

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

*Нестеров Александр Юрьевич*

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы  
(диссертации)

*«Экспериментальное исследование структуры высокоскоростных  
газожидкостных струй с высокой концентрацией жидкости»*

Направление подготовки:

01.06.01 – Математика и механика

Специальность подготовки: 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы;

Научный руководитель

*д.ф.-м.н. Поплавский Сергей*

*Владимирович*

Новосибирск, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Распыляющие устройства, или форсунки, широко представлены в промышленности, где применяются во многих технологических процессах и приложениях: в пожаротушении, химической промышленности, агропромышленном комплексе, для охлаждения жидкостей или газовых потоков, создания водяных завес. Особое место форсунки занимают в двигателестроении, находя применение во всех современных двигателях, печах и горелках. Большое многообразие областей применения предполагает широкий выбор используемых схем конструкции, которые можно разделить на классы по используемому механизму диспергирования жидкости. Среди них особо выделяется класс пневматических форсунок, использующий для разрушения струи жидкости высокоскоростную струю газа. Частным случаем этого типа распылителей является коаксиальная форсунка, в которой жидкость подается в соосный поток газа. Форсунки данного типа имеют множество приложений, где распыляют жидкости в диапазонах расходов от литров до кубометров в час. Высокие расходы диспергируемой жидкости предполагают высокую концентрацию капель в газожидкостном ядре потока, что оказывает влияние на движение струи газа и особенно на механизмы диспергирования капель. Исследованию данного влияния посвящено небольшое количество работ, отчего данная область исследования остается актуальной. Основная причина этого кроется в специфических проблемах, связанных как с моделированием, так и с экспериментальным исследованием таких струй.

Экспериментальное исследование газожидкостных струй предполагает использование бесконтактных оптических методов, большинство из них имеют принципиальные ограничения по максимальной концентрации частиц в области сбора данных. Отсюда вытекает проблема получения данных в высокозагруженных областях струи с большими концентрациями капель, где многие экспериментальные методы оказываются неприменимыми. Также у

ряда методов имеются ограничения по исследованию сверхзвуковых газожидкостных струй. Таким образом, исследование плотных сверхзвуковых газожидкостных потоков требует прежде всего развития методов получения и обработки экспериментальных данных для определения характеристик потока. Одной из важнейших характеристик газожидкостной струи является скорость дисперсной фазы, для измерения которой создан и испытан прототип ЛДА с прямым спектральным анализом. Показано, что данные ЛДА вкупе с результатами других применимых методов позволяют получить основные характеристики струи.

Характер истечения струи зависит от большого количества факторов, связанных как с геометрией форсунки и характерными размерами составляющих её элементов, так и с режимами истечения струи, характером истечения струйки из трубки подачи жидкости, состоянием потока газа, истекающего из сопла. Основные процессы разрушения капель происходят в ближнем следе струи (первые несколько калибров от среза сопла), устанавливается же картина течения на значительном удалении от форсунки (~10-100 калибров). Таким образом, для полного описания истечения газожидкостной струи коаксиальной форсунки необходимо определить роль указанных факторов, каждый из которых может оказать непосредственное влияние как на процессы газожидкостного ядра струи, так и на конечный результат диспергирования.

**Цель работы:** комплексное экспериментальное исследование газожидкостных струй коаксиальных пневматических форсунок с целью определения влияния характерных величин (масштаб форсунки, отношение диаметров канала газа и жидкости) на основные параметры газожидкостной струи и потока газа в ближнем и дальнем следе струи на различных режимах истечения.

Для достижения данной цели решены следующие **задачи**:

1. Создание прототипа ЛДА с прямым спектральным анализом для исследования высокозагруженных газожидкостных струй и развитие алгоритмов обработки полученных данных для определения параметров дисперсной фазы и газа.
2. Исследование ближнего и дальнего следа дозвуковых и сверхзвуковых газожидкостных струй с высокой концентрацией дисперсной фазы, определение влияния ударноволновых структур сверхзвуковой недорасширенной струи газа на процессы в двухфазной области потока и трансформации скачков в газожидкостном ядре струи.
3. Изучение влияния толщины трубки подачи жидкости на истечение струи, а также образование и разрушение капель.
4. Исследование струй форсунок с разным отношением диаметра центральной трубки к выходному диаметру сопла при различных расходах жидкости, определение влияния отношения на основные параметры струи: дисперсность, скорость движения жидкости и газа, концентрацию капель.

### **Научная новизна работы.**

1. Создан не имеющий аналогов прототип ЛДА с прямым спектральным анализом для определения скорости дисперсной фазы плотных газожидкостных потоков; разработаны алгоритмы обработки данных, позволяющие определить средние и локальные концентрации капель, числа Вебера капель в потоке, энергию струи.

2. По динамике капель в градиентном потоке выполнена оценка их размеров, показана достоверность полученного результата; получены данные о размерах капель в оптически непрозрачных струях.
3. Впервые получены профили скорости капель в непосредственной близости от среза сопла, показано наличие сверхзвуковых газодинамических структур в данной области.
4. Исследована трансформация скачков сверхзвуковой недорасширенной струи газа в двухфазной области, показан распад диска Маха на два скачка и изменение их формы под влиянием дисперсной фазы.
5. По динамике капель впервые получен профиль скорости газа в двухфазном ядре струи с высокой концентрацией капель, показано его качественное подобие профилю скорости газа сверхзвуковой недорасширенной струи; выявлено существование зоны возвратного течения газа за скачком.
6. Исследована природа газожидкостной структуры в ближнем следе толстой центральной трубки, получена продольная компонента поля скорости капель в этой области и показан вихревой характер явления.
7. Исследована дальняя область газожидкостной струи, определена граница активного разрушения капель в струе, показана независимость положения границы от параметров газового потока.

