

УДК 532.5.013.2

© 1993 г. О. Б. ДРЕННОВ, В. И. ЖИГАЛОВ, В. Д. ЗАГРАЙ,
В. Н. МОХОВ, Р. С. ОСИПОВ, В. И. РЫЖКОВ, Л. Л. ТЕЧКО, В. Ф. ТЮТИН

О ВОЗМОЖНОСТИ ИМПУЛЬСНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА ЧЕРЕЗ КАПИЛЛЯР ПРИ ВЫСОКОМ ИСХОДНОМ ДАВЛЕНИИ В СИСТЕМЕ ($P_0 \geq 100$ МПа)

Экспериментально продемонстрирована возможность импульсной (с помощью химического ВВ) транспортировки газа при высоком начальном давлении из дополнительного объема в основной за времени $100 \leq t \leq 175$ мкс.

Предлагаемая конструкция в течение первых 90 мкс нечувствительна к высокому внутреннему давлению газа. При $t \geq 90$ мкс необходимо учитывать прочностные свойства ее элементов. К этому моменту времени количество газа в основном объеме увеличивается примерно на 43% относительно первоначального.

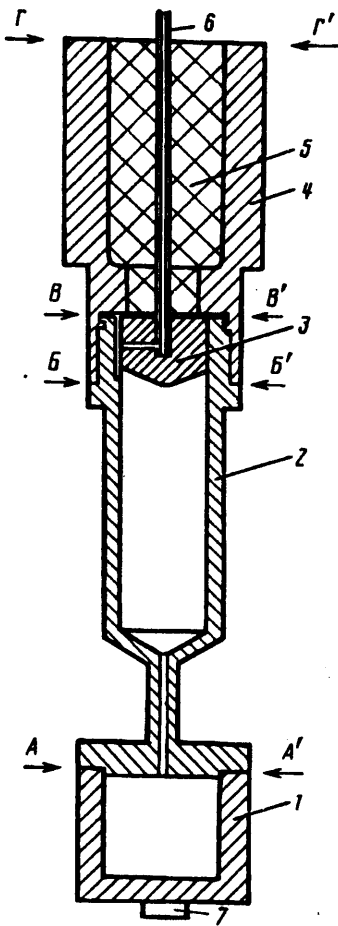
Использование легких поршней (титан, алюминий или магний вместо стали) позволяет сократить их время движения до величины, входящей в диапазон, нечувствительный к прочностным свойствам.

1. В одном из возможных способов, позволяющих использовать замкнутые объемы с минимальными размерами силовых элементов при максимальном внутреннем давлении газа, исследуемый объем должен находиться под высоким давлением в течение короткого промежутка времени (характерное время эксперимента). Достигается это, например, путем импульсной транспортировки газа из одного объема в другой (исследуемый) через капилляр. Два замкнутых объема соединяются тонким капилляром, причем в основном объеме (исследуемом) размещается только газ при высоком давлении, а в дополнительном, имеющем цилиндрическую форму, устанавливается еще и поршень. В заданный момент времени поршень начинает двигаться вдоль стенок цилиндрического объема и выталкивает газ, находящийся перед ним, через капилляр в основной объем. Скорость движения поршня целесообразно выбирать дозвуковой, чтобы ограничить или полностью исключить волновые процессы в газовой смеси, так как ударные волны могут существенным образом влиять на характер истечения газа: устанавливаться на входе в капилляр и изменять направление газового потока, устремляться в капилляр и формировать разрывные и кавитационные течения за фронтом.

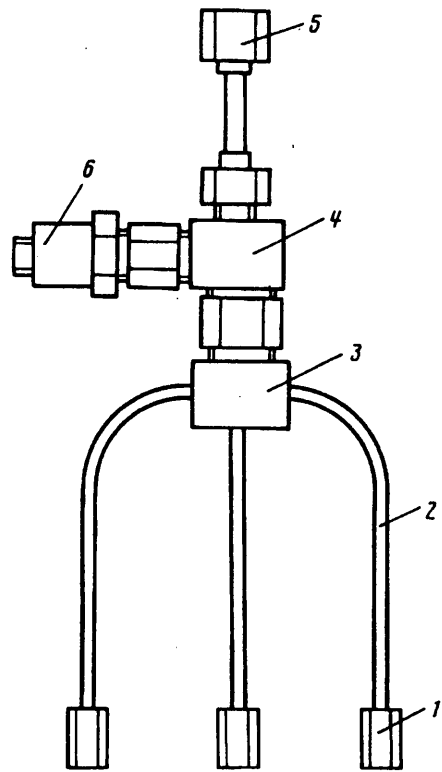
Вообще говоря, исследуемый объем может быть отделен мембранной перегородкой от дополнительного объема, заполняемого газом. В процессе сжатия газа движущимся поршнем (повышения давления в нем) мембрана разрывается и газ поступает в исследуемый объем.

