

УДК 532.542.4

Влияние условий входа на развитие турбулентного потока по длине круглых труб

ГАБРИАНОВИЧ Б. Н., ЛЕВЧЕНКО Ю. Д., ТРУБАКОВ Ю. П., УШАКОВ П. А.

В активных зонах реакторов и в теплообменном оборудовании область гидродинамически неустойчивых потоков теплоносителя составляет иногда заметную часть длины каналов. Это влияет на температурные поля элементов энергетического оборудования и внутриреакторных устройств. Для учета влияния неравномерного по длине теплового потока на температурное поле можно, в частности, использовать интеграл Дюамеля, содержащий так называемую переходную функцию. Для расчета этой функции необходимы количественные данные о процессах на входных участках каналов.

Расчеты по различным методикам [1—4] дают, как правило, меньшую длину входного участка по сравнению с опытами. Применяемые в технике устройства входа в трубы (решетки, шайбы, конфузоры, диффузоры, вход из большого объема и т. п.) вызывают деформацию профиля скорости на входе, турбулентность которого целиком зависит от предыстории потока. Опыт работы [5] показывает, что начальный уровень интенсивности турбулентности до 3% не влияет на течение в начальном участке круглых труб. Эксперименты других авторов [6—11] также не установили зависимости длины стабилизации от вида входных условий и интенсивности турбулентности на входе в трубу. В работах [12, 13], где исследовалось затухание турбулентности входного потока по длине трубы, не изучалось влияния входной турбулентности на стабилизацию радиального профиля усредненной продольной скорости потока.

В настоящей работе обобщается имеющийся материал [6, 14, 15, 16] и приводятся новые экспериментальные данные по длине стабилизации профилей скорости в круглых трубах в зависимости от входных условий. В качестве экспериментального канала использовали точеную трубу диаметром 145 мм, состоящую из 23 секций по 600 мм каждая. Секции изготавливали по второму классу точности с чистотой внутренней поверхности 0,32 ($\nabla 9$). Отдельные секции соединяли и центрировали посредством втулок. На посадочные наружные поверхности труб перед сборкой наносили уплотняющую смазку. Опыты проводили при напорном течении воздуха с числом Рейнольдса 285 000. Профили скорости и интенсивность турбулентности измеряли термоанемометрическим методом с применением комплекта соответствующей аппаратуры ДИЗА 55 М (Дания). В комплект аппаратуры входили мост постоянной температуры нити, усилитель, линейаризатор и вольтметр средних квадратических значений.

Плоский профиль скорости на входе в трубу обеспечивался с помощью сопла, выполненного по профилю Витошинского, со степенью поджатия потока, равной 4,9. Перед соплом устанавливался хонейкомб и различные варианты входных решеток. Профиль скорости на входе в трубу оставался постоянным, а интенсивность турбулентности менялась от 0,7 до 7,1%. При низкой степени турбулентности (0,7%) профиль скорости на входе в трубу деформировался при помощи различного рода сужающих устройств: шайб различного диаметра (как одиночных, так и нескольких), шайбы, несимметрично перекрывающей половину сечения трубы по диаметру. При каждом входном условии были проведены измерения скорости и ее пульсации вдоль оси трубы. Таким образом, были исследованы «предельные» случаи влияния входных условий на развитие характеристик потока вдоль трубы.

