

01;03

Численное решение задачи о формировании течения в цилиндрической трубе при открытии кольцевой щели

© С.В. Булович, В.Э. Виколайнен, Р.Л. Петров

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: bulovich@ista-pneumatics.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2007 г.

Численно, в осесимметричной постановке в рамках интегрирования системы уравнений Навье–Стокса в приближении тонкого слоя исследована задача о формировании структуры потока в цилиндрической ударной трубе, оснащенной быстродействующим клапаном. Перемещение запорной арматуры клапана моделируется открытием кольцевой щели. Расчеты проиллюстрированы полями вектора скорости и линиями равного значения числа Маха потока в окрестности запорного элемента. Формирование фронта ударной волны анализируется при помощи точек мониторинга.

PACS: 47.40.Nm

Рассмотрим запуск типовой ударной трубы круглого сечения. В начальный момент времени диафрагма делит трубу на камеры высокого и низкого давления. При раскрытии диафрагмы в трубе возникает нестационарное течение.

Моделирование течения газа в рамках квазиодномерной газовой динамики было проведено в работе [1]. Развитие течения в ударной трубе в плоском случае в рамках численного интегрирования двумерных уравнений газовой динамики исследовано в работе [2]. В обоих вариантах раскрытие диафрагмы моделировалось в виде увеличивающегося размера осевого отверстия в диафрагме. При этом в [2] были установлены режимы, когда конечная (немгновенная) скорость открытия диафрагмы в определенные моменты времени приводила к формированию помимо ударной волны всяческого скачка уплотнения, который, в свою очередь,

влият на интенсивность и скорость распространения головной ударной волны.

В качестве другого способа быстрого соединения камер высокого и низкого давления может быть применен быстродействующий пневматический клапан [3]. Время его открытия сопоставимо со временем раскрытия диафрагмы. Использование пневматического быстродействующего клапана имеет преимущества при автоматизации управления экспериментом или при проведении большого количества экспериментов. К недостаткам следует отнести ограничения по максимальным давлениям в камере высокого давления ударной трубы.

Использование клапана, по сравнению с вариантом применения в качестве запорного узла разрушаемой диафрагмы, изменяет структуру потока в начальный период истечения. При использовании диафрагмы поток газа возникает на оси канала и при ее раскрытии постепенно занимает все сечение трубы. При открытии пневматического клапана возникает кольцевое течение в окрестности стенки трубы и, по мере открытия запорного элемента, поток газа распространяется на все сечение.

В настоящем исследовании смещение запорного элемента клапана моделируется кольцевой щелью, изменяющей свой размер по определенному закону. При полностью открытом запорном элементе форма канала, образованная корпусом запорного элемента и поверхностью колпака клапана, приводит к формированию радиально-осевого течения газа в трубе. Учет направленного движения потока в запорном узле может быть реализован заданием соответствующего угла наклона вектора скорости. В работе сделано упрощение: вектор скорости в кольцевой щели направлен вдоль оси симметрии трубы.

Рассмотрена ударная труба с камерой высокого давления бесконечного объема, т.е. диафрагма расположена на входе в трубу. Диаметр трубы равен 0.02 м. Область исследования составляла 50 диаметров (калибров). Начальное отношение давлений на диафрагме равно 6. Начальная температура газа в камерах трубы была принята равной 300 К. Температура стенки считалась постоянной и равной 300 К.

Решение о формировании течения газа в цилиндрической трубе, вызванное открытием кольцевой щели, получено численным интегрированием нестационарных уравнений Навье–Стокса в приближении тонкого слоя по схеме предиктор–корректор, имеющей второй порядок точности. Сетка для дискретизации расчетной области составляла

1001 × 41 ячейку. Для лучшего разрешения структуры потока было использовано сгущение узлов сетки в поперечном направлении к боковой стенке трубы и сгущение в продольном направлении к месту расположения щели. Шаг интегрирования по времени был выбран равным $2 \cdot 10^{-7}$ s.

Конечная скорость открытия кольцевой щели определяет масштаб времени задачи. Для рассматриваемой конструкции это время составляет 1 ms. Анализ силового воздействия на рабочие поверхности колпака клапана позволяет считать закон его движения равноускоренным, т.е. изменение внутреннего радиуса щели происходит с постоянным ускорением в пределах от 0.01 m до нуля за 1 ms.