Возможность заполнения замкнутого объема за короткое время ($t_1 \leq 100$ мкс) и нахождение его при повышенном давлении в течение небольшого промежутка времени (время эксперимента $t_2 \leq 100$ мкс) позволяют исключить использование в нем дополнительных силовых элементов. При таких сравнительно малых временах прочность оболочек исследуемого объема незначительна, так как реализуется фактически инерционное удержание газа в объеме.

Метод импульсной транспортировки газа может использоваться и автономно



Фиг. 1



Фиг. 2

для создания кратковременного сверхвысокого уровня давления внутри замкнутого объема за малые временные интервалы.

В данном случае целесообразно использовать энергию взрывчатого вещества (ВВ) для перемещения поршня. С этой целью в дополнительном объеме над поршнем устанавливается цилиндрический заряд ВВ. Продукты взрыва, реализующиеся при детонации ВВ, толкают поршень вдоль канала дополнительного объема. Тем самым обеспечивается транспортировка газа через капилляр в основной объем. Для увеличения отбора энергии поршнем цилиндрический заряд ВВ целесообразно заключать в массивную оболочку из материала высокой плотности.

2. Описанные ниже результаты экспериментальной работы направлены на конкретное конструктивное исполнение системы импульсной транспортировки газа из дополнительного объема через капилляр в основной. Схема опытного макета изображена на фиг. 1. Основной (исследуемый) объем 1, имеющий форму цилиндра (объем $V_0 \approx 4,8 \text{ см}^3$), соединяется с дополнительным объемом 2 тонким капилляром диаметром 2—4 и длиной 18 мм. Дополнительный объем выполнен в виде полого цилиндра (внутренний диаметр $d = 14 \text{ мм}$, высота $H = 52 \text{ мм}$, объем $V_2 \approx 6,4 \text{ см}^3$) с плавным переходом в капилляр. С противоположного торца в объеме устанавливается поршень 3. Профиль свободной поверхности поршня повторяет геометрию плавного перехода стенки в капилляр.

Для надежной фиксации в канале дополнительного объема плоский торец поршня имеет фланец (стык В—В' на фиг. 1). Здесь выполняется герметизирующий сварной шов при сборке макета. В полости объемов газ подается через трубопровод диаметром 2 мм, совмещенный с поршнем. Подача газа производится от установки высокого давления. В поршне выполнен канал, а в стенке дополнительного объема — паз. Через эти элементы газ попадает внутрь объемов. При смещении поршня на базу, равную $\frac{1}{10}$ его толщины, паз в стенке дополнительного объема перекрывается. Обратное истечение газа исключается. Сверху на корпусе 2 фиксируется стакан 4, в котором размещается заряд бризантного ВВ 5, детонация в котором инициируется по поверхности Г—Г'. Нижний торец основного объема 1 снабжен конструктивным отверстием, в котором герметично размещается датчик давления 7.

Для изготовления макета выбрана высокопрочная жаростойкая водородостойкая сталь ЭИ 481, которая удобна для механической обработки [1].

Предварительно были проведены расчеты макеты на прочность с целью выбора оптимальных размеров его элементов. В расчетах, выполненных по безмоментной теории прочности [2], показано, что наиболее критичным к внутреннему давлению является дополнительный объем. При толщине его стенок $\Delta \approx 2,5$ мм разрушение происходит при $P_{cr} \approx 180$ МПа.

До проведения основной серии экспериментов один из макетов был испытан на предельное внутреннее давление. Разрушение дополнительного объема произошло при $P_{ex} \approx 175$ МПа, что хорошо согласуется с расчетными оценками конструкции на прочность. Под воздействием избыточного давления в материале возникают растягивающие пластические деформации. Появляются локальные утонения, перераспределения массы материала. В местах наибольшего ослабления сталь разрывается по образующей цилиндра.

