

4. *Ткаленко Р. А.* К линейной теории сверхзвуковых течений смеси газа и частиц.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1971, № 1, с. 109.
5. *Осипцов А. Н.* О структуре ламинарного пограничного слоя дисперсной смеси на плоской пластине.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, № 4, с. 48.
6. *Седов Л. И.* Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. 2-е изд. испр. и доп. М.: Наука, 1966. 448 с.
7. *Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В.* Теоретическая гидромеханика. Ч. 1. М.: Физматгиз, 1963. 583 с.
8. *Абрамовиц М. А., Липман Д., Мак Нииш А. и др.* Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 830 с.
9. *Лаврентьев М. А., Шабат Б. В.* Методы теории функций комплексного переменного. 4-е изд. испр. и доп. М.: Наука, 1973. 736 с.
10. *Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В.* Теоретическая гидромеханика. Ч. 2. М.: Физматгиз, 1963. 727 с.

Москва

Поступила в редакцию
29.V.1980

УДК 532.54

ТЕЧЕНИЕ ГАЗА В ПОВОРОТНОМ КАНАЛЕ

СЕНЦ В. А.

Сведения о гидравлических потерях при течении жидкости в поворотных каналах различной формы приведены в многочисленных руководствах [1-3]. Однако исследование структуры течения, его особенностей, формы изменения скоростных и температурных профилей в различных сечениях канала, изменения локальных тепловых потоков представляет собой новую задачу высокотемпературной газовой динамики.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований течения газа (воздуха) в криволинейном цилиндрическом канале. С помощью холодных продувок прозрачной модели получены картины пристеночных линий тока и зоны отрыва. При исследовании течения высокотемпературного газа с использованием в качестве источника тепловой энергии электродугового подогревателя измерены профили полного давления и температуры торможения в различных сечениях канала. Показано, что деформация профилей при течении горячего газа за поворотным каналом заканчивается быстрее, чем у холодного. Распределение тепловых потоков имеет существенную особенность. За поворотным каналом тепловой поток резко возрастает.

При движении газа в криволинейном цилиндрическом канале возникают специфические явления. В связи с тем что частицы газа движутся по криволинейным траекториям, давление на внешней (вогнутой) и внутренней (выпуклой) образующих стенок канала оказывается разным и различно меняется в направлении движения. Это приводит к возникновению вторичного течения, которое в середине трубы направлено к внешнему закруглению, т. е. наружу, а около стенок трубы — к внутреннему закруглению, т. е. к центру кривизны [1, 2].

Для лучшего понимания картины течения в элементах с поворотным каналом была проведена серия экспериментов с прозрачным каналом на холодном воздухе ($T=300$ К). Цилиндрические прямолинейные участки до и после поворота составляли длину $L=5d$ ($d=4$ см). На входе в модель для сглаживания возмущений устанавливался участок с профилем «лемниската».

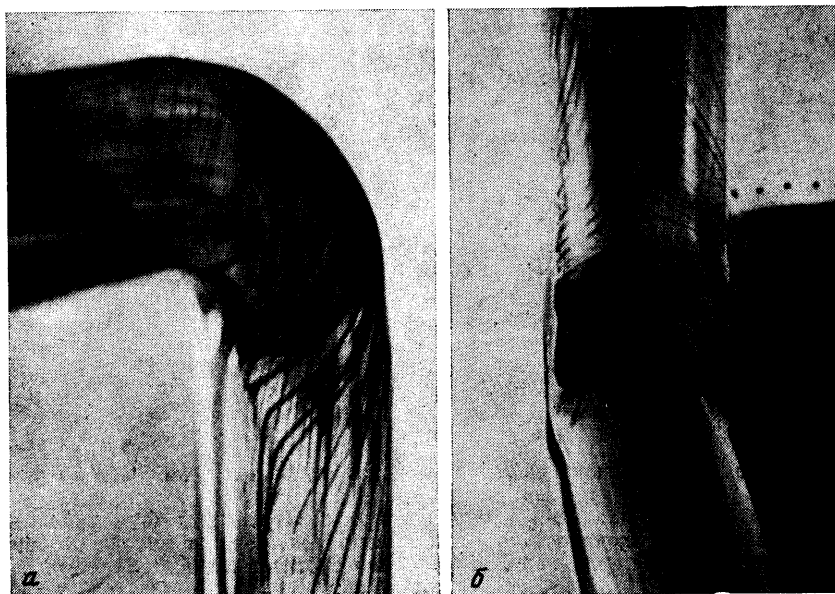
Эксперименты проводились в широком диапазоне расходов (100–250 г/с), что соответствовало числам Рейнольдса $Re=2 \cdot 10^5 + 5 \cdot 10^5$. Для визуализации пристеночных линий тока применялся специальный красящий состав (типографская краска + трансформаторное масло), который наносился с помощью кисти на кромку лемнискаты.

