

УДК 532.517.4

## О ВЛИЯНИИ ТУРБУЛИЗАЦИИ ПОТОКОВ НА СЛОЙ СМЕШЕНИЯ

ВАСИЛЬЕВ В. И., КРАШЕНИННИКОВ С. Ю.

Проведено экспериментальное исследование слоя смешения турбулизованных потоков в условиях, когда интенсивность пульсаций скорости довольно мала, а интегральные масштабы пульсаций и коэффициенты переноса велики по сравнению с соответствующими значениями в потоках без внешней турбулизации. Обсуждается вопрос об описании смешения в этих условиях. Показано, что когда интегральные масштабы турбулентности во внешнем потоке превосходят характерные размеры слоя смешения, внешняя турбулентность не оказывает значительного влияния на осредненные параметры в слое.

1. При решении практических задач, связанных с турбулентными сдвиговыми течениями, широко применяются модели турбулентности, в которых используется гипотеза Буссинеска. Сюда относятся, например, так называемые одно- и двухпараметрические модели [1]. В то же время возможность описания с помощью таких моделей влияния начальной и внешней турбулентности на слой смешения нуждается в дополнительных подтверждениях, поскольку из-за разнообразия возможных комбинаций характеристик турбулентности взаимодействующих потоков, проведенных до настоящего времени сопоставлений с экспериментальными данными недостаточно.

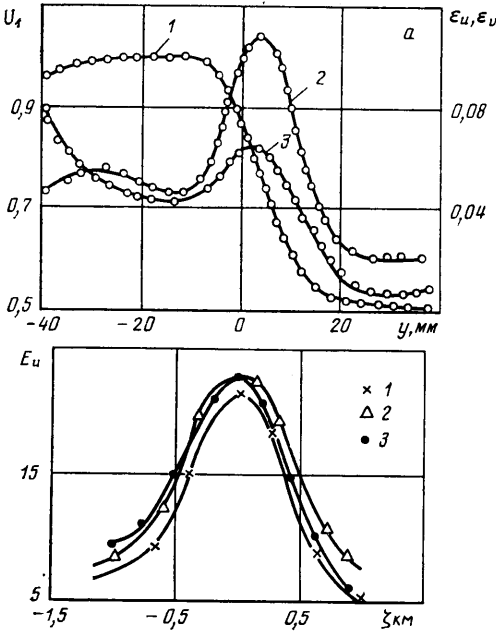
В данной работе рассматривается слой смешения турбулизованных потоков, в которых интенсивности пульсаций умеренные, а интегральные масштабы турбулентности  $L$  превышают толщину слоя  $b$  ( $b/L < 1$ ), причем комбинация их такова, что коэффициенты турбулентной вязкости  $\nu_t$  в потоках также велики. Такая ситуация характерна для камер смешения двухконтурных двигателей. Для расчета используется однопараметрическая модель турбулентности [1], которая, как показано в [2], дает удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными в случае смешения нетурбулизованных потоков. Однако в случае, когда смешиваются потоки с указанным выше уровнем турбулизации, формальное применение модели [1] показывает, что имеется сильное воздействие турбулизации на параметры в слое. В то же время пока выполняется условие  $b/L < 1$  гипотеза Буссинеска неприменима [1], а вопрос о реальном воздействии практически не исследован. Так, известные экспериментальные данные о слое смешения турбулизованных потоков [3–5] относятся в основном к ситуациям, когда велика интенсивность пульсаций ( $\approx 10\%$ ), кроме того, в [3–5] не определялись коэффициенты турбулентного переноса. Поэтому исследование реального воздействия на слой смешения турбулизации упомянутого выше типа проводилось экспериментально.

2. Слой смешения двух плоскопараллельных потоков исследовался в камере смешения длиной 0,5 м и с поперечным сечением  $100 \times 100$  мм, при уровне скоростей 10–35 м/с. Воздух поступал от общей магистрали высокого давления через хонейкомб и трубу длиной 2,16 м, в которой перед камерой смешения был установлен разделитель. Для регулирования соотношения параметров на входе в смесительную камеру один из потоков (в дальнейшем его параметры обозначаются индексом 2, а другого потока — индексом 1) пропусклся через решетки, установленные на расстоянии 0,4 м до входа в смесительную камеру; меняя их, можно было создавать потоки с различным соотношением скоростей и характеристик турбулентности. За сечением, где располагались решетки, имелся конфузурный участок с поджатием, равным 3.

Измерения проводились с помощью термоанемометров DISA55M01. Распределение среднего значения  $U$  и интенсивности пульсаций продольной составляющей скорости  $\epsilon_u = \langle u^2 \rangle^{1/2} U_1^{-1}$  определялись однонитяным датчиком, а интенсивность пульсаций поперечной составляющей скорости  $\epsilon_v = \langle v^2 \rangle^{1/2} U_1^{-1}$  — двухнитяным, х-образным. Интегральный масштаб пульсаций продольной составляющей скорости  $L_u$  определялся с помощью гипотезы Тейлора по измерениям нулевой составляющей спектра. Коэффициенты турбулентной диффузии  $D$  в потоках 1 и 2 определялись термодиффузионным методом по измерениям дисперсии температуры в следе за нагретыми нитями.

