

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ БОКОВЫХ ГРАНИЦ СТРУИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА, ВДУВАЕМОЙ В ПОПЕРЕЧНЫЙ ПОТОК ВОЗДУХА

2007 Н. М. Рогачев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Исследуется влияние соотношений скоростей потоков, степеней начальной турбулентности и конфигураций струй углекислого газа, распространяющихся в поперечном потоке воздуха, на положение боковых границ зоны смешения.

Введение. В [1] приведены результаты исследований расположения передней границы зоны смешения струи, распространяющейся в сносящем потоке. Данная работа посвящена определению положений боковых границ одиночной струи углекислого газа, вдуваемой в поперечный однородный поток воздуха. Исследовалось влияние соотношений скоростей потоков (гидродинамических параметров), степеней начальной турбулентности и конфигураций вдуваемой струи на ее расширение. Начальные степени турбулентности изменялись постановкой в сносящий поток и в струю углекислого газа различных турбулизирующих решеток. Исследовались струи, истекающие в сносящий поток из отверстий круглой и овальной формы. Относительная скорость струи изменялась в диапазоне $\bar{v} = v_0/v_\infty = 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0$, что соответствовало изменению гидродинамических параметров

$$\bar{q} = \frac{\rho_0 v_0^2}{\rho_\infty v_\infty^2} = 0,38; 0,85; 1,51; 3,40; 6,06.$$

Описание экспериментальной установки приведено в [1].

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования при отработке конструкций камер сгорания газотурбинных двигателей как с точки зрения улучшения организации процесса смешения в камере, так и с точки зрения охлаждения стенок камеры.

Методика проведения экспериментов и их результаты. Для обеспечения заданных соотношений скоростей $\bar{v} = (0,5 - 2,0)$ были

выбраны скорости: сносящего потока воздуха – 18 м/с, 24 м/с, 36 м/с; струи углекислого газа – 18 м/с, 24 м/с, 30 м/с. С помощью жиклера, установленного в газовой магистрали и работающего на сверхкритическом перепаде, обеспечивалось постоянство скорости течения струй, вдуваемых в сносящий поток. В экспериментах исследовалось поле скоростей сносящего потока на выходе из сопловой камеры. Измерения проводились с помощью специальной гребенки, состоящей из трех трубок полного давления, расположенных в одной плоскости на расстоянии 20 мм друг от друга и имеющих одинаковую длину. Гребенка устанавливалась на координатное устройство и имела возможность перемещаться в поле течения сносящего потока. Профили давлений показали, что без установки турбулизирующих решеток экспериментальная установка позволяла получать равномерное распределение скоростей потока воздуха на выходе из сопловой камеры. Постановка турбулизирующих решеток существенно деформировала профили динамических напоров.

Положение боковых границ зоны смешения струи с поперечным потоком определялось методом визуализации течения с помощью теневого прибора ИАБ-451. Оптическое стекло с вмонтированной трубкой подачи углекислого газа выставлялось перпендикулярно оптической оси прибора. Изображения потоков фиксировалось на фотопленку. По данным обработок фотопленок строились графики, отражающие положение границ зоны смешения. Каждая кривая на графиках получена в результате обработки 5 фотосним-

ков. Максимальная случайная погрешность измерений не превышала 5%. При построении графиков была выбрана система координат, представленная на рис. 1 (на рисунке не показана ось Oy , которая перпендикулярна плоскости чертежа). Все графики выполнены в безразмерных координатах. Некоторые из полученных фотографий приведены на рис. 2.

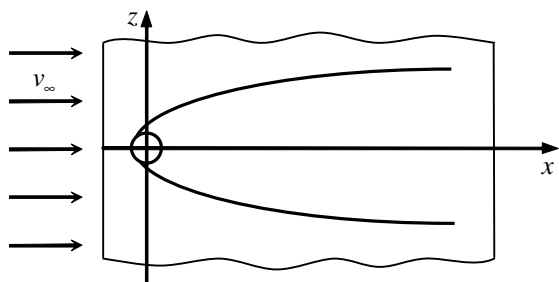


Рис. 1. Схема боковых границ струи

Математическая обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью системы MathCAD. В результате были получены две функции вида: $\bar{z} = f(\bar{x}, q)$, где

$$\bar{x} = \frac{x}{d}, \quad \bar{z} = \frac{z}{d} \quad \text{для круглой струи и } \bar{x} = \frac{x}{h},$$

$$\bar{z} = \frac{z}{d} \quad \text{для овальной струи. Здесь } d \text{ – диа-}$$

метр круглого отверстия; h – ширина овального отверстия.

Результирующая функция определялась следующим образом:

1. Рассматривался график при конкретном значении q .

2. Из конкретного набора базовых функций $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ находилась основная функция $f(\bar{x})$:

$$f(\bar{x}) = K_1\Phi_1(\bar{x}) + K_2\Phi_2(\bar{x}) + \dots + K_n\Phi_n(\bar{x}).$$

Коэффициенты K_1, K_2, \dots, K_n подбирались системой MathCAD так, чтобы основная функция наилучшим образом совпадала с экспериментальной. Таким образом, для каждой базовой функции был подобран коэффициент, который использовался при построении основной функции для данного значения q .

