

03;12

## Эффект изобарического перетекания в установке импульсного сжатия газов

© В.М. Шмелев, Д.Б. Волов, В.С. Илюхин, В.М. Николаев,  
С.М. Петухов

Институт химической физики РАН, Москва

E-mail: shmelev@chph.ras.ru

Самарская государственная академия путей сообщения

E-mail: volovdm@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 января 2006 г.

Рассматривается реализация способа изобарического перетекания газа из ствола в камеру баллистической установки двухстадийного сжатия. Экспериментально обнаружен эффект изобарического перетекания газа. Получено, что данный способ позволяет снизить давление в конечной стадии сжатия при неизменной энергии, вкладываемой в ту же массу рабочего газа. При сохранении предельного давления газа на прежнем уровне, определяемом, например, прочностью установки, можно вкладывать большую энергию в сжимаемый газ. Данный способ сжатия позволяет существенно снизить уровень предельного давления при прочих равных условиях и может быть применен в двигателях внутреннего сгорания с разделенным цилиндром.

PACS: 51.10.+y

Импульсные поршневые установки изоэнтропического сжатия, используемые в научном эксперименте, не обеспечивают нагрева газа до температуры свыше 2000 К даже при его сжатии до давления  $\sim 1000$  atm [1]. В связи с необходимостью достижения более высоких температур возникли различные модификации методов сжатия газов в поршневых устройствах, позволяющие существенно увеличить энерговыход в единицу массы рабочего газа при сохранении предельного давления сжатия.

Одним из перспективных является метод многокаскадного сжатия [2], в котором в первом каскаде сжатия для получения плотно-го высокотемпературного газа применяется изоэнтропическое сжатие „тяжелым“ поршнем, а для дальнейшего увеличения температуры используется неизоэнтропический перепуск газа из емкости в ем-

кость в последующих каскадах. Еще большая эффективность сжатия (до температуры  $\sim 10\,000\text{ К}$ ) достигнута при сжатии газа в двух последовательных стадиях двумя свободными поршнями (основным и перфорированным) [3].

Эффективность сжатия газа при его перетекании из каскада в каскад можно существенно повысить, если поддерживать давление перетекания на постоянном уровне [2]. С этой целью предлагалось регулировать площадь сечения отверстия в перегородке между каскадами с помощью различных клапанов. Однако этот способ технически сложен.

В данной работе исследовался процесс нагрева газа в поршневой баллистической установке двухстадийного сжатия с двумя камерами, разделенными перегородкой с отверстием [4]. Поршень имел возможность перемещаться в основной камере (стволе) большего объема, а отверстие в перегородке закрывалось разрывной диафрагмой. Предложено регулировать площадь сечения отверстия в процессе перетекания газа после раскрытия диафрагмы специально спрофилированным наконечником, закрепляемым на поршне. При подходе поршня к перегородке после разрыва диафрагмы наконечник входит в отверстие, изменяя площадь его проходного сечения. Продолжая двигаться в том же направлении, поршень „выдавливает“ газ через отверстие. Наконечник переменного сечения спрофилирован так, чтобы при своем движении обеспечить перетекание газа при постоянном давлении в стволе (изобарическое перетекание).

Получим формулу, определяющую профиль наконечника, который обеспечивал бы изобарическое перетекание, рассмотрев конечную стадию сжатия рабочего газа перед перегородкой с отверстием. При подходе поршня к перегородке давление толкающего газа уже много меньше давления сжимаемого газа, а трением и тепловыми потерями на конечном коротком участке пути можно пренебречь. Поршень массой  $m_p$  обладает энергией  $m_p v_0^2/2$ , где скорость поршня в момент раскрытия диафрагмы  $v_0$  определяется эффективностью передачи энергии толкающего газа рабочему газу. Мы предполагаем, что при движении поршня на этой стадии давление рабочего газа должно быть постоянным  $p_2 = \text{const}$ . С учетом указанных замечаний уравнение движения имеет вид

$$p_2 \sigma = -m_p a, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — площадь сечения ствола,  $a$  — ускорение.

Потребуем, чтобы перепад давления через отверстие при перетекании был сверхкритическим. Тогда температура сжимаемого газа, а следовательно, и его плотность постоянны, что приводит к постоянной скорости истечения через отверстие. Из уравнения неразрывности с учетом (1) следует, что площадь критического сечения должна изменяться как

$$S_0 - S(t) = \frac{\sigma}{k\sqrt{\gamma RT_2}} \left( v_0 - \frac{p_2\sigma}{m_p} t \right), \quad k = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}},$$

где  $S_0$  — площадь отверстия в момент раскрытия диафрагмы,  $S(t)$  — площадь сечения наконечника,  $R$  — газовая постоянная,  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $T_2$  — температура при изобарическом перетекании,  $t$  — время.

