

режим $\pi = \text{const}$, то $\kappa_{*1} = 0,9$ достигается при $\pi = 2,4$ (считаем $\alpha = 0$), соответствующее $p_{(L)} - p_{(0)} \approx 110$ атм. Увеличение или уменьшение перепада давления приведет к взрыву. Критический разогрев при этом $T_* - T_0 \approx 25$ град.

В заключение отметим, что возможные большие разогревы, намного большие характерного семеновского интервала RT_0^2/E , требуют анализа влияния выгорания вещества. По этой же причине возможна дополнительная погрешность результатов в связи с принятым разложением экспонент по методу Д. А. Франк-Каменецкого. Сравнение расчетов по (22) с расчетами более полной системы, проделанными в [2], показывает, что погрешность эта невелика и нигде не меняет качественной картины.

Автор благодарен В. Н. Вилюнову, Л. К. Гусаченко, В. И. Лисичину, А. М. Столину и участникам семинара по макрокинетике ТГУ за плодотворное обсуждение работы.

Поступила в редакцию
26/III 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Бостанджиян, А. Г. Мержанов, Н. М. Пручкина. ПМТФ, 1968, 5.
2. А. М. Столин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 4.
3. А. Г. Мержанов, А. М. Столин. ПМТФ, 1974, 1.
4. Абрамов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1968, 4, 4.
5. А. Г. Мержанов, А. М. Столин. Докл. АН СССР, 1971, 198, 6.
6. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
7. А. С. Штейнберг, Б. М. Слуцкер, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1970, 6, 4.
8. В. В. Барзыкин, Э. А. Штессель и др. ФГВ, 1971, 7, 2.
9. Э. И. Максимов, Ю. М. Максимов, В. Ф. Чуков. ФГВ, 1971, 7, 2.

УДК 662.215.1266.035/661.937

ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ДЕТОНАЦИИ В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ, ПРОПИТАННЫХ ЖИДКИМ КИСЛОРОДОМ

А. С. Розовский, В. Ф. Плешаков, Б. А. Иванов

(Балашиха)

1. При контакте жидкого кислорода с некоторыми пористыми материалами (сажа, древесные опилки и др.) могут образоваться взрывчатые вещества — оксиликвиты. Изучение условий образования и механизма возбуждения и развития детонации оксиликвитов актуально для решения вопросов обеспечения безопасности при работе с жидким кислородом, а также для определения перспектив использования оксиликвитов как ВВ для горных разработок.

В [1—3] описываются опыты по определению возможности взрыва материалов, пропитанных жидким кислородом при инициировании от капсюля-детонатора, а также от механического удара [4]. Наличие детонации устанавливалось по степени разрушения сосуда, в котором находился образец. Подробных исследований, подтверждающих, что при

Таблица 1

Материал	Возможность возбуждения детонации в материале, пропитанном жидким кислородом				Скорость детонации, м/с ($\delta \geq \delta_{lim}$)	Толщина образца, мм	
	от механического удара	от электрического разряда	от детонационной волны	δ_{lim}		критическая (δ_c)	
							пределная (δ_{lim})
Асфальт	Детонирует	Детонирует	Детонирует от ПС-4	1500	3,0	1,5	
Пенополистирол ПС-4	»	Не детонирует	Детонирует от асфальта	2510	2,0	0,5	
ФРП-1 (основа — вспененная фенол-формальдегидная смола)	»	»	Детонирует от асфальта и ПС-4	2240	3,5	2,0	
Пенополиуретан ППУ-304Н	Не детонирует	»	Детонирует от ГС-4	2140	2,5	1,0	
Дерево обугленное	»	»	Детонирует от асфальта и ПС-4	1950 ($\delta = 6\text{мм}$)	—	—	
Кожа «Чепрак»	Детонирует	»	Не детонирует	2900 ($\delta = 4\text{мм}$)	—	1,5	
Резина ОМ-12 (пористая)	Не детонирует	»	Детонирует от ГС-4	1050 ($\delta = 4\text{мм}$)	—	— (не измерялась)	

взрывах систем пористый материал — жидкий кислород действительно наблюдалась детонация, не проводилось.

В данной работе с помощью скоростной кинофотосъемки исследовано возбуждение и развитие детонации для ряда пористых материалов (табл. 1), пропитанных жидким кислородом, при воздействии на них механического удара, электрического разряда, а также детонационной волны. Измерены плотности образующихся оксидквитов, скорости детонации и критические условия детонации. Произведена теоретическая оценка скоростей детонации и давлений на фронте ударной волны.