**Практическая значимость работы** обусловлена широким применением газожидкостных форсунок. Лабораторией исследованы сопла, применяющиеся для сжигания отходов при обустройстве месторождений (расходы жидкости установки составляют десятки кубометров в час) и малорасходные форсунки различных производителей широкого профиля

применения. Данная работа позволяет получить картину истечения струи на различных режимах истечения и создать инструментарий, позволяющий выработать рекомендации к выбору конструкции форсунки и параметров истечения струи для достижения необходимого результата (дисперсности, угла распыла, скорости спрея и т.д.).

### **На защиту выносятся:**

1. Результаты экспериментальных исследований ближнего следа сверхзвуковых газожидкостных струй с высокой концентрацией дисперсной фазы, выявление ударноволновых структур в двухфазном ядре струи и их влияния на механизмы диспергирования; изменение характерного вида первой ячейки в двухфазной области: распад диска Маха на головной и тыльный скачки.
2. Исследование влияния толщины трубки подачи жидкости на процессы истечения струи, доказательства образования сопряженных тороидальных вихрей на срезе толстой трубки и изучение их изменений при смене режима истечения.
3. Результаты исследования истечения струй коаксиальных форсунок с различным отношением диаметров трубки подачи жидкости и выходного сопла газового тракта при различных режимах истечения струи.

**Достоверность полученных результатов** достигнута путем тщательной калибровки приборов и их проверки на модельных течениях и объектах, повторения измерений в ключевых точках и накоплением и обработкой массивов данных стационарно истекающей струи на устойчивых повторяющихся от опыта к опыту режимах истечения. Данные меры

гарантируют достоверность результатов в пределах указанных погрешностей.

**Личный вклад автора** в выполнение работы состоит в личном участии в создании и модернизации прототипа ЛДА, планировании экспериментов и участии в них в качестве управляющего диагностическим комплексом, обработке полученных данных и анализе погрешностей, анализе полученных результатов и формулировке выводов по ним, их представлении на научных мероприятиях.

**Апробация работы:** Результаты данных исследований докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- XV всероссийский семинар с участием иностранных ученых «Динамика многофазных сред», Новосибирск, 3-5 октября 2017 г.
- XII Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии», Новосибирск–Шерегеш, 16–22 марта 2018 г.
- International conference on the methods of aerophysical research ICMAR-2018, Novosibirsk, August 13-19, 2018.
- XIII Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии», Новосибирск–Шерегеш, 15–22 марта 2019 г.
- XXVI всероссийская конференция с международным участием «Высокоэнергетические процессы в механике сплошной среды», посвященная 150-летию со дня рождения С.А. Чаплыгина (VIII чаплыгинские чтения), 3-5 апреля 2019 г.
- XVI всероссийский семинар с участием иностранных ученых «Динамика многофазных сред», Новосибирск, 30 сентября – 5 октября 2019 г.

- XIV Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии», Новосибирск–Шерегеш, 28 февраля – 6 марта 2020 г.
- International conference on the methods of aerophysical research ICMAR-2020, Novosibirsk, November 1-7, 2020.
- XV Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии», Новосибирск–Шерегеш, 25 февраля – 5 марта 2021 г.
- XVII Всероссийский семинар с международным участием «Динамика многофазных сред» ДМС-21, Новосибирск, 27 августа – 4 сентября 2021

**Публикации:** Результаты, использованные при подготовке диссертации, опубликованы в 9 изданиях, из них 2 – в рекомендованных ВАК РФ изданиях (Теплофизика и аэромеханика):

- Poplavski S.V., Boiko V.M., Lotov V.V., Nesterov A.U. On the dispersion of liquid in coaxial supersonic gas jet // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol.894, 012115. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012115
- Boiko V.M., Poplavski S.V., Nesterov A.U., Kondratev S.V., Morozov A.A., Potekhin A.K. Laser Doppler Anemometer Based on the Fizeau Interferometer // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1893, 020015. DOI: 10.1063/1.5007453
- Poplavski S.V., Boiko V.M., Lotov V.V., Nesterov A.Yu. Coaxial gas-liquid jet: dispersion and dynamics // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1939, 020051. DOI: 10.1063/1.5027363
- 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 Conference Proceedings. 2018. Vol. 2027, 040008. DOI: 10.1063/1.5065282



- Poplavski S.V., Nesterov A.Yu. Investigation of supersonic two-phase flows by a laser Doppler anemometer with a Fizeau interferometer // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2125, 030001. DOI: 10.1063/1.5117383
- Poplavski S.V., Nesterov A.Yu. On the near wake structure of a supersonic coaxial gas-liquid jet // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1404, 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1404/1/012038
- Nesterov A.Yu., Poplavski S.V., Boiko V.M. Investigation of the scale factor influence on the pneumatic atomizers features // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2351, 040034. DOI: 10.1063/1.50052888
- Бойко В.М., Нестеров А.Ю., Поплавский С.В. Диспергирование жидкости в высокоскоростных коаксиальных газожидкостных струях // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 3. С. 417-431.
- Бойко В.М., Нестеров А.Ю., Поплавский С.В. 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.