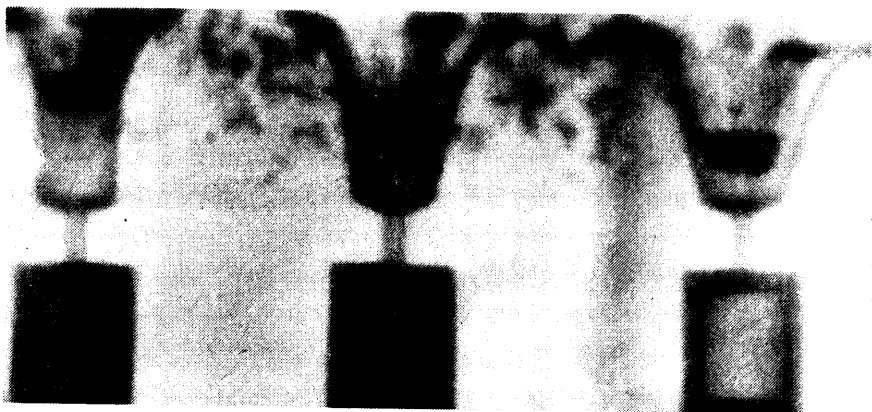
Для увеличения объема информации, получаемой в одном опыте, экспериментальный блок компоновался из трех макетов (фиг. 2). Макеты для импульсной транспортировки 1 через газопроводы 2 (внутренний диаметр $d = 1$ мм, толщина стенок $\Delta = 0,5$ мм) соединяются с распределителем 3, который стыкуется с тройником 4. Трубопровод 5 связывает распределитель с источником газовой смеси. Канал 6 служит для регистрации уровня давления в системе (используется мембранный датчик, работающий в диапазоне $4 \leq P \leq 200$ МПа).

В опытах исследовалась динамика движения поршня, метаемого продуктами взрыва, в условиях противодействия газа. Применялась методика импульсного рентгенографирования. Использовалась установка ГОНГ с граничной энергией гамма-квантов $E \approx 1,5$ МэВ. Принцип работы подобных установок описан в [3]. Погрешность измерения линейных величин при импульсном рентгенографировании на данной установке для конкретной схемы проведения опытов (за счет краевого размытия изображения движущихся объектов), согласно обмеру рентгенограмм тестовых объектов, составляет не более 5%.

В ряде опытов применялся датчик давления Т6000 на основе пьезоэлемента, способный регистрировать импульсное изменение давления в диапазоне до $P \leq 600$ Мпа. Собственная частота датчика $f = 200$ кГц. Датчик давления 7 устанавливается в нижнем торце основного объема 1 (фиг. 1).

Для расширения получаемой в одном опыте информации применено раздельное инициирование зарядов ВВ в каждом из макетов с задержкой относительно базового. Так, при одновременном рентгенографировании трех макетов на пленке фиксируются различные моменты смещения поршней относительно начального положения.

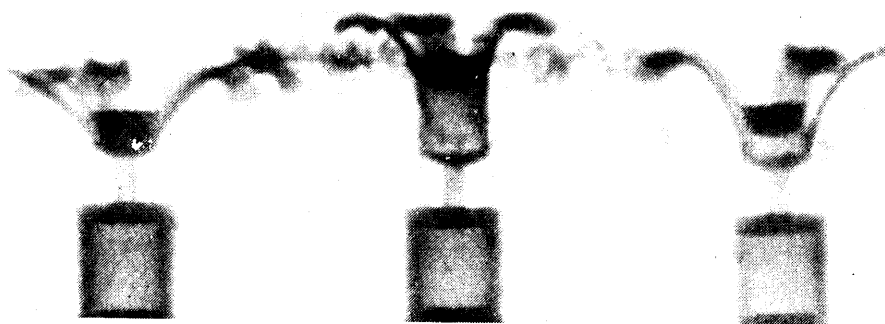
Типичные рентгенограммы опытов приведены на фиг. 3—5. Результаты опытов в виде (x, t) -диаграмм движения поршня в канале дополнительного объема (при различных диаметрах капилляра и исходных давлениях газа в системе $100 \leq P \leq 160$ Мпа) приведены на фиг. 6. На фиг. 6 приняты следующие обозначения: точки 1 — капилляр диаметром 2 мм, поршень из стали; 2 —



