

**Заключение.** На энергетические характеристики взрывного плазменного компрессора влияют два основных параметра: плотность заполнения и отношение массы ВВ к массе пластины. Несмотря на возрастание энергии плазмы, с увеличением плотности заполнения камеры сжатия удельная энергия плазмы уменьшается за счет поступления примесей со стенок камеры сжатия. Для получения высокого КПД компрессора необходимо добиваться увеличения КПД передачи энергии метаемой пластины в энергию плазмы ( $\eta_2$ ) путем подбора соответствующих параметров ( $r_m$  и  $\rho$ ).

Автор выражает благодарность А. А. Дерибасу, А. Е. Войтенко и Л. В. Альтшулеру за обсуждение результатов работы и ценные замечания, а также В. Ю. Афонину за помощь в проведении экспериментов.

*Поступила в редакцию  
15/V 1978*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. D. L. Compton, D. H. Coorer. Proc. of the Ninth Intern. Shock Tube Symposium Standford University, 1973.
2. А. Е. Войтенко, М. А. Любимова, Е. П. Маточкин. Теплофизика высоких температур, 1972, 10, 6.
3. В. И. Кирко, Т. М. Соболенко. ФГВ, 1976, 12, 6, 921.
4. А. А. Дерибас, Н. В. Губарева и др. Тез. докл. Всесоюзного научно-технического совещания (12—14 октября, 1976), Ворошиловград, 1976.
5. Н. В. Губарева, В. И. Кирко, Т. М. Соболенко. ФГВ, 1977, 13, 3.
6. А. Г. Зильберман, К. И. Козорезов. Металловедение и термическая обработка металлов, 1977, 9.
7. А. Е. Войтенко. ПМТФ, 1966, 4.
8. Г. Кнопфель. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., «Мир», 1972.
9. А. Е. Войтенко, В. И. Кирко. ФГВ, 1975, 11, 6, 956.
10. В. К. Crowley, H. D. Glenn. Shock Tubes Proc. of the VII-th Intern. Shock Tube Symp. Ed. by I. I. Glass Toronto, 1969.
11. Л. Г. Лойцанский. Механика жидкости и газа. М., «Наука», 1978.

---

### О ПРЕДЕЛАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НЕПЕРЕМЕШАНЫМИ ФАЗАМИ

*В. М. Гендугов  
(Москва)*

При прохождении ударной волны через трубу, заполненную газообразным окислителем, внутренняя поверхность которой покрыта пленкой жидкого топлива, возможно инициирование детонации [1—4]. Предсказания условий ее возникновения и распространения остаются важнейшими вопросами теории.

Согласно проведенным наблюдениям [1—4], установлено существование пределов распространения детонации. Определим пределы как значения параметров, которые отделяют область их изменения, где наблюдается возникновение и распространение самоподдерживающейся детонации, от области, где ее распространение не происходит.

Анализ структуры волны детонации в рассматриваемых условиях [5] показывает, что пределы по составу смеси газа, доле поверхности трубы, смоченной топливом, и давлению газа лимитируют распростра-

нение детонации в трубе после самовоспламенения горючей смеси за фронтом ударной волны. В то же время пределы по толщине пленки топлива и скорости ударной волны определяют механизм образования горючей смеси в период, предшествующий ее воспламенению.

В настоящей работе дано теоретическое объяснение природы пределов возникновения детонации в гетерогенных системах с предварительно перемешанными фазами по толщине пленки и скорости ударной волны и обоснован метод их расчета.

Пусть ударная волна со скоростью  $u_s$  входит в трубу, заполненную газообразным окислителем, внутренняя поверхность которой покрыта пленкой жидкого топлива. Ударная волна сжимает, разогревает и приводит в движение газ. Одновременно она инициирует в пленке систему волн сжатия и разрежения. Вслед за фронтом скачка уплотнения у поверхности трубы возникает нестационарный пограничный слой, который в окрестности скачка уплотнения ламинарен, а на расстоянии  $x_t$  от него турбулизуется.