### **Краткое содержание работы.**

**Введение** представляет собой постановку задачи, приведено обоснование выбора тематики исследования и выполнено краткое описание полученных результатов. Отражены практическая значимость выполненной работы, научная новизна полученных результатов, личный вклад автора в работу.

В **главе 1** приведено описание основных публикаций по теме первичного и вторичного разрушения газожидкостных струй. Представлен обзор экспериментальных методов, применяемых в исследованиях многофазных потоков, показана их ограниченная применимость к задачам газожидкостных струй с высокой концентрацией дисперсной фазы.

Разрушение струи жидкости потоком газа – тема, обширно описанная в литературе. Описание разрушения струи принято разделять на два этапа – разрушение струи жидкости на капли (первичное разрушение струи) и разрушение первичных капель в потоке газа (вторичное разрушение капель). Первичное разрушение струи на данном этапе исследовано как экспериментально (Lasheras et al., 1998, Wu et al., 1995, Mayer, Branam, 2004), так и методами численного моделирования (Jiang et al., 2010, Shinjo, Umemura, 2011, Zandian et al., 2018). Исследования первичного разрушения в указанных работах затрагивают разрушение струи жидкости соосным газовым потоком со скоростями менее 100 м/с либо разрушение истекающей в затопленное пространство в том же диапазоне скоростей струи жидкости. Разрушение струи при этом связывается с развитием неустойчивостей на межфазной границе, теоретические исследования данного явления также представлены весьма широко (Boomkamp, Miesen, 1996, Guo et al., 2002). Имеются также обзорные работы, объединяющие результаты в исследованиях первичного разрушения струи (Eggers, Villermaux, 2008) на основе обширной базы данных экспериментальных и теоретических исследований.

Вторичное разрушение капель потоком газа – тема, представленная публикациями еще более обширно. Исследования вторичного разрушения капель связаны с экспериментами в ударных трубах (Dai, Faeth, 2001, Joseph et al., 1999, Theofanous et al., 2012, Бойко, Поплавский, 2007), где капля разрушается газовым потоком с постоянными параметрами за ударной волной в трубе. В качестве основного результата таких исследований можно привести ранжирование известных механизмов разрушения капель по числам Вебера  $We = \frac{\rho_g d U^2}{2\sigma}$  и Онезорге  $Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho_l d \sigma}}$ , где  $\rho_g$ ,  $U$  – плотность и скорость газа,  $\rho_l$ ,  $\sigma$  и  $\eta$  – плотность, коэффициент поверхностного натяжения и динамическая вязкость жидкости,  $d$  – диаметр капель, на данный момент разработана карта режимов, приводящая переходные  $We$  для всех известных

механизмов разрушения капель (Pilch, Erdman, 1987, Hsiang, Faeth, 1992). Некоторые исследования (Gelfand, 1996, Бойко с соавторами, 2018) касаются также потоков с изменяющимися параметрами, хотя данная тематика изучена в значительно меньшей степени. Обычно исследования разрушения капель выполняются для одиночных капель, однако часть исследований (Theofanous et al., 2007, Бойко с соавторами, 2019) сконцентрирована на исследовании поведения пар, троек или более крупных агломератов. Особо следует выделить работы, посвященные экспериментальному исследованию и компьютерному моделированию движения двухфазных сред и их влияния на обтекаемое тело (Вараксин, 2018, Винников с соавторами, 2009, Алексеев с соавторами, 2018, Хмель, Федоров, 2014). Множество исследований посвящено форсункам (Barreras et al., 2006, Kihm, Chigier, 1991, Андрюшкин, 2011), в основном они касаются дисперсности распыла и некоторых других характеристик (к примеру, угла распыла жидкости форсункой) и не затрагивают процессов в струе ввиду принципиальных ограничений экспериментальных методов исследования газожидкостных струй.

Экспериментальные исследования газожидкостных потоков выполняются практически исключительно оптическими методами, в числе которых методы оптической визуализации (шлирен-визуализация, интерферометрия, лазерный нож), методы анемометрии (времяпролетный метод, ЛДА, PIV), методы определения дисперсности капель (с использованием визуализации, PDPA, IPI, метод малоуглового рассеяния света на частицах). Почти все указанные методы способны функционировать до достижения определенного порога концентрации дисперсной фазы, для части методов порог определяется единственностью частицы в области измерения (измерение дисперсности с использованием визуализации, обычные схемы ЛДА, PDPA, IPI), часть методов ограничена пропусканием света средой (все методы визуализации, метод малоуглового рассеяния) либо алгоритмами обработки первичных результатов (PIV). Исследование газожидкостных потоков с высокой концентрацией дисперсной фазы

ограничено лишь картинками визуализации, которые в наиболее важной области потока затенены. Таким образом, исследование струй в таких условиях требует разработки новых методов, о чем и пойдет речь далее.

**Глава 2** представляет собой описание экспериментальной установки «Газожидкостный стенд» и методов диагностики газожидкостных струй, использованных в работе. Особого упоминания удостоен прототип ЛДА с прямым спектральным анализом и его применимость к задачам исследования газожидкостных струй. Описаны методы обработки экспериментальных данных и способы оценки основных параметров струи, на основе доверительных интервалов измеряемых величин выведены погрешности полученных параметров.

