УДК 532.517.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ КРУГЛОЙ МИКРО-СТРУИ В УЗКОМ КАНАЛЕ

Шестаков М.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Грант РФФИ 12-08-00257-а «Экспериментальное исследование течения мини- и микроструй в компактных устройствах».

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты визуальных исследований структуры потока при течении затопленной круглой микро-струи в узком канале. Исследования выполнены при ламинарном и турбулентном режимах течения. По данным скоростной визуализации было выявлено четыре характерных режима течения струи в узком канале: ламинарный, ламинарный с крупномасштабными вихревыми структурами, переходной режим и турбулентный режим течения. Показано, что переход от ламинарного режима течения струи к турбулентному режиму течения струи связан с развитием синусоидальной моды неустойчивости. Ламинарный и переходной режим течения характеризуется сильной зависимостью длины ламинарной зоны струи от числа Re. Для турбулентного режима течения эта завитсимость слабая и длина ламинарной зоны струи уменьшается с ростом числа Re.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время интерес к изучению микротечений значительно возрос, что связано, с развитием принципиально новых технологических устройств микронных размеров. Исследование микрогидродинамики в мини- и микроканалах на фоне общей миниатюризации технологических устройств играет определяющую роль при создании принципиально новых технологий. Появилась возможность потенциального использования микроструй в различных процессах, таких как микроохлаждение, микрообработка, струйное горение, производство нанопорошков, управление макроструйными течениями, перемешивание микрообъемов растворов в химической и биологической промышленностях и т.д. В настоящее время количество работ по исследованию мини- и микроструй весьма ограниченно. Одной из причин сравнительно небольшого количества работ в этой области связано со сложностью экспериментальных измерений высокой точности, а также с трудностями изготовления микроустройств с контролируемыми параметрами (размеры, шероховатости и т.д.). Основными экспериментальными методиками, используемыми в ранних работах по исследованию мини- и микротечений, были визуализация и термоанемометрия.

Одни из первых работ посвященных экспериментальному изучению устойчивости микроструи при малых числах Re, являются работа Виилу [1] и работа Рейнольдса [2]. В работе [1] исследовалось течение затопленой свободной струи с выходным диаметром струи d_0 варьируемым в диапазоне от 130 до 450 мкм. В зависимости от сценария развития возмущений в струе автор классифицирует течение на четыре режима: устойчивое, течение с небольшим запасом устоичивости, течение близкое к устойчивому течению и неустойчивое течение. Основываясь на визуальных наблюдениях, автор определяет критическое число Re для затопленной свободной круглой микроструи, которое равно 10-12. В работе [2], котороя была инициирована работой Виилу [1], исследовалась микроструя жидкости

© Шестаков М.В.

с выходным диаметром d_0 = 350 мкм, при низких числах Рейнольдса, диапазон чисел Рейнольдса составлял от 10 до 300. В работе более детально описаны пять видов возмущений возникающих в струе: a) возмущения порождаемые сдвигом, b) симметричные возмущения, соответствующие варикозной моде неустойчивости, c) синусоидальные возмущения, соответствующие антисимметричной моде, d) синусоидальные возмущения, приводящие к распаду струи в дальней области e) возмущения, возникающие случайным образом приводящие к распаду струи. Авторы работ [1,2] указывают на наличие значительно затянутого ламинарного участка струи. О наличии аномального для макроструй продолжительного ламинарного участка в микроструях свидетельствуют и ряд других работ [3,4,7,8]. Авторами работы [7,8] высказывается предположение, что наличие затянутого ламинарного участка в микроструе обуславливается наличием параболического профиля скорости на срезе сопла, вследствие чего неустойчивость Кельвина – Гельмгольца не развивается. Известно, что в макроструях переход от ламинарного к турбулентному режиму течения обусловлен развитием неустойчивости Кельвина – Гельмгольца в слой смешения струи.

