

УДК 532.694

Структура сверхзвуковой газожидкостной струи при высокой концентрации жидкости*

В.М. Бойко, В.В. Лотов, А.Ю. Нестеров, С.В. Поплавский

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: al.yur.nesterov@gmail.com

Выполнено экспериментальное исследование сверхзвуковых газожидкостных струй коаксиальной форсунки при высокой концентрации жидкости. Использовался комплекс оптической диагностики газокapельных потоков: методы визуализации и PIV (particle image velocimetry), лазерный доплеровский анемометр и прибор Malvern Spraytec для изучения дисперсного состава спрея. Исследования показали, что профили скорости и концентрации капель с ростом расхода меняются: за головным скачком появляется протяженная зона с малыми скоростями капель, концентрация при этом уменьшается значительно медленнее, чем при низких расходах. Малый рост энергии струи при расходах жидкости свыше 100 л/ч и заметное увеличение размеров капель свидетельствуют об исчерпании возможностей струи газа по разрушению жидкости на указанных режимах.

Ключевые слова: газожидкостный поток, недорасширенная сверхзвуковая струя, аэродинамическое разрушение капель.

Введение

Форсунки, или устройства для диспергирования жидкостей, имеют большое разнообразие технологических приложений, включающих химическую и пищевую промышленность, агротехнику, современные системы пожаротушения, двигатели, печи, горелки и многое другое. Форсунки условно разделяют на классы в соответствии с механизмами распыления жидкости, и особое место среди них занимает класс пневматических форсунок. Здесь для разрушения капель используется высокоскоростной поток газа, что позволяет распылять большие объемы жидкости и генерировать мелкодисперсный факел, а также дает некоторые другие преимущества технологического характера [1]. Наиболее простой конфигурацией пневматической форсунки является коаксиальная схема, при которой жидкость подается на срез газового сопла и разрушается внешним соосным газовым потоком. Эта схема обладает существенными преимуществами при изучении распыления жидкости в газовой струе: доступностью жидкости для наблюдения с момента попадания в газовый поток; осесимметричным характером истечения, что упрощает

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 гг. (№ госрегистрации 121030500158-0).

описание истечения струи и нивелирует возможные краевые эффекты. Форсунка достаточно широко исследована как в экспериментальном плане, так и при численном моделировании [2–4]; кроме того, она позволяет генерировать мелкодисперсный спрей высокого качества.

Основным преимуществом пневматического разрушения струи остается способность эффективно распылять большие объемы жидкости, генерируя при этом газожидкостные струи с высокими концентрациями дисперсной фазы. Показано [5, 6], что такие потоки значительно отличаются от разреженных по структуре струй жидкости и газа и, как следствие, по механизмам разрушения капель. В них имеет место взаимное влияние капель и газа, приводящее к значительным изменениям состояния обеих сред с сильной зависимостью результирующего течения от большого числа факторов [7, 8]. Тем не менее в научной литературе структура и механизмы развития газожидкостных струй с высокой концентрацией капель освещены недостаточно ввиду сложности как экспериментального, так и численного их изучения. Проблемы экспериментального исследования плотных газожидкостных потоков связаны с неработоспособностью большинства методов диагностики в таких средах, поэтому получение данных в них сводится к необходимости создания новых методов диагностики. Созданный коллективом авторов комплекс оптической диагностики показал работоспособность в струях с большим содержанием жидкой фазы, с его помощью можно выполнить полное описание структуры газожидкостной струи и процессов в ней [9, 10]. В связи с этим целесообразно исследовать потоки с высокой концентрацией капель для восполнения недостающих данных как в практической части изучения струи промышленных форсунок, так и в фундаментальном аспекте межфазного взаимодействия.

Среди явлений, изменяющих характер течения многофазных потоков, можно выделить волновую структуру сверхзвуковой струи газа. Характер разрушения струи жидкости таким потоком существенно отличается от дозвукового случая: структура скачков формирует области повышенной концентрации частиц, в которых вследствие резкого торможения газа значительно возрастает динамическая нагрузка на каплю [11]. Это приводит к интенсификации процессов вторичного дробления капель и позволяет наиболее эффективно использовать энергию газа, причем не только на участках ускорения, но и при торможении в данной области потока. Сама структура скачков также деформируется: диск Маха превращается в конусообразный скачок и сдвигается вверх по потоку с ростом расхода жидкости. Тем не менее эти данные относятся к потокам с малыми и средними концентрациями капель (до 200 л/ч). Существование структуры скачков и ее влияние на разрушение капель в высокозагруженной струе остается одним из невыясненных вопросов динамики газожидкостных сред. Этот вопрос особенно актуален ввиду того, что в условиях высокой концентрации капель структура скачков может играть большую роль в процессе разрушения из-за снижения динамической нагрузки на капли в таких течениях.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование волновой структуры сверхзвуковой газожидкостной струи коаксиальной форсунки при высокой концентрации жидкой фазы и ее влияния на развитие газожидкостной струи и процессы разрушения капель.

