

ДВА ТИПА СТРУКТУРЫ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В МНОГОФРОНТОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

B. A. Субботин

(Новосибирск)

Эксперименты по изучению детонационных волн в газах практически во всех случаях указывают на существование поперечных волн. Основными элементами газодинамической структуры поперечной волны являются излом переднего фронта и поперечный фронт, распространяющийся по слою сжатого газа [1, 2]. Траектории движения поперечных волн, регистрируемые следовым методом, имеют разную степень регулярности [3].

Цель данной работы состояла в том, чтобы установить, различаются ли структуры поперечных волн в смесях, отличающихся степенью регулярности следовых отпечатков. Наиболее подробно исследовались: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ — смесь, дающая следовые отпечатки с наиболее высокой степенью регулярности, и $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ — смесь с наиболее низкой степенью регулярности. Для укрупнения структуры в последнюю смесь добавлялось около 6% воздуха, при этом качественных изменений структуры не происходило.

Исследования проводились в плоском канале $4,7 \times 96$ мм. Наблюдательная секция канала состояла из двух стекол, разделенных резиновыми прокладками. Полная длина канала составляла 1,4 м. Съемка производилась камерой СФР совместно с теневой установкой ИАБ-451. Аналогично работе [4] ширина светового отверстия двухрядной линзовой вставки камеры СФР уменьшалась до 1 мм. Этим достигалось уменьшение времени экспозиции до 0,5 мкс при времени между двумя соседними кадрами одного ряда 3,56 мкс.

Детонация в ацетилено-кислородной смеси инициировалась высоковольтным разрядом с энергией около 10 Дж. В других смесях инициирование производилось либо подрывом навески азота свинца, либо высоковольтным разрядом. В последнем случае для облегчения перехода горения в детонацию в исследуемую смесь непосредственно перед опытом через отверстие в электроде добавлялась ацетилено-кислородная смесь, парциальное давление которой составляло примерно 1/3 общего давления смеси. Результаты опытов не зависели от способа инициирования.

Детонация в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$

Самоподдерживающаяся детонация. Типичные шлирен-фотографии самоподдерживающейся детонации в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ приведены на рис. 1. Однаковые фазы процесса, полученные в разных кадрах одного опыта или в разных опытах, но при равных начальных давлениях, практически не отличаются друг от друга. Структура поперечных волн совпадает со структурой 1-го типа, наблюдающейся в смеси $2\text{CO} + \text{O}_2 + 5\% \text{ H}_2$ [1, 5]. Траектории движения тройных точек, построенные по этим снимкам, дают ячеистую структуру, близкую к идеализированной схеме движения поперечных волн, приведенной в тех же работах. Скорость движения участков переднего фронта вдоль оси симметрии ячейки измерялась с помощью разверток. Когда на ширине канала укладывались 4 или 5 ячеек, т. е. поперечный размер ячейки a равнялся 24 и 19 мм соответственно, эта скорость уменьшилась от $(1,5 \pm 0,15)D$ в начале ячейки до $(0,78 \pm 0,03)D$ в конце ячейки,

