

УДК 533.6.011.5

© 1999 г. А.М. БАРТЕНЕВ, Б.Е. ГЕЛЬФАНД, Н. ГРЁНИГ, С.П. МЕДВЕДЕВ,
А.Н. ПОЛЕНОВ, С.В. ХОМИК**ГОРЕНИЕ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ С НЕОДНОРОДНЫМИ
ПОЛЯМИ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ**

На примере фокусировки ударных волн при их взаимодействии с вогнутыми отражающими поверхностями экспериментально исследовано воспламенение и горение газовых водородно-воздушных смесей в пространстве с неоднородным полем давления и температуры. Используются двухмерные отражатели, располагающиеся в торцевой части ударных труб прямоугольного сечения различной длины, но с примерно одинаковым отношением длин секций высокого и низкого давления. Показано наличие общей закономерности развития взрывного процесса, следующего за воспламенением смеси от горения в полости отражателя до детонации через промежуточную стадию, характеризующуюся вторичным взрывным процессом с переменной интенсивностью. Проведено сравнение результатов взаимодействия ударных волн с отражателями различной геометрии.

Исследования процессов горения, перехода горения в детонацию и самой детонации обычно проводятся в условиях, когда давление и температура горючей среды однородны по пространству. Наблюдения в таких условиях позволяют выявить основные характеристики взрывных процессов, изучить химико-кинетические свойства горючих смесей и прогнозировать развитие горения в условиях отсутствия локальных зон поджата и разогрева энергоносителя. Однако в реальных устройствах, как правило, поля давления и температуры неоднородны. В частности, в камерах сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей течение горючей смеси обычно осложнено присутствием присоединенных и отраженных волн давления, формирующих сложную пространственно-временную структуру распределения температуры и давления.

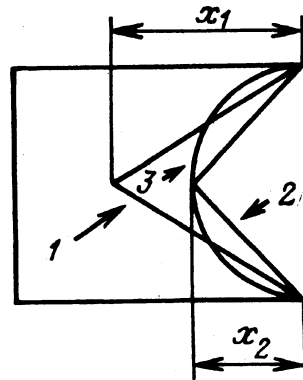
Описание химико-газодинамических явлений в пространстве с неоднородным распределением температуры и давления безусловно требует экспериментальной верификации на достаточно простых примерах, допускающих подробное измерение основных параметров в сопоставимых начальных условиях как в нейтральной газовой смеси, так и в ее горючем аналоге. Представляется удобным провести такие исследования на примере явления фокусировки ударных или взрывных волн при их взаимодействии с вогнутыми отражающими поверхностями.

В работах, обобщенных в [1], создана достаточная опытно-теоретическая база для описания взаимодействия ударных волн с двумерными и трехмерными вогнутыми отражателями в негорючих газах. В данных экспериментах ударные волны регистрируются как возмущения давления с конечным временем существования постоянных давления и температуры ударно сжатого газа. Взрывными же волнами считаются возмущения с непрерывным изменением давления и температуры за передним фронтом.

Примером двумерных отражателей являются угловые (клиновидные), цилиндрические и параболические полости. Трехмерные отражатели – полости в виде разнообразных тел вращения: сфера, эллипсоид или параболоид, конус.

Имеются наглядные свидетельства [2–6] заметного влияния газодинамических про-

цессов на взрывные явления за возмущениями давления, проникающими в искривленные каналы или отражающимися на неплоских концевых элементах. Эти наблюдения получены в высокорекреационных смесях стехиометрического состава, когда характерное время химических реакций и пространственные масштабы их реализации намного меньше тех же масштабов для газодинамических процессов [3, 4, 6]. Однако в таких смесях трудно моделировать полную картину вероятных режимов взаимодействия и нельзя выделить влияние структуры неоднородного поля давление – температура на реализующиеся переходные режимы горения и взрыва. В частности, пока не выявлено различие в динамике взрывных явлений в горючей среде при фокусировке ударных волн на концевых отражателях различной геометрической формы. Для отражателей одинаковой формы не классифицированы основные типы переходных явлений, сопровождающих горение газов в пространстве, содержащем меняющиеся со временем зоны локального повышения температуры и давления, при встрече ударной волны с двумерной или трехмерной полостью.