Эксперименты выполнены на установке «Газожидкостный стенд» ИТПМ СО РАН. Данная установка позволяет выполнить исследование газожидкостных струй комплексом диагностических методов в диапазоне расходов жидкости через образец от 10 л/ч до 5 м<sup>3</sup>/ч при давлении газа в форкамере до 8 атмосфер. Установка (рис.1) представляет собой струйный модуль 1 с сопловым узлом 2 и приемным резервуаром 3 для диспергированной жидкости. Форсунки различных конструкций закрепляются на выходе струйного модуля посредством металлического стакана. Режим истечения контролируется приборами, расположенными в системе подачи жидкости и газа 4, измеренные ими параметры оцифровываются и записываются на ПК. Элементы диагностики 5 располагаются вокруг струйного модуля, что позволяет исследовать различные области газожидкостной струи путем смещения струйного модуля 1 или соплового узла 2 относительно инструментов 5.

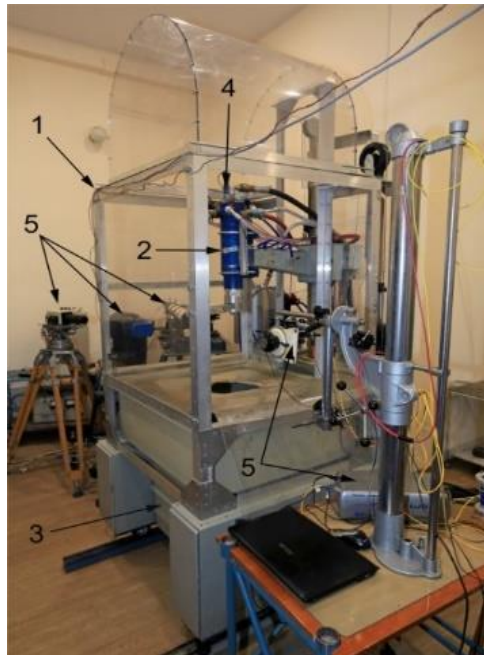


Рис.1. Внешний вид установки «газожидкостный стенд» с указанием составных элементов: 1 – струйный модуль, 2 – сопловой узел, 3 – приемный резервуар, 4 – каналы подачи жидкости и газа, 5 – элементы диагностики

Использованы следующие методы диагностики:

- Теневая и АВТ-визуализация
- Дифракционный анализатор спреев Malvern Spraytec
- Лазерный нож и PIV
- Прототип ЛДА с прямым спектральным анализом

**Теневой метод** – один из наиболее широко используемых в аэрофизическом эксперименте. Он состоит из осветительного светодиода, двух телескопов, диафрагмы для увеличения контрастности изображения, и камеры ВИДЕОСКАН 285/П-USB. Поскольку имеются существенные ограничения применения теневых методов при исследовании потоков с малыми градиентами плотности, в дополнение к теневому методу используется **АВТ-визуализация**, где вместо диафрагмы в качестве инструмента визуализации используется тонкая пластина из фототропного стекла – адаптивный визуализирующий транспарант (АВТ). В качестве

источника света используется Nd:YAG лазер мощностью 4 мВт, что позволяет использовать данный прибор для более четкого отображения быстропротекающих процессов в силу большей яркости осветителя и меньшего времени экспозиции, а также лучшей чувствительности к градиентам плотности газа.

**Прибор Malvern Spraytec** позволяет получить распределение по размеру частиц в газожидкостной струе с использованием метода малоуглового рассеяния. Он состоит из двух частей – источник (трансмиситтер) и приемник (ресивер). Капли рассеивают свет, создаваемый гелий-неоновым лазером мощностью 2 мВт и сформированный коллимирующей оптической системой в широкий (10 мм) параллельный луч. После рассеяния свет фокусируется системой линз и попадет на детекторную матрицу, регистрирующую свет, рассеянный под разными углами. Далее компьютерная программа по полученному угловому распределению света рассчитывает распределение капель по размерам. Погрешность определения размеров капель зависит от многих параметров, однако при рассмотрении гистограмм она определяется шириной столбца (~ 10 % от диаметра капли).

**Лазерный нож** – это метод визуализации потока частиц (трассеров), позволяющий получать качественную картину истечения с малым временем экспозиции. Нож визуализирует течение в определенной плоскости, вдоль или поперек потока. Комплекс аппаратуры лазерного ножа состоит из нескольких элементов. Частицы освещаются импульсным лазерным лучом, сформированным в плоскость («нож»), далее рассеянный частицами свет регистрируется камерой высокого разрешения PCO Sensicam. На той же элементной базе работает **PIV**, метод измерения скорости по корреляции пар изображений. В отличие от лазерного ножа, PIV использует два лазера для формирования двух импульсов с коротким (1-2 мкс) промежутком между ними. Импульсы освещают поток газа с добавленными трассерами (капли, частицы; в нашем случае использовался конденсат этиленгликоля). Камера Sensicam в данном случае работает в двухэкспозиционном режиме, позволяя

получить пару кадров от двух вспышек лазера, после чего методами кросс-корреляции определяется скорость движения трассеров. Данный метод позволяет определять скорость дозвуковых потоков газа с погрешностью 5 %, при исследовании градиентных течений погрешность может значительно возрасти.