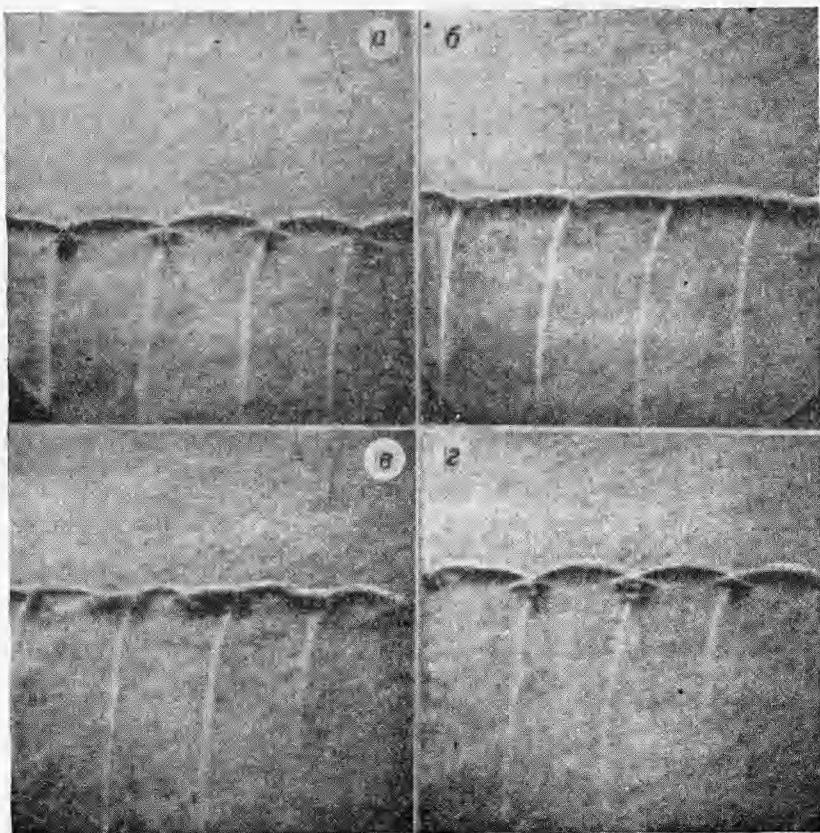


Рис. 1. Самоподдерживающаяся детонация в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$
 $p_0 = 100$ мм рт. ст., время между кадрами 3,56 мкс, $D = 1720$ м/с.

где D — скорость детонации. Измеренная скорость была примерно на 6% ниже расчетной скорости равновесной детонации Чепмена — Жуге. Использовались параметры детонации Чепмена — Жуге, рассчитанные на ЭВМ. Отметим, что значение скорости в конце ячейки, равное $0,78D = 0,73D_{\text{ч.-ж.}}$, отличается от данных, приведенных в работе [6], где эта скорость равна $0,6D_{\text{ч.-ж.}}$, на величину, превышающую ошибку измерения.

Была рассчитана скорость ударной волны, возникающей при распаде разрыва, с одной стороны которого находится газ с равновесными параметрами Чепмена — Жуге, а с другой — исходная нереагирующая смесь. Считалось, что показатель адиабаты в волне разрежения не изменяется. Рассчитанная скорость равна $0,72D_{\text{ч.-ж.}}$ и близка к скорости движения переднего фронта в конце ячейки.

На многих снимках перед столкновением наблюдалось резкое отставание зоны горения от поперечного фронта (рис. 1, a , c). Накапливавшееся при этом несгоревший газ полностью сгорает в ударных волнах, расходящихся после столкновения. Расстояние от наиболее удаленной от переднего фронта границы несгоревшего газа до линии, проведенной по вершинам выпуклостей, можно считать эффективной шириной зоны горения. В данной смеси она равна примерно $0,3a$.

Затухающая детонация. При начальных давлениях смеси, меньших 70 мм рт. ст., обычно наблюдалась затухающая детонация. В этом случае также наблюдались поперечные волны со структурой типа I (рис. 2, a). В такой волне смесь самовоспламеняется за большей частью поперечного фронта. Смесь не воспламеняется лишь за косым

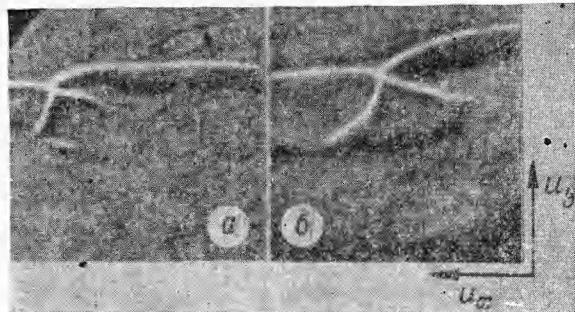


Рис. 2: Поперечные волны типа I при затухающей детонации в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$.
а) $p_0 = 55$ мм рт. ст., составляющие скорости движения тройной точки $u_x = 1000$ м/с, $u_y = 1400$ м/с; б) без реакции, $p_0 = 60$ мм рт. ст., $u_x = 900$ м/с, $u_y = 1020$ м/с.

