

УДК 536.24

Пространственная структура потока при истечении круглой струи в узкий канал*

Б.В. Перепелица, М.В. Шестаков

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: perep@itp.nsc.ru

Приведены результаты визуальных исследований структуры потока при течении затопленной круглой струи в узком канале. Исследования выполнены при ламинарном и турбулентном режимах течения. В потоке обнаружены характерные крупномасштабные структуры и зоны с интенсивным турбулентным перемешиванием.

Ключевые слова: визуализация, турбулентность, струя, узкий канал, вихревые структуры.

Затопленные струи жидкости или газа, примыкающие к твердым стенкам, обладают рядом полезных свойств с прикладной точки зрения. Благодаря этому пристенные струи широко используются в авиации, судостроении, энергетике, пневматике, медицине и т. д., в основном, для интенсификации массо- и теплообменных процессов или для управления течениями рабочих жидкостей. Экспериментальным наблюдениям структуры потоков и образованию когерентных структур в турбулентных течениях посвящено большое количество работ. Для исследований широко используют различные методы визуализации потока с целью непосредственного наблюдения сложных нестационарных турбулентных движений [1]. Организованные структуры свободных сдвиговых слоев наблюдаются в слоях смешения и в области развитого течения осесимметричной и плоской струй [2]. В то время как наблюдается высокая степень организованности структур, их временная последовательность остается, однако, стохастической. Свободные струи структурно относятся к сдвиговым слоям, имеющим когерентные структуры сравнительной простоты: основные элементы — это линейные вихри для двумерных конфигураций и кольцевые или спиральные вихри в случаях осевой симметрии [3, 4]. Распознавание когерентных структур является затруднительным ввиду множества и очевидной сложности структурных форм и динамики. Это характерно как для потоков, ограниченных стенками, так и для струйных течений. При истечении круглой струи в узкий канал на свободное струйное течение быстро накладывается влияние стенок, что приводит к особой структуре потока [5, 6].

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-08-00417-а).

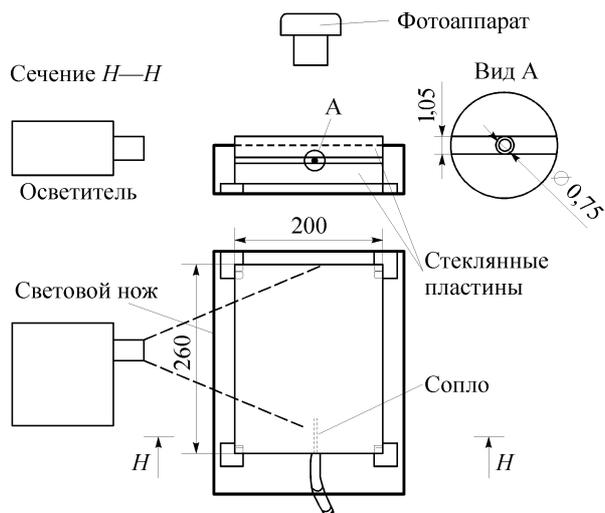


Рис. 1. Схема рабочего участка.

В настоящей работе сообщается о результатах визуальных исследований структуры потока, образующейся при истечении осесимметричной струи из трубки в затопленное пространство между двумя близко расположенными плоскопараллельными пластинами. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Узкий канал, в который происходило истечение струи, представлял собой зазор между двумя стеклянными пластинами размером 200×260 мм. Величина зазора (h) между пластинами составляла 1,05 мм. Все четыре боковые стенки канала были открыты. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Истечение струи происходило из трубки внешним диаметром 1,05 мм, внутренним — 0,75 мм и длиной 50 мм с гладкой выходной кромкой. Расход воды через сопло поддерживался постоянным с помощью бака постоянного уровня. Средняя расходная скорость струи на выходе из сопла изменялась от 0,2 до 13,5 м/с. Температура жидкости в контуре поддерживалась постоянной. Исследования проводились в диапазоне чисел Рейнольдса от 160 до 10600 ($Re = WD/\nu$, где W — средняя расходная скорость, D — внутренний диаметр трубки, ν — кинематическая вязкость жидкости). Визуализация картины течения осуществлялась путем фотосъемки процесса истечения. Зона наблюдения освещалась галлогеновой лампой накаливания с помощью “светового ножа”. Для визуализации потока в воду добавлялись алюминиевые частицы, либо полистироловые шарики размером около 50 микрон. Достаточно длительная выдержка при съемке позволяет выделить осредненное течение и структуру потока. Анализ фотографий картины течения показал наличие характерных крупно- и мелкомасштабных движений.