Ограниченые струйные течения исследовались в работах [5, 6, 9]. Визуализационное исследование истечения плоской турбулентной струи в ячейке Хил – Шоу было проведено в работе [5] при следующих параметрах глубина ячеки Хил-Шу h = 680 мкм и ширина сопла d = 6 мм. Авторами данной работы представлены картины течения, полученные с помощью визуализации, а также проведено сравнение с расчетом по модели, предложенной в работе [5]. В работе [6] сообщается о результатах визуальных исследований структуры потока, образующейся при истечении осесимметричной струи в затопленное пространство между двумя плоскопараллельными пластинами, расположенными на расстоянии h = 1.05мм. Исследования проведены в широком диапазоне чисел Рейнольдса от 160 до 10600. Анализ трековых картин течения показал большое разнообразие режимов течения с наличием характерных крупно- и мелкомасштабных движений. Ламинарный и переходной режим течения характеризуются наличием ламинарного участка струи, протяженность которого увеличивается с ростом числа Re. Турбулентный режим течения струи характеризуется крупномасштабными квази-двумерными структурами. Размеры и положение этих вихревых структур меняется с течением времени. В работе [9] по исследованию турбулентной плоской струи в узком канале h = 4 мм были измерены вторичные течения, которые образовывались в ближнем поле струи.

Наличие затянутого ламинарного участка в микроструе предполагает о существовании иного сценария перехода от ламинарного режима течения к турбулентному. В настоящее время нет ответа на вопрос, почему в микроструе не происходит столь быстрого роста возмущений в слое смешения струи как в макро струе и влияние какого механизма приводит к распаду струи на столь значительном расстоянии от выхода из сопла.

ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Экспериментальный стенд представлял собой замкнутый гидродинамический контур, состоящий из бака постоянного уровня, расходомера и рабочего участка. Дистиллированая вода из бака постоянного уровня через систему трубопроводов подовалась в сопло, которым являлся металлический капилляр внешним диаметром d=680 мкм, внутренним диаметром d_0=300 мкм и длиной 40 мм. Сопло монтировалось в плоский канал, образованный двумя стеклянными пластинами шириной 100 мм длиной 250 мм и толщиной 40 мм расположенными на расстоянии h=680 мкм друг от друга. Температура жидкости поддерживалась постоянной 26±0,5°C. Исследования проводились в широком диапазоне чисел Re от 100 до 4 000.

Для исследования течения круглой микроструи в узкий канал использовалась измерительная система «ПОЛИС», которая состояла из высокоскоростного сдвоенного импульсного лазера Pegasus PIV Nd: YLF (10 мДж в импульсе) и высокоскоростной камеры 1200hs CMOS с частотой съемки 1200 Hz и синхронизующего процессора. Схема расположения измерительной системы представлена на рис. 1. Управление оборудованием и обработка данных осуществлялась посредством программного обеспечения ActualFlow.

Толщина лазерного ножа составляла 700 мкм и засвечивала узкий канал по всей толщине.В оптической системе применялись объективы MicroNikon со светофильтром 550 нм, фокусное расстояние

объектива выбиралось взависимости от необходимого разрешения (50 мм, 60 мм и 100 мм).

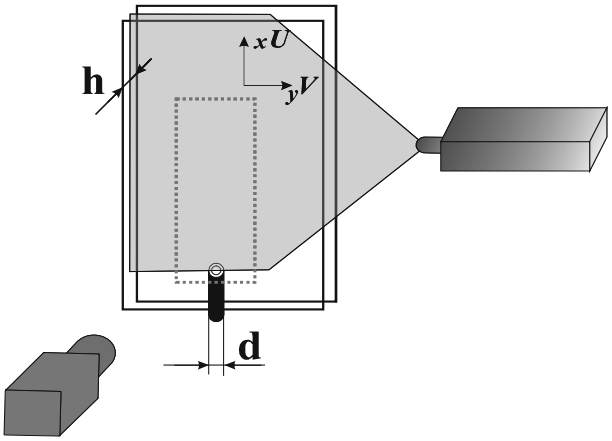

Рис.1 Схема расположения измерительной системы.

Для исследования устойчивости струи и развития возмущений, возникающих в струе, использовался метод PLIF. При измерениях в поток через сопло подавался краситель – слабый раствор флуорафора Rodamine 6G (5 мг/л), при этом поток освещался лазерным ножом. Полученные распределения интенсивности флуоресценции красителя регистрировались на высокоскоростную цифровую камеру. Толщина лазерного луча несколько привышала толщину канала, в связи с этим полученные яркостные картины течения представляли собой распределения красителя, осредненного по глубине канала. В ходе проведенного визуализационого исследования были получены серии изображений красителя в потоке. Для повышения контрастности полученных изображений, из всех изобажений вычиталось осредненное изображение. Осредненое избражение рассчитывалось как среднее по ансамблю первичных распределений красителя.