На фиг. 1 представлена картина пристеночных линий тока. Искривление линий тока начинается непосредственно в начале поворота. Большая часть линий тока, искривляясь по поверхности поворотного канала, сходится в зоне, где заканчивается поворот. Эта картина течения была постоянна в указанных пределах чисел Re . В зоне сгущения линий тока, на внутренней поверхности малого радиуса образуются два встречных вихря. Вращение вихрей вдоль образующей радиуса $R_1=1$ см направлено навстречу движению потока. За поворотным участком возникает вто-

ричное течение, которое около стенок трубы направлено к внутреннему закруглению, а в середине трубы — к внешнему. Угол наклона к оси линий тока вниз по потоку в выходном участке трубы уменьшается с увеличением расстояния от поворота. Таким образом, интенсивность вторичного течения уменьшается.

В зоне образующей радиуса $R_3=5$ см из-за криволинейной траектории движения частиц образуется зона повышенного давления.

Из фиг. 2 следует, что на контуре с радиусом R_1 зона вихрей начинается при $\theta=45^\circ$ и заканчивается при $\theta\sim 90^\circ$, где угол θ отсчитывается от начала поворота.



Фиг. 1

Поперечный размер вихревой зоны на внутренней поверхности приблизительно равен $\sim 15-20^\circ$.

Сложная трехмерная структура течения в поворотном канале приводит к тому, что течение в прямолинейном участке, установленном за поворотом, также является трехмерным. Экспериментальное определение вектора скорости в таком канале в связи с его малыми поперечными размерами требует специальной сложной методики измерений (необходимы малогабаритный трехтрубчатый насадок, координатник с тремя степенями свободы). В настоящей работе использовался упрощенный метод, состоящий в регистрации давления $p^{*'}$ обычным насадком, введенным в поток по нормали к поперечному сечению канала (перпендикулярному его центральной линии). Имеются сведения, что величина $p^{*'}$ близка к давлению торможения p^* . Например, при угле между насадком и направлением потока, меньшем 15° , величины p^* и $p^{*'}$ практически не отличаются друг от друга.

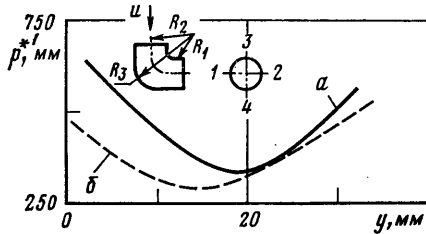
На фиг. 2 представлены зависимости измеряемой в мм водяного столба величины $\xi = p^{*'} - p_a$, где p_a — атмосферное давление, от расстояния y , отсчитываемого вдоль двух взаимно перпендикулярных диаметров в поперечном сечении канала. Один из этих диаметров (d_1) является линией симметрии течения в поперечном сечении канала. Вдоль этого диаметра вследствие действия центробежных сил происходит увеличение давления по направлению к образующей $R_3=5$ см (по направлению к точке 3). Вдоль другого диаметра (d_2) распределение газодинамических параметров характеризуется симметрией относительно его средней точки O .

Изменение ξ связано с изменением статического давления и скоростного напора. Вдоль диаметра d_2 изменение статического давления не велико и изменение ξ связано с изменением скорости газа. Таким образом, согласно фиг. 3, скорость газа в точках 1 и 2 выше, чем в точке O . Это связано с ускорением потока вблизи точек 1 и 2 вследствие развития вторичного течения.

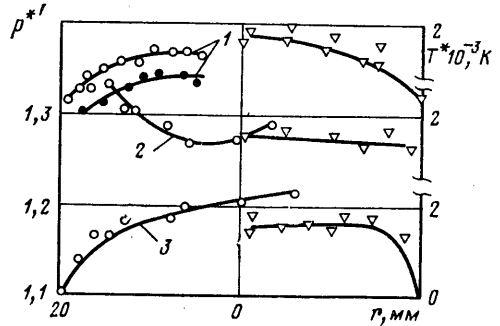
Величины ξ в точке 3, согласно фиг. 3, больше, чем в т. 4. Это можно объяснить ростом статического давления по направлению к т. 3.

Исследование высокотемпературного течения газа и теплообмена в модели поворотного канала проводилось на установке с электродуговым подогревателем газа. Эксперименты проводились при среднемассовой температуре торможения на входе в исследуемую модель $T^* \approx 1600-1500$ К.

За участком поворота устанавливался прямолинейный цилиндрический канал из четырех охлаждаемых секций длиной по 5 см каждой. Охлаждение поворотного канала и каждой секции было индивидуальным и могло регулироваться. Температура воды на выходе каждого участка регистрировалась на ЭПП-09, холодный спай термопар находился при температуре входа охлаждающей воды. Таким образом, во



Фиг. 2



Фиг. 3

время эксперимента фиксировался расход через отдельные участки и нагрев охлаждающего $\Delta t_{\text{в}}$.

Насадком полного давления измерялся профиль давления торможения в трех сечениях. Сечение 1 находилось на расстоянии 1.5 калибра от начала поворота, сечение 2 — на расстоянии 0.5 калибра после поворота и сечение 3 — на выходе из модели (фиг. 3).