3. Находилась зависимость коэффициентов каждой базовой функции от q :

$K_1 = K_1(q)$ по методу, изложенному в пункте 2.

4. Результирующая функция $\bar{z} = f(\bar{x}, q)$ равна:

$$f(\bar{x}, q) = K_1(q)\Phi_1(\bar{x}) + K_2(q)\Phi_2(\bar{x}) + \dots + K_n(q)\Phi_n(\bar{x})$$

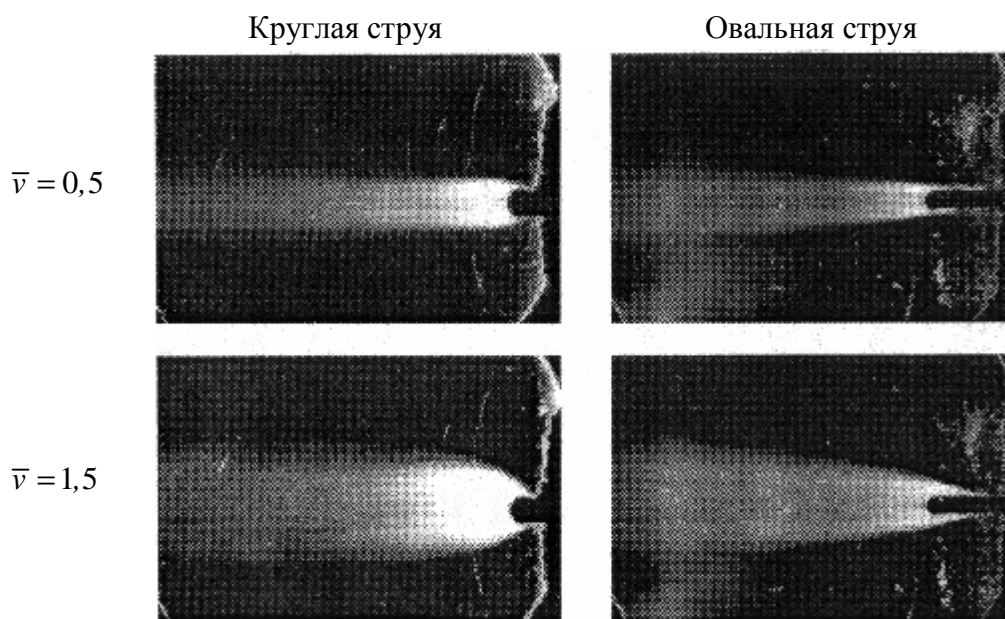


Рис. 2. Фотографии струи в поперечном потоке

5. Вышеуказанные действия проводились для круглой и овальной струй.

Найденные параметрические функции имеют вид:
для круглой струи

$$f(\bar{x}, q) = \lg\left((\bar{x} + 1)^{K_1(q)} \cdot (\bar{x} + 2)^{K_2(q)}\right) + K_3(q), \quad (1)$$

где

$$K_1(q) = -10,537q + \frac{16,907}{\sqrt{q}} - 49,066 + 44,535\sqrt{q},$$

$$K_2(q) = 14,196q - \frac{23,051}{\sqrt{q}} + 67,492 - 59,192\sqrt{q},$$

$$K_3(q) = -3,781q + \frac{6,146}{\sqrt{q}} - 17,409 + 15,739\sqrt{q};$$

для овальной струи

$$f(\bar{x}, q) = \bar{x}^{K_1(q)} + K_2(q) \cos(K_3(q)\bar{x} + K_4(q)) - 0,7, \quad (2)$$

где

$$K_1(q) = 5,5 \cdot 10^{-3} q^2 + 1,2 \cdot 10^{-2} q - 2,3 \cdot 10^{-2} \cos(2q) + 0,485,$$

$$K_2(q) = 0,91(q + 0,21) \frac{q - 1,02}{q - 1} - 0,263q^{1,6},$$

$$K_3(q) = 0,01 \left(1,09q^{1,4} + \frac{6,07}{q} - 1,6 \cos(7,3q - 1) - 0,5 \right)$$

$$K_4(q) = 0,103q - \frac{0,375}{q} - 0,448 \cos(3,8q - 0,84) - 1.$$

Экспериментальные данные и кривые параметрических уравнений представлены на рис. 3, 4.

Из сопоставления экспериментальных графиков можно сделать следующие выводы:

1. Возрастание относительной скорости струи углекислого газа \bar{v} от 0,5 до 2,0 приводит к увеличению ее ширины.

2. С увеличением уровня начальной турбулентности сносящего потока вдуваемая струя размывается при меньших значениях ординаты x .

3. Увеличение уровня начальной турбулентности вдуваемой струи не приводит к заметному изменению границ зоны смешения.

