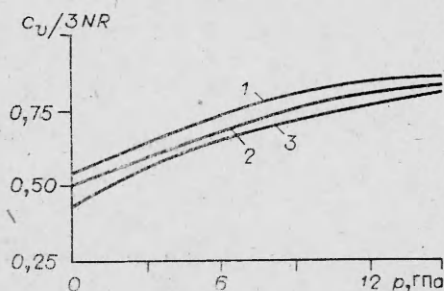


Рис. 3. Зависимость теплоемкости $c_v/3NR$ от давления.



Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) экспериментальные и теоретические ударные адибаты хорошо согласуются вплоть до давлений, инициирующих детонацию;

2) температура ударного сжатия с точностью до 5% совпадает с величиной температуры, вычисленной по задержке адиабатического взрыва [11].

В заключение автор выражает благодарность А. М. Гришину за полезные обсуждения работы.

Поступила в редакцию 18/XII 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил, О. К. Розанов и др. Докл. АН СССР, 1960, 131, 4.
2. А. Н. Дремин, К. К. Шведов, О. С. Авдонин. ФГВ, 1970, 6, 4.
3. И. М. Воскобойников, А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов. ФГВ, 1967, 3, 4.
4. Т. Н. Фортова, К. Г. Шкадинский, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1977, 13, 1.
5. Н. Х. Ахмадеев. ФГВ, 1981, 17, 1.
6. Цянь Сюэ-сен. Физическая механика. М.: Мир, 1965.
7. А. И. Китайгородский. Молекулярные кристаллы. М.: Наука, 1971.
8. Ю. М. Ковалев, В. А. Шляпочников. Изв. АН СССР. Сер. хим., 1979, 11.
9. J. M. Walsh, R. H. Christian. Phys. Rev., 1955, 97, 6.
10. Л. Жирифалько. Статистическая физика твердого тела. М.: Мир, 1975.
11. А. Ф. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва /Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
12. Е. Ю. Орлова. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. М.: Оборонгиз, 1960.
13. Ф. Боуден, И. Иоффе. Быстрые реакции в твердых взрывчатых веществах. М.: ИЛ, 1962.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ПЕРЕДАЧИ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ЧЕРЕЗ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

В. А. Субботин, С. П. Усольцев
(Новосибирск)

Детонационные процессы в водных пенах, образованных взрывчатыми газовыми смесями, исследовались в работах [1, 2], где установлено, что в пене при относительно высоких концентрациях жидкости наблюдаются стационарные детонационные волны, скорость которых близка к скорости газовой детонации.

В [1] опыты проводили в трубе диаметром 28 мм с пеной, пузырьки которой содержали стехиометрическую пропан-кислородную смесь. Детонационный процесс наблюдался в том случае, когда диаметр большинства пузырьков был больше 3—4 мм, при этом массовая концентрация жидкой фазы доходила до 17 кг/м³.

В [2] исследовали параметры детонационных волн в водных пенах, образованных пропан- и метан-кислородными смесями стехиометрического состава. Применяли трубы диаметром 50 и 80 мм, детонацию инициировали электродетонатором. Детонация возникала в пенах с размером пузырьков от 1—2 до 5—6 мм и концентрацией жидкости от 1 до 8 кг/м³.

Незначительное снижение скорости детонации в двухфазной среде, в которой массовая концентрация жидкой фазы на порядок больше

газовой, на наш взгляд, является интересным экспериментальным фактом, требующим дополнительного исследования. В [2] высказано предположение о том, что этот результат есть следствие струйного механизма передачи детонации от ячейки к ячейке.

Процесс взаимодействия газовой детонации в стехиометрической пропан-кислородной смеси с жидкими пленками, помещенными внутрь прямоугольной трубы сечением 20×23 мм, рассмотрен в [3]. В этой работе делается вывод о том, что жидкие пленки мгновенно дробятся на капли, при этом скорость детонации не уменьшается и остается примерно равной скорости детонации в газе.