Эксперимент и обработка данных

Эксперименты выполнены на установке «Газожидкостный стенд» ИТПМ СО РАН, подробно описанной в [9, 11]. Установка позволяет исследовать газожидкостные струи

в диапазоне расходов жидкости от 10 л/ч до 5 м³/ч при давлениях газа в форкамере сопла до 8 атм. Она представляет собой струйный модуль с сопловым узлом и приемным резервуаром 5 для отработанной жидкости. Жидкость в форсунке подается посредством насоса 6 и контролируется датчиками давления, расхода и температуры 1, 2, 7. Газ подается из ресивера среднего давления 8 через шаровый кран 9, его давление и расход контролируются клапаном 10 и измеряются датчиками 11–14 на магистрали и 3, 4 — на сопловом узле. Сопловый узел перемещается по вертикали, позволяя исследовать струю на удалениях от 0 до 700 мм от среза сопла форсунки. С целью недопущения обратного тока воздуха реализован отсос воздуха из приемного резервуара. Исследуемый образец представляет собой коаксиальную форсунку внешнего смешения с подачей жидкости на срез газового сопла. Газ подается через конфузорное сопло с входным диаметром 19 мм и выходным — 14 мм, жидкость подается посредством центральной трубки внутренним диаметром 4 мм и внешним — 5 мм. Схемы установки и форсунки представлены на рис. 1.

Эксперименты выполнены на режимах Npr6, Npr8 при объемных расходах жидкости от 100 до 1000 л/ч (массовые расходы — от 22 до 220 г/с). В качестве жидкости использована вода, диспергирующей фазы — воздух. Исследование выполнено с помощью комплекса оптических методов диагностики газовых потоков, в который входят [10]:

— методы оптической визуализации потока (теневой метод, адаптивный визуализирующий транспарант (АВТ-визуализация) [12]);

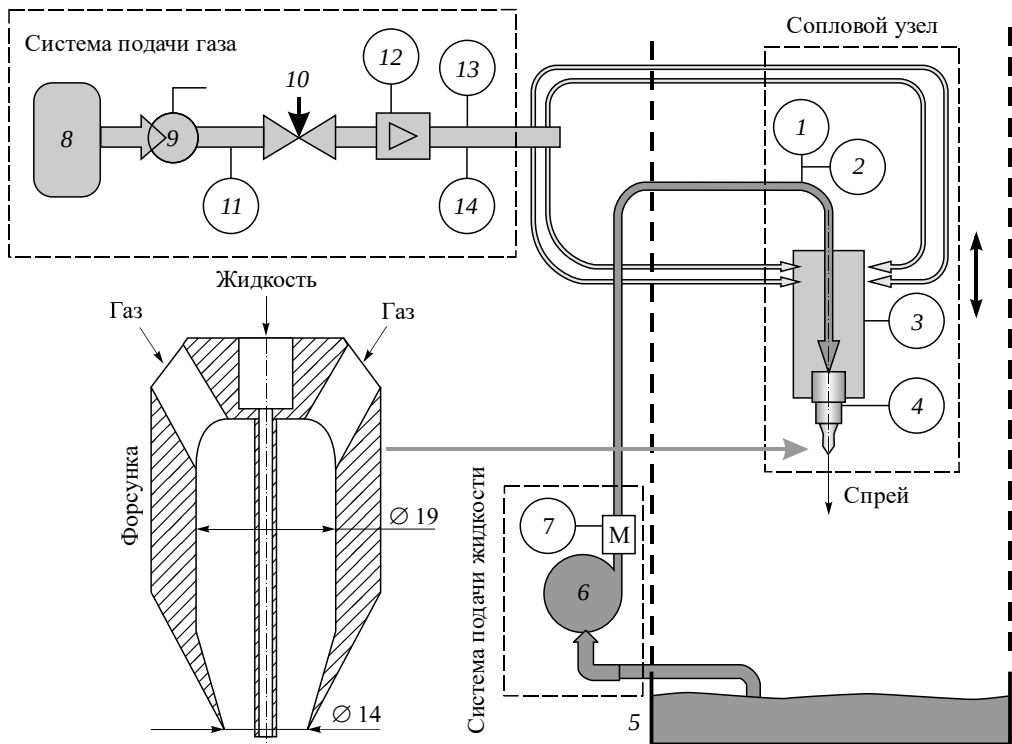


Рис. 1. Схема установки «Газожидкостный стенд» и разрез форсунки.

- 1 — датчик P_1 , 2 — датчик T_1 , 3 — датчик P_g в форкамере, 4 — датчик P_g на выходе форкамеры, 5 — приемный резервуар, 6 — насос, 7 — расходомер жидкости, 8 — ресивер среднего давления, 9 — шаровый кран, 10 — регулирующий клапан, 11 — датчик P_g в ресивере, 12 — газовый расходомер, 13 — датчик P_g в магистрали, 14 — датчик T_g .

— дифракционный анализатор спрея Malvern Spraytec для регистрации дисперсного состава капель;

— PIV-диагностика полей скорости газового потока;

— лазерный доплеровский анемометр (ЛДА) с прямым спектральным анализом [13, 14] для измерения скорости капель в газожидкостных струях с высокой концентрацией дисперсной фазы.

