

СМЕШЕНИЕ СТРУИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА СО СНОСЯЩИМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

© 2006 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 передней границы зоны смешения.

Введение. Распространение газовых струй в сносящем потоке давно привлекло к себе внимание исследователей [1-5]. Связано это, с одной стороны, с тем, что турбулентные газовые струи, обдуваемые боковым потоком, используются в ряде технических устройств: камерах сгорания газотурбинных двигателей, газовых горелках струйного типа, вентиляционных воздушных завесах, распространении дыма из труб и т. д. С другой стороны, они представляют несомненный теоретический интерес, так как особенностью их распространения является криволинейность оси (в отличие от свободных затопленных струй), асимметрия границ зоны смешения относительно оси струи, подковообразная форма поперечного сечения.

Экспериментальные исследования, выполненные Ю. В. Ивановым [4], показали, что интенсивность смешения газовой струи со сносящим потоком зависит от начальных размеров и формы струи, от угла атаки струи, от степени турбулентности и гидродинамического параметра (отношения скоростных напоров струи и сносящего потока).

Согласно работе [2] неизотермические струи распространяются во всех направлениях быстрее изотермических. При этом существенно, что во всех случаях теплообмен происходит интенсивнее, чем обмен импульсов, что хорошо согласуется с аналогичными данными для затопленных струй. Проведенные измерения позволили также установить, что уровень турбулентности струи, развивающейся в сносящем потоке, значительно выше, чем в свободной затопленной струе, и в месте максимальной кривизны траектории достигает 35 %. На основании измерений утверждается, что силы турбулентного трения, выз-

ванные наличием турбулентных пульсаций, значительно превышают силы вязкого трения.

Исследования влияния формы выходного отверстия на характеристики смешения [4] показали, что для струй овального и квадратного поперечных сечений наблюдаются те же закономерности, что и для круглых струй.

Физическая картина течения и механизм перемешивания струи со сносящим потоком недостаточно изучены, что затрудняет создание точных аналитических методик расчета. Поэтому большое значение приобретают экспериментальные исследования процесса смешения струй для накопления опытных данных и использования их в практических целях.

В настоящей работе экспериментально определялось положение передней границы одиночной струи, распространяющейся в поперечном потоке. Эксперименты проводились при различных соотношениях скоростей и гидродинамических параметров вдуваемых струй и сносящего потока. Причем значения параметров лежали в области, не встречающейся в известной литературе. Варьировалась также форма выходных отверстий и начальные степени турбулентности. На основе экспериментальных данных были выведены параметрические уравнения, описывающие границы струй, истекающих из круглого и овального отверстий. Производилось сравнение экспериментальных данных и параметрических уравнений.

Экспериментальная установка. Для исследования смешения газовой струи со сносящим потоком была изготовлена экспериментальная установка, схематический чертеж которой показан на рис. 1.

