

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОЙ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ

Б. И. Заславский, Б. В. Юрьев

ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений, 141570 Менделеево

Исследуется течение в плоской вихревой камере, расстояние между торцевыми стенками которой меньше ее радиуса. Основные исследования проводились оптическими методами: использовался прибор Теплера, у которого нож Фуко был заменен диафрагмой. Показано, что течение в камере имеет сложную пространственную структуру. Помимо основного спирального течения, возникает интенсивное «поперечное» вращение типа вихрей Тейлора — Гёртлера. В отличие от исследованных ранее течений, где эти вихри наблюдались вблизи вогнутой поверхности, в рассматриваемом движении поперечные вихри присутствуют во всем рабочем объеме камеры. Показано, что в данном случае реализуется четыре параллельных вихревых «жгута». Высокая интенсивность вихрей позволила визуализировать их теплеровским методом и путем подкраски потока мелкодисперсными частицами. Получены количественные зависимости размеров вихревых ячеек от режима течения (от давления торможения газа).

Закономерности движения газа, тангенциально вдуваемого в плоскую камеру с центральным выходным отверстием, изучались экспериментально и теоретически [1–6]. В этих работах рассматривалось некоторое «усредненное» движение, которое предположительно можно представить (за пределами пограничных слоев и областей, примыкающих к входному и выходному каналам) как потенциальный вихрь с некоторой вихревой составляющей.

В данной работе приводятся результаты детального изучения указанных движений в камере, имеющей центральный и тангенциальный выходы. Показано, что рассматриваемые течения имеют сложную структуру, на основной вихрь накладываются поперечные вихри типа вихрей Тейлора — Гёртлера [3–5].

Для проведения исследований движения газа и твердых частиц создан стенд (рис. 1), в состав которого входят цилиндрическая вихревая камера 1 ($h^0 = h/R = 0,45$, где h — высота цилиндра, R — его радиус) с прозрачными торцевыми стенками, комплекс оптической аппаратуры 2–4, измерители акустических сигналов 5, осциллографы, анализаторы спектров 6, ПЭВМ, пневмосистема, осветительная система и система электрического

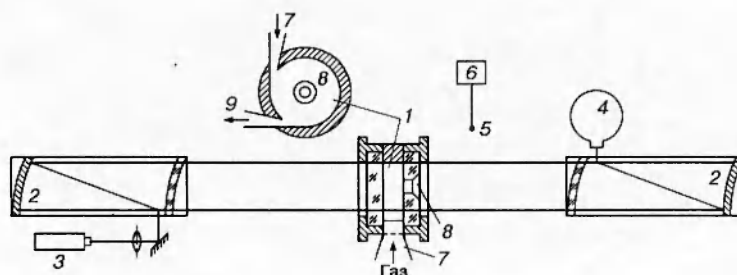


Рис. 1

питания. Проводились исследования течений в рабочих камерах с различными размерами ($R \leq 125$ мм), однако все камеры были геометрически подобны. В процессе работы установки в камеру через сужающееся сопло 7 с прямоугольным поперечным сечением ($S_B^0 = S_B/S_0 = 0,013$, где S_B — площадь входного сопла, $S_0 = \pi R^2$ — площадь поперечного сечения камеры) подается сжатый воздух по касательной к образующей внутренней цилиндрической поверхности, т. е. осуществляется тангенциальный ввод газа. В центре камеры в одной из ее торцевых стенок имеется круглое профилированное отверстие 8 ($S_C^0 = S_C/S_0 = 0,05$, где S_C — площадь центрального отверстия), соединяющее внутренний объем камеры с атмосферой. Помимо центрального отверстия камера имеет отводное сопло 9, сдвинутое относительно входного сопла на 90° вперед по потоку (рис. 1) и имеющее аналогичные входному соплу геометрию и способ соединения с камерой. Как показали опыты, расход газа через центральное сопло приблизительно в 2 раза меньше расхода через отводное сопло, которое играет также определенную роль в стабилизации потока и частично компенсирует возмущающее влияние входного сопла на течение в камере. Подвод к камере газа с заранее заданными и варьируемыми в процессе исследования параметрами обеспечивается пневмосистемой.

Оптическая система стенда включает в себя прибор Теплера ИАБ-451 2 и источники света 3 (мощный лазер ИЛГИ-101, искровой разрядник, ртутную лампу и лампу-вспышку). Лазер генерирует световые импульсы длительностью 40 нс с частотой 10 кГц, искровой разрядник и лампа-вспышка дают однократные импульсы длительностью 1,5 и 300 мкс соответственно. С помощью указанной оптической системы и лупы времени ЖЛВ-2 4 (до 8 млн кадр/с) развитие рассматриваемых движений визуализировалось и фиксировалось на киноплёнке в виде теплерограмм.

