

03

Пневматический разгон поршня в стволе

© С.В. Булович, Р.Л. Петров

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

Поступило в Редакцию 25 марта 2005 г.

Исследован режим пневматического разгона поршня в стволе до трансзвуковых скоростей движения. Результаты получены в рамках численного интегрирования по схеме со вторым порядком точности по времени и по пространству системы нестационарных уравнений узкого канала. Установлены количественные оценки влияния волновых процессов, трения, теплообмена и давления в стволе перед поршнем на скорость движения поршня. Рассмотрены аспекты формирования нестационарного турбулентного пограничного слоя за поршнем на стенке ствола.

Разгон тел под действием сил избыточного давления имеет множество практических приложений. В силу ряда причин использование для создания высокого давления взрывчатых веществ не всегда приемлемо. Альтернативой служит пневматическая баллистическая установка. Она состоит из камеры высокого давления (ресивера), запорной арматуры (диафрагмы или быстрооткрывающегося клапана) и ствола. Выбор параметров системы продиктован требуемой скоростью разгона U тела массой M , имеющего диаметр D . Для обеспечения требуемой скорости выбирается длина L ствола, объем камеры высокого давления V , состав газа, начальный уровень давления P^0 и температуры T^0 в ресивере. Это хорошо известная постановка для внутренней задачи (задачи Лагранжа [1]).

Простейший способ расчета движения тела в стволе — квазистационарный подход, не учитывающий волновых явлений. При скоростях тела, соизмеримых со скоростью звука, волновые явления необходимо учитывать. Желательно учитывать влияние трения и теплообмена на скорость модели.

В работе [2] приведены характеристики трения и теплообмена газа в стволе орудия при подрыве порохового заряда, но нет данных о

скорости модели. Решение задачи получено в рамках приближения узкого канала, записанного в неконсервативной форме. Применение выбранной математической модели течения газа оправдано для протяженных каналов. В настоящей работе обеспечена полная консервативность рассматриваемой системы уравнений и существенно упрощен алгоритм получения решения. Решение о течении газа и движении поршня в стволе получено для пневматической баллистической установки.

Турбулентный режим течения газа в стволе моделировали в рамках двухслойной алгебраической модели турбулентности. Для описания характеристик потока во внутренней области пограничного слоя была применена первая гипотеза Прандтля с демпфирующим множителем Ван-Дриста в окрестности стенки. Для описания течения газа во внешней области пограничного слоя была использована модель Клаузера типа следа, а область перемежаемости на внешней границе пограничного слоя описывалась при помощи функции Клебанова. Детали модели турбулентности и опыт ее использования изложены в [3].

Текущее состояние газодинамических переменных в ресивере описывалось в рамках квазистационарной модели. Расход газа из камеры высокого давления в ствол определяли в соответствии с теорией характеристик по значениям газодинамических функций в ресивере и на входном срезе ствола.

Силовое воздействие газа на поршень определяли как разность давлений на его торцевых поверхностях. Давление за поршнем было получено в результате решения задачи о течении газа в стволе. Давление в стволе перед поршнем рассчитывали как давление газа в простой волне сжатия [4].

Численное интегрирование разностных уравнений выполнено в рамках схемы предиктор-корректор со вторым порядком точности по времени и по пространству [5]. Для дискретизации задачи была использована подвижная сетка, отслеживающая положение поршня в стволе. В процессе решения задачи в продольном направлении сетка оставалась равномерной. В радиальном направлении была использована неравномерная сетка для адекватного разрешения структуры нестационарного турбулентного пограничного слоя.

Расчеты были приведены для следующих значений параметров задачи: масса поршня $M = 0.2$ kg, диаметр ствола $D = 0.04$ m, объем

камеры высокого давления $V = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м, начальное давление газа в ресивере $P^0 = 7.0$ МПа, температура $T^0 = 300.0$ К. Температура стенки ствола постоянна и равна начальной температуре. В качестве рабочего тела был выбран воздух. Расчет выполнен на сетке размером 100×90 .

Результаты расчета проиллюстрированы графиками. Зависимости от времени скорости поршня и расхода газа из ресивера представлены на рис. 1, *a*. Для сравнения на рис. 1, *a* пунктиром приведена зависимость скорости поршня от времени для варианта квазистационарного разгона поршня без учета кинетической энергии газа. На приведенных кривых цифрами отмечены точки, отражающие перемещение поршня в метрах в стволе. Зависимости средней по сечению скорости, температуры и давления газа от продольной координаты представлены на рис. 1, *b–d* (нумерация кривых соответствует моментам времени, кратным 2 мс; давление и температура отнесены к значениям начального состояния газа в стволе).