Фиг. 3



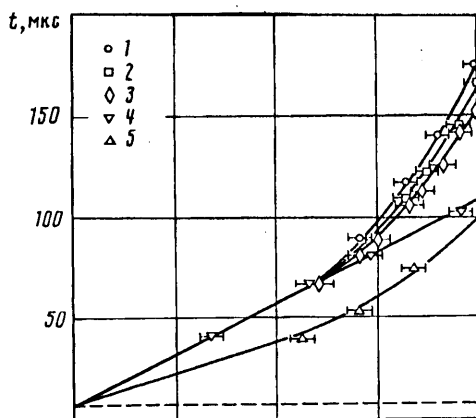
Фиг. 4



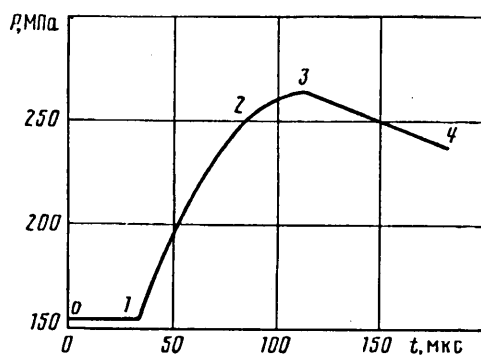
Фиг. 5

капилляр диаметром 3 мм, поршень из стали; 3 — капилляр диаметром 4 мм, поршень из стали; 4 — капилляр диаметром 2 мм, поршень из стали (давление в системе атмосферное); 5 — капилляр диаметром 3 мм, поршень из титана.

Из фиг. 3—5 следует, что в процессе движения поршня наблюдается разрушение стенок дополнительного объема (трещинообразование и расслоение по образующим). Перемещаемый поршнем газ не успевает полностью перетекать через



Фиг. 6



Фиг. 7

капилляр. Давление в части дополнительного объема под поршнем увеличивается, превышает критическую величину, характеризующую прочность конструкции. Это происходит при прохождении поршнем примерно половины (или несколько более) длины канала дополнительного объема. В местах локального ослабления материала начинает формироваться «пузырь». Между боковыми поверхностями поршня и дополнительного объема образуется зазор. При дальнейшем движении поршня возможно обратное истечение газа.

Характерная (P, t) -диаграмма изменения величины давления в основном объеме для одного из опытов приведена на фиг. 7. Зависимость получена путем расшифровки записи изменения напряжения во времени, снимаемого с чувствительного элемента пьезодатчика Т6000. На диаграмме фиг. 7 можно выделить следующие состояния: 0—1 — система заполнения газом (в конкретном случае водородом, $P_0 \approx 155$ МПа); 1 — газ начинает поступать в основной объем (истечение через капилляр). Волновая циркуляция в системе, заполненной газом (V_2), завершена, 1—2 — масса газа в основном объеме увеличивается; 2 — поступление новых порций газа в основной объем несколько сокращается. Это время ($80 \leq t \leq 90$ мкс) соответствует этапу потери прочности цилиндрической частью дополнительного объема. Появляются зазоры между боковой поверхностью поршня и стенками объема; 2—3 — осуществляются два конкурирующих процесса: втекание газа через капилляр в основной объем и истечение газа из дополнительного объема через зазоры за поршень; 3 — момент набора максимального давления в основном объеме ($P_{\max} \approx 265$ МПа), разрушение дополнительного объема; 3—4 — уровень давления в основном объеме постепенно снижается, что

соответствует началу обратного истечения газа. Дополнительный объем разрушен, а поршень не успевает перекрыть вход в капилляр; 4 — момент рентгенографирования, ему соответствует мощная электрическая наводка, прерывающая запись показаний датчика.

Из анализа экспериментальных данных (фиг. 3—7) следует, что за время $t \leq 90$ мкс стенки дополнительного объема еще сопротивляются повышенному внутреннему давлению. При $t > 90$ мкс дополнительный объем разрушается, т. е. за время $t \leq 90$ мкс работоспособность конструкции может быть описана без учета прочностных свойств составляющих ее элементов. При $t > 90$ мкс необходимо учитывать прочность материала и конструкции на разрыв.

3. Рассмотрим физическую картину процессов, реализующихся в дополнительном объеме V_g . Продукты взрыва разгоняют поршень до скорости $W \approx 0,4$ мм/мкс. Перед ним возникает ударная волна. Газ за фронтом приобретает массовую скорость, равную скорости поршня (течение без разрывов). Для идеального газа оценка параметров сформировавшейся ударной волны [4] дает

$$u^2 = \frac{2V_g(P - P_0)}{(\gamma + 1)P + (\gamma - 1)P_0}, \quad P \approx 250 \text{ МПа}$$

$$\frac{T}{T_0} = \frac{P}{P_0} \frac{P_0(\gamma + 1) + (\gamma - 1)P}{P_0(\gamma - 1) + (\gamma + 1)P} \approx 2,2$$

$$D = \sqrt{\frac{1}{2}V_g [(\gamma + 1)P + (\gamma - 1)P_0]} \approx 0,9 \text{ мм/мкс}$$

После отражения от искривленной стенки с капилляром давление в области фронта ударной волны возрастает до величины $P^* = 2P - P_0 \approx 350$ МПа. Отраженная ударная волна движется по сжатому газу, достигает поверхности поршня, отражается от нее. Из расчетных оценок следует, что реализовавшиеся волны слабые ($D \leq c$). С учетом затухания можно считать, что после первого отражения ударные волны трансформируются в звуковые и не влияют на состояние газа и характер его течения в основном объеме V_0 .

