

## РАЗГОН ЧАСТИЦ ПЕРЕСЖАТОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ

Т. П. Гавриленко, В. В. Григорьев, А. В. Троцюк, В. Ю. Ульяницкий  
(Новосибирск)

Известно [1—3], что при пересжатии детонационной волны резко растут давление, плотность и скорость продуктов детонации (ПД). При пересжатии  $\alpha = D/D_{\text{ч-ж}} = 1,7$  скорость ПД увеличивается по сравнению с критическим истечением втрое, плотность в 10 раз, а динамический напор почти на два порядка. Поэтому частицы порошка, введенные в поток ПД, могут быть разогнаны до больших скоростей на малых дистанциях, несмотря на непродолжительное время существования сильного пересжатия.

Один из способов создания пересжатой волны — профилирование сечения трубы. Формирование пересжатой волны может происходить в нерегулярном (рис. 1, а), квазирегулярном и регулярном режимах (рис. 1, б).

При нерегулярном отражении волны Чепмена — Жуге от стенок конуса [2, 3] растет маховская пожка, движущаяся вдоль образующей конуса с повышенной скоростью. Она является пересжатой детонационной волной (ДВ) со степенью пересжатия  $\alpha = 1/\cos(\varphi + \beta/2)$ , где  $\varphi$  — угол конуса;  $\beta$  — угол между образующей конуса и траекторией тройной точки при маховском отражении.

Значение  $\beta$  зависит в основном от размера ячейки  $a_0$  во фронте самоподдерживающейся детонации [4, 5] и, вообще говоря, не постоянно [2, 3]. Если длина образующей конуса не более чем в 10 раз превосходит  $a_0$ , то при  $\varphi = 30^\circ$  маховская пожка имеет  $\alpha = 1,3$ . В случае нерегулярного отражения при столкновении маховских пожек вблизи узкой части канала образуется вторичная маховская пожка с  $\alpha \approx 1,7$ . Узкая часть канала должна начинаться в том месте, где размер ее равен диаметру канала, тогда она, не разрушаясь, входит в узкую часть, создавая там существенно сверхзвуковой поток газа. Измерения показывают, что в этом случае пересжатая волна (вторичная пожка) сохраняет свою скорость примерно на трех диаметрах узкой части канала, а дальше ее скорость постепенно падает до скорости Чепмена — Жуге. Спад скорости определяется тем, насколько быстро волна разрежения, возникшая при

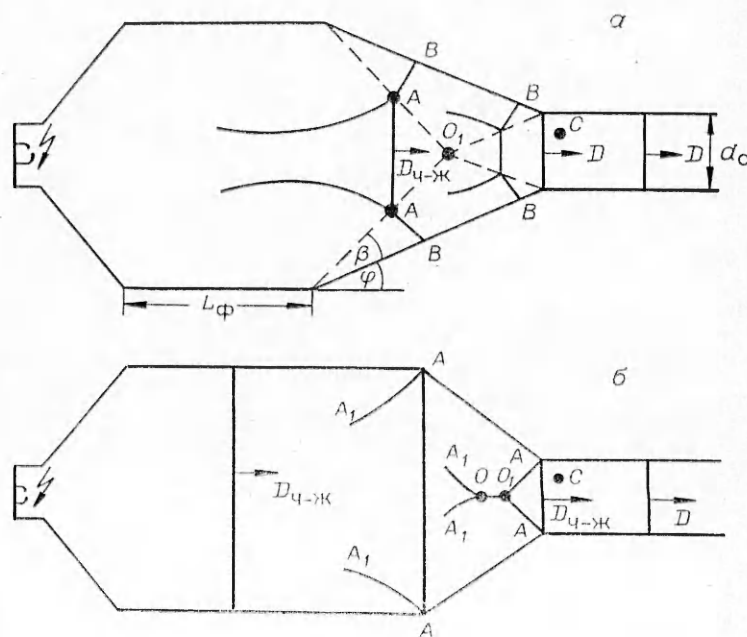


Рис. 1.

