

УДК 532.517.4

**ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ В КРУГЛОМ РАСШИРЯЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ
ПРИ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА, МЕНЬШИХ 2000**

© 2011 г.

В.В. Трифонов, А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

trifonovvl@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

В рамках решения проблемы существования и значения нижнего критического числа Рейнольдса для течения в круглой трубе проведены экспериментальные и расчетные исследования течения в круглом коническом диффузоре с углом наклона образующей 0.3 градуса и длиной 70 входных диаметров. Измерения проведены в потоке воздуха в выходном сечении диффузора при числах Рейнольдса от 600 до 3000. Показано, что в отличие от трубы, где при числе Рейнольдса меньше 2000, как установившееся, реализуется только ламинарное течение, в выходном сечении исследуемого диффузора при числе Рейнольдса больше 1000 формируется развитое турбулентное течение. При числе Рейнольдса больше 1300 это течение установившееся, то есть почти не зависит от степени турбулентности на входе и определяется значением числа Рейнольдса в выходном сечении. При числе Рейнольдса около 1000 турбулентное течение непрерывно переходит в ламинарное. Измеренные на выходе из диффузора характеристики течения соответствуют расчету по трехпараметрической модели турбулентности.

Ключевые слова: число Рейнольдса, турбулентный поток, безотрывный диффузор, турбулентные напряжения, эксперимент.

**Структура входного течения в трубе
и критическое число Рейнольдса**

Для течения в круглой трубе числа Рейнольдса (Re построено по диаметру D и средней по сечению скорости U) вблизи 2000 обычно называются околочитическими. Ниже этого значения, как установившийся, реализуется только ламинарный режим течения. При более высоких значениях Re , если не принимать специальных мер, наблюдается изменение режима течения. Многие вопросы, связанные с течением в этой области, недостаточно изучены. Остается открытым вопрос о существовании и значении нижнего критического числа Рейнольдса, под которым обычно подразумевается такое значение Re , ниже которого установившееся течение в трубе при любых условиях на входе может быть только ламинарным. Значение Re , ниже которого установившееся течение в трубе может быть только ламинарным при конкретных условиях на входе в трубу, называют критическим (Re^*).

Установившееся турбулентное течение в трубах при $Re < 2000$ не реализуется. Однако расчеты для круглой трубы [1] с использовани-

ем трехпараметрической модели сдвиговой турбулентности [2] показывают, что установившееся турбулентное течение может существовать при числах Re больше ~ 1000 . Согласно расчетам, при этом значении Re турбулентное течение непрерывно переходит в ламинарное, профиль турбулентного течения приближается к параболическому, а турбулентные пульсации исчезают. Для круглой трубы это значение Re можно приближенно получить из условия равенства коэффициентов сопротивления, вычисленных по формуле Гагена – Пуазейля для ламинарного течения и по формуле Прандтля для турбулентного течения. Экспериментальные исследования [3, 4] по определению влияния интенсивности и структуры начальных возмущений на Re^* , показали, что при различных рассмотренных способах подачи газа минимальное значение Re^* , равное ~ 1950 , получается при подаче газа в трубу через безотрывный диффузор. Было отмечено, что на участке 20–30 диаметров трубы от входа при $Re > 1000$ осевая скорость близка к расчетной скорости для турбулентного течения. Это и определило необходимость изучения характеристик течения в выходном сечении безотрывного диффузора.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка включала в себя устройство подачи заданного расхода воздуха, исследуемый диффузор и измерительную систему. Для проведения исследований был выбран круглый конический диффузор с прямолинейной образующей, входным диаметром $D_1 = 5.7$ мм, выходным диаметром $D_2 = 10$ мм и длиной 420 мм. Угол наклона образующей составляет примерно 0.3 градуса. При постоянном расходе воздуха местное значение Re внутри диффузора меняется обратно пропорционально диаметру. Воздух в диффузор подавался через трубку диаметром 1.7 мм. В ней устанавливался стабильный турбулентный поток при значении $Re > 500$ на выходе диффузора.

Для измерения скорости воздуха применялся термоанемометр DISA 56C01 СТА, малоразмерные проволочные датчики 55P11 или 55P15 производства Dantec Dynamics, которые могли перемещаться по диаметру выходного сечения диффузора. Для измерения напряжений Рейнольдса использовались двухнитяные X-образные проволочные датчики 55P51 или 55P53.