Для исследования струй с высокой концентрацией капель разработан **прототип ЛДА** с прямым спектральным анализом, который использует для определения доплеровского сдвига серийный измеритель длин волн Angstrom WS-7 (Россия), модифицированный для обработки двух сигналов в режиме компаратора. В основе измерителя – многолучевой клиновидный эталон Физо (ЭФ), благодаря линейной дисперсии этого интерферометра значительно упрощается обработка интерферограмм. Используется ЭФ с расстоянием между зеркалами 40 мм, область свободной дисперсии 3,75 ГГц.

Прототип ЛДА построен по схеме удаленного доступа к объекту: подвод лазерного излучения к объекту и сбор рассеянного света производится посредством оптоволоконных линий, а сам прибор может располагаться вне зоны действия факторов, затрудняющих работу прецизионной оптики. На рис.2 представлены схема и внешний вид прибора. Свет Nd-YAG лазера из блока осветителя 4 посредством коллиматора 8 передается оптоволоконном в коллиматор 1, фокусирующий его в исследуемой точке. Рассеянный свет собирается коллиматором 2 и передается в блок обработки 3, сюда также попадает опорный луч из блока 4 от светоделительной пластины 7 и коллиматора 9. Интерферограммы излучения от каналов 2 и 9 оцифровываются фотодиодными линейками и обрабатываются программными средствами. Прототип способен регистрировать доплеровский сдвиг частоты рассеянного излучения с погрешностью не более 10 МГц (скорость  $\pm 5$  м/с).

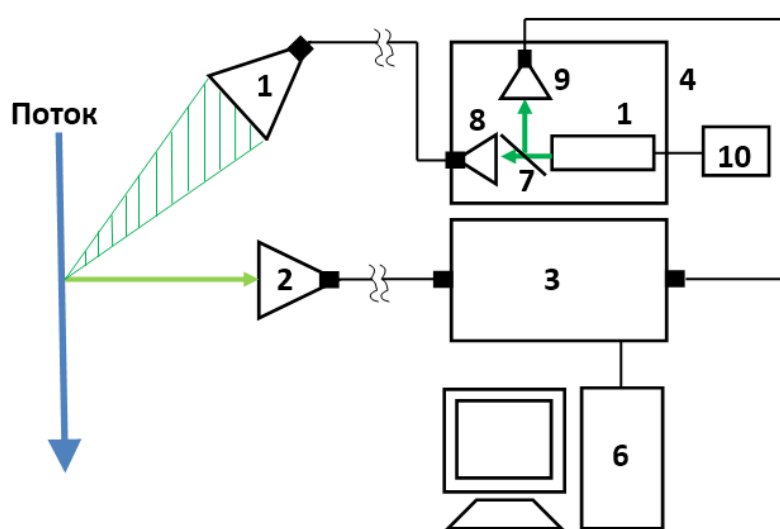


Рис.2. Схема прототипа ЛДА: 1 – система фокусировки света на объекте, 2 – система сбора рассеянного света, 3 – блок обработки (WS-7), 4 – блок осветителя, 5 – стойка, 6 – компьютер, 7 – полупрозрачное зеркало, 8 – ввод лазерного излучения в оптоволокно, 9 – ввод опорного сигнала, 10 – лазер

Описанный комплекс методов диагностики позволяет получать данные о скоростях движения капель и газа, дисперсности капель в потоке, геометрических размерах и структуре газожидкостной струи. Эти данные позволяют получать такие критически важные данные о струе, как объемная концентрация (средняя  $\beta_A$  и на границе двухфазной области струи  $\beta_B$ ), числа Вебера капель, энергия струи:

$$\beta_A = \frac{4Q}{\pi V_{\text{ж}} D^2} \quad (1)$$

$$\beta_B = \frac{2d}{3L} \quad (2)$$

$$E = \frac{3\pi}{2} V_0 \sigma \frac{D_0^2}{d} + \frac{\pi}{8} \rho_{\text{ж}} \beta_A D^2 V_{\text{ж}}^3 \quad (3)$$

Здесь  $Q$  – расход жидкости,  $D$  – диаметр струи,  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $V_{\text{ж}}$  и  $d$  – плотность, скорость и диаметр капель соответственно,  $L$  – оптический путь света в струе,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $V_0$ ,  $D_0$  – скорость и диаметр струйки жидкости, истекающей из центральной трубки. Также разработан метод определения средних размеров капель по динамике струи:



$$d = \frac{3}{4} C_x \frac{\rho_\Gamma (U_\Gamma - V_{ж})^2}{\rho_{ж} a} \quad (4)$$

где  $a$  и  $C_x$  – ускорение и коэффициент аэродинамического сопротивления капли,  $\rho_\Gamma$ ,  $U_\Gamma$  – плотность и скорость газовой фазы. Данная формула апробирована измерениями Malvern Spraytec и применяется в случаях, когда прибор неспособен выполнять измерения (в ближнем следе струи либо при пропускании света средой менее 5 %). Одной из задач, связанных с исследованием газожидкостных струй, является восстановление скорости газа в двухфазной области, где данные по скорости ограничены лишь измерениями ЛДА. Показано (Бойко с соавторами, 2013, 2015), что на линии тока в градиентных струях скорость газа можно вычислить из скорости трассеров (частиц) по формуле:

$$U_\Gamma = V_{ж} \pm \sqrt{\lambda V_{ж} \left| \frac{dV_{ж}}{dx} \right|}, \lambda = \frac{4\rho_{ж}d}{3\rho_\Gamma C_x} \quad (5)$$

Знак «+» имеет место для положительного  $\frac{dV_{ж}}{dx}$ , «-» - для отрицательного. В силу зависимости  $C_x$  от  $Re$  и, соответственно, от  $U_\Gamma$ , данная формула не является замкнутой. Эта проблема решается путем применения данных PIV в чистом газе и нахождением последовательных приближений решения к конечному ответу. Установлено, что вторая итерация дает хорошее приближение к точному решению уравнения (5).

