

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hirschfelder J. O., Curtiss C. F.* Theory of detonations. 1. Irreversible unimolecular reaction. J. Chem. Phys., 1958, vol. 28, No. 6.
2. *Linder B., Curtiss C. F., Hirschfelder J. O.* Theory of detonations. 2. Reversible unimolecular reaction. J. Chem. Phys., 1958, vol. 28, No. 6.
3. *Curtiss C. F., Hirschfelder J. O., Barnett M. P.* Theory of detonations. 3. Ignition temperature approximation. J. Chem. Phys., 1959, vol. 30, No. 2.
4. *Hirschfelder J. O., Curtiss C. F., Barnett M. P.* Ignition temperature approximation for bimolecular detonations. Phys. Fluids, 1961, vol. 4, No. 2.
5. *Wood W. W.* Existence of detonations for small values of the rate parameter. Phys. Fluids, 1961, vol. 4, No. 1.
6. *Wood W. W.* Existence of detonations of large values of the rate parameter. Phys. Fluids, 1963, vol. 6, No. 8.
7. *Toshitaka Fujiwara.* Plane steady Navier—Stokes detonations of oxyzone. J. Phys. Soc. Japan, 1970, vol. 28, No. 5.
8. *Вильямс Ф. А.* Теория горения. М., «Наука», 1971.
9. *Гиршфельдер Дж., Кергисс Ч., Берд Р.* Молекулярная теория газов и жидкостей. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
10. *Reyn J. W.* Classification and description of the singular points of a system of three linear differential equations. ZAMP, 1964, vol. 15, No. 5.
11. *Рождественский Б. Л., Яненко Н. Н.* Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. М., «Наука», 1968.
12. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1954.
13. Основы газовой динамики. М., Изд-во иностр. лит., 1963.

УДК 534.222.2

**РАСПАД РАЗРЫВА С УЧЕТОМ РЕАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ
ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЗРЫВЧАТОГО
ВЕЩЕСТВА**

О. С. ПОПЕЛЬ, О. А. СИНКЕВИЧ

(Москва)

Рассмотрена задача о распаде произвольного разрыва, связанного с выходом детонационной волны на границу заряда конденсированного ВВ. В численных расчетах использовалось реальное уравнение состояния продуктов детонации гексогена. Построена u — p -диаграмма, которая позволяет проводить графические расчеты распада разрыва для различных сред.

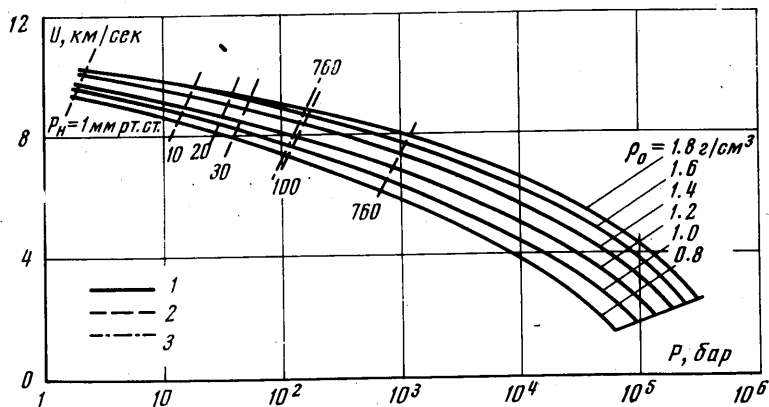
Проведено сопоставление рассчитанных значений начальных скоростей ударных волн с экспериментальными данными, полученными на некотором расстоянии от заряда ВВ. Показано, что увеличение давления газа, в которой происходит разлет продуктов взрыва, приводит к уменьшению начальной скорости ударной волны и к усилению затухания в процессе ее дальнейшего движения в ударной трубе.

1. В связи с созданием взрывных ударных труб [1–4] возникает необходимость расчета параметров ударных волн, получаемых в таких устройствах. Первым шагом в этом направлении является решение задачи о распаде произвольного разрыва, вызванного выходом детонационной волны на границу заряда конденсированного взрывчатого вещества. При взрыве конденсированного ВВ в продуктах детонации развиваются давления в сотни тысяч атмосфер и температуры в несколько тысяч градусов [5]. Образование ударной волны в газе с начальным давлением p_H порядка нескольких миллиметров ртутного столба приводит к расширению продуктов взрыва до нескольких атмосфер. Описать процесс расширения в таком широком диапазоне параметров можно лишь при использовании реального уравнения состояния продуктов детонации, учитывающего эффекты взаимодействия между частицами.

Непосредственно применять данные экспериментального и теоретического исследований изэнтроп расширения продуктов детонации конденсированных ВВ, приведенные в работах [6–10], для расчета распада взрыва во взрывных ударных трубах не удается по двум причинам. Во-первых, в этих работах рассматривается расширение

ние продуктов детонации до нескольких тысяч атмосфер, в то время как требуются данные по расширению до давлений на два-три порядка меньших. Во-вторых, в работе [10] на основе уравнения состояния [9] исследуется изменение лишь термодинамических параметров вдоль изотроп расширения, в то время как для расчета распада разрыва необходимо знание еще и изменения скорости продуктов детонации в процессе расширения.