разгрузке области с центром в точке  $O$  (см. рис. 1, а), будет догонять фронт вторичной ножки. Осциллограмма изменения давления за вторичной ножкой приведена на рис. 2, 1. Пьезодатчик располагался в точке  $C$ . Как показывает анализ экспериментов [2, 3], для осуществления режима нерегулярного отражения необходимо, чтобы  $a_0 \approx 0,75d_c$  ( $d_c$  — диаметр узкой части канала).

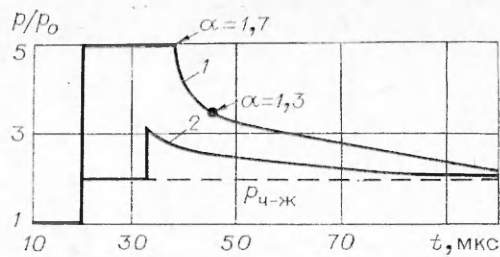


Рис. 2.

У смесей на основе ацетилена или пропан-бутана с кислородом при начальном давлении 1 атм  $a_0 = 2 \div 0,2$  мм, поэтому режим нерегулярного отражения для таких смесей может существовать, если  $d_c = 2,7 \div 0,27$  мм. При таких диаметрах существенную роль в режиме распространения пересжатой детонации будет играть взаимодействие газового потока со стенками. Потери на трение и теплопровод здесь будут полностью компенсировать то повышение параметров, которое возникает при пересжатии. Когда детонация отражается от конуса нерегулярным образом, по высоте маховской ножки мала (или  $a_0 < 0,75d_c$ ), назовем такое отражение квазирегулярным. В этом случае ножки малы, разгон твердой частицы осуществляется практически так же, как и при регулярном отражении детонации от конуса.

При регулярном отражении волны Чепмена — Жуге от стенок конуса, которое наблюдается, если  $\varphi \geq 45^\circ$  [1, 3], скорость детонации остается постоянной, но начиная с некоторого момента при столкновении отраженных волн  $AA_1$  (см. рис. 1, б) формируется вторичная УВ, распространяющаяся по продуктам детонации и постепенно догоняющая детонационный фронт  $AA$ . Плотность и скорость ПД при прохождении вторичной волны существенно повышаются, ее амплитуду (из-за сложной картины течения) можно определить лишь экспериментально, измерив давление за ней или скорость детонации в тот момент, когда вторичная волна догонит фронт детонации Чепмена — Жуге.

Построенная на основе экспериментальных измерений схема профиля давления за пересжатой волной квазирегулярного (регулярного) отражения приведена на рис. 2, 2. Датчик располагался в точке  $C$  (см. рис. 1). Из рис. 2 видно, что при нерегулярном отражении параметры потока существенно выше, но при малых размерах ячейки (как в смесях на основе ацетилена или пропан-бутана с кислородом) этот режим практически не реализуется.

**Экспериментальное исследование пересжатия в случае квазирегулярного отражения** проведено для смеси технический пропан-бутан +  $3O_2$ , которая при начальном давлении 1 атм имеет минимальную длину перехода горения в детонацию и довольно высокую скорость детонации (2550 м/с). Во всем диапазоне изменения геометрических размеров установки режим пересжатия соответствовал квазирегулярному.

Экспериментальная установка состояла из трубы переменного сечения (длину отдельных участков можно изменять), систем приготовления газовой смеси, иницирования и наблюдения. Схема изменения внутреннего сечения аналогична приведенной на рис. 1, а. Основные размеры:  $\varphi = 30, 10$  и  $5^\circ$ ,  $d_c = 20, 10$  и  $5$  мм, длина формирующей секции 150, 200, 250, 300 и 500 мм, диаметр этой секции  $d_\phi = 85$  мм. При  $d_c = 5$  мм  $L_\phi = 131, 238$  и  $388$  мм,  $d_\phi = 20$  мм. Выбор геометрии сечения позволял варьировать отношение площадей широкой и узкой частей, а также выяснить влияние  $L_\phi$  на параметры процесса. Скорость регистрировали по обычной методике: фоторазвертка движения фронта детонации в узкой части канала через щель, параллельную его оси, шириной 1 мм; ошибка при определении скорости не превышала 2%. Для измерения  $D_{ч-жк}$  формирующую секцию заменяли трубкой с диаметром, равным  $d_c$ . Во всех