В данной работе проведено исследование процесса передачи газовой детонации через жидкие пленки. В отличие от [3] обнаружено сильное влияние жидких перегородок на детонационную волну: сразу за пленкой детонация распадается на ударную волну и фронт горения, затем детонация восстанавливается.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Передачу детонации через жидкие пленки изучали путем фотографической регистрации процесса распространения детонации по заполненному взрывчатой смесью ячейкам, сформированным из мыльных пленок с помощью проволочного каркаса. Схема установки приведена на рис. 1. Прямоугольный каркас из медной проволоки диаметром 0,9 мм крепился на основании из оргстекла 1 с помощью стоек 2. Верхняя часть каркаса имела поперечные перемычки 3, нижняя часть — проволочная рамка, приподнятая над основанием на высоту около 2 мм. К торцу каркаса примыкала трубка внутренним диаметром 14 мм. На противоположный конец трубки навинчивался стакан из оргстекла с электродами, между которыми имелся разрядный промежуток, и штуцером для подвода газа. Вблизи электродов внутри трубки помещалась проволочная спираль длиной около 100 мм, служившая для сокращения преддетонационного расстояния. Длина трубки со стаканом составляла 0,2 м. Контрольные опыты, в которых внутри трубки помещались закопченные фольги, показали, что даже при очень маломощном поджиге к концу трубки успевала сформироваться стационарная детонационная волна, поперечный размер ячейки в которой составлял 1 мм.

Перед опытом трубка продувалась смесью пропан-бутан + $5O_2$ и со стороны каркаса «заклеивалась» мыльной пленкой. Затем с помощью гибкого шланга с наконечником между перемычками каркаса выдувались мыльные пузыри, которые после соприкосновения с каркасом и друг с другом трансформировались в ячейки с плоскими боковыми стенками и выпуклой верхней поверхностью. В случае необходимости излишки газа из ячейки отсасывались с помощью медицинского шприца.

Данная методика позволяла наполнять соседние ячейки различными газами, что, на наш взгляд, является существенным ее достоинством. Недостаток этого метода заключается в том, что, на фоторазвертках процесса фиксируется темная зона, распространяющаяся вслед за фронтом волны. Внутри этой зоны полностью экранируется теневая картина явления и существенно ослабляется самосвечение процесса. Возникновение темной зоны можно объяснить поглощением и рассеянием света на каплях, образующихся в результате взаимодействия волны с боковыми пленками. Прозрачность среды постепенно восстанавливается, если с боковыми пленками взаимодействует детонационная волна. Это происходит быстрее при более высоких параметрах

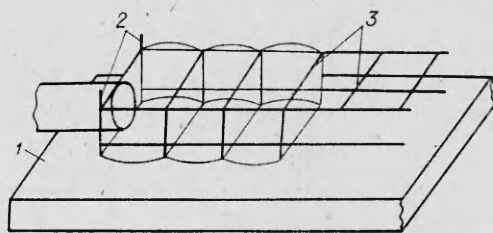


Рис. 1.

детонационной волны. За ударными волнами среда остается непрозрачной в течение всего времени регистрации процесса. Естественно предположить, что восстановление прозрачности среды объясняется испарением капель жидкости.

В экспериментах в основном использовалась смесь пропан-бутан + $5O_2$. Пропан-бутан брался из баллонов для бытовых целей, процентное содержание бутана в пропане не контролировалось. В некоторых экспериментах одна или несколько ячеек наполнялись смесью $2H_2 + O_2 + 3Ag$ либо воздухом. Ацетилен-кислородную смесь в данных опытах использовать не удалось, так как оказалось, что ацетилен довольно быстро улетучивается через мыльные пленки. Это явление объясняется достаточно высокой растворимостью ацетилена в воде, которая примерно на порядок больше растворимости пропана.

Фоторегистрация процесса проводилась путем развертки самосвечения и теневой картины, а также посредством шпирен-киносъемки. Для этого использовались барабанный фоторегистратор, камера СФР и теневой прибор ИАВ-451. Для получения разверток перед каркасом устанавливался экран со щелью, располагавшейся посредине высоты каркаса, с масштабными метками, нанесенными через 50 мм. Масштабные метки выполнены в виде пропилов в экране шириной 1 и глубиной 2 мм и на развертках фиксируются в виде светлых линий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Развертка самосвечения процесса в смеси пропан-бутан + $5O_2$ приведена на рис. 2. Видно, что скорость фронта самосвечения непостоянна: сразу за пленкой она несколько ниже, а затем несколько выше стационарной скорости детонации, которая устанавливается к концу ячейки, образованной мыльными пленками. Резкое уменьшение яркости свечения за фронтом волны объясняется дроблением боковых пленок, расположенных между светящимся газом и объективом фоторегистратора. Свечение газа за фронтом неравномерное: ярче светятся траектории газа, прошедшего через низкоскоростной участок процесса.

