Влияние коронно-стримерного разряда на развитие неустойчивостей затопленной воздушной микроструи

Д. А. Яранцев и И. А. Моралёв
Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

E-mail: yarantsev.d@gmail.com

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2023 г.

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования устойчивости и ламинарно-турбулентного перехода в круглой дозвуковой воздушной микроструе при воздействии на нее импульсно-периодического коронно-стримерного разряда. Выполнена высокоскоростная дымовая визуализация струи. Сделан анализ зависимости положения точки ламинарно-турбулентного перехода от параметров разряда. https://doi.org/10.33849/2023401

1. ВВЕДЕНИЕ

Режим истечения ламинарных струй является важной характеристикой в различных устройствах, от горелок до химических реакторов. Вопросам устойчивости таких течений посвящена обширная литература [1–4], причем время первых исследований соответствует самому началу работ по устойчивости гидродинамических течений. Существенная часть экспериментальных исследований [5–11] в данной области посвящена струям малого диаметра, или микроструям.

Струя считается микроструей если ее начальный диаметр не превышает 1–1.5 мм. Режим истечения круглой струи зависит в первую очередь от профиля скорости на выходе сопла. Чем ближе профиль скорости к параболическому, формирующемуся в результате течения Хагена–Пуазейля, тем дальше от сопла происходит ламинарно-турбулентный переход. Сглаживание профиля происходит за счет нарастания пограничного слоя, поэтому для получения протяженных ламинарных струй большого диаметра необходимо использовать длинные каналы. При диаметре трубки менее 1 мм, ламинарный профиль устанавливается в трубке уже на длине в несколько сантиметров.

Неустойчивость круглой струи с “ударным” (П-образным) профилем скорости на срезе сопла связывают с неустойчивостью сдвигового слоя, приводящей к формированию вихрей Кельвина–Гельмгольца (КГ), а также с возможным формированием полосчатых структур в результате алгебраического роста возмущений.

В случае микроструи параболический профиль скорости оказывается существенно более устойчивым к нулевой азимутальной моде колебаний — вихрям КГ. В результате круглая микроструя всегда имеет значительную протяженность участка ламинарного течения. Более того, вопрос наличия в струях с параболическим профилем осесимметричной неустойчивой моды в целом зависит от модели исследуемого течения [1–4]. Наиболее быстро в такой струе нарастают колебания шлангового типа (с азимутальным числом $m = 1$), которые и приводят к переходу. Стандартным способом возбуждения микроструй является использование плоской поперечной акустической волны (см., например, [5, 10]). При этом колебания развиваются в плоскости волны, а изменение азимутальной ориентации источника звука приводит к повороту плоскости колебаний. Следует отметить, что в этом случае возбуждение является распределенным по длине ламинарного участка. Предположительно, амплитуда и фаза возмущений в первую очередь определяется волнами, созданными в точке максимальной восприимчивости — на кромке сопла.

Синусоидальные колебания струи довольно быстро растут, выходят на нелинейный режим, который затем распадается с переходом к турбулентности. Еще на линейной стадии развития возмущений шланговая мода колебаний соответствует рождению в струе цепочек продольных вихрей [5]. Можно предположить, что их взаимодействие на поздней стадии развития возмущений приводит к разрушению ламинарного режима течения. Детали этого процесса определяет динамика вихрей, формирующихся на поздней стадии эволюции возмущений. Так, в определенном диапазоне частот обнаружено явление бифуркации струи, т.е. ее разделения на две под действием поперечного акустического поля. Динамика струи на этой стадии исследовалась как с помощью визуализации, так и в рамках численного моделирования [10, 12]. Показано, что непосредственно перед бифуркацией происходит отклонение струи от плоскости акустической волны, затем струя распадается на цепочки отдельных вихрей.