(носика и скачка, идущего от шлейфа в сгоревшем газе) расположенной между ними. На снимках носик обычно также не удается разрешить, но анализ течения указывает на необходимость его введения. В волне на рис. 2, б давление за волной Маха примерно в 1,5 раза больше, чем за изломом переднего фронта. Течение в окрестности трой-

скаком, идущим от тройной точки на переднем фронте—«носиком» структуры. Носик имеет малые размеры и на большинстве снимков не виден, но «хвост» несгоревшего газа за ним имеет большую протяженность и наблюдается довольно часто.

Наряду с этим существует много волн, в которых за всем поперечным фронтом смесь не самовоспламеняется (рис. 2, б). Такой поперечный фронт состоит из двух пересекающихся косых скачков

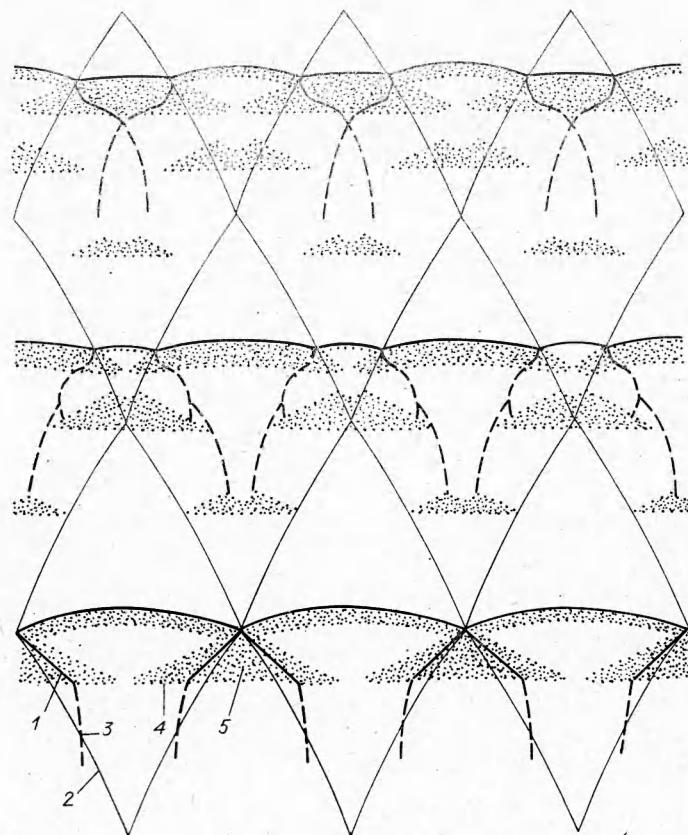


Рис. 3. Идеализированная схема процесса распространения детонации с поперечными волнами без реакции.

1 — ударные волны в несгоревшем газе; 2 — траектории движения тройных точек; 3 — волны сжатия в сгоревшем газе; 4 — фронты горения; 5 — несгоревший газ.

ной точки в этом случае можно согласовать, если ввести косой скачок, идущий от тройной точки к волне Маха, давление за которым равнялось бы давлению за изломом переднего фронта. Такая структура отличается от структуры I типа только тем, что за волной Маха смесь не самовоспламеняется. Поэтому структуру волны, в поперечном фронте которой волна Маха, расположенная между двумя косыми скачками, не поджигает смесь, будем называть структурой типа I без реакции.

Поперечные волны без реакции имели и другую структуру (см. ниже рис. 7, г, д), но характерно, что волны, в поперечном фронте которых косые скачки пересекаются регулярно, в данной смеси не наблюдалось.

Столкновение поперечных волн без реакции (любой структуры), если оно сопровождается вспышкой газа, приводит к отделению от фронта «островков» несгоревшего газа. Догорание их определяется скоростью пламени и происходит на расстояниях от фронта порядка размера ячейки. Если одна из сталкивающихся волн с реакцией, то она сжигает газ, накопившийся за поперечным фронтом встречной волны, и островок несгоревшего газа не образуется.

