

УДК: 532.525.2: 532.525.3

И.А. Знаменская, Д.С. Наумов, Д.А. Нерсисян, Н.Н Сысоев, Я.Н. Ширшов

*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, E-mail: nersdima@mail.ru*

## **ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ВОДЯНОЙ СТРУИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

### **АННОТАЦИЯ**

В работе представлены результаты исследований оптическими методами высокоскоростных струй жидкости, истекающих из сопла, создающего струю высокого давления. 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 станка гидроабразивной резки Flow WaterJet Mach3, ее развитие и стационарное течение. Теневым методом исследовались начальная стадия выхода головной части струи из сопла; динамика движения лидера в течение 0,2 – 0,4 миллисекунд при рабочем давлении насоса 400 МПа. Для изучения процесса формирования струи проведена съемка высокоскоростной камерой Photron FASTCAM SA5 со скоростью съемки до 100 000 кадров в секунду с экспозицией 1 мкс. Измерены пространственно-временные характеристики струи, выходящей из фокусирующей трубки. В результате цифровой обработки серий изображений струи измерена скорость и ускорение головной части струи в стартовом процессе.

**СТРУЯ, ТЕЧЕНИЕ, ВЫСОКОЕ ДАВЛЕНИЕ, ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ СТРУЯ,  
ДВУХФАЗНАЯ ЖИДКОСТЬ**

### **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. Преимущество гидроабразивной обработки состоит в щадящем режиме обрабатываемой поверхности, не допускающем термического шока материала по сравнению с другими технологиями.

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 так же с целью оптимизации конструкции устройства [1, 2].

Между тем, стартовый процесс, имеющий важное значение для анализа воздействия струи на материал, практически не исследовался. При развитии импульсной жидкой струи топлива со сверхзвуковой скоростью были зарегистрированы ударно-волновые конфигурации [6]. С целью изучения динамических характеристик струи, выходящей из сопла рабочей головки станка гидроабразивной резки, в настоящей работе теневым методом с использованием высокоскоростной камеры выполнена съемка всего процесса.

### Описание экспериментальной установки

Для получения струи высокой скорости был использован промышленный станок гидроабразивной резки Flow WaterJet Mach3. Станок позволяет получить высокоскоростную водную струю, проходящую через струеформирующее сопло диаметром 0,3 мм при давлении 100 МПа или 400 Мпа и скоростью струи, превышающую скорость звука до трех раз [3, 4]. Проходя через камеру смешения с абразивом и фокусирующую трубку диаметром 1мм и длиной 74 мм струя выходит в открытое пространство при нормальных условиях (рис. 1). Диаметр центральной зоны струи составляет около 1 мм [5]. В настоящей работе был исследован процесс выхода из фокусирующей трубки и формирования высокоскоростной водной струи без подачи абразива под давлением 400 МПа.

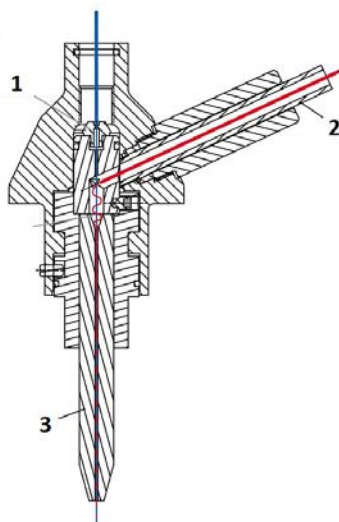


Рис. 1. Устройство гидроабразивной головки. Жидкость под давлением подается сверху, проходит камеру смешения с абразивом, проходя через фокусирующую трубку, на выходе представляет собой смесь воды с абразивом, являющуюся рабочим телом в технологии гидроабразивного резания. Обозначения: 1 – струеформирующее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

Для фиксации процесса формирования струи проводилась съемка объекта с помощью сверхскоростной камеры Photron FASTCAM SA5 и объектива Nikon AF NIKKOR, позволяющей получать снимки до 1 Млн кадров в сек. и общей длительностью видеопленки 2 сек.

Синхронизация включения камеры и струи выполнялась вручную, поскольку время съемки 2 сек. больше времени установления стационарного состояния струи, и нет необходимости реализации особоточной системы синхронизации.