В работах [9–11] было показано, что указанного комплекса методов достаточно для полного описания как структуры скачков, так и механизмов разрушения газожидкостных струй. Там же определены параметры газожидкостной струи, получаемые по данным диагностики, такие как среднеобъемная концентрация жидкости в двухфазной области струи β и энергия спрея E . Получены формулы для оценки размеров капель d по их динамике, что очень важно в условиях ограничения прибора Malvern Spraytec по концентрациям капель в измеряемых спреях:

$$\beta = \frac{4Q}{\pi V D^2}, \quad (1)$$

$$E = \frac{3\pi}{2} V_0 \sigma \frac{D_0^2}{d} + \frac{\pi}{8} \rho_l \beta D^2 V^2, \quad (2)$$

$$d = \frac{3}{4} C_d \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{(U - V)^2}{a(x)}, \quad a(x) = V(x) \frac{dV(x)}{dx}, \quad (3)$$

здесь Q — объемный расход жидкости; U, V — скорость газа и капель соответственно; D — диаметр струи; V_0, D_0 — скорость капель и диаметр струи на выходе из центральной трубки; σ — коэффициент поверхностного натяжения; ρ_l, ρ_g — плотность жидкости и газа; C_d — аэродинамическое сопротивление капель; $a(x)$ — профиль ускорения капель. В качестве U использованы данные PIV.

Результаты

Структура скачков двухфазного ядра высокорасходных струй

В работе [11] было показано, что уже при введении в газовое сопло центральной трубки внешним диаметром 3 мм поток газа будет значительно отличаться от классической недорасширенной струи сопла Витошинского: появляются аэродинамический след центральной трубки с признаками стекающего в поток пограничного слоя и скачки из внутренней области газового сопла. Поэтому целесообразно исследовать изменения, образованные трубкой диаметром 5 мм. Для оценки влияния конструкции форсунки на характер истечения газовой струи был выполнен анализ скачков струи газа без жидкости. Теневые изображения скачков без центральной трубки и с ней на режиме Nrgb представлены на рис. 2. Видно, что присутствие центральной трубки привело к формированию конического скачка 2* вместо плоского диска Маха 2 из-за взаимодействия последнего со скачком 6 вместо классического висячего скачка 1. Скачок 6 является отражением замыкающего скачка центральной трубки 5 от слоя смещения 4. Конические скачки наблюдались ранее при взаимодействии газовой периферии с газожидкостным ядром [11] либо при внесении в центральную часть струи низконапорной струйки или сильных завихрений [15]. В этом случае конический скачок присутствует в потоке без жидкости и обусловлен аэродинамическим следом центральной трубки. Возникает вопрос:

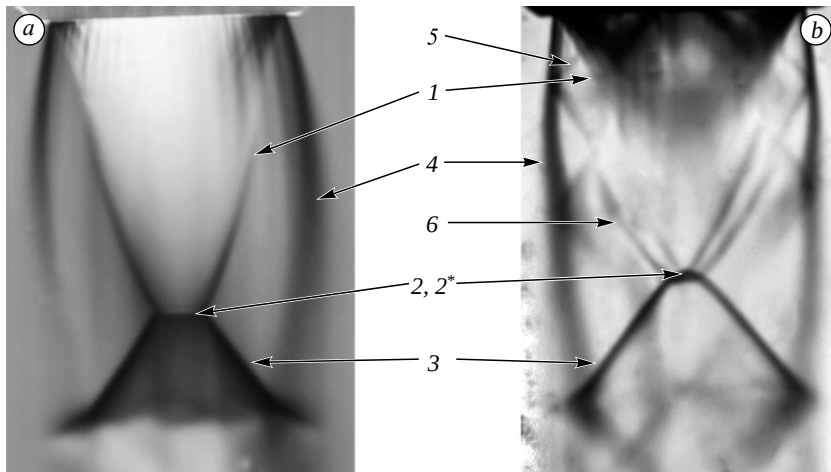


Рис. 2. Теневое изображение структуры скачков сверхзвуковой недорасширенной струи без центральной трубки (а) и с ней (b) в режиме Npr6.

1 — висячий скачок, 2 — диск Маха, 2* — конусообразный скачок,
3 — отраженный скачок, 4 — слой смешения,
5 — замыкающий скачок центральной трубки, 6 — отражение замыкающего скачка.

как изменение формы скачка в чистом газе повлияет на его форму при взаимодействии с газожидкостным ядром струи? При этом рассмотрение структуры скачков в режиме Npr8 не показало значительных отличий от истечения без трубки, где взаимодействие висячего скачка с замыкающим скачком центральной трубки происходит на периферии диска Маха, а сам диск остается плоским.