Шпирен-развертка детонации в той же смеси приведена на рис. 3. Здесь светлые горизонтальные линии соответствуют масштабным меткам, темные — жидким перегородкам. В первых трех ячейках низкоскоростной участок процесса существенно больше, а темная зона отстает от переднего фронта дальше, чем в последующих ячейках. Эти особенности объясняются тем, что форма фронта волны вблизи выхода детонации из трубки близка к сферической и радиус кривизны увеличивается по мере движения волны. На низкоскоростном участке траектории фронт волны движется со скоростью $\approx 0,6D$, где D — скорость детонации в газе. За низкоскоростным участком скорость скачком возрастает и становится больше D , а затем плавно уменьшается до D .

На фоторазвертках видны волны сжатия, распространяющиеся против потока. Каждая пара волн возникает в результате взаимодействия детонационной волны с жидкими перегородками: первая волна появляется в момент падения детонационной волны на жидкую перегородку, вторая волна распространяется на расстоянии 6—10 мм вслед за первой. Следует отметить, что траектории обеих волн прослеживаются и на многих развертках самосвечения, где они регистрируются в виде более ярко светящихся линий. Первая волна сжатия представляет собою волну, отраженную от жидкой перегородки. Она возникает всегда независимо от того, каким газом заполнена следующая за пленкой ячейка. Вторая волна не возникает, если следующая за пленкой ячейка заполнена негорючим газом или смесью $2H_2 + O_2 + 3Ag$. Так, на рис. 3 в конце последней ячейки, граничащей с воздухом, вторая волна не наблюдается.

На рис. 4 приведена шпирен-развертка для случая, когда четвертая ячейка (на снимке она расположена за наиболее длинной ячейкой) заполнена смесью $2H_2 + O_2 + 3Ag$, а остальные — смесью пропан-бутан + $5O_2$.



Рис. 2.



Рис. 3.

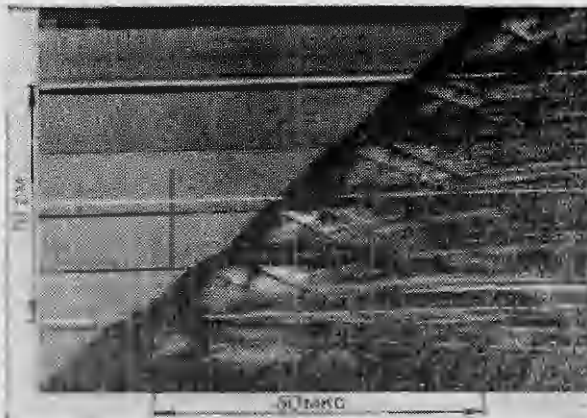


Рис. 4.

Здесь, как и в негорючем газе, в начале четвертой ячейки вторая волна сжатия не образуется, а в пятой ячейке наблюдается целая система таких волн. К сожалению, темная зона затеняет траектории вторых волн вблизи фронта, однако с достаточной уверенностью можно утверждать, что место их возникновения примерно совпадает с точкой перехода от низкоскоростного участка траектории к высокоскоростному. Существенное удлинение низкоскоростного участка траектории в пятой ячейке произошло из-за того, что предыдущая ячейка была заполнена смесью $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$. Анализ нескольких полученных таким методом «растянутых» низкоскоростных участков траекторий позволяет сделать качественные заключения о характере изменения скорости. В начале таких участков наблюдается спад скорости, затем спад прекращается и скорость остается практически постоянной и, наконец, начинает более или менее плавно возрастать. Плавный участок возрастания скорости завершается скачком, появление которого естественно связать с переходом горения в детонацию. Тогда вторую волну сжатия можно считать волной детонации, генерируемой в момент перехода горения в детонацию [4].

Если одна из ячеек заполнялась воздухом, то детонация за ней не возбуждалась, хотя в некоторых экспериментах скорость ударной волны в начале следующей ячейки была на 100—150 м/с выше, чем в опыте, приведенном на рис. 4. При этом в смеси пропан-бутан + 5O_2 наблюдался монотонный спад скорости волны. Этот факт говорит о том, что восстановление детонации за пленкой происходит за счет поджигания взрывчатой смеси горячими продуктами сгорания с последующим переходом горения в детонацию. В соответствии с этим будем называть низкоскоростной участок траектории фронта, видимый непосредственно за пленкой, преддетонационным. Все наблюдавшиеся в данных экспериментах искусственно растянутые преддетонационные расстояния не превышали 25—30 мм, хотя в гладкой трубе диаметром 28 мм это расстояние равно 0,8 м [1]. Следует также отметить, что в наших экспериментах условия для перехода горения в детонацию значительно хуже вследствие того, что газ заключен в очень слабую оболочку из мыльных пленок. Сгорание газа в мыльных пленках сопровождается его расширением во все стороны, а не только вперед, как это происходит при поджигании смеси у закрытого конца трубы. В этих условиях постоянство скорости ударной волны, поддерживаемой горением, можно обеспечить за счет высокой скорости сгорания смеси, по порядку величины соизмеримой со скоростью сжатого газа относительно фронта волны. На искусственно «растянутых» преддетонационных режимах в смеси пропан-бутан + 5O_2 эта скорость была около 190 м/с. Скорость горения порядка 100 м/с можно ожидать лишь в турбулентных пламенах. Турбулентное перемешивание продуктов сгорания и несгоревшего газа может происходить сразу после разрушения жидкой пленки.