### Оптическая регистрация стартового процесса

Были проведены серии экспериментов с высокоскоростной регистрацией быстропротекающего процесса начальной стадии формирования струи. Схема установки показана на Рис. 2. Расстояние от объектива камеры до образца составляло 44 см и при давлении 400 МПа. Для зондирования была использована лампа 500 Вт с удлиненной

светящейся нитью накаливания ориентированной в вертикальном положении. Объектив камеры фокусировался на ось струи.

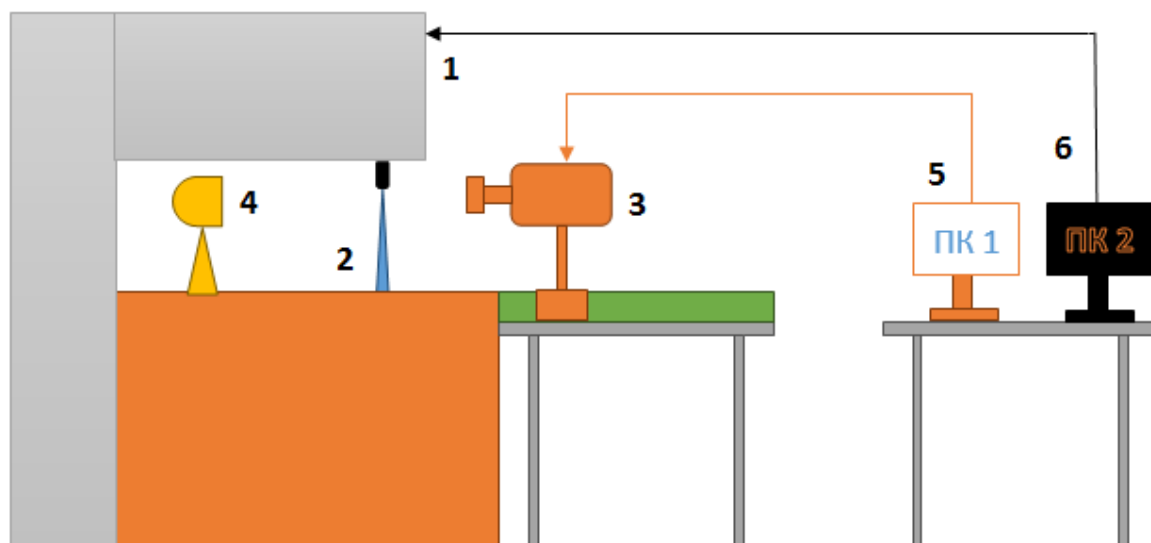


Рис. 2. Схема эксперимента. Обозначения: 1 – установка Flow WaterJet Mach3, 2 – струя; 3 – высокоскоростная камера Photron FASTCAM SA5, 4 – лампа, 5 – ПК 1, отвечающий за управление камерой, 6 – ПК 2, отвечающий за управление установкой

Поскольку область съемки струи с необходимым разрешением не охватывала ее полностью по высоте (~130мм), 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 100000/50000/30000 кадров/сек 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 (см. Рис. 1). При закрытой трубке закрыт подсос воздуха при проходе струи через фокусирующую трубку. Наконец, в части экспериментов внутренние объемы формирующей струю головки продувались сжатым воздухом.

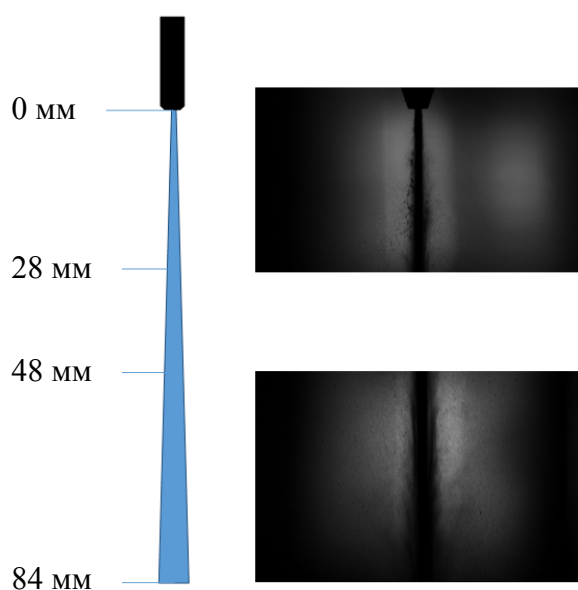


Рис. 3. Верхняя и нижняя области съемки в масштабе

## Анализ результатов

Были получены видофильмы 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 [4]; однако сверхзвуковых возмущений, генерируемых спутным течением, не было зарегистрировано.