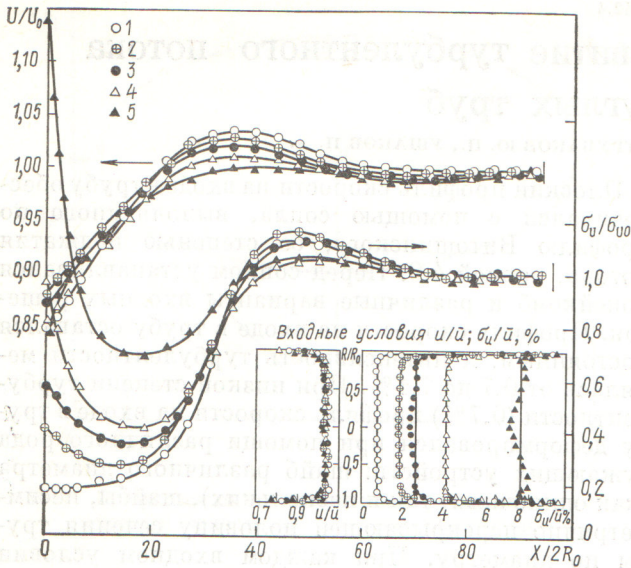
Интенсивность начальной турбулентности на входе в трубу изменялась с помощью решеток, устанавливаемых за хонейкомбом перед соплом, которые изготавливали из металлических пластин. Отверстия в решетках были расположены по углам правильных треугольников. Размер вихрей, генерируемых за решеткой, зависел от размеров отверстия в решетке и перемычки между отверстиями. Поэтому примененные решетки имели различную пористость (см. таблицу).

В этой же серии опытов были проведены измерения с сеткой, установленной перед соплом, что соответствовало условию плавного профилированного входа. Сетка имела размер ячейки 0,5 мм и толщину проволоки 0,32 мм. Результаты измерения скорости и пульсации ее вдоль оси трубы при различных значениях интенсивности начальной турбулентности потока на входе в трубу приведены на рис. 1.

Профили усредненной скорости во входном сечении трубы были линейными при всех примененных в опытах решетках и практически (с разбросом опытных данных $\pm 1\%$) совпадали с профилем скорости во входном сечении при плавном

Характеристики входных решеток

Число отверстий	Диаметр отверстий	Пористость	Интенсивность турбулентности на входе, %
7	75	0,4	7,1
19	50	0,46	3,9
37	41	0,6	2,3
92	25	0,55	1,7



Р и с. 1. Изменение продольной скорости U/U_0 и ее пульсации σ_u/σ_{u0} на оси трубы при различных уровнях входной турбулентности: 1 — сетка $0,5 \times 0,32$; 2 — решетка с 91 отверстием диаметром 25; 3 — решетка с 37 отверстиями диаметром 41; 4 — решетка с 19 отверстиями диаметром 50; 5 — решетка с 7 отверстиями диаметром 75; $Re = 285\ 000$

профилированном входе. Радиальный профиль интенсивности турбулентных пульсаций скорости во входном сечении трубы также был достаточно равномерным по сечению трубы. В пристенной области потока интенсивность турбулентности была одинаковой для всех решеток и определялась генерацией турбулентных пульсаций за счет градиента скорости в пограничном слое, образующемся на стенках сошла. В центральной части потока интенсивность турбулентности при различных решетках составляла 0,7—7,1%. Для уверенности в том, что в процессе экспериментов измерялась действительно турбулентность, а не аппаратные шумы, сигнал подавался на анализатор спектра 3348 Брюль и Кьер и коррелятор ДИЗА 55Д70 (Дания). Пульсации скорости на входе в трубу носили случайный характер и не имели регулярной составляющей в диапазоне частот от нуля до 20 кГц.

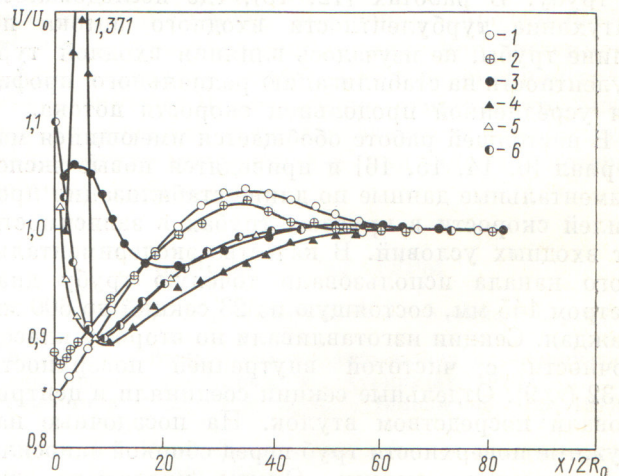
Из рис. 1 следует, что увеличение входного уровня интенсивности турбулентности от 0,7 до 2,3% практически не влияло на характер развития скорости вдоль оси трубы. В случае плавного профилированного входа отмечалась максимальная осевая скорость по длине трубы на расстоянии от входа, равном 40 диаметрам. Значение максимальной скорости уменьшалось с повышением уровня интенсивности турбулентности во входном сечении трубы. При интенсивности турбулентности во входном сечении трубы, равном 7,1%, также имелась некоторая немонотонность в изменении продольной скорости по длине трубы.

