

03;12

Формирование кольцевого вихря в импульсной струе, проникающей через фильтрующий слой

© В.П. Самсонов

Сургутский государственный университет
E-mail: svp@iff.surgu.ru*Поступило в Редакцию 27 февраля 2003 г.*

Предложен метод формирования ламинарного кольцевого вихря, исключая взаимодействие импульсной струи с кромками сопла. Предложен метод визуализации и измерения распределения скорости газа в струе внутри фильтрующего слоя. Получены критические условия формирования кольцевого вихря в виде зависимости механической мощности струи от толщины плоского фильтрующего слоя, образованного гранулированными частицами силикагеля. Показано, что механизм образования ламинарного кольцевого вихря обусловлен только ускорением, которое испытывает поток газа в струе.

Выяснение физического механизма образования кольцевых вихрей в импульсных течениях остается актуальной научной и технической задачей [1,2]. Гипотеза Прандтля об образовании вихревого кольца как результата взаимодействия потока с кромкой отверстия, из которого происходит импульсное выталкивание газа, в работе [3] подвергается сомнению. Автором [3] предлагается механизм, заключающийся в торможении и расширении лобовой части струи. В обоих случаях должен выполняться первый критерий Рэйли влияния точки перегиба на профиле скоростей [4]. Для доказательства того, что противоречия в указанных механизмах нет, необходим эксперимент, в котором роль краевых эффектов была бы минимальной. В работах [5,6] такие эксперименты выполнены при облучении плоской поверхности мишени из полиметил-метакрилата импульсным лазерным излучением. Кромки ограничивающих поверхностей в этом случае отсутствовали. Однако изменение скорости потока на границе струи продуктов пиролиза (теплого пятна на поверхности) было значительным. Авторами работ [5,6] обнаружены предельные значения энергии и времени воздействия лазерного излучения, определяющие образование вихревого кольца.

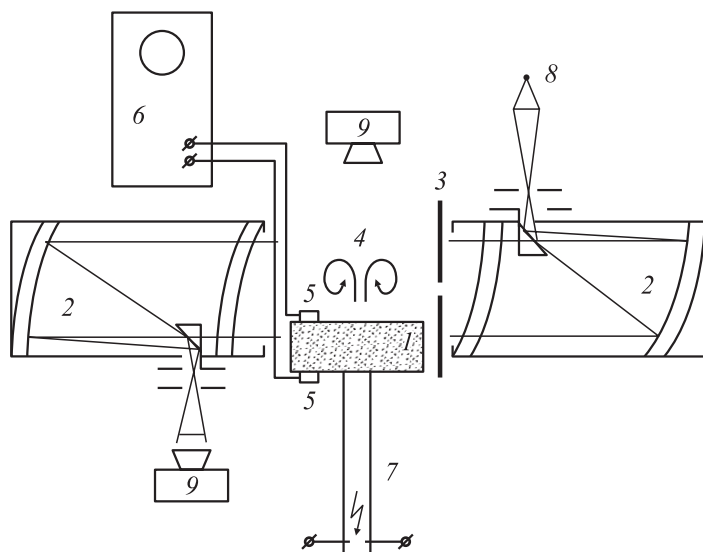


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — контейнер, содержащий фильтрующий слой; 2 — коллиматор теневого прибора ИАБ-451; 3 — щелевая диафрагма; 4 — кольцевой вихрь; 5 — пьезокерамические датчики давления; 6 — двухлучевой электронный осциллограф; 7 — полукрытая труба; 8 — ртутная лампа ДРШ-1; 9 — кинокамеры.

В настоящей работе предлагается метод исследования течения в импульсной струе, рассеянной на плоской, фильтрующей преграде. Как и в работах [5,6], метод исключает взаимодействие струи с кромками ограничивающих поверхностей. Изменение толщины фильтрующего слоя позволяет добиться уменьшения градиента скорости на границе струи и окружающего воздуха до нуля, так как вследствие рассеяния струи профиль скорости изменяется от параболического на входе в слой до гауссовского на выходе. Кроме того, метод позволяет с большой точностью измерять ускорения, которые поток испытывает при прохождении фильтрующего слоя.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Экспериментальная установка состояла из контейнера 1 в виде прямоугольного параллелепипеда, внутри которого размещали горизонтальный слой