На рис. 4 показан каждый десятый кадр выхода лидера струи из сопла и ее развития.

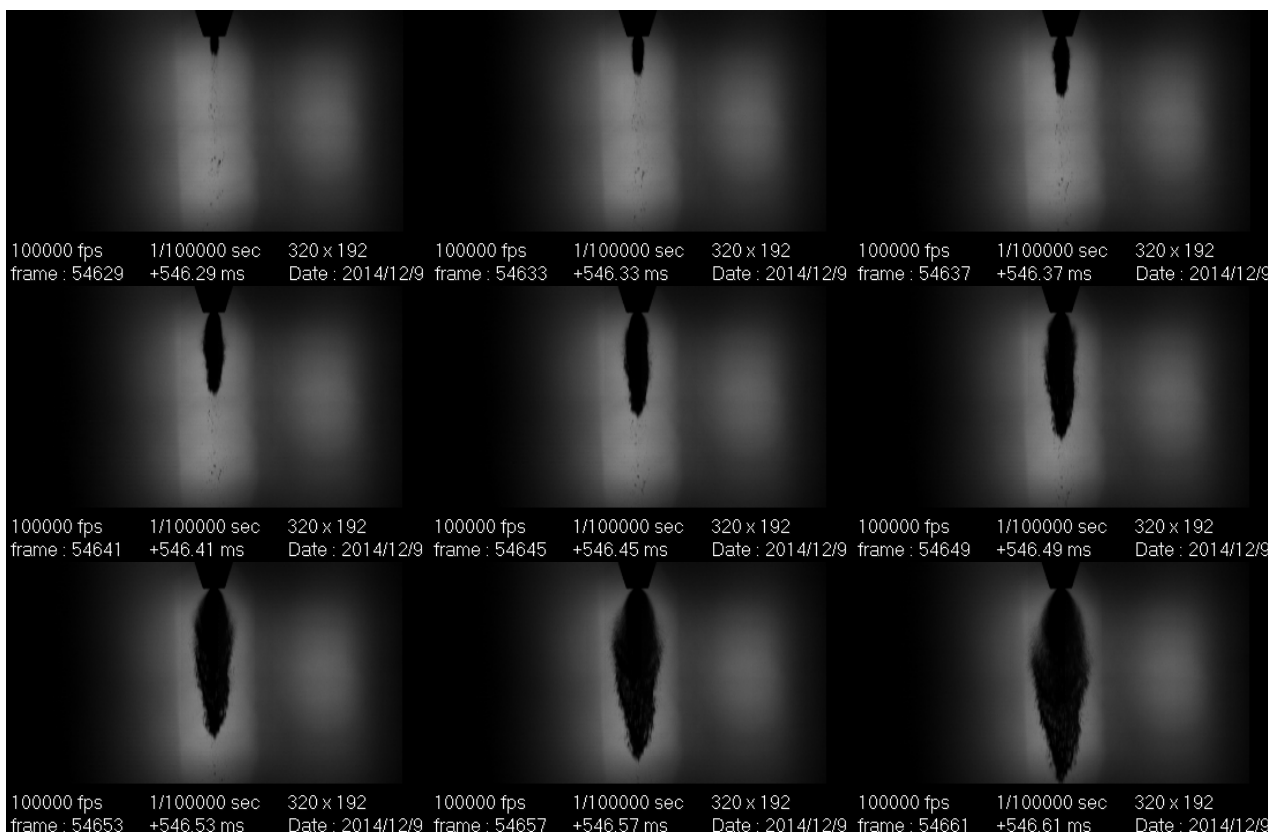


Рис. 4. Снимки выхода лидера и развития струи при съемке 100 000 кадров в секунду

Пример развития струи в нижней области приведен ниже на рис. 5.

