03

Экспериментальное исследование газокапельного течения в эжекторе Коанда

© О.Ю. Отмахов, М.А. Пахомов, Н.П. Скибина, И.А. Чохар, В.И. Терехов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: pma41976@yandex.ru, uss.skibina@gmail.com, terekhov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 19 февраля 2026 г.
В окончательной редакции 19 июня 2026 г.
Принято к публикации 4 июля 2026 г.

Представлены результаты экспериментального исследования структуры газокапельного течения в эжекторе Коанда. Измерения диаметров капель и их скорости получены с использованием оптической системы SpraySpy® (AOM-Systems GmbH). Опыты проведены в диапазоне изменения абсолютной величины полного давления в форкамере $P = 1.47 - 3.11$ atm, что соответствовало режимам как до-, так и сверхкритического истечения кольцевой струи. Ширина кольцевой щели, через которую в камеру смешения вдувался эжектирующий поток, составляла $h = 0.25$ mm. Получено уменьшение медианного диаметра капель (до 20 %) по всему сечению потока на выходе из эжектора по отношению к размеру капель во входном сечении. При этом скорость капель на оси течения выше соответствующих значений на периферии потока до 40 %. Профиль распределения размеров капель по поперечному сечению течения имеет равномерный вид для всего исследованного диапазона изменения диаметров капель. Скорость капель и газовой фазы на выходе из цилиндрического сопла эжектора существенно дозвуковая. При этом скорость газа заметно выше соответствующего значения для дисперсной фазы за счет инерционных свойств капель воды.

Ключевые слова: эксперимент, система SpraySpy® эжектор, двухфазный газокапельный поток, дробление капель, коалесценция, эффект Коанда.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64066.24-26

Введение

Газовые эжекторы широко применяются в различных практических приложениях: в горном деле, авиационных двигателях, в энергетике и т. д. Эжекторы имеют простую конструкцию и высокое отношение массовых расходов газа на входе в эжектор (эжектируемый или первичный поток) и вдуваемой (эжектирующей) струи (коэффициент эжекции), также они отличаются надежностью работы. Несмотря на то, что базовые положения теории однофазных эжекторов подробно изложены в [1–4], исследования в данном направлении сохраняют свою актуальность (см. монографии [5,6] и обзорные статьи [7–10]).

В эжекторе Коанда (ЭК) (рис. 1) подача эжектирующей струи осуществляется по нормали к оси (в радиальном направлении) через кольцевую щель, что отличает его от эжекторов классической схемы (с центральной струей). Радиальная высоконапорная струя за счет действия эффекта Коанда [11] безотрывно движется вдоль криволинейной выпуклой поверхности, разворачиваясь на 90°, далее движется вдоль стенки цилиндрического канала уже как кольцевая струя. Вдув струи создает разрежение внутри ЭК, вследствие чего начинается эжекция воздуха из окружающего затопленного пространства, среда поступает во внутренний объем эжектора и увлекается спутной пристенной кольцевой струей.

В отечественных [12–16] и зарубежных [17–23] работах, посвященных экспериментальным исследованиям однофазных течений при наличии эффекта Коанда, было показано, что его использование снижает вероятность возникновения отрывов потока и увеличивает производительность эжекторных систем. Ввиду того, что реализация экспериментальных исследований является сложной и трудоемкой задачей, для анализа и описания газодинамических процессов привлекают численные методы. Так, к настоящему времени проведены численные исследования газодинамики течения в ЭК с использованием Large Eddy Simulation [24], Delay Detached-Eddy Simulation [25] и URANS [26–28] подходов.

Системы подачи с радиальным вдувом рабочей среды встречаются в приложениях авиа- и двигателестроения, применяются для очистки загрязнений внутренних поверхностей труб и каналов, для нанесения покрытий методом холодного газодинамического напыления [29,30]. В перечисленном классе задач рабочая среда нередко представляет собой двухфазное рабочее тело [31–35], а добавление второй фазы (например, частиц ПАВ или топлива) превращает объект исследования (однофазный поток) в полидисперсное, газокапельное высокоскоростное течение [36–38], где крайне важно знание распределения капель по размерам вследствие коагуляции, дробления и фазовых переходов. Взаимодействие мелких распыленных капель жидкой фазы с турбулентными вихрями в условиях высокоскоростного течения газа —