Отметим наличие двух областей, где происходит разной интенсивности расширение газа. Область высокой интенсивности непосредственно примыкает к разгоняемому телу. Здесь из-за ускоренного движения поршня в стволе происходит генерация волн разрежения. Взаимодействие волн разрежения газа приводит к тому, что в стволе формируется продольный градиент давления, снижающий эффективность воздействия располагаемого в данный момент времени давления в ресивере на поршень. Наличие продольного градиента давления приводит к увеличению скорости движения газа вдоль ствола, что и иллюстрирует график скорости. Область менее интенсивного расширения газа — камера высокого давления, где давление и температура понижаются из-за поступления массы газа из ресивера в ствол. Последующее расширение газа непосредственно в стволе приводит к тому, что расход газа из камеры высокого давления может иметь максимум, как в рассматриваемом случае, несмотря на возрастающую скорость движения поршня. Еще одним фактором, влияющим на пропускную способность канала, является формирующийся на стенках канала пограничный слой.

В длинном стволе успевают сформироваться температурный и динамический пограничные слои на стенке ствола. При этом пограничные слои газа остаются нестационарными как из-за изменения линейного

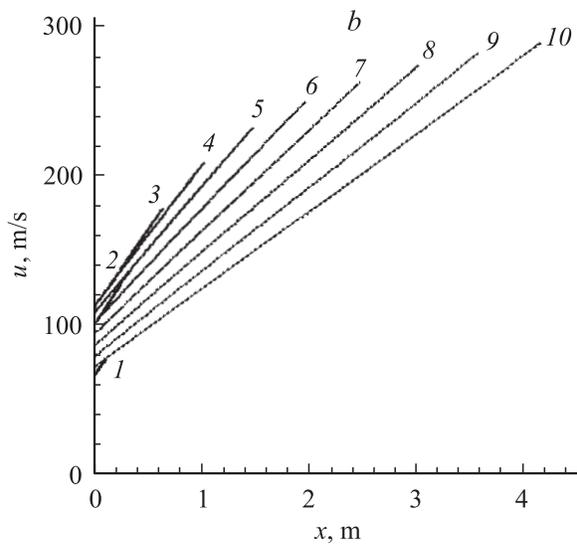
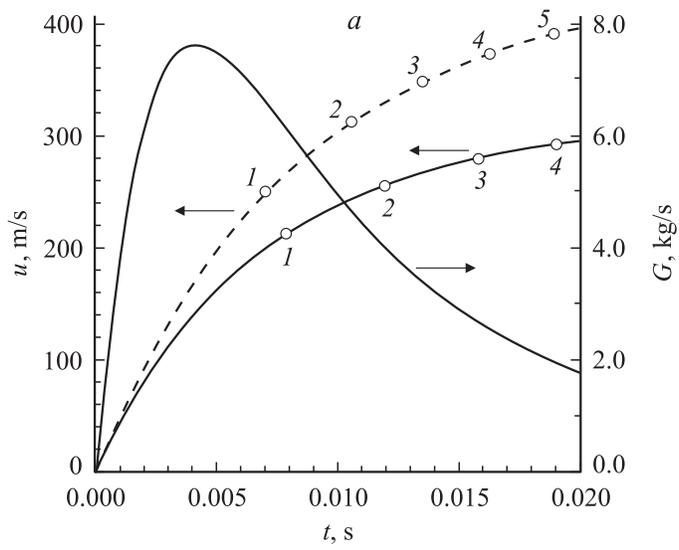


Рис. 1.