Несмотря на большой объем литературы, посвященной динамике ламинарных струй и процессу их бифуркации в акустическом поле, детали поздних стадий перехода, а также механизм бифуркации остаются неясными. Для детального экспериментального исследования этого процесса представляется в первую очередь важным разделить процессы возбуждения и эволюции колебаний, сделав возбуждение локальным. В данной работе для этой цели используется коронный разряд, напряжение на котором модулируется с требуемой частотой воздействия. В результате работы визуализирована структура течения, продемонстрировано ее принципиальное соответствие структуре при акустическом возбуждении, получены дисперсионные характеристики изгибных колебаний струи в диапазоне частот, характерном для развития неустойчивости.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для исследования влияния разряда на устойчивость ламинарной микроструи была спроектирована

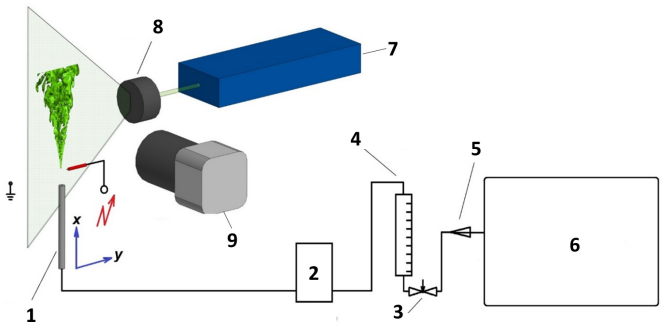
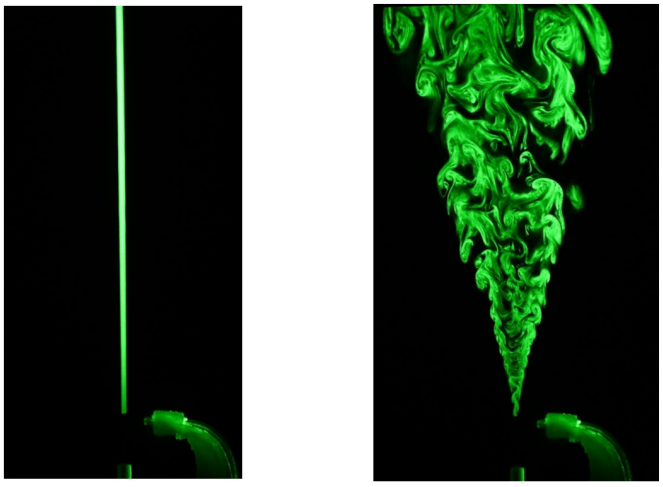


Рисунок 1. Схема установки: 1 — керамическая трубка, 2 — генератор дыма, 3 — редуктор давления, 4 — ротаметр, 5 — вентиль, 6 — компрессор, 7 — Nd-YAG лазер, 8 — цилиндрическая линза, 9 — высокоскоростная камера.



(а) (б)

Рисунок 2. Фотографии невозмущенной (*а*) и возмущенной (*б*) струи.

и подготовлена экспериментальная установка, схема которой показана на рисунке 1. Расход воздуха контролировался ротаметром с регулировкой расхода LZM-6T (0.1–1 л/мин). Дым генерировался при тлении шашки из древесных опилок при прокачке воздуха через колосник. Засеянный дымом воздух подавался в керамическую трубку, установленную в безвихревой камере со стеклянными стенками. Подсветка дыма осуществлялась высокочастотным импульсным лазером Beamtech Vlite-Hi-527-30. Этот твердотельный лазер работает в диапазоне частот повторения импульсов (далее по тексту — частот) от 200 Гц до 10 кГц, с длительностью импульса 200 нс. Длина волны излучения 527 нм, максимальная энергия в импульсе равна 30 мДж при частоте 1 кГц.. Картина течения регистрировалась с помощью скоростной монохромной камеры Photron Fastcam Nova с разрешением 1024x1024 и скоростью съемки 8 кГц, либо на фотоаппарат Nikon Z5.

Струя создавалась на выходе керамической трубки с внутренним диаметром d = 1 мм, длиной 80 мм. Предположительно, при скорости истечения струи порядка u = 5 м/с на срезе трубки устанавливалось течение Пуазейля с параболическим профилем скорости, за счет чего невозмущенная микроструя оставалась ламинарной на расстоянии более 100 мм от сопла. Посчитанное по диаметру трубки число Рейнольдса равно $Re_{\mathrm{d}} = 350$. Струя возбуждалась с помощью коронного разряда переменного тока, который генерировался на конце изолированного провода диаметром 0.7 мм. Провод был установлен перпендикулярно струе в плоскости лазерного листа. Координаты коронирующего электрода относительно центра выходного сечения трубки равнялись $x_{\mathrm{p}} = 7$ мм, $r_{\mathrm{p}} = 3$ мм. Заземленный электрод был также расположен в плоскости лазерного листа на расстоянии 70 мм от оси струи таким образом, чтобы ось разрядного промежутка была перпендикулярна струе.