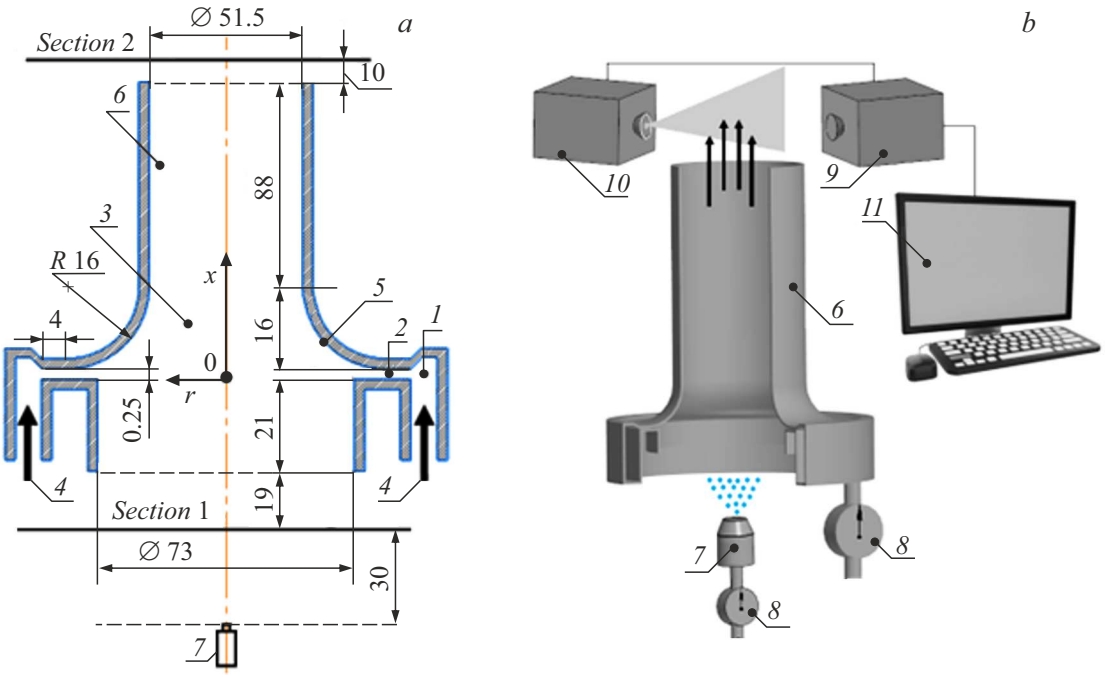


Рис. 1. Эскиз ЭК (*a*) и принципиальная схема экспериментального стенда (*b*). Все размеры на рис. 1, *a* указаны в mm. *1* — форкамера, *2* — сопло с кольцевой щелью, *3* — камера смешения, *4* — линия подвода сжатого воздуха из магистрали, *5* — участок с поверхностью Коанда, *6* — цилиндрическая труба, *7* — гидравлическая вихревая форсунка, *8* — манометр, *9* — система SpraySpy®, *10* — лазер непрерывного действия, *11* — персональный компьютер.

сложный многофакторный процесс, который к настоящему времени не до конца изучен.

Экспериментальные исследования однофазных течений в ЭК ограничены в силу методических сложностей, обусловленных спецификой геометрии, поэтому представление о распределении параметров потока и газодинамических процессах, протекающих во внутреннем объеме, носит фрагментарный характер. Например, в работе [18] с применением метода лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) получены распределения продольной осредненной скорости и интенсивности ее пульсаций в нескольких сечениях по длине камеры смешения эжектора, а также статических давлений на его стенке при изменении ширины кольцевой щели и величины полного давления вдуваемой струи. В [16] также приведены результаты измерений продольной осредненной скорости течения и ее пульсаций методом ЛДА в однофазном ЭК, дополненные измерениями статического и динамического давлений по оси эжектора и статического давления на стенке. Несмотря на отличия в условиях экспериментов (ширина щели, диапазон изменения полного давления вдуваемой струи и геометрия ЭК) в [16,18], установлено, что с увеличением полного давления струи наблюдается рост степени разрежения на стенке канала и продольной компоненты скорости в пристенной области. Для распределений статического давления вдоль оси ЭК характерно наличие области разрежения практически на всей длине цилиндрического участка.

По результатам аналитического обзора можно сделать вывод о том, что приведенные в литературе сведения не дают полной картины и особенностей газодинамических процессов, протекающих в ЭК, даже для случая однофазного режима течения. Работ, посвященных исследованию течения в ЭК в двухфазном режиме работы, нами в литературе обнаружено не было. Таким образом, данное исследование является первым шагом в изучении процессов смешения в газокапельном ЭК. В настоящей работе представлены результаты измерений распределения размеров капель и их продольной компоненты скорости на входе и выходе из эжектора, что частично восполнит отсутствие экспериментальных данных в этой области газодинамики двухфазных турбулентных течений. Понимание таких сложных и многообразных процессов динамики движения, дисперсного состава частиц в подобных течениях позволит более эффективно использовать двухфазные газокапельные потоки при разработке современного энергетического оборудования, для уменьшения уровня запыленности тупиковых забоев подземных рудников и угольных шахт [12], а также в системах пожаротушения.

1. Описание экспериментального стенда и методов измерения

1.1. Рабочий участок

Принципиальная схема ЭК показана на рис. 1. Геометрия эжектора и рабочие режимы соответствуют та-

ковым из работы [16]. ЭК состоит из форкамеры *1*, кольцевого сопла шириной $h = 0.25\,\text{mm}$ *2* и камеры смешения *3* длиной $L = 104\,\text{mm}$. Очищенный от примесей и осушенный сжатый воздух из магистрали поступает по подводящим патрубкам *4* в форкамеру *1*, и через кольцевое сопло *2* попадает в камеру смешения *3*. Камера *3*, где смешиваются высоконапорный пристенный радиальный эжектирующий поток газа с эжектируемым воздухом из окружающего пространства, включает в себя участок с поверхностью Коанда *5* и цилиндрическую трубу *6* с внутренним диаметром $D = 51.5\,\text{mm}$ и длиной $L_1 = 88\,\text{mm}$. Поверхность Коанда (*5*) представляет собой выпуклую поверхность с сечением в виде четверти круга с радиусом 16 mm. После выхода из кольцевого сопла *2* поток газа движется вдоль криволинейной поверхности *5* и поступает в цилиндрическую трубу *6*. Полная температура газа в форкамере измеряется с помощью хромель-копелевой термопары с точностью $\pm 1\,\%$ и составляет $T \approx 293\,\text{K}$. Измерение объемного расхода сжатого воздуха в подводящей магистрали *4* осуществляется ультразвуковым расходомером ИРВИС Ультра-СИ с точностью 0.5 %. Дополнительно электронным манометром ДМ-5002М происходит измерение полного давления в форкамере перед кольцевой щелью с неопределенностью не более 0.25 % в исследованном в работе диапазоне изменений давления.

За начало координат вдоль оси эжектора $x = 0$, как это показано на рис. 1, *a*, принято место расположения сопла кольцевой щели. Перед эжектором на расстоянии $x = -70\,\text{mm}$ от начала координат на оси течения располагается гидравлическая вихревая форсунка DSA 9Li 7 фирмы Daewoo (Korea), которая генерирует поток полидисперсного газокапельного аэрозоля с полым конусом и углом распыла 90°. Эжектор расположен вертикально и направление двухфазного течения было восходящим.

