

УДК 536.24

Пространственная структура потока в канале с гофрированной стенкой*

Б.В. Перепелица

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

E-mail: perep@itp.nsc.ru

Приведены результаты визуальных исследований структуры потока при течении воздуха в канале с гофрированной стенкой. Исследования выполнены при ламинарном и турбулентном режимах течения. В потоке обнаружены характерные крупномасштабные структуры и зоны с интенсивным турбулентным перемешиванием. Предложена общая схема течения.

Ключевые слова: гофрированная стенка, вихревые структуры, дымовая визуализация.

Течение жидкостей и газов в каналах со сложными (трехмерными) поверхностями широко встречается в современных тепло- и массообменных аппаратах — это компактные теплообменники, химические реакторы, газотурбинные и комбинированные установки, авиационная и ракетно-космическая теплотехника. Трехмерные турбулентные течения в каналах сложной формы в последние десятилетия стали предметом многочисленных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований [1–4]. Для эффективного решения задач аэродинамики и теплообмена в трехмерной постановке необходимо выяснение фундаментальных закономерностей процессов переноса в таких устройствах. Структура турбулентности потоков в каналах сложной формы очень разнообразна и еще недостаточно изучена. Полезную информацию об общей картине течения могут дать визуальные методы исследования. Визуализация течения, основанная на наблюдении и регистрации структуры потока, является эффективным и содержательным методом исследования, позволяющим получить наглядную качественную информацию о картине течения [5]. Для исследований структуры потока широко используют различные методы визуализации потока с целью непосредственного наблюдения сложных нестационарных ламинарных и турбулентных движений [6–9]. Визуальные методы исследования также широко используются для изучения структуры потока при ламинарно-турбулентном переходе [10]. Наряду с визуализацией картины течения в потоке некоторую дополнительную информацию о структуре потока дает масляная визуализация поверхности. В работе [11] визуализация отрывных течений

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-08-00417-а).

на поверхности модели методом масляной пленки позволила оценить размеры и характер формирования отрывного течения.

Изучение крупномасштабной структуры турбулентных потоков в каналах сложной формы и распознавание когерентных структур в них является затруднительным ввиду множества и очевидной сложности структурных форм в них. Структура потока, наблюдаемая при течении в каналах сложной формы, не является стационарной, а изменяется случайным образом во времени и пространстве. Визуальные исследования служат для прямого получения интересующих сведений о ламинарных и турбулентных течениях в сложных внешних условиях и являются способом накопления опытной информации для дальнейшего совершенствования расчетов. При изучении структуры потока в каналах сложной формы возникают определенные трудности и с изготовлением оптически прозрачных моделей. Большой интерес с научной и технической точки зрения представляет изучение структуры потока в каналах с гофрированными стенками, которые находят широкое практическое применение [12–16].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей статье приведены результаты визуальных исследований картины течения в канале с гофрированной пластиной. Общий вид рабочего участка экспериментальной установки представлен на рис. 1. Исследования проводились в канале, одна стенка которого шириной 400 мм и длиной 800 мм представляет собой ряд прямоугольных треугольных каналов глубиной 32 мм и ориентированных под углом 45° к боковым стенкам, а другая — гладкая прозрачная пластина. Зазор между ребристой пластиной и гладкой стенкой канала составлял 20 мм. Фотографирование проводилось через прозрачную верхнюю пластину. В качестве рабочей жидкости использовался воздух. Исследования проведены в диапазоне чисел Рейнольдса от 220 до 2300.

Для исследования картины течения использовался метод наблюдения за трассирующими частицами. Этот метод основан на конвективном переносе таких частиц в потоке. В качестве трассирующих частиц использовался дым. Дымы представляют собой взвеси небольших твердых или жидких частиц в прозрачном

газе. При рассеянии и отражении света этими частицами создаются условия для визуализации течения. Для получения качественных контрастных фотографий необходимо подобрать соответствующее освещение и проводить фотографирование на черном фоне. В связи с этим стенки гофрированной пластины оклеивались черной тканью. Стенки канала можно считать технически гладкими и влиянием шероховатости на структуру потока можно пренебречь. Эти выводы подтверждаются и предварительными визуальными наблюдениями с использованием гофрированной стенки, изготовленной из оргстекла.



Рис. 1. Общий вид рабочего участка и зонда.

Наблюдения за хорошо видимыми струйками дыма, выпускаемыми из одной или нескольких трубок, позволяют получить представление об общей картине течения, характере отрывного течения, положении точек отрыва и о крупномасштабных вихрях. В данных опытах для подачи дыма использовался зонд с тремя трубочками, расположенными в одной плоскости на расстоянии 15 мм друг от друга. При наблюдении и для выявления характерных особенностей потока трубочки располагались в различных областях канала путем их перемещения и вращения вокруг оси державки. При наличии второй гофрированной пластины картина потока не должна сильно качественно измениться, поскольку, как показали наши измерения, в распределении температуры на стенке по периметру гофра в этом случае сохраняется подобие структуры потока со всеми характерными особенностями [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ ВИЗУАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Уже первые наблюдения картины течения, возникающей при обтекании гофрированной пластины, показали, что в турбулентном потоке имеет место сложная нестационарная структура потока с образованием крупномасштабных вихрей (рис. 2). Характерные фотографии потока, полученные при различных числах Re , представлены на рис. 2–7. Число Рейнольдса в опытах определялось как $Re = W \cdot D_T / \nu$, где W — средняя расходная скорость, D_T — гидравлический диаметр канала, ν — кинематическая вязкость. Средняя расходная скорость потока изменялась от 0,06 до 0,6 м/с. Начальная температура воздуха ($T_0 = 291–297$ К) принималась в качестве определяющей при расчете физических свойств воздуха.

