

В. В. Козлов^{1,2}, **Г. Р. Грек**^{1,2}, **Ю. А. Литвиненко**¹,
Г. В. Козлов^{1,2}, **М. В. Литвиненко**¹

¹ Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: kozlov@itam.nsc.ru

ДОЗВУКОВЫЕ КРУГЛАЯ И ПЛОСКАЯ МАКРО- И МИКРОСТРУИ В ПОПЕРЕЧНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ *

В работе обсуждаются результаты экспериментальных исследований механизма развития плоских и круглых макро- и микроструйных течений при малых числах Рейнольдса в поперечном акустическом поле. Термоанемометрические измерения и дымовая визуализация течений с использованием стробоскопической лазерной подсветки струи на частотах акустического воздействия на нее позволили получить новые данные о механизме развития струй.

Ключевые слова: круглая струя, плоская струя, микроструи, неустойчивость струй, дымовая визуализация, термоанемометрия, акустика.

По сравнению с микроструями к исследованию свободных макроструй привлечено большее внимание из-за их широкого использования в различных областях науки и техники. Однако в последнее время интерес к изучению микроструй значительно возрос [1; 2], что связано, в частности, с развитием МЭМС-технологий. Появилась возможность потенциального использования микроструй в различных процессах, например таких, как микроохлаждение, струйное горение, производство нанопорошков и т. д. Особое внимание уделяется исследованию воздействия акустического поля на микрострую [2–5], что важно как для понимания физики процесса, так и для возможности практического использования явления, например в авиационной, космической, химической промышленности и т. д.

В работе обсуждаются результаты экспериментальных исследований механизма развития плоских и круглых макро- и микро-

струйных течений при малых числах Рейнольдса в поперечном акустическом поле. Термоанемометрические измерения и дымовая визуализация течений с использованием стробоскопической лазерной [6] подсветки струи на частотах акустического воздействия на нее позволили получить новые данные о механизме развития струй.

Таким образом, цель настоящих экспериментальных исследований состоит в изучении механизма развития плоской и круглой микроструй под воздействием акустического поля и сравнение полученных результатов с результатами последних исследований по данной тематике.

Круглые макро- и микроструи

Круглая макроструя с «ударным» профилем скорости на срезе сопла (рис. 1) подвержена неустойчивости Кельвина –

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-01-00027), гранта ведущих научных школ (НШ-454.2008.1), гранта Министерства образования и науки РФ (№ РНП. 2.1.2.541) и гранта Президента РФ (МК-420.2008.1).

Гельмгольца, связанной с образованием кольцевых вихрей, эволюция которых вниз по потоку приводит к ее турбулизации [7; 8]. Дымовая визуализация струи показала, что кольцевые вихри Кельвина – Гельмгольца взаимодействуют с полосчатыми структурами, которые могут генерироваться непосредственно на выходе струи из сопла, приводя к возникновению трехмерных азимутальных структур типа Λ - или Ω -образных вихрей. Эволюция азимутальных вихрей вниз по потоку ведет к интенсификации процесса смешения струи с окружающим газом и затем к ее турбулизации [9].

Изменение начальных условий на срезе сопла, т. е. распределение средней и пульсационной составляющих скорости в поперечном сечении струи, приводило к кардинальному изменению характеристик ее течения. Создание параболического профиля скорости на срезе сопла приводило (рис. 2) к ситуации, когда течение в струе оставалось ламинарным на расстоянии до десяти калибров ($l/d = 10$, где l – длина ламинарного участка струи; d – выходной диаметр сопла) и отсутствовали кольцевые вихри Кельвина – Гельмгольца [8].

Акустическое воздействие на чисто ламинарную область струи не обнаружено, причем частота и амплитуда сигнала изменялись в широком диапазоне (частота от единиц герц до десятков килогерц, а интенсивность звукового воздействия доходила до 100 дБ). Далее вниз по потоку течение переходило в турбулентное состояние при возникновении вихревых структур, наблюдаемых ранее авторами работы [10] при исследовании круглой струи, подверженной поперечному потоку. Неустойчивость ламинарной струи с параболическим профилем

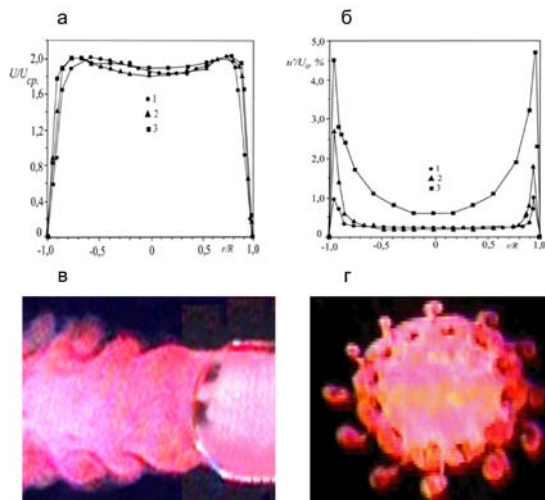


Рис. 1. Профили средней (а) и пульсационной (б) составляющих продольной компоненты скорости классической круглой струи и картины дымовой визуализации течения струи в продольном (в) и поперечном (г) сечениях. $U_0 = 5$ м/с; $Re = U_0 \times d / \nu = 6667$; 1, 2, 3 – при $x = 2, 10$ и 20 мм соответственно

скорости на срезе сопла к слабому поперечному течению, вызванная конвекцией окружающего струю воздуха, была смоделирована в физическом эксперименте [11]. Визуализация струи дымом показала, что наблюдаемые при этом картины течения (рис. 3) практически совпадали с результатами исследований работы [10]. Обнаружено, что неустойчивость струи приводит к ее деформации в виде тангенциальных выбросов газа поперечным потоком с периферии струи в окружающее пространство, к сворачиванию выбросов в пару противорвращающихся вихрей и вследствие этого к уменьшению размера ядра струи.

Эксперименты показали, что механизм неустойчивости Кельвина – Гельмгольца

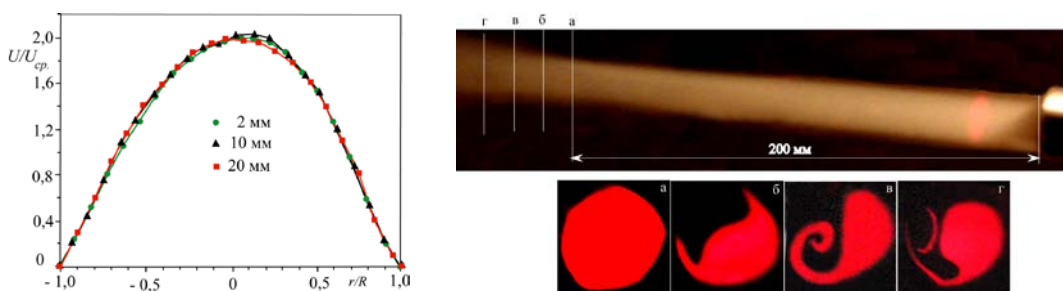


Рис. 2. Профиль средней (слева) составляющей продольной компоненты скорости параболической круглой струи и картины дымовой визуализации течения струи в продольном (справа, сверху) и поперечных (справа, внизу) сечениях. $U_0 = 5$ м/с, $Re = U_0 \times d / \nu = 6667$

