

Оптические исследования динамики развития водяной струи высокого давления

И. А. Знаменская, Д. А. Нерсесян, Н. Н. Сысоев, Е. Ю. Коротеева, Я. Н. Ширшов

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества.*

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ogon93@yandex.ru

Статья поступила 17.03.2016, подписана в печать 16.05.2016.

В работе представлены результаты оптических исследований высокоскоростных струй жидкости, истекающих из струеформирующего сопла при давлении 400 МПа. Целью работы является получение новой информации о течении двухфазной среды при экстремальных условиях, а также анализ возможности оптимизации конструкции устройства. Рассматривается процесс выхода высокоскоростной струи жидкости из фокусирующей трубки установки гидроабразивной резки Flow Waterjet Mach 3, ее развитие и стационарное течение. Теневым методом исследовались начальная стадия выхода головной части струи из сопла, а также динамика движения лидера струи в течение первых 200–400 мкс после открытия клапана при рабочем давлении насоса 400 МПа. Для изучения процесса формирования струи проведена съемка высокоскоростной камерой Photron FASTCAM SA5, обеспечивающей временное разрешение съемки до 1 000 000 кадров/с с экспозицией 1 мкс, и тепловизором FLIR SC7000, обеспечивающим временное разрешение съемки до 400 кадров/с с экспозицией 1 мс. Измерены пространственно-временные характеристики струи, выходящей из фокусирующей трубки. В результате цифровой обработки серий изображений струи измерены скорость и ускорение головной части струи в стартовом процессе.

Ключевые слова: струя, течение, высокое давление, высокоскоростная струя, двухфазная жидкость.

УДК: 532.525.2, 532.525.3. PACS: 06.60.Jn, 47.27.nf, 47.27.wg.

Введение

Гидроабразивная струйная обработка материалов используется во многих технологических цепочках. С помощью гидроабразивной струи могут быть обработаны любые известные твердые и аморфные материалы (камень, металл, стекло, керамика, резина, полиэтилен и др.). Рабочим телом в данной технологии является высокоскоростная струя смеси воды и абразивных частиц.

В последние годы проводились экспериментальные и теоретические исследования функционирования как процесса гидроабразивной обработки, так и течений в отдельных элементах установки (струеформирующего сопла, создающего струю высокого давления; фокусирующей ускорительной трубки, в которой частицы абразива приобретают импульс струи) с целью получения новой информации о течении многофазных сред при экстремальных условиях, а также с целью оптимизации конструкции устройства [1, 2].

Так, в работе [3] исследовались струи, истекающие в горизонтальном направлении из сопла с диаметром 4.5–5 мм при давлении от 5 до 350 кПа. Механическим методом проводилось измерение скорости. В результате авторы показали, что скорость струи постоянна в пределах погрешности вплоть до расстояния 50 см от сопла, также были получены и сравнены параметры струи, истекающей из сопел с различной формой канала.

В работе [4] выполнено моделирование процесса

воздействия одной абразивной частицы на обрабатываемый материал с помощью метода конечных элементов. При моделировании воздействия в работе учитывалась деформация материала и частицы. Определялась зависимость показателя сферичности кратера от скорости струи и угла ее воздействия на материал. В результаты авторы показали, что чем выше скорость струи, тем меньше сферичность кратера, независимо от этого фактора, если угол воздействия равен 90°, то форма кратера зависит от формы абразивной частицы.

Авторы работы [5] исследовали процессы, сопутствующие гидроабразивной резке, с применением методов механики сплошных сред. Для моделирования движения жидкости в соплах различной формы с последующим выявлением особенностей движения абразивных частиц и струи жидкости на выходе из сопла использовался пакет моделирования AUTODYN. В ходе исследования выяснилось, что форма сопла значительно влияет на ускорение струи: чем больше разница входного и выходного диаметра сопла, тем быстрее струя набирает конечную скорость. При моделировании взаимодействия частиц с внутренними стенками фокусирующей трубки показано, что частицы совершают сложное колебательное движение. Колебания частиц происходят неравномерно, следствием чего является неравномерный износ струеформирующего канала.

Между тем стартовый процесс, имеющий важное значение для анализа воздействия струи на материал, практически не исследовался. При развитии

