

НАБЛЮДЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ УРОВНЕЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛООБМЕНА

В.Н.Зайковский, В.М.Трофимов

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН
630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 14 марта 1995 г.

Экспериментально обнаружено расслоение теплообмена на дискретные уровни при взаимодействии акустического поля с турбулентным пограничным слоем в сверхзвуковом канале. Установлена кратность квадратов коэффициентов интенсивности теплообмена, относящихся к разным уровням.

Свойства внутренних турбулентных структур в гидродинамической турбулентности [1–4], связь их с аналогичными объектами в нелинейных оптике, акустике, радиофизике [5] вызывают особый интерес к изучению природы взаимодействия внешних полей с турбулентной средой. Восприимчивость турбулентного сдвигового слоя проявляется в избирательном преобразовании акустических возмущений в вихревые в узких диапазонах частот [6]. Хотя порождение собственных колебаний наблюдается и в ламинарном слое [7], наименее понятными остаются как природа акустического взаимодействия с развитой турбулентностью, так и свойства самих внутренних турбулентных структур.

В данной работе исследовалось влияние акустического поля на теплоперенос в турбулентном пограничном слое в условиях повышенной анизотропии течения.

Эксперименты проводились на газодинамической крупномасштабной РД-установке (ИТПМ СО РАН), реализующей высокие числа Рейнольдса, с расходами воздуха до 10 кг/с. Измерялись распределения коэффициентов интенсивности теплообмена, давления и пульсаций давления на стенках сверхзвукового канала в зависимости от положения его оси относительно входного дозвукового потока газа, в котором, в свою очередь, возбуждались интенсивные собственные акустические волны.

Газ (воздух), проходящий через входной канал 1 (рис.1), поступал в замкнутую полость 2, далее на вход второго канала 3, имеющего форму конического сопла Лаваля. Угол наклона образующей дозвуковой части сопла равнялся 32° , сверхзвуковой – 8° . Диаметр критического сечения – 38,4 мм. Положение сопла варьировалось так, что угол между осями каналов 1 и 3 принимал значения $\beta = 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ$. Числа Маха истекающего из канала 1 газа $M_1 = 0,1; 0,2; 0,35$. Полное давление на выходе из него составляло $p_0 = (19,1 - 19,5) \cdot 10^5$ Па. Число Рейнольдса, построенное по диаметру канала 1, – $Re = (3 - 9) \cdot 10^6$.

Методика измерений локальных интенсивностей теплообмена, включая оригинальный метод тарировки датчиков, описана в [8]. Датчики температуры располагались вдоль образующей сопла в точках (4, рис.1) с шагом 5мм (всего 40 точек). Относительно низкая их инерционность обеспечивалась высокими значениями коэффициентов интенсивности теплообмена $\alpha = q/(T_w - T_w^*)$,

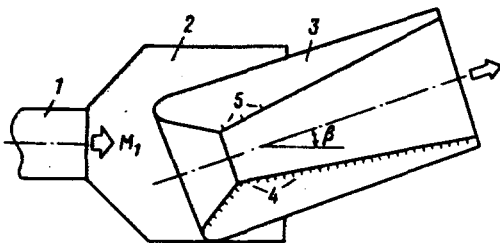


Рис.1. Схема эксперимента: 1 - входной канал, 2 - замкнутая полость, 3 - сопло, 4 - датчики температуры поверхности, 5 - датчики пульсаций давления

где q - плотность теплового потока на стенке; T_w , T_w^* - температуры поверхности стенки и восстановления на стенке, соответственно. Случайная ошибка в измерениях α теплообмена не превышала 5%, суммарная - до 10%. В опытах использовалась автоматизированная система сбора и обработки информации с частотой опроса датчиков температуры 50 Гц. Для контроля пульсаций давления использовались тензодатчики, изготовленные в ИТПМ СО РАН, с диаметром чувствительного элемента 1,5 мм. Сигналы, поступающие с датчиков, подавались на вход усилителя, а затем отцифровывались в системе СПЕКТР-ЭВМ "МЕРА-60" и записывались. Частота дискретной выборки составляла 25 кГц. Погрешность измерений - 1,5%. Использовались три датчика, встроенные в стенку сопла через 10 мм вдоль его образующей (5, рис.1). Вращением канала 3, относительно его оси достигалась смена положения образующей с измерительными точками относительно потока. Измерения проведены как вдоль нижней ($\gamma = 0^\circ$), так и вдоль верхней ($\gamma = 180^\circ$) образующих канала.