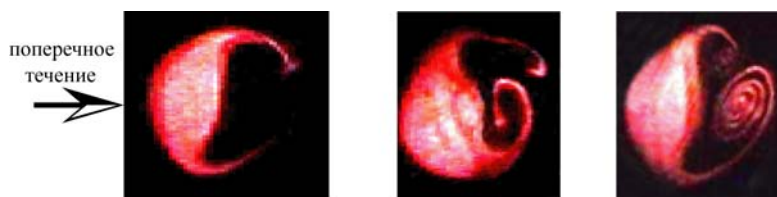


Рис. 3. Картины дымовой визуализации течения ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости на срезе сопла, подверженной неустойчивости к слабому поперечному потоку, в поперечных сечениях

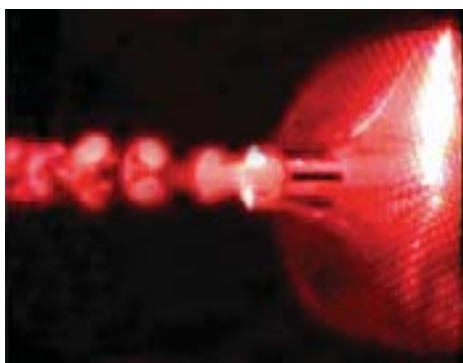


Рис. 4. Картина дымовой визуализации течения ламинарной круглой струи с ударным профилем скорости на срезе сопла в продольном сечении. $U_0 = 1,5$ м/с, $d = 5$ мм, $Re_d = 500$

для круглой струи с «ударным» профилем скорости на срезе сопла сохраняется до довольно малого диаметра струи (рис. 4). Однако при диаметре струи менее 1 мм «ударный» профиль скорости на срезе сопла становится практически параболическим по причине исчезновения ядра струи и замыкания слоя сдвига на оси струи. Механизм развития струи при этом кардинально меняется.

В результате предыдущих исследований был выявлен механизм развития дозвуковой круглой макроструи при изменении начальных условий на срезе сопла, в том числе в присутствии поперечного акустического поля. На основе полученных знаний о развитии макроструи авторы настоящей работы приступили к изучению особенностей развития круглой микроструи как с параболическим, так и с «ударным» профилем скорости при наличии поперечного акустического поля. В ходе экспериментов было установлено, что круглая микроструя имеет значительную протяженность участка ламинарно-

го течения в отсутствие акустического поля независимо от профиля скорости на срезе сопла (рис. 5).

Следует отметить, что в отличие от круглой макроструи с «ударным» профилем скорости на срезе сопла неустойчивость Кельвина – Гельмгольца не обнаружена. Диапазон исследуемых скоростей развития круглой микроструи в данных исследованиях изменялся от 1,5 до 10 м/с. Акустическое воздействие на струю создавалось с помощью динамического громкоговорителя, генерирующего синусоидальную моду неустойчивости. Частота вводимых возмущений изменялась от 30 до 1 500 Гц с интенсивностью акустического поля порядка 90 дБ. Поскольку практически невозможно измерить профиль скорости в микроструе с помощью термоанемометра, реализация ударного и параболического профилей скорости на срезе микросопла осуществлялась на основании соотношения l/d , полученного в работе [8]. С другой стороны, есть предположение, что в микроструе всегда реализуется параболический профиль скорости на срезе микросопла, так как ядро струи практически исчезает. Тем не менее были проведены эксперименты с соплами диаметром 200, 400, 500, 600 и 1 600 мк при соотношении $l/d \approx 50$ для реализации параболического профиля скорости на срезе сопла, поскольку изменения начальных условий на срезе сопла кардинально меняет состояние течения в макроструе, как показали эксперименты [8]. Следует сразу заметить, что струю с диаметром сопла 1 650 мк трудно отнести к микроструе, однако наши предварительные исследования показали, что механизм развития микроструй диаметром 200, 400, 600 и 1 650 мк оказался идентичен, а выявить нюансы этого механизма оказалось возможным только на более

крупном объекте. Это относится, прежде всего, к обнаружению явления уплощения круглой микроструи под воздействием поперечного акустического поля.

На рис. 6 показана картина визуализации дымом круглой микроструи, истекающей из сопла диаметром 1 600 мк со скоростью 1,5 м/с ($Re_d = U_0 \times d / \nu = 60$). Видно, что под воздействием поперечного акустического поля (интенсивностью до 90 дБ) круглая струя деформируется и трансформируется в плоскую струю. В данном случае, как мы предполагаем, в качестве поперечного потока выступает акустическое поле. Следует заметить, что уплощение круглой микро-

струи, т. е. трансформация ее в плоскую струю, под воздействием поперечного акустического поля отмечали и авторы работ [2–5].

Воздействие поперечного акустического поля на микрострую оказывается значительно более сильным, чем на макрострую. Воздействие акустики на макрострую приводило лишь к изменению периодичности вихреобразования и ускорению ее турбулизации. Воздействие же поперечного акустического поля на микрострую как вызывало изменение ее структуры (из круглой струи она преобразовывалась в плоскую), так и приводило к раздвоению микроструи

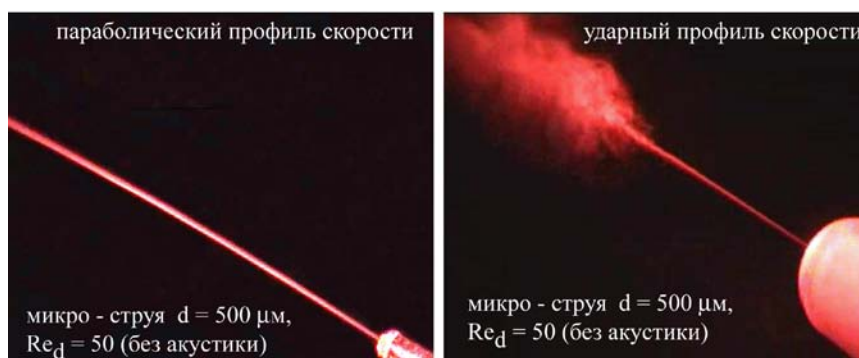


Рис. 5. Картины визуализации дымом развития круглой микроструи в отсутствие акустического поля

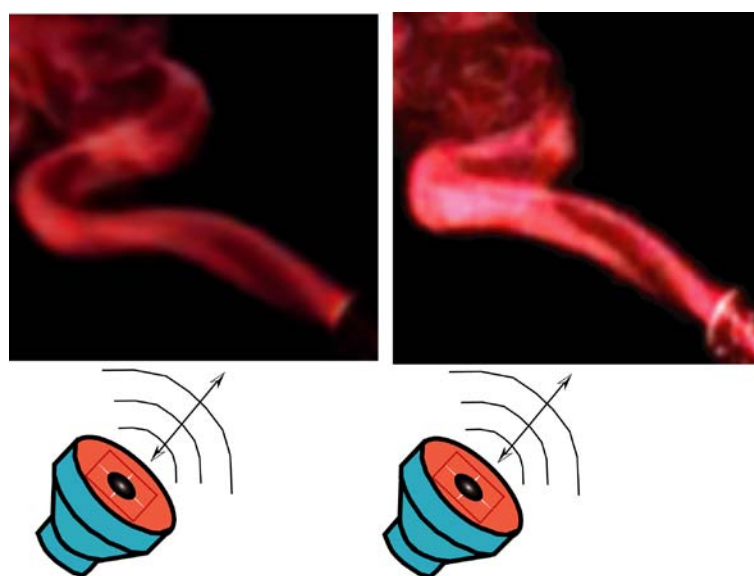


Рис. 6. Картины визуализации дымом развития и уплощения круглой микроструи в присутствии поперечного акустического поля ($f = 40$ (слева) и 100 Гц (справа), интенсивность звука 90 дБ)