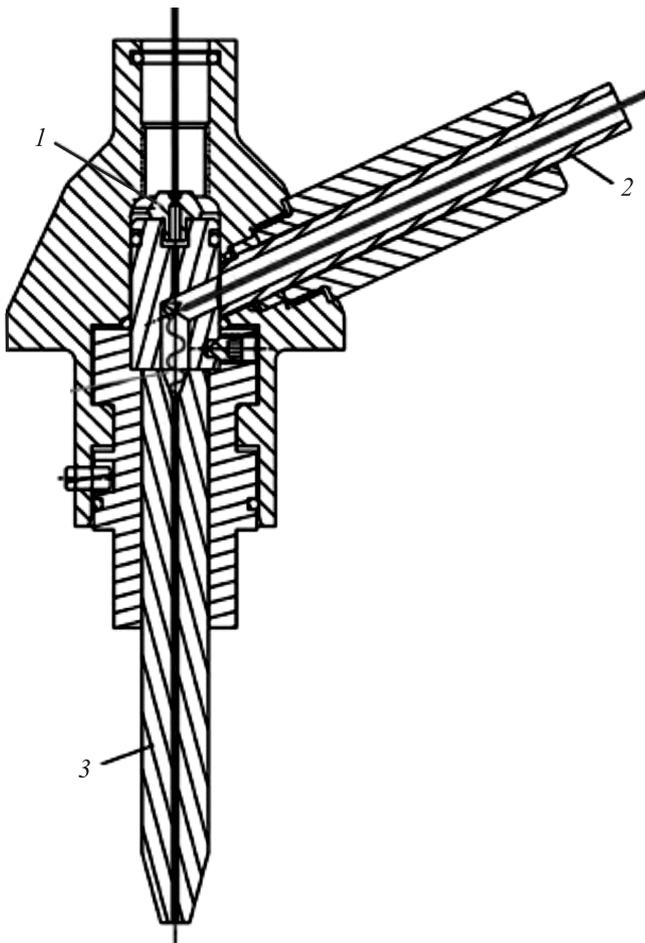


Рис. 1. Устройство гидроабразивной головки. Жидкость под давлением подается сверху, проходит камеру смешения с абразивом, протекая через фокусирующую трубку, на выходе представляет собой смесь воды с абразивом, являющуюся рабочим телом в технологии гидроабразивного резания. Обозначения: 1 — струеформирующее сопло, 2 — трубка подачи абразива, 3 — сопло (фокусирующая трубка)

импульсной жидкой струей топлива со сверхзвуковой скоростью были зарегистрированы ударно-волновые конфигурации [6]. С целью изучения динамических характеристик струи, выходящей из сопла рабочей головки станка гидроабразивной резки (рис. 1), в настоящей работе теневым методом с использованием высокоскоростной камеры выполнена съемка всего процесса, также выполнена съемка тепловизором высокого разрешения.

1. Описание экспериментальной установки

Для получения струи высокой скорости был использован промышленный станок гидроабразивной резки Flow Waterjet Mach 3. Станок позволяет получить высокоскоростную водную струю, проходящую через струеформирующее сопло, имеющее канал сложной формы характеристическим диаметром 0.3 мм, при давлении 100 или 400 МПа и скорости струи, превышающей скорость звука до трех

раз [7, 8]. Проходя через камеру смешения с абразивом и фокусирующую трубку диаметром 1 мм и длиной 74 мм, струя выходит в открытое пространство при нормальных условиях [3]. Диаметр центральной зоны струи составляет 1 мм [5]. В настоящей работе был исследован процесс выхода из фокусирующей трубки и формирования высокоскоростной водной струи без подачи абразива при рабочем давлении насоса 400 МПа.

Для фиксации процесса формирования струи проводилась съемка объекта с помощью сверхскоростной камеры Photron FASTCAM SA5 с объективом Nikon AF NIKKOR, позволяющей снимать до 1 млн кадров/с и общей длительностью видеопленки 2 с. Синхронизация включения камеры и струи выполнялась вручную, поскольку максимальное время съемки (2 с) много больше времени установления стационарного состояния струи (1 мс), таким образом, не было необходимости в реализации точной системы синхронизации. Также велась съемка тепловизионной камерой FLIR SC7000, работающей в спектральном диапазоне 3.7–4.8 мкм и обладающей временным разрешением до 400 кадров/с. Общая длительность полученных тепловизионных фильмов составляла от 5 с до 3 мин, на них регистрировалось несколько последовательных независимых запусков струи.

2. Оптическая регистрация стартового процесса

Были проведены серии экспериментов с высокоскоростной регистрацией быстропротекающего процесса начальной стадии формирования струи. Схема установки изображена на рис. 2. Расстояние от объектива камеры до образца составляло 44 см, давление воды до струеформирующего сопла состав-

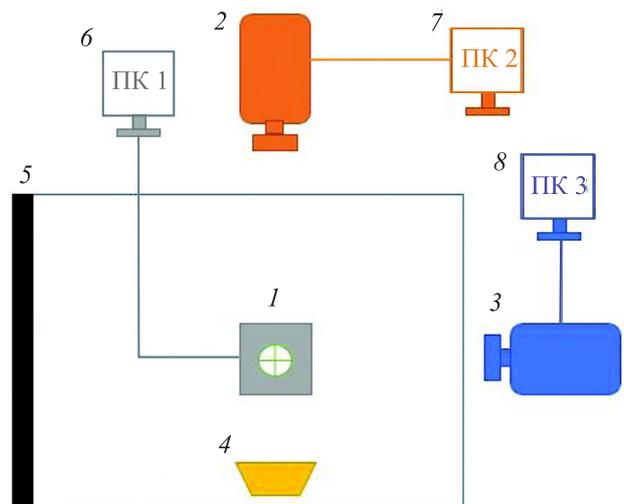


Рис. 2. Схема эксперимента (вид сверху). Обозначения: 1 — установка Flow Waterjet Mach 3; 2 — высокоскоростная камера Photron FASTCAM SA5; 3 — тепловизор; 4 — лампа; 5 — черный экран; 6 — ПК 1, отвечающий за управление установкой; 7 — ПК 2, отвечающий за управление камерой; 8 — ПК 3, отвечающий за управление тепловизором

