

Из приведенного анализа следует, что неустойчивость фронта горения по отношению к пространственным возмущениям наступает при более широких зонах химической реакции ($\mu=5,283$), чем в случае продольных возмущений. Фронт горения наиболее чувствителен к возмущениям, волновые векторы которых лежат в пределах $0 < k^2 < 3/4$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авдеев П. А.* Исследование устойчивости стационарного фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1985, № 1, с. 115–118.
2. *Шкадинский К. Г., Хайкин Б. И., Мержанов А. Г.* Распространение пульсирующего фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе. — Физика горения и взрыва, 1971, т. 7, № 1, с. 19–28.
3. *Новожилов Б. В.* Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М.: Наука, 1973. 176 с.
4. *Matkowsky B. J., Sivashinsky G. I.* Propagation of a pulsating reaction front in solid fuel combustion. — SIAM J. Appl. Math., 1978, v. 35, p. 465–478.

Москва

Поступила в редакцию
25.VI.1985

УДК 532.517.3

ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ НА ВХОДЕ В КРУГЛУЮ ТРУБУ НА ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ

КОЛЯДА В. В., ПАВЕЛЬЕВ А. А.

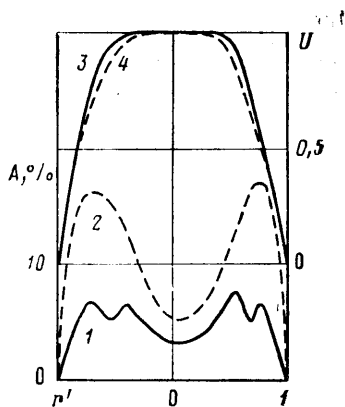
Переход к турбулентности в круглой трубе обычно связывают с гидродинамической неустойчивостью течения на ее начальном участке. Течение в круглой трубе с параболическим профилем скорости (профилем Пуазейля), согласно большинству авторов, в линейном приближении устойчиво [1]. В настоящее время в литературе отсутствуют данные о переходе к турбулентности в трубе, когда профиль скорости в ней определяется не развитием пограничного слоя на ее стенке, а формируется входными устройствами. Проведение подобных экспериментов позволило бы получить данные о механизме перехода к турбулентности в трубе. Особый интерес представляет случай, когда на входе в трубу с помощью входных устройств формируется профиль скорости, близкий к профилю Пуазейля. Если при этом уровень возмущений таков, что интенсивность процессов переноса в потоке близка к молекулярному уровню, то развитие возмущений в таком потоке будет означать или несправедливость представлений о линейной устойчивости такого течения, или существование других механизмов перехода к турбулентности. В качестве такого механизма может рассматриваться развитие в потоке с градиентом скорости возмущений, возникающих за входными устройствами, причем масштаб этих возмущений может быть значительно меньше поперечных размеров потока [2, 3].

Условно этот механизм далее будем называть мелкомасштабным, а механизм перехода к турбулентности, связанный с развитием в потоке вследствие гидродинамической неустойчивости волновых колебаний (волн Толлмина — Шлихтинга), — длинноволновым механизмом.

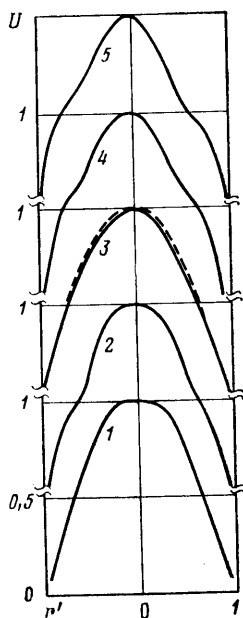
1. Эксперименты проводились на аэродинамической трубе, которая ранее использовалась авторами для исследования перехода к турбулентности в потоке с профилем скорости, формирующимся естественным образом [4]. В настоящей работе для формирования профилей скорости в круглой трубе диаметром $D=49$ мм между ней и конфузором аэродинамической трубы помещалось устройство, состоящее из вставки и пакета гидравлических сопротивлений. Входной участок вставки был спрофилирован по методу Витопинского и обеспечивал поджатие потока до диаметра, составляющего $0,6D$ (вставка 1) и $0,33D$ (вставка 2). Выходной

участок вставки представлял собой диффузор с большим углом раскрытия. Пакет гидравлических сопротивлений состоял из металлических сеток и хонейкомба, набранного из трубок длиной 20 мм, внутренним диаметром 0,9 мм и толщиной стенки 0,05 мм. Интенсивность начальных возмущений ϵ_0 определялась параметрами сеток, входящих в пакет.