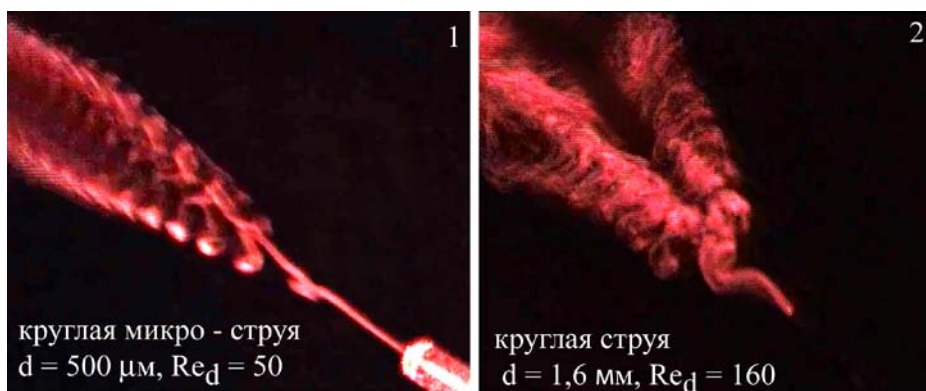


Рис. 7. Картины дымовой визуализации течения круглой струи с параболическим (1) и ударным (2) профилем скорости на срезе сопла с диаметром выходного отверстия 500 и 1 600 мк

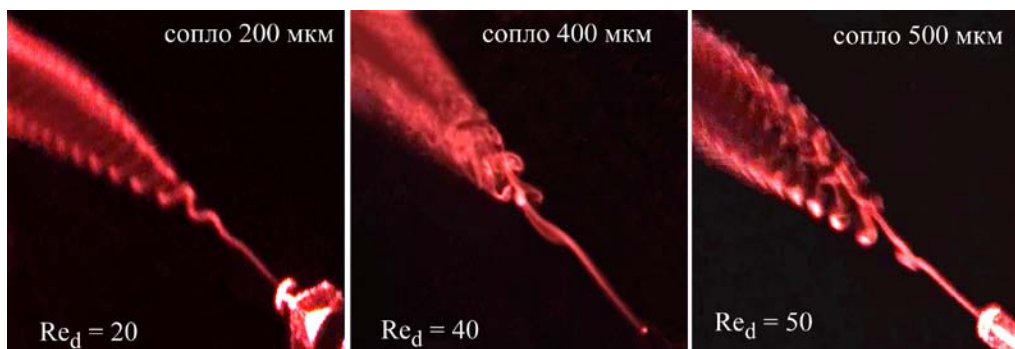


Рис. 8. Картины визуализации дымом процесса развития микроструи в поперечном акустическом поле частотой 200 Гц при различных диаметрах сопла

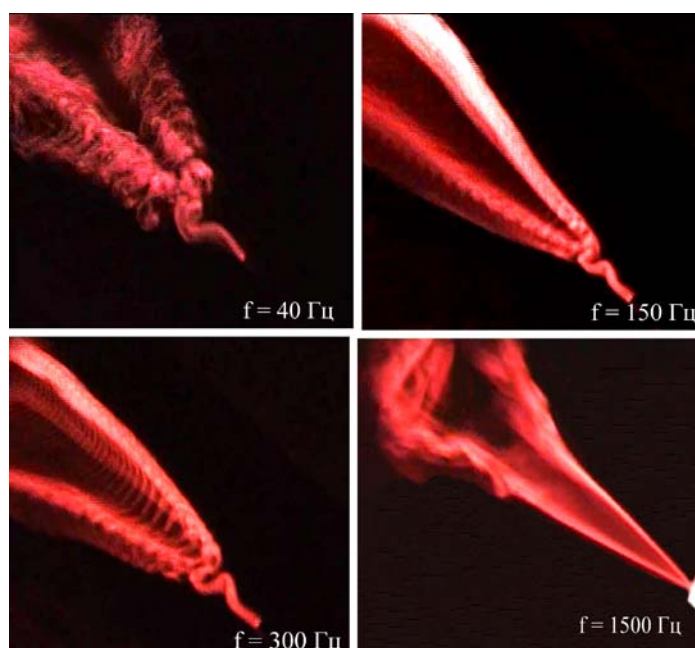


Рис. 9. Картины визуализации дымом процесса развития круглой микроструи (сопло диаметром выходного отверстия 500 и 600 мк) в поперечном акустическом поле различной частоты

(рис. 7). Причем процесс раздвоения струи приводил к независимому друг от друга развитию двух разбегающихся в разные стороны под определенным углом струй с кольцеобразными вихревыми структурами вторичной высокочастотной неустойчивости каждой из этих струй. Частота следования кольцеобразных вихревых структур зависит от частоты поперечного акустического поля.

Преобразование круглой микроструи в плоскую под воздействием поперечного акустического поля приводило к ее развитию вниз по потоку, как и плоской макроструи [7]. Обнаружено синусоидальное колебание микроструи как единого целого на начальной стадии ее разрушения. В случае как параболического, так и «ударного» профиля скорости на срезе сопла наблюдается характерное разделение единой струи на две струи под воздействием поперечного акустического поля. Причем эти две новые струи распространяются вниз по потоку под углом друг к другу примерно 20–25°. Следует отметить, что данный эффект реализуется и при низкой, и при высокой частоте акустического воздействия (от 100 до 1 500 Гц) и независимо от диаметра сопла (200, 400, 500 и 1 600 мк) (рис. 8).

Данное явление не наблюдалось при развитии плоской макроструи [7], и, более того, механизм этого процесса не совсем понятен. Была предпринята попытка разобраться в данном явлении и предложить гипотезу его возникновения. На рис. 6 показана картина визуализации дымом процесса развития круглой микроструи, преобразованной в плоскую под воздействием поперечного акустического поля, представленной в более крупном масштабе для ясности понимания явления. Видно, что на выходе из сопла струя из круглой трансформировалась в плоскую, которая начинает синусоидально колебаться в направлении вектора акустического поля, причем можно заметить винтообразный разворот струи. Под воздействием акустики синусоидальный колебательный процесс, начиная практически после одного периода колебания ламинарного участка струи, приводит к резкому росту амплитуды ее колебаний вниз по потоку в плоскости, параллельной направлению вектора акустического поля, и в итоге к разрыву единой струи на две независимо друг от друга развивающихся структуры. Причем на каждой

из этих новых структур (струй) идет процесс развития вторичных высокочастотных возмущений, наведенных акустическим полем (см. рис. 7, 8). Отметим, что данный механизм развития микроструи остается вне зависимости от диаметра (см. рис. 8) и частоты акустического поля (рис. 9) одним и тем же.