Дистиллированная вода подается к форсунке при помощи насоса с избыточным давлением 4 bar, а ее массовый расход, определяемый весовым методом, во всех экспериментах был неизменным и равным 8.83 g/s. Неопределенность измерения расхода не превышала 5 %. Измерения параметров эжектируемого двухфазного потока проводились непосредственно вблизи входа в сечении *1* (рис. 1, *a*), отстоящем на 19 mm от эжектора. Измерение расхода жидкой фазы, проведенное путем сбора капель воды в мерные объемы, показало, что при низких давлениях в форкамере не вся распыленная жидкость попадает внутрь эжектора. При повышении давления $P > 2.34\,\text{atm}$ за счет улучшения эжекционных свойств все генерируемые форсункой капли поступают в камеру смешения эжектора.

Подача радиальной однофазной воздушной струи в камеру смешения *3* осуществляется через кольцевое сопло *2*. Сопло представляет собой кольцевой канал, с одной стороны образованный поверхностью Коанда, а с другой — плоским участком длиной $Y = 4\,\text{mm}$ ($Y/h = 16$). В экспериментах полное давление изменялось в диапазоне $P = 1.47 - 3.11\,\text{atm}$, что включает в себя режимы как до-, так и сверхкритического истечения газа. Критический режим истечения по данным [5] реализуется при $P = 1.893\,\text{atm}$.

Условия проведения экспериментов

P, atm	1.47	2.34	2.74	3.11
G, g/s	21.2	37.43	45.34	50.2
ρ, kg/m^3	1.77	3.03	3.6	3.75
$\text{Re} \cdot 10^{-3}$	5.11	9.02	10.92	12.09
G_d, g/s	7.33	8.83	8.83	8.83
M_{in}	0.148	0.082	0.072	0.066
$\Phi_{in} \cdot 10^4$	1.79	0.99	0.88	0.79
M_{out}	0.104	0.061	0.053	0.048

В табл. 1 приведены условия проведения экспериментов, где P — полное давление в форкамере, G — массовые расходы вдуваемого воздуха, ρ — его плотность и $\text{Re} = U_m h/\nu = G/(\mu\pi D_1)$ — число Рейнольдса, U_m — среднемассовая скорость газа в щели $D_1 = 73\,\text{mm}$ — диаметр входного сечения в камере смешения, G_d, M_{in} и M_{out} — расход и массовые концентрации жидкой фазы на входе и выходе из эжектора. Плотность газа на выходе из сопла определялась с использованием газодинамических функций [5] для условий изоэнтропического истечения газа. Динамическая вязкость воздуха при определении числа Рейнольдса принималась при атмосферных условиях.

Содержание жидкой фазы на входе в эжектор, как это следует из данных табл. 1, невелико и в диапазоне исследуемых давлений объемная концентрация капель изменяется в пределах $\Phi_{in} = (0.8 - 1.8) \cdot 10^{-4}$. Такие концентрации капель соответствуют режиму с влиянием частиц на процессы переноса в несущей фазе и с отсутствием межчастичного взаимодействия [39]. Концентрации капель на выходе из эжектора понижаются по сравнению со входом за счет подмешивания газа из кольцевой однофазной эжектирующей струи.

1.2. Метод измерения параметров дисперсной фазы системой SpraySpy®

Для одновременных локальных измерений диаметра капель d и их средней по времени аксиальной скорости U_d в работе используется измерительная система SpraySpy® (AOM-Systems GmbH, Griesheim, Germany) [40], состоящая из приемной оптической системы *9*, двух лазеров *10*, блока управления системой и персонального компьютера *11*. Измерения проводились в поперечных сечениях перед входом в эжектор (сечение 1, $x = -70\,\text{mm}$) и на выходе из него

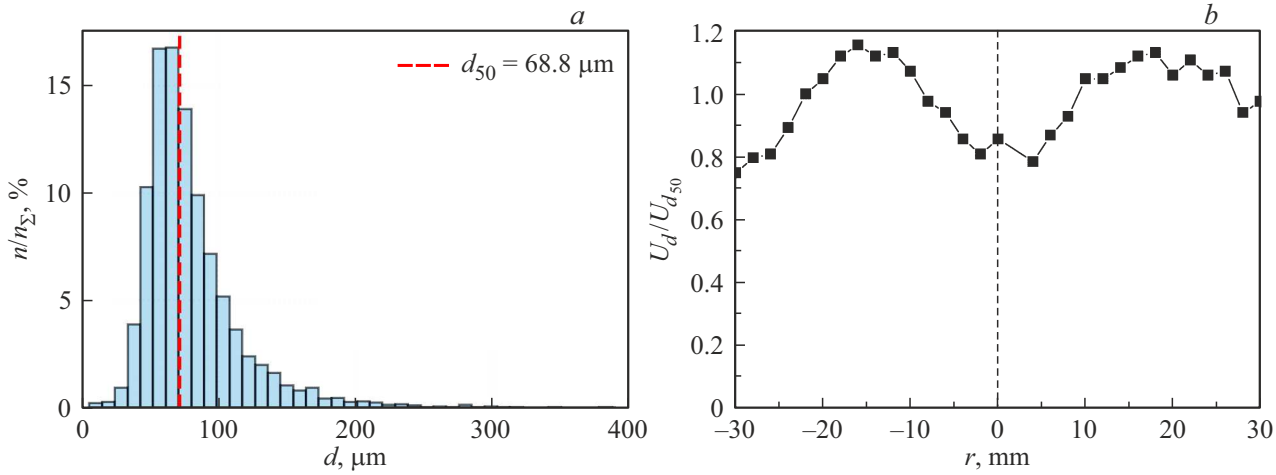


Рис. 2. Гистограммы распределений диаметра капель d (a) и относительной медианной скорости (b) на входе в эжектор. $P = 2.74$ atm, $x = -70$ mm.