Для проверки этого предположения проведена шпиреп-киносъемка процесса разрушения пленки детонационной волной. Внутри трубки, закрытой мыльной пленкой, находилась смесь пропан-бутан + 5O_2 ,

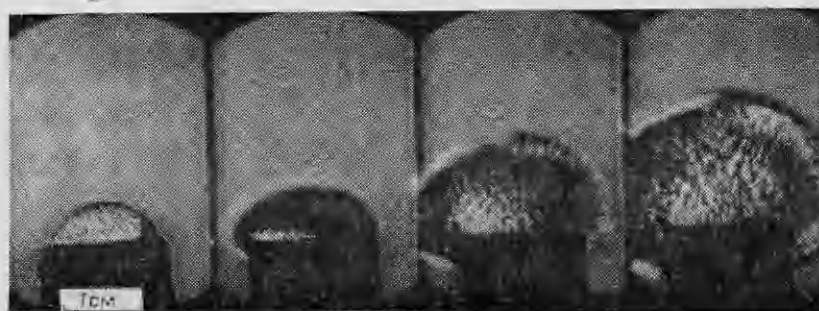


Рис. 5.

снаружи — воздух. Поверхность пленки — выпуклая, ее форма видна на первом кадре рис. 5 (время между кадрами 4 мкс). За фронтом волны в правой половине третьего кадра наблюдаются неоднородности в виде черточек длиной около 3 мм, ориентированных перпендикулярно фронту волны. Эти неоднородности, по-видимому, соответствуют струям газа, образующимся после разрушения пленки, которые способствуют турбулизации контактной поверхности и интенсифицируют процесс перехода горения в детонацию.

Таким образом, можно считать, что предположение, высказанное в [2], о струйном механизме передачи детонации от ячейки к ячейке подтверждается экспериментально.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изложенные выше результаты экспериментов позволяют качественно описать процесс передачи детонации через жидкую перегородку. На рис. 6 представлена t, x -диаграмма процесса. Детонационная волна OA падает на пленку в точке A и частично отражается от нее в виде волны сжатия AB (первые волны сжатия на рис. 3). Продукты детонации в виде струй прорываются через пленку и за нею образуется сильно турбулизированный слой, в котором продукты детонации перемешаны с несгоревшим газом. Быстрое сгорание газа в этом слое создает волны сжатия, идущие к переднему фронту и в сгоревший газ. Волны сжатия, догоняющие ударный фронт, ускоряют его. Температура и давление в частицах газа, пересекающих ударный фронт, с течением времени возрастают, а период индукции τ уменьшается. Поскольку горение переходит в детонацию практически всегда на участке ускорения процесса, сокращение периода индукции в отдельной фиксированной частице ($\frac{d\tau}{dt} < 0$), на наш взгляд, является необходимым условием перехода горения в детонацию.

Адиабатическое самовоспламенение газа происходит вблизи точки C в слое газа, прошедшего через ускоряющийся участок ударного фронта перед точкой C . Сравнение экспериментально измеренных времен индукции с расчетными τ , полученными для параметров газа, сжатого за ударным фронтом перед точкой C , показало, что $\tau \geq (5 \div 10)\tau_{\text{эксп}}$. Можно предположить, что время индукции сокращается из-за того, что $\frac{d\tau}{dt} < 0$. Однако это предположение нуждается в более тщательной экспериментальной проверке.

Вследствие самовоспламенения газа на переднем фронте образуется пересжатая детонационная волна CD , а в сгоревшем газе — волна ретонации CE (вторая волна сжатия). На развертках самосвечения (см. рис. 2) траектории газа, прошедшего через волну AC , светятся более ярко.