2. Испытуемый образец материала длиной 80, шириной 22 мм и толщиной от 0,5 до 12 мм помещался в металлическую ванну и закреплялся. Перед проведением экспериментов все детали установки, которые в условиях опыта контактируют с жидким кислородом, обезжиривались четыреххлористым углеродом и высушивались. Заливка жидкого кислорода в ванну и пропитка образца производилась в течение 30 минут. За это время вся система успевала полностью охладиться до температуры кипения кислорода (90,18 К), а образец пропитаться жидким кислородом ($\rho_l = 1,14 \text{ г/см}^3$). Увеличение времени пропитки материалов до двух часов не влияло на их способность к детонации и на скорость детонации. Уровень жидкости над поверхностью образца в момент опыта составлял 6 ÷ 10 мм.

Для возбуждения детонации материалов при воздействии механического удара использовался вертикальный копер [4]. Максимальная энергия падающего груза составляла 120 Дж.

При инициировании детонации электрическим разрядом электроды запрессовывались в образец материала. Разряд между электродами производился от конденсаторов емкостью 1400 мкФ, которые заряжались до 280 В. Пробой промежутка между электродами осуществлялся с помощью высоковольтного разряда, создаваемого узлом синхронизации СФР [5].

Иницирование детонации образца исследуемого материала (пассивного заряда) сформированной детонационной волной производилось от другого материала (активного заряда), детонация которого была вызвана механическим ударом или электрическим разрядом. Скорость иницирующей волны была как выше («пересжатая волна»), так и ниже («недосжатая волна») скорости детонации пассивного заряда. Скорости детонации материалов измерялись фотографированием процесса при работе СФР в режиме непрерывной развертки. Развитие процесса детонации изучалось при работе СФР в режиме «лупы времени».

3. Условия возбуждения, критические (минимальные) толщины (δ_c), а также предельные толщины образцов (δ_{lim}), начиная с которых скорости детонации остаются постоянными, для различных материалов представлены в табл. 1. Видно, что детонация пористых материалов, пропитанных кислородом, может возникнуть от различных источников. Одни материалы, например асфальт, детонируют при воздействии любого из используемых источников иницирования, другие чувствительны лишь к некоторым источникам. Материалы ФРП-1 и ППУ-304Н имеют близкие значения скоростей детонации, но обладают разной чувствительностью к воздействию детонационных волн: ФРП-1 детонировал как от «недосжатой» (от асфальта), так и от «пересжатой» (от ПС-4) детонационной волны, а ППУ-304Н был чувствителен только к «пересжатой» детонационной волне. Кожа «Чепрак» не детонировала при воздействии «недосжатых» детонационных волн от асфальта и ПС-4, но детонировала при воздействии механического удара.

При воздействии на материалы, пропитанные жидким кислородом, механического удара и электрического разряда в них возникают ударные волны, которые являются источником возбуждения детонации. В первом случае источником образования ударных волн являются локальные взрывы под ударником [4], во втором — низковольтный электрический разряд малой длительности $\tau \approx 40$ мкс.

4. На рис. 1 представлены фотографии шести последовательных (через 21,32 мкс) положений зоны реакции в образце асфальта, пропитанного жидким кислородом. Источником иницирования служил электрический разряд. На первом кадре видно, что свечение возникает в поперечном сечении образца на расстоянии ~ 15 мм от источника, по-видимому, после отражения ударной волны от твердых дисперсных частиц (песка). Затем свечение появляется над источником иницирования и вокруг него вдоль стенок чашки (кадры 2, 3). Возникшая первоначально зона ускоряющегося горения распространяется по образцу со средней скоростью около 300 м/с и через 75 мкс достигает середины образца (кадр 4). В это время на противоположном конце образца возникает новый очаг горения (кадры 4, 5), который движется навстречу первоначальному и сливается с ним (кадр 6). Возникновение нового

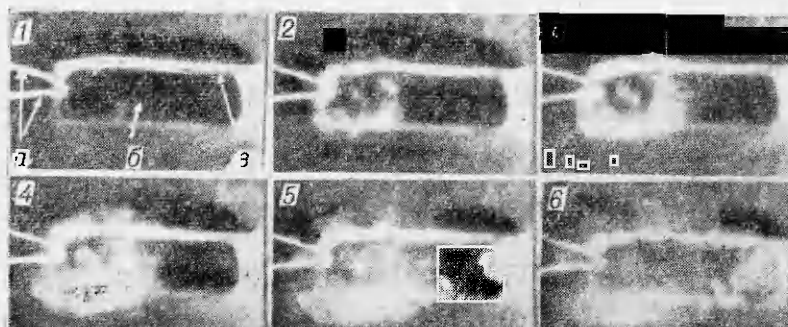


Рис. 1. Развитие процесса детонации в асфальте, пропитанном жидким кислородом, при иницировании электрическим зарядом.
а) электроды источника иницирования; б) образец; в) чашка.