На рис. 3 показана АВТ-визуализация структуры струи без жидкости (рис. 3а) и с ее малым расходом (рис. 3б–3д). На рис. 3б, 3с видно, что при малых расходах жидкости происходит уширение зоны диска Маха и прогиб конуса (2* на рис. 2) в направлении сопла с формированием более выраженного широкого изогнутого скачка. При этом сама структура, формирующая конусообразный скачок, остается неизменной: взаимодействие скачка 6 с висячим скачком 1 (см. рис. 2) сохраняется как структурно,

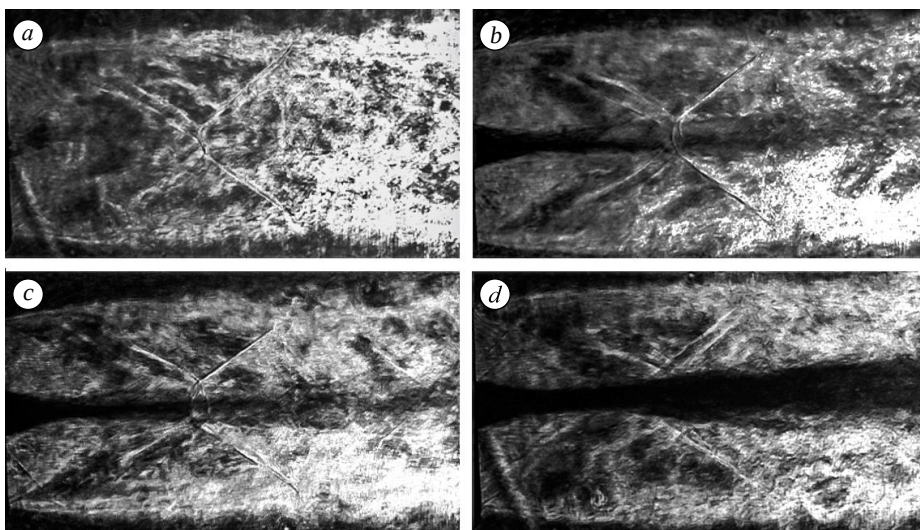


Рис. 3. АВТ-визуализация истечения струи на режиме Npr6 в отсутствие жидкости (а), при малых ее расходах (б, с) и при расходе 20 л/ч (d).

так и морфологически. С ростом расхода до 20 л/ч заметно появление двойных скачков на периферии струи (рис. 3d), которые следуют друг за другом либо взаимодействуют друг с другом, образуя единый результирующий скачок. Газожидкостное ядро струи становится непрозрачным и недоступно для наблюдения, поэтому форма области диска Маха при высоких расходах жидкости остается неявной.

Следует отметить некоторые структурные отличия этого течения от описанного в [11]. Во-первых, за конусообразным скачком отсутствует темная область, соответствующая повышенной концентрации спрея. Это свидетельствует о сильной зависимости здесь концентрации капель газожидкостной струи от их размера. Во-вторых, диаметр двухфазного ядра как в зоне диска Маха, так и за ним изменяется непрерывно. Наблюдавшееся ранее уширение за скачком с образованием «пузыря» с высокой концентрацией капель отсутствует. Возможно, такое отличие видимой картины от имеющей место при низких расходах обусловлено слабостью скачка на режиме Npr6 и при увеличении давления газа картина изменится. Для оценки такой возможности на рис. 4 приведена АВТ-визуализация струи на режиме Npr8 при небольших расходах жидкости. Видно, что уже на рис. 4b за диском Маха имеется область повышенной концентрации частиц, значительно вытянутая вдоль струи. На рис. 4c данная структура также заметна, при этом конусообразный скачок смещается вверх и взаимодействует с отраженным скачком. При дальнейшем увеличении расхода (см. рис. 4d) от этой структуры остается лишь конусообразный скачок, а струя несколько уширяется после его прохождения. Таким образом, все структуры, наблюдаемые ранее, в данных течениях присутствуют, однако проявляются лишь при достаточной силе образующихся скачков, т.е. на режимах Npr8 и более.

Теневые изображения струи при росте расхода жидкости от 50 до 1500 л/ч на режиме Npr6 представлены на рис. 5. Видно, что при расходах 50 л/ч (рис. 5a) и 200 л/ч (рис. 5b) структура, подобная показанной на рис. 4d, сохраняется. Однако с увеличением концентрации до 500 л/ч (см. рис. 5c) появляется второй скачок, следующий за головным