Прямыми наблюдениями [3, 4] установлено, что на поверхности пленки топлива длина ламинарного участка пограничного слоя короче, чем на «сухой» поверхности трубы. Этот факт имеет прямое отношение к исследуемому вопросу, и поэтому требует пояснения. Турбулизация пограничного слоя над жесткой поверхностью происходит из-за внутренней неустойчивости, присущей нестационарному слою [6]. При увеличении скорости ударной волны усиливается теплоотдача в стенку, которая в сочетании со сверхзвуковым течением во внешнем потоке приводит к повышению устойчивости ламинарного пограничного слоя.

В отличие от жесткой стенки над поверхностью жидкости турбулизация происходит из-за внутренней неустойчивости нестационарного пограничного слоя и возмущений в газе, которые порождаются системой волн сжатия и разрежения в пленке. Последние способствуют более быстрому переходу ламинарного слоя в турбулентный, в силу чего значения Рейнольдсовых чисел на границе переходной области снижаются. Поскольку с увеличением скорости ударной волны интенсивность возмущений в газе растет, то устойчивость ламинарного пограничного слоя повышается не столь существенно, как над поверхностью «сухой» стенки.

Переходные числа Рейнольдса

$$\text{Re}_t = \frac{\rho_0 u_s \left( \frac{\rho_t}{\rho_0} - 1 \right)^2 x_t}{\mu_e}, \quad (1)$$

рассчитанные по экспериментальным данным турбулизации пограничного слоя над пленкой [3, 4], имеют незначительный разброс в диапазоне изменения числа Маха ударной волны ( $M_s$ ) от 3 до 6. Поэтому в расчетах принимается  $\text{Re}_t = \text{const} = 3 \cdot 10^6$ . Здесь  $\rho_0$ ,  $\rho_e$  — плотность газа перед и за ударной волной;  $\mu_e$  — вязкость газа вне пограничного слоя;  $x_t$  — координата точки перехода ламинарного слоя в турбулентный в системе координат, связанной с ударной волной.

В [7] показано, что за ударной волной на поверхности пленки топлива возникают капиллярные волны. Они образуются при отражении системы волн сжатия и разрежения в пленке от границы раздела газ — жидкость. Пограничный слой, взаимодействуя с поверхностью жидкости, меняет амплитуду этих волн, поэтому пленка может потерять устойчивость. Установлено, что на ламинарном участке пограничного слоя пленка всегда устойчива. Однако переход ламинарного слоя в турбулентный резко меняет характер колебательного движения поверхности жидкости. При этом существуют две возможности развития поверхностного волнения.

Если выполняется неравенство

$$h \leq \frac{10 \cdot \frac{\rho_e}{\rho_0} \cdot \text{Re}_t^{1/8}}{\rho_0 u_s \left( \frac{\rho_e}{\rho_0} - 1 \right)^2} \cdot \frac{\mu_{ж}}{\sqrt{M_{ж}^2 - 1}}, \quad (2)$$

которое получено после преобразования условия устойчивости в [7], то пленка устойчива к воздействию скачка уплотнения. Здесь  $h$  — толщина пленки;  $\mu_{ж}$  — вязкость жидкости на поверхности пленки за ударной волной;  $M_{ж} = u_s/a_{ж}$ ;  $a_{ж}$  — скорость звука в жидкости. В противном случае пленка разрушается.

Исследуем роль устойчивости пленки в возникновении детонации в гетерогенных системах с предварительно перемешанными фазами. Пусть пленка устойчива к воздействию ударной волны, скользящей вдоль ее поверхности. Тогда единственно возможным механизмом образования горючей смеси за фронтом скачка уплотнения является испарение топлива с поверхности жидкости. Расчеты показывают [8], что в отсутствие горения и при  $M_s < 5$  концентрация паров топлива на поверхности пленки (и, следовательно, внутри пограничного слоя) ниже концентрационных пределов самовоспламенения смеси. Поэтому инициирование детонации ударной волной в этом случае невозможно.

Пусть пленка такова, что при прохождении ударной волны она теряет устойчивость. Разрушение пленки вне зависимости от ее толщины происходит непосредственно за точкой  $x_t$ , когда с гребней поверхностных волн срываются капли топлива или амплитуда волн становится соизмеримой с половиной толщины пленки. В обоих случаях капли топлива, попадающие в поток газа, продолжают дробиться. Окончательные их размеры, оцененные по числу Вебера [9], не превышают нескольких микрон. В силу турбулентного перемешивания и испарения частиц топлива в пограничном слое образуется парогазовая смесь и создается условие возникновения детонации.