очага горения, по-видимому, происходит при отражении ударной волны от торца чашки. Эта волна движется со скоростью ≈ 950 м/с, что соответствует скорости звука в жидком кислороде.

Как видно из покадровой съемки, детонация асфальта носит очаговый характер. Это также наблюдалось при изучении фоторазвертки детонации асфальта, пропитанного жидким кислородом.

При возбуждении детонации заранее сформированной детонационной волной в «пассивном» заряде может возникнуть детонация как на контакте зарядов, так и на некотором расстоянии от него в «пассивном» заряде. Если скорость детонации «активного» заряда (D_a) больше скорости детонации «пассивного» (D_p), то детонация, как правило, возникает в месте контакта зарядов (рис. 2). Если $D_a < D_p$, то детонация возникает на некотором расстоянии от границы контакта (в заряде на основе ПС-4, детонирующем от асфальта, это расстояние составляло 10—12 мм) или не возникает вообще.

На рис. 3 приведены зависимости скорости детонации от толщины образца для материалов ПС-4, ФРП-1, ППУ-304Н. Из рисунка 3 видно, что при толщинах образцов, начиная с предельных ($\delta \geq \delta_{lim}$), скорости остаются практически постоянными. При толщинах образцов, меньших предельных, скорости снижаются. Материалы, пропитанные жидким кислородом, не детонируют при толщинах, меньших критических ($\delta < \delta_c$).

Плотности оксидквитов, образующихся при пропитке материалов кислородом, определялись экспериментально. Производилось взвешивание образца с прикрепленным к нему грузом до и после погружения в жидкий кислород. Масса кислорода, поглощаемая образцом, определялась с учетом действующей на систему архимедовой силы.

Эксперименты показали, что количество кислорода, поглощаемого материалом, не пропорционально объему образца, что наблюдалось бы при однородной пропитке, и сильно зависит от его толщины. Средняя (приведенная) плотность оксидквита, равная отношению массы образца, пропитанного жидким кислородом, к его объему, уменьшается с увеличением толщины образца. Это можно объяснить замкнутопористой структурой материалов. Проникновение жидкого кислорода в глубь образца происходит в основном между спекшимися гранулами (у ПС-4) или по незамкнутым порам, небольшой процент которых всегда имеется в материале (у ФРП-1, ППУ-304Н, а также у ПС-4). Отметим здесь, что газы, содержащиеся в порах (фреон, CO_2 , H_2O), в процессе пропитки кислородом конденсируются.

Поскольку скорости детонации становятся не зависящими от толщины образца δ при $\delta \geq \delta_{lim}$, в качестве плотности оксидквитов ρ_1 необходимо принять плотности, измеренные при толщинах, равных пре-

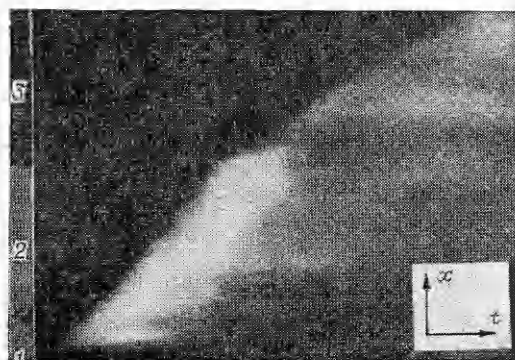


Рис. 2. Возбуждение и распространение процесса детонации в системе асфальт (1) — ПС-4 (2) — резина ОМ-12 (3).