Характерные фотографии потока при различных числах Рейнольдса приведены на рис. 2–4. Как для ламинарного, так и для турбулентного режима течения, наблюдаются следующие характерные особенности потока. По обе стороны от струи, в нижней ее части (у устья), образуются вращающиеся в противоположных направлениях пара вихрей, разделенных ядром струи. Струя на определенном расстоянии от сопла веерообразно растекается во все стороны. При небольших числах Re струя растекается на расстоянии 1-2 см от среза сопла (см. рис. 2, *a, b*). Течение стационарно во всей области. В нижней части веера линии тока резко меняют направление. Жидкость начинает течь в противоположном направлении, затем

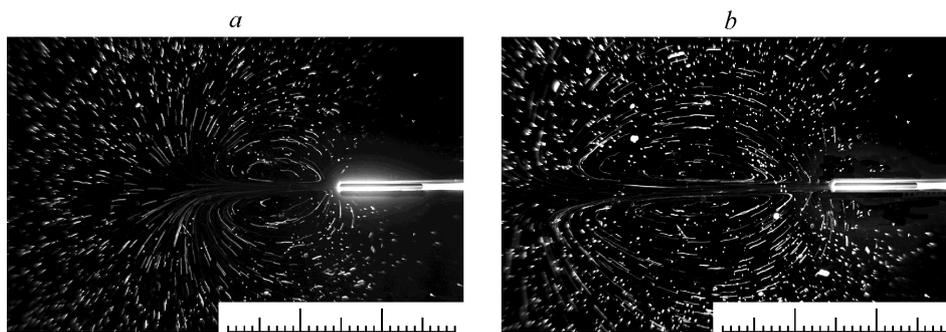


Рис. 2. Структура потока при ламинарном режиме течения.
 $Re = 160$ (a), 380 (b).

линии тока еще раз резко изгибаются, и жидкость снова подхватывается струей. Происходит захват жидкости круглой струей. Ширина струи увеличивается. С ростом расхода дальнобойность струи возрастает, и у ее устья начинают образовываться нестационарные вихревые структуры, которые обтекаются с внешней стороны медленным пульсирующим потоком жидкости (см. рис. 3, a, b). В этом случае вокруг струи начинают появляться мелкие вихревые структуры. Струя как бы покрывается чешуей. Ее расширение при этом — незначительное.

Иная картина течения наблюдается при турбулентном режиме истечения струи. Турбулентная струя начинает расширяться сразу на выходе из сопла по линейному закону. Угол раскрытия составляет почти 15 градусов. Ниже по потоку образуется характерная пара вихревых структур большего размера с высоким уровнем турбулентных пульсаций. Размеры и положение этих вихревых структур меняется с течением времени (см. рис. 4, a–d). Как и в ламинарном режиме, эти структуры с внешней стороны обтекаются медленным внешним потоком, который замыкается на струю. В области образования этих вихревых структур ядро струи сужается и принимает извилистую форму. При высоких числах Рейнольдса ($Re = 10600$) происходит образование нескольких вихревых структур вниз по потоку. Положение этих вихрей изменяется со временем (см. рис. 4, c, d).

Для понимания особенностей течения затопленной струи в узкой щели требуется детальное измерение поля скорости во всех обнаруженных характерных областях потока. Проведенные эксперименты показали, что вихревые структуры возникают в широком диапазоне чисел Re , а наличие структур не зависит от режима течения. В заключение отметим, что полученные результаты расширяют

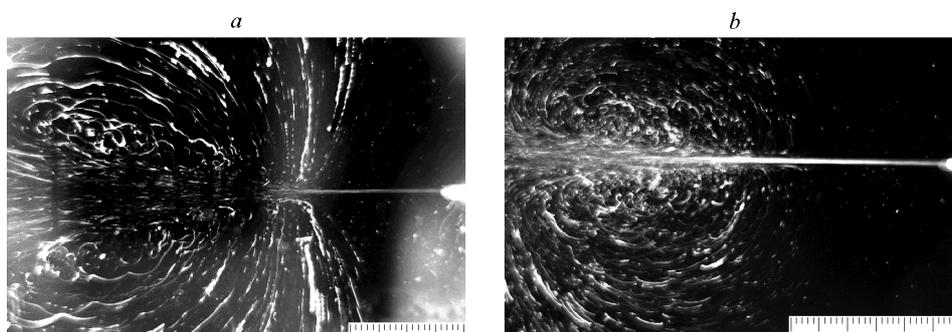


Рис. 3. Структура потока при переходных режимах течения.
 $Re = 1300$ (a), 1600 (b).