Для получения количественной информации о потоке, полей скорости, использовался метод PIV. Для этого в поток добовлялись флуоресцентные полиамидные трассеры со средним диаметром 3 мкм. Для повышения точности расчета векторов скорости и увеличения динамического диапазона использовался итерационный кросскорреляционный алгоритм с непрерывным смещением расчетной области, конечный размер расчетной области составил 16×16 пикселя с 50% перекрытием. В результате обработки изображений размер конечного поля скорости соответствовал 92×127 векторов с шагом 0,77 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.2 представлены мгновенные картины течения струи в узкий канал для трех различных режимов течения ламинарного, переходного и турбулентного, картины получены при помощи высокоскоростной визуализции краской, частота съемки 500 Гц.

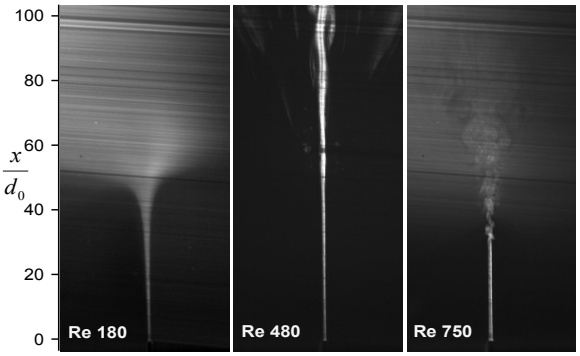

Рис.2 Мгновенная картина течения микроструй в узком канале.

При ламинарном режиме (Re = 180), течение струи характеризуется двумя областями: областью струйного течения и областью, в которой струя начинает сильно растекаться в поперечном направлении.

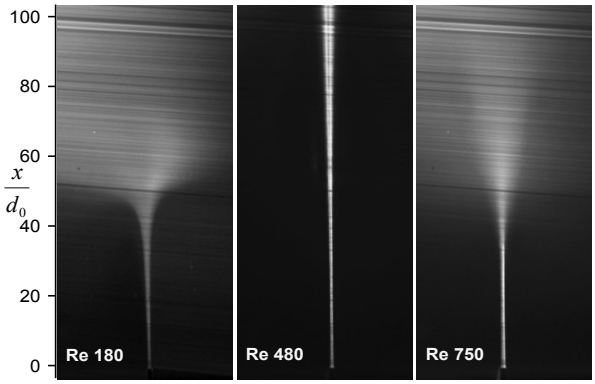

Рис.3 Осредненная картина течения микроструй в узком канале

Расположение данных областей зависит от отношения между инерционными силами и силами вязкости в струе. Такая же картина течения реализуется при низких числах Re для плоской струи

в щелевом канале [5]. С увеличением числа (Re = 480) область струйного течения увеличивается и струя становится неустойчивой. Развитие данной неустойчивости приводит к колебательному движению струи, которое обусловлено развитием синусоидальной моды неустойчивости.

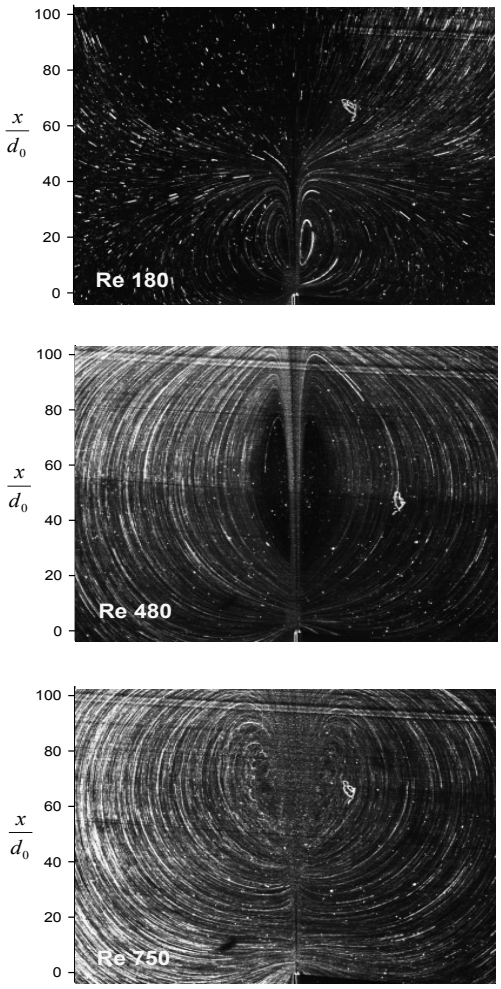

Рис.4 Линий тока для осредненного течения микроструй в узком канале.