**Глава 3** содержит экспериментальные данные, полученные при исследовании газожидкостных струй коаксиальных форсунок. Раздел 1 посвящен исследованию ближнего следа высокоскоростной газожидкостной струи. Исследованы форсунки с тонкой и толстой центральными трубками. При исследовании форсунки с тонкой центральной трубкой на сверхзвуковых режимах обнаружено значительное изменение картины скачков: диск Маха в двухфазной области распадается на две структуры, головной и тыльный скачки. Образование данной структуры при росте расхода жидкости показано теневыми картинками истечения струи (рис.3): с

одной стороны, происходит рост концентрации капель за диском Маха вследствие уменьшения скорости газа, что приводит к образованию облака частиц и головной ударной волны на нем. С другой, сам диск деформируется вследствие резкого спада скорости звука в двухфазной области и, как следствие, роста чисел Маха газового потока. Вследствие этих явлений скачки расходятся и образуется линзовидная структура из головного и тыльного скачков, при дальнейшем росте концентрации головной скачок отрывается от «тройной» точки и сдвигается вверх по потоку, тыльный же скачок, оказавшись в зоне повышенной концентрации частиц, исчезает.

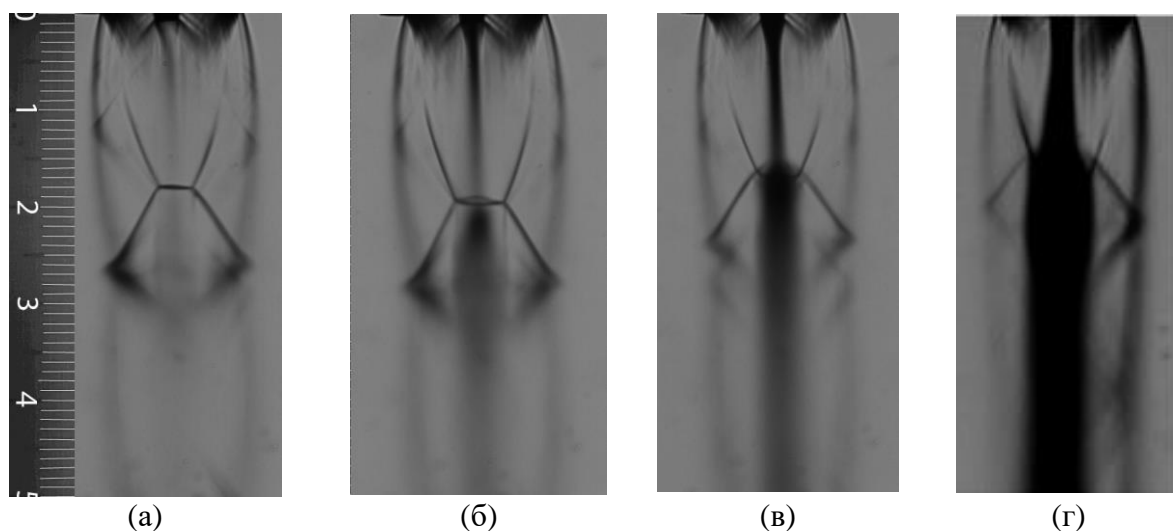


Рис.3. Теневые изображения струи на режиме  $N_{прб}$  в отсутствие

жидкости (а), при малых расходах жидкости (б, в) и при расходе 20 л/ч (г)

Показано (Глотов, 1998), что изгиб диска Маха вверх по потоку приводит к формированию за ним зоны с рециркуляционным течением газа. В данном случае скачком, способным сформировать такое течение, является головной скачок на облаке частиц. Определенным свидетельством наличия такого течения в двухфазной области можно считать значительное расширение струи за скачком (рис.3б-г), однако для того, чтобы установить факт образования рециркуляционной зоны точно, необходимы анемометрические измерения. На рис.4а представлены профили скорости капель в ближнем следе струи, на рис.4б – восстановленная по ним скорость

газа на оси струи. Видно, что непосредственно за скачком скорость приобретает отрицательные значения, при расходе 20 л/ч также заметно наличие остатков второго скачка (на удалении 22-23 мм от среза сопла). При повышении расхода остаток второго скачка исчезает, однако на удалении 35-40 мм начинает развиваться вторая ячейка, полностью оформляющаяся при расходе 100 л/ч. Дальнейший рост расхода жидкости приводит к общему спаду скорости капель и, по всей видимости, к дальнейшему формированию ячеек (на рис.4б при расходе 100 л/ч заметна зачаточная структура на удалении 47 мм).