Таким образом, необходимым условием возникновения детонации в гетерогенных системах с предварительно перемешанными фазами при ее инициировании ударной волной является потеря устойчивости пленки топлива за фронтом скачка уплотнения. Поэтому расчет пределов возникновения детонации по толщине пленки и скорости ударной волны необходимо вести по соотношению (2).

Поскольку вязкость и скорость звука в жидком топливе существенно зависят от температуры жидкости за ударной волной, они вычисляются при температуре пленки в точке  $x_t$ . Температура в этой точке определяется из соотношения [8]

$$\frac{T_w}{T_0} - 1 = 0,489 \sqrt{\frac{\pi \rho_0 c_p \lambda_e}{2 \rho_T c_T \lambda_T} \left( 1 + 1,665 \frac{\rho_e}{\rho_0} \right) \left[ \frac{T_e}{T_0} - 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \left( \frac{u_e}{a_0} \right)^2 \right]},$$

которое получено путем совместного решения уравнений ламинарного пограничного слоя и уравнения теплопроводности за скачком уплотнения. Здесь  $T_w$  — температура поверхности пленки;  $T_0$ ,  $T_e$  — температура газа перед ударной волной и за ней;  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $\lambda$  — теплопроводность газа;  $\rho_T$ ,  $c_T$ ,  $\lambda_T$  — плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность жидкого топлива;  $a_0$  — скорость звука;  $\gamma$  — показатель адиабаты;  $u_e$  — скорость газа.

Из анализа правой части уравнения (2) следует, что при заданных начальных условиях значения  $h$  лежат в физически реальной области, если  $u_s > a_{ж}$ . При  $u_s \leq a_{ж}$  пленка любой конечной толщины устойчива к воздействию ударной волны и детонация не может возникнуть.

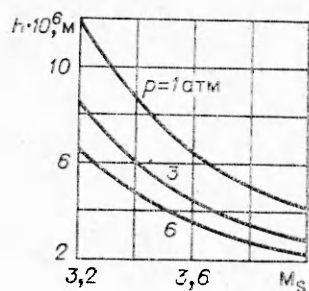


Рис. 1.

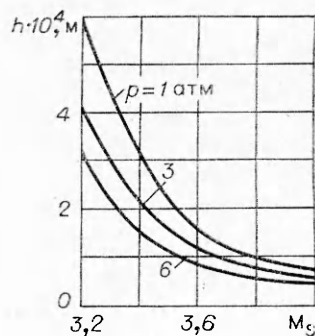


Рис. 2.

Таким образом, видно существование пределов скорости ударной волны, способной инициировать детонацию. Непосредственными расчетами установлено, что предел скорости ударной волны снижается с увеличением начальной температуры системы и повышением давления в газе. Для большинства топлив (индивидуальные углеводороды, масла) при начальной температуре 300 К и давлении газа от 1 до 6 атм предельные числа Маха лежат в диапазоне от 2,8 до 3.

Зависимость предела возникновения детонации по толщине пленки от начального давления в газе и скорости ударной волны, которая способна инициировать детонацию, проявляется через плотность газа и температуру поверхности жидкости за скачком уплотнения. На рис. 1 приведены теоретические кривые таких зависимостей для топлива *n*-гексан; начальная температура 300 К; начальное давление в газе варьировалось от 1 до 6 атм. Видно, что с увеличением скорости ударной волны и начального давления в газе значение предельных толщин уменьшается.

На рис. 2 приведены аналогичные кривые для масла ВМ-4. Резкое увеличение предельных значений толщины пленки в этом случае обусловлено тем, что вязкость масла ВМ-4 на порядок больше, чем у *n*-гексана.

Возникновению детонации в гетерогенных системах с предварительно перемешанными фазами предшествует процесс переноса топлива с поверхности жидкости в пограничный слой за ударной волной. Проведенное исследование позволяет установить (по крайней мере для рассмотренных жидких топлив), что если число Маха инициирующей ударной волны менее 5, то образование парогазовой смеси происходит в результате потери устойчивости пленки за фронтом скачка уплотнения. Однако самовоспламенение смеси, а следовательно, и возникновение детонации возможны только при наличии дополнительных ограничений, связанных с начальными условиями, например с концентрацией окислителя в газе. Поэтому потерю устойчивости пленки топлива за ударной волной следует рассматривать как необходимое условие возникновения детонации.