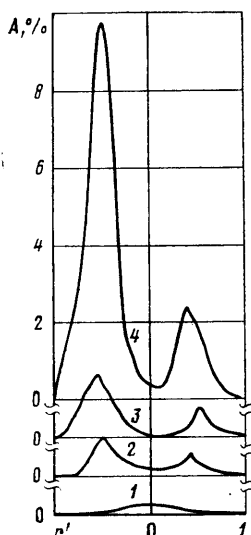
Измерение средней по времени продольной скорости потока u и ее среднеквадратичной пульсационной составляющей u' производилось с помощью термоанемометра 55M и аналоговой аппаратуры DISA. Использовался датчик 55E30 с термокомпенсацией, нить которого устанавливалась перпендикулярно направлению течения. Величина ϵ_0 определялась как отношение измеренной на расстоянии одного радиуса трубы от пакета сеток пульсационной составляющей скорости на оси



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

трубы u_0' к средней скорости на оси трубы u_0 , измеренной в той же точке. Спектральный анализ сигнала осуществлялся анализатором спектра Briel & Kjaerg 2131 с полосой разрешения $1/3$ октавы. Для записи профилей средней скорости и среднеквадратичных пульсаций скорости использовались графопостроители Endim 620.02. Датчик скорости, установленный на срезе трубы длиной x , перемещался в радиальном направлении r с помощью координатного устройства DISA 52B01. При исследовании струй истечение в окружающую атмосферу происходило в сечении $x' = x/D = 2$.

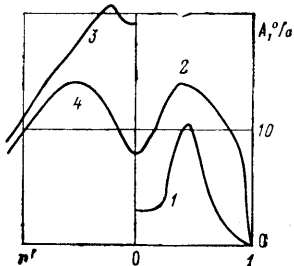
2. На фиг. 1 приведены зависимости величин $A = u'/u_0$ (кривые 1 и 2) и $U = u/u_0$ (кривые 3 и 4) от координаты $r' = 2r/D$ при $\epsilon_0 = 0,35\%$ (сплошные кривые) и $\epsilon_0 = 2,4\%$ (штриховые). Среднерасходная скорость U_p равна 4,3 м/с, расстояние от пакета сеток 17 см. При $\epsilon_0 = 0,35\%$ в профиле пульсаций скорости имеются локальные минимумы, характерные для волн Толлмина — Шлихтинга. Этот признак отмечен как в теоретических расчетах [5], так и в экспериментах по переходу к турбулентности в пограничном слое на пластине [6]. Спектры пульсаций скорости в слое сдвига имели локальные максимумы в диапазоне частот, соответствующем области линейной неустойчивости.

Увеличение ϵ_0 приводит к сглаживанию спектров пульсаций скорости и исчезновению локальных минимумов в профилях этой величины.

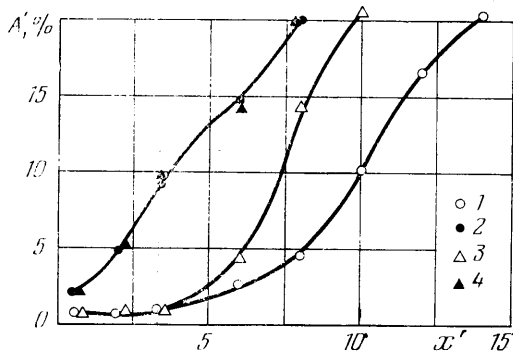
Вставка 2 позволяет получить поток с большей толщиной слоя сдвига скорости. При $U_p = 2,8$ м/с в сечении $x' = 2$ число Рейнольдса, построенное по толщине вытесне-