(сечение 2, $x = 114$ mm) (рис. 1, a). Система SpraySpy® выполняет одновременные измерения диаметра капель и их скорости в режиме обратного рассеяния [41,42]. Два луча лазера непрерывного действия 10 (энергия в импульсе 50 mW с длинами волн 405 и 450 nm) фокусируются в измерительной точке пространства на расстоянии 125 mm от линз. Измерительная область имеет вид эллипсоида и размер области по его осям составляет $1 \times 0.5 \times 0.5$ mm. Фазовый сдвиг между доплеровскими сигналами от разных детекторов пропорционален диаметру частицы, а ее скорость определяется через частоту сигнала.

Диапазон измерений размера капель: $1-1000\,\mu$m и их скоростей: 1–100 m/s. Предельные отклонения измерений в любой точке поперечного сечения струи для размера капли составляют 1.7 %, ее скорости 0.6 % и количества капель 1.5 %. Оптимальное количество капель для статистического анализа составляло 1000 штук. Система SpraySpy® позволяет получить количественные характеристики спрея с точностью воспроизведения 1.7 % для размера капель и 0.6 % для ее скорости [40].

2. Результаты измерений и их обсуждение

2.1. Распределения параметров газокапельного потока перед входным сечением эжектора

Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 2 в виде гистограмм распределений размеров капель d (рис. 2, a) и распределения медианной скорости капель по сечению потока (рис. 2, b). Здесь n — число капель рассматриваемой фракции, n_Σ — общее число капель. Штриховые линии соответствуют величинам медианного диаметра капель d_{50} и медианной скорости U_{d50}. Медианный диаметр капель d_{50} равен значению, при котором их количество мельче или крупнее этой величины, составляет 50 %. Медианная скорость капель U_{d50} — скорость выше/ниже которой имеют 50 % регистрируемых капель. Медианный диаметр капель перед эжектором, как это видно на рис. 2, a составляет $d_{50} = 68.8$ m. Судя по этим данным, распределение капель по размерам отличается от гауссова за счет наличия в потоке крупных фракций.

На рис. 2, b показан профиль относительной медианной скорости капель по сечению потока перед ЭК. При этом величина средней по сечению медианной скорости оказалась равной $U_{d50} = 8.4$ m/s. Профиль скорости имеет вид, близкий к симметричному относительно оси течения. Минимум величины скорости капель расположен в приосевой области потока, тогда как максимум наблюдается во внешней зоне течения, что связано с формированием форсункой полого конуса распыла.

2.2. Распределения параметров газокапельного потока на выходе из эжектора

Гистограммы распределений диаметра d и скорости капель U_d при вариации полного давления газа в форкамере кольцевой щели P на выходе из эжектора представлены на рис. 3. Измерения выполнены как для до- ($P = 1.47$ atm), так и сверхкритических ($P = 2.34$, 2.74 и 3.11 atm) значений полного давления. Как видно из представленных данных, на выходе из эжектора величина медианного диаметра капель d_{50} заметно снижается (до 20 %) в сравнении с их размерами на входе. Это говорит о том, что основное влияние на размер частиц воды оказывает процесс их дробления в высокоскоростной кольцевой воздушной струе. Тем не менее процессы коалесценции также оказывают влияние на закономерности распределения капель по размерам