$\sigma$	$L_{\Phi}$ , мм	$\varphi$ , град	$D_{20}$ , м/с	$D_{100}$ , м/с	$\bar{\alpha}_{20}$	$\bar{\alpha}_{100}$
16	150 ( $1,9d_{\Phi}$ )	30	2550	2550	1,00	1,00
		10	2590	2590	1,01	1,01
		5	2600	2600	1,02	1,02
	200 ( $2,5d_{\Phi}$ )	30	2500	2500	1,00	1,00
		10	2550	2500	1,00	1,00
		5	2550	2550	1,00	1,00
	300 ( $3,75d_{\Phi}$ )	30	2700	2700	1,06	1,06
		10	2800	2800	1,10	1,10
		5	2740	2740	1,08	1,08
	500 ( $6,25d_{\Phi}$ )	30	2900	2900	1,14	1,14
		10	2960	2960	1,16	1,14
		5	2990	2990	1,17	1,17
	131 ( $6,55d_{\Phi}$ )	30	2770	2670	1,11	1,06
		10	2940	2770	1,17	1,10
		5	2800	2660	1,12	1,06
	238 ( $11,9d_{\Phi}$ )	30	2810	2660	1,11	1,06
		10	2840	2800	1,12	1,11
		5	2770	2720	1,11	1,08
388 ( $19,4d_{\Phi}$ )	30	2750	2710	1,11	1,07	
	10	2780	2750	1,11	1,10	
	5	2760	2720	1,10	1,09	
64	150 ( $1,9d_{\Phi}$ )	30	2550	2550	1,00	1,0
		10	2900	2600	1,14	1,02
		5	2550	2550	1,00	1,0
	200 ( $2,5d_{\Phi}$ )	30	2600	2600	1,02	1,02
		10	3200	2600	1,25	1,02
		5	2600	2600	1,02	1,02
	250 ( $3,125d_{\Phi}$ )	30	2900	2600	1,12	1,10
		10	2900	2800	1,12	1,10
		5	2900	2800	1,12	1,10
	500 ( $6,25d_{\Phi}$ )	30	2900	2800	1,14	1,10
		10	2900	2800	1,14	1,10
		5	2800	2800	1,14	1,10

экспериментах на входе формирующей секции была обеспечена детонация Чепмена — Жуге.

Результаты экспериментов приведены в таблице, где  $\sigma$  — отношение площадей;  $D_{20}$ ,  $\bar{\alpha}_{20}$  и  $D_{100}$ ,  $\bar{\alpha}_{100}$  — скорость и среднее пересжатие на длине 20 и 100 мм от входа в узкий канал. Из таблицы видно, что максимальное пересжатие (1,14) наблюдается при  $\sigma = 16$  и  $64$  и  $L_{\Phi} = 500$  мм (т. е.  $\sim 6d_{\Phi}$  формирующей секции). Если бы отражение детонации от стенок конуса было нерегулярным, изменение отношения площадей сечений приводило бы к существенному различию результатов. Это еще раз подтверждает квазирегулярный характер отражения детонации Чепмена — Жуге в конусе. Сравнение данных, приведенных в таблице, показывает, что независимо от  $\varphi$  и  $\sigma$  при  $L_{\Phi} \geq 6d_{\Phi}$  появляется пересжатие в  $\sim 15\%$ , с ростом длины оно достигает примерно 20%, но не выше. В отдельных опытах  $\alpha \sim 1,5$ , по это связано с тем, что на конус приходила пересжатая волна после поздно происшедшего перехода горения в детонацию. Эта волна испытывает нерегулярное отражение от конуса, величина пересжатия при котором существенно выше.

Следующую серию экспериментов поставили с целью выяснить, насколько параметры частиц, разгоняемых пересжатой волной, отличаются от параметров частиц, разгоняемых волной Чепмена — Жуге.