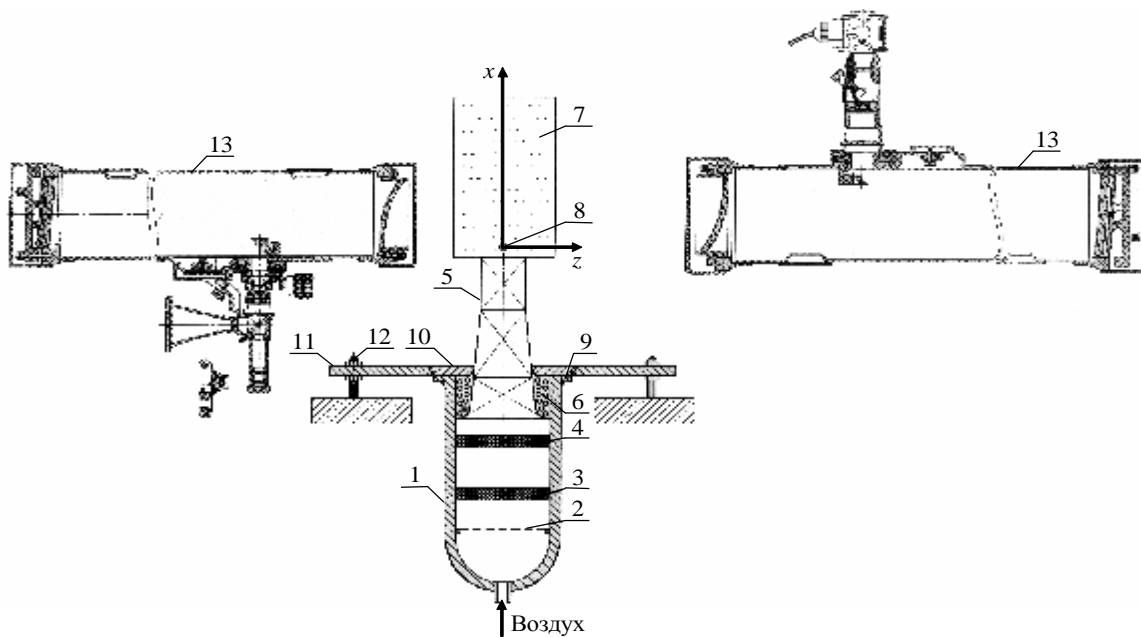


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Установка состоит из выравнивающей камеры 1, предназначенной для гашения пульсаций в потоке воздуха; поворотного устройства 9, 10, 11; вертикально расположенного стекла 7 и сопловой камеры 5. Поворотное устройство позволяет проводить фотосъемки различных проекций струй. Выравнивающая камера 1 представляет собой толстостенный полый цилиндр, к верхней открытой части которого приварен кольцевой фланец 9. Воздух от компрессора подается в камеру через отверстие в ее полукруглом дне таким образом, что имеет направление, совпадающее с осью цилиндра. Во внутренней полости камеры устанавливаются устройства 2, 3, 4, предназначенные для гашения пульсаций поступающего в нее воздуха.

Выравнивающая камера с помощью переходного кольца фланца 9 болтами соеди-

няется с фланцем 10, который является подвижной частью поворотного устройства установки. Фланец 11 крепится к станине регулировочными болтами 12, позволяющими изменять высоту среза сопловой камеры в поле зрения прибора, а также выдерживать горизонтальность этого среза.

В оптических стеклах 7, имеющих толщину 10 мм, сделаны отверстия для установки газоподводящей трубки 8 (рис. 2). В экспериментах использовались два сменных стекла, в одно из которых устанавливалась цилиндрическая трубка 8, а в другое – трубка овального поперечного сечения (площади поперечных сечений круглой и овальной трубок одинаковы). Внутренние нижние кромки трубок выставлялись на одном и том же расстоянии от среза сопловой камеры, равном 9 мм.

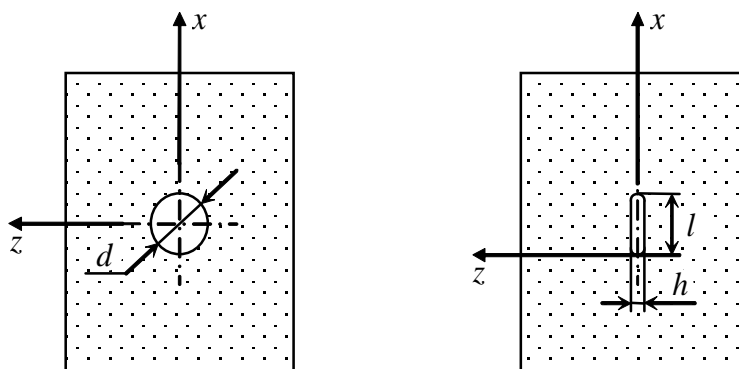


Рис. 2. Оптические стекла

Сопловая камера 5, представляющая собой сварной металлический короб квадратного сечения, крепится к подвижному фланцу 10. С обратной стороны к фланцу 10 крепится входное устройство 6, изготовленное из пенопласта и имеющее форму конфузора с плавным входом. К внешней кромке входного устройства 6 приклеивается металлическая сетка, имеющая квадратные ячейки размером 1,5 мм.

В магистрали подачи углекислого газа при некоторых экспериментах в цилиндрическую трубку 8 устанавливались крестообразные турбулизирующие решетки толщиной 3 мм, а в овальную трубку впаивались три вставки диаметром 3 мм на расстоянии 7,5 мм.

Для турбулизации сносящего потока в сопловой камере 5 размещались сменные турбулизирующие решетки, представляющие собой плоские пластины с отверстиями 20 мм и шагом 28 мм и с отверстиями 10 мм и шагом 14 мм.

Положение границ зоны смешения углекислого газа со сносящим потоком воздуха определялось методом визуализации течения с помощью теневого прибора ИАБ-451. При съемках теневых изображений с помощью поворотного устройства плоскость стекла 7 устанавливалась параллельно оптической оси прибора.

В качестве источника света для визуального наблюдения и съемок исследуемых процессов применяется лампа накаливания К-50. Теневые изображения проекций струй регистрируются на фотопленке. Экспозиция при съемках составляла 1/30 с. Ширина щели теневого прибора 13 устанавливалась равной 0,35 мм при положениях лимба каретки ножа Фуко 15,1-15,2.