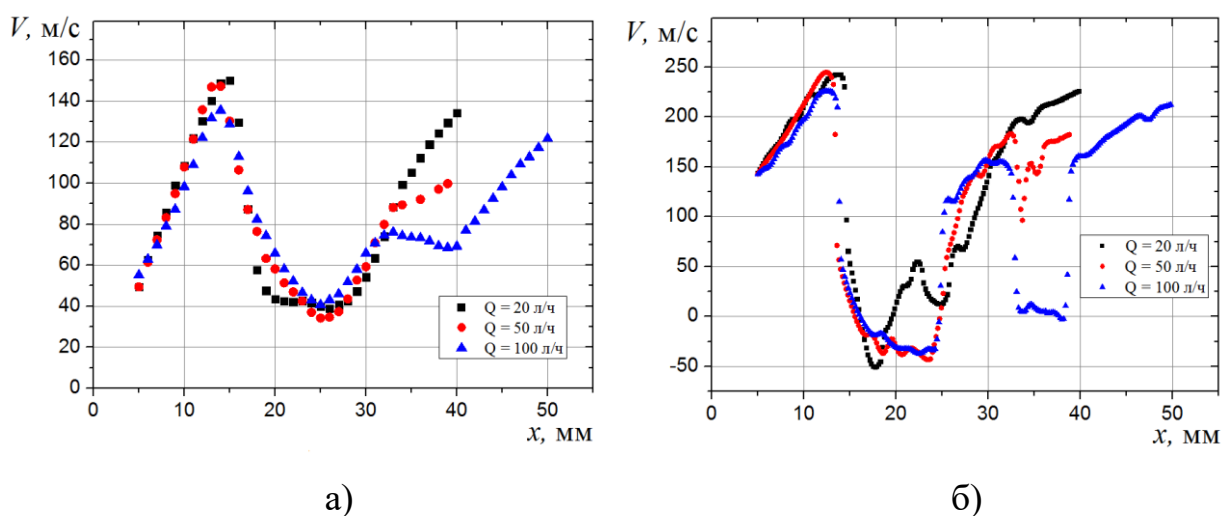
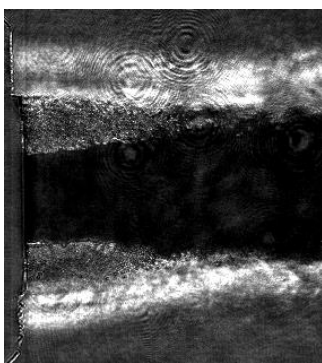


Рис.4. Профили скорости дисперсной фазы на оси струи (а) и восстановленная по ним скорость газа (б) на режиме Nпр6 при различных расходах жидкости

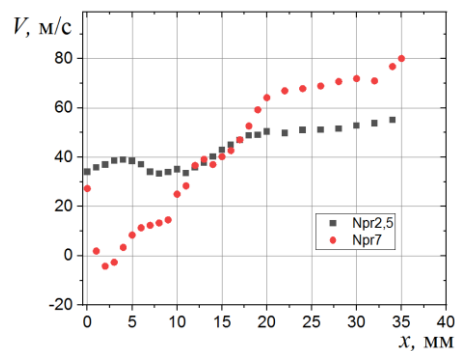
Увеличение отношения диаметра центральной трубки к диаметру газового сопла приводит к «размыванию» области за скачком и формированию зоны с неизменной скоростью газа на высоких расходах. Причиной этого, вероятно, является значительный рост размеров капель при росте расхода жидкости свыше 100 л/ч и больший диаметр газожидкостного ядра струи, что приводит к большему влиянию спрея на осевую скорость газа.

Исследование ближнего следа толстостенной центральной трубки показало значительное изменение характера истечения газожидкостной

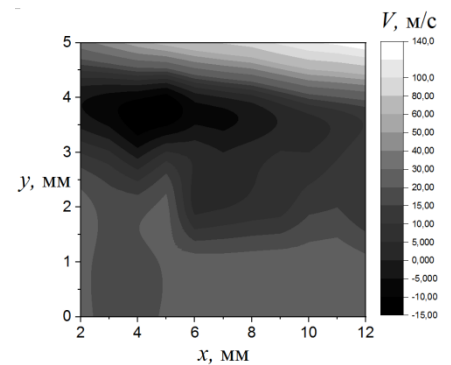
струи. Выявлено образование тороидальных вихрей в следе трубки, унос жидкости которыми приводит к затенению струи жидкости каплями (рис.5а). Показано, что на удалении 3-4 калибров находится зона разворота потока и отрыва капель. Наличие вихревых течений в этой области приводит к спаду скорости струи жидкости, особенно заметному на сверхзвуковых режимах (рис.5б), что приводит к кардинальному изменению картины течения. Также данное явление приводит к задержке первичного разрушения струи и уменьшению его интенсивности. Для наилучшего понимания природы явления выполнены анемометрические измерения продольной компоненты поля скорости капель (рис.5в), показано наличие зоны обратного течения (черная область,  $y = 4$  мм,  $x = 2-8$  мм). Очевидно, что в данном случае эта зона находится между течениями, направленными вниз по потоку, таким образом, имеет место пара вихрей, образующих зону с обратным течением газа в данной области. Показано, что наполнение этой структуры каплями с ростом скорости истечения газа происходит менее интенсивно при бóльших расходах жидкости, что, вероятнее всего, связано с бóльшим временем на развитие неустойчивости в менее скоростных струях жидкости.