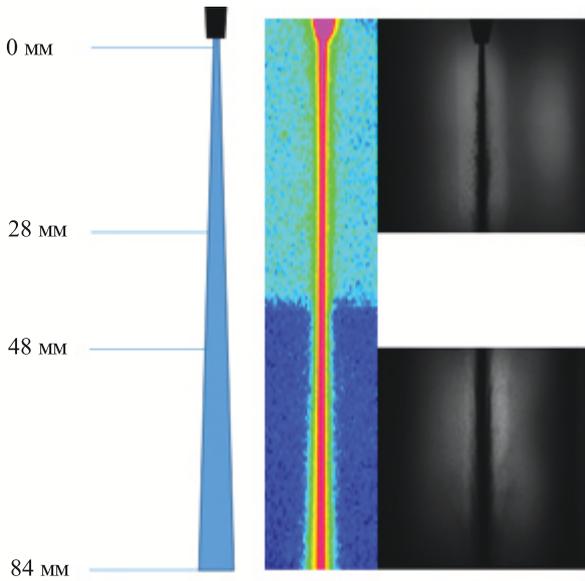


Рис. 3. Верхняя и нижняя области съемки. Слева направо горизонтальными отрезками показаны координаты начал и концов двух областей съемки высокоскоростной камерой, верхней от 0 до 28 мм и нижней от 48 до 84 мм; далее схематично изображены сопло и выходящая из него расходящаяся струя (цвет не несет смысловой нагрузки); далее приведена фотография струи на всей высоте ее распространения, полученная тепловизором (цвет отражает энергетические единицы); справа — фотографии струи в верхней и нижней областях съемки высокоскоростной камерой. Масштаб рисунка выдержан по вертикали

вило 400 МПа. Для зондирования была использована лампа 500 Вт с удлиненной светящейся нитью накаливания, ориентированной в вертикальном положении. Объектив камеры фокусировался на ось струи.

Поскольку область съемки струи с необходимым разрешением не охватывала ее полностью по высоте (~130 мм), были выбраны два варианта расположения камеры по высоте относительно нижней границы сопла: верхняя и нижняя области (рис. 3). Видимый участок струи в верхней области составлял 28 мм, в нижней 36 мм. Скорость съемки и разрешение выбирались в диапазонах 100 000 / 50 000 / 30 000 кадров/с и 320×192 / 512×272 / 640×376 пикселей соответственно. Для контроля светового потока использовался нейтральный оптический фильтр.

В ряде экспериментов трубка подачи абразива оставалась открытой (рис. 1). При закрытой трубке закрыт подсос воздуха при прохождении струи через фокусирующую трубку. Наконец, в части экспериментов внутренние объемы формирующей струю головки продувались сжатым воздухом.

3. Регистрация стартового процесса на тепловизор

Схема установки при съемке тепловизором показана на рис. 2. Время интеграции детектора тепловизионной камеры FLIR SC7000 при скорости съемки 400 кадров/с составляло 1032 мкс. Расстояние от объектива тепловизора до образца составило 103 см, давление воды до струеформирующего сопла составляло также 400 МПа. Так же как и для экспериментов при съемке высокоскоростной камерой, трубка для подачи абразива в ряде экспериментов была открытой.

Поскольку вода является практически непрозрачной для излучения в рабочем диапазоне ИК-спектра (3.7–4.8 мкм), тепловизором велось наблюдение периферийной области струи и ее воздушно-водной

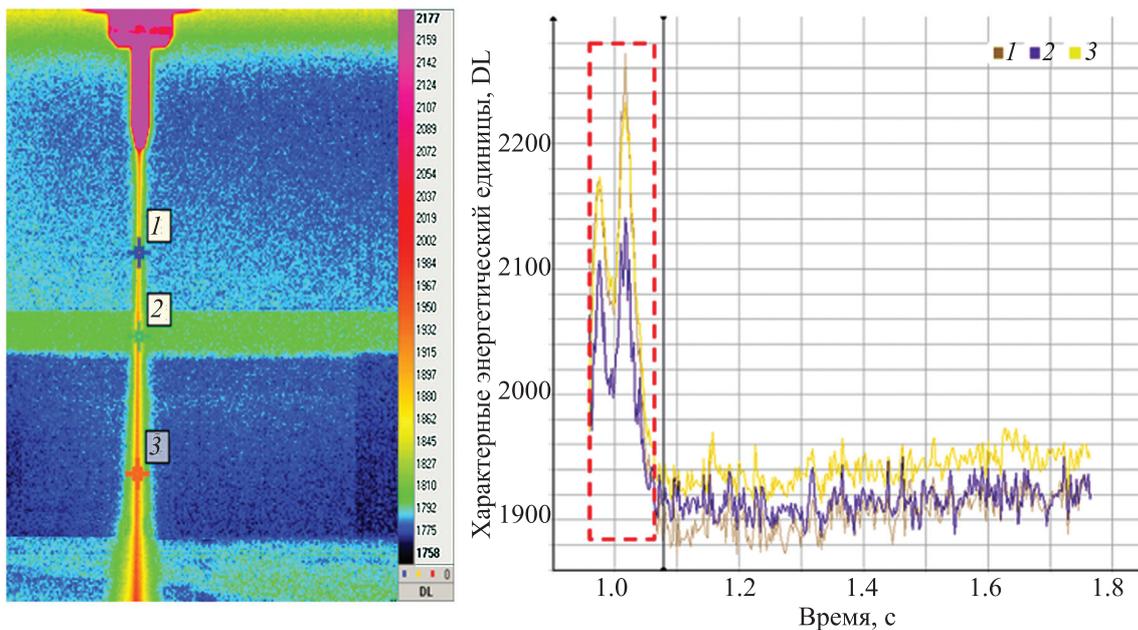


Рис. 4. Пример термограммы высокоскоростной струи с указанием опорных точек (слева) и временная развертка запуска в интервале за 0.8 с после включения (справа)

оболочки. Пример типичной термограммы высокоскоростной незатопленной струи и временных разворотов температуры в выделенных опорных точках представлен на рис. 4.

При анализе термограмм было обнаружено, что при запуске струи происходит однократное колебание температуры с амплитудой порядка 2–3°C в интервале времени 0.1 с от начала включения. Затем наблюдается выход на стационарный режим.