Напряжение создавалось резонансным трансформатором, питаемым полумостовым инвертором. Изменение амплитуды осуществлялось регулировкой напряжения питания при резонансной частоте контура около 85 кГц. Напряжение на острие модулировалось по синусоиде в диапазоне частот до 3 кГц с помощью генератора импульсов произвольной формы. Диапазон величины воздействия был выбран эмпирически в диапазоне напряжений U = 3–4.8 кВ. Минимальное напряжение соответствовало ситуации, когда возмущений на струе в видимой области не наблюдалось, максимальное — отклонению струи от оси сопла.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Структура течения в исходной и возбужденной струе при максимальной амплитуде воздействия показана на рисунке 2(*а, б*). Можно видеть, что периодическое локализованное возбуждение струи коронным разрядом приводит к формированию в начальной области синусоидального изгиба канала, а затем к ламинарно-турбулентному переходу. Видно, что периодическое воздействие ионного ветра от разряда на струю работает подобно акустическому возбуждению, несмотря на свою пространственную локализацию. Также как и при акустическом воздействии, на начальном этапе развивается синусоидальная неустойчивость, которая затем сменяется бифуркацией и последующей эволюцией вихрей.

В экспериментах варьировались частота и амплитуда воздействия коронного разряда на микрострую воздуха при постоянной скорости потока 5.3 м/с для данного положения острия электрода относительно сопла. На рисунке 3 приведены фотографии струи для максимального напряжения на разряде 3.8 кВ при варьировании частоты разряда в диапазоне 1000–2500 Гц. Видно, что процесс возбуждения струи носит избирательный характер. Максимальная скорость нарастания колебаний наблюдается в диапазоне частот 1.5–2 кГц, что соответствует числам Струхаля $Sh = f/(ud) = 0.3$–0.4, где f — частота воздействия, u — скорость и d — диаметр струи. Кроме того, видно, что собственно бифуркация струи на поздних стадиях перехода наблюдается также для указанного диапазона чисел Струхаля. Вне него вихри, возникающие после распада струи, не формируют таких ярко выраженных отдельных дорожек.

На рисунке 4 приведены фотографии струи для $Sh = 0.3$ при варьировании амплитуды воздействия в диапазоне напряжений 3.4–4.2 кВ. Видно, что до момента турбулизации/бифуркации струя под воздей-

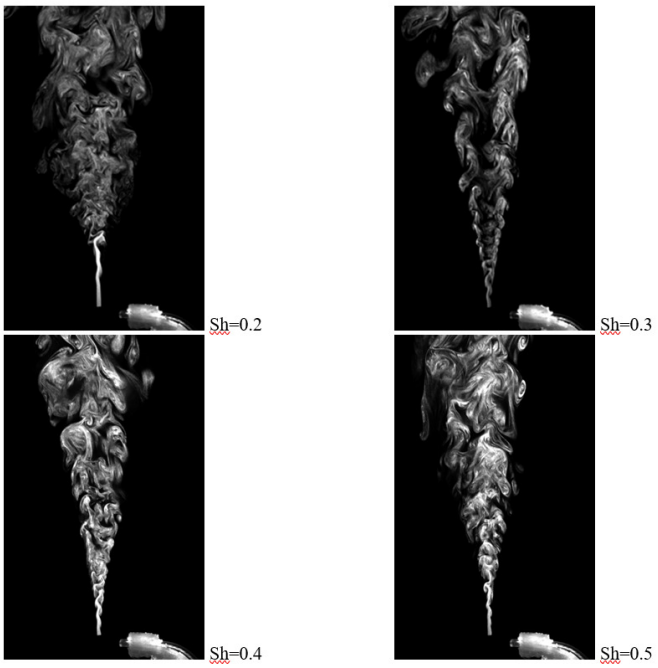


Рисунок 3. Фотографии сечения струи при частоте разряда 1000–2500 Гц и амплитуде питающего напряжения 3.8 кВ.