На рис. 3 приведена идеализированная схема процесса распространения детонации с поперечными волнами без реакции. Положение детонационного фронта в нижней части рис. 3 соответствует моменту столкновения тройных точек, движущихся по переднему фронту. В результате нерегулярного отражения изломов переднего фронта между ними появляется волна Маха, а по газу, скатому за изломами, распространяются отраженные волны. Момент столкновения тройных точек можно считать началом зарождения новых поперечных волн. Если за новыми поперечными волнами происходит самовоспламенение газа, то поперечные волны усиливаются и образуется островок несгоревшего газа. Островки имеют форму треугольника с характерной выемкой при вершине и в них находится газ, прошедший через поперечные фронты ранее момента столкновения тройных точек.

По-видимому описанный процесс детонации в данной смеси распространяться устойчиво не может. В реальных процессах средняя скорость движения переднего фронта всегда снижается, ширина слоя несгоревшего газа растет, а поперечные волны ослабевают.

Детонация в $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ и других смесях

Волны с реакцией за поперечным фронтом (I типа) в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ наблюдаются очень редко. За большинством поперечных фронтов смесь не самовоспламеняется, в результате чего возникают хвосты несгоревшего газа. Структура таких волн характеризуется тем, что поперечный фронт в них состоит из двух косых скачков, пересекающихся регулярно. Это структура типа II, приведшаяся ранее в работе [1]. На рис. 4, а приведены две волны со структурой II типа. Метано-кислородная смесь по структуре наиболее сильно отличается от смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$. Как уже указывалось, в последней смеси структура II типа не наблюдалась. По структуре к метано-кислородной смеси близка стехиометрическая ацетилено-воздушная смесь. В смесях $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$, $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$ и $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ наблюдаются волны как I, так и II типов. На рис. 4, б показаны волны без реакции за поперечным фронтом. Столкновение поперечных волн типа II в основных чертах происходит подобно схеме рис. 3.

В метано-кислородной смеси наряду с крупными (основными) неоднородностями на переднем фронте всегда имеются более мелкие, которые можно считать тонкой структурой переднего фронта. Такие

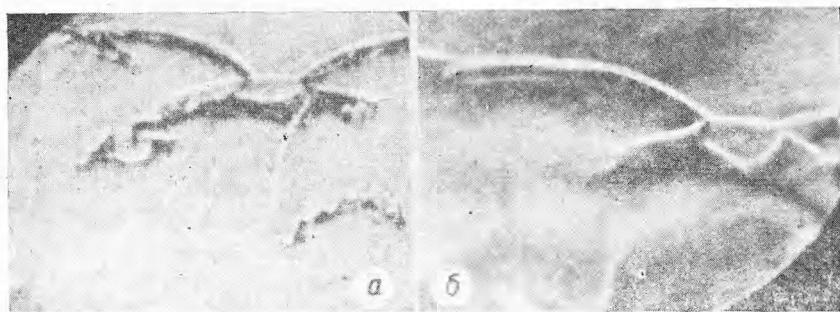


Рис. 4. Волны типа II в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\%$ воздуха, $p_0 = 80$ мм рт. ст. (а) и волны без реакции в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ (справа — волна типа I, слева — типа II, $p_0 = 70$ мм рт. ст.) (б).

неоднородности приводят к турбулизации фронта горения. Поток газа, прошедший через поперечный фронт крупной неоднородности, также турбулизирован. Из-за турбулизации происходит дробление островков. Расстояние от фронта, на котором островки перестают быть видны, примерно равно основному размеру ячейки. Можно считать, что протяженность зоны горения также равна основному размеру ячейки.

Анализ и обсуждение результатов

Наблюдавшиеся структуры различаются характером пересечения косых скачков в поперечном фронте: в структуре типа II пересечение регулярное, в структуре типа I — нерегулярное (между скачками находится волна Маха).

