

Н.И. Михеев¹, В.М. Молочников¹, И.А. Давлетиин², Д.И. Романов¹

Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра РАН, Россия (1)
Казанский государственный технический университет им. А.Н.Туполева, Россия (2)

ОТРЫВ ПОТОКА ЗА ВЫСТУПОМ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования отрывной области за выступом в круглой трубе при пульсирующем турбулентном потоке. Получены данные о распределении продольной компоненты вектора поверхностного трения по длине отрывной области и размерах отрывной области в зависимости от частоты наложенных пульсаций среднего расхода потока.

1. ВВЕДЕНИЕ

Потоки рабочих сред в каналах различных технических устройств в общем случае имеют нестационарный характер. Наличие в этих каналах поворотов, внезапных расширений и сужений зачастую приводят к отрыву потока. Наличие таких отрывных областей оказывает существенное влияние на гидродинамические и тепловые параметры (гидравлическое сопротивление, коэффициент теплоотдачи) устройств [1].

Важнейшей характеристикой отрывного течения является длина отрывной области, под которой понимается расстояние от точки отрыва до точки присоединения потока. При известном положении точки отрыва (например, отрыв потока на острой кромке) длина отрывной области определяется положением точки присоединения. Чаще всего точка присоединения определяется как точка, в которой продольная компонента вектора поверхностного трения обращается в нуль, или как точка, в которой вероятности течения в прямом и обратном направлениях равны между собой [2,3]. Надо отметить, что не всегда эти два подхода дают одинаковые результаты.

Литературные данные позволяют судить о поверхностном трении как о векторной величине, имеющей продольную (по потоку) и поперечную составляющие. Важным параметром отрывных течений является продольная компонента вектора поверхностного трения τ_x , которая принимает характерные значения в различных областях таких потоков. В отрывной области τ_x принимает отрицательные значения (поток у стенки направлен против направления основного потока). Положительные значения τ_x в этой области вблизи выступа (уступа) свидетельствуют о наличии углового вихря. В области присоединения потока τ_x принимает нулевые значения. За точкой присоединения, в области релаксации, продольная компонента вектора поверхностного трения опять становится положительной.

Существующие эмпирические данные дают представление о длине отрывной области при обтекании безграничными стационарными турбулентными потоками выступов (перегородок) и уступов. В первом случае длина отрывной области $X_R=(10\dots 12)h$, а во втором $X_R=(5\dots 6)h$, где h – высота выступа (уступа). Для турбулентных отрывных течений с наложенными пульсациями скорости задача становится намного сложнее. И данных по таким течениям явно недостаточно. Изучение потоков с периодическими пульсациями расхода усложняется существенной зависимостью профилей гидродинамических параметров от частоты и амплитуды наложенных пульсаций [4]. Например, в работе [5] для нестационарных режимов были получены даже отрицательные значения турбулентной вязкости.

Данные по теплообмену в отрывной области в условиях стационарного турбулентного течения обобщены в [6]. Для пульсирующих турбулентных потоков в настоящее время нет данных даже о влиянии наложенной нестационарности на размеры отрывной области.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения экспериментов по отрывным течениям в пульсирующих турбулентных потоках была создана установка, схема которой представлена на рис.1. Основными элементами установки являлись рабочий участок, устройство для создания пульсаций расхода 3, ресивер 4 объемом около $0,5 \text{ м}^3$, на выходном герметичном фланце которого устанавливался набор критических сопел 5, и турбокомпрессор 6, работающий на всасывание (рис.1,а).

Рабочий участок состоял из двух частей. Неподвижная часть 2 представляла собой круглую металлическую гидравлически гладкую трубу с внутренним диаметром $d_2=64$ мм и длиной 1200 мм, на которой устанавливались в сечении I – термоанемометрический датчик продольной компоненты вектора поверхностного трения τ_x , в сечении II – термоанемометрический датчик скорости потока U . Подвижная часть 1 выполнена из гладкой трубы с внутренним диаметром $d_1=50$ мм и длиной 600 мм, на выходном торце которой устанавливалась диафрагма $d_0=40$ мм. В данном случае диафрагма являлась выступом высотой $h=(d_2-d_0)/2=12$ мм в канале,

на острой кромке которого осуществлялся гарантированный отрыв потока. Подвижная часть рабочего участка имела возможность перемещаться в трубе 2. Линейка с координатной шкалой позволяла контролировать положение диафрагмы относительно датчиков. Герметичность телескопического соединения подвижного и неподвижного частей рабочего участка обеспечивалась двумя радиальными резиновыми уплотнителями.