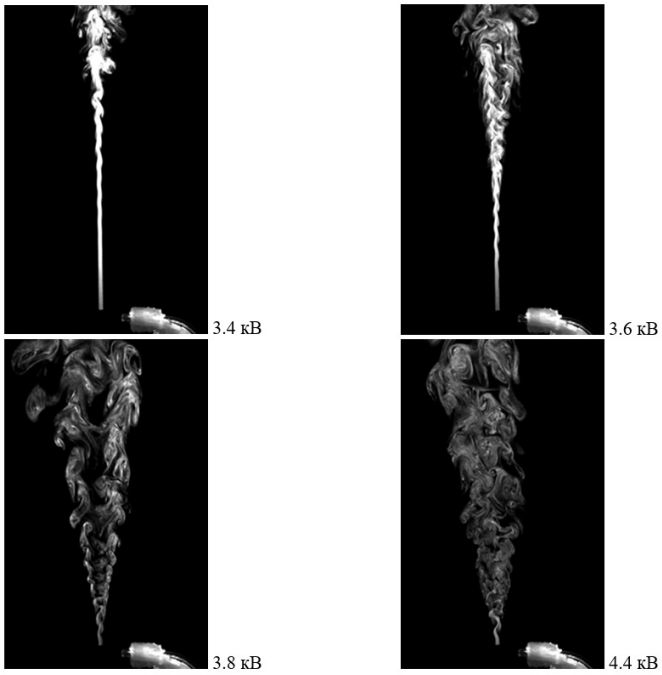


Рисунок 4. Фотографии сечения струи при частоте разряда 1500 Гц ($Sh = 0.3$) и U = 3.4–4.4 кВ.

ствием разряда испытывает синусоидальную неустойчивость.

Для оценки длины волны синусоидальной моды был создан алгоритм, восстанавливающий положение центра оси струи, которое оказывается искаженным при прямом усреднении интенсивности поперек струи за счет генерации вторичных возмущений на выпуклых участках струи. Принцип действия алгоритма показан на рисунках 5(*а–в*) для струи при ее возбуждении на $Sh = 0.2$ и U = 3.4 кВ. На рисунке 5(*б, в*) показан увеличенный синусоидальный участок с наложением восстановленного при обработке положения оси струи.

График восстановленного положения оси струи на синусоидальном участке приведен на рисунке 6(*а*). Длина волны оценивалась исходя из спектра полученной зависимости $y(x)$. Как видно на рисунке 6(*б*), пространственная длина волны при такой обработке определяется для $Sh = 0.2$ как 3.1 мм (3.1d).

Зависимость длины волны колебаний струи от частоты разряда приведена на рисунке 7. Видно, что длина волны падает с ростом частоты. При этом оценка скорости распространения возмущений колеблется в пределах 3.5–5 м/с, что соответствует (0.7–1)u. Следует отметить, что данные были получены на достаточно длинном участке струи, где колебания, по-видимому, достигают насыщения на нелинейной стадии. В этой области, как видно из рисунка 6(*а*), длина волны падает.

Был выполнен анализ зависимости положения точки и угла бифуркации от напряжения на разряде. На рисунке 3 видно, что положение точки перехода зависит от напряжения, питающего разряд (скорости ионного ветра). На рисунке 8 представлена зависимость расстояния между электродом и точкой ламинарно-турбулентного перехода струи от амплитуды воздействия при разных числах Струхаля. Как видно, существует некоторое минимальное расстояние от электрода, необходимое для роста возмущений до уровня, при котором происходит турбулизация. Это расстояние не очень сильно зависит от частоты воздействия и составляет 1.5–2 длины волны. При этом, чем больше частота, тем больше пороговая амплитуда воздействия, при которой наблюдается переход к турбулентности. В свою очередь, угол бифуркации струи практически не зависит от амплитуды питающего напряжения и примерно равен 25°.