Для выяснения качественного характера течения была проведена оптическая визуализация теньевым методом на специальной установке в плоском аналоге экспериментальной модели. Установлено, что турбулентная струя, близкая к расчетной, истекающая из входного канала 1, взаимодействует с пристенным течением вдоль дозвуковой части канала 3, в которой происходит частичный поворот струи в направлении повернутого канала 3, и, наконец, в сверхзвуковой его части основное течение окончательно поворачивается до направления оси канала 3. В слое смещения струи, истекающей из канала 1, развиваются крупномасштабные структурные образования, которые затем рассеиваются под действием ускорения в канале 3.

Измерения пульсаций давления (в точках 5, рис.1) проведены при $M_1 = 0,35$ и указанных значениях γ и β . Характерной особенностью полученных спектров пульсаций является наличие дискретного тона в окрестности частоты $\nu = 1,75$ кГц и его второй гармоники. Характер изменения дискретного тона при варьировании параметров β и γ свидетельствует о том, что источником его является сдвиговый слой газа в окрестности входного канала и что интенсивные когерентные акустические волны (дискретные тона) затем взаимодействуют с турбулентным течением в пограничном слое на стенках канала 3.

Распределения коэффициентов интенсивности теплообмена $\alpha = q/\Delta T$ вдоль образующей канала 3 при $\beta = 0^\circ$ и малом значении числа Маха в истекающем из канала 1 потоке ($M_1 \leq 0,1$) показаны на рис.2а. Данные опытов хорошо описываются асимптотической теорией турбулентного пограничного слоя [9] (кривая).

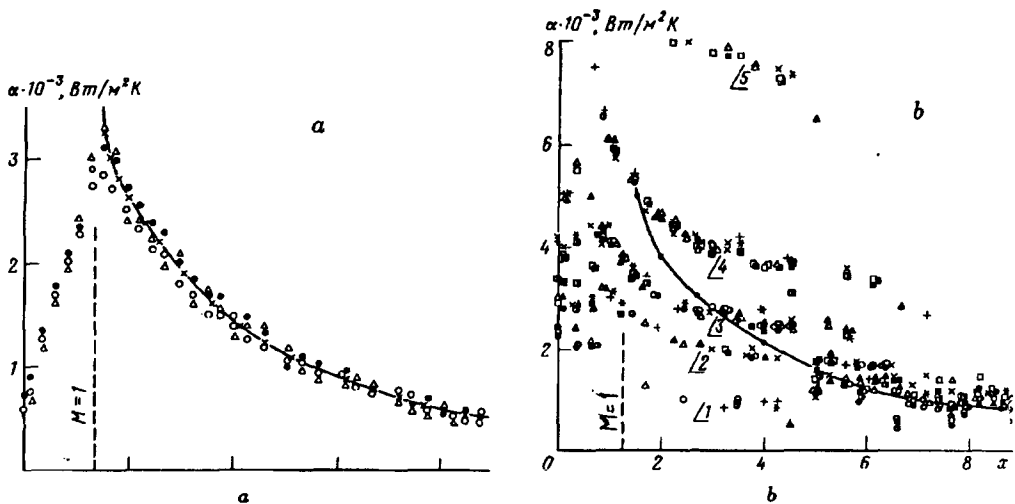


Рис.2. Распределение коэффициентов интенсивности теплообмена вдоль образующей сопла $x = X/R^*$: а - $M_1 \leq 0,1$, $\beta = 0^\circ$; кривая - расчет по [9]; б - $M_1 = 0,35$, $\beta = 20^\circ$: 1 - 5 - структурные уровни теплообмена; кривая - расчет ([9], $\beta = 0^\circ$)

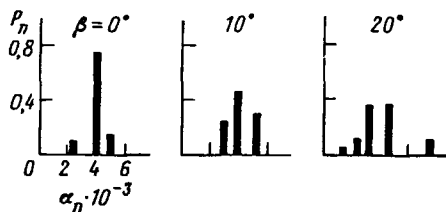


Рис.3. Влияние угла наклона сопла на спектры (средних вдоль контрольного участка) уровней коэффициентов интенсивности теплообмена при $M_1 = 0,35$

При наложении опытных данных (когда $\beta \neq 0$; $M_1 > 0,1$) нескольких экспериментов, проведенных в идентичных условиях, либо данных нескольких выборок, полученных в одном эксперименте, обнаруживается четко регистрируемая качественно новая закономерность в поведении коэффициентов α . Она состоит в следующем. На участке образующей сопла, соответствующем области отклонений давлений на стенке от невозмущенных значений, коэффициенты α случайным образом распределяются на 3-5 уровнях, число которых растет с увеличением β и M_1 (достигая максимума, равного 5). Непосредственно за этим участком экспериментальные точки сходятся к одному уровню, близкому к распределению α при $\beta = 0^\circ$, $M_1 \approx 0$.