Характерным свойством потока является его отрыв в верхней части подветренной стороны канала с образованием застойной зоны (рис. 3, 4). Это связано с тем, что, когда градиент давления по потоку становится отрицательным при течении газа в резко расширяющемся канале, толщина вязкого слоя возрастает, поскольку количество движения расходуется как на преодоление трения на стенке,

так и на градиент давления, и в некоторой области вязкий слой отрывается от ограничивающей поверхности. Вниз по потоку от области отрыва воздух проходит выше области рециркуляционного течения и набегает на наветренную сторону канала. В верхней

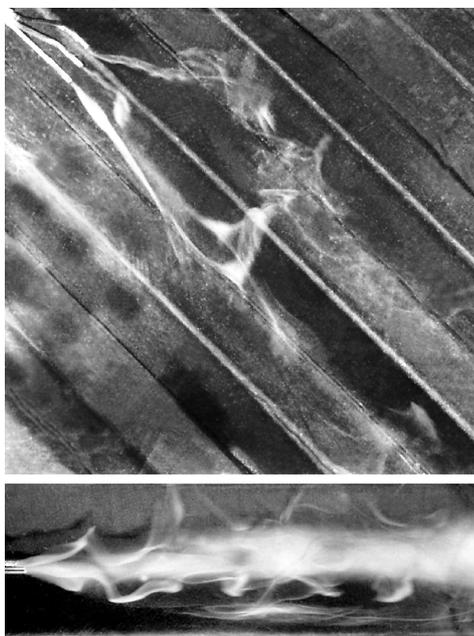


Рис. 2. Структура потока при $Re = 2300$.

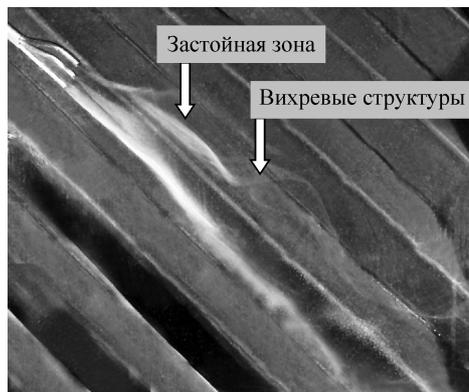


Рис. 3. Застойная зона и закрутка потока при $Re = 400$.

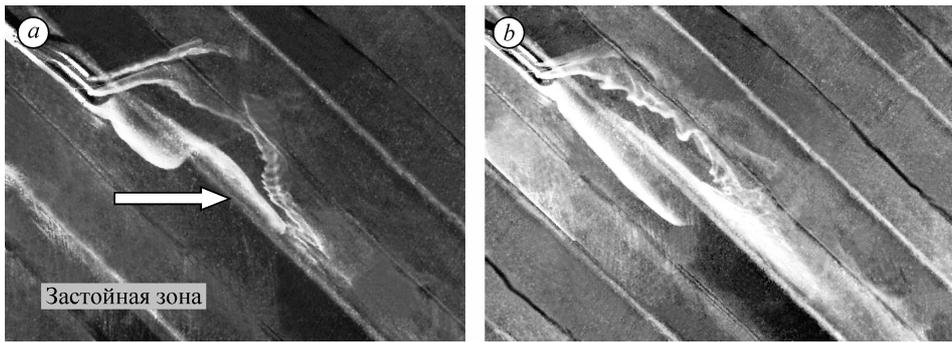


Рис. 4. Структура потока при $Re = 630$ (a) и 820 (b).

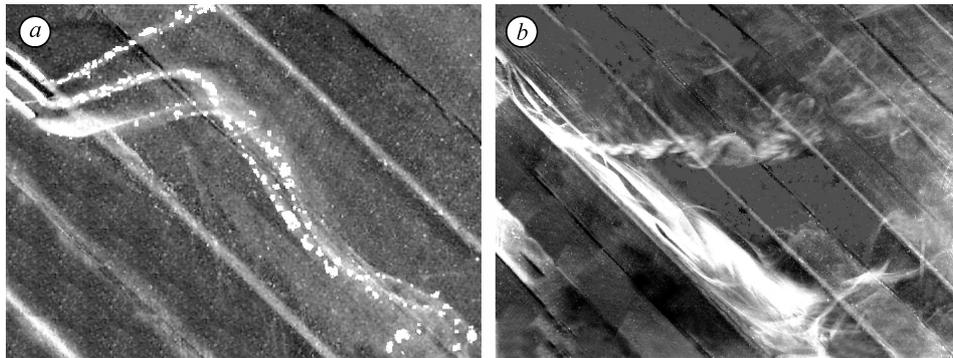


Рис. 5. Разворот потока по нормали к ребру и закрутка потока $Re = 220$ (a) и 1560 (b).