Для обработки и анализа были выбраны кадры от момента появления струи в области обзора до выхода лидера из данной области. 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 пересчитывалось в мм. Под лидером струи следует понимать визуально определяемую крайнюю граничную точку сплошной области изучаемого объекта в направлении скорости потока. Неопределённость в нахождении положения лидера составляла около 1 мм.

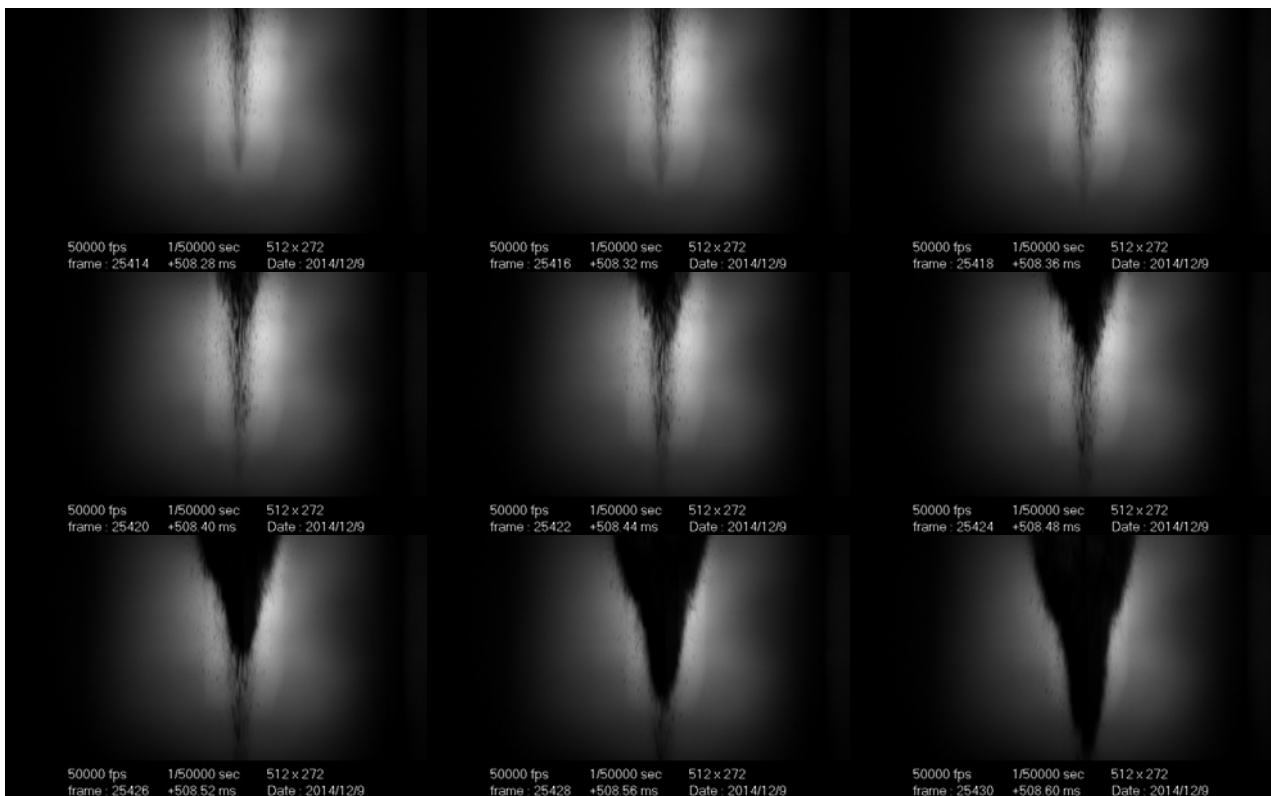


Рис. 5. Снимки развития струи при съемке со скоростью 50000 кадров в секунду

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. 6 представлены графики зависимости координаты лидера струи  $x$  от времени для съемки в верхней области. Скорость изменяется в диапазоне от 50 м/с до 80 м/с.