Структура течения на выходе безотрывного диффузора

Были измерены скорость в центре выходного сечения диффузора и напряжения Рейнольдса в точке, расположенной между стенкой и осью на половине радиуса выходного сечения, в зависимости от Re в диапазоне $600 < Re < 3000$. Измерения показали, что при $Re > 1000$ течение на выходе диффузора турбулентное. При $Re > 1300$ скорость и турбулентные напряжения практически не зависят от степени турбулентности на входе в диффузор и определяются значением Re . Результаты измерений хорошо согласуются с расчетом с использованием трехпараметрической модели турбулентности. В соответствии с расчетом, если энергия турбулентности на входе превышает некоторое предельное значение, то развитие течения происходит так, что на некотором расстоянии от входа энергия турбулентности возрастает, достигает некоторого максимума, а затем уменьшается и стремится к величине, соответствующей значению Re на выходе. В этом случае параметры течения на выходе почти не зависят от начального значения энергии турбулентности. Если же это значение близко к предельному, то развитие процесса переходит в выход-

ную часть канала, либо турбулентность в диффузоре не развивается.

Зависимость скорости на выходе диффузора от Re очень хорошо согласуется с расчетной. При значениях $Re > 1300$ измеренная продольная скорость на оси не более чем на 3% отличается от полученной в расчетах при различных, отличающихся почти в два раза, входных значениях энергии турбулентности.

При уменьшении Re от 1100 до 900 относительная скорость в центре выходного сечения диффузора резко меняется примерно от 1.6 до 3. Течение становится ламинарным и при значениях $Re < 900$ не зависит от начальных входных возмущений.

При $Re = 2800$ рассчитанные профили скорости на выходе диффузора и для установившегося течения в трубе практически не различаются и соответствуют результатам измерений как для диффузора, так и для трубы (длиной 200 калибров). Измеренные на выходе диффузора и на выходе трубы значения напряжений Рейнольдса также соответствуют расчету. Напряжения Рейнольдса на выходе диффузора по абсолютной величине превышают соответствующие значения для установившегося течения в трубе.

Измерение и расчет распределения параметров в выходном сечении диффузора при $Re = 1900, 1600, 1300$, когда установившееся турбулентное течение в трубах не реализуется, дало качественно такие же результаты, как для $Re = 2800$.

Измеренный профиль скорости при $Re = 800$ хорошо совпадает с рассчитанным, который почти не зависит от величины турбулентной энергии на входе, хотя в диапазоне $900 < Re < 1100$ результаты расчета при разных входных условиях существенно различаются. Измеренные и рассчитанные значения напряжений Рейнольдса на выходе диффузора при $Re = 800$ практически нулевые, следовательно, течение на выходе из диффузора ламинарное.

Результаты исследования

Обнаружено сильное влияние расширения канала на режим течения. В отличие от трубы, где при значении $Re < 2000$, как установившееся, реализуется только ламинарное течение, на выходе исследуемого диффузора формируется развитое турбулентное течение при значениях Re , больших 1000. Формирование развитого турбулентного течения подтверждается результатами измерений напряжений Рейнольдса и

расчетами. При значениях $Re > 1300$ турбулентное течение можно считать установившимся, так как его параметры на выходе практически не зависят от условий на входе в диффузор, пока эти условия достаточны для формирования турбулентного течения.

Результаты проведенного исследования показали, что установка на входе в круглую трубу безотрывного диффузора создает достаточные условия для формирования в трубе турбулентного течения при $Re > 1000$. Вырождение турбулентности в длинной трубе при $Re < 2000$ не связано с условиями на входе в трубу.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 10-01-00392).

Список литературы

1. Павельев А.А., Решмин А.И. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2001. №4. С. 113–121.
2. Лущик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1978. №3. С. 13–25.
3. Павельев А.А. и др. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2003. №4. С. 47–55.
4. Павельев А.А., Решмин А.И., Трифонов В.В. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2006. №6. С. 68–76.

TURBULENT FLOW IN A CIRCULAR EXPANDING CHANNEL AT REYNOLDS NUMBERS SMALLER THAN 2000

V.V. Trifonov, A.I. Reshmin, S.Kh. Teplovodskii

The experimental and numerical investigation of flow are carried out in a circular conical diffuser with the generator slope of 0.3° and a length equal to 70 entry diameters within the framework of the analysis of the problem of existence and the value of the lower critical Reynolds number for flow in a circular tube. The measurements are carried out in an air flow for Reynolds numbers Re_2 in the diffuser exit section ranging from 600 to 3000. It is shown that, in contrast to a tube, where only laminar flow can be realized as steady for $Re < 2000$, a developed turbulent flow is formed for $Re_2 > 1000$ at the exit section of the diffuser. This flow is steady for $Re_2 > 1300$, that is, almost independent of the turbulence level at the entry, and is determined by Reynolds number Re_2 at the exit section. For $Re_2 \sim 1000$ the turbulent flow continuously goes over into a laminar flow. The flow parameters measured at the diffuser exit correspond to the calculations using the three-equation turbulence model.

Keywords: Reynolds number, turbulent flow, separationless diffuser, Reynolds stresses, experiment.