В целом, эксперименты показали, что данный механизм развития круглой микроструи резко отличается от механизма развития круглой макроструи в присутствии поперечного акустического поля, и впервые обнаружен в настоящих исследованиях. Оказалось, что воздействие поперечного акустического поля на микрострую значительно более сильное, способствующее возникновению новых явлений в процессе эволюции струи, чем в случае макроструи. Предположение о причинах, вызывающих его, рассмотренное выше, явно связано с воздействием поперечного акустического поля. Тем не менее более детальное рассмотрение этих явлений требует дополнительных исследований. Следует также отметить, что исследования показали возможность детального изучения механизма воздействия поперечного акустического поля на микрострую с помощью струи диаметром 1,6 мм, так как механизм развития обеих струй оказался качественно идентичным.

Плоские макро- и микроструи

Известно [12], что неустойчивость ламинарной плоской струи связана с возникновением и развитием двух мод неустойчивости: симметричной и асимметричной. В научной литературе [13] эти моды еще часто ассоциируют с понятиями варикозной и синусоидальной мод неустойчивости соответственно. В случае ударного (П-образного) профиля скорости на срезе сопла, по мере развития струи вниз по потоку, идет непрерывная борьба этих двух мод неустойчивости. На начальном этапе развития струи превалирует симметричная мода неустойчивости, но по мере сужения ядра струи и постепенного приближения профиля скорости к параболической форме асимметричная мода становится превалирующей и, в конечном счете, симметричная мода перестает главенствовать в механизме разрушения течения и в большинстве ситуаций вообще

затухает. В настоящем эксперименте [7; 14] параболический профиль скорости был сформирован непосредственно на выходе струи из канала, и в связи с этим мы должны ожидать развития только асимметричной синусоидальной моды неустойчивости. Картины дымовой визуализации течения в плоской ламинарной струе с параболическим профилем скорости показали, что в отсутствие акустического воздействия на струю она подвержена изгибному колебанию синусоидального типа как единое целое. Существование самоподдерживающихся сильных синусоидальных колебаний в плоской струе впервые было отмечено авторами работы [15], где показано, что они имеют особенности абсолютно неустойчивых мод. В данном случае, когда плоская струя развивается в условиях параболического профиля средней скорости, сформированного непосредственно на срезе сопла, можно бы-

ло наблюдать именно синусоидальное колебание струи в целом, вызванное абсолютной ее неустойчивостью (рис. 10). При акустическом воздействии на струю с одинаковой интенсивностью звука, но на различных частотах (от 30 до 150 Гц) можно было наблюдать некоторые особенности такого воздействия. Акустическое воздействие на низких частотах (30–70 Гц) способствовало четкому выделению асимметричных вихревых структур; угол распыливания струи вниз по потоку составлял 18° (без акустики) и 30° (с акустикой), т. е. акустика способствовала росту трансверсальной протяженности струи и ускорению ее турбулизации. С ростом частоты возбуждения струи от 90 до 150 Гц можно было наблюдать нарушение синусоидальной периодичности вихревых структур, связанного с этим подавления колебания струи в целом и, наконец, расслоения единой струи на две части.

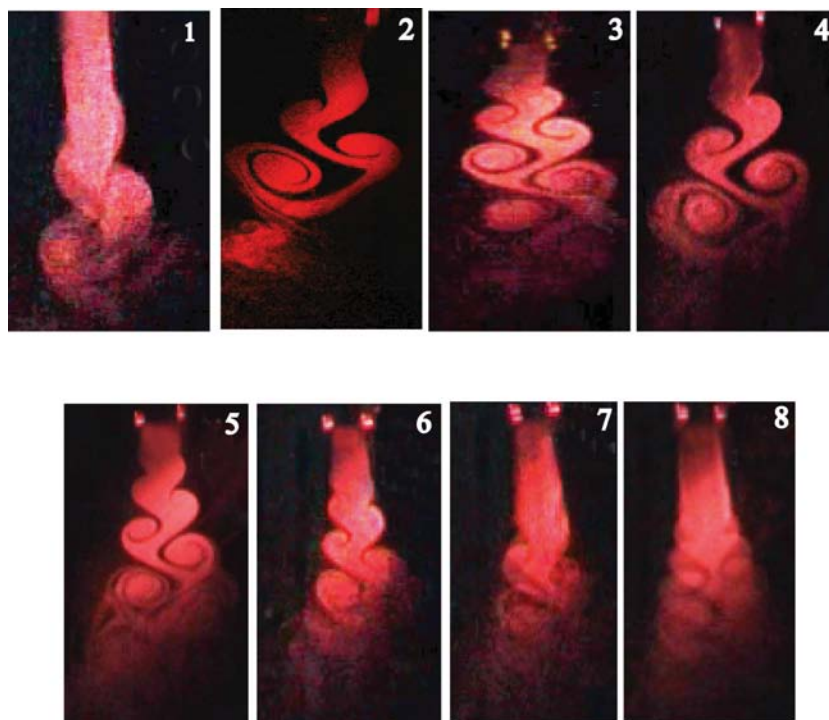


Рис. 10. Картины дымовой визуализации течения в ламинарной плоской струе в плоскости xz без акустического воздействия (1) и при акустическом воздействии (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – при $F = 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90$ Гц соответственно). $U_0 = 3,7$ м/с, $Re = U_0 \times 2h / \nu = 3577$



Рис. 11. Картина дымовой визуализации процесса развития плоской струи, истекающей из сопла шириной выходной щели 2,5 мм, под воздействием поперечного акустического поля ($F = 100$ Гц)

Данный результат подтверждает вывод [12] о том, что плоская струя с параболическим профилем скорости подвержена неустойчивости синусоидального типа и более чувствительна к низкочастотным возмущениям.

Уменьшение поперечного размера плоского сопла с 10 (как в предыдущих экспериментах) до 2,5 мм показало, что механизм колебания струи в целом с образованием синусоидальной вихревой дорожки качественно сохраняется и в данной ситуации (рис. 11).

Результаты первых качественных экспериментальных исследований плоской микроструи [7], формируемой на выходе из короткого классического сопла с поперечным размером его выходного отверстия 700 мк, показали, что процесс колебания струи в целом с образованием синусоидальной вихревой дорожки качественно остается таким же, как и в предыдущих экспериментах, где плоская струя формировалась на выходе из сопла с размером выходной щели более 1 мм (рис. 12). Акустическое воздействие на струю, как и ранее, приводило к изменению периодичности синусоидальной вихревой дорожки.