а)



б)



в)

Рис.5. Изображение околосопловой структуры на режиме Npr2 (а), профили скорости на оси струи (б) и продольная компонента поля скорости (в) на режиме Npr2,5; все данные при  $P_1=8$  атм

Исследование уменьшенных копий форсунок показало, что газожидкостные струи, образованные ими, также имеют указанные особенности. Данные визуализации показывают наличие околосопловых вихрей, при этом вихри остаются прозрачными на более высоких режимах по газу. Причиной этого является значительно меньший путь света через двухфазную область.

В *разделе 2* описываются результаты исследования дальнего следа газожидкостной струи. Показано, что профили скорости капель (рис.6а) в этой области имеют характерный вид с достижением максимума на удалении 75-125 мм от среза сопла, после чего капли релаксируют с потоком газа; механизмы диспергирования капель в данной области не представлены, что демонстрирует значение чисел Вебера капель в струе (рис.6б). Пороговое значение (горизонтальная линия) капли превышают на удалениях 50-140 мм, разрушение капель происходит лишь в этой области. Далее происходит коагуляция капель, слегка увеличивающая размеры частиц. На всех режимах положение максимума скорости не зависит от режима истечения по газу и определяется расходом жидкости. При высоких расходах жидкости (от 500 л/ч) после достижения максимума скорости формируется зона с почти неизменной скоростью капель. Скорость на дозвуковых режимах на удалениях свыше 50 мм при этом не изменяется совсем. Причиной тому является энергетический баланс струи, при росте расхода жидкости энергия, по всей видимости, перераспределяется от кинетической энергии струи к энергии диспергирования и поверхностного натяжения капель. Исследования маломасштабных копий форсунок показало схожесть профиля скорости, при этом на больших удалениях (порядка 100 калибров) скорость перестает изменяться. Положение максимума скорости смещается к соплу пропорционально масштабному фактору и не зависит от режима истечения газа.

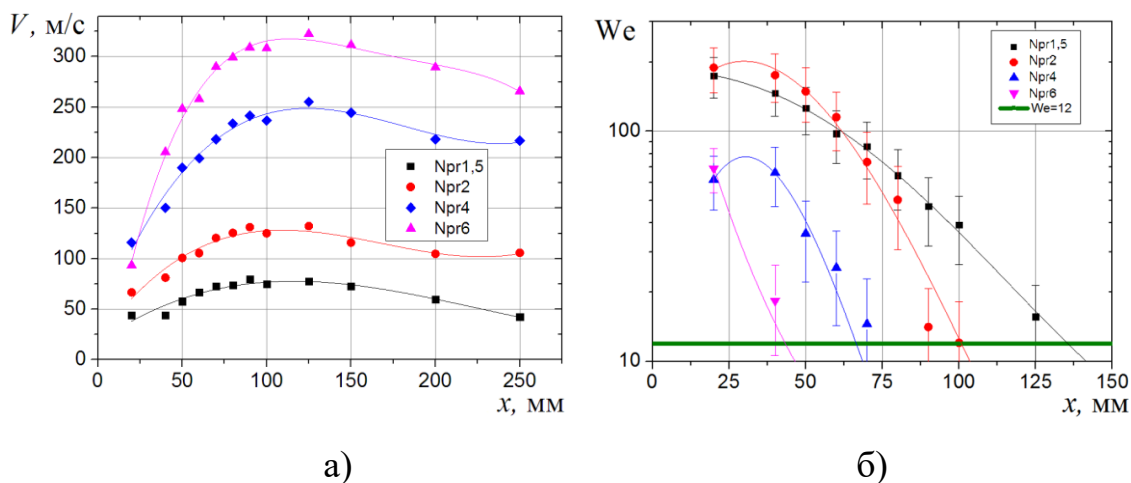


Рис.6. Профили скорости в дальнем следе струи (а) и числа Вебера (б) газожидкостной струи при расходе 180 л/ч

**Выводы:** Выполнено комплексное экспериментальное исследование газожидкостной струи коаксиальной форсунки на различных режимах истечения. При исследовании ближнего следа рассмотрено изменение картины скачков недорасширенной сверхзвуковой струи газа при добавлении жидкости. Показан распад диска Маха на две структуры: головной скачок на облаке частиц и тыльный, образованный непосредственно диском. Тыльный скачок существует лишь при сверхмалом расходе жидкости, с ростом расхода он исчезает; головной скачок с ростом расхода отрывается от тройной точки и существует отдельно. Показано наличие возвратного течения газа на оси газожидкостной струи, его влияния на скорость капель в струе. Рассмотрен механизм формирования бочек недорасширенной струи и их развития с ростом расхода жидкости. Исследовано влияние толщины среза трубки подачи жидкости на развитие газожидкостной струи, показано наличие вихревой структуры в следе трубки и развитие структуры с ростом давления газа. Рассмотрено влияние вихревой структуры на скорость струи жидкости и первичное разрушение струи. При исследовании дальнего следа струи получен характерный профиль скорости капель с ускорением до определенного максимума и последующей релаксацией в потоке газа. Показано, что в зоне релаксации нет вторичного разрушения капель, здесь

имеет место их коагуляция и рост размеров. Положение максимума скорости зависит исключительно от расхода жидкости. Спад скорости капель заканчивается приблизительно в 100 калибрах от среза сопла; далее газожидкостный поток является равновесным и дисперсность капель не изменяется.