части наветренной стороны канала наблюдается область, где поток растекается в противоположные стороны (вверх и вниз вдоль наветренной стороны ребра). Ниже области натекания поток вдоль стенки закручивается и устремляется вглубь угла, а в верхней части наветренной стороны канала направляется вверх и обтекает ребро (см. рис. 3, 4). Над вершиной треугольного канала обнаружена узкая область, в которой воздушный поток направлен под углом 90° к ребру канала, т. е. резко изменяет свое направление (рис. 5). Немного выше этой зоны поток направлен вдоль направления основного потока, чуть ниже — вдоль ребра треугольного канала. В этой области возникают очень большие градиенты скорости. Область натекания потока на наветренной стороне ребра характеризуется наиболее высокими коэффициентами тепло- и массоотдачи. Закрутка потока приводит к тому, что часть жидкости из ядра потока смещается к подветренной стороне канала (см. рис. 3). В ядре потока можно наблюдать образование регулярных структур в виде вихревых спиралей (рис. 6). Следует отметить, что при больших числах Re картина течения быстро меняется во времени, и визуально наблюдать все детали потока не представляется возможным. Исчерпывающую информацию о картине течения можно получить путем регистрации ее с помощью скоростной видеокамеры.

Визуальные наблюдения и анализ фотографий потока позволили выделить некоторые весьма существ-

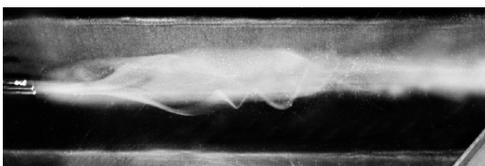


Рис. 6. Спирали в потоке $Re = 630$.



Рис. 7. Схема потока (цифры на схеме соответствуют характерным особенностям течения).

венные особенности течения и составить общую картину трехмерного течения для данной геометрии канала (рис. 7). При этом следует выделить следующие характерные особенности течения:

1. В верхней части подветренной стороны канала и в его глубине в потоке образуются застойные зоны.
2. В нижней части подветренной стороны ребра поток смещается в глубь канала и поднимается вверх по наветренной стороне.
3. На наветренной стороне канала наблюдается область в верхней части ребра, где поток растекается в противоположные стороны.
4. Интенсивный поток, направленный вниз из верхней части наветренной стороны канала, закручивает встречный поток, поднимающийся из угла вверх по стенке, и отрывает его от стенки.
5. В ядре канала образуются спиральные структуры.
6. Над вершиной треугольного канала обнаружена узкая область, в которой воздушный поток направлен под углом 90° к ребру канала, т. е. резко изменяет свое направление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М.И. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. 592 с.
2. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. С.-Петербург: Изд-во «Судостроение». 2005. 392 с.
3. Haechon Choi, Woo-Pyung Jeon, Jinsung Kim, Control of flow over a bluff body // Annual Review of Fluid Mechanics. 2008. Vol. 40. P. 113–139.
4. Thoroddsen S.T., Etoh T.G., Takehara K. High-speed imaging of drops and bubbles // Annual Review of Fluid Mechanics. 2008. Vol. 40. P. 257–285.
5. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. 101 с.
6. Kline J., Reynolds W.C., Schraub F.A., Runstadler P.W. The structure of turbulent boundary layers // J. Fluid Mech. 1967. Vol. 30. P. 741–773.
7. Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.
8. 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.
9. 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 // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 3. С. 14–33.

10. **Бойко А.В., Грек Г.Р., Довгаль А.В., Козлов В.В.** Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука, 1999. 328 с.
11. **Терехов В.И., Смутьский Я.И., Ярыгина Н.И.** Особенности теплообмена в отрывном течении за плоским ребром, расположенным под углом к основному потоку, при изменении внешней турбулентности // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 2. С. 219–227.
12. **Gradeck M., Lebouche M.** Wall shear measurements inside corrugated channels using the electrochemical technique // Experiments in Fluids. 1998. Vol. 24, No. 1. P. 17–26.
13. **Olujic Z.** Development of a complete simulation model for predicting the hydraulic and separation performance of distillation columns equipped with structured packings // Chem. Biochem. Engng. Q. 1997. Vol. 11, No. 1. P. 31–46.
14. **Gradeck M., Hoareau B., Lebouche M.** Local analysis of heat transfer inside corrugated channel // Inter. J. of Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 48, No. 10. P. 1909–1915.
15. **Перепелица Б.В.** Экспериментальное исследование влияния структуры турбулентного потока на распределение температуры в компактном теплообменнике // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, No. 4. С. 603–609.
16. **Amala Justus Selvam M., Chenthil Kumar, Nibin T., Muthuraman S.,** Computational Modeling and Simulation of Heat Transfer Analysis in Plate Heat Exchanger with Different Chevron Angles // J. of Engng. and Applied Sciences. 2007. 2 (4). P. 760–767.

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2009 г.