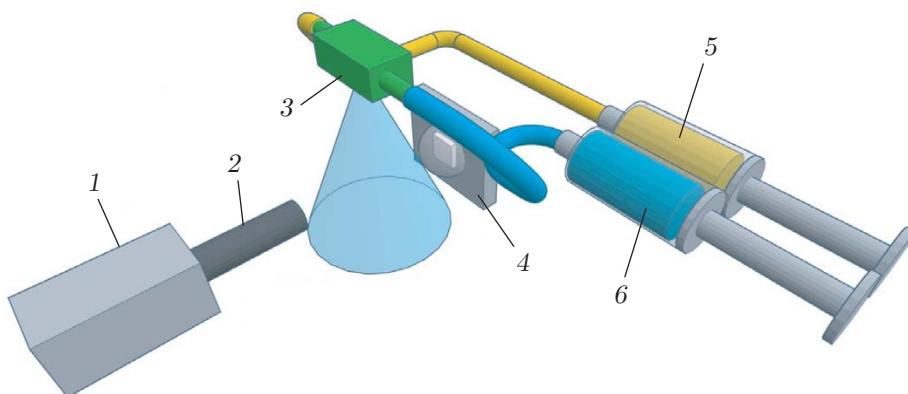


Рис. 5. Схема экспериментальной установки, используемой на втором этапе для распыления смеси вода — керосин:

1 — скоростная камера Photron FASTCAM NOVA S12, 2 — микроскоп Infinity DistaMax K2, 3 — форсунка центробежного типа, 4 — диод с рассеивающей линзой, 5 — поршневой насос с керосином, 6 — поршневой насос с водой

ным размером  $0,7 \times 0,7$  см, выдержка составила  $1/1\,500\,000$  с. В каждом эксперименте было получено 5000 кадров.

**3. Результаты исследования и их обсуждение.** Использование локально-времяпролетного метода позволило получить информацию о среднем диаметре капель, средней скорости капель и количестве зарегистрированных капель в единицу времени вдоль линии  $y/D_c = 0$ ,  $z/D_c = -25$ . На рис. 6, 7 представлены результаты измерений среднего диаметра капель  $\langle D_k \rangle$ , средней скорости капель  $\langle v_k \rangle$ , а также частоты регистрации капель  $f_{\text{рег}}$  при значениях давления  $p = 3, 4, 5$  атм, которым соответствуют значения расхода жидкости  $Q = 5,59; 6,67; 7,01$  мл/с ( $\langle D_k \rangle_{\min}$  — минимальный наблюдаемый средний диаметр капель в точке,  $\langle v_k \rangle_{\min}$  — минимальная наблюдаемая скорость в точке). Кроме того, на рис. 6, 7 приведены результаты эксперимента для однокомпонентной жидкости (вода — вода), в котором использовался поршневой насос. При таком способе подачи воды максимальный расход  $Q$  составил 3,3 мл/с. Измерения проводились на меньшем от-