Возможность существования различных структур исследовалась с помощью ударных поляр. В расчете использовались табличные зависимости энталпии от температуры [7]. Были выбраны некоторые средние значения параметров натекающего потока, соответствующие следующему случаю: плоский ударный фронт движется со скоростью детонации D , по нему бежит тройная точка со скоростью v , равной средней скорости движения поперечных волн. Величины скоростей взяты из экспериментов. Нумерация поляр на рис. 5 и областей течения на рис. 6, которым эти поляры соответствуют, одна и та же. Углы поворота течения ω отсчитываются от направления втекающего потока против часовой стрелки.

По заданным нормальной и тангенциальной составляющим скорости натекающего потока находятся параметры потока за передним фронтом МО (точка A на поляре 1). Пересечение поляр 1 и 2 дает точку B , соответствующую параметрам потока за изломом переднего фронта ОН (область 3') и за косым скачком ОК (носиком), идущим от тройной точки (область 3). Характер взаимодействия скачка EF , идущего из горевшего газа, и скачка ОК определялся следующим образом: если поляры 3 и 4 имеют общую точку, то скачки пересекаются регулярно, если не имеют — нерегу-

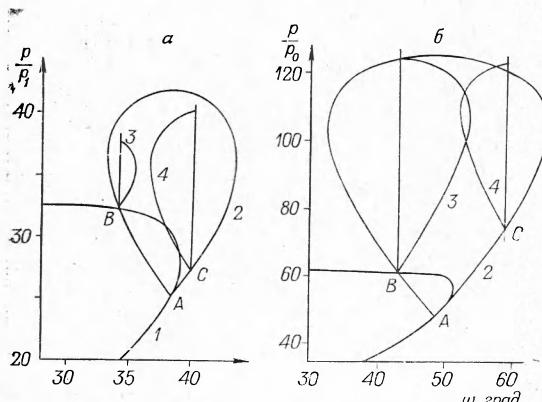


Рис. 5. Ударные поляры.
а) для смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$, $\pi_{42} = 1,09$; б) для смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$, $\pi_{42} = 1,53$.

лярно. Поляра 3 однозначно определена параметрами натекающего потока, поляра 4 задавалась положением точки C , т. е. возрастанием давления $\pi_{42} = p_c/p_A$ в скачке EF . В таблице приведены результаты анализа.

Как видно из таблицы, в области 2 числа Маха и показатели адиабаты γ_2 в сравниваемых смесях существенно различаются. Этим объясняется тот факт, что структура типа I в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ возникает при сравнительно малой интенсивности скачка EF с $\pi_{42} > 1,09$, в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ для этого необходим более сильный скачок с $\pi_{42} > 1,53$. В первой смеси структура типа II не осуществляется, так как при уменьшении π_{42} поляра 4 раньше начинает пересекаться с полярой 1, чем с полярой 3.

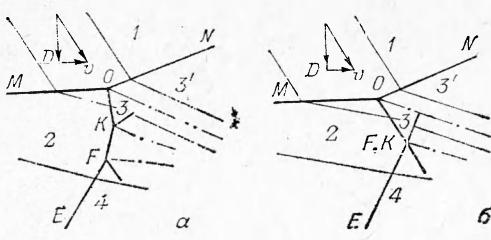


Рис. 6. Схема течения (МО — передний фронт, ОН — излом переднего фронта. ОК — косой скачок, идущий от тройной точки на переднем фронте, EF — косой скачок, идущий из сгоревшего газа, КF — волна Маха).
 а) смесь $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$; б) смесь $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$. — ударные волны; — линии тока; - - контактные разрывы.

Смесь	D , м/с	v'/D	M_2	γ_2	Структура		
					I тип, рис. 7, а, б	II тип, рис. 7, в	рис. 7, г, д
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$	1720	0,59	1,24	1,43	$\pi_{42} > 1,09$	Не осуществляется	$\pi_{42} \leq 1,09$
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$	2235	0,55	1,57	1,18	$\pi_{42} > 1,53$	$1,16 < \pi_{42} \leq 1,53$	$\pi_{42} < 1,16$

Из анализа также следует, что в обеих смесях могут осуществляться конфигурации, показанные на рис. 7, г, д. Четырехударная конфигурация рис. 7, д соответствует расположению поляр, изображенному на рис. 5, а. В такой конфигурации поперечный фронт состоит из двух скачков, расположенных последовательно один за другим, причем первый из них отклоняет поток в положительном направлении, второй — в отрицательном. Конфигурация с тремя скачками рис. 7, д может осуществляться при дальнейшем уменьшении π_{42} , когда точка C находится на участке, где поляры 1 и 2 либо совпадают, либо правая ветвь поляры 2 проходит левее поляры 1. В последнем случае для согласования течения необходимо ввести центрированную волну разрежения.