Для количественной характеристики процесса приведем скорости детонации смеси пропан-бутан + $5O_2$:

а) скорость детонации в трубе диаметром 20 мм $D = 2350 \pm 50$ м/с,

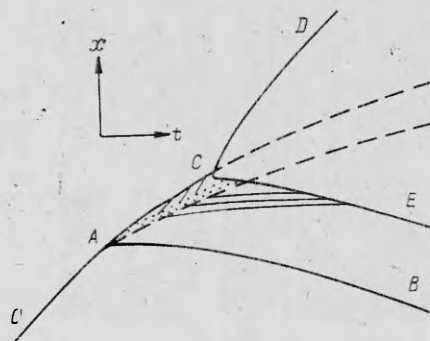


Рис. 6.

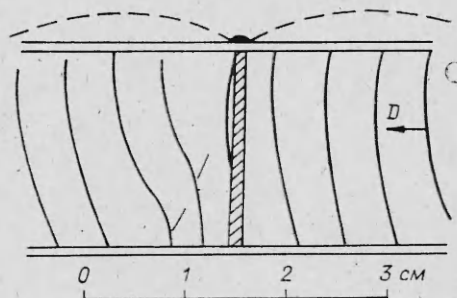


Рис. 7.

б) средняя скорость процесса на длине последних трех ячеек $D_{ср} = 2360 \pm 80$ м/с,

в) скорость процесса перед точкой А (см. рис. 6) $D_1 = 2420 \pm 250$ м/с,

г) скорость за точкой А $D_2 = 1430 \pm 300$ м/с.

Для лучшей характеристики диапазонов изменения скоростей, наблюдавшихся в экспериментах, указаны максимальные отклонения измеренных величин от их среднего значения. Большой разброс объясняется не низкой точностью измерений, а неоднородностью процесса.

Как показала шпирен-киносъемка, фронт волны почти всегда искривлен и радиус кривизны уменьшается после взаимодействия волны с жидкой пленкой. Вследствие кривизны фронта или пленки, а также из-за непараллельности их плоскостей детонационная волна контактирует с пленкой вначале на ограниченном участке. В этом месте за пленкой переход к детонации происходит раньше и на фронте волны образуется выпуклость. На рис. 7 показана форма фронта волны до и после взаимодействия с пленкой, полученная с помощью шпирен-киносъемки. Время между двумя соседними положениями фронта 2 мкс. Волна движется справа налево, тень от пленки заштрихована. Поле зрения ограничено проволочками каркаса, штриховой линией (условно) показана форма верхней пленки. Можно заметить сходство формы фронта волны за пленкой с диаграммой рис. 6. Это сходство объясняется подобием рассматриваемых явлений.

Восстановление детонации первоначально на небольшом участке фронта за пленкой является механизмом, приводящим к увеличению кривизны фронта. В принципе причиной образования выпуклости может быть и неравномерность пленки по толщине: за более тонким участком пленки детонация должна восстанавливаться быстрее.

Как следует из приведенных выше данных, средняя скорость распространения процесса по ячейкам в пределах ошибки измерений совпадает со скоростью газовой детонации в трубке. Измерена скорость детонации в пене с характерным размером ячеек 8—10 мм, помещенной внутрь трубки диаметром 20 мм. Эта скорость совпала со скоростью газовой детонации в этой трубке и оказалась равной 2350 ± 100 м/с. Обнаруженный ранее [1, 2] и подтвержденный в данном исследовании результат о пренебрежимом влиянии жидкой фазы на скорость детонации можно объяснить следующим образом: потери скорости волны на преддетонационном участке траектории компенсируются на ее пересжатом участке. При этом наличие жидких перегородок между ячейками может улучшить условия распространения волны по сравнению с ячейками без перегородок: пересжатие вначале возникает на относительно небольшом участке фронта волны за перегородкой, который изолирован от действия боковых волн разрежения.

Знание механизма передачи детонации через жидкие пленки может оказаться полезным для понимания пределов детонации в пенах. В качестве характерного масштаба l , определяющего минимальный размер пузырьков δ , по которым еще может распространяться детонация, можно выбрать длину преддетонационного участка. Для установившихся режимов в смеси пропан-бутан + $5O_2$ $l = 3 \div 4$ мм и совпадает с величиной δ , приведенной в [1]. Однако по данным [2] $l = (2 \div 3)\delta$. Этот вопрос требует специального исследования, однако не исключено, что может оказаться справедливым неравенство $\delta < l$. В подтверждение этого опишем опыт, в котором оказалось, что на растянутом преддетонационном участке горение не перешло в детонацию до конца ячейки. Детонация возникла в момент падения волны на пленку, причем сразу за пленкой образовалась пересжатая детонационная волна.