4. Анализ результатов

Были получены видеофильмы процесса развития струи. Общая длительность процесса инициирования и развития струи составило около 1 мс. Для верхней области время ее прохождения лидером составляло 0.35 мс, что включает около 100 последовательных кадров процесса. Ввиду высокой оптической плотности объекта изображения струи получены преимущественно за счет поглощения зондирующего света. В двухфазной оболочке центральной зоны струи зарегистрированы зоны рассеяния света, визуализирующие высокоскоростные спутные структуры. В установившемся стационарном режиме центральная часть струи движется со сверхзвуковой скоростью [8]; однако сверхзвуковых возмущений, генерируемых спутным течением, зарегистрировано не было.

На рис. 5, 6 слева направо и сверху вниз показаны последовательные кадры выхода лидера струи из сопла и ее развития для двух экспериментов, стартовые условия в этих экспериментах были одинаковыми. Форма струи различается от запуска к запуску даже при одинаковых условиях старта струи. Общая длительность изображенного процесса в одном случае составила 0.32 мс, в другом 0.86 мс, соответствующие интервалы между отдельными кадрами составили 0.04 и 0.11 мс. На рис. 7 показаны последовательные кадры развития процесса становления струи в нижней области съемки. Показано девять кадров с интервалом 0.033 мс между ними общей длительностью 0.266 мс. Такие интервалы определены равномерным по времени выбором кадров в целях удобства демонстрации.

Для обработки и анализа изображений в каждом эксперименте были выбраны серии кадров. Первым кадром в серии брали второй кадр из двух, в которых в первом кадре визуально струя отсутствует, во втором — присутствует. Последним кадром в серии брали первый кадр из двух, в которых в первом кадре струя присутствует, во втором — отсутствует. Для нижней области использовался такой же алгоритм. Визуально конфигурация струи в верхней области съемки весьма различна. Для каждой фотографии определялось положение лидера струи по вертикали в пикселях, которое с помощью реперного кадра

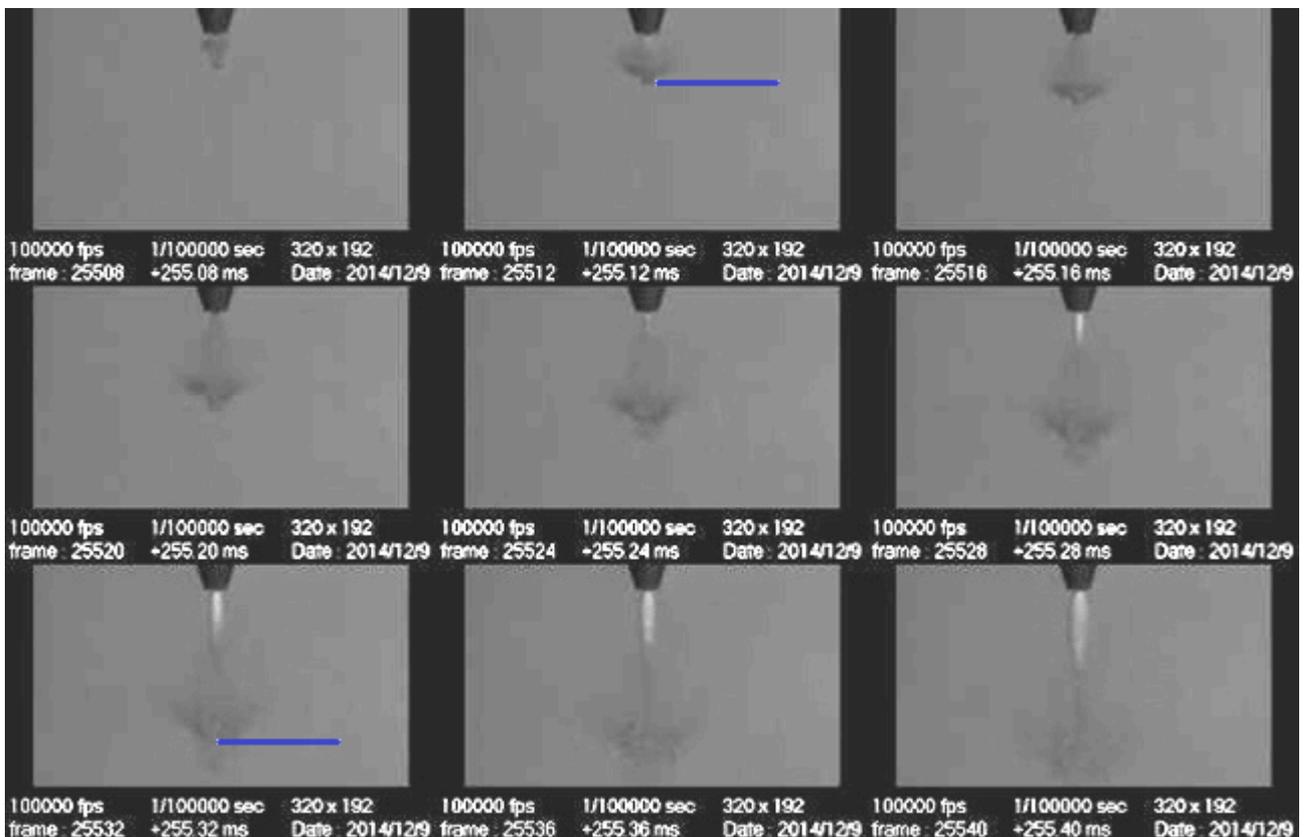


Рис. 5. Снимки выхода лидера и развития струи при съемке 100 000 кадров/с. Последовательно слева направо и сверху вниз изображены девять фотографий выхода струи из сопла. Фотографии выбраны равномерно через каждые 0.04 мс в периоде 0.32 мс. Отрезком указано положение лидера струи