Рассмотрим некоторые характеристики полученного решения. На рис. 1 приведены линии постоянного значения числа Маха и поля вектора скорости с интервалом в $250 \mu\text{s}$ для области, непосредственно примыкающей к кольцевой щели. Число Маха построено по осевой составляющей вектора скорости (с учетом знака) и скорости звука. Продольное направление — осевая координата, поперечное направление — радиальная координата.

Начальная стадия процесса характеризуется течением типа Коанда (Koanda) — прилипанием струи при движении газа вблизи стенки. Вдоль боковой стенки трубы формируется тонкая кольцевая струя, распространившаяся к рассматриваемому моменту времени на один калибр трубы. Распространение головных масс струи происходит нестационарно и сопровождается вихрем тороидальной формы, расположенным в окрестности ее головной части. Пониженное давление в центре вихря приводит к формированию радиального градиента давления, который вызывает отрыв струи от боковой поверхности трубы (рис. 1, *a*). В дальнейшем головная часть струи отклоняется в сторону оси трубы. В результате этого возникает локальное повышение давления на оси трубы, которое вызывает оттеснение вихря в застойную зону в окрестности щели.

К моменту времени 0.5 ms (рис. 1, *b*) перекрытая часть проходного сечения составляет свыше 45%. Струя, истекающая из кольцеобразного отверстия, приобретает характерную бочкообразную форму недорасширенной струи. Головная часть струи (вышедшая за пределы рисунка), после отрыва от боковой поверхности трубы и радиального натекания на ее ось (область 2-го калибра трубы), вновь изменяет направление распространения и после взаимодействия со стенкой трубы

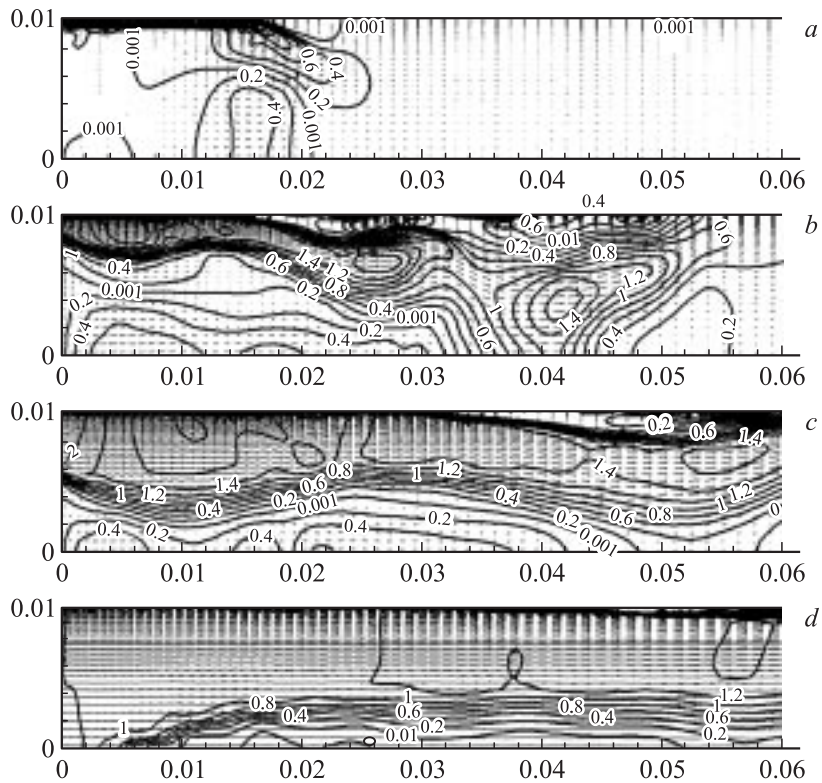


Рис. 1. Линии равного значения чисел Маха и поля вектора скорости в окрестности кольцевой щели.