Данный режим течения соответствует одному из пяти режимов, режим С описанный в работе [2]. При дальнейшем увеличении расхода (Re = 750) в струе возникают возмущения, которые приводят к кратковременному развалу струи. При турбулентном режиме картина течения струи представляет собой продолжительный ламинарный участок, после которого начинается участок турбулентного струйного течения с углом раскрытия приблизительно 15 градусов. Из анализа последовательных картин течения, полученных со скоростью съемки 1 кГц, следует, что распаду струи предшествует область синусидального движения, развитие именно синусоидальной неустойчивости приводит переходу к турбулентному режиму течения и распаду струи.

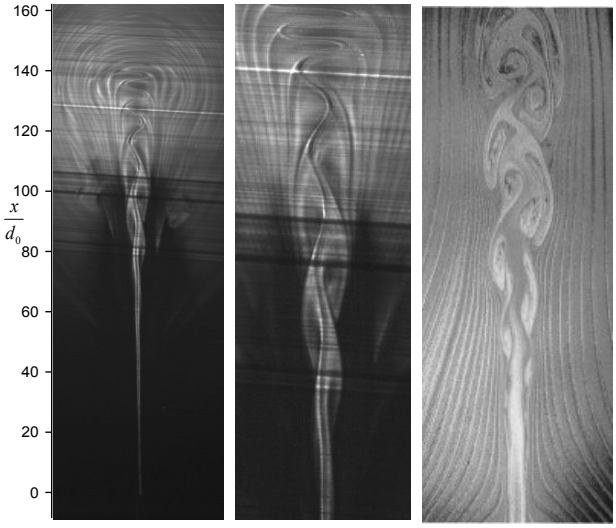

Рис.5 Мгновенная картина течения микроструй в узком канале Re 500.

На рис.3 показаны осредненые картины течения для режимов, представленных на рис.2. Данные изображения были получены путем осреднения серии мгновенных изображений. При низких числах Рейнольдса мгновенная картина течения неотличается от осредненной по ансамблю. Характерные особенности переходного режима течения (Re = 480) следующие: большая продолжительность ламинарного участка и малый угол раскрытия струи. Турбулентный режим течения характреризуется точкой распада струи, которая разделяет область ламинарного и турбулетного струйного течения. Расстояние от сопла до точки распада уменьшается с увеличением числа Рейнольдса и при числе Re=4000 струя раскрывается сразу после выхода из сопла подобно течению затопленной макроструи. Угол раскрытия турбулентной микроструи лежит в диапозоне 19-25 градусов.

На рис.4 представлены распределения линий тока, полученные путем осреднения серии изображений распределения частиц в потоке. Частицы маркируют линии тока медленного течения.

Для ламинарного режима (Re = 180) в области струйного течения линии тока являются замкутыми и образуют области возвратного течения, которые расположены с правой и левой стороны от струи. Аналогичная картина линий тока получается при моделировании потенциального течения в тонком слое жидкости с источником и

стоком [10]. В области потенциального течения линии тока представляют собой расходящиеся линии. Распределение линий тока в области потенциального течения хорошо согласуется с картиной течения, которая была получена с помощью визуализации. С увеличением числа Re области возвратного течения увеличиваются в размерах, в ближнем поле струи появляется участок, где линии тока подходят к струе перпендикулярно ее оси. Аномальная для микроструй продолжительность ламинирного участка обусловлена наличием областей возвратного течения, которые располагаются справа и слева от струи. Для турбулентного режима течения (Re = 750) после области ламинарного участка, где линия тока перпендикулярны ости струи, следует область, в которой линии тока подходят к струе снизу. Такое поведение линий тока обусловлено захватом внешней жидкости вследствиие интенсивного турбулентного перемешивания в струе. Начало этой области совпадает с точкой распада струи и началом турбулентного течения.

Особеностью переходного режима течения является наличие крупномасштабных вихревых структур, которые образуются при истечении круглой микроструи в узкий канал. Образование этих структур является следствием развития синусоидальной моды неустоичивости в струе. Вследствие ограничения течения стенками канала, течение струи являются двумерным. На этот факт также указывает некоторое сходство между течением круглой струи в узком канале и течением двумерной струи в мыльной пленке, толщина которой состовляет 1 мкм (рис.5).