ния пограничного слоя и скорости u_0 , составляет 3720. На фиг. 2 и 3 профилям 1—5 соответствует $x'=2, 6, 12, 16$ и 22. Пульсации скорости на входе в трубу не превышали 0,28%. Симметрия профилей пульсаций скорости нарушается неконтролируемыми неоднородностями сборки. Эти профили не имеют характерных для длинноволнового механизма перехода к турбулентности локальных минимумов, а спектры пульсаций скорости не имеют выделенных частот. Профили скорости при $2 < x' < 12$ имеют точки перегиба, возникающие при перестройке потока на участке от входного сечения, где формпараметр искусственно сформированного профиля скорости $f_0 = u_0/U_p$ равен 2,18, до сечения $x'=12$, где профиль скорости близок к профилю Пуазейля (показан пунктиром). Дальнейшая эволюция течения в трубе также сопровождается появлением точек перегиба в профилях средней скорости (профиль 4), что характерно для развития мелкомасштабных возмущений [7].

3. Было проведено сравнение течений в трубе и струе при равных начальных условиях (вставка 2, $U_p = 4,3$ м/с). Начальный профиль скорости совпадал с приве-



Фиг. 4



Фиг. 5

денным на фиг. 2 (кривая 1). На фиг. 4 правая половина профилей пульсационной составляющей скорости относится к течению в трубе (кривые 1 и 2), а левая — к течению в струе (кривые 3 и 4). Профили 1 и 3 получены при $\epsilon_0 = 0,55\%$ и $x' = 10$, профили 2 и 4 — при $\epsilon_0 = 2,2\%$ и $x' = 6$.

В случае $\epsilon_0 = 0,55\%$ рост возмущений в струе происходит интенсивнее, чем в трубе, как на оси потока, так и в слое со сдвигом скорости. Увеличение начальной интенсивности возмущений приводит к тому, что как профили скорости, так и профили ее среднеквадратичных пульсаций в трубе отличаются от соответствующих профилей струйного течения лишь в непосредственной близости от стенки. На фиг. 5 приведены зависимости максимальной по сечению потока интенсивности пульсаций скорости A' от координаты x' для трубы (точки 1 и 2) и струи (3 и 4). Точкам 1 и 3 соответствует $\epsilon_0 = 0,55\%$, точкам 2 и 4 — $\epsilon_0 = 2,2\%$. Аналогичный вид имели зависимости величины пульсаций скорости на оси трубы и струи A_0 от координаты x' . Тот факт, что при $\epsilon_0 = 2,2\%$ наличие точки перегиба в профиле средней скорости струи не влияет на развитие возмущений по сравнению с течением в трубе, позволяет предположить, что переход к турбулентности в этом случае связан с развитием в потоке не длинноволновых колебаний, а мелкомасштабных возмущений широкого спектра.

Таким образом, проведенные эксперименты позволили установить, что в трубе с искусственно сформированным начальным профилем скорости, имеющим формпараметр $f_0 = 1,46$, при $\epsilon_0 = 0,35\%$ наблюдались признаки длинноволнового, а при $\epsilon_0 = 2,4\%$ — мелкомасштабного механизма перехода к турбулентности. В профиле с толщиной слоя сдвига скорости, близкой к радиусу трубы и $f_0 \approx 2$ при $\epsilon_0 = 0,28\%$ наблюдались лишь признаки мелкомасштабного механизма перехода к турбулентности. При $\epsilon_0 = 2,2\%$ в струе с искусственно сформированным начальным профилем скорости переход к турбулентности происходил по этому же механизму.

Можно заключить, что переход к турбулентности в круглой трубе с начальным профилем скорости, близким к профилю Пуазейля, происходит вследствие развития в потоке широкополосного спектра возмущений и в том числе возмущений, масштаб которых меньше толщины слоя сдвига скорости.

Полученные выше результаты являются дальнейшим развитием методов формирования неравновесных турбулентных потоков, которые ранее предлагались для струй и пограничных слоев [8, 9]. Формирование в начальном сечении трубы потока с заданным градиентом скорости у стенки, масштаб турбулентности в котором определяется входным устройством и значительно меньше радиуса трубы, позволяет на некоторой длине уменьшить трение на стенках трубы. При создании в начальном сечении круглой трубы профиля скорости, близкого к профилю Пуазейля, переход к развитой турбулентности происходит через развитие неравновесной турбулентности, масштаб которой определяется входным устройством и значительно меньше

радиуса трубы. Это подтверждается, в частности, тем, что при росте интенсивности пульсаций скорости в зоне с градиентом скорости интенсивность пульсаций на оси не возрастает.