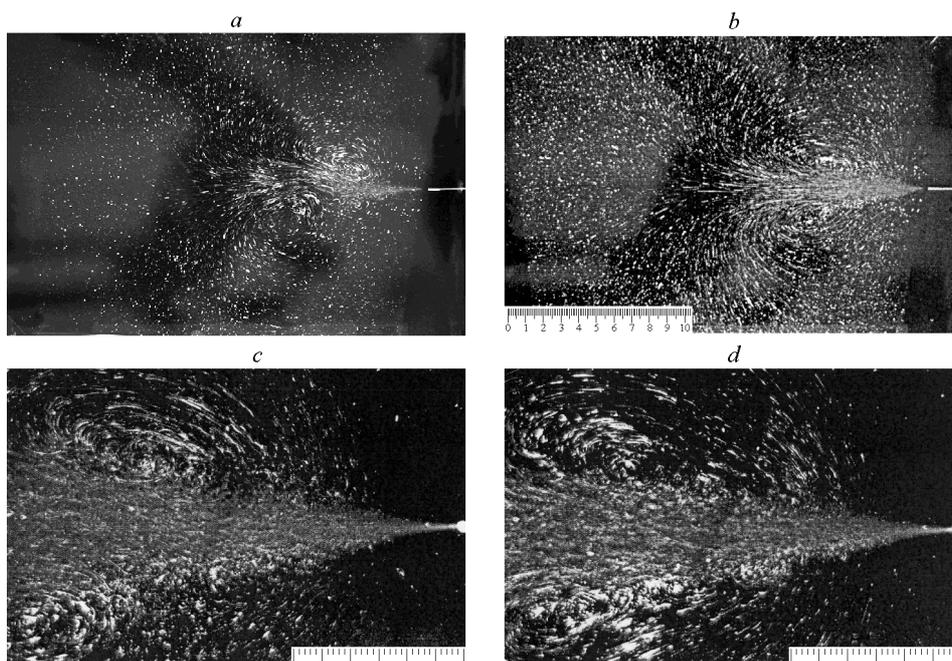


Рис. 4. Структура потока при турбулентном режиме течения в различные моменты времени (цена деления шкалы — 1 мм).
 $Re = 3200$ (a, b), 10200 (c, d).

представления о структуре течения струй в узких каналах. Необходимы более детальные исследования образующихся турбулентных структур внутри полости и их взаимодействия с основной струей.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$Re = WD/\nu$ — число Рейнольдса, безразмерное,
 D — внутренний диаметр сопла, м,

ν — коэффициент кинематической вязкости, m^2/s ,
 W — средняя расходная скорость, м/с,
 h — величина зазора, мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. — М.: Мир, 1986. — 101 с.
2. Fiedler H.E. Coherent Structures // Advances in Turbulence: Proc. of the First Europ. Turbulence Conf. Lyon, France, 1986 / Ed.: G.Conte-Bellot and J.Mathien. — Springer-Verlag, 1987. — 588 с.
3. Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. — Новосибирск: ИТ СО РАН, 2003. — 504 с.
4. Приходько В.Г., Ярыгин И.В., Ярыгин В.Н. Возникновение когерентных структур при взаимодействии импактной струи с отраженным от преграды потоком // Теплофизика и аэромеханика. — 2007. — Т. 14, № 4. — С. 665–667.
5. Жак В.Д., Мухин В.А., Накоряков В.Е., Сафонов С.А. Распространение затопленной струи в узкой щели // Журнал прикладной механики и теоретической физики. — 1985. — № 3. — С. 69–77.
6. Dracos T., Giger M., Jirka G.H. Plane Turbulent Jets in a Bounded Fluid Layer // J. Fluid Mechanics. — 1992. — Vol. 241. — P. 587–614.

Статья поступила в редакцию 20 июня 2008 г.