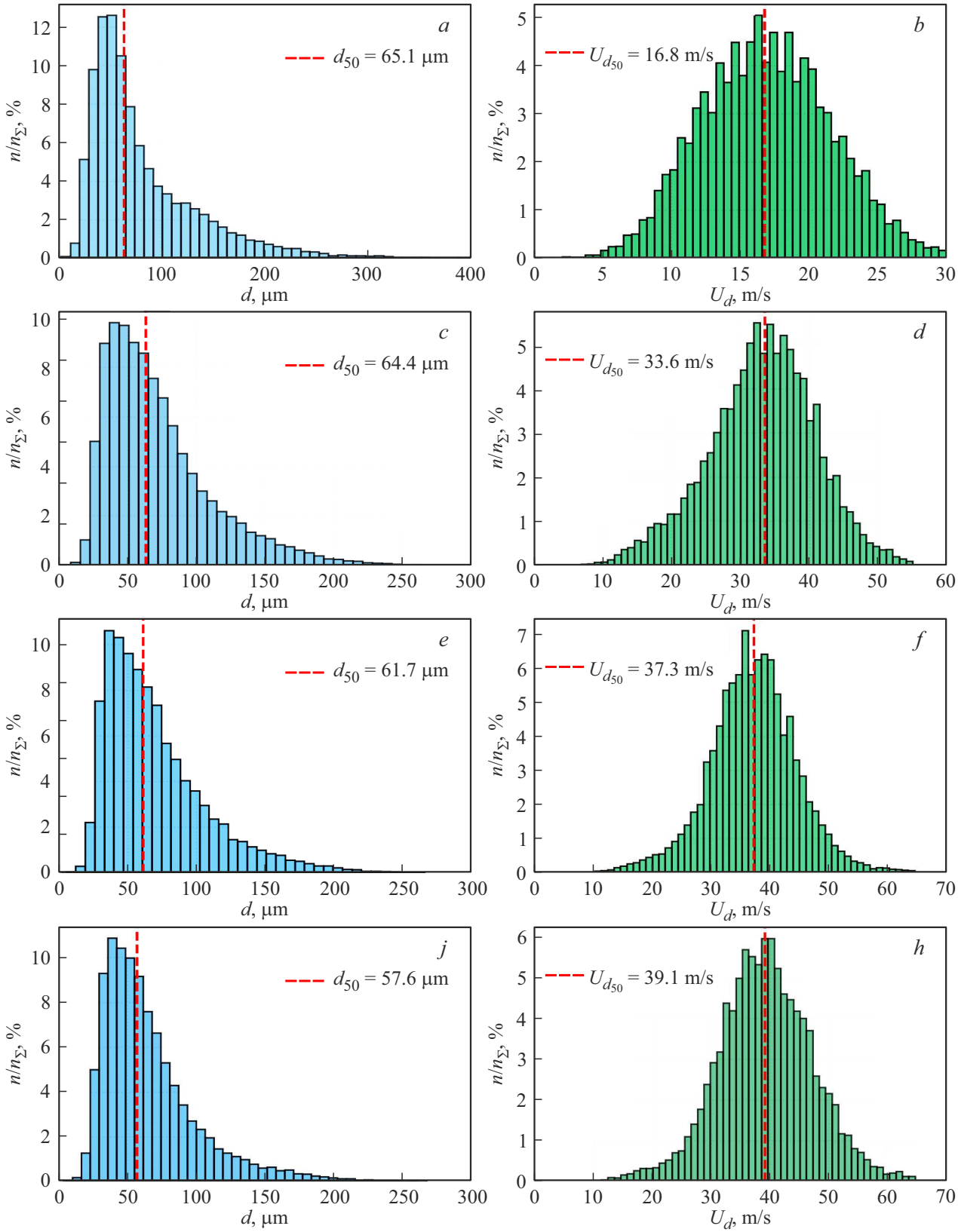


Рис. 3. Гистограммы распределений диаметра (слева) и скорости капель (справа) при вариации полного давления газа в форкамере $P = 1.47$ (a, b), 2.34 (c, d), 2.74 (e, f) и 3.11 atm (j, h) в выходном сечении эжектора $(x = 114\,\text{mm})$.

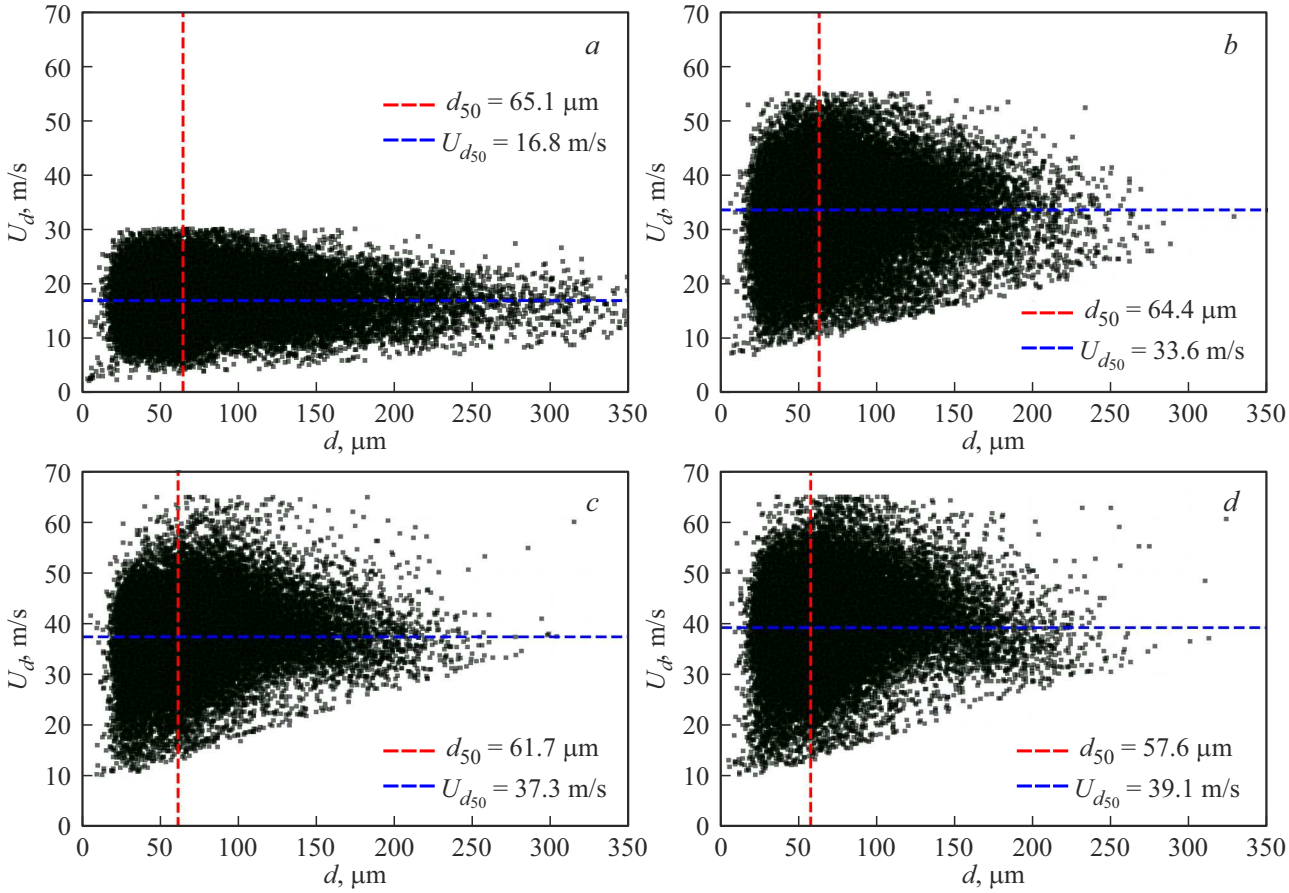


Рис. 4. Корреляция „диаметр капель–их скорость“ при вариации полного давления газа в кольцевой щели при $P = 1.47$ (a), 2.34 (b), 2.74 (c) и 3.11 atm (d) в сечении на выходе из эжектора. Штриховые линии размеров и скоростей капель. $x = 114$ mm.

на выходе из эжектора. Об этом говорит наличие в потоке более крупных капель по сравнению с распределением на входе. Существенное увеличение скорости вдуваемой высоконапорной воздушной струи при росте давления приводит в основном только к количественным изменениям в распределениях диаметра капель и их скорости, а не к качественным. Внешний вид гистограмм остается практически неизменным. Стоит отметить, что при небольших давлениях в двухфазном потоке присутствуют капли более крупных размеров (до 350 μm), тогда как при больших давлениях максимальный диаметр капель составляет 270 μm.