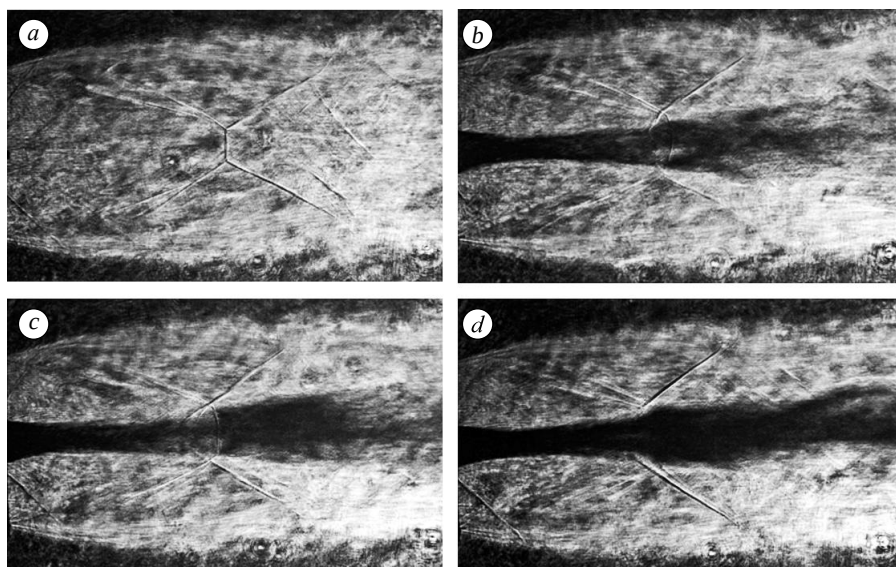


Рис. 4. АВТ-визуализация истечения струи форсунки на режиме Npr8 в отсутствие жидкости (a) и при добавлении малых расходов жидкости: газожидкостная струя на диске Маха (b), формирование конусообразного скачка (c), уширение струи при значительных расходах жидкости (d).

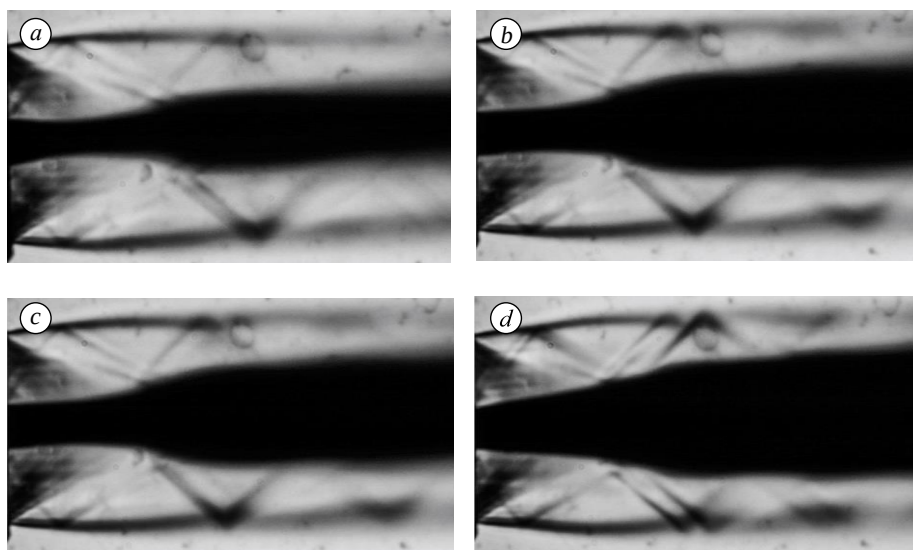


Рис. 5. Теневое изображение струи на режиме Npr6 при различных расходах жидкости.
 $Q = 50$ (a), 200 (b), 500 (c), 1500 (d) л/ч.

на некотором удалении и имеющий тот же наклон, причем при расходе 1500 л/ч этот скачок становится заметно отчетливее (см. рис. 5d). Следует отметить, что никаких сдвоенных скачков при расходе 200 л/ч не наблюдается, а на 50 л/ч они сливаются, что позволяет предположить либо погрешность наблюдения вследствие смещения струи жидкости в пространстве и частых перестроений структуры скачков, либо очень близкое расположение скачков в струе. Природа сдвоенных скачков при расходе свыше 500 л/ч может быть совершенно иной: вероятно, имеет место повторное отражение замыкающего скачка центральной трубки от плотного газожидкостного ядра с образованием сильного второго скачка, формирующего сложную картину течения газа при высоких расходах жидкости через форсунку.

Таким образом, можно отметить, что структура скачков газожидкостной струи при малых расходах жидкости имеет схожую с полученной в работе [11] картиной. Различия обусловлены необходимостью установки трубки большего диаметра и изменением течения из-за нее. Однако рост расхода жидкости приводит к более серьезным изменениям газовой периферии струи: образуется второй скачок, следующий за головным и возникающий при расходах свыше 500 л/ч. Структура скачков внутри газожидкостного ядра остается неизвестной, что обуславливает необходимость анемометрических измерений для определения наличия скачков в двухфазной области и их влияния на диспергирование капель.

Характеристики газожидкостной струи при высоких концентрациях жидкости

В настоящей работе методом ЛДА получены профили скорости капель на оси струи. Результаты измерений приведены на рис. 6. Видно, что профили скорости струи, схожие с наблюдавшимися в [11] при расходе 100 л/ч, с ростом расхода заметно изменяются. Зона восстановления скорости начинается не сразу после спада, а спустя 20 мм, на удалении 40–50 мм от среза сопла. Динамика снижения скорости капель за скачком приблизительно одинаковая, что указывает на схожие средние размеры капель, однако