Для определения уровня акустических сигналов использовались датчики (конденсаторные микрофоны фирмы Briel & Kjer), усилители и аналоговые преобразователи этой же фирмы, а также пьезодатчики.

Производился частотный анализ сигналов, результаты которого и сами сигналы вводились в память ПЭВМ, куда вводились и показания остальных приборов, в частности измерителей статических и полных давлений в потоке.

При проведении ряда экспериментов нож Фуко у прибора ИАБ-451 был заменен круглой диафрагмой, что позволило визуализировать во всем осесимметричном потоке периодические структуры, связанные с большими градиентами плотности. Кадр теплерограммы потока в камере, полученный таким способом, приведен на рис. 2, б. Время экспонирования кадра 40 нс, источник света — лазер ИЛГИ-101. Концентрические светлые и темные кольца на снимке соответствуют концентрическим зонам резких градиентов плотности.

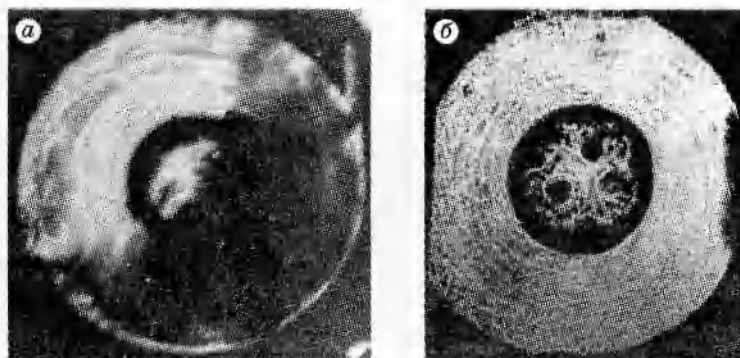


Рис. 2

На рис. 2, а представлен кадр теплорограммы потока, полученный в штатном режиме работы ИАБ-451 (с помощью ножа Фуко). Источником света здесь служила лампа-вспышка ИСШ-400 (линейный источник). При этом условия визуализации потока в узком секторе камеры с хордой, перпендикулярной кромке ножа Фуко, близки к условиям визуализации потока в секторе камеры при использовании круговой диафрагмы, что дает возможность выявить структуру течения в указанном секторе и при такой методике визуализации. Действительно, как видно из рис. 2, в основном имеет место совпадение картин течения. Меньшая контрастность рис. 2, а связана с существенно большим временем экспонирования кадра в этом случае.

Как показывают опыты, расстояние между темными и светлыми полосами δ не зависит от длины волны источника освещения, а определяется режимом течения в камере (например, зависит от P_0 — давления торможения газа в камере). Распределение плотности почернения на кадрах теплорограмм остается во времени постоянным. Выявленная таким образом структура распределения градиентов плотности может быть интерпретирована и как система инерционных волн с нулевой фазовой частотой (поскольку величины градиентов плотности практически стационарны), однако авторы считают, что данная структура связана с поперечными вихрями, накладывающимися на основное течение в камере.

Вихревая природа выявленных кольцевых зон подтверждается кинограммами движения мелких частиц в работающей камере. Введенные в камеру крупные частицы из текстолита, разбиваясь после удара о боковую поверхность, дают ряд мелких, но различных частиц (диаметром $0,2 \div 0,5$ мм), «подкрашивающих» объемы газа, связанного с этими частицами. Таким образом, появляется возможность проследить движение отдельных элементарных объемов газа.

На рис. 3 приведены примеры траекторий движения таких частиц, построенные по кинограммам (показана проекция на плоскость поперечного сечения камеры). Точки на линиях траекторий обозначают моменты экспонирования очередного кадра кинограммы. Временной интервал между кадрами 100 мкс. Наличие траекторий, похожих на циклоиды (проекция винтовой линии), указывает на существование поперечных вихрей во вращающемся потоке. Градиенты плотности, связанные с поперечным вращением газа, позволяют визуализировать поток (см. рис. 2) и определить положение этих вихрей.

Частоту вращения среды внутри поперечных вихрей можно приближенно определить с помощью временных меток на траекториях. В рассматриваемых опытах $f = 3 \div 5$ кГц (две циклоидные линии на рис. 3). Средняя линейная скорость перемещения частиц вдоль окружности радиусом $r \sim 60$ мм $v \sim 45 \div 240$ м/с, а вдоль окружности радиусом $r \sim 35 \div 40$ мм $v \sim 60 \div 180$ м/с.