Были рассчитаны скорости ударных волн, которые образуются при выходе детонации из смеси $2H_2 + O_2 + 3Ag$ в нереагирующей смеси $C_3H_8 + 5O_2$, $2H_2 + O_2 + 3Ag$ и в воздух, параметры Жуге взяты из [5]. Считалось, что в волне разрежения γ постоянна и равна ее равновесному значению в точке Жуге. Ударные волны рассчитывались с использова-

нием табличных зависимостей энтальпии газа от температуры [6, 7]. Расчетные скорости $\bar{D}_{уд}$ сравнивались с экспериментальными скоростями D_2 . Оказалось, что в смеси $C_3H_8 + 5O_2$ $D_{уд} = 1150$ м/с, $D_2 = 1230 \pm 150$ м/с, в смеси $2H_2 + O_2 + 3Ag$ $D_{уд} = 1330$ м/с, $D_2 = 1390 \pm 50$ м/с и в воздухе $D_{уд} = 1250$ м/с, $D_2 = 1180 \pm 50$ м/с. Таким образом, скорость ударной волны за точкой А (см. рис. 6) в горючих смесях несколько выше, а в воздухе несколько ниже расчетной. Однако эта разница невелика и в первом приближении можно считать, что скорость ударной волны, образующейся сразу за пленкой, совпадает со скоростью, рассчитанной по распаду разрыва.

Время индукции в смеси $C_3H_8 + 5O_2$ при $D_2 = 1230$ м/с определялось путем экстраполяции данных работ [8—10] в область более низких температур и оказалось на 1—2 порядка больше экспериментально измеренного времени восстановления детонации. Эта оценка лишней раз подтверждает невозможность восстановления детонации за пленкой по механизму адиабатического самовоспламенения.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что за жидкой пленкой после падения на нее детонационной волны возникает ударная волна; детонация за пленкой восстанавливается за счет горения газа на турбулентной контактной поверхности и последующего перехода горения в детонацию; слабое влияние жидких перегородок на среднюю скорость детонации объясняется струйным механизмом передачи горения от ячейки к ячейке и тем, что потери компенсируются за счет пересжатых детонационных режимов, которые возникают внутри каждого пузырька после перехода горения в детонацию.

Авторы благодарят В. В. Митрофанова за внимание к работе и полезные обсуждения.

Поступила в редакцию 4/1 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. J. P. Saint-Cloud, C. Gueraud, M. Moreau а. о. Acta Astr., 1976, 3, 9/10, 781.
2. В. М. Кудинов, Б. И. Паламарчук, С. Г. Лебедь и др. Докл. АН СССР, 1977, 234, 1, 45.
3. J. P. Saint-Cloud, C. Gueraud, N. Manson. 8-th Intrn. Colloquium on Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems. Book of Abstr. Minsk, 1981.
4. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец. Теория детонации. М.: Гостехиздат, 1955.
5. Ю. А. Николаев, М. Е. Топчий. ФГВ, 1977, 13, 3, 393.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ/Под ред. В. П. Глушко. М.: Изд-во АН СССР, 1967.
7. М. И. Вукалович, В. А. Кириллин и др. Термодинамические свойства газов. М.: Машгиз, 1953.
8. V. F. Myers, E. F. Bartle. AIAA J., 1969, 7, 10, 1862.
9. R. D. Hawthorn, A. C. Nixon. AIAA J., 1966, 4, 3, 513.
10. A. Burcat, K. Scheller, A. Lifshitz. Comb. Flame, 1971, 16, 1, 29.

МЕТАНИЕ И НАГРУЖЕНИЕ ПЛАСТИН ПРОДУКТАМИ ВЗРЫВА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕДОСЖАТЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ

В. С. Соловьев, С. Г. Андреев, А. В. Аггетков,
М. М. Бойко, В. Н. Крамаренко

(Москва)

В работах [1—6] рассмотрены аналитические решения одномерной плоской задачи метания и нагружения несжимаемого тела продуктами детонации (ПД), причем детонация взрывчатого вещества (ВВ) протекает в нормальном режиме — режиме Чепмена — Жуге. В настоящее время распространение получают недосжатые детонационные режимы [7—10], предельным случаем которых является «мгновенная» детонация.