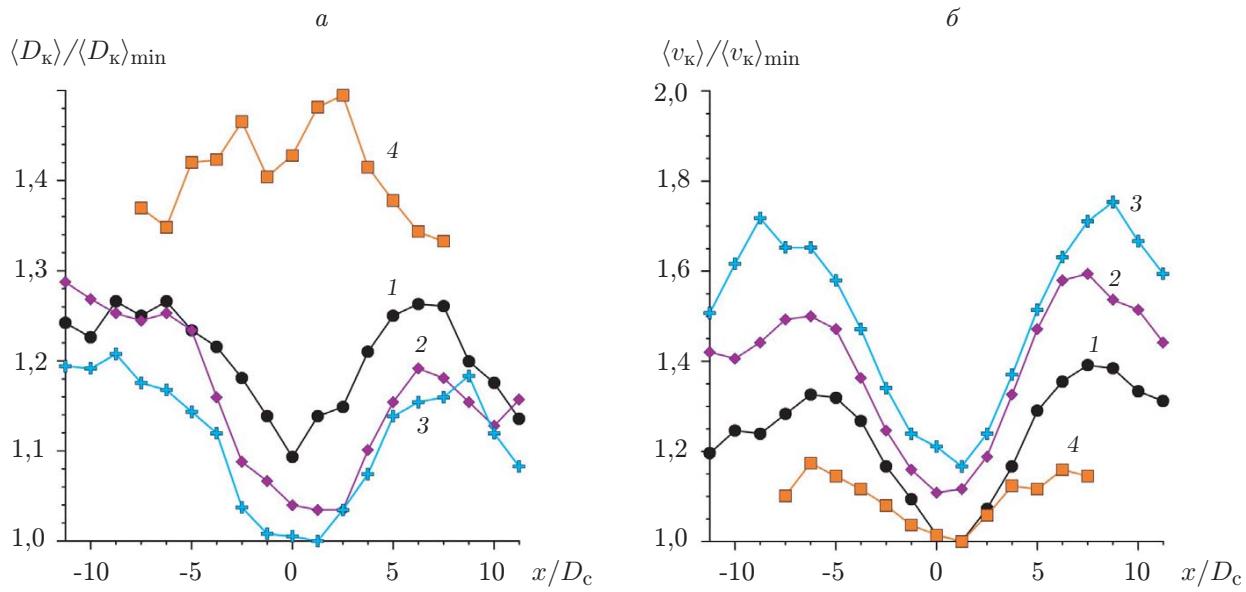


Рис. 6. Распределения среднего диаметра капель  $\langle D_k \rangle$  (а) и средней скорости капель  $\langle v_k \rangle$  (б), полученные локально-времяпролетным методом при распылении однокомпонентной жидкости (вода — вода) вдоль отрезка  $x/D_c \in [-11,25; 11,25]$  при различных значениях давления:

1 —  $p = 3$  атм, 2 —  $p = 4$  атм, 3 —  $p = 5$  атм, 4 — подача рабочей жидкости с помощью поршневого насоса с расходом  $Q = 3,3$  мл/с

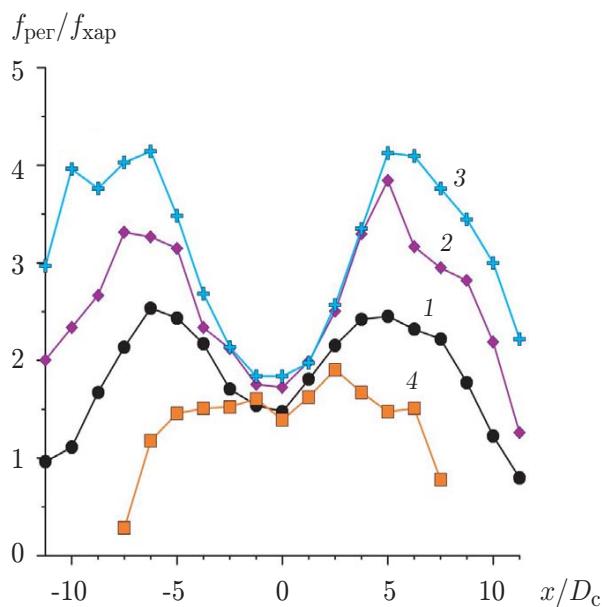


Рис. 7. Распределение частоты регистрации капель  $f_{\text{пер}}$  в исследуемом течении, полученное локально-времяпролетным методом при распылении однокомпонентной жидкости (вода — вода) вдоль отрезка  $x/D_c \in [-11,25; 11,25]$  при различных значениях давления:

1 —  $p = 3$  атм, 2 —  $p = 4$  атм, 3 —  $p = 5$  атм, 4 — подача рабочей жидкости с помощью поршневого насоса с расходом  $Q = 3,3$  мл/с

Значения чисел Вебера We, Рейнольдса Re, Фруда Fr  
при различных режимах подачи рабочей жидкости

Режим подачи	We	$Re \cdot 10^{-3}$	$Fr \cdot 10^{-3}$
$Q = 3,3 \text{ мл/с}$	30	1,5	0,3
$p = 3 \text{ атм}$	86	2,5	1,0
$p = 4 \text{ атм}$	122	3,0	1,4
$p = 5 \text{ атм}$	135	3,1	1,5

резке  $x/D_c \in [-7,5; 7,5]$ , что обусловлено меньшим углом раскрытия конуса распыления вследствие малой скорости жидкости, распыляемой из форсунки.