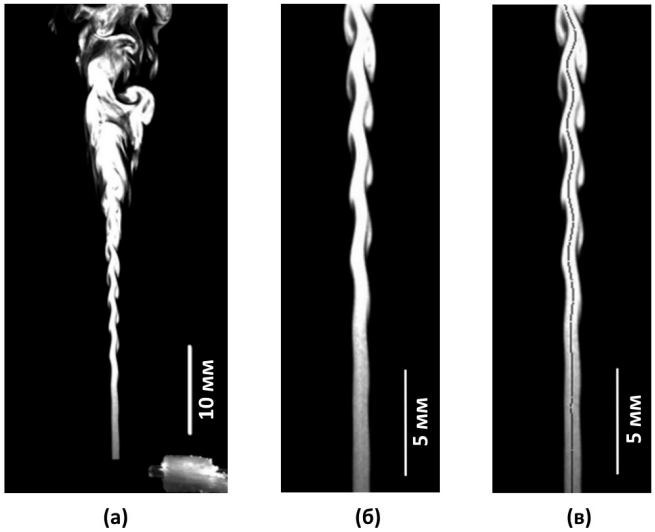


Рисунок 5. Фотография сечения струи при f = 1000 Гц ($Sh = 0.2$), U = 5.2 кВ (*а*); синусоидальный участок (*б*); синусоидальный участок с наложением восстановленного положения оси струи (*в*).

Стоит отметить, что амплитуда воздействия, использованного для возбуждения струи, была довольно велика, при этом огибающая импульса напряжения бы-

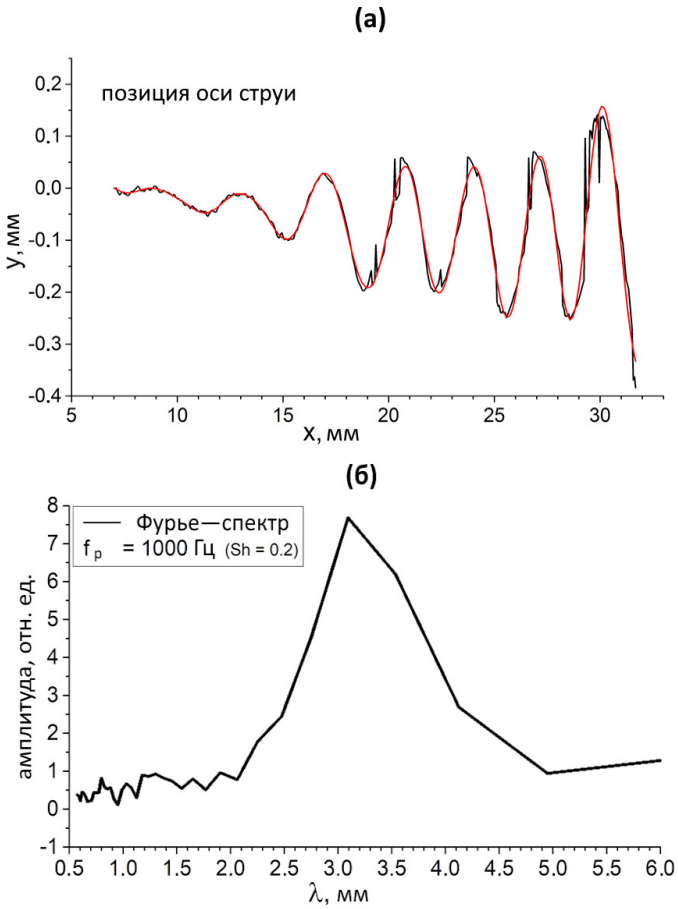


Рисунок 6. Восстановленное положение оси струи с фильтрацией выбросов при ошибках алгоритма (*а*), Фурье спектр колебаний оси струи на синусоидальном участке (*б*).

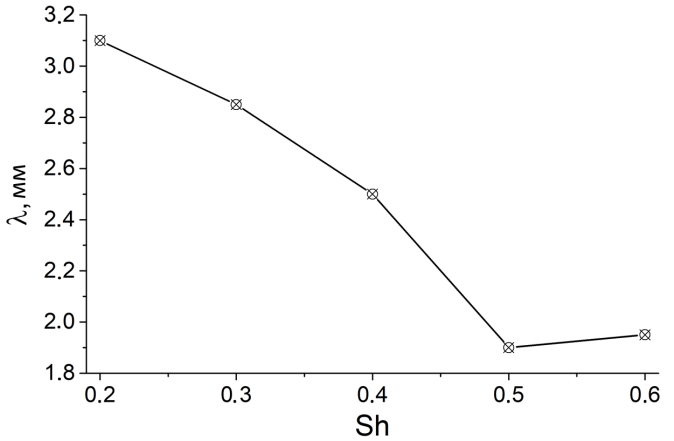


Рисунок 7. Зависимость пространственной длины волны колебаний струи от частоты разряда.