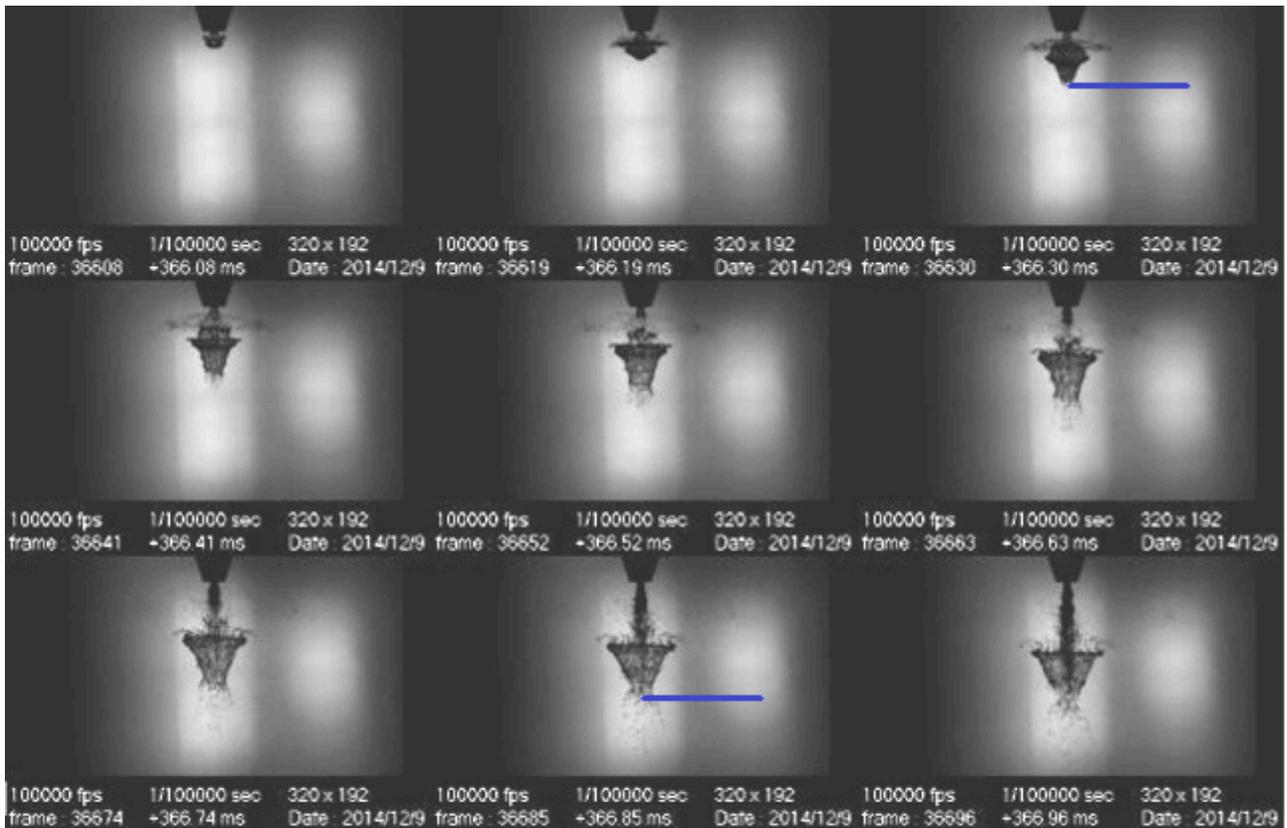


Рис. 6. Снимки выхода лидера и развития струи при съемке 100 000 кадров/с. Последовательно слева направо и сверху вниз изображены девять фотографий выхода струи из сопла. Фотографии выбраны равномерно через каждые 0.11 мс в периоде 0.86 мс. Отрезком указано положение лидера струи