Процессы коалесценции капель при их движении в эжекторе, как это следует из рис. 3, ослабевают по мере роста давления в форкамере радиальной струи. Основной причиной этого, вероятно, служит увеличение их продольной скорости с ростом давления и сокращения времени их пребывания в эжекторе соответственно. Так, при увеличении давления в форкамере с $P = 1.47$ до 3.11 atm средняя скорость капель возрастает более чем в два раза. В то же время важно отметить, что величина медианного диаметра капель на выходе практически не зависит от давления в форкамере и составляет $d_{50} \approx 57.6 - 65.1\,\mu$m.

Корреляции „диаметр капли–скорость капли“ при четырех значениях полного давления газа в форкамере представлены на рис. 4. Эти данные наглядно демонстрируют изменения размеров частиц и величин их продольной скорости в двухфазном газокапельном потоке на выходе из эжектора. Общая картина корреляций симметрична относительно скорости капель медианного диаметра, тогда как для размеров капель симметрия нарушается и распределение приобретает вытянутую в сторону больших диаметров капель форму. Одна из причин такого поведения корреляций размер капель–скорость капель обусловлена особенностями формирования капельного облака форсункой на входе в эжектор. Основное же влияние на характеристики капельной фазы оказывает аэродинамическая структура потока внутри эжектора. Величина медианного диаметра капель (d_{50}) изменяется несущественно (менее 5 %) при переходе от до- к сверхкритическому режиму истечения струи. Тогда как медианная скорость капель (U_{50}) увеличивается в 2.3 раза (от 16.8 до 39.1 m/s) и выше.

Анализом экспериментальных данных, полученных при измерении параметров течения (скорость и давления) в эжекторе [16], было установлено, что распределение скорости на выходе в режиме однофаз-

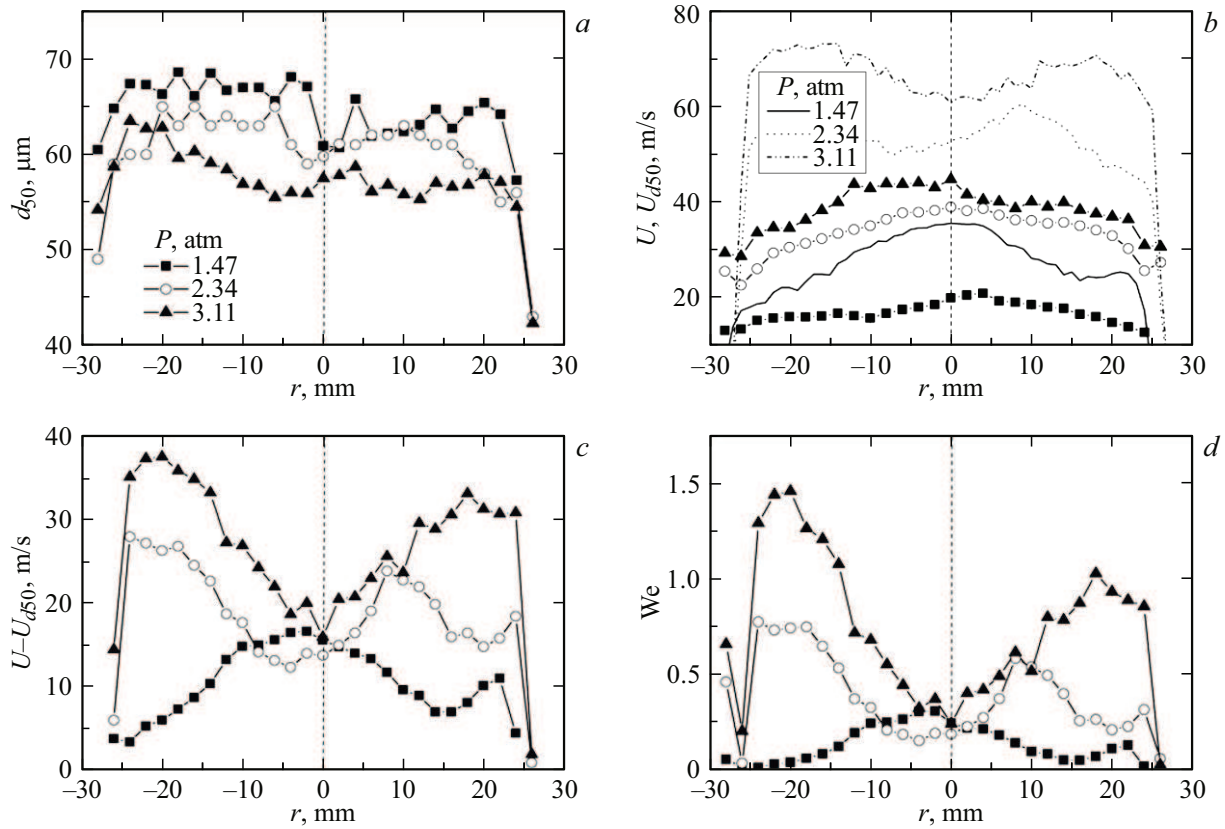


Рис. 5. Профили медианного диаметра частиц d_{50} (a), средней по времени скорости капель U_{d50} и продольной скорости осредненного течения газовой фазы U (b), межфазной продольной скорости $U - U_{d50}$ (c) и числа Вебера We (d) на выходе эжектора при изменении полного давления P. На b линии с точками данные экспериментов SpraySpy® для скорости капель авторов данной работы, линии — LDA-измерения [16] для однофазного потока. $x = 114$ mm.