В работе [1] исследовались плоские микроструи ($h = 50, 100$ и 200 мкм при длине щели $l = 2000$ мкм) в отсутствие акустического поля и сделан вывод о том, что характеристики развития микроструи кардинально отличаются от характеристик развития макроструи. Процессы формирования вихрей и их слияние, наблюдаемые в макроструе, полностью отсутствуют в микроструе;

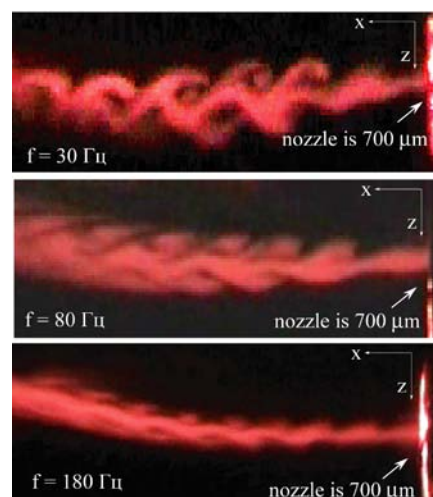


Рис. 12. Картины дымовой визуализации процесса развития плоской микроструи под воздействием поперечного акустического поля различной частоты

не обнаружено взаимодействия струи с окружением до момента ее турбулентного разрушения; турбулизация струи происходит при более высоком числе Рейнольдса и определяется в точке, где наблюдается быстрое пространственное расширение струи и начинается процесс смешения. Эксперимент [1] был воспроизведен в условиях истечения плоской микроструи из сопла шириной $h = 200$ мкм при длине щели $l = 2360$ мкм ($l/h \approx 12$, $Re = 100$). Данное сопло было сформировано из сопла с диаметром выходного отверстия 1600 мкм, использованного ранее при исследовании круглой струи. Вследствие этого площадь выходного отверстия сопла в обоих случаях

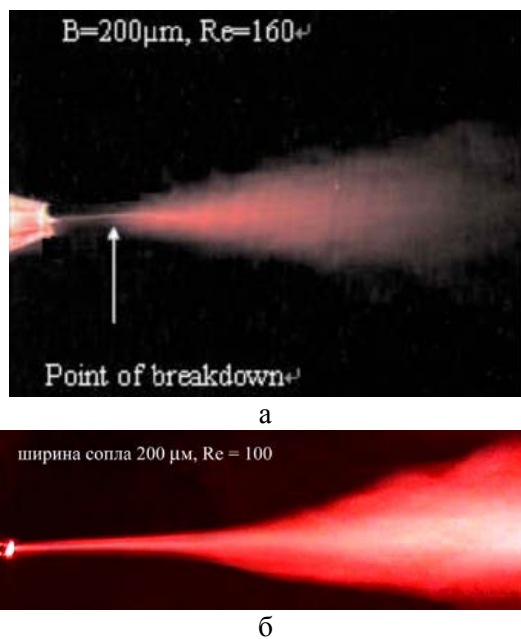


Рис. 13. Картины дымовой визуализации течения псевдоплоской микроструи без акустического воздействия. Из работы [1] (а) и результат настоящих исследований (б)

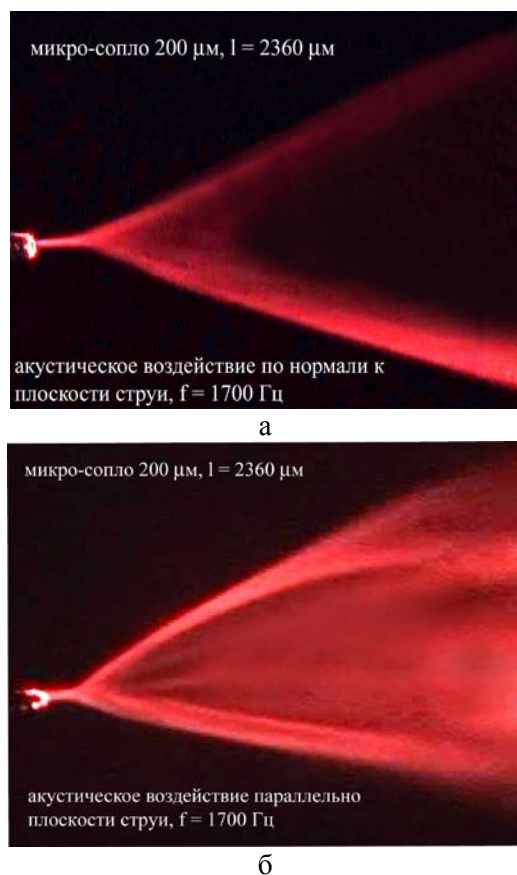


Рис. 14. Картины дымовой визуализации течения псевдоплоской микроструи при акустическом воздействии ($F = 1700$ Гц). Вектор скорости акустики перпендикулярен (слева) и параллелен (справа) плоскости струи

оставалась одной и той же. Проведено сравнение результатов настоящего исследования с результатами работы [1] для условий истечения плоской микроструи из сопла шириной $h = 200$ мкм при длине щели $l = 2000$ мкм ($l/h = 10$, $Re = 160$). При достаточно малом соотношении длины сопла к его ширине ($l/h \approx 10$) сложно струю идентифицировать как плоскую. Ее скорее можно отнести к эллиптической струе. В отсутствие акустического воздействия картина визуализация дымом псевдоплоской микроструи демонстрирует примерно один и тот же сценарий ее развития в обоих случаях, т. е. можно наблюдать начальную область чисто ламинарного течения струи без каких-либо синусоидальных колебаний и далее вниз по потоку ее турбулентное разрушение (рис. 13).

Однако значительные изменения в характере развития псевдоплоской микроструи можно наблюдать при воздействии на нее акустики (рис. 14). Видно, что независимо от направленности вектора акустического поля микроструя расщепляется на две развивающиеся независимо друг от друга под определенным углом струи. Данное наблюдение напоминает раздвоение круглой микроструи при акустическом воздействии, которое было описано выше. В определенных условиях, связанных как частотой акустического воздействия, так и со скоростью струи, можно наблюдать не только раздвоение струи, но и ее утроение и даже учетверение (рис. 15).

Следует заметить, что с ростом частоты акустики угол, под которым идет процесс расщепления струи, постепенно уменьшается (рис. 16).

В условиях относительно низкой частоты акустического воздействия можно наблюдать не только процесс раздвоения данной микроструи, но и несколько периодов синусоидального колебания струи на начальной стадии ее расщепления и даже определенные вихревые структуры в областях развития двух вновь образовавшихся струй (рис. 17).

Картины визуализации дымом псевдоплоской микроструи параллельно и перпендикулярно плоскости струи показали, что синусоидальный колебательный процесс и расщепление струи происходит в плоскости поперечного сечения струи, а в плоскос-

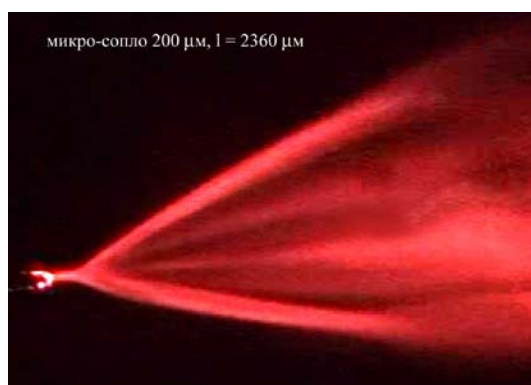


Рис. 15. Картина дымовой визуализации течения псевдоплоской микроструи при акустическом воздействии ($F = 2\,500$ Гц)



Рис. 16. Картина дымовой визуализации течения псевдоплоской микроструи при акустическом воздействии ($F = 4\,000$ Гц)

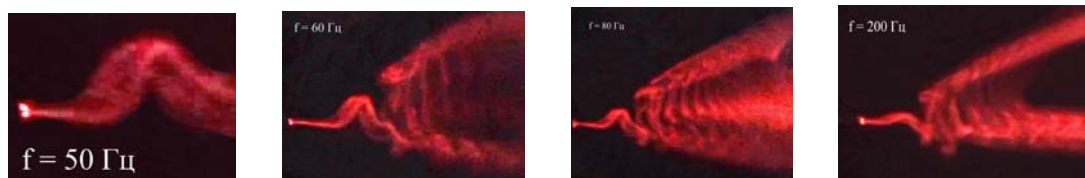


Рис. 17. Картина дымовой визуализации течения псевдоплоской микроструи при акустическом воздействии ($f = 50, 60, 80$ и 200 Гц)

ти самой струи она практически не расплывается (рис. 18).