**Разгон частиц пересжатой волной.** Исследовался разгон сферических частиц железа диаметром 250—550 мкм в пересжатой волне, получаемой на описанной выше установке,  $L_{\Phi} = 500$  мм,  $d_{\Phi} = 85$  мм, длина узкой

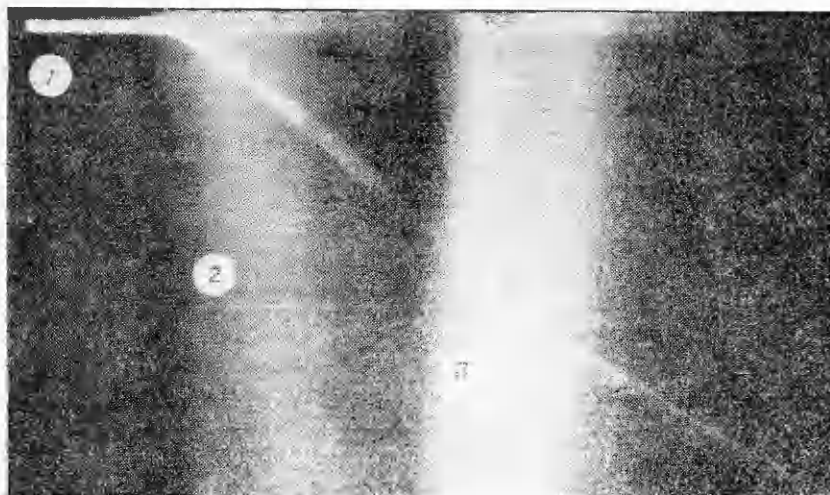


Рис. 3.

части канала 205 мм,  $d_c = 20$  мм,  $\varphi = 30^\circ$ . Торцы узкой части закрывали прозрачной крышкой для ввода вдоль оси канала лазерного луча. Для наблюдения за процессом разгона частицы использован метод лазерной визуализации, подробно описанный в [6].

У предварительно отобранной частицы измеряли диаметр на микроскопе и затем приклеивали ее на капроновую нитку толщиной 10 мкм. Нитку закрепляли по диаметру узкой части канала так, чтобы частица располагалась на оси канала на расстоянии 54 мм от его начала. Когда детонация достигала частицы, нитка разрывалась или плавилась, и частица оставалась свободной. Рассеянный частицей свет регистрировали фоторегистратором через щель шириной 2 мм. Скорость фотопленки 100 м/с, коэффициент уменьшения изображения равен 1,06. Светофильтр КС-15 позволял одновременно фиксировать рассеянный частицей свет лазера (ГОР-100 М) и свечение продуктов детонации. Длительность импульса излучения лазера  $\sim 700$  мкс. Генерация светового импульса примерно на 100 мкс опережала момент прихода фронта детонации на частицу.

На фоторазвертке, приведенной на рис. 3: 1 — трек частицы, 2 — фронт пересжатой волны, 3 — фронт детонации, отраженной от закрытого конца канала. Видно, что до прихода пересжатой волны частица покоится, затем на расстоянии  $\sim 1$  мм набирает скорость и движется с ускорением вплоть до встречи с отраженной ДВ, после чего начинает тормозиться (трек 1 меняет кривизну). Из-за малой глубины резкости использованного объектива фронт пересжатой и отраженной волн сильно размыт.

Результаты экспериментов приведены на рис. 4. Начало отсчета на графиках — момент прихода детонационной волны на частицу; кривые 1 соответствуют разгону частиц пересжатой волной, 2 — волной Чепмена — Жуге. При измерении скорости частицы в волне Чепмена — Жуге конус заменяли трубкой диаметром, как у узкого канала. Для удобства сравнения результатов данные по скоростям, полученные для частиц различного диаметра, пересчитаны на скорость частицы диаметром 400 мкм.