На рис.6 представлены распределения продольной и поперечной компоненты средней скорости. Данные распределения скорости представляют собой результат осреднения скорости по глубине и осреднения по ансамблю мгновенных полей скорости.

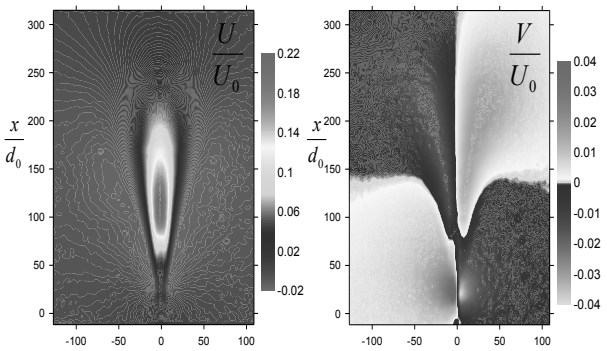

Рис.6 Осредненое поле скорости слева продольная компонента скорости, справа поперечная компонента скорости Re 1500.

На рис.6 a) представлено поле продольной компоненты средней скорости. Структура течения микроструи подобна структуре макроструи для турбулентного режима а распределение скорости в слое смешения так же подчиняется линейному закону. Однако максимум скорости в микроструе расположен на расстоянии 100 калибров, что является не совсем физическим результатом. Данный эффект связан с низким пространственным разрешением и осреднением скорости по глубине канала. На рис.6 b) представлено распределение поперечной компоненты скорости. В ближнем поле струя характеризуется максимом поперечной скорости данный максимум обусловлен интенсивным захватом окружающей жидкости, после которого и начинает происходить распад струи и переход к турулентному течению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования течения круглой микроструи в узкий канал были выявлены четыре характерных режима течения; ламинарный, ламинарный с двумерными вихревыми структурами, переходной режим и турбулентный режим течения. При ламинарном режиме течения поле течения струи в узком канале можно разделить на две области: инерционая область с возвратными течениями и область вязкого течения. Показано, что начиная с числа Re 450, струя становится неустойчивой к синусоидальным возмущениям. Развитие синусоидальной неустойчивости приводит к формированию вихревых структур. Основной особенностью течения микроструи в узком канале является продолжительный ламинарный начальный участок струи. Переходной режим течения характеризуется распадом струи вследствие внезапной потери устойчивости. Точка распада, точка перехода к турбулентному режиму течения, сопровождается интесивным вовлечением внешней жидкости в ядро струи. С увеличением числа Ренольдса длина ламинарного участка струи уменьшается, а точка распада струи приближается к соплу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Viilu A. 1960 Preliminary Report of Massachusetts Institute of Technology (Dept. Aeronautics and Astronautics) for NASA. Grant No. NsG-31-60.
2. Reynolds A.J. Observations of a liquid-to-liquid jet // J. Fluid Mech. – 1962. – Vol. 14. – P. 552 – 556.
3. Becker H.A., Massaro T.A. Vortex evolution in a round jet // J. Fluid Mech. – 1968. – Vol. 31– part 3. – P. 435– 448.
4. Koller-Milojevic D., Schneider W. Free and confined jets at low Reynolds numbers// Fluid Dynamics Research. – 1993 – 12. – P. 307-322.
5. В. Д. Жак, В. А. Мухин, В. Е. Накоряков, С. А. Сафонов. Распространение затопленной струи в узкой щели.// ПМТФ. –1985 – Том 151. – № 3.
6. Перепелица Б.В., Шестаков М.В. Пространственная структура потока при истечении круглой струи в узкий канал.// Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – том 16 – №1– С. 226-229.
7. Козлов В.В. и др. Дозвуковые круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле. Вестинк НГУ серия: Физика. – 2010. – Том 5. – выпуск 2.
8. Chie Gau, и et.al. Peculiar phenomenon of micro-free-jet flow.// Physics of fluids.– 2009. – 2. – P.¬– 092001.
9. Bilsky A.V., Lozhkin A.V., Markovich D. M., Shestakov M.V., Tokarev M. P. Tomographic PIV and Planar Time-resolved PIV Measurements in a Turbulent Slot Jet // Proc. of 16th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics (ALTFM). – 2012.
10. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск. 2000. – С. 206.