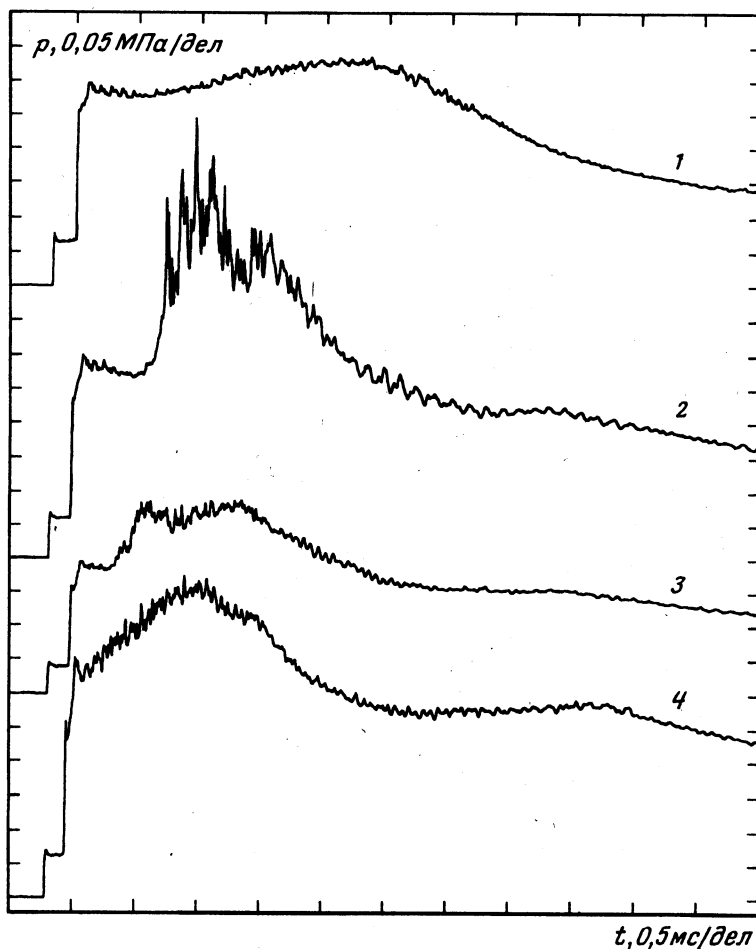
Фиг. 1. Отражатели, использованные в большой ударной трубе, 1, 2 – клинья с углами $\alpha_2 = 53^\circ$ и $\alpha_1 = 90^\circ$ соответственно, 3 – полуцилиндр с $R_2 = 27$ мм, $x_1 = 54$ мм, $x_2 = 27$ мм

1. Для изучения динамики взрывных явлений в неоднородном по температуре и давлению пространстве, заполненном горючей газовой смесью, при начальном давлении, изменяющемся в широком диапазоне значений, использованы две ударные трубы с различными линейными размерами и прочностными характеристиками. Отношение длины камеры высокого давления к длине камеры низкого давления равнялось для обеих труб 0,5. Малая ударная труба имела прямоугольную камеру низкого давления сечением 34×50 мм² и длиной 1,2 м. В качестве отражателя для малой ударной трубы использовали цилиндрическую выемку с радиусом кривизны $R_1 = 25$ мм. Большая ударная труба длиной 6,35 имела камеру низкого давления квадратного сечения 54×54 мм². Длина камеры высокого давления составляла 3,15 м. Камера низкого давления оснащалась двумерными симметричными клиновидными отражателями с полным углом раскрытия $\alpha_1 = 90^\circ$ или $\alpha_2 = 53^\circ$. Ряд опытов выполнен с двумерным цилиндрическим отражателем с радиусом кривизны $R_2 = 27$ мм.

На фиг. 1 приведены типы отражателей, использованных на большой ударной трубе. Камеры низкого давления обеих ударных труб в местах установки концевых неплоских отражателей снабжались системой пьезоэлектрических датчиков давления для многоточечного измерения параметров возмущений давления в плоскости симметрии отражателей. Поперек газового потока соосно чувствительным элементам датчиков устанавливались фотодиоды для фиксации локальных уровней излучения продуктов взрыва в случае возникновения очагов горения.

В опытах с горючими смесями предварительно вакуумированные камеры низкого давления наполнялись заранее перемешанной смесью 15%Н₂ + 85% воздух до давления $p_1 = 0,005-0,1$ МПа при температуре $T_1 = 293 \pm 3$ К. Негорючий газообразный аналог этой смеси имел состав 15%Н₂ + 85%N₂ и использовался в предварительных опытах для установления параметров полей давления и температуры в отсутствие объемных химических реакций. Камеры высокого давления обеих труб наполнялись гелием до известного давления разрыва мембраны, разделяющей их с камерами низкого давления.