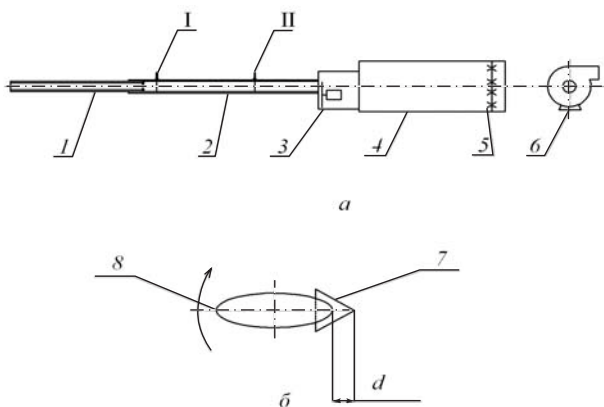


Рис. 1. Экспериментальная установка

Пульсации расхода обеспечивались устройством с вращающейся заслонкой эллиптической формы (рис.1,б), периодически перекрывающей входное отверстие (по форме – треугольник со скругленными краями) герметичного отсека. Заслонка приводилась во вращение электроприводом с регулируемой и стабилизируемой частотой вращения. Конструкция устройства для создания пульсаций расхода обеспечивала возможность регулирования амплитуды пульсаций расхода посредством изменения степени перекрытия отверстия.

Схема рабочего участка представлена на рис. 2. Поток воздуха протекал по трубе 1, отрывался на кромке диафрагмы 3 и присоединялся к стенке трубы 2.

Сбор и обработка опытных данных по скорости потока и поверхностного трения выполнялись при помощи автоматизированной системы, включающей ПЭВМ и восьмиканальный аналого-цифровой преобразователь с параллельным опросом каналов. При частоте наложенных пульсаций расхода до 100 Гц частота опроса каналов составляла 2000 Гц, время опроса – 5 сек, а при частоте наложенных пульсаций расхода свыше 100 Гц – 5000 Гц и 2 сек соответственно.

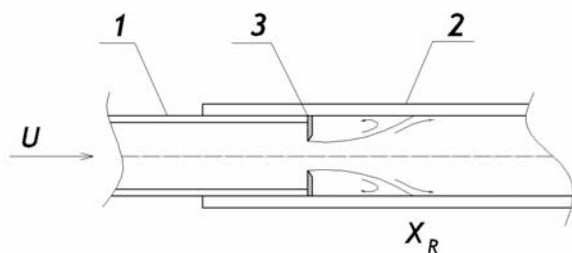


Рис. 2. Рабочий участок

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Целью исследований являлось определение распределения по длине канала продольной компоненты вектора поверхностного трения и длины отрывной области за выступом при пульсирующем турбулентном течении в круглой трубе при различных частотах наложенных пульсаций и при разных средних расходах воздуха через установку.

Эксперименты проводились в диапазоне среднего объемного расхода воздуха через установку $Q = 53,1-180,6 \text{ м}^3/\text{ч}$. При этом среднерасходная скорость потока в трубе 2 составляла $U = 4,6-15,6 \text{ м/с}$, а число Рейнольдса $Re = (2,0-6,9) \times 10^4$ ($Re = Ud_2/\nu$). Измерения проводились при частотах наложенных пульсаций расхода $f = 0-189 \text{ Гц}$. Амплитуда пульсаций скорости на оси трубы, определенная по результатам измерений термоанемометрическим датчиком, во всем диапазоне частот составила $\sim 0,4 U$.

На рис. 3 показано распределение продольной компоненты вектора поверхностного трения τ_x для случая, когда средний расход воздуха через установку $Q = 78,63 \text{ м}^3/\text{ч}$. Полученные данные представлены в виде зависимостей осредненных коэффициентов $c_f = \tau_x/(\rho U^2/2)$ от расстояния между выступом и датчиком трения X/h , где $h = (d_2 - d_0)/2 = 12 \text{ мм}$ – высота выступа.

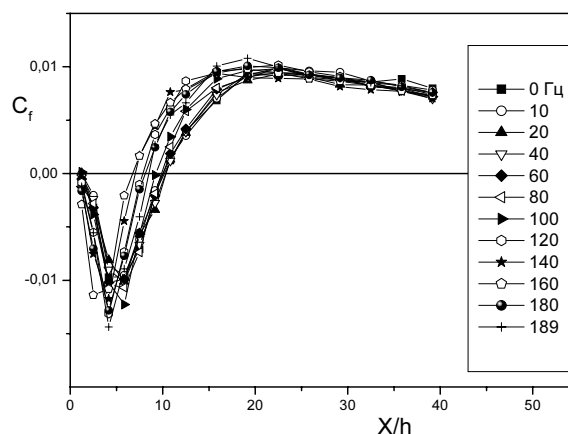


Рис. 3. Распределение поверхностного трения за выступом. Средний расход воздуха через установку – $78,63 \text{ м}^3/\text{ч}$

Как видно из графиков, измеренные величины поверхностного трения имеют значения, характерные для областей отрывного течения. В диапазоне от $X/h = 0$ до $X/h = 7...11$ трение имеет отрицательные значения, что соответствует возвратному пристеночному течению отрывной области. Нулевые значения c_f соответствуют точкам присоединения потока. Далее, ниже по потоку, напряжения трения возрастают, проходят максимумы и несколько снижаются в зоне релаксации. В окрестности точки присоединения, произошло довольно сильное расслоение графиков. При частотах наложенных пульсаций ниже 100 Гц значения $c_f = 0$ соответствуют расстояниям $X/h = 10...11$, т.е. длина отрывной об-

ласти здесь $X_R = (10 \dots 11)h$. В дальнейшем, при увеличении частоты, графики оказались левее, т.е. произошло уменьшение длины отрывной области вплоть до $X_R = 7h$ на высоких частотах.