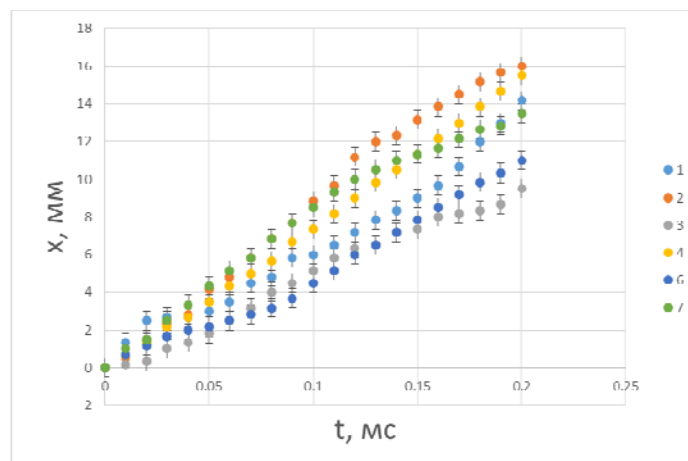


Рис. 6. Зависимость координаты лидера струи от времени

График зависимости положения лидера струи для нижней области съемки приведен на рис. 7. Для одного эксперимента было измерено положение бокового фронта от времени (рис. 5).

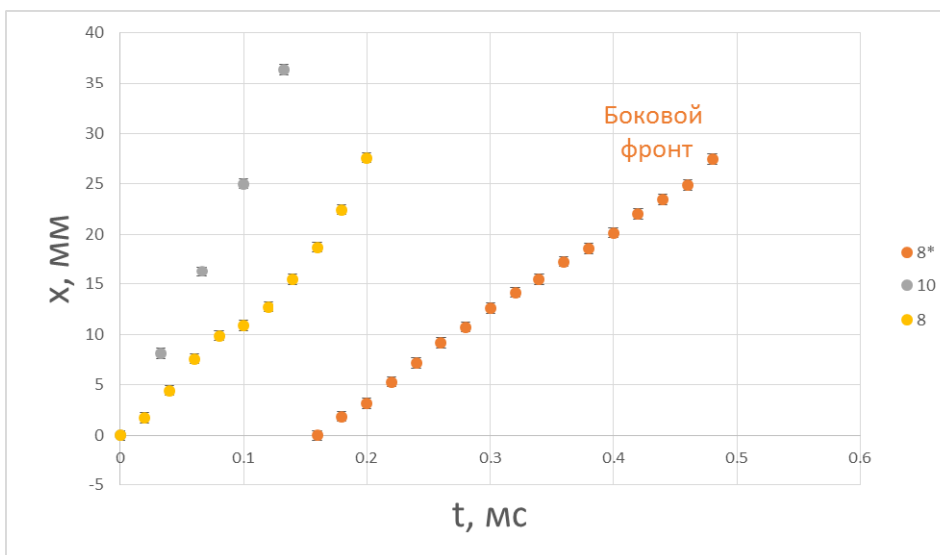


Рис. 7. График зависимости положения лидера струи и бокового фронта от времени. Нулевая точка по оси ординат соответствует верхней границе нижней области съемки 48 мм (рис. 3)

Графики зависимости скорости лидера струи от координаты представлены на рис. 8.

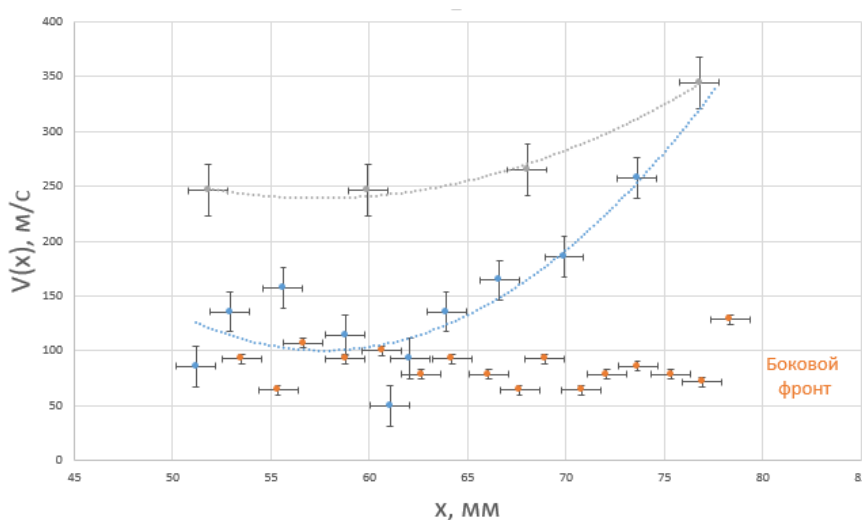


Рис. 8. Графики зависимости скорости лидера струи от координаты во второй области съемки. Нулевая точка по оси абсцисс соответствует уровню сопла 0мм (рис. 3)