Обнаружено, что полученные зависимости среднего диаметра капель и частоты регистрации капель от поперечной координаты  $x$  качественно согласуются с данными [11]. Монотонно убывающая зависимость среднего диаметра капель от давления также согласуется с данными [11]. Из полученных зависимостей следует, что мелкие капли локализуются вблизи оси симметрии конуса распыления форсунки, в то время как крупные капли сосредоточиваются на периферии. Этот результат согласуется с данными [12].

Важными критериями подобия задачи о распылении жидкости являются число Вебера  $We = \rho Lv^2/\sigma$ , представляющее собой отношение инерционных сил к силам поверхностного натяжения, число Рейнольдса  $Re = \rho v D / \eta$ , характеризующее отношение инерционных сил к силам вязкого трения, и число Фруда  $Fr = v^2/(gL)$ , определяющее отношение инерционных сил к внешним силам, в поле которых происходит движение ( $\rho$  — плотность жидкости,  $v$  — характерная скорость течения жидкости,  $L$  — характерный размер (диаметр выходного сопла форсунки или диаметр капли),  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $D$  — гидравлический диаметр (диаметр выходного сопла форсунки),  $\eta$  — динамическая вязкость,  $g$  — ускорение свободного падения).

Данные безразмерные характеристики были вычислены для случая распыления однокомпонентной жидкости при различных режимах подачи жидкости в форсунку центробежного типа (см. таблицу). Из таблицы, в частности, следует, что при уменьшении диаметра капель, которое достигается путем увеличения давления (расхода) жидкости, число Вебера увеличивается, что согласуется с данными [13].

На втором этапе экспериментов исследовалось влияние добавления второй жидкости на структуру дисперсной газожидкостной смеси, в частности на динамику пленки жидкости, выходящей из сопла. В качестве второй жидкости использовался керосин. Выбор керосина в качестве рабочей жидкости обусловлен его несмешиваемостью на молекулярном уровне с водой при достаточно близких значениях плотности и вязкости. При проведении анализа применялся метод теневой визуализации как в случае однокомпонентных жидкостей вода — вода и керосин — керосин, так и в случае двухкомпонентной эмульсии керосин — вода (рис. 8). Результаты теневой визуализации показывают, что при распылении двухкомпонентной эмульсии практически мгновенно распадается на отдельные капли и жидкие лигаменты, при этом конус распыления не формируется (см. рис. 8,*b*), в отличие от случая распыления однокомпонентных жидкостей вода — вода (см. рис. 8,*a*) и керосин — керосин (см. рис. 8,*b*), в котором образуется пленка конической формы, распадающаяся на больших расстояниях от среза выходного сопла форсунки. По-видимому, данная особенность распыления двухкомпонентной эмульсии обусловлена формированием отдельных сопутствующих потоков воды и керосина, независимо истекающих из сопла, что, в свою очередь, приводит к появлению разрывов пленки распыла на срезе сопла и ее быстрому распаду на мелкие капли и жидкие лигаменты.