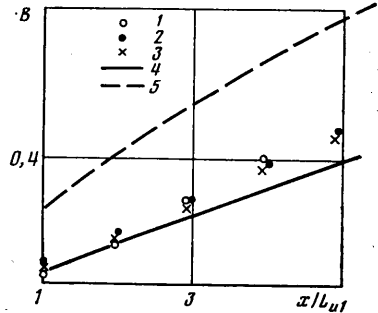
Исследовалось течение при отношении скоростей потоков  $m=U_2/U_1=0,53-0,3$ . В более скоростном потоке  $I$  интегральный масштаб турбулентности был весьма значителен:  $L_{u1} \approx 50$  мм, а интенсивность пульсаций — умеренная:  $\epsilon_{u1} \approx 4\%$ ,  $\epsilon_{v1} \approx 6\%$ . Однако коэффициент турбулентной диффузии при этом велик:  $D_1/U_1 \approx 0,5$  мм; он примерно на порядок превосходит максимальное значение  $D_1$  в пограничных слоях на разделительной кромке, которое определялось по измеренной толщине вытеснения согласно данным [6]. Коэффициент вязкости выражается через  $D$  в виде  $\nu_t = Pr_t D$ , где  $Pr_t$  — турбулентное число Прандтля, приблизительно равное в плоскопараллельных потоках 0,5. В потоке 2 за счет установки решеток масштабы и интенсивность пульсаций несколько меньше:  $L_{u2} = 10-30$  мм,  $\epsilon_{u2} = 2-4\%$ ,  $\epsilon_{v2} = 1-3\%$ ; соответственно меньше и коэффициенты турбулентного переноса:  $D_2/U_1 \approx 0,12$  мм при  $m=0,46$ .

Характерное распределение параметров в слое смешения показано на фиг. 1, а. Здесь представлены профили осредненного значения продольной составляющей скорости



Фиг. 1

(кривая 1) и профили интенсивности пульсаций (2 —  $\epsilon_u$ , 3 —  $\epsilon_v$ ) при  $m=0,53$  на расстоянии  $x=200$  мм от входа в смешительную камеру;  $y$  — поперечная координата, отсчитываемая от разделительной кромки. Видно, что имеются ядра потоков. Измерения, проведенные в различных сечениях камеры, показывают, что характерные значения параметров в этих ядрах, в том числе  $\epsilon_u$  и  $\epsilon_v$ , практически постоянны, т. е. не происходит не-



Фиг. 2

посредственного взаимодействия пристенных пограничных слоев со слоем смешения. Распределения имеют вид, типичный для слоя смешения. Зависимость  $U(x, y)$  автомодельна и удовлетворительно аппроксимируется профилем Шлихтинга [6]. В зоне смешения оказываются автомодельными также профили  $\epsilon_u/(1-m)$  и  $\epsilon_v/(1-m)$ . На фиг. 1, б показана зависимость  $E_u = \epsilon_u/(1-m)$  от  $\xi = (y-y_0)/b$ , где  $y_0$  — координата точки, в которой  $\epsilon_u$  максимальна;  $b$  — толщина слоя, найденная как разность координат точек в данном сечении, в которых параметр  $(U-U_2)/(U_1-U_2)$  принимает значения 0,1 и 0,9; 1 —  $m=0,3$ ,  $x=150$  мм; 2 —  $m=0,46$ ,  $x=200$  мм; 3 —  $m=0,53$ ,  $x=200$  мм.

На фиг. 2 показано изменение  $b$  вдоль  $x$ : 1 —  $m=0,3$ ; 2 — 0,46; 3 — 0,53. Несмотря на имеющийся в потоках переменный уровень турбулизации, данные для различных значений параметра  $m$  удовлетворительно описываются известной зависимостью [6]:  $b = b_0(1-m)/(1+m)$ , где  $b_0$  — толщина слоя при  $m=0$ . На фиг. 2 данные для разных значений  $m$  с помощью этой зависимости приведены к значению 0,46, т. е.  $B = 0,37(b/L_{u1})(1+m)/(1+m)$ . Отметим, что рассматриваемый диапазон удалений от разделительной кромки соответствует условию  $b/L_{u1} < 1$ . Кроме того, интегральный масштаб продольных пульсаций в потоке  $I$  для всех  $x$  превосходит масштаб в слое смешения нетурбулизованных потоков, где  $L_u = 0,13 x$  при  $m=0$  [6]. Сопоставление полученных данных с расчетом, выполненным методом, описывающим смешение нетурбулизованных потоков, позволяет определить степень воздействия внешней турбулизации, удовлетворяющей указанным условиям.