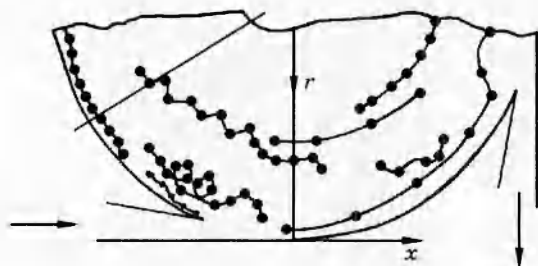


Рис. 3



Рис. 4

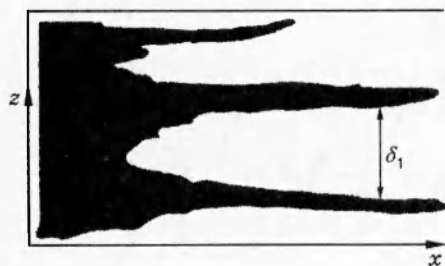


Рис. 5

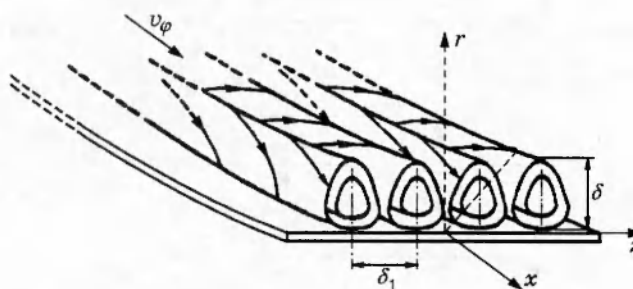


Рис. 6

Путем введения в поток мелкодисперсных частиц никотиновой смолы была определена тонкая структура потока в направлении, ортогональном к плоскости торцевых стенок (к плоскости колец, представленных на рис. 2), и в пограничном слое на торцевых поверхностях камеры (рис. 4). Из-за наличия поперечных вихрей в потоке частицы смолы налипают на боковую поверхность камеры неравномерно. Вдоль линий, отделяющих вихревые ячейки, оседание их на боковую поверхность камеры будет выше, чем в области, где «поперечная» скорость вихревого потока максимальна, что приводит к сдуванию частиц смолы.

Опыт показал, что в исследуемой камере таких ячеек четыре (две пары поперечных вихрей со встречным движением). Действительно, как видно из рис. 5, где представлена картина запыленности боковой поверхности камеры мелкодисперсными частицами смолы, имеются три четко различимые линии оседания частиц, что соответствует четырем ячейкам, расположенным между этими линиями и торцевыми поверхностями. Треки, прочерченные частицами смолы на торцевых поверхностях (рис. 4), представляют собой классические спирали Экмана. Пограничный слой здесь — слой Экмана.

Проанализируем полученные результаты. Поток в камеру поступает из прямолинейного прямоугольного канала. Скорость газа на срезе сопла $200 \div 300$ м/с ($Re \approx 3 \cdot 10^5$), т. е. имеет место турбулентный режим течения. Взаимодействуя с вогнутой боковой стенкой, поток тормозится. Скорость газа вблизи стенки становится меньше скорости вышележащих слоев. Вследствие действия центробежной силы более удаленные от стенки, но движущиеся с большей скоростью слои вытесняют нижние.

Возникающий отрицательный градиент давления ведет к появлению неустойчивости основного потока, сходной с неустойчивостью, наблюдаемой в жидкости между вращающимися концентрическими цилиндрами [4]. Это приводит, например, в случае поворота