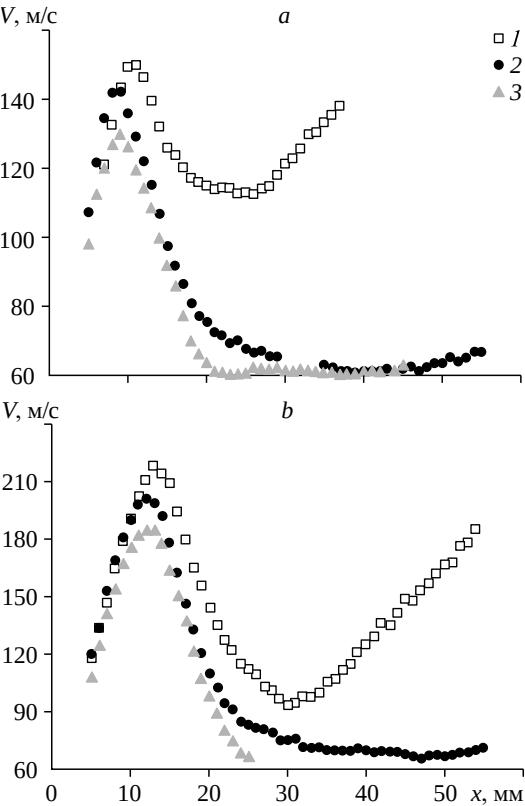


Рис. 6. Профили скорости капель на оси струи форсунки с центральной трубкой диаметром 4 мм на режиме Npr6 (a) и Npr8 (b) в различных расходах жидкости.

$Q = 100$ (1), 300 (2), 500 (3) л/ч.

при расходе 500 л/ч спад скорости заканчивается в 20 мм от среза сопла, в отличие от расхода 300 л/ч, где «хвост» снижения скорости затягивается до ~50 мм. Далее на максимальных расходах (500 л/ч и более) образуется область с неизменными значениями скорости.

По формуле (1) получены профили среднеобъемной концентрации жидкости в струе, результаты представлены на рис. 7. Видно, что в отличие от профилей из [11] в этом случае не наблюдается рост концентраций за головным скачком, однако при расходах свыше 300 л/ч график становится значительно менее пологим. Дальнейший рост расхода не изменяет его вид; причиной этого, по всей видимости, явля-

ется высокая инерционность капель, из-за чего область повышенной концентрации растягивается и выходит за рамки исследуемой области. Также следует отметить, что рост концентрации жидкости в зоне торможения при расходах свыше 200–300 л/ч обусловлен вкладом расхода жидкости в формуле (1), так как диаметры струи (см. рис. 5) и значения скорости за скачком (см. рис. 6) с ростом расхода остаются практически неизменными.

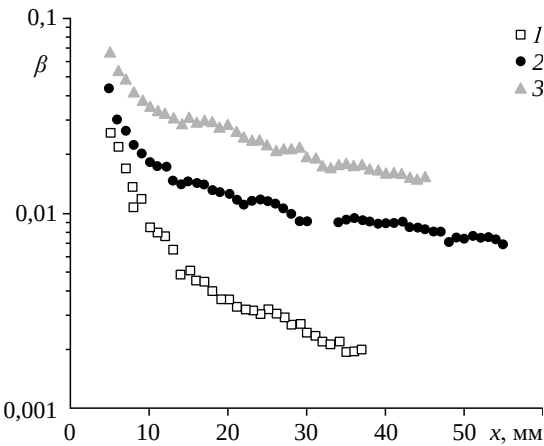


Рис. 7. Профили среднеобъемной концентрации капель в газожидкостной струе на режиме Npr6.

$Q = 100$ (1), 300 (2), 500 (3) л/ч.

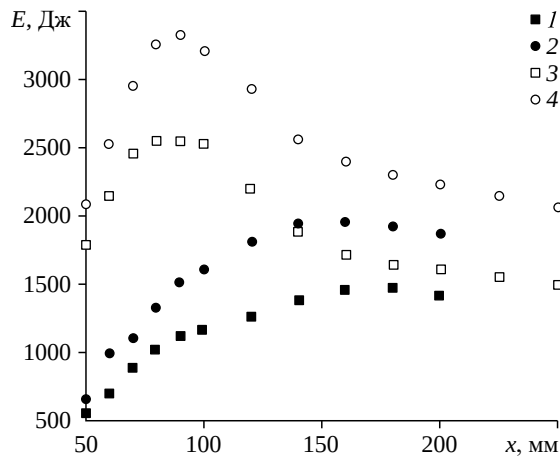


Рис. 8. Профили энергии в сечениях газожидкостной струи при двух режимах истечения: Npr6 (1, 3) и Npr8 (2, 4).
 $Q = 100$ (1), 100 (2), 1000 (3), 1000 (4) л/ч.

Для оценки эффективности диспергирования с ростом расхода жидкости сделаны оценки энергии спрея по формуле (2) на больших удалениях от среза сопла. Результаты представлены на рис. 8. Несмотря на десятикратный рост расхода жидкости, максимальная энергия струи увеличивается не очень значительно (на 60–70 %), что является свидетельством низкой скорости капель и неэффективного влияния струи газа на разрушение. Оценка размеров капель по формуле (3) это подтверждает. С ростом расхода от 100 до 1000 л/ч средние размеры капель увеличиваются втрое: на режиме Npr6 от 10–15 до 45–50 мкм, на режиме Npr8 — от 10 до 30 мкм. Таким образом, при расходах свыше 100 л/ч эффективность разрушения капель значительно снижается с ростом расхода, что обусловлено ограниченным потенциалом струи газа по разрушению массы жидкости на капли.