В данной работе минимальная интенсивность продольных пульсаций скорости в начальном сечении трубы составляла $\sim 0,3\%$. Остается неясным, существуют ли для любого числа Рейнольдса такие характеристики начальной турбулентности, при которых энергия этой турбулентности в трубе с искусственно созданным профилем Пуазейля не будет возрастать на любом расстоянии от начала трубы. Если такие характеристики существуют, то создавая в начальном сечении поток с профилем скорости Пуазейля и соответствующими характеристиками турбулентности и учитывая тот факт, что течение в круглой трубе с профилем Пуазейля устойчиво к бесконечно малым возмущениям, можно ожидать ламинарного течения в гладкой трубе на любых расстояниях от начала трубы.

Если такие характеристики не существуют или если они экспериментально недостижимы, то представляет интерес вопрос о длине, на которой трение на стенке трубы может быть значительно ниже, чем при развитом турбулентном течении, если в начальном сечении изменять профиль скорости и характеристики турбулентности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Huang L. M., Chen T. S. Stability of developing pipe flow subjected to non-axisymmetric disturbances.— J. Fluid Mech., 1974, v. 63, pt 1, p. 183—193.
2. Павельев А. А. О переходе к турбулентности в струях.— В сб.: Турбулентные течения. М.: Наука, 1974, с. 185—193.
3. Луцкич В. Г., Павельев А. А., Якубенко А. Е. Исследование перехода к турбулентности в пограничном слое при большой интенсивности внешних возмущений с помощью трехпараметрической модели.— В сб.: Проблемы современной механики. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ, 1983, с. 127—138.
4. Коляда В. В., Павельев А. А. О переходе к турбулентности на начальном участке круглой трубы.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1985, № 4, с. 52—56.
5. Шахтгинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
6. Arnal D., Juillen J.-C. Etude expérimentale et théorique de la transition de la couche limite.— Recherche Aéropatiale, 1977, № 2, p. 75—88.
7. Луцкич В. Г., Павельев А. А., Якубенко А. Е. Исследование сдвиговых течений в каналах и пограничных слоях с использованием трехпараметрической модели турбулентности.— Отчет Ин-та мех. МГУ, 1981, № 2553. 106 с.
8. Навознов О. И., Павельев А. А. О переходе к турбулентности в спутных струях.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1969, № 6, с. 131—136.
9. Навознов О. И., Павельев А. А. Влияние начальных условий на течение осесимметричных спутных струй.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1980. № 4, с. 18—24.

Москва

Поступила в редакцию
10.VI.1985

УДК 532.526

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ СФЕРЫ С ПЕРЕДНЕЙ ОТРЫВНОЙ ЗОНОЙ

ХЛЕБНИКОВ В. С.

Исследования сверхзвуковых осесимметричных отрывных течений перед телом с иглой или между парой тел проведены в целом ряде работ, многие из которых рассмотрены в [1]. Большинство экспериментальных работ посвящено в основном исследованию сопротивления тела с иглой (системы пары тел) либо исследованию распределений давления по поверхности тела с иглой (по поверхности тела в следе) в зависимости от размеров иглы и тела (пары тел и расстояния между ними), а также чисел M и Re . Работ, в которых исследована теплопередача к поверхности тел с иглой, немного (см., например, [2—3]). Сведения, приведенные в них, не обладают достаточной полнотой и зачастую носят противоречивый характер. Работы [4—6] посвящены исследованию теплового потока на поверхности тел, расположенных в сверхзвуковом следе.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментального исследования распределений теплового потока по поверхности сферы с иглой, на конце которой установлен конический или пирамидальный насадок. Испытания проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе с осесимметричной рабочей частью и подогревом потока при числах $M=3$ и $Re=10^6-10^7$. Число Рейнольдса определено по параметрам набегающего потока и длине иглы. Температура торможения потока $T_0=393\pm 3$ К, давление в форкамере $P_0=(4,9\pm 0,5)\cdot 10^5$ Н/м². Измерение теплового потока на поверх-