3. Для расчета слоя смешения использовались уравнения типа пограничного слоя, а в качестве замыкающего соотношения — однопараметрическая модель турбулентности [1], которая, как показано в [2], удовлетворительно описывает распределение осредненных параметров в слое смешения нетурбулизованных потоков, если в качестве начального условия используется значение  $\nu_t$  в пограничных слоях на разделительной кромке. Система соотношений интегрировалась численно, с помощью неявной конечно-разностной схемы второго порядка. Метод расчета анало-

жигчен применявшемуся в [7]. Распределение осредненного значения продольной составляющей скорости в начальном сечении смесительной камеры взято из опытов. Начальное значение коэффициента турбулентной вязкости, связанное с пограничными слоями на разделительной кромке, определялось по измеренным значениям толщины вытеснения,  $v_{i \max}/U_1=0,045$  мм. Проводились расчеты, в которых учитывалось только начальное значение  $v_i$  в пограничных слоях (кривая 4 на фиг. 2), а также расчеты, в которых учитывался коэффициент турбулентной вязкости в смешивающихся потоках (кривая 5).

Сравнение результатов расчетов и экспериментальных данных (на фиг. 2 приведены данные о толщине слоя смешения при  $m=0,46$ ) показывает, что если турбулизация смешивающихся потоков характеризуется умеренной интенсивностью ( $\approx 6\%$ ) и большими масштабами, то при выполнении условия  $b/L_u < 1$  воздействие внешней турбулентности на осредненные параметры в слое смешения слабое. Формальный учет коэффициентов переноса, обусловленных внешней турбулентностью, в рамках гипотезы Буссинеска приводит к сильному расхождению расчета с экспериментом. В то же время для расчета до удалений от кромки, при которых  $b < L_u$ , допустимо использовать обычную однопараметрическую модель турбулентности [1], учитывая только начальное значение  $v_i$ , обусловленное пограничными слоями на входе. Такой расчет (кривая 4 на фиг. 2) удовлетворительно согласуется с опытными данными. С ростом отношения  $b/L_u$  начинается ускоренное нарастание толщины слоя, а ее значения, по-видимому, должны приближаться к зависимости, соответствующей кривой 5 на фиг. 2.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамович Г. Н., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н.* Турбулентные течения при воздействии объемных сил и неавтомоделности // М.: Машиностроение. 1975. 94 с.
2. *Абрамович Г. Н., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н.* Неавтомоделные турбулентные струи // Турбулентные течения. М.: Наука, 1977. С. 69–79.
3. *Гиневский А. С.* Теория турбулентных струй и следов. М.: Машиностроение, 1969. 397 с.
4. *Груздев В. Н., Виноградов Ю. В., Постнов В. Ф., Талантов А. В.* Влияние начальной турбулентности и соотношения скоростей на смешение спутных плоских изотермических струй в начальном участке // Теория и практика сжигания газа. Л.: Недра, 1975. Т. 6. С. 5–9.
5. *Белов И. В., Багаутдинов З. С.* Исследование влияния начальной турбулентности и отсоса пристенного пограничного слоя на ширину зоны смешения плоскопараллельных струй // Турбулентные струйные течения. Таллин: Изд-во АН СССР. Ч. 2. 1982. С. 14–21.
6. *Абрамович Г. Н., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н., Смирнова И. П.* Турбулентное смешение газовых струй. М.: Наука, 1974. 272 с.
7. *Кузнецов В. Р., Лебедев А. Б., Секундов А. Н., Смирнова И. П.* Расчет турбулентного диффузионного факела горения с учетом пульсаций концентрации и архимедовых сил // Изв. АН СССР. МЖГ. 1977. № 1. С. 30–40.

Москва

Поступила в редакцию  
18.VIII.1986

УДК 532.526

### АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ВОЗВРАТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ОТРЫВА ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

ГОГИШ Л. В.

С использованием уравнения импульсов Кармана и простейших соображений о подобии профилей турбулентных касательных напряжений построено автомоделное возвратное течение несжимаемой жидкости, которое в зависимости от значений входящих в него эмпирических постоянных может реализоваться либо за точкой отрыва турбулентного пограничного слоя, либо перед точкой его присоединения. Для определения эмпирических постоянных использовано несколько независимых экспериментальных работ по турбулентным отрывным течениям жидкости и газа при до- и сверхзвуковых скоростях.

На фиг. 1, а показана условная схема осредненного отрывного течения в пограничном слое между критическими точками его отрыва  $s$  и присоединения  $r$ . Здесь  $\delta$  — граница пограничного слоя,  $y_j$  — линия потока постоянной массы,  $y_0$  — линия нулевых значений продольной скорости ( $u=0$ ),  $y_m$  — линия максимальных значений возвратной скорости  $u_m < 0$ . В турбулентном отрывном течении толщина возвратного пограничного слоя  $y_m$  и величина касательного напряжения на его внешней