ла не синусоидальной, а амплитуда ионного ветра — тем более. При низких частотах (менее 500 Гц) наблюдается возбуждение струи высокочастотными гармониками на фронте импульса напряжения.

Такое возбуждение позволяет сделать предположение о механизме бифуркации струи (см. рисунок 9). Можно видеть, что на переднем фронте импульса рождается изгиб струи, из которого затем формируется вихревое кольцо. Предположительно, формирование вихревого кольца происходит в результате перезамыкания вихревых нитей, образующихся на линейной стадии эволюции неустойчивости [5]. Подобные вихревые кольца наблюдаются и при непрерывном возбуждении струи (см., например, рисунок 4, $Sh = 0.3$). По-видимому, именно динамика вихревых колец определяет структуру струи на турбулентном участке. Бифуркацию струи в таком случае можно интерпретировать как генерацию двух дорожек вихревых колец, которые далее движутся под определенным углом друг к другу, увлекая за собой вещество струи.

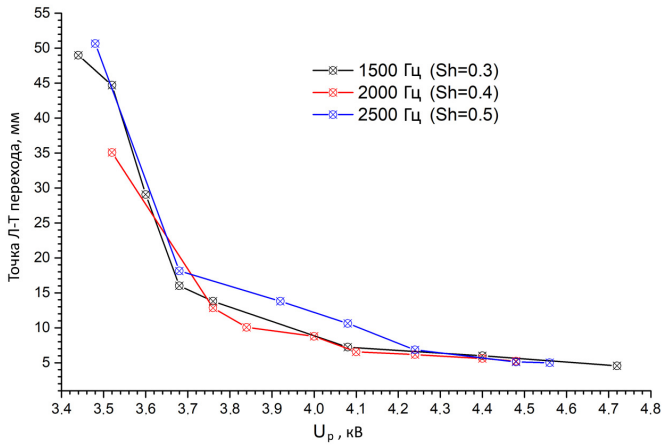


Рисунок 8. Зависимость положения ламинарно-турбулентного перехода от амплитуды воздействия при разных частотах.

Таким образом, распад струи при плоском возбуждении не зависит от механизма возбуждения (плоская акустическая волна или локальный источник импульса), и может быть представлен в виде последовательности следующих явлений. В области воздействия (или вблизи выхода из трубки) внешнее возмущение трансформируется в собственные моды струи. Для микроструй доминирующей является первая азимутальная мода, которая и нарастает вниз по потоку. По мере увеличения амплитуды колебаний среднее течение теряет скорость, в результате чего фазовая скорость и длина волны возмущения на нелинейной стадии уменьшаются. При определенной амплитуде возмущения деформация начальных вихрей, существующих в изгибах первичной моды, приводит к формированию отдельных кольцевых вихрей. Вихревые кольца рождаются дважды за период питающего напряжения при максимальном отклонении струи от оси, формируя дорожки вихревых колец. За счет взаимодействия вихрей в подобной дорожке генерируется течение, которое в среднем соответствует разделению струи на две. Расстояние до точки ламинарно-турбулентного перехода зависит от амплитуды воздействия и инкремента нарастания возмущений, который, в свою очередь, определяется числом Струхаля. При фиксированном числе Струхаля угол раскрыва струи после бифуркации не зависит от питающего разряд напряжения, так как бифуркация происходит только после достижения первичной модой порогового значения. Амплитуда смещения струи от оси при этом составляет порядка 1 калибра сопла.