Массу газа, которая поступила из дополнительного объема в основной, можно оценить, используя измеренную величину максимального давления в основном объеме.

Процесс транспортировки газа по капилляру и последующего течения по основному объему V_0 адиабатический ($dQ = 0$), так как присутствует изолирующая оболочка макета. Следовательно, для оценок можно пользоваться адиабатой Пуассона $PV^\gamma = \text{const}$. Покажем, что этот процесс с достаточной степенью точности можно считать изэнтропическим ($\Delta S = 0$).

Для идеального газа изменение энтропии [5]

$$\Delta S = c_p m \ln \frac{T_2}{T_1} + mR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3.1)$$

Поскольку $V_2 = V_1 = V_0$ (основной объем фиксированный), второй член соотношения (3.4) обращается в нуль. Далее сравним начальную и конечную температуры газа, т. е. T_1 и T_2 . Скорость движения газа на входе в капилляр существенно меньше звуковой (не превышает максимальной скорости поршня $W \approx 0,4$ мм/мкс). Для дозвукового потока в случае сужающегося сопла с круто-сходящимися стенками (аналог места стыка капилляра и стенок объема V_g) скорость струи на срезе сопла меньше скорости звука [4]. Следовательно, процесс перетекания газа через капилляр проходит с дозвуковой скоростью и не сопровождается ударно-волновым разогревом. Оценим возможность разогрева газа за счет вязкого трения при движении по капилляру. Сила трения [4]

$$F = \frac{\eta A v}{a} \approx 0,36 \text{ Н}$$

Здесь a — расстояние между граничными поверхностями, A — площадь соприкосновения, v — скорость перемещения газа по каналу, η — динамическая вязкость газа. Допустим, что половина массы газа из дополнительного объема ($m = 0,5$ г) переместилась по капилляру в основной объем. Если представить массу газа в виде цилиндра диаметром капилляра, длина его составит $L \approx 110$ м.

Работа вязких сил ($FL \approx 40$ Дж) идет на разогрев газа. Отсюда получаем $T = FL/(mc_0) \approx 10$ К, т. е. разогрев газа незначителен. $T_2 \approx T_1$, первый член соотношения (3.1) также мал.

Процесс истечения газа через капилляр проходит кратковременно: $\Delta t \approx 30\text{--}40$ мкс (без учета времени детонации ВВ и времени прихода на вход в капилляр первого возмущения). За такое время источник тепла, возникающий в определенном месте потока, не может передать избыточную температуру существенным по массе слоям газа.

Следовательно, реализующееся в экспериментах течение газа по капилляру и в объеме V_0 можно приближенно считать изэнтропическим. Вследствие этого масса газа в основном объеме пропорциональна $P^{1/\gamma}$. Для одноатомного газа $m \sim P^{3/5}$. Используя известные величины $P_0 \approx 155$ МПа, $P_{\max} \approx 265$ МПа, $m_0 \approx 0,74$ г, получаем $m \approx 1,06$ г, $\Delta m = m - m_0 \approx 0,32$ г. Иными словами, в основной объем до момента разрушения цилиндрической части дополнительного объема поступает около 43% газа относительно исходного количества, бывшего в нем.

Из фиг. 6 следует, что поршень перемещается по каналу дополнительного объема до места входа в капилляр за время $t = 160\text{--}175$ мкс. Для реализации оптимальных условий транспортировки газа, соответствующих перемещению практически всей его массы из дополнительного объема, необходимо существенно сократить полное время движения поршня (до $t \leq 90$ мкс, пока в конструкции не проявятся эффекты прочности). Достигается это путем применения более легких и энергоемких поршней (замена стали на титан, алюминий, магний в этой же геометрии обеспечивает соотношение для кинетических энергий движущихся поршней $E_{St} < E_{Ti} < E_{Al} < E_{Mg}$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приданцев М. В., Давыдова Л. Н., Тамирина И. А. Конструкционные стали: Справочник. М.: Металлургия, 1980. 288 с.
2. Феодосьев В. И. Сопrotивление материалов. М.: Физматгиз, 1963. 539 с.
3. Павловский А. И., Кулешов Г. Д., Склизов Г. В. и др. Сильноточные безжелезные бетатроны // Докл. АН СССР. 1965. Т. 160. № 1. С. 68—70.
4. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
5. Жуковский В. С. Термодинамика. М.: Энергия. 1983. 304 с.

Арзамас

Поступила в редакцию
5.V.1992