гранулированных частиц силикагеля или стеклянных шариков. Диаметр частиц изменяли от $3 \cdot 10^{-3}$ до $15 \cdot 10^{-3}$ м, а толщину фильтрующего слоя от $2 \cdot 10^{-2}$ до 0,4 м. Основание параллелепипеда — квадрат размером $0,5 \times 0,5$ м. Боковые стенки высотой 0,45 м изготавливали из прозрачного плексиглаза. Основания параллелепипеда закрывали стальной сеткой. Толщина проволоки, из которой изготавливали сетку, равнялась $1 \cdot 10^{-3}$ м. Для визуализации профиля скорости внутри фильтрующего слоя использовали вставную измерительную кассету. Она представляла собой прямоугольный параллелепипед размерами $0,5 \times 0,45 \times 0,02$ м. Боковую стенку кассеты размером $0,5 \times 0,45$ м изготавливали из прозрачного плексигласа. Толщина стенки равнялась $1 \cdot 10^{-3}$ м. Кассету устанавливали в центре фильтрующего слоя и заполняли гранулами силикагеля. Входное поперечное сечение кассеты закрывали сеткой, а выходное оставляли открытым. Для того чтобы зафиксировать положение гранул после прохождения струи, опыты проводили при вертикальном положении фильтрующего слоя. Поскольку слой гранул в кассете оставался горизонтальным, то смещение гранул после прохождения струи сохранялось. Кассету заполняли двумя способами. В первом из них использовали гранулы силикагеля, окрашенные в разные цвета. Слои гранул одного цвета чередовали со слоями другого цвета. Во втором — параллельные слои гранул силикагеля чередовали параллельными слоями порошка окиси магния. Первый способ заполнения кассеты применяли для измерения распределений скорости в струе, обладающей большим импульсом, а второй — при малых скоростях газа в фильтрующем слое.

Перенос частиц окиси магния и смещение гранул в фильтрующем слое относительно первоначального положения определяется энергией (квадратом скорости) струи в рассматриваемой точке. Смещение границ между слоями гранул разного цвета или слоев частиц окиси магния после прохождения струи, наблюдаемое через прозрачные боковые стенки кассеты, позволяло визуализировать профиль скоростей газа в струе и измерить поперечные размеры струи и профиль скоростей внутри фильтрующего слоя. Вынос частиц окиси магния из фильтрующего слоя позволял визуализировать течение газа в кольцевом вихре.

Визуализацию течения в струе у верхней поверхности фильтрующего слоя производили методом светового ножа, создаваемого коллиматором 2 теневого прибора ИАБ-451 и диафрагмой 3 в виде плоской вертикальной щели. На рис. 1 детали оптической схемы показаны в виде

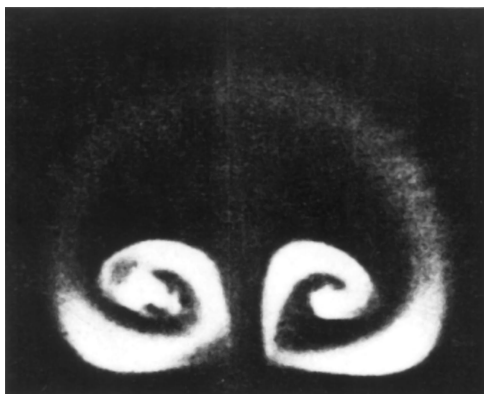


Рис. 2. Типичная фотография кольцевого вихря, формирующегося в импульсной струе продуктов горения после прохождения фильтрующего слоя.

сверху, а кольцевой вихрь 4 и фильтрующий слой — при наблюдении сбоку. Измерения времени прохождения фронта струи в фильтрующем слое производили с помощью двух пьезокерамических датчиков давления 5, располагавшихся на нижней и верхней поверхностях слоя. Сигналы с датчиков регистрировали в ждущем режиме двухлучевым электронным осциллографом 6.