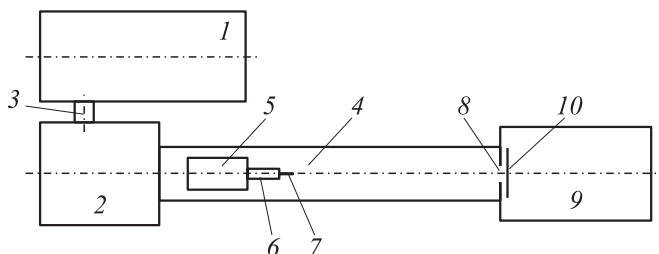
В соответствии с (1) движение поршня с наконечником равнозамедленное:  $x(t) = v_0 t - at^2/2$ , и окончательно для диаметра осесимметричного наконечника получаем:

$$d(x) = 2\sqrt{\frac{S(x)}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{1}{\pi} \left( S_0 - \frac{\sigma}{k\sqrt{\gamma RT_2}} \sqrt{v_0^2 - \frac{2p_2\sigma}{m_p} x} \right)}, \quad (2)$$

где  $x$  — координата сечения наконечника, отсчитываемая от его носика. Здесь учтено, что в начальный момент времени (раскрытия диафрагмы) площадь проходного сечения равна  $S_0$  ( $d(0) = 0$ ).

Задаваясь длиной наконечника  $L_k$  и начальным давлением рабочего газа в стволе, по уравнению адиабаты определяем давление  $p_2$  и температуру  $T_2$  изобарического перетекания, а также критическую скорость истечения газа через отверстие. Из закона равнозамедленного движения следует, что скорость поршня в момент раскрытия диафрагмы  $v_0 = \sqrt{2p_2\sigma L_k/m_p}$ , а из уравнения неразрывности определяется начальная площадь отверстия  $S_0 = v_0\sigma/k\sqrt{\gamma RT_2}$ . Давление толкающего газа должно быть выбрано так, чтобы обеспечить движение поршня со скоростью  $v_0$ .

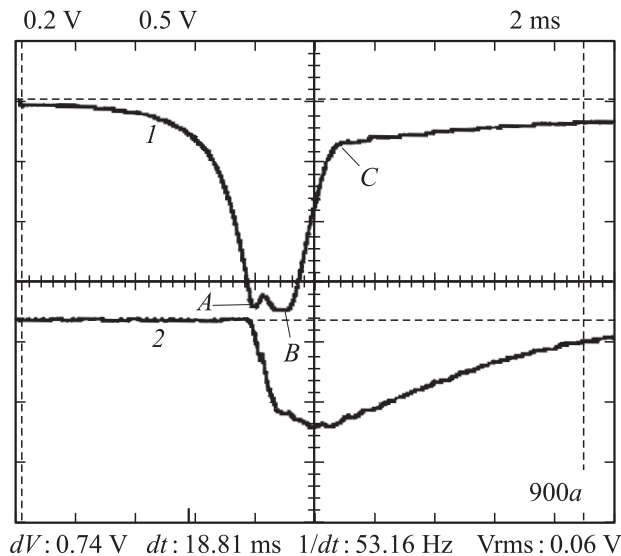
Расчет профиля наконечника по формуле (2) показывает, что он имеет вытянутую  $S$ -образную форму, в первом приближении схожую с профилем усеченного конуса. В эксперименте использовались более технологичные в изготовлении наконечники в виде простых усеченных конусов.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки.

Экспериментальная установка (рис. 1) содержала баллон 1 с толкающим газом и камеру толкающего газа 2, соединенные через электромагнитный клапан 3, основную камеру (ствол) 4, поршень 5 с жестко закрепленным наконечником 6 и рассекателем диафрагмы 7, перегородку с отверстием 8 и дополнительную камеру 9. Объем ствола 4 изолировался от объема камеры 9 разрывной диафрагмой 10. Ствол 4 и камера 9 заполнялись рабочим газом (воздухом) до заданного давления, а поршень 5 с наконечником 6 и рассекателем 7 фиксировался в крайнем левом положении. В баллон 1 накачивался толкающий газ до нужного давления. Объем баллона с толкающим газом —  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ , рабочая длина ствола установки — 0.93 м, дополнительной камеры — 0.09 м (диаметр — 0.04 м), внутренний диаметр ствола — 0.057 м, диаметр отверстия — 0.0114 м, общая длина наконечника с рассекателем — 0.038 м (наконечник выполнен в виде усеченного конуса длиной 0.016 м на ножке 0.007 м, диаметр конуса — от 0.0102 м до 0.003 м). Давление в стволе и в камере регистрировалось пьезодатчиками быстропеременного давления Лх-610, чувствительность датчика в стволе —  $17.0 \cdot 10^5 \text{ Pa/V}$ , в дополнительной камере —  $14.6 \cdot 10^5 \text{ Pa/V}$ . Сигнал от датчиков на компьютер выводился через плату сбора данных PCS64i (частота дискретизации 64 MHz).