распространяется вдоль ее поверхности (область 3-го калибра трубы). Между щелью и местом натекания струи на ось трубы располагается область рециркуляционного течения газа. Из-за устранения влияния тороидального вихря на точку отрыва струи расширяется участок струи, распространяющейся без отрыва от боковой поверхности трубы. Точка отрыва струи последовательно смещается вниз по потоку.

В следующий рассмотренный момент времени перекрыто около 20% сечения трубы. В трубе реализуется развитое струйное течение, которое попеременно взаимодействует с осью трубы и ее боковой стенкой (рис. 1, *c*).

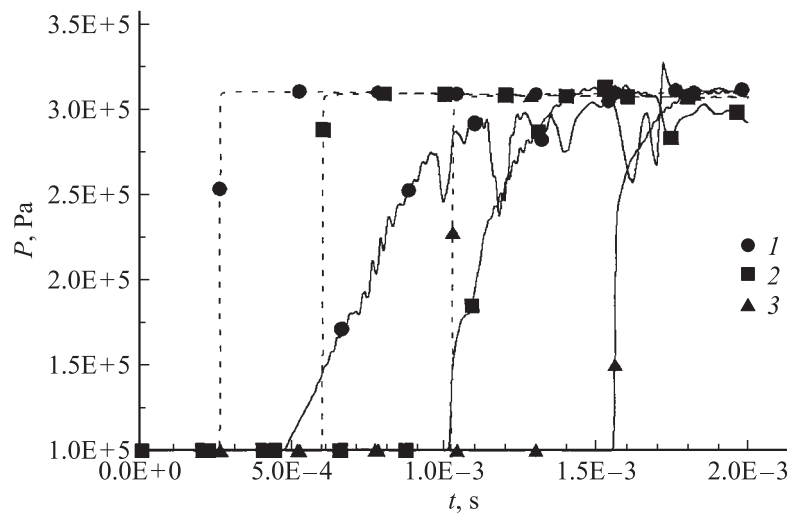


Рис. 2. Зависимость давления от времени в точках мониторинга (1 — 12.5, 2 — 25, 3 — 37.5).

Заключительная стадия рассматриваемого процесса соответствует полностью открытому сечению трубы (рис. 1, *d*). В рассматриваемом случае кольцевого открытия сечения у оси трубы располагается достаточно „толстый“ слой смешения, который был сформирован при струйном истечении. С учетом этого эквивалентное проходное сечение трубы меньше реального геометрического сечения, что приводит к снижению расхода толкающего газа. В последующие моменты времени происходят разгон и проталкивание приосевой „пробки“. Осевые градиенты давления невысоки; следовательно, разгон масс газа основан на механизме взаимодействия при помощи сил вязкости.

О положении головной волны сжатия и постепенной ее трансформации в ударную волну в результате изменения перепада давлений на фронте волны можно судить по иллюстрациям на рис. 2. Здесь представлены зависимости давления на стенке трубы от времени для трех положений точек мониторинга, выраженных в диаметрах трубы. Для лучшей демонстрации влияния конечной скорости открытия диафрагмы на формирование ударной волны при одних и тех же начальных и граничных условиях на рис. 2 приведены штрихпунктирные кривые, ко-

торые иллюстрируют случай мгновенного открытия; сплошные кривые отражают конечную скорость открытия диафрагмы.

Для рассмотренного варианта скорости открытия кольцевой щели полное формирование ударной волны (интенсивность ударной волны соответствует случаю мгновенного открытия диафрагмы) в трубе заканчивается к третьей миллисекунде. При этом ударная волна находится на расстоянии 40–50 калибров. При сопоставлении со случаем мгновенного открытия диафрагмы задержка, связанная с открытием запорного элемента, проявляется на стадии формирования ударной волны в ее более низкой интенсивности, а на стадии распространения по трубе в отставании по положению ударной волны.

Список литературы

- [1] *Донцова Ж.С., Еришов И.В., Киреев В.Т., Рузавин Е.И.* // Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. № 2. С. 120–128.
- [2] *Васильев Е.И., Данильчук Е.В.* // Изв. АН СССР. МЖГ. 1994. № 2. С. 147–154.
- [3] *Исаков С.Н., Пакин П.А., Смирнов Г.В.* Пусковой клапан для ударных труб. А. с. 496405 // БИ. 1975. № 47.