В контакте с нижней поверхностью слоя находился открытый конец вертикально расположенной цилиндрической трубы 7, закрытой с другого конца. Внутренний диаметр трубы равнялся 0.05 м, а длина 1.00 м. Трубу заполняли пропановоздушной или пропанокислородной смесью, зажигаемой высоковольтной электрической искрой. Мощность выхлопа струи продуктов сгорания на входе в фильтрующий слой регулировали временем сгорания смеси путем перемещения координаты точки зажигания горючей смеси вдоль оси трубы. Время выхлопа измеряли по длительности сигнала с датчика давления, устанавливаемого внутри трубы у закрытого конца. Тепловую энергию, выделяемую при горении, вычисляли по теплотворной способности и объему горючей смеси. Горючие смеси готовили в газометре вытеснения с погрешностью объемной концентрации газа, не превышающей 0.1%.

На рис. 2 представлена типичная фотография ламинарного кольцевого вихря, образованного в струе над поверхностью фильтрующего

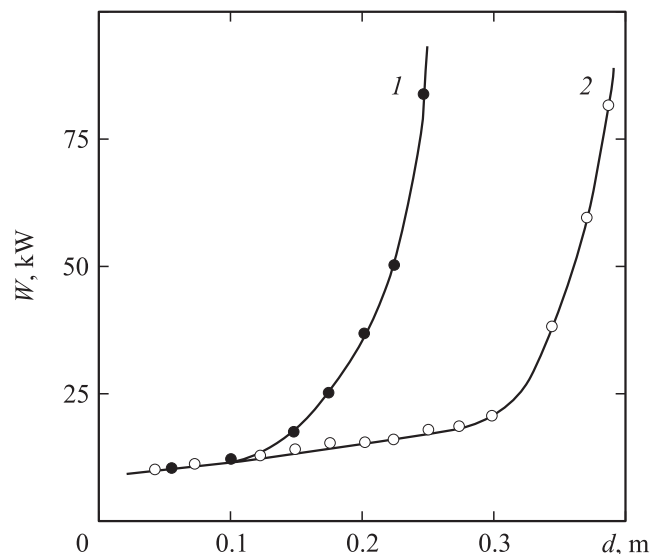


Рис. 3. Зависимость минимальной мощности выхлопа импульсной струи от толщины фильтрующего слоя: 1 и 2 — верхняя и нижняя границы области формирования ламинарного кольцевого вихря.

слоя. Ось вихревого кольца совпадает с направлением скорости на оси струи при выходе из слоя. Верхняя граница кольцевого вихря на фотографии соответствует лобовой части струи. Обнаружено, что образование вихревого кольца после прохождения пористого слоя происходит при любых толщине фильтрующего слоя и диаметре рассеянной струи на выходе из него и зависит только от начальной мощности выхлопа струи. Это подтверждается зависимостью минимальной мощности выхлопа струи от толщины слоя, определяющей условия формирования вихревого кольца и представленной на рис. 3. Графики, отмеченные цифрами 1 и 2, соответствуют верхней и нижней границам области формирования ламинарного кольцевого вихря. Превышение мощности выхлопа вызывает турбулизацию потока, а уменьшение ниже порога, указанного графиком 2, приводит к образованию ламинарного, струйного течения или затуханию струи внутри фильтрующего слоя. Увеличение минимальной энергии выхлопа струи

при постоянной толщине фильтрующего слоя приводит к уменьшению времени прохождения струи через фильтрующий слой. Этот результат согласуется с данными работы [5]. В условиях проведенных опытов время прохождения изменялось от 0.01 до 1 с. Ускорение, которое испытывала лобовая часть струи, оставалось примерно постоянным и равным $\approx 20 \text{ m/s}^2$. Полученный результат понятен, так как с точки зрения кинематики вихревое движение является единственной формой ламинарного ускоренного движения сплошной среды [4,7].

Список литературы

- [1] *Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.* Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973. 416 с.
- [2] *Козлов В.В., Грек Г.Р., Лефдаль Л.Л., Чернорай В.Г.* // Прикладная механика и техническая физика. 2002. Т. 43. № 2. С. 62–76.
- [3] *Петров П.А.* // Изв. АН СССР. МЖГ. 1973. № 2. С. 19–26.
- [4] *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.
- [5] *Аверсон А.Э., Алексеев М.В., Борисов В.П.* // Журнал прикладной механики и технической физики. 1984. № 5. С. 64–101.
- [6] *Алексеев М.В., Фатеев И.Г.* // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 5. С. 30–33.
- [7] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.