Таким образом, при воспроизведении одного из экспериментов работы [1] было установлено, что акустическое воздействие на псевдоплоскую микрострую приводит к ее раздвоению и появлению синусоидального колебательного процесса всей плоскости струи с выделением определенных вихревых структур, что наблюдалось ранее при воздействии акустики как на плоскую макрострую [14], так и на круглую микрострую.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований развития действительно

плоской микроструи ($l/h = 70, 180$ при $l = 36\,000$ мкм и $h = 500, 200$ мкм соответственно) без акустики и с акустическим воздействием. В отсутствие акустики плоская микроструя была подвержена синусоидальному колебанию, что совпадает с результатами наших наблюдений за развитием плоской макроструи [7; 14]. Уменьшение поперечного размера выходной щели сопла до 500 и 200 мкм выявило ряд новых особенностей в поведении плоской микроструи. В отсутствие акустического воздействия, микроструя была подвержена синусоидальному колебанию как единое целое (рис. 19), что наблюдалось и ранее [7; 14].

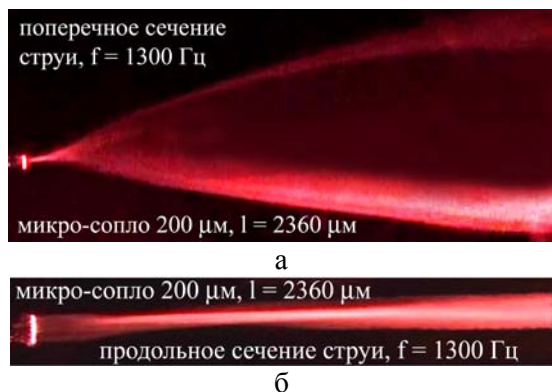


Рис. 18. Картины дымовой визуализации течения псевдоплоской микроструи при акустическом воздействии ($F = 1300$ Гц), поперечное (а) и продольное (б) сечения струи

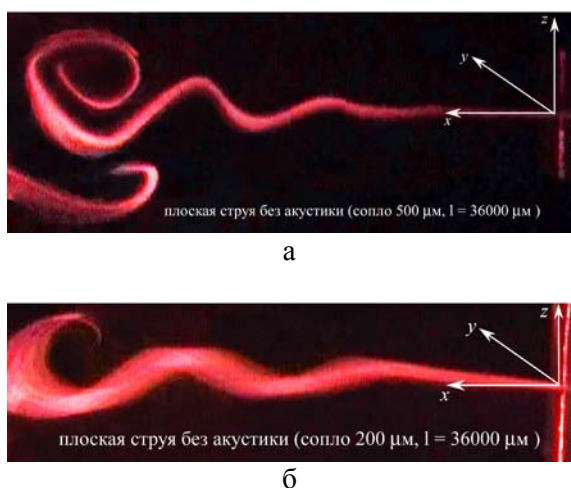


Рис. 19. Картина дымовой визуализации течения плоской микроструи без акустического воздействия: ширина выходного отверстия сопла 500 (а) и 200 мкм (б)

Именно синусоидальное колебание плоской струи приводит к появлению синусоидальной вихревой дорожки при воздействии поперечного акустического поля на макрострую [7; 14]. В случае воздействия на микрострую поперечного акустического поля на низких частотах (30–150 Гц) наряду с появлением синусоидальной вихревой дорожки можно было наблюдать и процесс закрутки плоскости струи на ее краях в направлении переменного вектора скорости потока, создаваемого акустическим полем (см. рис. 19). На рис. 20 хорошо видно, что под действием акустики интенсивностью 90 дБ четко прослеживается явление концевых эффектов, заключающегося в сворачивании вихревой

пелены струи в противоположных друг к другу направлениях на каждом периоде акустического воздействия. При этом на картинах дымовой визуализации течения струи (см. рис. 20) отчетливо видно, что если в центре струи (сечение 1) сохраняется синусоидальная вихревая дорожка колебания струи в целом то в областях проявления концевых эффектов можно наблюдать раздвоение плоской струи (сечения 2 и 3).

Более детально результат воздействия поперечного акустического поля на плоскую микрострую на начальном этапе процесса можно наблюдать на рис. 21. Видно, что струя начинает раздваиваться вблизи края сопла из-за краевого эффекта, вызванного поперечным акустическим полем.

Картины визуализации дымом микроструи в различных сечениях xz вдоль координаты y показаны на рис. 22, а–в. Можно ясно наблюдать синусоидальную вихревую дорожку в сечении струи xz на координате $y = 0$ мм, т.е. в центре плоскости струи. Далее от центра струи в стороны ее краев (см. рис. 21, б–в), отчетливо прослеживается механизм раздвоения микроструи по причине колебательного процесса, вызванного поперечным акустическим полем, приводящего к сворачиванию плоскости струи на ее краях то в одну, то в противоположную сторону.

Явление раздвоения наблюдалось ранее в исследованиях круглой микроструи, которая под воздействием поперечного акустического поля уплощалась и приобретала свойства развития, присущие плоской струе. Появление же нового вида неустойчивости плоской микроструи (раздвоение из-за периодического сворачивания краев плоскости струи) связано с сопоставимостью энергии, создаваемой акустическим полем, с энергией микроструи. Аналогичное явление наблюдалось и в случае истечения струи из сопла с поперечным размером 500 мкм (рис. 23).

Под воздействием поперечного акустического поля на картине дымовой визуализации течения можно наблюдать процесс сворачивания струи из-за концевых эффектов (см. рис. 23, а). Поперечное сечение струи в плоскости xz (см. рис. 23, б) демонстрирует синусоидальную вихревую дорожку большой протяженности, сохраняющей свою когерентную структуру в ограниченном по пространству канале, воз-