Методика проведения экспериментов. Выбраны скорости воздушного потока $v = 18 \text{ м/с}$, 24 м/с , 36 м/с и углекислого газа $v = 18 \text{ м/с}$, 24 м/с , 30 м/с . При этом относительное соотношение скоростей $\bar{v} = v_0/v_\infty = (0,5 - 2,0)$, а изменение гидродинамического параметра $\bar{q} = \frac{r_0 v_0^2}{r_\infty v_\infty^2} = 0,38 - 6,06$.

Здесь r_0, r_∞ - плотности углекислого газа и воздуха, соответственно. Скорости течения газа контролировались с помощью тарировочных кривых по показаниям манометров. При изменении атмосферного давления и температуры газа в значения скоростей вводились поправки.

Здесь r_0, r_∞ - плотности углекислого газа и воздуха, соответственно. Скорости течения газа контролировались с помощью тарировочных кривых по показаниям манометров. При изменении атмосферного давления и температуры газа в значения скоростей вводились поправки.

Схема распространения газовой струи в поперечном потоке показана на рис. 3. Положение границ зоны смешения струи углекислого газа со сносящим потоком воздуха определялось с помощью теневого прибора и фиксировалось на фотопленку. После обработки фотопленок были построены графики, отражающие положение передней границы струи. Каждая кривая на графиках получена в результате обработки пяти фотоснимков. Максимальная случайная погрешность измерений не превышала 5%. При построении графиков была выбрана система координат, показанная на рис. 3 (на рисунке не показана ось oz , которая перпендикулярна плоскости чертежа).

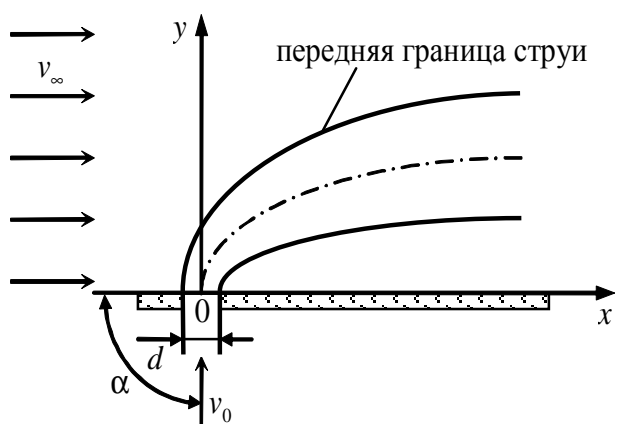


Рис. 3. Схема струи

Некоторые наиболее характерные фотографии струй в сносящем потоке приведены на рис. 4.

Анализ и обобщение результатов экспериментов. По данным экспериментов были построены графики зависимости координат передней границы струи при истечении ее из круглого и овального отверстий. Для обработки результатов экспериментов использовалась математическая система *MathCAD*, с помощью которой были получе-