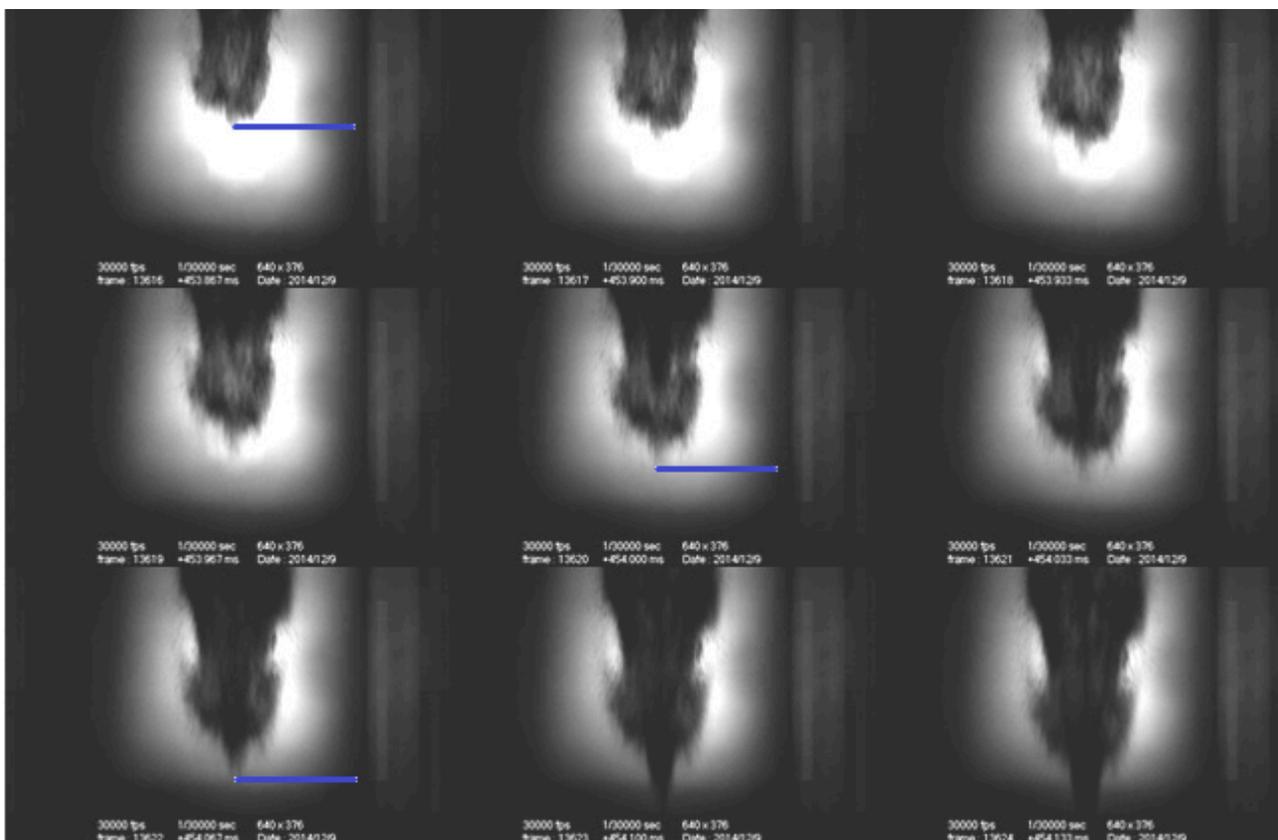


Рис. 7. Снимки развития струи при съемке со скоростью 50 000 кадров/с. Последовательно слева направо и сверху вниз изображены девять фотографий выхода струи из сопла. Фотографии выбраны равномерно через каждые 0.033 мс в периоде 0.266 мс. Отрезком указано положение лидера струи

пересчитывалось в миллиметры. Под лидером струи следует понимать визуально определяемую крайнюю граничную точку сплошной области изучаемого объекта в направлении скорости потока (рис. 5, 6, 7). Неопределенность в нахождении положения лидера составила около 1 мм.

Построены графики зависимости координаты лидера струи от времени. По полученным зависимостям построены графики зависимости скорости лидера струи от его координаты. Оценены усредненные скорости лидера струи и их эволюция.

На рис. 8 представлены графики зависимости координаты лидера струи x от времени для съемки в верхней области. Скорость в верхней области находится в диапазоне от 50 до 80 м/с на протяжении всей области съемки. В силу большой изменчивости процесса в этой области зависимость скорости от координаты установить не удалось.

График зависимости положения лидера струи для нижней области съемки приведен на рис. 9. Из гра-

фика видно, что скорость от 52 м/с увеличивается, оставаясь в диапазоне от 79 до 87 м/с на нижней границе нижней области съемки.

Графики зависимости скорости лидера струи от координаты для нижней области представлены на рис. 10. Из графика видно, что лидер струи ускоряется на участке 60–77 мм; его скорость достигает 270 м/с к нижней границе второй области съемки. Погрешность определения скорости составила 20 м/с.

Экстраполяция скорости лидера струи позволяет оценить предполагаемое время выхода струи на сверхзвуковой режим как 0.2–0.4 мс после старта или на расстоянии 80–100 мм от сопла.

Время интеграции (экспозиции) тепловизора много больше времени экспозиции высокоскоростной камеры, таким образом, изображение, полученное при помощи тепловизора, можно представить как суммарное изображение некоторого количества изображений, полученных с помощью высокоскорост-

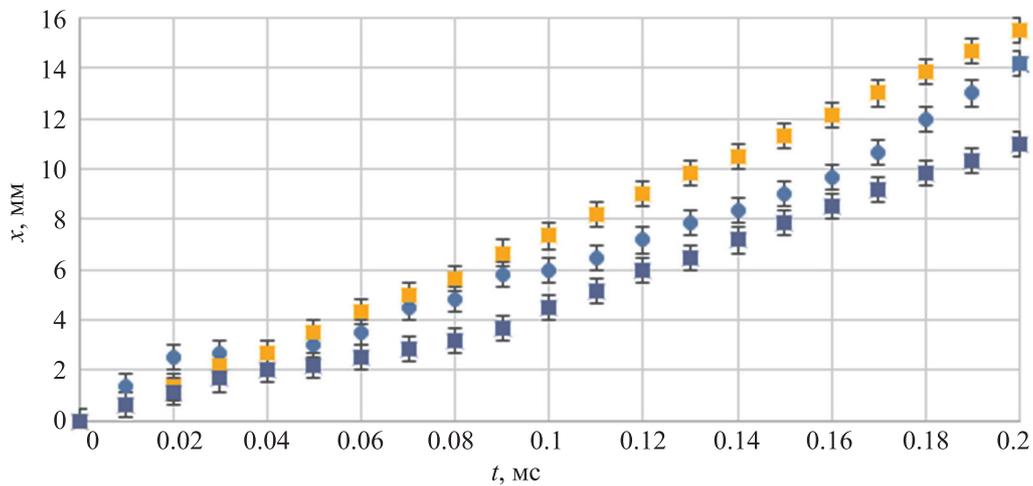


Рис. 8. Зависимость координаты лидера струи от времени в верхней области съемки высокоскоростной камерой. Показаны результаты трех запусков струи