ного течения является неравномерным. Следовательно, можно предположить, что и изменение параметров капельной фазы в двухфазном потоке на выходе будет также неравномерным. Распределения медианного диаметра капель d_{50}, профили медианной скорости капель U_{d50}, продольной скорости осредненного течения в однофазном воздушном потоке U [16], продольной межфазной скорости $U - U_{d50}$ и числа Вебера $\mathrm{We} = \rho d_{50}|U - U_{d50}|^2/\sigma$ дисперсной фазы по сечению струи приведены на рис. 5, где σ — поверхностное натяжение жидкой фазы. Дополнительно на рис. 5, b нанесены данные LDA-измерений [16] для осредненной продольной скорости газа в однофазном течении (линии) и при тех же давлениях в форкамере, что и для двухфазного случая. Перечисленные данные позволяют описать особенности параметров несущей и капельной фаз по поперечному сечению газокапельного потока при вариации полного давления в форкамере эжектора.

Рост давления в форкамере для подачи эжектирующей струи вызывает уменьшение медианного диаметра капель и возрастание их медианной скорости по всему сечению двухфазного потока (рис. 5, a, d). При этом распределение размера капель d_{50} близко к равномерному за исключением узких периферийных зон, где размер капель значительно уменьшается из-за сильных эффектов их дробления. Профили скорости дисперсной фазы по поперечному сечению струи при всех исследованных давлениях в форкамере ЭК имеют вид, подобный течению в трубе, с максимумом на оси потока, что характерно для всего рассмотренного в работе диапазона полного давления. При этом, как следует из данных рис. 5, b, профиль средней по времени скорости капель качественно и количественно отличается от профиля скорости газовой фазы, что говорит об инерционных свойствах частиц дисперсной фазы, которые за малые времена пребывания частиц в камере смешения эжектора не успевают отслеживать газовый поток. Скорость капель и газовой фазы на выходе из цилиндрического сопла существенно дозвуковая. При этом скорость газа в восходящем течении заметно выше соответствующего значения для дисперсной фазы за счет инерционных свойств капель воды (до 50 %).

На рис. 5, c представлены профили межфазной скорости в выходном сечении. Величина скорости скольжения фаз велика и может достигать почти 40 m/s. При этом распределение межфазной скорости имеет существенно различный вид для до- и сверхкритических режимов истечения. При полном давлении в форкамере

$P = 1.47$ atm, когда реализуется докритический режим, максимальное значение межфазной скорости находится на оси двухфазного течения и его величина составляет $U - U_{d50} \approx 15$ m/s. При сверхкритическом истечении ($P = 2.34$ и 3.11 atm) максимум скорости скольжения фаз, как и у газовой фазы, располагается на внешней границе двухфазного потока и $U - U_{d50} \approx 30$ и 38 m/s. На оси канала скорость скольжения остается практически неизменной вне зависимости от полного давления в форкамере ЭК.

Данные по распределениям числа Вебера по сечению за срезом канала показаны на рис. 5, *d*. Диапазон изменения числа Вебера $\mathrm{We} \leq 1.5$ для указанных полных давлений в форкамере, что меньше критического значения числа Вебера для дробления капель $\mathrm{We}_{\mathrm{cr}} = 2$ [33] и 6.28 [43] в турбулентном потоке газа. Сделанные нами оценки возможного влияния процесса испарения капель на изменение их диаметра показали, что уменьшение диаметра капель за счет испарения составляет не более 0.3 %. Поэтому дробление за счет динамического напора в данном случае является основным механизмом. Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод, что процесс дробления капель в высокоскоростном потоке превалирует над их коалесценцией.

Заключение

В работе представлены результаты экспериментального исследования газокапельного течения в ЭК. Данные о распределении диаметров капель и их продольной скорости получены с использованием оптической системы SpraySpy®. По результатам работы получено уменьшение локального диаметра капель по всему сечению двухфазного потока на выходе из эжектора в сравнении с медианным диаметром капель на входе (до 20 %). Скорость капель значительно возрастает с ростом полного давления в форкамере. При увеличении полного давления с $P = 1.47$ до 3.11 atm наблюдается рост медианной скорости капель в 2.3 раза (от 16.8 до 39.1 m/s) и примерно в 3 раза во внешнем периферийном слое двухфазного потока. Вне зависимости от полного давления в форкамере эжектора скорость капель и газовой фазы на выходе из него существенно дозвуковая. При этом скорость газа в восходящем течении заметно выше соответствующего значения для дисперсной фазы (до 50 %). Распределения межфазной скорости в выходном сечении имеют существенно различный вид для до- и сверхкритических режимов истечения.

Благодарности

Авторы благодарят Лебедева А.С. (ИТ СО РАН) за помощь в проведении экспериментов.