Положение датчиков давления и фотодиодов вдоль плоскости симметрии отражателей характеризовалось расстоянием x_d , отсчитываемым от поверхности или точки отражателя, наиболее удаленной от входа в вогнутую полость из канала камеры

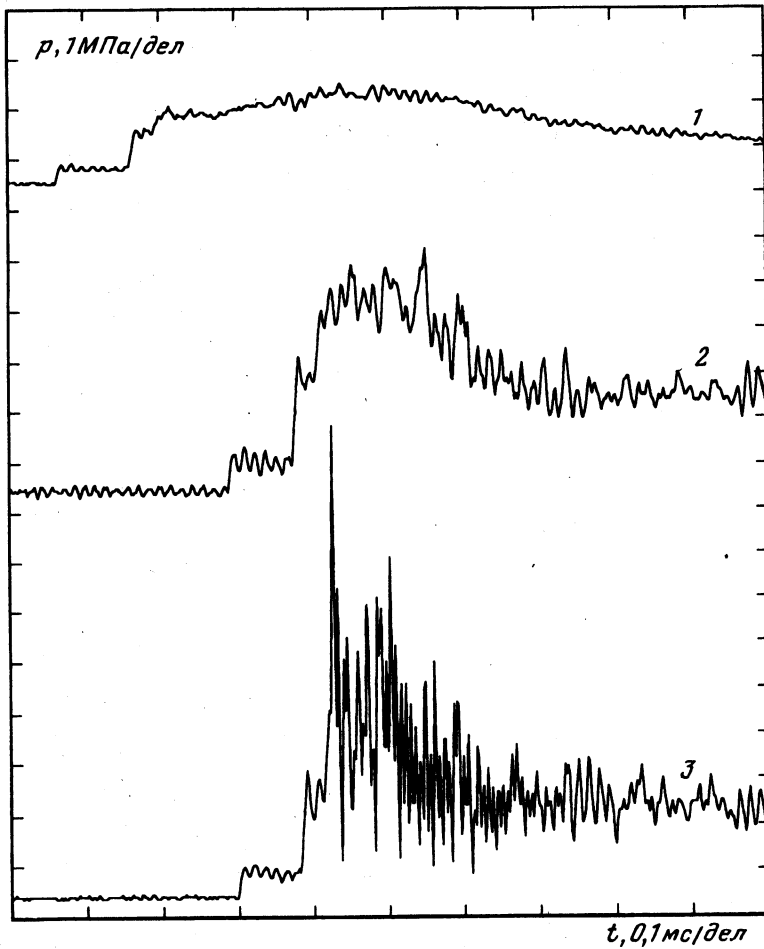


Фиг. 2. Профили давления, регистрируемые на одинаковом расстоянии от вершины цилиндрической полости в большой ударной трубе при различных числах Маха в смеси 15%N₂ + 85% воздух. М = 2,19 (1), 2,34 (2), 2,44 (3), 2,59 (4)

низкого давления постоянного сечения (для примера на фиг. 1: x_1 – для отражателя 1 или x_2 – для отражателей 2, 3 и т.д.). Сбор и обработка показаний датчиков давления и фотодиодов на малой ударной трубе выполнялась цифровыми осциллографами и вычислительным комплексом на основе персонального компьютера. Те же операции на большой ударной трубе выполнялись на персональном компьютере со специальной картой для регистрации быстропотекающих процессов.

2. Серия записей давления в большой ударной трубе на осевом удалении $x_2 = 29$ мм от поверхности цилиндрической полости с радиусом кривизны $R_2 = 27$ мм в смеси 15%N₂ + 85% воздух при начальном давлении $5,5 \times 10^{-3} - 10^{-2}$ МПа показана на фиг. 2. Изменяемым параметром для серии представленных осциллограмм было число Маха М ударной волны, входящей в цилиндрическую полость.