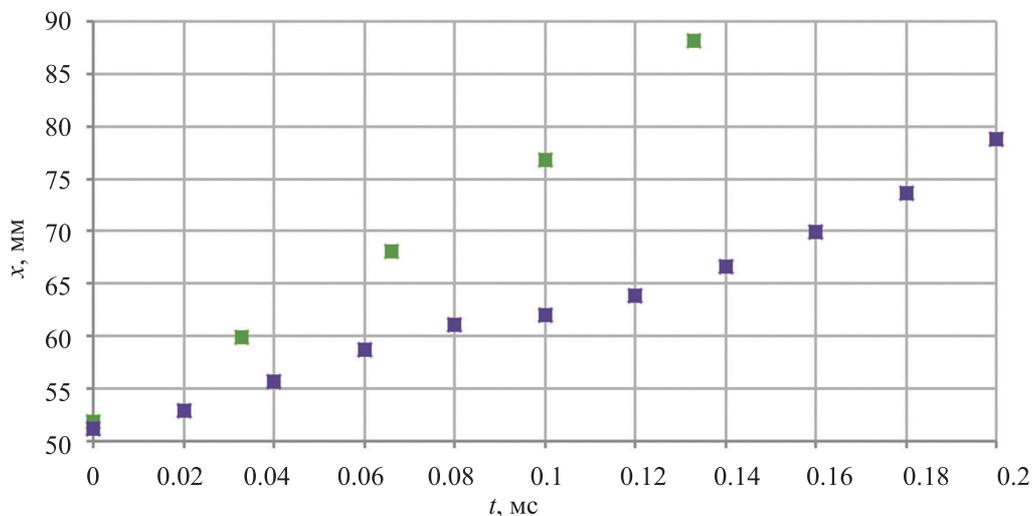


Рис. 9. График зависимости положения лидера струи для экспериментов в нижней области съемки высокоскоростной камерой. Показаны результаты двух запусков струи. В одном случае показан высокий, во втором — низкий рост скорости лидера струи

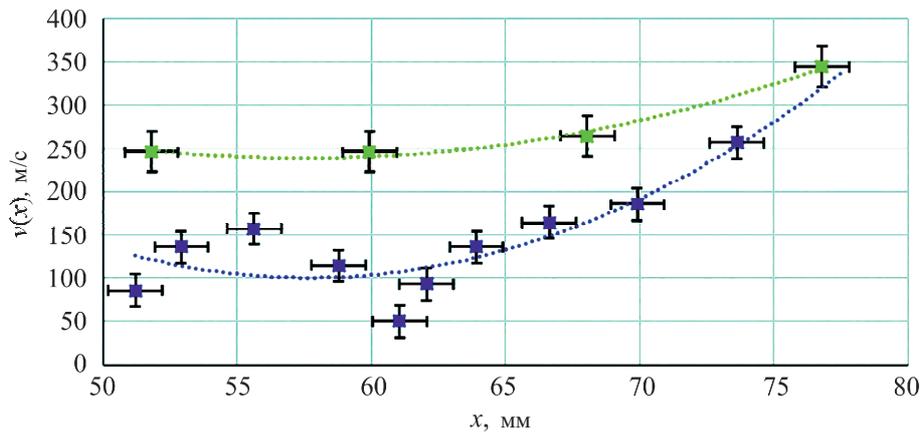


Рис. 10. Графики зависимости скорости лидера струи от координаты в нижней области съемки. Кривые соответствуют кривым на рис. 9

ной камеры. Для учета разницы времени съемки кадров вводится понятие эффективного времени экспозиции. Эффективное время экспозиции — это время между началом изучаемого процесса и закрытием диафрагмы тепловизора. На рис. 11 приведено изображение изучаемого процесса, полученное тепловизором. Эффективное время экспозиции соответствует положению лидера струи, показанному на двух кадрах, полученных при съемке высокоскоростной камерой. За время экспозиции тепловизора 1 мс накапливается 1000 кадров высокоскоростной камеры со временем экспозиции 1 мкс. За эффективное время экспозиции в отдельный кадр тепловизора попадает не больше чем 1000 кадров высокоскоростной камеры. Таким образом, исходя из оценки времени прохождения струей пути, попадающего в объектив высокоскоростной камеры, на отдельном кадре, полученном на тепловизоре, изображено усреднение по 100–300 кадров стартового процесса

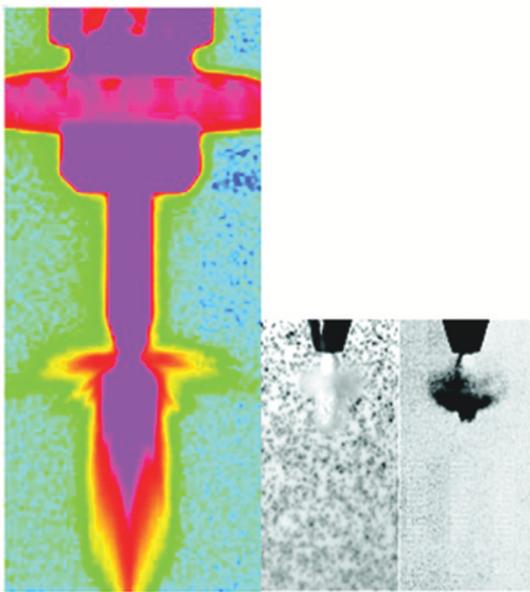


Рис. 11. Снимки выхода струи из сопла, выполненные тепловизором и высокоскоростной камерой