Из рис. 4 видно, что за одно и то же время ускорения частица в пересжатой волне набирает скорость в 2,5—4 раза большую, чем в волне Чепмена — Жуге. Разброс по скоростям связан в основном с неповторяемостью условий при приклеивании частицы на нитку (различная присоединенная к частице масса клея). По ускорению частицы можно оценить время воздействия на нее пробки газа за пересжатой волной. Самое большое ускорение частица испытывает в течение первых 10—20 мкс,

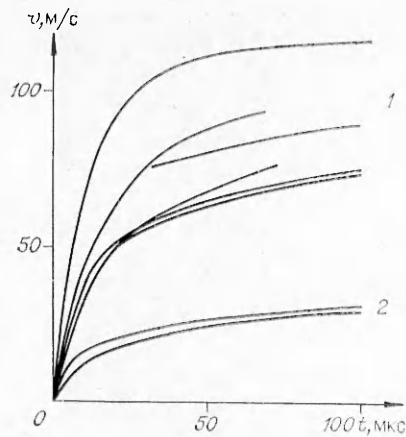


Рис. 4.

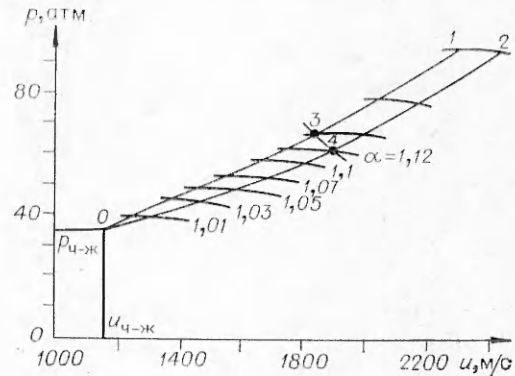


Рис. 5.

примерно через 30 мкс от начала воздействия волны на частицу ускорение падает и дальше частица разгоняется медленно. За время 30 мкс частица диаметром 400 мкм (плотностью 7,8 г/см<sup>3</sup>) приобретает скорость 70 м/с, пройдя расстояние от начального положения ~2 мм. Если скорость, полученную частицей диаметром 400 мкм, пересчитать для частицы диаметром 40 мкм, то скорость последней через 30 мкс будет иметь величину 700 м/с, а путь разгона составит ~20 мм. Отметим, что разгон частиц осуществлялся в таком режиме, когда достигнутое в канале пережатие сохраняется на расстояниях ~100 мм от начала узкой части канала, в противном случае сказалось бы то обстоятельство, что частица вводилась в канал на расстоянии 54 мм от начала, где пережатие уже могло бы существенно упасть.

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с оценочным расчетом, приводимым ниже, по разгону частиц пережатой детонационной волной.

**Расчет разгона частиц пережатой детонацией.** Построим  $p, u$ -диаграмму для двухволнового течения газа: по первоначально покоящейся взрывчатой смеси с параметрами  $p_0, \rho_0, T_0$  распространяется детонационная волна со скоростью  $D_{ч-ж}$ , вслед за ней по газу с параметрами  $p_{ч-ж}, \rho_{ч-ж}, u_{ч-ж}$  распространяется УВ, скорость которой неизвестна. После слияния фронта детонации и ударной волны скорость образовавшегося комплекса равна  $1,15D_{ч-ж}$ . Но этот комплекс неустойчив и претерпевает распад, параметры которого можно оценить по  $p, u$ -диаграмме (рис. 5), построенной по формулам работы [7] (01 — пережатая детонация, 02 — ударная волна, 43 — адиабата Пуассона, 3 — параметры газа после распада разрыва). Ударную адиабату построим в предположении, что УВ распространяется по изотермическому газу [8].

Зная параметры газа, найдем ускорение частицы

$$\frac{du_r}{dt} = \frac{3}{4} c_D \frac{(u_{уд} - u_r)^2}{\rho_r d_r} \rho, \quad (1)$$

где  $u_r, \rho_r, d_r$  — скорость, плотность и диаметр частицы;  $c_D$  — коэффициент сопротивления шара; для сверхзвуковых течений при  $Re \sim 10^4$   $c_D \approx 1$  [9].