При М = 2,19 вдали за фронтом отражений волны отмечалось слабое повышение давления (кривая 1), которого не было в негорючей смеси 15%N₂ + 85%N₂ при тех же исходных p_1 и T_1 . Таким образом, появление этой волны связано с горением внутри полости. Повышение интенсивности волны до уровня, отвечающего числу М = 2,34, приводит к появлению на датчике, расположенном в полости, ударной волны, соот-

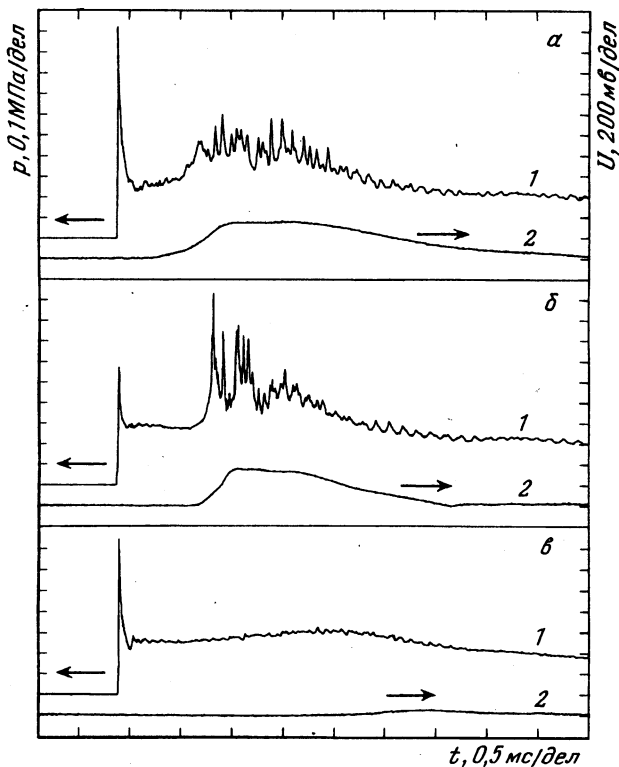


Фиг. 3. Профили давления, регистрируемые на одинаковом расстоянии от вершины цилиндрической полости в малой ударной трубе при различных числах Маха в смеси 15%N₂ + 85% воздух. М = 2,12 (1), 2,33 (2), 2,42 (3)

ветствующей вторичному взрывному процессу (кривая 2). Дальнейший рост числа Маха до 2,44 характерен некоторым снижением интенсивности вторичных взрывных процессов и сокращением периода запаздывания их появления за фронтом исходного импульса. Наконец, при $M = 2,59$ отмечается резкое возрастание интенсивности фронта отраженной волны, сменяемого следующей за ним вторичной волной сжатия (кривая 4).

На фиг. 3 представлена серия записей давления в малой ударной трубе на осевом удалении $x_2 = 33$ мм поверхности цилиндрической полости с радиусом кривизны $R_1 = 25$ мм в смеси 15%N₂ + 85% воздух при начальном давлении 0,07–0,1 МПа. Как и в описанных выше опытах на большой ударной трубе, на фиг. 3 при увеличении числа Маха виден переход от горения в полости при $M = 2,12$ к появлению вторичного взрывного процесса при $2,33 < M < 2,42$.

Сравнение результатов, представленных на фиг. 2 и 3, позволяет заключить, что существует качественное подобие процесса воспламенения и развития горения при фокусировке ударных волн в двумерных полостях в исследованном диапазоне начальных давлений. Различия во временных характеристиках процессов в малой и в

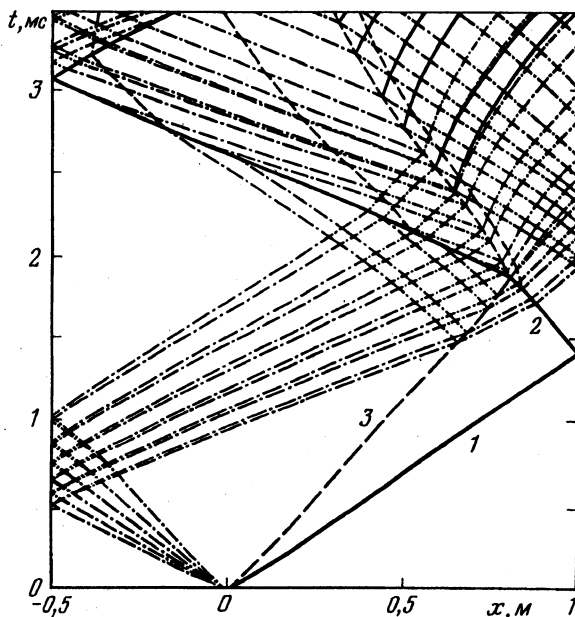


Фиг. 4. Профили давления p (1) и интенсивности свечения U (2), регистрируемые в большой ударной трубе на одинаковом расстоянии от вершины отражателя при постоянном числе Маха для различных отражателей. $a, в$ – клиновидные полости с углами раскрытия 53 и 90° соответственно, $б$ – цилиндрическая полость с радиусом 27 мм