На расстоянии от входа, равном 65 диаметрам, отмечался минимум продольной скорости потока, который с уменьшением входной турбулентности потока становился менее заметным.

Турбулентные пульсации скорости, вызванные входными решетками, затухали на расстоянии от входа, равном 20 диаметрам, где наблюдался минимум в распределении турбулентных пульсаций скорости по длине трубы. Минимальная пульсация скорости на оси трубы была пропорциональна входному уровню турбулентности. Из опытов следовало, что турбулентность, вызванная решеткой, не успевала полностью диссипировать до того, как турбулентные вихри из пограничного слоя начинали достигать оси трубы. Далее по потоку повышенная турбулентность увеличивала перенос количества движения в радиальном направлении, что препятствовало образованию более вытянутого профиля скорости по сравнению со стабилизированным.

Таким образом, увеличение интенсивности турбулентности на входе в трубу приводило к более монотонному развитию усредненной скорости и к уменьшению длины стабилизации. Поэтому к причинам различия в экспериментальных результатах по изучению развития профилей скорости потока на входном участке круглых труб, полученных разными авторами, можно отнести влияние входного уровня турбулентности.

Из сопоставления результатов работ, проведенных ранее [6—12, 14—16], следует, что различные входные условия по-разному влияют на развитие гидродинамических характеристик потока на не-



Р и с. 2. Изменение продольной скорости U/U_0 на оси трубы при различных условиях входа: 1—4 — плавный профилированный вход; 2 — вход с шайбой диаметром 140 мм; 3 — вход с пятью кольцами диаметром 133,6 мм; 4 — вход с шайбой, перекрывающей половину сечения трубы, $Re = 285\ 000$ (данная работа); 5 — вход с диффузором, $Re = 55\ 000$ [9]; 6 — вход из большого объема, $Re = 81\ 000$ [6]; X — расстояние от входа в канал; R_0 — радиус трубы; \bar{u} — средняя скорость потока; $Re = 2R_0 \cdot \bar{u} / \nu$

стабилизированном участке течения. Условия входа в круглые трубы (решетки, вход из большого объема, диффузоры, дросселирующие шайбы) в той или иной мере вызывают поджатие потока на входе. В данной работе проведено изучение влияния степени поджатия потока на входе на развитие течения по длине трубы. Профиль скорости, значительно вытянутый вблизи входа из-за поджатия потока, на некоторой длине сначала уплотняется, а затем монотонно развивается по длине до своего стабилизированного вида. Значение минимума скорости и расстояние, на котором он расположен от входа в трубу, определяется видом входного устройства. В опытах в качестве входных устройств использовали шайбу толщиной 2 мм, выступающую в поток на 2,5 мм, шайбу, перекрывающую половину сечения трубы по диаметру, и плавный профилированный вход.

На рис. 2 приведены результаты измерений настоящей работы (кривые 1, 2, 4) и данные работ [15, 9, 6], которые обозначены соответственно кривыми 3, 5, 6. Как следует из рис. 2, значения скорости на оси трубы при плавном профилированном входе являются секущими семейства минимумов при других видах входа в трубу. Длина стабилизации при всех деформациях потока на входе практически не меняется.