Процесс начинался с открытия электромагнитного клапана 3, заполнения толкающим газом камеры 2 и освобождения „тяжелого“ поршня 5 ( $m_p = 1.1 \text{ kg}$ ), который разгонялся толкающим газом до скорости, меньшей скорости звука в обоих газах. При этом до разрыва диафрагмы 10 поршень сжимал рабочий газ в стволе 4 почти изэнтропически, так как теплообмен со стенками ствола за время



**Рис. 2.** Давление в стволе (1) и в камере рабочего газа (2) установки.

выстрела невелик, а волновыми явлениями можно пренебречь. При подходе поршня к перегородке 8 рассекатель 7 разрывал диафрагму 10, после чего начиналось истечение рабочего газа в камеру 9. Поршень, замедляясь, двигался далее, дожимая газ. Наконечник 6, находящийся на поршне, проходил через отверстие 8 и тем самым осуществлялось регулирование его проходного сечения.

В данной работе в ходе экспериментов удалось получить изобарическое перетекание рабочего газа из ствола в камеру (участок *AB*, рис. 2). Это наивыгоднейший с точки зрения вклада энергии режим перетекания. Начальные параметры и геометрия узлов установки подобраны таким образом, чтобы поршень, рассекая диафрагму, „выдавливал“ газ при практически постоянном давлении. К перегородке поршень подходил в тот момент, когда вся масса рабочего газа уже перетекла в камеру. Данный результат, иллюстрируемый на осциллограмме давления на рис. 2, был получен при начальном давлении рабочего газа (воздуха) в стволе и в камере —  $0.2 \cdot 10^5$  Па, давлении толкающего газа  $10 \cdot 10^5$  Па. Как видно из рис. 2, заметное возрастание давления наблюдалось

лишь на заключительной стадии сжатия, когда поршень подходил к перегородке. Момент разрыва рассекателем диафрагмы определялся по началу возрастания давления в дополнительной камере. Наконечник, движущийся через отверстие, регулировал давление в стволе и поддерживал его на почти постоянном уровне. Незначительные отклонения от изобарического перетекания связаны с использованием наконечника упрощенной формы, отличной от определяемой по формуле (2). К тому моменту, когда поршень доходил до перегородки, весь рабочий газ перетекал в дополнительную камеру, давление в ней достигало максимума. Таким образом, за счет кинетической энергии поршня совершалась работа изобарического перетекания:  $m_p v_0^2 / 2 = p_2 \Delta V_2 = p_2 \sigma L_k$ , где  $\Delta V_2$  — изменение объема газа в стволе при его перетекании. Далее начинался отскок поршня и обратное перетекание газа при пониженном давлении. Когда давление в стволе и в камере сравнивается, на графике давления в стволе появляется характерный излом (точка С, рис. 2).

Следовательно, при поддержании давления постоянным в конечной стадии сжатия (возможно, на допустимом из условий прочности установки уровне), можно вкладывать большую энергию в рабочий газ. Тогда при той же массе рабочего газа можно получать большие температуры или до той же температуры сжимать большую массу рабочего газа. Поскольку давление в таком случае может быть близко к предельному, необходимо точное соблюдение условий выстрела во избежание разрушения установки. Поэтому данный способ сжатия может использоваться только на расчетном режиме перетекания.

Данный способ сжатия с успехом может быть применен в устройствах импульсно-периодического действия (поршневых двигателях), расчетные режимы работы которых хорошо известны. Но при этом из конструкции узла неизоэнтропического перетекания необходимо исключить невосстанавливаемые элементы (в данном случае диафрагму). В связи с этим представляет интерес реализация импульсного сжатия без диафрагмы и рассекателя, когда доля вкладываемой энергии теряется вместе с некоторой частью рабочего газа, но основная масса газа изобарически перетекает через отверстие на расчетном давлении.

В статье [5] рассмотрена концепция „сверхадиабатического“ сжатия смеси в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. Проанализировано сжатие, сопровождающееся ростом энтропии. Показано, что „сверхадиабатическое“ сжатие позволяет поднять температуру смеси в 1.3–1.6 раза без изменения конечного давления или степени сжа-

тия и существенно увеличить время нахождения смеси при высокой температуре. Это дает возможность осуществить надежное воспламенение и быстрое сгорание смеси очень бедного состава, а также реализовать предварительное термическое разложение углеводородного топлива непосредственно в цилиндре двигателя. Эффективным при этом является как раз режим изобарического перетекания.

Таким образом, экспериментально доказана возможность реализации изобарического перетекания в установках импульсного сжатия с помощью специально профилированного наконечника, размещенного непосредственно на поршне. Данный способ сжатия позволяет существенно снизить уровень предельного давления при прочих равных условиях и может быть применен в двигателях внутреннего сгорания с разделенным цилиндром.

## Список литературы

- [1] Колбановский Ю.А., Щипачев В.С., Черняк Н.Я. и др. Импульсное сжатие газов в химии и технологии. М.: Наука, 1982. С. 240.
- [2] Кислых В.В., Крапивной К.В. // ТВТ. 1990. Т. 28. № 6. С. 1195–1203.
- [3] Шмелев В.М., Марголин А.Д., Волов Д.Б. и др. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 9. С. 67–70.
- [4] Shmelev V., Nikolaev V., Iuhin V. Ignition of methane-air mixtures at superadiabatic compression. Nonequilibrium Processes. V. 1. Combustion and Detonation. М.: Torus Press, 2005. P. 115–123.
- [5] Шмелев В.М., Николаев В.М. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2002. № 4. С. 57–66.