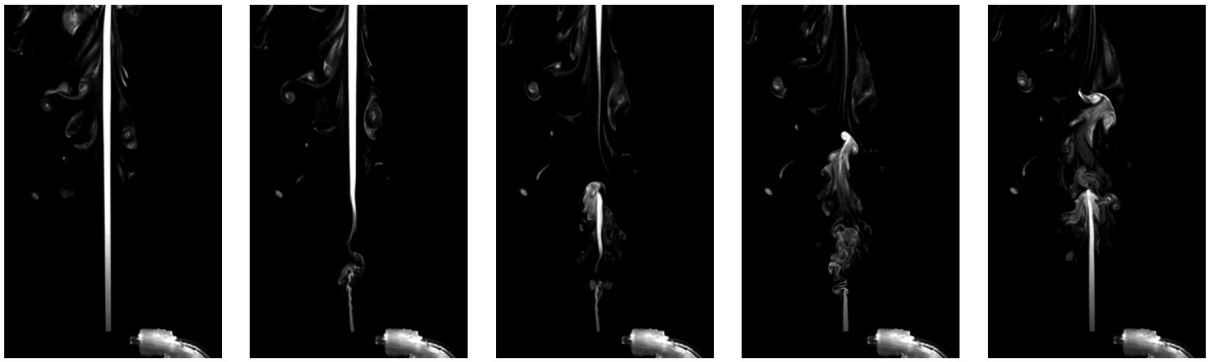


Рисунок 9. Развитие возмущения от одиночного импульса при U = 3.2 кВ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы характеристики колебаний, возникающих в воздушной струе при ее истечении из круглого сопла малого диаметра при $Re_{\mathrm{d}} = 350$. Измерения выполнены при локализованном возбуждении струи импульсно-периодическим коронно-стримерным разрядом при числах Струхаля $Sh = 0.1$–0.6. Показано, что возмущение струи при таком воздействии во многом аналогично возмущению при воздействии акустических волн. В частности показано, что бифуркация струи реализуется только в диапазоне чисел Струхаля 0.2–0.4, вне этого диапазона течение в турбулентной области менее структурировано. Исследовано изменение параметров синусоидального возмущения струи при варьировании частоты и амплитуды разряда. Показано, что пространственная длина волны синусоидальной неустойчивости струи снижается с ростом частоты разряда. Проанализировано влияние параметров разряда на ламинарно-турбулентный переход и показано, что чем больше частота разряда, тем больше пороговая амплитуда воздействия, при которой наблюдается переход. Наконец, показано, что процесс возбуждения не связан с локализацией источника возмущений. Изменение расстояния между точкой воздействия на струю и срезом сопла в пределах 5–30 калибров струи не оказывает влияния на развитие возмущений, что говорит об отсутствии взаимодействия ионного ветра с кромкой сопла. Импульсное возбуждение струи приводит к формированию вихревого кольца на поздней стадии эволюции возмущений. Можно предположить, что данный процесс имеет место на поздних стадиях перехода при бифуркации струи и определяет конфигурацию течения в турбулентной области.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание № 075-01129-23-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Batchelor G K and Gill A E 1962 *J. Fluid Mech.* **14** 529–551
2. Kambe T 1969 *Phys. Soc. Japan* **26** 566–575
3. Mollendorf J C and Gebhart B 1973 *J. Fluid Mech.* **61** 367–399
4. Shtern V and Hussain F 2003 *J. Fluid Mech.* **480** 283–309
5. Кривокорытов М С, Голуб В В, Моралев И А и Володин В В 2014 *ТВТ* **52** 450–455
6. Кривокорытов М С, Голуб В В и Моралев И А 2013 *ПЖТФ* **39** 38–44
7. Gau C, Shen C H and Wang Z B 2009 *Phys. Fluids* . **21** 092001
8. Анискин В М, Бунтин Д А, Маслов А А, Миронов С Г и Цырюльников И С 2012 *ЖТФ* **82** 17–23
9. Fomin V M, Aniskin V M, Maslov A A, Mironov S G and Tsyryul'nikov I S 2010 *Dokl. Phys.* **55** 419–422
10. Козлов В В, Грек Г Р, Литвиненко Ю А, Козлов Г В и Литвиненко М В 2010 *Вестник НГУ. Серия: Физика* **5** 28–42
11. Козлов Г В, Грек Г Р, Сорокин А М и Литвиненко Ю А 2008 *Теплофизика и аэромеханика* **15** 59–73
12. Vankova O S and Yakovenko S N 2023 *Plasma Sources Sci. Technol.* **03002** 3–8