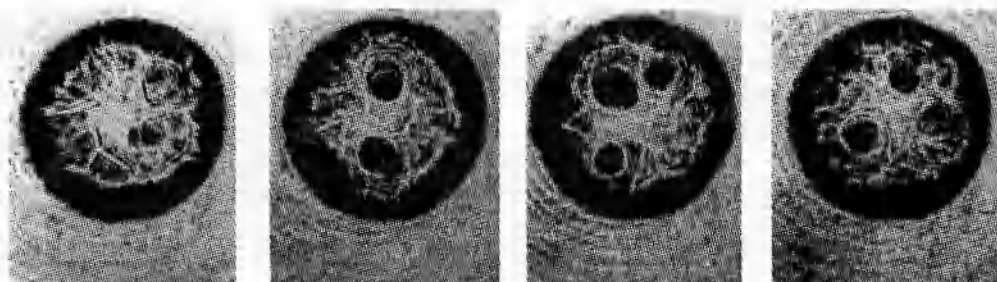


Рис. 7

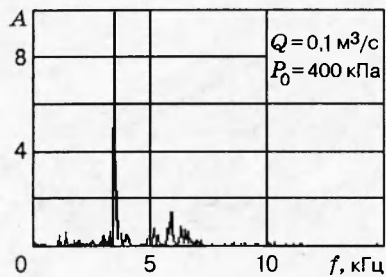


Рис. 8

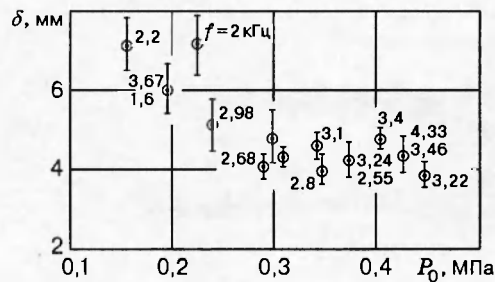


Рис. 9

потока в колене к возникновению в слое жидкости (газа), примыкающем к вогнутой стенке, «поперечных» вихрей (вихрей Гёртлера [3]). Вид этих вихрей показан на рис. 6 (взяты из [5]). В рассматриваемой же нами ситуации поперечные вихри, как видно из рис. 2, вследствие спиралевидности течения занимают все пространство камеры. При этом размер ячеек в направлении радиуса несколько меньше соответствующего размера сечения входного сопла.

На рис. 2 видна структура потока внутри центрального выходного отверстия, газ из рабочей камеры в атмосферу истекает через кольцевую зону; причем приосевая область является зоной отрицательного давления, куда непрерывно поступает незакрученный газ из внешней среды. Между центральной и кольцевой зонами циркулируют линейные вихри. В обычном стационарном режиме их три. При выходе на режим или смене режимов возникает от двух до пяти вихрей (рис. 7).

В заключение отметим некоторые особенности акустических сигналов, излучаемых камерой. Спектр этих сигналов может служить указателем наличия и относительной интенсивности аэродинамических процессов, развивающихся в исследуемом потоке.

На рис. 8 приведен пример спектра излучаемого сигнала. Он носит линейчатый характер. По составу частот спектр может быть разделен на четыре диапазона: $200 \div 700$ Гц, $1,6 \div 3,5$ кГц, $6 \div 12$ кГц, $25 \div 40$ кГц. Первый, по-видимому, связан с объемным резонированием камеры, второй — с автоколебаниями потока в выходном сопле ($\sim 2,5 \div 2,7$ кГц) и вращением среды в поперечных вихрях (~ 3 кГц), третий — с различными модами собственных колебаний газа в камере, четвертый — с вихрями, срывающимися со среза выходного сопла, — периодический характер возмущений в этой зоне течения (период ~ 30 мкс) выявляется с помощью теплереограмм.

Остановимся на акустических колебаниях в диапазоне ~ 3 кГц. Сопоставление фиксируемых в опытах частот этого диапазона с размерами вихревых ячеек δ приведено на рис. 9, где показана зависимость δ и значений соответствующих частот f от давления торможения P_0 газа, подаваемого в камеру. Видно, что при относительно низком давлении ($P_0 < 0,3$ МПа) оба параметра существенно зависят от P_0 (для δ зависимость близка к линейной). С ростом давления (при $P_0 > 0,3$ МПа) размер ячеек и значения соответствующих частот стабилизируются. При этом стабилизируется и структура течения в камере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштик М. А. Вихревые потоки. Новосибирск: Наука, 1981.
2. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1975.

3. **Görtler H.** Instabilität laminarer Grenzschichten an konkaven Wänden gegenüber gewissen dreidimensionalen Störungen // ZAMM. 1941. Bd 21, N 1. S. 250–252.
4. **Taylor G.** Stability of viscous liquid contained between two rotating cylinder // Proc. Roy. Soc. London. 1923. V. 223-A. P. 289. Рус. пер. в кн. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 2. М.: Гостехтеоретиздат, 1948. С. 548–555.
5. **Smith A. M. O.** On the growth of Taylor — Gortler vortices along highly concave walls // Quart. J. Appl. Math. 1955. V. 13, N 3. P. 233–262.
6. **Hamerlin G.** Über das Eigenwertproblem der dreidimensionalen Instabilität laminarer Grenzschichten an konkaven Wänden // J. Rational Mech. and Analysis. 1955. V. 4, N 2. P. 279–321.

*Поступила в редакцию 6/IX 1995 г.,
в окончательном варианте — 5/VI 1996 г.*