Получена связь скорости инициирующей ударной волны с предельной толщиной пленки жидкого топлива. Показано, что, если скорость волны меньше скорости звука в топливе за скачком уплотнения, пленка устойчива при любой толщине. Тем самым установлено существование нижней границы скоростей ударных волн, способных инициировать детонацию.

Пределы возникновения детонации не совпадают с пределами ее распространения, полученными в работах [10—12]. Объясняется это прежде всего тем, что пределы распространения детонации по толщине пленки, концентрации окислителя в газе, доле поверхности трубы,

смоченной топливом, связаны между собой и зависят от физико-химических свойств фаз гетерогенной системы, начальных условий, структуры детонационной волны и характерного размера трубы. Поэтому, например, пределы распространения детонации по толщине пленки могут оказаться и больше, и меньше пределов возникновения по толщине пленки.

Поступила в редакцию  
22/XI 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1965, 162, 1.
2. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1967, 175, 1.
3. С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. Докл. АН СССР, 1968, 182, 1.
4. К. Регланд, Я. Николс. РТК, 1969, 7, 5.
5. И. Н. Зверев, В. М. Гендугов, Н. И. Зверев. ФГВ, 1975, 11, 6.
6. Г. Маирлс.— В сб.: Ударные трубы. М., ИЛ, 1962.
7. В. М. Гендугов. ФГВ, 1978, 14, 1.
8. В. М. Гендугов, И. Н. Зверев. Вестн. МГУ. Мат. и мех., 1973, 1.
9. Ф. А. Вильямс. Теория горения. М., «Наука», 1971.
10. В. М. Гендугов, Л. Г. Ильясова. ФГВ, 1976, 12, 1.
11. С. А. Лесняк, В. Г. Слуцкий. ПМТФ, 1975, 4.
12. С. А. Лесняк, В. Г. Слуцкий. ФГВ, 1977, 13, 5.

### ОБРАЗОВАНИЕ ОЧАГОВ В ТРОТИЛЕ И ТЕТРИЛЕ ПРИ СЛАБОМ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*С. Г. Андреев, М. М. Бойко, И. Ф. Кобылкин, В. С. Соловьев*  
(Москва)

Поведение ВВ при нагружении слабыми ударными волнами изучено сравнительно мало. Это, отчасти, обусловлено трудностью получения контролируемых профилей нагрузок в диапазоне  $1 \div 10$  кбар большой длительности. Такая интенсивность ударной волны недостаточна для инициирования нормальной детонации в большинстве бризантных ВВ, поэтому возникающая химическая реакция протекает в форме горения или в форме низкоскоростного режима. Более полное представление об этих взрывчатых превращениях можно получить, исследуя сохраненные образцы после нагружения.

Методы сохранения образцов, применяемые в [1, 2], имеют определенные недостатки. Так, взрывчатое вещество, заключенное в прочную капсулу, нагружается сложным образом и при малых давлениях трудно определить параметры нагружения. Нагружение образцов ВВ в бассейне с водой [1] вообще не позволяет сохранять образцы ВВ.

В настоящей работе описывается схема, позволяющая исключить отмеченные недостатки и получать «сохраненные» образцы ВВ после нагружения их ударной волной требуемого профиля, близкого к прямоугольному. Приводятся результаты по нагружению образцов ВВ из ТНТ и тетрила. Использовался литой ТНТ со столбчатой структурой с продольным размером зерен  $3 \div 5$  мм и поперечным размером  $200 \div 400$  мкм, плотность заряда составляла  $1,59$  г/см<sup>3</sup>. Прессованные шашки из ТНТ и тетрила имели плотность  $1,58$  и  $1,60$  г/см<sup>3</sup> и средний размер зерен  $20 \div 200$  и  $50 \div 600$  мкм соответственно.

Образец ВВ (диаметр — 15, высота — 10 мм) помещался в инертную среду, сжимаемость которой близка к сжимаемости ВВ. Инертная среда, воспринимающая ударную нагрузку, заключалась в жесткую трубу, чем достигалось практически плоскосимметричное течение (рис.