Конфигурации рис. 7, г, д наблюдались в обеих смесях при затухающей детонации и как тонкая структура на переднем фронте. Иногда наблюдались промежуточные структуры, соответствующие переходу от рис. 7, б к рис. 7, г.

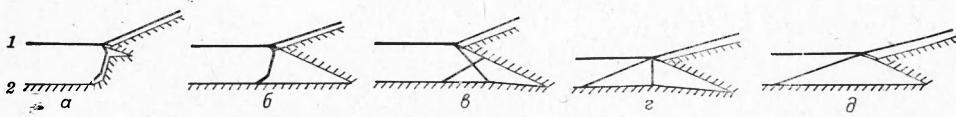


Рис. 7. Структуры, наблюдавшиеся в опытах.

а, б) структура типа I с реакцией и без нее; в) структура типа II; г) четырехударная структура. (Поперечный фронт состоит из двух последовательно расположенных косых скачков); д) конфигурация с тремя ударными волнами (все скачки поворачивают поток в положительном направлении).

1 — ударные волны; 2 — фронты горения.

На основании проведенного исследования могут быть сделаны следующие выводы.

1. Влияние поперечных волн, существующих при самоподдерживающейся детонации, на механизм сгорания в смесях $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ и $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ различно. В первой смеси, характеризующейся высокой степенью регулярности следовых отпечатков, поперечные фронты сжигают смесь. Во второй смеси, дающей следовые отпечатки с низкой степенью регулярности, большая часть поперечных фронтов не сжигает смесь и за ними остаются хвосты несгоревшего газа.

2. В первой смеси поперечные волны имеют структуру типа I. Поперечный фронт в такой волне состоит из двух косых скачков, из которых один идет от тройной точки на переднем фронте, а второй — от шлейфа в сгоревшем газе и из волны Маха, расположенной между этими скачками. Воспламенение смеси происходит за волной Маха. Во второй смеси преобладают волны типа II: поперечный фронт таких волн состоит из двух косых скачков, пересекающихся регулярно (без волны Маха).

3. Волны, поперечные фронты которых не сжигают смесь, в первой смеси наблюдаются при затухающей детонации. В основном они имеют структуру типа I, но без воспламенения за волной Маха.

4. Столкновения волн, за поперечными фронтами которых смесь не самовоспламеняется, приводят к образованию островков несгоревшего газа и к увеличению протяженности зоны горения.

Автор благодарит В. В. Митрофанова за полезные обсуждения, А. Я. Горбункову за помощь в проведении расчетов и М. Е. Топчияна за предоставление расчетов параметров детонации Чепмена — Жуге.

Поступила в редакцию
12/IV 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
2. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
3. R. A. Strehlow, C. O. Engel. AIAA J. 1969, 7, 2—3.
4. Т. В. Баженова, А. Г. Гоздева. Ударные волны в реальных газах. М., «Наука», 1968.
5. В. В. Митрофанов. ПМТФ, 1962, 4.
6. D. H. Edwards, G. Hooper and R. J. Meddins. Astronautica Acta, 1972, 17, 4—5.
7. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Под ред. акад. В. П. Глушко. Т. II. М., Изд-во АН СССР, 1962.

УДК 662.21+534.222.2

ТРЕХСТАДИЙНАЯ ИЗЭНТРОПА РАСШИРЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ В В

*K. И. Козорезов, В. В. Сергеев
(Москва)*

Многие промышленные процессы и некоторые специальные исследования взрыва требуют ясных инженерных представлений о процессе образования и затухания ударных волн в газообразной среде вблизи заряда. Ряд теоретических работ и экспериментальных исследований