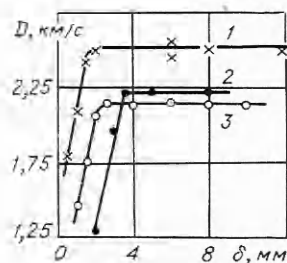
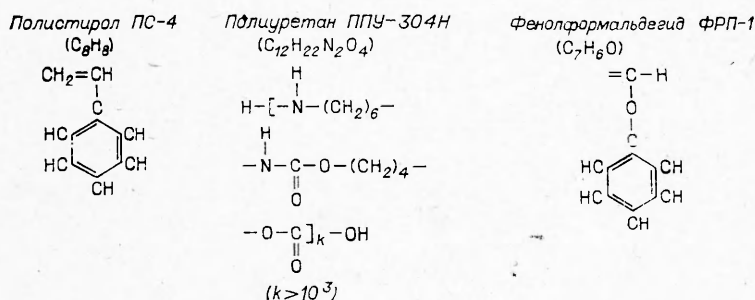


Рис. 3. Зависимость скорости детонации материалов, пропитанных жидким кислородом от толщины образца.
1 — ПС-4; 2 — ФРП-1; 3 — ППУ-304Н.

дельным (табл. 2). Это означает, что при увеличении толщины образца основную роль в процессе детонации играет только часть его, имеющая постоянную среднюю плотность ($\rho = \rho_1$).

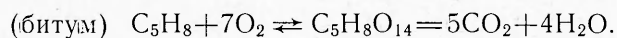
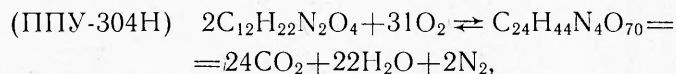
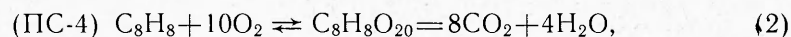
5. Для построения физических моделей детонации в системах пористый материал — жидкий кислород необходимо, кроме плотности ρ_1 , знать ряд других параметров, характеризующих такие системы. Значения некоторых из этих параметров приведены в табл. 2. Существенными параметрами, характеризующими многофазность системы, являются: средняя плотность пористого материала ρ_m и исходная (истинная) плотность материала ρ_{om} . Значения ρ_{om} даны в табл. 2 для исходных веществ: полистирола, полиуретана, фенолформальдегидной смолы, вспениванием которых получались пористые материалы; у асфальта ρ_{om} даны отдельно для битума и песка.

Низшая теплотворная способность материалов H_u определялась экспериментально при их сжигании в кислороде (начальная температура 290 К, давление 40 атм). Стехиометрический коэффициент κ (отношение массы кислорода к массе вступающего в реакцию материала) рассчитан с использованием химических формул веществ, определяемых по основным структурным звеньям материалов:



Условная химическая формула для основной горючей связки у асфальтобитума (по весу в асфальте было 20% битума и 80% песка) может быть определена по известной весовой доле химических элементов в битуме: С — 86%, Н — 11, N — 44, О — 0,26, S — 2,3%. Приближенная формула, получаемая при весовых долях С — 88% и Н — 12% в битуме, имеет вид C_5H_8 и соответствует углеводородам ацетиленового ряда, обладающим высокой чувствительностью к взрыву в жидком кислороде [6].

В табл. 2 также приведены основные характеристики идеальных оксиликвитов, т. е. таких веществ, которые образуются при однородном стехиометрическом смешении исходных материалов с кислородом. Химические формулы оксиликвитов и продукты их взрыва определялись из следующих уравнений химических реакций материалов с кислородом:



Плотности идеальных оксиликвитов в состоянии, при котором они занимают объем пористого материала, определялись по формуле $\rho_p = \rho_m + \kappa\rho_m$ для первых трех материалов, при пропитке которых в избытке содержится кислород, и по формуле $\rho_p = \rho_{o_2} + \rho_{o_2}/\kappa$ для асфальта,

Материал	ρ_m , г/см ³	ρ_{om} , г/см ³	H_u , кал/г _м	κ , г _{О₂} /г _м	Оксиликвит
ПС-4	0,034	1,1	9100*	3,08	C ₈ H ₈ O ₂₀
ППУ-304Н	0,04	1,1	6300*	1,92	C ₂₄ H ₄₄ N ₄ O ₇₀
ФРП-1	0,055	1,2	7300*	2,42	C ₇ H ₆ O ₁₇
Асфальт (20% битум — C ₅ H ₈ , 80% песок — SiO ₂)	1,7	0,95 (битум) 2,05 (песок)	9600*	3,29	C ₅ H ₈ O ₁₄