2. Задача о распаде разрыва может быть решена с помощью $u-p$ -диаграммы [11]. Давление и скорость на контактной поверхности и, следовательно, за фронтом



Фиг. 1

ударной волны определяются в результате пересечения адиабаты Пуассона для продуктов взрыва и адиабаты Гюгонно для ударной волны.

Изэнтропа расширения описывается системой уравнений

$$(2.1) \quad \left(\frac{\partial E}{\partial \rho} \right)_s = p/\rho^2, \quad du = \frac{1}{\rho} \sqrt{dp d\rho}$$

Обоснование возможности рассмотрения процесса расширения продуктов детонации как изэнтропийного дано в [10].

Уравнение состояния продуктов детонации бралось из работы [9]. Оно позволяет рассчитывать не только давление и энергию расширяющихся продуктов детонации, но и такие параметры, как температура, теплоемкость, скорость звука.

В качестве начальных условий для уравнений (2.1) берутся условия в точке Жуге

$$(2.2) \quad \rho = \rho_* \rightarrow E = E_*, \quad u = u_*$$

Для сильной ударной волны адиабата Гюгонно имеет вид

$$(2.3) \quad u \approx \frac{2}{\gamma_e + 1} M a_H, \quad p \approx \frac{2}{\gamma_e + 1} M^2 \rho_H a_H^2$$

Здесь γ_e — эффективный показатель адиабаты газа; $M = U/a_H$ — число Маха ударной волны; ρ_H , a_H — плотность и скорость звука в газе перед фронтом ударной волны; U — скорость ударной волны.

Ударные адиабаты для аргона рассчитывались с использованием данных работы [12], в которой состояние газа за фронтом ударной волны рассматривалось с учетом возбуждения, многократной ионизации и кулоновского взаимодействия.

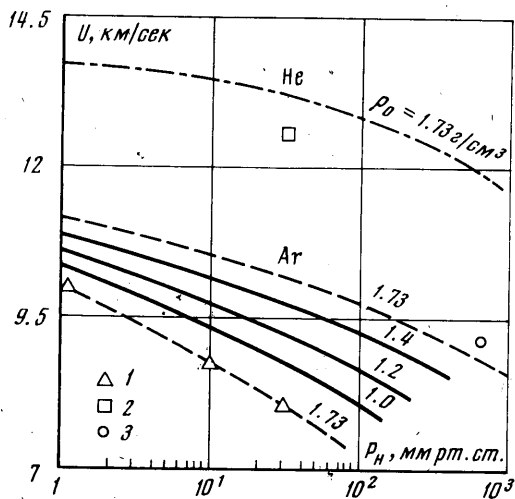
Условием пересечения адиабат Пуассона и Гюгонно является равенство скоростей и давлений справа и слева от контактной поверхности

$$(2.4) \quad u_+ = u_-, \quad p_+ = p_-$$

Система уравнений (2.1) — (2.4) с учетом уравнения состояния [9] решалась численно на ЭЦВМ БЭСМ-6. В результате ее решения построена $u-p$ -диаграмма и найдены зависимости параметров продуктов детонации и ударно нагретого газа на контактной поверхности в функции плотности заряжания ВВ и давления газа перед фронтом ударной волны p_H .

На фиг. 1 изображена u - p -диаграмма, построенная для различных плотностей заряжения гексогена ρ_0 . Здесь приняты следующие обозначения: 1 — изэнтропы расширения продуктов детонации гексогена; 2, 3 — соответственно адиабаты Гюгонно для аргона ($T_H=300^\circ\text{K}$, $p_H=1, 10, 20, 30, 100, 760$ мм рт. ст.) и гелия ($T_H=300^\circ\text{K}$, $p_H=1$ бар). Наличие u - p -диаграммы позволяет проводить графический расчет параметров ударных волн в различного рода средах.

Решение задачи о распаде разрыва дает лишь начальные параметры ударной волны в канале взрывных ударных труб. Последующее движение ударной волны связано с уменьшением ее скорости вследствие влияния неоднородного распреде-



Фиг. 2

ления параметров в продуктах реальной детонации. Это обстоятельство необходимо иметь в виду при сопоставлении расчетных данных и результатов эксперимента по измерению скорости ударной волны на некотором расстоянии от заряда ВВ. На фиг. 2 нижняя пунктирная кривая представляет собой результаты экспериментов [1, 2] на расстоянии 1.7 м от заряда (гексоген, $\rho_0=1.73$ г/см³). Верхняя пунктирная линия и сплошные кривые представляют собой результаты расчетов начальных скоростей ударных волн при различных плотностях заряжения гексогена. Видно, что увеличение давления p_H приводит к уменьшению начальной скорости ударной волны и к усилению затухания ударной волны в процессе дальнейшего движения. Так, при $p_H=1$ мм рт. ст. уменьшение скорости ударной волны на расстоянии 1.7 м составляет 1 км/сек, а при $p_H=30$ мм рт. ст. уменьшение скорости достигает 2 км/сек.