4. Аппликаты полуширины овальных струй при больших значениях \bar{v} больше, чем

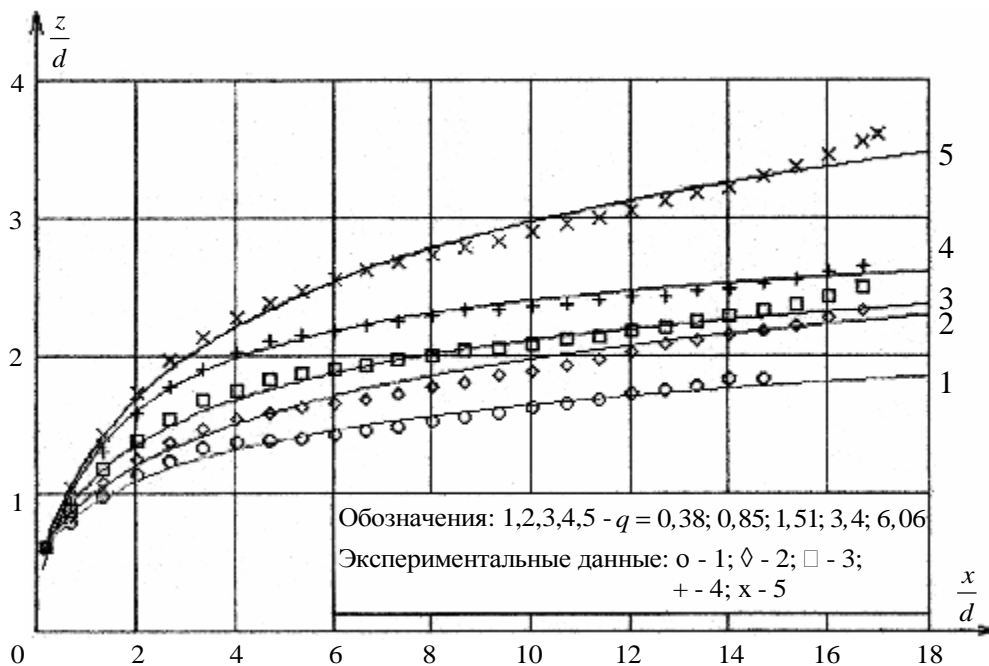


Рис. 3. Истечение струи из круглого отверстия

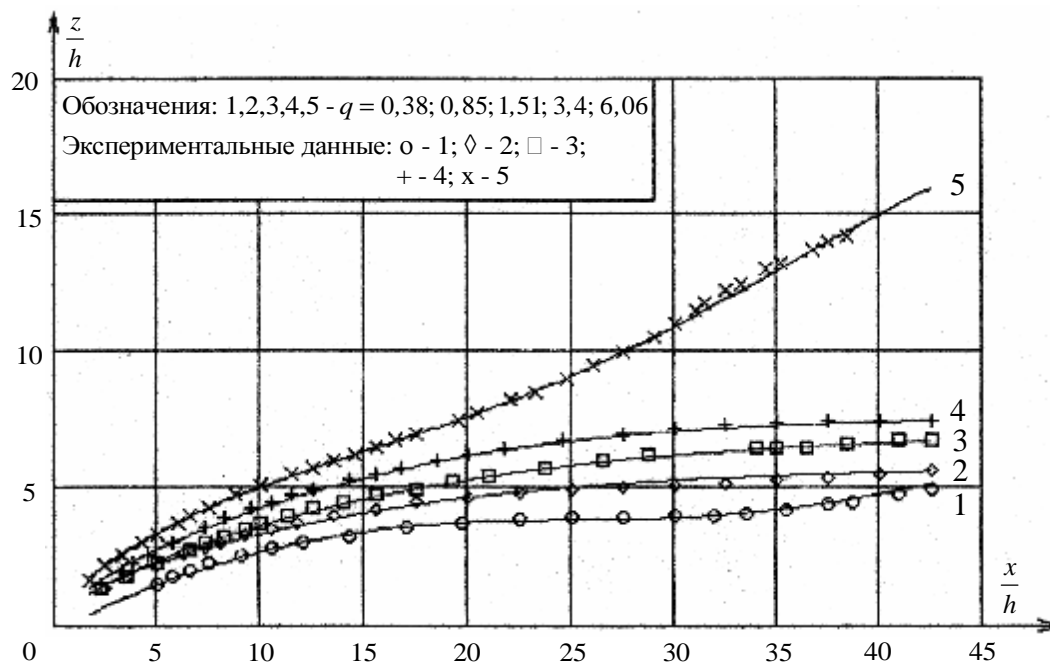


Рис. 4. Истечение струи из овального отверстия

у круглых струй, а при малых значениях \bar{v} закономерность обратная. При наличии турбулизирующих решеток во всем диапазоне изменения скоростей аппликаты полуширины овальной струи больше таковых для круглой струи.

Список литературы

1. Рогачев Н. М. Смещение струи углекислого газа со сносящим потоком воздуха // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. – Самара: СГАУ, 2006, № 1.