большой ударных трубах могут быть обусловлены различными зависимостями задержек воспламенения от давления при различных температурах [7] и при более чем на порядок различающемся максимальном давлении в отражающей полости. Последнее следует из разницы начальных давлений в камерах высокого давления в обеих использованных трубах. Непосредственное использование зависимостей, полученных в [7], невозможно, так как неизвестны давление и температура в той точке полости, где происходит воспламенение смеси.

Следует отметить, что ни один из описанных режимов взрывного превращения, как при $2,12 < M < 2,44$, ранее не отмечался. При столкновении ударных волн с плоским торцом при $M \leq 2,34$ самовоспламенения смесей $15\%N_2 + 85\%$ воздух отмечено не было. В [4] самовоспламенение смеси $2H_2 + O_2$ прекращалось при отражении на плоском торце волн при $M \leq 2,37$.

Динамика переходного взрывного превращения при неизменной интенсивности падающей волны зависит от геометрии вогнутого отражателя. На фиг. 4 на серии записей давления (кривые 1) и свечения (кривые 2) показаны основные типы взрывного превращения смеси $15\%N_2 + 85\%$ воздух за ударной волной с $M = 2,3 \pm 0,1$. Взрывное превращение зафиксировано в клиновидной полости с углом раскрытия $\alpha_2 = 53^\circ$ (a), в цилиндрической выемке с радиусом кривизны $R_4 = 27$ мм ($б$) и в клиновидной полости с углом раскрытия $\alpha_1 = 90^\circ$ ($в$). Как видно, на клине с $\alpha_2 = 53^\circ$ при фокусировке волны с $M = 2,3$ отмечается взрывной процесс с усилением отраженной волны. В цилиндри-



Фиг. 5. $x-t$ -Диаграмма течения в малой ударной трубе для смеси $15\%H_2 + 85\%N_2$ при $M = 2$. 1 – траектория падающей ударной волны, 2 – траектория отраженной ударной волны, 3 – траектория контактной поверхности

ческой выемке при тех же начальных условиях реализуется взрывной процесс с запаздывающим вторичным взрывом. Наконец, внутри клина с $\alpha_1 = 90^\circ$ реализуется процесс медленного энерговыделения со слабой волной вторичного повышения давления, сопровождаемый умеренным свечением продуктов горения. Установленная в опытах однозначная связь динамики переходных взрывных явлений с геометрией фокусировки ранее не отмечалась.

Кроме процессов внутри фокусирующей полости важно проанализировать поведение отраженной волны после ее удаления от неплоского отражателя. Расчет волновой диаграммы в ударной трубе [8] позволяет понять особенности течения в негорючей среде, например $15\%H_2 + 85\%N_2$.

На фиг. 5 представлена идеальная диаграмма расстояние x -время t для малой ударной трубы при $M \approx 2$. Участок трубы от $-0,5$ м до 0 отвечает камере высокого давления и занят гелием, а участок при $x > 0$ занят смесью $15\%H_2 + 85\%N_2$. В объеме трубы правее контактной поверхности находится исследуемая смесь с водородом. Газовая смесь за проходящей волной движется к торцу со скоростью u_2 (в приведенном примере 460 м/с). Против этого потока идет отраженная волна со скоростью от 370 до 480 м/с при встрече с контактной поверхностью. Некоторое ускорение возникает из-за проникновения веера отраженных от торца камеры высокого давления волн разрежения (штрихпунктирные линии) в зону течения за проходящей волной. Таким образом, возможно ускорение отраженной ударной волны при удалении от неплоского торца до уровня, в 1,3 раза превышающего скорость отраженной ударной волны у торца.

В опытах с горючими смесями в камере низкого давления при $M = 2,19$ ускорение отраженной ударной волны не превосходило такого в негорючей атмосфере. Однако при $M \geq 2,34$ скорость такой волны в лабораторной системе координат достигает 1000 м/с, т.е. $\sim 1450 \pm 50$ м/с относительно потока горючей смеси за про-

ходящей волной. Этот уровень скорости соответствует величине скорости детонации в смеси $15\% \text{H}_2 + 85\% \text{воздух}$ и не может быть достигнут в ударной трубе никаким иным путем.