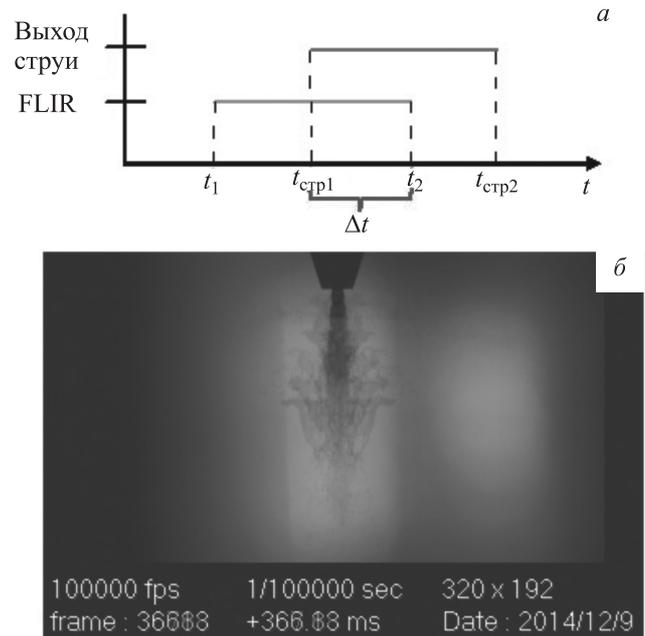


Рис. 12. а) t_1 соответствует времени открытия диафрагмы тепловизора FLIR; t_2 соответствует времени закрытия диафрагмы тепловизора FLIR; $t_{стр1}$ соответствует времени, когда струя начинает выходить из фокусирующей трубки; $t_{стр2}$ соответствует времени, когда процесс развития струи окончен и она становится стационарной; $\Delta t = t_2 - t_{стр1}$ — период, за который высокоскоростная камера снимает определенное количество кадров. б) Наложение пяти кадров полученных высокоскоростной камерой с временной задержкой между ними 500 мкс

и 700–900 кадров стационарного процесса, полученных на высокоскоростной камере. Чтобы управлять эффективным временем экспозиции, требуется с управляемой задержкой включать съемку кадра тепловизора и открывать клапан включения струи (рис. 12).

Заключение

В настоящей работе с помощью высокоскоростной регистрации изучен быстротекающий процесс выхода водной струи из фокусирующей трубки

рабочей головки установки гидроабразивной резки. Получены количественные динамические характеристики образования и развития головной части струи, движущейся с ускорением. Показано, что скорость лидера струи меняется от 30 до 270 м/с. Обнаружено, что при запуске струи происходит однократное колебание температуры с амплитудой порядка 2–3°С в интервале времени 0.1 с от начала включения, за которым следует выход на стационарный режим.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы развития МГУ и при поддержке РФФИ (грант 16-38-60186).

Список литературы

1. Maniadaki K., Kestis T., Bilalis N. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2007. **31**. P. 933.
2. Guha A., Barrona R.M., Balachandar R. // *J. of Materials Processing Technology*. 2011. **211**. P. 610.
3. Котоусов Л.С. // Журн. техн. физики. 2005. **75**, № 9. С. 8.
4. Ahmadi-Brooghani S.Y., Hassanzadeh H., Kahhal P. *Modeling of Single-Particle Impact in Abrasive Water Jet Machining*. 2007.
5. Герасимова А.М., Ефимова С.А., Прохорова А.В., Колпаков В.И. Особенности физико-математической постановки и численного решения типовых задач гидроабразивной резки различных материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
6. Matthujak A., Pianthong K., Takayama K., Milton B.E. *Experimental Study of Ignition over Impact-Driven Supersonic Liquid Fuel Jet*. 2013.
7. Латыпов Р.Р., Терегулов Н.Г., Харлов А.И. Некоторые сведения о гидрорезании материалов. Уфимский государственный авиационный технический университет, 1999.
8. Тихомиров Р.А., Бабанин В.Ф., Петухов Е.Н. Гидрорезание судостроительных материалов. Л.: 1987.

An optical study of high-pressure water-jet dynamics

I. A. Znamenskaya, D. A. Nersesyan, N. N. Sysoev, E. Yu. Koroteeva, Ya. N. Shirshov

Department of Molecular Processes and Extreme States of Matter, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ogon93@yandex.ru.

This paper considers the results of an optical study of high-speed fluid jets ejected from a nozzle at 400 MPa. The objective was to study two-phase flows under extreme conditions and to analyze the possibility of the optimization of the device design. The process of a high-speed water jet as it exits the focusing tube of the Flow WaterJet Mach3 abrasive cutting machine, along with its development, and the state of the stationary flow are considered. The shadow method was used to investigate the initial stage of high-speed water-jet formation, as well as the jet-head dynamics during the first 200–400 μ s after ejection at 400 MPa. A Photron FASTCAM SA5 high-speed camera with a frame rate of one million shots per second and an exposure time of 1 μ s and a FLIR SC7000 infrared thermal camera with a frame rate of 400 shot/s and an exposure time of 1 ms were employed in order to study the jet-formation process. The spatiotemporal characteristics of the jet-development process were analyzed. The jet velocity and the starting jet head acceleration were measured by post-processing of digital images.

Keywords: jet, flow, high pressure, high-speed jet, two-phase liquid.

PACS: 06.60.Jn, 47.27.nf, 47.27.wg.

Received 17 March 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2016. **71**, No. 4. Pp. 405–412.

Сведения об авторах

1. Знаменская Ирина Александровна — профессор; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: znamen@phys.msu.ru.
2. Нерсесян Дмитрий Араатович — студент; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: nersdima@mail.ru.
3. Сысоев Николай Николаевич — профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-10-97, e-mail: nn.sysoev@physics.msu.ru.
4. Коротева Екатерина Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-27-41, e-mail: koroteeva@physics.msu.ru.
5. Ширшов Ярослав Николаевич — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-48-58, e-mail: ogon93@yandex.ru.