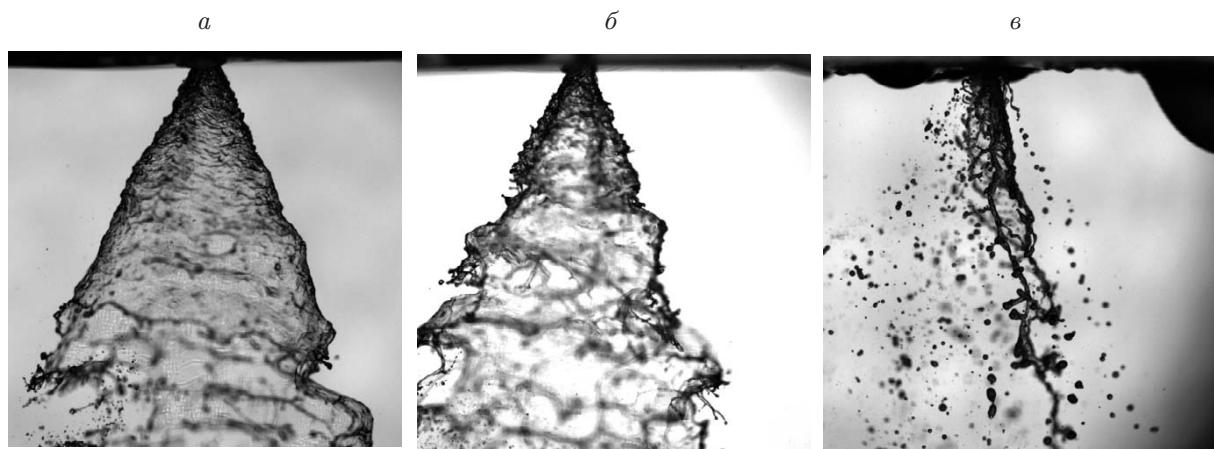


Рис. 8. Результаты теневой визуализации распыления однокомпонентных жидкостей вода — вода (а) и керосин — керосин (б), а также двухкомпонентной эмульсии керосин — вода (в)

**Заключение.** В работе исследовался процесс распыления однокомпонентной жидкости и двухкомпонентной эмульсии форсункой центробежного типа. С помощью локально-времяпролетного метода вычислены зависимости среднего размера, средней скорости и частоты регистрации капель от давления в поперечном сечении струи в случае распыления однокомпонентной жидкости при различных способах ее подачи в каналы форсунки. С использованием метода теневой визуализации проведен анализ влияния добавления не смешивающейся с водой жидкости (керосина) на формирование конуса распыления и его распад. Установлено, что добавление керосина оказывает значительное влияние на структуру потока, а именно: пленка жидкости распадается на капли и жидкие лигаменты практически на срезе сопла, что приводит к существенному искажению конической поверхности распыления, наблюдавшейся в случае распыления однокомпонентной жидкости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Maiboom A., Tauzia X. NO<sub>x</sub> and PM emissions reduction on an automotive HSDI Diesel engine with water-in-diesel emulsion and EGR: An experimental study // Fuel. 2011. V. 90, N 11. P. 3179–3192.
2. Nyashina G. S., Vershinina K. Yu., Strizhak P. A. Impact of micro-explosive atomization of fuel droplets on relative performance indicators of their combustion // Fuel Process. Technol. 2020. V. 201. 106334.
3. Shinjo J., Xia J., Ganippa L. C., Megaritis A. Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets // Phys. Fluids. 2014. V. 26, N 10. 103302.
4. Shinjo J., Xia J., Megaritis A., et al. Modeling temperature distribution inside an emulsion fuel droplet under convective heating: a key to predicting microexplosion and puffing // Atomizat. Sprays. 2016. V. 26, N 6. P. 551–583.
5. Antonov D. V., Fedorenko R. M., Strizhak P. A., et al. Puffing/micro-explosion in composite fuel/water droplets heated in flames // Combust. Flame. 2021. V. 233. 111599.
6. Киселев С. П., Киселев В. П., Зайковский В. Н. О влиянии закрутки потока газа на процесс нанесения покрытия на преграду методом холодного газодинамического напыления // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 2. С. 72–83.

7. Северин А. С., Тимошевский М. В., Илюшин Б. Б., Первунин К. С. Турбулентная структура свободной пузырьковой струи: анализ статистических моментов старших порядков для флюктуаций скорости // ПМТФ. 2023. Т. 64, № 6. С. 81–84.
8. Наз М. Я., Сулейман С. А., Эриваджуди Б., Кушаари Кузилати. Визуализация распада струи горячего водного аэрозоля, инициированного коническими форсунками // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 2. С. 53–62.
9. Шадрин Е. Ю., Ануфриев И. С., Шарыпов О. В. Исследование процесса распыления и сжигания водоугольного топлива с использованием пневматической форсунки // ПМТФ. 2021. Т. 62, № 3. С. 165–171.
10. Schäfer W., Tropea C. Time-shift technique for simultaneous measurement of size, velocity, and relative refractive index of transparent droplets or particles in a flow // Appl. Optics. 2014. V. 53, N 4. P. 588–597.
11. Витман Л. А. Распыливание жидкости форсунками / Л. А. Витман, Б. Д. Кацнельсон, И. И. Палеев. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962.
12. De Corso S. M., Kemeny G. A. Effect of ambient and fuel pressure on nozzle spray angle // Trans. ASME. 1957. V. 79, N 3. P. 607–614.
13. Повх И. Л. Техническая гидромеханика. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1976.

*Поступила в редакцию 18/XII 2023 г.,  
после доработки — 18/XII 2023 г.  
Принята к публикации 29/I 2024 г.*