3. Вероятность самовоспламенения и тип последующего режима горения в горючей смеси зависят от изменения температуры и давления в пространстве и времени. Из предварительных расчетов [4, 5] следует, что при фокусировке ударных волн в полости наблюдаются быстрые изменения температуры и давления во времени, нехарактерные для простого нормального падения волны на плоскую стенку. Размеры наиболее "горючих" зон вместе с полями давления и температуры внутри них увеличиваются после серии сложных взаимодействий отраженных и присоединенных волновых структур. История развития взрывного превращения зависит при этом от соотношения характерных времен и линейных масштабов газодинамических и химических процессов.

В частности, время τ существования зон повышенной температуры должно находиться в определенном соответствии с характерным временем химических реакций θ . При $\tau < \theta$ воспламенения не будет. При $\tau > \theta$ воспламенение произойдет в локальной зоне с размерами δ . Сложное влияние сочетания геометрических и химических факторов на динамику взрыва ясно из опытов при $M = 2,3$ с клиновидными полостями $\alpha_1 = 90^\circ$ и $\alpha_2 = 53^\circ$. В соответствии с [4–5] в полости с α_1 следует ожидать большего разогрева газа, чем в полости с α_2 . В то же время длительность действия высокой температуры в полости с α_2 , напротив, превосходит таковое в полости с большим углом раскрытия и оказывает существенное влияние на процесс горения. При малом δ переход горения в детонацию нереален. Тогда исход развития взрывных процессов при фокусировке ударных волн зависит от линейных размеров фокусирующих полостей.

При увеличении линейных размеров отражающих полостей вероятность появления опасных режимов горения возрастает.

Заключение. Предложенная методика наблюдения взрывных процессов в ударных трубах вблизи двумерных фокусирующих газовый поток концевых элементов позволила ввести чувствительные элементы измерительного оборудования внутрь зоны сходящегося газового течения и обнаружить новые детали развития взрыва в пространстве с неоднородными полями давления и температуры. Переход к реагирующим системам с умеренной реакционной способностью позволил разрешить во времени и пространстве дополнительные особенности переходных процессов возникновения быстрых режимов взрывного превращения, упущенные при опытах со смесями стехиометрического состава.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 97-03-32041) и Фонда Фольксваген.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proc. Intern. Workshop on shock wave focusing / Ed. K. Takayama. SWRS, IFS, Tohoku Univ. 1990. 226 p.
2. Nettleton M.A. Gaseous Detonation: Their Nature, Effects and Control. L.; N.Y.: Chapman and Hall, 1987. 255 p. (Рус. перев.: Неттлетон М. Детонация в газах. М.: Мир, 1989. 278 с.)
3. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Заманский В.М., Лисянский В.В., Скачков Г.И., Трошин К.Я. Воспламенение горючих газовых смесей в условиях фокусировки отраженных ударных волн // Хим. физика. 1988. Т. 7. № 10. С. 1387–1391.
4. Chan C.K., Lau D., Thibault P.A., Penrose J.D. Ignition and detonation initiation by shock focussing // AIP Conf. Proc. V. 208: Proc. 17th Intern. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes, 1989. N.Y.: AIP. 1990. P. 161–166.

5. *Duong D.O., Milton B.E.* The Mach reflection of chock waves in converging, cylindrical channels // *Exper. in Fluids*. 1985. V. 3. № 3. P. 161–168.
6. *Achasov O.V., Labuda S.A., Penyazkov O.G., Ragozin D.S.* Initiation of detonation by gasdynamic methods in half-limited space // *Shock waves. Proc. 20th ISSW / Ed. Sturtevant B. et al. Pasadena. Word Sci.*, 1996. V. 2. P. 1131–1136.
7. *Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Медведев С.П., Хомик С.В., Агафонов Г.Л., Кушарин А.Ю.* Отличительные признаки самовоспламенения водородовоздушных смесей при высоком давлении // *Докл. РАН*. 1993. Т. 330. № 4. С. 457–459.
8. *Yu H-r, Esser B., Lenartz M., Gronig H.* Gaseous detonation driver for a shock tunnel // *Shock waves*. 1992. V. 2. № 4. P. 245–254.

Москва
Аахен

Поступила в редакцию
12.XI.1997