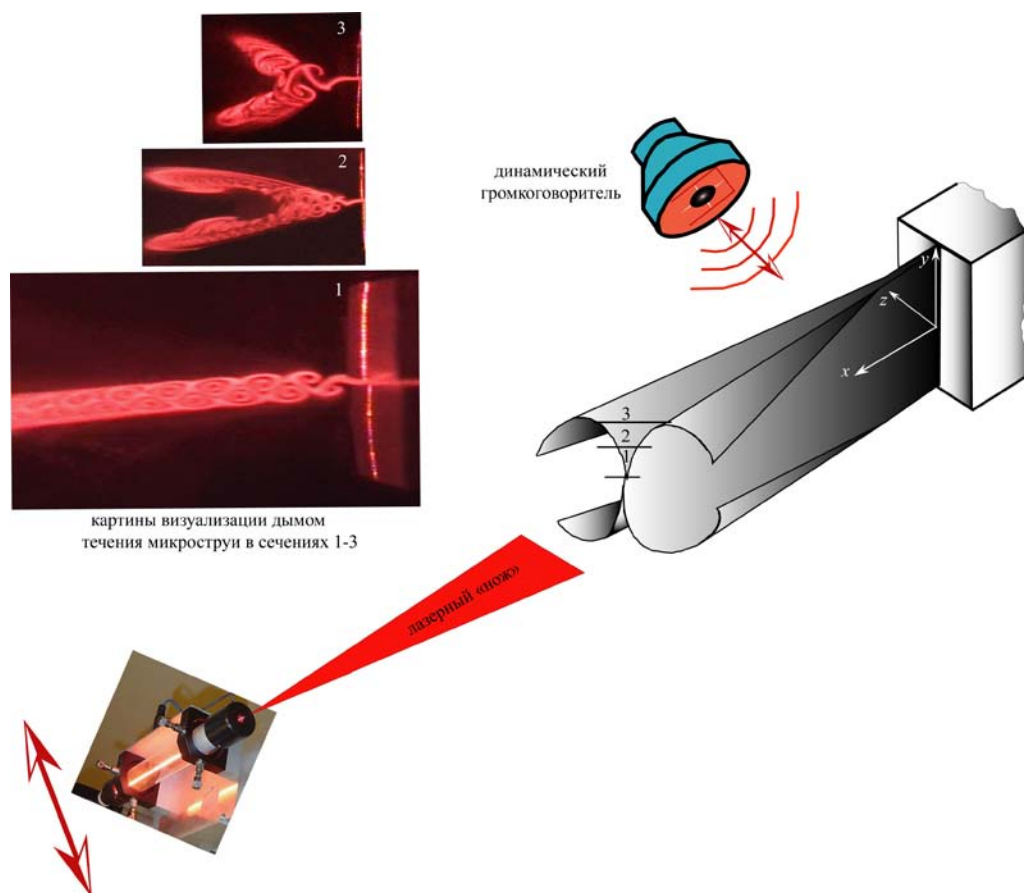


Рис. 20. Схема развития плоской микроструи (200 мкм) под воздействием поперечного акустического поля ($F = 150$ Гц, 90 дБ) и картины визуализации дымом струи в плоскости xz для различных позиций в направлении оси y

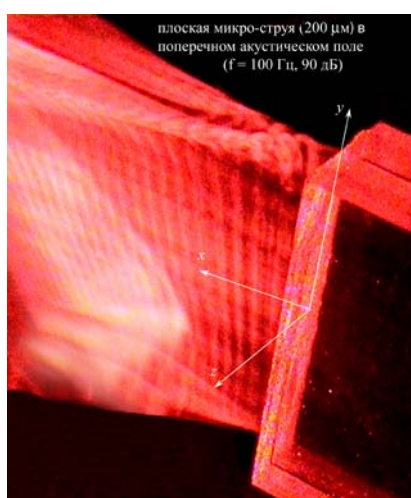


Рис. 21. Картина визуализации дымом общего вида микроструи ($\delta = 200$ мкм, $l = \pm 18$ мм), подверженной влиянию поперечного акустического поля ($F = 150$ Гц, 90 дБ)

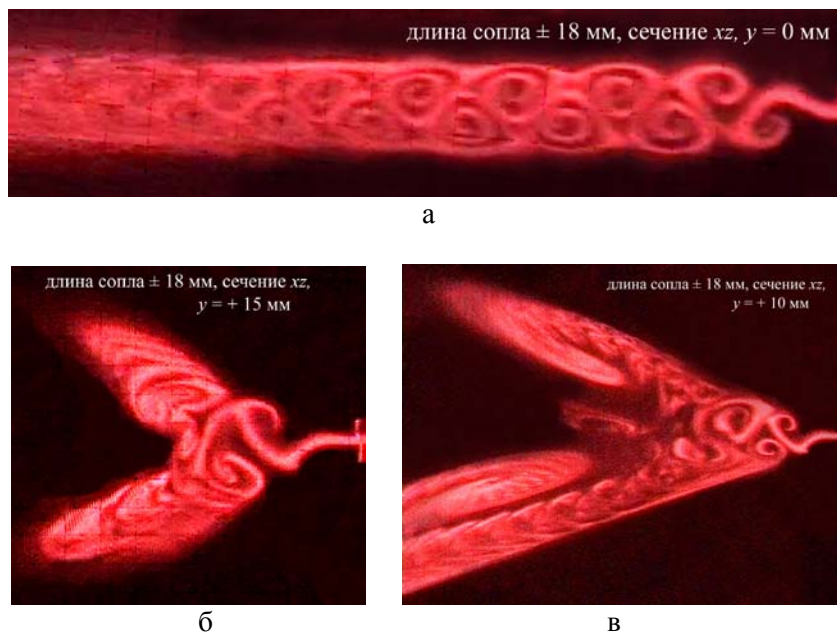


Рис. 22. Картина визуализации дымом микроструи ($\delta = 200$ мкм, $l = \pm 18$ мм), подверженной влиянию поперечного акустического поля ($F = 150$ Гц, 90 дБ) в сечениях xz для различных координат вдоль оси y

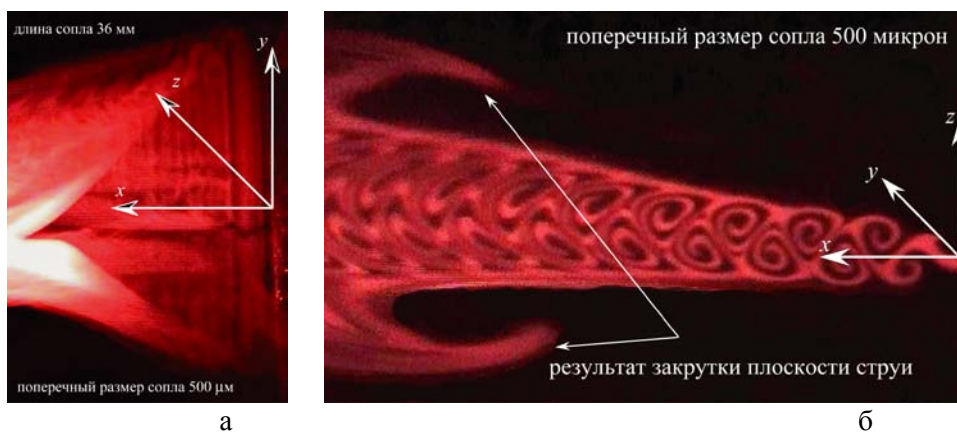


Рис. 23. Картины дымовой визуализации процесса развития плоской микроструи в поперечном акустическом поле ($F = 100$ Гц): a – общий вид струи в плоскости xy ; $б$ – поперечное сечение струи в плоскости xz

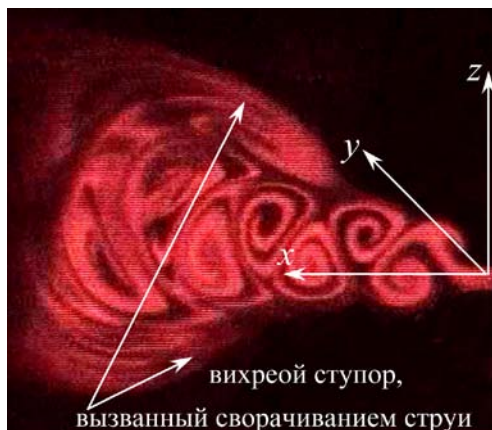


Рис. 24. Картина дымовой визуализации процесса развития плоской микроструи в поперечном акустическом поле ($F = 100$ Гц)

никновение которого связано с процессом сворачивания струи. Следует отметить, что этот процесс приводит к остановке (ступору) развития струи вниз по потоку и препятствует ее дальнейшему развитию вниз по потоку и турбулизации (рис. 24).