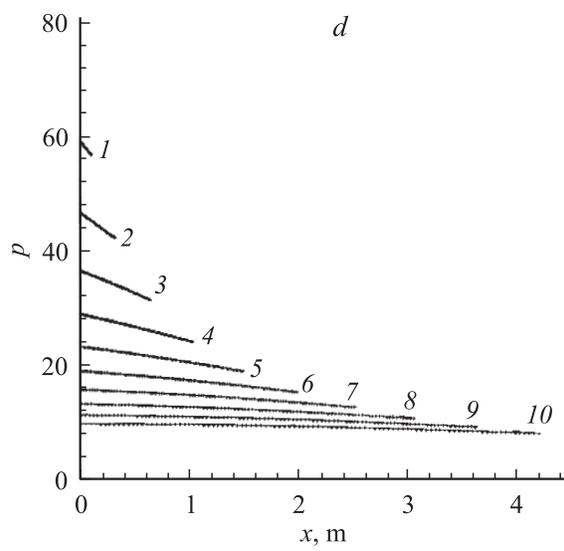
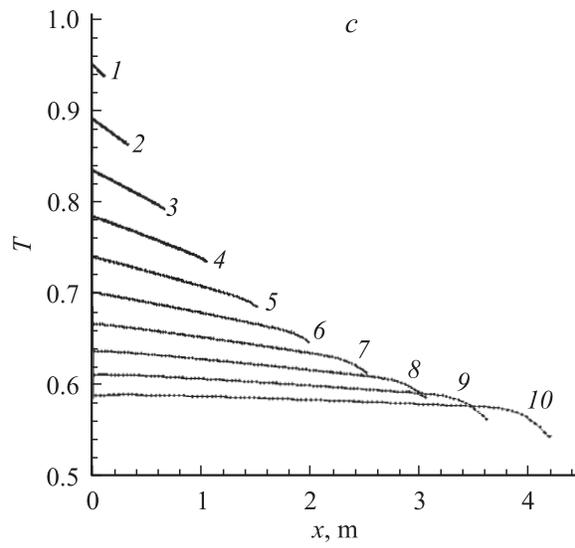


Рис. 1 (продолжение).

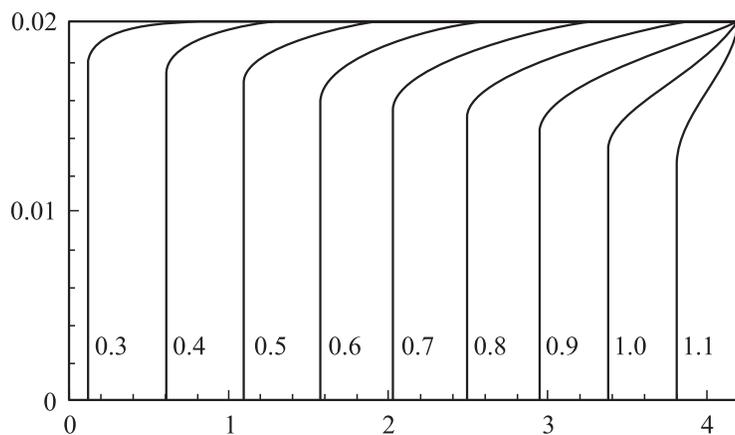


Рис. 2.

масштаба задачи, связанного с перемещением поршня по стволу, так и вследствие изменения газодинамических функций на внешней границе пограничного слоя. Наличие развитого пограничного слоя снижает пропускную способность ствола. Для выбранных параметров задачи из-за пограничного слоя в ядре потока формируется трансзвуковое течение с переходом через звуковую линию. При этом течение газа в стволе обретает свойства, характерные для течения газа в сопле Лавала. Существенное отличие заключается в том, что линия с числом $M = 1$ смещается вниз по течению вслед за поршнем. Структура течения газа в стволе в виде линий постоянного значения числа Маха к моменту времени, соответствующему 20-й μs от начала разгона поршня, приведена на рис. 2 (поперечное направление — радиальная координата).

Результаты расчета выявляют следующую особенность течения газа в стволе. Скорость модели незначительно превышает скорость звука. Влияние волновых свойств, а также трения и теплообмена на скорость тела проявляется в том, что она уменьшается. Например, для трехметрового ствола отклонение составляет 20%, и это воздействие будет нарастать по мере увеличения скорости движения тела.

Список литературы

- [1] *Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И.* и др. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М.: Наука, 1974. 344 с.
- [2] *Бубенчиков А.М., Комаровский А.В., Харламов С.Н.* Математические модели течения и теплообмена во внутренних задачах динамики вязкого газа. Томск: Том. гос. ун-т, 1993. 182 с.
- [3] *Латин Ю.В., Стрелец М.Х.* Внутренние течения газовых смесей. М.: Наука, 1989. 366 с.
- [4] *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. 6-е изд. М.: Наука, 1987. 847 с.
- [5] *Булович С.В.* // Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий: Материалы науч.-практ. конф. и школы-семинара. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2004. С. 188–207.