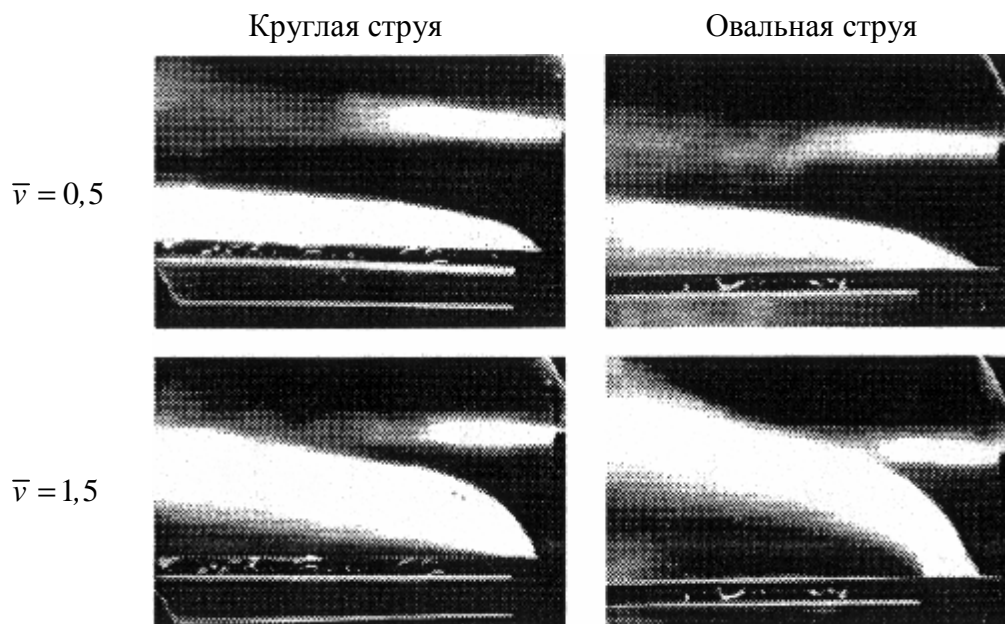


Рис. 4. Фотографии струи

ны две функции вида $\bar{y} = f(\bar{x}, \bar{v})$, где $\bar{x} = \frac{x}{d}$,

$\bar{y} = \frac{y}{d}$ - для круглой струи и $\bar{x} = \frac{x}{h}$, $\bar{y} = \frac{y}{h}$ -

для овальной струи (d - диаметр круглого отверстия, h - ширина овального отверстия).

Результирующая функция определялась следующим образом:

1. Брался график при конкретном значении относительной скорости \bar{v} .

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 с помощью системы *MathCAD* так, чтобы основная функция наилучшим образом совпала с экспериментальной. Для каждой базовой функции был подобран коэффициент, который надо было использовать при построении основной функции для данного значения \bar{v} .

3. Находилась зависимость коэффициентов каждой базовой функции от \bar{v} :

$K_1 = K_1(\bar{v})$ по методу, изложенному в пункте 2.

4. Результирующая функция $\bar{y} = f(\bar{x}, \bar{v})$ равна

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

Вышеуказанные действия проводились для круглой и овальной струй.

Найденные параметрические функции имеют вид:

- для круглой струи

$$f(\bar{x}, \bar{v}) = K_1(\bar{v}) + K_2(\bar{v})\lg(\bar{x}+1) + K_3(\bar{v})\lg(\bar{x}+2), \quad (1)$$

где

$$K_1(\bar{v}) = 37,405 - 73,18\sqrt{\bar{v}} + 60,087\bar{v} - 5,76e^{\bar{v}},$$

$$K_2(\bar{v}) = -49,868 - 99,681\sqrt{\bar{v}} - 77,788\bar{v} - 7,8e^{\bar{v}},$$

$$K_3(\bar{v}) = 14,98 - 29,81\sqrt{\bar{v}} + 23,335\bar{v} - 2,339e^{\bar{v}};$$

- для овальной струи

$$f(\bar{x}, \bar{v}) = K_1(\bar{v}) + K_2(\bar{v})\lg(\bar{x}+1) + K_3(\bar{v})\lg(\bar{x}+2), \quad (2)$$

где

$$K_1(\bar{v}) = -184,05 + 338,053\sqrt{\bar{v}} - 229\bar{v} + 19,531e^{\bar{v}},$$

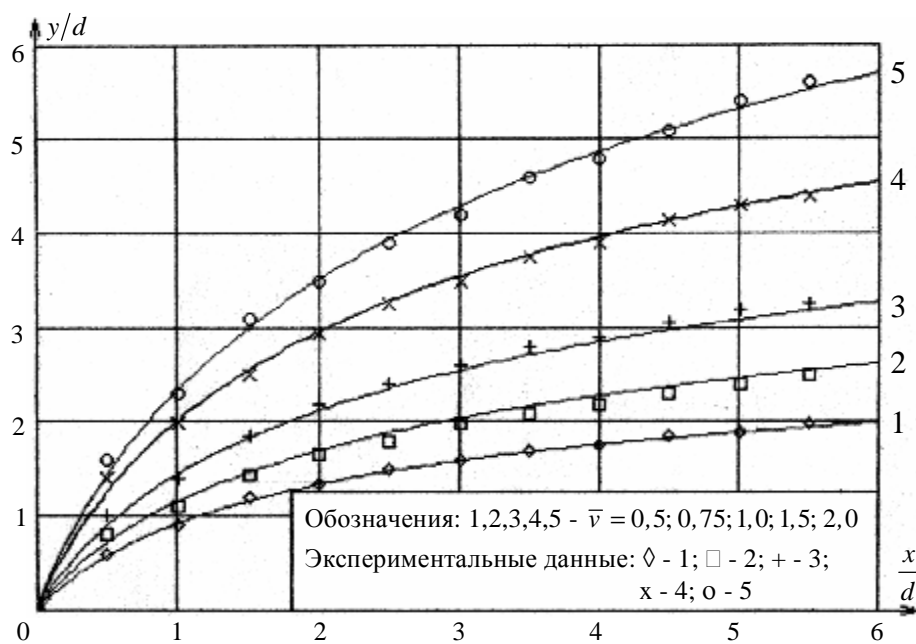


Рис. 5. Истечение струи из круглого отверстия

$$K_2(\bar{v}) = 351,236 - 615,581\sqrt{\bar{v}} + 389,882\bar{v} - 30,826\bar{v}^2$$

$$K_3(\bar{v}) = -103,639 + 181,664\sqrt{\bar{v}} - 115,502\bar{v} + 9,209\bar{v}^2$$