Таким образом, исследования показали, что длина стабилизации в круглых трубах при одном и том же числе Рейнольдса слабо зависит от степени поджатия потока на входе и сильно зависит от уровня входной турбулентности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Szablewski W. «Ingenieur Archiv», 1953, Bd 21, S. 323.
2. Филиппов Г. В. «Техническая физика», 1963, т. 28, № 8, с. 1823.
3. Солодкин Е. Е., Гиневский А. С. Труды ЦАГИ, 1957, вып. 701, с. 26.
4. Bowls D., Brighton J. «J. of Basic Engng», 1968, v. 184, N 3, p. 431.
5. Richman J., Azad R. «Appl. Sci. Res.», 1973, v. 28, p. 419.
6. Бибииков Л. Н. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 1, с. 19.
7. Барбин А. Р., Джоунс Д. Б. «Техническая механика», 1963, т. 85-Д, № 1, с. 34.
8. Ибрагимов М. Х.-Г. и др. «Теплофиз. высоких темпер.», 1974, т. 12, № 3, с. 542.
9. Dalla Lana I., Christiansen S. «Canad. J. Chem. Engng», 1967, v. 45, N 10, с. 275.
10. Адамов Г. А., Идельчик И. Б. Труды № 670, БНТ МАП, 1948, 27 с.
11. Weir J., Priest A., Sharan V. «J. Mech. Engng Sci.», 1974, v. 16, N 3, p. 241.
12. Сукомел А. С. и др. «Инж.-физ. журн.», 1977, т. 33, № 5, с. 816.
13. Швец И. Т. и др. — «Изв. вузов. Сер. энергет.», 1960, № 8, с. 403.
14. Субботин В. И. и др. Исследование турбулентного потока воздуха на входном участке круглой трубы. Препринт ФЭИ-599, 1975.
15. Трубаков Ю. П., Габрианович Б. Н., Левченко Ю. Д. — «Изв. АН БССР. Сер. Физ.-энергет. наук», 1976, № 2, с. 89.

Поступила в Редакцию 29.09.78

УДК 621.36

Графоаналитический метод определения длины элементов по высоте многоэлементной термоэмиссионной сборки

СИНЯВСКИЙ В. В.

Теоретические [1—3] и экспериментальные [4, 5] исследования многоэлементных термоэмиссионныхборок показали, что вследствие неоднородности тепловыделения по высоте сборки $q(z)$ наблюдается неравномерность температуры эмиттеров $T_{\text{э}}$ отдельных элементов в сборке. При ограничении $T_{\text{э}} \leq T_{\text{доп}}$ (или $T_{\text{э, доп}} \leq T_{\text{макс}}$), где $T_{\text{доп}}$ — предельно допустимая температура эмиттера, любая неоднородность $q(z)$ будет снижать выходные энергетические характеристики сборки с последовательно соединенными элементами одинаковой длины [1].

Повышение эффективности сборки с неоднородным $q(z)$ может быть осуществлено за счет перераспределения делящегося вещества по высоте сборки (ядерное профилирование [6]) или путем оптимального распределения длины элементов по высоте сборки (электронное или геометрическое профилирование). Для неоднородного $q(z)$ гео-

метрическое профилирование исследовано как теоретически [2, 7, 8], так и экспериментально [9]. Формулировка задачи и численный алгоритм определения $\{l_i\}_{\text{опт}}$ для неравномерного $q(z)$ приведены в работе [2]. Однако из общих физических соображений следует, что при ограничении $T_{\text{э, макс}} \leq T_{\text{доп}}$ не только неоднородность $q(z)$, но и любая неоднородность параметров, от которых зависит $T_{\text{э, макс}}$ (например, температуры коллекторов $T_{\text{с}}$, давления паров цезия и т. п.), также будет приводить к снижению выходных характеристик сборки с последовательно соединенными элементами одинаковой длины. В таких случаях может быть эффективно использовано геометрическое профилирование.

Предлагаемый графоаналитический метод определения оптимальной функции распределения длины элементов по высоте сборки $\{l_i\}_{\text{опт}}$ пригоден для решения задачи геометрического профилиро-