Финансирование работы

Работа выполнена рамках Государственного задания ИТ СО РАН (126021217057-2).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] С.А. Христианович. *О расчете эжектора. Промышленная аэродинамика* (Изд-во БНТ НКАП, М., 1944), 3.
[2] М.Д. Миллионщиков, Г.М. Рябинков. *Газовые эжекторы больших скоростей.* Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов (Изд-во БНИ, ЦАГИ, Жуковский, 1961), 5.
[3] Ю.Н. Васильев. *Газовые эжекторы со сверхзвуковыми соплами.* Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов (Изд-во БНИ, ЦАГИ, Жуковский, 1961), 134.
[4] Ю.Г. Жулев, Ю.Ф. Потапов. Труды ЦАГИ, (1958), 3 (1978).
[5] Г.Н. Абрамович. *Прикладная газовая динамика* (Наука, М., 1991), 5-е изд., перераб. и доп.
[6] Ю.К. Аркадов. *Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы* (Физматлит, М., 2001)
[7] G. Besagni, R. Mereu, F. Inzoli. Renewable Sustainable Energy Rev., **53**, 373 (2016). DOI: 10.1016/j.rser.2015.08.059
[8] Н. Поладванди, А.Х. Ахдам. ПМТФ, **59** (4), 126 (2018). [N. Poladvandi, A.H. Aghdam. J. Appl. Mech. Techn. Phys., **59** (4), 687 (2018).] DOI: 10.15372/PMTF20180415
[9] B.M. Tashtoush, M.A. Al-Nimr, M.A. Khasawneh. Appl. Energy, **240**, 138 (2019). DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.185
[10] S. Gruber, K. Rola, D. Urbancl, D. Goricanec. Energies, **17** (16), 4043 (2024). DOI: 10.3390/en17164043
[11] H. Coanda. U.S. Patent 1104963, 1911, USA.
[12] В.А. Зеленецкий, В.И. Терехов. Патент РФ № 23118119, 2008.
[13] И.Н. Соколова. Ученые записки ЦАГИ, **14** (4), 124 (1983).
[14] Н.М. Митрохин, А.В. Петров. Ученые записки ЦАГИ, **22** (2), 23 (1991).
[15] Г.А. Ганич, Н.И. Гущина, Ю.Г. Жулев. Ученые записки ЦАГИ, **25** (3-4), 121 (1994).
[16] О.Ю. Отмахов, М.А. Пахомов, Н.П. Скибина, И.А. Чохар, В.И. Терехов. Теплофизика и аэромеханика, **32** (3), 491 (2025). [O.Yu. Otmakhov, M.A. Pakhomov, N.P. Skibina, I.A. Chokhar, V.I. Terekhov. Thermophys. Aeromech., **32** (3), 609 (2025).] DOI: 10.63430/TIA202503007
[17] D.G. Gregory-Smith, A.R. Gilchrist. Int. J.Heat Fluid Flow, **8** (2), 156 (1987). DOI: 10.1016/0142-727X(87)90019-1
[18] M. Ameri. PhD thesis, Case Western Reserve University, Cleveland, OH, U.S.A. (1993).
[19] T.H. Kim, S. Matsuo, T. Setoguchi, H.D. Kim. J. Thermal Sci., **14** (2), 97 (2005). DOI: 10.1007/s11630-005-0017-z
[20] D. Allen, B.L. Smith. Exp. Fluids, **46** (1), 55 (2009). DOI: 10.1007/s00348-008-0536-y
[21] M. Trancossi. SAE Technical Papers, 2011-01-2591, 13 pages (2011). DOI: 10.4271/2011-01-2591

[22] L. Dunaevich, D. Greenblatt. Phys. Fluids, **32**, 084106 (2020). DOI: 10.1063/5.0013534
[23] S. Chi, Y. Gu. Appl. Sci., **12**, 7567 (2022). DOI: 10.3390/app12157567
[24] T. Nishino, S.H. Hahn, K. Shariff. Phys. Fluids, **22**, 125105 (2010). DOI: 10.1063/1.3526757
[25] Z.H. Liu, G.C. Zhao, L.F. Xiao. Phys. Fluids, **36**, 115114 (2024). DOI: 10.1063/5.0233870
[26] H.D. Kim, G. Rajesh, T. Setoguchi, S. Matsuo. J. Thermal Sci., **15** (4), 331 (2006). DOI: 10.1007/s11630-006-0331-2
[27] A. Dumitrache, F. Frunzulica, H. Dumitrescu, O. Preotu. Proc. Appl. Math. Mech., **11**, 647 (2011).
[28] Н.П. Скибина, М.А. Пахомов, В.И. Терехов. Изв. РАН МЖГ, (3), 120 (2025). [M.A. Pakhomov, N.P. Skibina, V.I. Terekhov. Fluid Dynamics, **60** (3), 72 (2025).] DOI: 10.31857/S1024708424040041
[29] А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, В.М. Фомин. *Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика.* (Физматлит, М., 2010)
[30] С.П. Киселев, В.П. Киселев, В.Н. Зайковский. ПМТФ, **58** (6), 78 (2017). [S.P. Kiselev, V.P. Kiselev, V.N. Zaikovskii. J. Appl. Mech. Techn. Phys., **58** (6), 1021 (2017).] DOI: 10.15372/PMTF20170608
[31] Ю.Н. Васильев. Лопаточные машины и струйные аппараты, (5), 175 (1971).
[32] Г.А. Салтанов. *Неравновесные и нестационарные процессы в газодинамике однофазных и двухфазных сред* (Наука, М., 1979)
[33] М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов. *Газодинамика двухфазных сред* (Энергоиздат, М., 1981)
[34] И.М. Васенин, В.А. Архипов, В.Т. Бутов, А.А. Глазунов, В.Ф. Трофимов. *Газовая динамика двухфазных течений в соплах* (Изд-во ТГУ, Томск, 1986)
[35] Н.П. Шаманов, А.Н. Дядик, А.Ю. Лабинский. *Двухфазные струйные аппараты* (Судостроение, Л., 1989)
[36] И.А. Лепешинский. ТВТ, **12** (3), 578 (1974).
[37] Ф. Барон, Л.И. Зайчик, В.А. Першуков. Теплофизика и аэромеханика, **3** (4), 353 (1996).
[38] А.В. Ципенко. ТВТ, **44** (2), 246 (2006). [A.V. Tsipenko. High. Temp., **44** (2), 243 (2006) DOI: 10.1007/s10740-006-0030-2]
[39] S. Elghobashi. Appl. Sci. Res., **52** (4), 309 (1994).
[40] *AOM-Systems. SpraySpy® LabLine Spray & Droplet Analysis for Research & Development*
[41] Б.А. Павловский, Н.В. Семидетнов. Измерительная техника, **34** (9), 917 (1991). DOI: 10.1007/BF00980803
[42] N. Damaschke, H. Nobach, N. Semidetnov, C. Tropea. Appl. Opt., **41** (27), 5713 (2002). DOI: 10.1364/AO.41.005713
[43] A.A. Shraiber, A.M. Podvysotsky, V.V. Dubrovsky. Atomization and Sprays, **6** (6), 667 (1996). DOI: 10.1615/AtomizSpr.v6.i6.30