Экспериментальные данные и кривые параметрических уравнений показаны на рис. 5, 6.

Из сопоставления экспериментальных графиков можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением относительной скорости \bar{v} ординаты передней границы y/d и y/h возрастают. У струи овальной формы нарастание ординаты происходит более интенсивно.

2. Наличие турбулизирующих решеток в сносящем потоке существенно изменяет положение передней границы зоны смешения потоков. Значительно возрастают углы выхо-

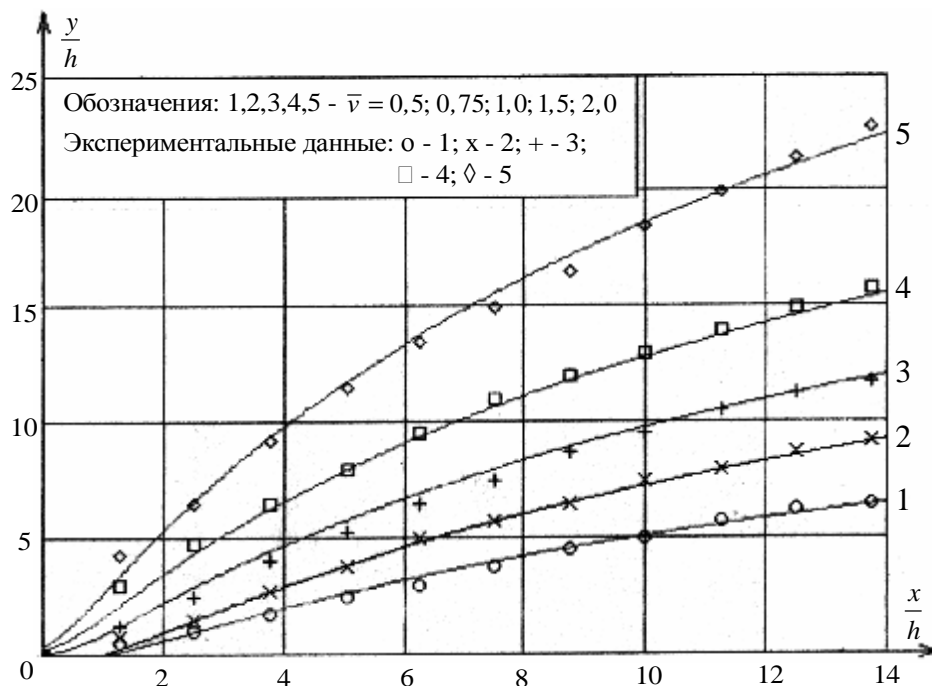


Рис. 6. Истечение струи из овального отверстия

да струй углекислого газа, интенсивнее увеличивается ордината границ струи u с ростом координаты x .

3. Помещение турбулизирующих решеток в магистраль углекислого газа качественно не изменяет картины взаимодействия потоков. При этом наблюдается уменьшение значений ординат границ зоны смешения как для круглой, так и для овальной струй.

Список литературы

1. Теория турбулентных струй. / Под ред. Г. Н. Абрамовича. - М.: Наука, 1984.

2. Палатник И. Б., Темирбаев Д. Ж. Закономерности распространения осесимметричной воздушной струи в сносящем однородном потоке // Проблемы теплоэнергети-

ки и прикладной теплофизики. - 1967, вып. 4.

3. Акатнов Н. И. Круглая турбулентная струя в поперечном потоке // МЖГ. – 1969. №6.

4. Иванов Ю. В., Гендриксон В. А. Закономерности изменения осевой скорости осесимметричной струи в поперечном потоке // Теплоэнергетика. – 1968. №11.

5. Горелов Ю. А., Висков А. Н., Филиппова Н. М. Расчет поля скоростей и давлений, индуцируемых струй в сносящем потоке // Труды ЦАГИ. - 1972, вып.1412.

6. Васильев Л. А. Теневые методы. - М.: Наука, 1968.