* Приводимые экспериментальные значения совпадают в пределах точности экспериментов с

где ρ_{O_2} — средняя плотность распределенного в пористом материале кислорода, равная 0,275 г/см³, поскольку при пропитке асфальта в избытке содержится горючее (битум). Плотности идеальных оксиликвитов в кристаллическом состоянии (ρ_c) определялись как средние при стехиометрическом смешении исходных непористых материалов и кислорода: $\rho_c = \rho_{om}(1 + \kappa) / (1 + \kappa \rho_{om} / \rho_s)$, где $\rho_s = 1,425$ г/см³ — плотность кислорода при 20,66 К в твердом состоянии (изменение плотностей исходных материалов при охлаждении можно не учитывать).

Энергия, выделяемая при сгорании единицы массы идеального оксиликвита, определялась по формуле $Q_p = H_u / (\kappa + 1)$; энтальпией, необходимой для испарения единицы массы кислорода и нагревания образовавшегося газа до температуры 290 К, можно пренебречь.

Часть материала, пропитанная жидким кислородом, представляет собой систему, состоящую из горючего, окислителя и инертного вещества. Если у материала в порах содержится жидкого кислорода больше, чем необходимо по стехиометрическому соотношению (ПС-4, ППУ-304Н, ФРП-1), то инертным веществом является избыточная часть кислорода, если меньше (асфальт), то инертное вещество — избыток горючего (битум). У асфальта инертной примесью может быть также песок. С учетом сказанного энергия, выделяемая при сгорании единицы массы реального оксиликвита, может быть найдена пересчетом: $Q_1 = Q_p \rho_p / \rho_1$.

Приведенные в табл. 2 параметры позволяют оценить скорости детонации D и давления на фронте ударной волны p в рамках той или иной модели. Ниже такая оценка произведена в предположении, что гидродинамическая модель детонации конденсированных ВВ может быть применена с некоторыми изменениями для случая детонации оксиликвитов. Хорошим приближением (при $p \gg p_0$) могут быть следующие выражения для D и p , получаемые из условий Ренкина — Гюгонно и Чепмена — Жуге:

$$D^2 = 2(\gamma^2 - 1) Q_1, \quad (3)$$

$$p = 2\rho_1 D^2 / (\gamma + 1), \quad (4)$$

где $\gamma = -(\partial \ln p / \partial \ln V)$ — показатель адиабаты в уравнении состояния для продуктов детонации; давление на фронте ударной волны p увеличено в два раза по сравнению с давлением в плоскости Чепмена — Жуге.

В работе [7] рассмотрен способ вычисления величины γ при почти кристаллической плотности заряда и предложен способ вычисления при более низких плотностях для случая ВВ, содержащих углерод,

Таблица 2

ρ_1 при $\delta = \delta_{lim}$, г/см ³ (экспери- мент)	ρ_p , г/см ³	ρ_c , г/см ³	Q_p , кал/гВВ	Q_1 , кал/г (Дж/кг)	γ_c	γ_p	D , м/с	p , атм	$\frac{\Delta m}{m}$
0,26	0,14	1,33	2230	1190 (4,99 · 10 ⁶)	2,72	1,48	3450 (2510)	13200	0,53
0,35	0,12	1,29	2160	720 (3,01 · 10 ⁶)	2,65	1,45	2580 (2140)	13100	0,69
0,47	0,19	1,35	2140	860 (3,58 · 10 ⁶)	2,74	1,53	3100 (2240)	18650	0,52
1,98 (с песком)	0,36	1,28	2240	410 (1,7 · 10 ⁶) (с песком)	2,35 (битум)	1,62	2350 (1500)	33900	0,41

рассчитанными по формуле Менделеева с использованием химических реакций (2).

водород, азот и кислород. При кристаллической плотности заряда ($\rho = \rho_c$) [7]

$$\gamma_c = \frac{4}{3} + \frac{\sum_i n_i (ar_e)_i}{2 \sum_i n_i}, \quad (5)$$

где n_i — число атомов каждого элемента ВВ, $(ar_e)_i$ — константы функции Морзе:

Элемент	С	Н	Н	О
$(ar_e)_i$	3,04	1,42	3,40	3,22

При плотности заряжения меньше кристаллической ($\rho = \rho_p$) модель, рассматривающая ВВ как вещество, находящееся в двух фазах, дает [7]:

$$\gamma_p = \frac{4}{3} + \frac{1}{2} \frac{\rho_p}{\rho_c} \frac{\sum_i n_i (ar_e)_i}{\sum_i n_i}. \quad (6)$$

Рассчитанное таким образом эффективное значение γ_p принимается равным величине γ в плоскости Чепмена — Жуге при детонации реального оксидквита. Наличие инертных примесей (избытка горючего или кислорода, а также песка у асфальта) учитывается при определении Q_1 .