Все эксперименты проводились при одинаковых расходах рабочего тела и охлаждающего через подогреватель и одной и той же электрической мощности на электрической дуге ($I=900-940$ а, $U=540-580$ в). Колебания параметров по расходу воздуха между двумя запусками составляли 2%, а по мощности $\sim 5\%$.

Основные параметры на входе в экспериментальную модель были следующие: $T^* \approx 1600$ К, $G \sim 123$ г/с, $Re = wd/\nu \approx 8,0 \cdot 10^4$, $M \approx 0,5$.

С помощью термопары охлаждаемого насадка полного давления и калориметрического зонда производились измерения T^* и p^* в сечениях 1, 2 и 3 исследуемой модели (фиг. 4) вдоль соответствующих диаметров d_2 (см. фиг. 2).

Каждый профиль можно считать симметричным и производить измерение только половины профиля. В одном запуске удавалось измерить только часть профиля T^* . В зоне температур выше 1500 К термопары часто выходят из строя. Для получения одной температурной зависимости приходилось проводить измерения в нескольких запусках. Разброс точек по температуре (см. фиг. 3) связан с отклонением параметров потока в различных экспериментах. Этот разброс невелик и находится в пределах колебания мощности электродугового подогревателя.

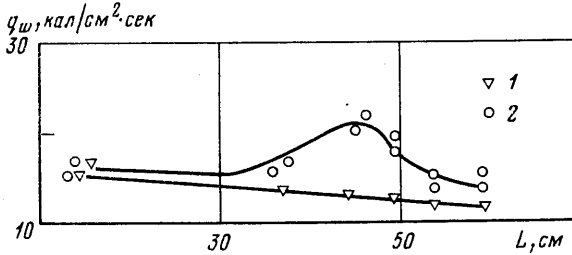
В сечении 1 перед входом в поворотный канал профили температуры и давления торможения имеют вид наполненных профилей, типичных для турбулентных течений в трубах [1]. В сечении 1 имеем $p^* = p^*$. Изменение p^* в сечении 2 (за поворотным каналом) с качественной стороны аналогично изменению p^* вдоль диаметра d_2 на фиг. 3. Особенностью течения в сечении 2 является уплощенный профиль температуры.

Существенно, что вид профиля p^* в сечении 3 в случае горячего газа отличается от аналогичного профиля в том же сечении, измеренного в холодном эксперименте (фиг. 2). Профиль p^* на фиг. 3 характеризуется максимумом на оси канала, что свидетельствует об установлении обычных газодинамических профилей в канале и отсутствии вторичных течений. Поэтому можно утверждать, что стабилизация высокотемпературного течения за поворотным каналом происходит значительно быстрее, чем в случае холодного газа.

Сопоставление локальных тепловых потоков производилось по двум экспериментальным моделям. Первая модель — модель с криволинейным участком и прямолинейным участком длиной $L=5d$ за поворотом, вторая модель отличалась от первой заменой поворотного канала на эквивалентный участок прямой трубы. За экви-

валент принималась длина средней линии. Эксперименты проводились при одинаковых условиях. За локальный тепловой поток принимался суммарный тепловой поток в каждую отдельную секцию.

Тепловые потоки в стенки канала с прямолинейной секцией, длина которой равна средней линии криволинейного канала, сильно отличаются от величин тепловых потоков при течении газа в канале с криволинейным участком. При одних и тех же режимах течения за поворотным участком наблюдается увеличение тепло-



Фиг. 4

вого потока в стенку q_w до 50% в I секцию с последующим снижением до 40% во II, 15 в III и 10 в IV.

Увеличение теплового потока в поворотном канале по сравнению с прямолинейным составляет ~15% и связано с сильной деформацией линий тока, которые, сгущаясь, направлены в место образования вихрей.

Зона отрыва пограничного слоя находится в конце криволинейного канала. Начало нарастания пограничного слоя приходится на участок I и II секций, где увеличение теплового потока максимально.

В результате проведенного исследования в поворотном канале течения воздуха установлены следующие особенности:

На внутренней поверхности поворотного канала образуется зона двух интенсивных встречных вихрей, положение которой инвариантно по отношению к числу Рейнольдса. На контуре с радиусом R_1 зона вихрей начинается при $\theta=45^\circ$ и заканчивается при $\theta=90^\circ$, где угол θ отсчитывается от начала поворота. Поперечный размер вихревой зоны на внутренней поверхности канала приблизительно равен 15–20°.

Вторичное течение для холодного газа сохраняется на всей длине цилиндрического участка ($x/d \approx 5$), установленного за поворотным каналом, причем в случае горячего газа ($T \approx 1600$ К) затухает значительно быстрее. На длине $x/d \approx 5$ вторичное течение в случае горячего газа не было зарегистрировано.

Обнаружено значительное увеличение локальных тепловых потоков на участке за поворотным каналом по сравнению с течением при отсутствии поворотного канала. Увеличение тепловых потоков обусловлено присоединением газодинамического потока за зоной образования вихрей.

Автор благодарит А. Б. Ватажина за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
2. Некрасов Б. Б. Гидравлика. М.: Воениздат, 1954.
3. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1960.
4. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
5. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1961.

Москва

Поступила в редакцию
15.1.1980