Интегрируя (1) по времени при  $u_r(0) = 0, x_r(0) = x_0$ , получим

$$\begin{aligned} u_r &= u_{уд} [1 - 1/(1 + t/\tau_0)], \\ x_r &= x_0 + u_{уд} t [1 - \tau_0/t \ln(1 + t/\tau_0)], \\ \tau_0 &= 4/3 \cdot \rho_r d_r / c_D \rho u_{уд}, \end{aligned}$$

$\tau_0$  — характерное время, по истечении которого частица приобретает скорость, равную половине скорости продуктов детонации. Полагая  $t$  равным

времени воздействия потока с повышенными параметрами на частицу (из эксперимента  $t \sim 30$  мкс), найдем скорость, до которой разгонится частица за это время, и путь разгона. Скорость частицы при  $\alpha = 1,15$  ( $\rho_r = 10^4$  кг/м<sup>3</sup>,  $d_r = 40$  мкм,  $\rho = 3,2$  кг/м<sup>3</sup>,  $u_{нд} = 2014$  м/с,  $\tau_0 = 56$  мкс):  $u_r = 698$  м/с, путь разгона  $x = x_r - x_0 = 1$  см; частица из материала той же плотности диаметром 400 мкм имеет  $u_r = 179$  м/с,  $x_r = 1,5$  мм. Таким образом, результаты оценочного расчета хорошо согласуются с экспериментом.

**Выводы.** Анализ результатов экспериментов показывает, что при квазирегулярном отражении детонации Чепмена — Жуге от стенок конуса максимальное пережатие имеет величину 12—15%, если длина формирующей секции превышает 6 калибров независимо от угла клина и диаметров узкой и широкой частей канала. Скорость твердых частиц, разгоняемых продуктами детонации за пережатой волной, в 3—4 раза выше скорости таких же частиц, разгоняемых продуктами за волной Чепмена — Жуге.

*Поступила в редакцию 5/XI 1984,  
после доработки — 27/II 1985*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Т. П. Гавриленко, Ю. А. Николаев, М. Е. Топчий. ФГВ, 1979, 15, 5.
2. Т. П. Гавриленко, Е. С. Прохоров. — В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1980.
3. Т. П. Гавриленко, Е. С. Прохоров. ФГВ, 1981, 17, 6.
4. А. А. Васильев, Ю. А. Николаев. ФГВ, 1976, 12, 5.
5. А. А. Васильев, Ю. А. Николаев, В. Ю. Ульяницкий. ФГВ, 1977, 13, 3.
6. В. М. Бойко, Т. П. Гавриленко, В. В. Григорьев и др. ФГВ, 1983, 19, 3.
7. Ю. А. Николаев, М. Е. Топчий. ФГВ, 1977, 13, 3.
8. С. А. Ждан, Е. С. Прохоров. ФГВ, 1984, 20, 5.
9. С. Б. Хендерсон. РТК, 1976, 14, 6.

### ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА ДЛИНУ ПРЕДЕТОНАЦИОННОГО УЧАСТКА В ТГ 50/50

*С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов  
(Новосибирск)*

Основные параметры, определяющие возможность возбуждения детонации в конденсированных гетерогенных ВВ, это давление  $p$  в иницилирующей ударной волне (УВ) и длительность импульса давления  $\tau$ . Зависимости  $p_{кр}$  от  $\tau$  [1] установлены для различных ВВ в широких диапазонах изменения этих величин. В то же время влияние скорости нарастания и спада давления на процесс иницирования исследовано недостаточно. В этом направлении имеются лишь отдельные работы. В одних [2, 3] рассматривалось влияние скорости нарастания давления в волне сжатия, в других [4, 5] — действие нескольких последовательно идущих УВ на процесс иницирования конденсированных ВВ.

В [4] обнаружено, что если максимальное давление в пластическом ВВ РВХ-9404 достигалось в результате прохождения двух УВ, а не в одном скачке, то ВВ оказывалось менее чувствительным по отношению к действию второй более мощной УВ. Иницирование детонации в пресованном тротиле системой из двух или трех УВ различной длительности и амплитуды показало [5], что предварительное прохождение слабых УВ приводит к уменьшению скорости разложения образцов. На возможное влияние УВ, проходящей по составу В, на его чувствительность при возбуждении детонации кумулятивной струей указано в [6].

Учет этого явления может быть в принципе необходимым и при постановке тестовых экспериментов, например таких, как иницирование