В заключение сформулируем некоторые основные выводы работы.

1. Показано, что механизм неустойчивости Кельвина – Гельмгольца для круглой струи с «ударным» профилем скорости на срезе сопла сохраняется до диаметра струи, равного примерно 5 мм.

2. Установлено, что механизм развития микроструи как с ударным, так и с параболическим профилем скорости на срезе сопла кардинально меняется.

3. Обнаружено новое явление, связанное с трансформацией круглой микроструи в плоскую микрострую под воздействием поперечного акустического поля.

4. Показано, что ее развитие вниз по потоку определяется механизмом синусоидальной вихревой неустойчивости плоской струи.

5. Обнаружено явление раздвоения микроструи на две развивающиеся независимо друг от друга струи.

6. Установлено, что две новые микроструи распространяются под определенным углом друг к другу и подвержены высокочастотной вторичной неустойчивости.

7. Показано, что синусоидальная неустойчивость плоской струи сохраняется для макро- и микроструй как с акустическим, так и без акустического воздействия.

8. Установлено, что акустическое воздействие на псевдоплоскую микрострую ($l/h = 10$) приводит к механизму ее развития, аналогичному механизму развития круглой микроструи в поперечном акустическом поле.

9. Показано, что псевдоплоская микроструя в присутствии акустического поля демонстрирует наличие в ней вихревых структур и зависимость угла раздвоения струи от частоты акустики.

10. Обнаружено новое явление – так называемая закрутка плоскости микроструи ($l/h = 70, 180$) на ее краях в направлении переменного вектора скорости потока, создаваемого поперечным акустическим полем.

11. Показано, что процесс закрутки микроструи приводит к остановке (ступору) развития струи вниз по потоку и препятст-

вует ее дальнейшему развитию вниз по потоку и турбулизации.

12. Установлена принципиальная разница в воздействии акустического поля на неустойчивость круглой и плоской микроструй. Показано, что синусоидальная неустойчивость круглой микроструи зависит от направления вектора акустического поля, а плоской микроструи – не зависит.

13. Установлено, что новые явления, обнаруженные в процессе исследований развития как круглой, так и плоской микроструи, обусловлены соизмеримостью энергии поперечного акустического поля с энергией самих микроструй.

Список литературы

1. *Chie Gau, Shen C. H., Wang Z. B.* Peculiar Phenomenon of Micro-Free-Jet Flow // *Physics of Fluids*. 2009. Vol. 21. No. 092001. P. 1–13.

2. *Carpenter J.-B., Baillot F., Blaisot J.-B., Dumouchel C.* Behavior of Cylindrical Liquid Jets Evolving in a Transverse Acoustic Field // *Physics of Fluids*. 2009. Vol. 21. No. 023601. P. 1–15.

3. *Abramov O. V., Borisov Y. Y., Oganyan R. A.* Critical Sound Pressure in the Acoustic Atomization of Liquids // *Sov. Phys. Acoust.* 1987. Vol. 33. P. 339–345.

4. *Hoover D. V., Ryan H. M., Pal S., Merkle C. L., Jacobs H. R., Santoro R. J.* Pressure Oscillation Effects on Jet Breakup // *ASME, Heat and Mass Transfer in Spray Systems HTD*. 1991. Vol. 187. P. 27–41.

5. *Heister S. D., Rutz M. W., Hilbing J. H.* Effect of Acoustic Perturbation on Liquid Jet Atomization // *J. Propul. Power*. 1997. Vol. 13. P. 82–97.

6. *Бойко В. М., Оришич А. М., Павлов А. А., Пикалов В. В.* Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте. Новосибирск, 2009. 449 с.

7. *Козлов В. В., Грек Г. Р., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А.* Физические аспекты развития дозвуковых струйных течений // *Успехи механики сплошных сред: Сб. науч. тр. всерос. конф., приуроченной к 70-летию академика В. А. Левина*. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 331–351.

8. *Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А.* Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круг-

лой струи // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 1. С. 59–73.

9. Литвиненко М. В., Козлов В. В., Козлов Г. В., Грек Г. Р. Влияние продольных полосчатых структур на процесс турбулизации круглой струи // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 3. С. 50–60.

10. Lim T. T., New T. H., Luo S. C. On the Development of Large-Scale Structures of a Jet Normal to a Cross Flow // Phys. Fluids. 2001. Vol. 13. No. 3. P. 770–775.

11. Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Моделирование неустойчивости ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2009. Т. 4, вып. 1. С. 14–24.

12. Sato H. The Stability and Transition of a Two-Dimensional Jet // J. Fluid Mech. 1960. Vol. 7 (1). P. 53–80.

13. Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В. Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях. М.; Ижевск, 2006. 304 с.

14. Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения и устойчивость плоской струи // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 3. С. 25–37.

15. Yu M.-H., Monkewitz P. A. Oscillations in the Near Field of a Heated Two-Dimensional Jet // J. Fluid Mech. 1993. Vol. 255. P. 323–347.

Материал поступил в редколлегию 04.03.2010

V. V. Kozlov, G. R. Grek, Yu. A. Litvinenko, G. V. Kozlov, M. V. Litvinenko

SUBSONIC ROUND AND PLANE JETS IN THE TRANSVERSAL ACOUSTIC FIELD

Results of the experimental studies of the subsonic round and plane both the macro and micro-jets are reported. The new phenomenon associated with transformation of the round micro-jets into the plane micro-jets under effect of a transversal acoustic field is revealed. It is shown, that its downstream development is determined by the sinusoidal instability mechanism of the plane jet. The disintegration phenomenon of the micro-jets on two jets developing separately from each other is revealed. It is found, that two new micro-jets are spreaded under a definite angle to each other and subjected by high-frequency secondary instability. It is shown, that sinusoidal instability of a plane jet is saved for macro and micro-jets both with acoustic and without acoustic effect. It is found, that the pseudo plane micro-jet at the presence of an acoustic field demonstrates presence in it of the vortex structures and dependence of the jet splitting angle from the frequency acoustic. The new phenomenon, so-called twist of a plane of a micro-jet on its edges in direction of the stream velocity vector created by a transversal acoustic field is revealed. It is shown, that process of the micro-jet twist result in a stupor of the jet downstream development and delay of its turbulisation. It is found, that sinusoidal instability of the round micro-jet depends on a direction of the acoustic field vector while the plane micro-jet does not depend. It is shown, that the new phenomena detected during investigations of a development both the round and plane micro-jet are stipulated by commensurability of the transversal acoustic field energy with the micro-jets energy.

Keywords: round jet, plane jet, micro-jets, jets instability, smoke visualization, hot-wire anemometry, acoustic.