На рис.2b приведены данные четырех опытов с тремя выборками α (выборка соответствует разовому опросу всех 40 измерительных точек) в каждом, полученных при $M_1 = 0,35$, $\beta = 20^\circ$, $\gamma = 0$. Следует отметить четко фиксируемое расположение опытных точек вдоль каждой из линий уровней и явную предпочтительность попадания их на средние уровни.

Для анализа вероятности попадания опытных значений α на различные уровни в зависимости от параметров M_1 , β , γ построены диаграммы распределений α по уровням. В качестве контрольного выбран участок образующей канала в промежутке $X/R^* = 1,0-5,0$, здесь R^* - радиус критического сечения сопла (где число Маха $M = 1$). Исходный массив опытных точек был равен

сумме опытных данных из двенадцати выборок (194 точки). Путем подсчета числа точек на каждом из уровней определялась вероятность P_n попадания на него. Затем находилось среднее значение α_n на контрольном участке для каждого уровня.

На диаграмме вероятностей P_n (рис.3) по осям абсцисс отложены средние значения α_n для каждого уровня вдоль контрольного участка. Справедливо нормировочное соотношение

$$\sum_{n=1}^N P_n = 1,$$

где N – число уровней, появившихся в опыте. Видно, что с ростом β при фиксированном $M_1 = 0,35$ число уровней в спектре α_n увеличивается. Подобное же происходит при фиксации β и изменении M_1 . Аналогичная картина наблюдается и на верхней образующей канала 3 ($\gamma = 180^\circ$). Отличие состоит в том, что с ростом β или M_1 спектр α_n деформируется по разному. На верхней образующей канала наблюдается рост заселенности нижних уровней коэффициентов теплообмена, а на нижней образующей – обратная тенденция.

Анализ данных показал, что между величинами α_n^2 (рис.2b, $n = 1 - 5$) в произвольном сечении X/R^* на контрольном участке образующей канала 3 существует вполне определенная связь: все они кратны минимальной из них (α_1^2). Так для пяти произвольно выбранных сечений $X/R^* = 1,5; 1,9; 2,0; 2,5; 4,0$ среднеквадратичное отклонение отношений α_n^2/α_1^2 от целых чисел равно 13% и находится в пределах погрешности вычислений этих величин. При этом в 10% от общего числа точек это отклонение меньше 0,5%, что исключает возможность случайного совпадения.

Расслоение турбулентного теплообмена на дискретные уровни и кратность отношений α_n^2/α_1^2 свидетельствуют об особом механизме взаимодействия когерентного акустического поля с анизотропной турбулентностью, связанном с ее внутренней структурой.

-
1. А.К.М.Ф. Hussain, *Phys. Fluids* **26**, 2816 (1983).
 2. V.S.Kachanov, O.S.Ruzhov, and F.T.Smith, *J. Fluid Mech.* **251**, 273 (1993).
 3. М.А.Гольдштик, В.Н.Штерн, *ДАН СССР* **257**, 1319 (1980).
 4. Ю.А.Березин, В.М.Трофимов, *Изв. РАН МЖГ* **6**, 62 (1994).
 5. Г.М.Заславский, Р.З.Сагдеев, *Введение в нелинейную физику*, М.: Наука, 1988.
 6. Н.Н.Яненко, В.В.Козлов, С.П.Бардаханов, *ДАН СССР* **274**, 50 (1984).
 7. А.А.Маслов, Н.В.Семенов, *Изв. АН СССР МЖГ* **3**, 82 (1989).
 8. В.Н.Зайковский, Е.Г.Зауличный, Б.М.Меламед, Ю.М.Сенов, *ПМТФ* **2**, 52 (1982).
 9. С.С.Кутателадзе, А.И.Леонтьев, *Тепло-массообмен и трение в турбулентном пограничном слое*, М.: Энергия, 1972.