Зависимость начальной скорости ударной волны от давления p_H в гелии для заряда гексогена с плотностью $\rho_0=1.73$ г/см³ изображена на фиг. 2 штрихпунктирной линией. Здесь же нанесены экспериментальные данные 2, 3 работ [3, 2], соответствующие разным начальным давлениям и расстояниям от заряда 0.75 и 1.7 м. Скорость ударной волны в гелии оказывается больше, чем в аргоне того же давления, однако число Маха меньше. При уменьшении давления $p_H \rightarrow 0$ кривые фиг. 2, соответствующие одинаковым плотностям заряжения ρ_0 , по-видимому, должны выходить на общие асимптоты, не зависящие от рода газа. Скорость при этом будет равняться скорости разлета продуктов детонации в вакуум.

Поступила 4 III 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Савров С. Д., Дремин А. Н. Новый метод генерации сильно ударных волн в газе. Докл. АН СССР, 1970, т. 194, № 4, стр. 811—817.
2. Савров С. Д., Лебедев Е. Ф., Кузнецов Ю. А. Ударные трубы для исследования нестационарных течений плазмы при больших магнитных числах Рейнольдса. Магнитогидродинамический метод получения электроэнергии. М., «Энергия», 1972, стр. 152—160.

3. *Seay G. E., Seely L. B., Fowler R. G.* Production of high ion densities in helium by means of high explosives. *J. Appl. Phys.*, 1961, vol. 32, No. 11, pp. 2439–2447.
4. *Freiwald D. A.* Strong shock propagation through decreasing density. *J. Fluid Mech.*, 1972, vol. 54, No. 2, p. 297.
5. *Станюкович К. П.* Неуставившиеся движения сплошной среды. М., «Наука», 1971.
6. *Jones H., Miller A. R.* The detonation of solid explosives. *Proc. Roy. Soc. (London)*, 1948, Ser. A, vol. 194, p. 480.
7. *Deal W. E.* Measurement of the reflected shock hughoniot and isentrope for explosive reaction products. *Phys. fluids*, 1958, vol. 1, No. 6, p. 523.
8. *Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Телегин Г. С.* Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ. ПМТФ, 1969, № 4, стр. 127–132.
9. *Кузнецов Н. М., Шведов К. К.* Уравнение состояния продуктов детонации гексогена. *Физика горения и взрыва*, 1966, № 4, стр. 85–96.
10. *Кузнецов Н. М., Шведов К. К.* Изэнтропическое расширение продуктов детонации гексогена. *Физика горения и взрыва*, 1967, № 2.
11. *Курант Г., Фридрихс К.* Сверхзвуковое течение и ударные волны. М., Изд-во иностр. лит., 1950.
12. *Козлов Г., Ступицкий Е. Л.* Расчет состояния аргона за падающей ударной волной в диапазоне чисел Маха от 20 до 50 с учетом возбуждения, многократной ионизации и кулоновского взаимодействия. ПМТФ, 1968, № 3.

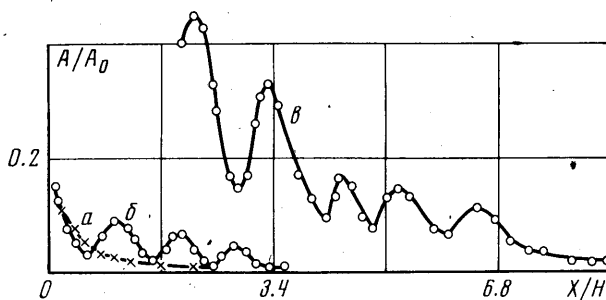
УДК 536.25:532.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКОНВЕКТИВНЫХ ВОЛН

Ю. И. БАРКОВ, Б. М. БЕРКОВСКИЙ, В. Е. ФЕРТМАН

(Минск)

При периодическом процессе теплообмена на границах твердых тел, жидкостей и газов в них распространяются обусловленные теплопроводностью температурные колебания. Эти колебания в изотермической вязкой жидкости быстро затухают: на одной длине волны их амплитуда уменьшается в $e^{2\pi} \approx 540$ раз [1]. В реальных условиях при существовании температурного и гравитационного полей возникающее конвективное движение должно существенно влиять на процесс распространения тем-



Фиг. 1

пературных колебаний. В работах [2, 3] исследовалась обратная задача: влияние на конвективную устойчивость слоя температурных колебаний, распространяющихся в глубь жидкости от границы, на которой периодически меняется температура. Задача о распространении слабозатухающих термоконвективных волн в вязкой теплопроводящей несжимаемой жидкости впервые была рассмотрена в [4]. Распространение термоконвективных волн в горизонтальном слое жидкости со свободными границами до и после потери устойчивости равновесия анализируется в [5].

В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментального исследования распространения температурных возмущений при естественной развитой конвекции в горизонтальном слое воздуха, равномерно подогреваемом снизу.