Снижение эффективности газожидкостной струи по дисперсности с ростом расхода — это вполне ожидаемый эффект, но ценность работы не в нем. Во-первых, количественно предел эффективности процесса следовало определить экспериментально, а во-вторых, не во всех приложениях требуется дисперсность спрея ~ 10 мкм, как в топливных форсунках. Так, в системах пожаротушения дисперсность 30–50 мкм — это хороший результат, особенно при высоких расходах жидкости, как в настоящей работе. Важно обратить внимание на структуру скачков давления в двухфазном ядре струи и на само ее существование при рассмотренной концентрации жидкости.

Следует отметить, что профили скорости явно свидетельствуют о существовании головного скачка на облаке частиц во всем диапазоне расходов. Тем не менее видны расхождения в зоне восстановления скорости за скачком, причем они тем заметнее, чем выше расход жидкости. Затягивается зона восстановления скорости и формируется область с малыми скоростями капель. Профили концентрации демонстрируют монотонный спад, скорость уменьшения концентрации с удалением от среза сопла при высоких расходах жидкости существенно снижается. Исследование энергетических профилей в дальней области показало незначительный рост энергии на больших удалениях от среза сопла, при этом качество распыла заметно ухудшилось.

Обсуждение результатов

Исследование теневых изображений и профилей основных параметров газожидкостной струи показало, что ее отличия от струй малого и среднего расхода незначительны. Основные структуры струи, наблюдавшиеся ранее, можно видеть и с повышением расхода жидкости: на всех расходах в ядре струи существует головной скачок на облаке частиц, за которым происходит восстановление скорости газа. При формировании он принимает коническую форму, после чего сдвигается в направлении сопла с ростом расхода. Тем не менее имеют место некоторые отличия, связанные как с высокой концентрацией капель в струе, так и с установкой центральной трубки большого диаметра, искажающей картину скачков струи газа. Изменения структуры диска Маха, связанные с центральной трубкой, хорошо заметны, однако даже при малых расходах жидкости, когда область диска Маха доступна для наблюдения, возмущения от газожидкостного ядра оказывают значительно большее влияние на структуру, сводя картину скачков к наблюдаемой ранее в [11].

Значительно важнее рассмотреть изменения структуры скачков на периферии при высоких концентрациях дисперсной фазы (расходы от 500 л/ч). Здесь с ростом расхода жидкости возникает сразу два параллельных скачка: скачок на облаке частиц и отраженный от двухфазного ядра струи скачок центральной трубки. Тот факт, что второй скачок является отраженным, подтверждается как его усилением с ростом концентрации газожидкостного ядра струи, так и отсутствием каких бы то ни было скачков, помимо головного, на профилях скорости капель. Объемное содержание жидкости в рассматриваемой области 2–3 %, по-видимому, эти значения и являются пороговыми для отражения скачка от газожидкостной завесы.

Что касается параметров струи, заметно отличие профилей от наблюдаемых ранее. Профили скорости, схожие с представленными в [11] при малых расходах жидкости, при больших расходах демонстрируют расширенную область спада скорости капель, что может быть обусловлено ростом массы и, как следствие, инерционности отдельных капель, а также большим диаметром газожидкостного ядра и его высокой загрузкой каплями. При этом градиенты скорости газа на периферии газожидкостной струи оказывают заметно меньшее влияние на течение в ее ядре, что и приводит к затягиванию восстановления скорости за скачком. Таким образом, высокая загрузка потока каплями (при расходах свыше 300 л/ч и $\beta = 1 - 2 \%$) ведет к увеличению области пониженных скоростей за скачком. Если учесть также, что наполненное жидкостью ядро струи не прекращает увеличиваться в диаметре после прохождения скачка, можно понять, почему профили концентрации жидкости монотонно спадают. На этих режимах струя демонстрирует процессы, в целом схожие с рассмотренными ранее режимами, однако загрузка каплями оказывает на нее значительное влияние.

Структура скачков в ближней области струи является важным фактором с точки зрения эффективности распыла, поскольку обеспечивает градиентный характер течения газа, что особенно важно применительно к высокорасходным струям. Рисунок 8 показывает, что десятикратное увеличение расхода приводит к росту максимальной энергии спрея лишь на 60–70 %, в результате чего значительно ухудшается качество распыла. В этих условиях основную роль в разрушении капель, по всей видимости, играет именно скачок, благодаря которому высокие градиенты скорости газа и числа Вебера, сохраняются до 80–90 мм от среза сопла.

Выводы

Выполнено экспериментальное исследование сверхзвуковой недорасширенной струи газа в двухфазной области газожидкостной струи коаксиальной форсунки при высоких расходах жидкости. Использован комплекс оптических методов в составе инструментов визуализации и приборов для получения количественных данных, таких как Malvern Spraytec и прототип ЛДА с прямым спектральным анализом. На основе полученных данных выявлены следующие характерные особенности струй с высоким содержанием жидкости.