Значения величин γ_p , γ_c , D , p , рассчитанных по формулам (3) — (6), приведены в табл. 2. Видно, что расчетные скорости детонации несколько превышают измеренные. В рамках данной модели это можно объяснить тем, что при пропитке материала кислородом образуется неоднородная, гетерогенная система, в которой при детонации реагирует только часть материала, успевшая перемешаться с кислородом за ударной волной. В табл. 2 даны значения массовой доли материала ($\Delta m/m$), участвующей в реакции, при которой получается совпадение расчетных и экспериментальных значений скорости детонации. Для построения строгой модели необходима независимая от определения скорости детонации экспериментальная оценка массы реагирующего материала. Значения p рассчитаны при $\gamma = \gamma_p$, $\rho = \rho_1$ и скоростях, измеренных экспериментально. Отметим, что для оксидквитов полученные значения D и p значительно ниже соответствующих значений для известных конденсированных ВВ. Приведенные в табл. 2 параметры γ_c , Q_p , ρ_c , характери-

зующие идеальные оксиликвиты, позволяют считать, что при соответствующих условиях возможно образование оксиликвитов, превосходящих по мощности и сравнимых по бризантному действию с известными штатными ВВ (тротилом, гексогеном и др.). Основой таких оксиликвитов могут быть пористые металлы.

Поступила в редакцию
11/11 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Перрат, Н. А. Толч. Взрывчатые вещества с жидким кислородом, ОНТИ, 1933.
2. E. Karwat, G. Klein. Linde Berichte aus Technik und Wissenschaft, 1961, 11, 28.
3. Г. Ф. Денисенко, В. И. Файнштейн. Техника безопасности при производстве кислорода. М., «Металлургия», 1968, с. 58.
4. Б. А. Иванов, А. С. Мелихов и др. — В кн.: Процессы горения и проблемы тушения пожаров. Ч. II. М., ВНИИПО, 1973, с. 63—73.
5. Л. Г. Шпирман, А. С. Дубовик. — В сб.: Физика взрыва, № 3. М., ИХФ АН СССР, 1955, с. 5—15.
6. Г. А. Гитцевич, З. Б. Басыров, В. Г. Сагайдак. Кислород, 1959, 3.
7. Р. Миллер. — В кн.: Детонация и двухфазное течение. Перевод с англ. Под ред. П. Ф. Похила. М., «Мир», 1966, с. 68—77.

УДК 534.222.2

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЗАРЯДА ВВ ДЛЯ ПЛОСКОГО МЕТАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ

В. С. Трофимов

(Черноголовка)

Самый распространенный и простой метод разгона плоских пластин до скоростей несколько километров в секунду представлен на рис. 1 [1]. Металлическая пластина прикладывается к торцу заряда ВВ, на который выходит плоский детонационный фронт. Пластина разгоняется толчками. Сначала по ней вперед идет ударный фронт; в момент его выхода на свободную поверхность образуется волна разрежения, распространяющаяся назад. В результате ее взаимодействия со сжатыми продуктами детонации (ПД) в пластине формируется новая волна сжатия. Строгий анализ показывает, что она не успевает формироваться в ударный фронт, но в первом приближении будем рассматривать ее как сильный разрыв. Волна разрежения в первом приближении тоже будет считаться сильным разрывом.

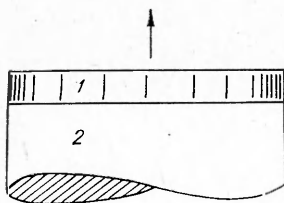


Рис. 1. Схема плоского метания металлической пластины (1) зарядом ВВ (2).

Предполагается, что детонация инициируется таким способом удастся плоско разогнать только небольшую центральную часть пластины, так как боковая разгрузка нарушает одномерность течения позади детонационного фронта. В настоящей работе предлагается элементарный метод расчета процесса разгона метаемой пластины, исходя из которого можно оценить геометрические размеры заряда ВВ, необходимого для плоского метания пластины данного диаметра и толщины с заданной скоростью.