Из графика видно, что лидер ускоряется на участке 60 – 77 мм; его скорость достигает 270 м/с к нижней границе второй области съемки (вблизи амортизирующей подложки). Погрешность определения скорости составила 20 м/с.

Анализ динамики лидера и в частности, экстраполяция скорости позволяет оценить предполагаемое время выхода лидера на сверхзвуковой режим как 0,2 – 0,4 мс после старта или на расстоянии 80 – 100 мм от сопла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе с помощью высокоскоростной регистрации (до 100 000 кадров в секунду с разрешением 640×376 пикселей) изучен быстропротекающий процесс выхода водяной струи из сопла (фокусирующей трубки) рабочей головки станка гидроабразивной резки. Получены количественные динамические характеристики образования и развития головной части струи, движущейся с ускорением. Показано, что скорость лидера меняется от 30 до 270 м/с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kyriaki Maniadaki, Thomas Kestis, Nicholaos Bilalis.** Aristomenis Antoniadis. A finite element-based model for pure waterjet process Simulation// Int J Adv Manuf Technol. 2007. 31. P. 933–940.
2. **Guha A., Barrona R.M., Balachandar R.** An experimental and numerical study of water jet cleaning process// Journal of Materials Processing Technology. 2011. V. 211. P. 610-618.
3. **Латыпов Р.Р., Терегулов Н.Г., Харлов А.И.** Некоторые сведения о гидрорезании материалов // Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия.
4. **Тихомиров Р.А., Бабанин В.Ф., Петухов Е.Н. и др.** Гидрорезание судостроительных материалов. - Л.: Судостроение, 1987. - 164 с.
5. **Исследование процесса формирования струи воды, истекающей из сопла установки гидроабразивной резки /** Я. Ширшов, Д. Нерсесян, Н. Сысоев, И. Иванов // Материалы X Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ 2014), 23-31 мая 2014 г., Алушта. — Т. 1. — Издательство МАИ Москва, 2014. — С. 59–62.
6. **Anirut Matthujak, Kulachate Pianthong, Kazuyoshi Takayama and B. E. Milton** “Experimental Study of Ignition over Impact-Driven Supersonic Liquid Fuel Jet”, 2013.

I.A. Znamenskaya, D.S. Naumov, D.A. Nersesyan, N.N. Sysoev, Y.N. Shirshov

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,  
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, E-mail: [nersdima@mail.ru](mailto:nersdima@mail.ru)*

## OPTICAL STUDIES OF THE DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF WATER JET HIGH PRESSURE

*Optical methods research of high speed water jets issuing from the nozzle which creates high pressure stream results are presented in the current paper. Current work aims to investigate new knowledge about two-phase liquid flow under extreme conditions, and the analyze possibility of device design optimization. The process of high-speed water jet outflow from the focusing tube of the Flow WaterJet Mach3 hydroabrasive cutting machine, its development process and the stationary flow state overall time period near 1 second is considered in the current paper. Shadow method was used to investigate an initial stage of high-speed water jet outflow from the focusing tube as well as jet a head part movement dynamic for 0.2-0.4 milliseconds period with a working pressure 400MPa. In order to study jet formation process high-speed camera Photron FASTCAM SA5 with framing rate no more then 100.000 frames per second and with exposure time 1 $\mu$ s was used. Videodata and pictures have been processed. High-speed water jet outflow spatial-temporal characteristics have been measured as well as the stationary mode establishment process. As a result of image series digital processing jet velocity and jet head part acceleration at the initial stage are measured.*

JET, FLOW, HIGH PRESSURE, HIGH SPEED JET, TWO-PHASE LIQUID