- Использование центральной трубки большого диаметра повлияло на форму диска Маха газовой струи на режиме Npr6. Вместе с тем изменения, связанные с внесением в поток жидкости, сильнее модифицируют вид скачка.

- При расходах жидкости свыше 500 л/ч появляется второй скачок, параллельный головному и усиливающийся с ростом расхода жидкости. Он связан с отражением замыкающего скачка центральной трубки от границы плотной двухфазной области газожидкостной струи.

- Рост расхода не приводит к значительному изменению профилей скорости, тем не менее имеет место затягивание области малых скоростей за головным скачком. Концентрация капель монотонно падает при удалении от среза сопла.

- Оценка профилей энергии спрея показала незначительный ее рост при расходах жидкости более 100 л/ч, что вместе с существенным увеличением размеров капель показывает неэффективность процессов разрушения на таких режимах.

Список обозначений

Npr — Nozzle Pressure Ratio, отношение давления в форкамере сопла к внешнему давлению,
 P_1 — давление жидкости, атм,
 P_g — давление газа, атм,
 T_1 — температура жидкости, °C,
 T_g — температура газа, °C,
 x — координата струи вдоль оси с началом отсчета на срезе сопла, мм,
 $a(x)$ — ускорение капель вдоль x , м/с²,
 $D(x)$ — диаметр газожидкостной струи в сечении x , мм,
 D_0 — диаметр струи на срезе сопла, мм,

$U(x)$ — скорость газа в координате x , м/с,
 $V(x)$ — скорость капель в координате x , м/с,
 V_0 — скорость струи жидкости на срезе сопла, м/с,
 ρ_g — плотность газа, кг/м³,
 ρ_l — плотность жидкости, кг/м³,
 Q — объемный расход жидкости, м³/с,
 C_d — коэффициент аэродинамического сопротивления капли,
 σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м,
 $\beta(x)$ — среднеобъемная концентрация жидкости в сечении x ,
 $d(x)$ — средний размер капель в сечении x , м.

Список литературы

1. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. Распыливание жидкости форсунками. М., Л.: Госэнергоиздат, 1962. 265 с.
2. Lasheras J.C., Hopfinger E.J. Liquid jet instability and atomization in a coaxial gas stream // Annual Rev. Fluid Mech. 2000. Vol. 32. P. 275–308.
3. Charalampous G., Hardalupas Y., Taylor A. Structure of the continuous jet core during coaxial air-blast atomization // Int. J. Spray and Combust. Dynamics. 2009. Vol. 1, No. 4. P. 389–415.
4. Mayer W.O.H. Coaxial atomization of a round liquid jet in a high-speed gas stream: a phenomenological study // Fluids. 1994. Vol. 16. P. 401–410.
5. Варакин А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 3. С. 421–455.
6. Faeth G.M. Mixing, transport and combustion in sprays // Prog. Energy Combust. Sci. 1987. Vol. 13. P. 293–345.
7. Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Пахомов М.А., Терехов В.И. Исследование структуры полидисперсной изотермической газочапельной струи на начальном участке. Эксперимент и численное моделирование // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 3. С. 309–324.

8. Лепешинский И.А., Воронецкий А.В., Зуев Ю.В., Онес В.И., Решетников В.А., Ципенко А.В. Экспериментальные и теоретические исследования газокапельных струй с высокой концентрацией жидкости в газе // Мат. моделирование. 2001. Т. 13, № 6. С. 124–127.
9. Бойко В.М., Нестеров А.Ю., Поплавский С.В. Диспергирование жидкости в высокоскоростных коаксиальных газовых струях // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 3. С. 417–431.
10. Poplavski S.V., Boiko V.M. The complex of optical methods for study of gas-liquid jets // AIP Conf. Proc. N. Y., AIP Publ. 2017. Vol. 1893. P. 030002-1–030002-6.
11. Бойко В.М., Лотов В.В., Нестеров А.Ю., Поплавский С.В. Влияние спрея на газодинамическую структуру сверхзвуковой недорасширенной струи // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 3. С. 323–337.
12. Бойко В.М., Оришнич А.М., Павлов А.А., Пикалов В.В. Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте. Новосибирск: НГУ, 2009. 450 с.
13. Поплавский С.В., Нестеров А.Ю., Бойко В.М. Разработка и применение лазерного доплеровского анемометра с прямым спектральным анализом для исследования высокоскоростных многофазных потоков // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 4. С. 583–591.
14. Boiko V.M., Nesterov A.Yu., Poplavski S.V. Development of LDA method with direct spectral analysis based on fizeau interferometer for aerophysical experiments // AIP Conf. Proc. N. Y., AIP Publ. 2018. Vol. 2027. P. 040008-1–040008-6.
15. Глотов Г.Ф. Локальные дозвуковые зоны в сверхзвуковых струйных течениях // Механика жидкости и газа. 1998. № 1. С. 143–150.

*Статья поступила в редакцию 9 марта 2023 г.,
после доработки — 24 июля 2023 г.,
принята к публикации 17 августа 2023 г.*