Таким образом, выявлена существенная зависимость величины продольной компоненты вектора поверхностного трения от частоты наложенных пульсаций в турбулентном отрывном течении, особенно в окрестности точки присоединения потока.

Длина отрывной области определялась как расстояние от диафрагмы до точки присоединения X_R . За точку присоединения принималась точка, в которой осредненная по времени продольная компонента вектора поверхностного трения была равна нулю $\tau_x = 0$ ($c_f = 0$).

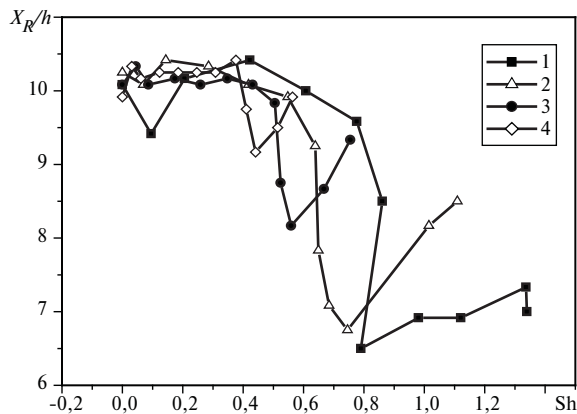


Рис. 4. Зависимость длины отрывной области от частоты. Средний расход воздуха через установку: 1 – 53,1 м³/ч; 2 – 78,63 м³/ч; 3 – 126,9 м³/ч; 4 – 180,6 м³/ч

Среднерасходная скорость потока на срезе диафрагмы составляла $U_c = 11,7 - 39,9$ м/с, а число Рейнольдса $Re_c = (0,9 - 3,2) \times 10^4$ ($Re_c = U_c h/\nu$). Степень перекрытия расходного отверстия пульсатора в экспериментах составляла 100 %, т.е. за один период заслонка полностью открывала и полностью закрывала отверстие. Изменение положения средней точки присоединения потока по частоте наложенных пульсаций показано на рис. 4.

Полученные данные представлены в виде зависимости относительной длины отрывной области X_R/h от числа Струхалия Sh , где число Струхалия

$Sh = f X_R / U_c$. Значению $Sh = 0$ соответствуют значения X_R для стационарного потока.

Как видно из графиков, длина отрывной области X_R при малых частотах наложенных пульсаций довольно близка к длине отрывной области для стационарных потоков. По мере увеличения частоты (числа Струхалия) происходит уменьшение X_R . При некоторых характерных значениях числа Струхалия Sh происходит резкое уменьшение длины отрывной области. На расходе воздуха 53,1 м³/ч резкое уменьшение отрывной области происходит при $Sh = 0,8 - 0,9$. При этом длина отрывной области уменьшается до $X_R/h = 6,7$. С увеличением расхода чувствительность размеров отрывной области к наложенным пульсациям уменьшается и смещается в область меньших Sh . На расходе 180,6 м³/ч резкое уменьшение отрывной области происходит при $Sh = 0,4 - 0,5$ до $X_R/h = 9,5$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-16263) и ведущей научной школы (грант НШ-8574.2006.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алемасов В.Е., Занько Ф.С., Михеев Н.И., Молочников В.М., Стинский Г.В. Аналогия Рейнольдса в нестационарном турбулентном потоке // Тезисы докл. XXVI Сибирского теплофизического семинара, 17–19 июня 2002 г. Новосибирск, 2002. С.13–15.
2. Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М., Сайкин А.К. Характеристики вектора поверхностного трения в турбулентных отрывных и присоединяющихся течениях // Известия РАН. Энергетика. 1998. №4. С.3–31.
3. Козлов А.П., Михеев Н.И., Стинский Г.В., Сухоруков О.В. Влияние наложенных пульсаций скорости потока на мгновенный вектор поверхностного трения // Изв. вузов. Авиационная техника. 1999. №3. С.51–53.
4. Валуева Е.П., Попов В.Н. Нестационарное турбулентное течение жидкости в круглой трубе // Изв. АН СССР. МЖГ. 1993. №5. С. 150–157.
5. Mizushima T., Maruyama T., Siozaki Y. Pulsating turbulent flow in a tube // J. Chem. Engrs. Jap. 1973. V.6. №6. P. 487–494.
6. Леонтьев А.И., Ивин В.И., Грехов Л.В. Полуэмпирический способ оценки уровня теплообмена за точкой отрыва пограничного слоя // ИФЖ. 1984. Т. 47. №4. С. 543–550.