

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ЧЕПМЕНА — ЖУГЕ И ВРЕМЕНИ РЕАКЦИИ В ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЕ МОЩНЫХ ВВ

А. Н. Дремин, К. К. Шведов

(Москва)

Электромагнитным методом измерены давления в плоскости Чепмена — Жуге и время химической реакции в детонационной волне тротила, гексогена, тэна, тетрила, дины, смесей тротила с гексогеном в зависимости от начальной плотности.

Показано, что ширина зоны химической реакции примерно в 5—10 раз больше ранее определенных откольным методом.

Современная гидродинамическая теория детонации [1-2] в настоящее время общепризнана. Одним из важнейших выводов этой теории является утверждение о наличии повышенного давления в зоне химической реакции (химпик) на фронте детонационной волны. С временем химической реакции связан один из наименее изученных вопросов теории детонации взрывчатых веществ (ВВ) — механизм протекания химической реакции. Впервые о существовании химпика при детонации газовых смесей известно из работы [3]. Наличие химпика в детонационной волне твердых ВВ было доказано экспериментально в работах [4, 5] так называемым «откольным методом». Идея этого метода состоит в измерении первоначальной скорости движения свободной поверхности w металлических пластин разной толщины l , плотно прижатых к детонирующему заряду ВВ. По параметрам ударной волны в точке резкого изменения наклона $w = w(l)$ рассчитывается давление p в плоскости Чепмена — Жуге и ширина зоны химической реакции a в детонационной волне.

Этим методом в работах [4, 5] было показано, что a литого состава В (ТГ 36/63 1% воска) ~ 0.13 мм, а для ТНТ в зависимости от плотности $-0.17 \div -0.32$ мм. Толщина металла, на которой сказывается влияние химпика, оказалась примерно в 10 раз больше a . Применение откольного метода ограничено рядом условий. Во-первых, предполагается наличие плоского фронта детонационной волны, что затрудняет использование этого метода для исследования неидеальных режимов детонации, когда фронт волны сильно искривляется. Во-вторых, измерения должны проводиться в области металла, сжатого исследуемой ударной волной, но не затронутой волной разгрузки сбоку. Поэтому для определения a в несколько мм необходимо использовать довольно толстые пластины (несколько десятков мм), что приводит к значительному увеличению диаметра и веса заряда.

Ниже приводятся некоторые результаты экспериментального определения массовой скорости u , давления p и времени химической реакции τ при детонации твердых ВВ в идеальном режиме детонации. Для этого использовался электромагнитный метод определения u за фронтом ударных и детонационных волн [6-8]. Этот метод основан на законе электромагнитной индукции. При движении проводника в магнитном поле в нем наводится э.д.с. индукции E , которая связана со скоростью движения проводника u , его длиной L и напряженностью магнитного поля H простым соотношением $E = HLu$. Отсюда можно легко найти u , зная H , L и E . В качестве проводника (будем называть его датчиком) использовалась алюминиевая фольга толщиной 0.1 мм и шириной 12—15 мм, согнутая в форме буквы П, перекладина которой является рабочей длиной. Датчик помещается в исследуемое ВВ. Опыт проводится в постоянном магнитном поле. При прохождении детонационной волны по заряду перекладина датчика движется со скоростью продуктов взрыва (массовая скорость) перпендикулярно магнитному полю. На концах датчика появляется э.д.с., которая записывается на осциллограф. Постоянное магнитное поле создавалось стационарным электромагнитом. Напряженность H в центре зазора ~ 700 мм была 400 э с точностью 1.5%.

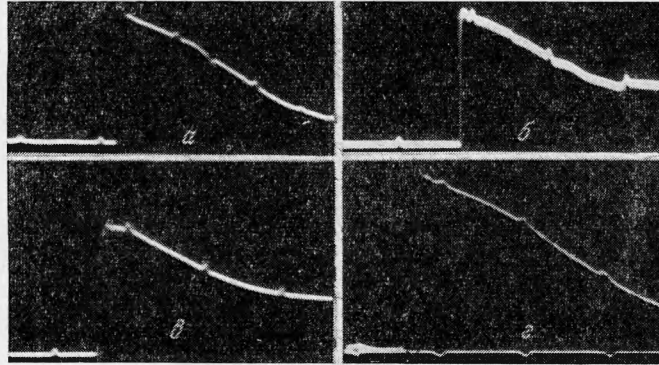
Электромагнитный метод дает возможность проследить за профилем массовой скорости во всей детонационной волне. Если согласно гидродинамической теории детонации на фронте детонационной волны существует химпик, то очевидно, что он должен проявиться на записях $u = u(t)$ при условии, что завал переднего фронта осциллограмм меньше времени существования химпика. Для использованных в настоящей работе датчиков завал переднего фронта составлял 0.06—0.1 мкс.

Применение электромагнитного метода предполагает, что наличие датчика в ВВ не искажает профиль детонационной волны. Поэтому для проверки работы метода были проведены предварительные опыты по определению профиля u за ударной волной в различных инертных средах. На фиг. 1 показаны примеры осциллограмм записей u в таких опытах: a — в воде, b — в прессованном полиэтилене, c — в кварцевом песке насыпной плотности, d — в парафине.

Как видно из фиг. 1, в исследованных инертных средах наблюдается резкий подъем массовой скорости во фронте ударной волны, а затем плавный спад. Для проверки амплитудного значения u были измерены независимо u и скорость ударной волны D в парафине от одинаковых зарядов на одной и той же глубине. Полученное электромагнитным методом значение u совпало со значением u , рассчитанным по известной ударной адиабате парафина [9] с использованием измеренной скорости D . Таким образом,

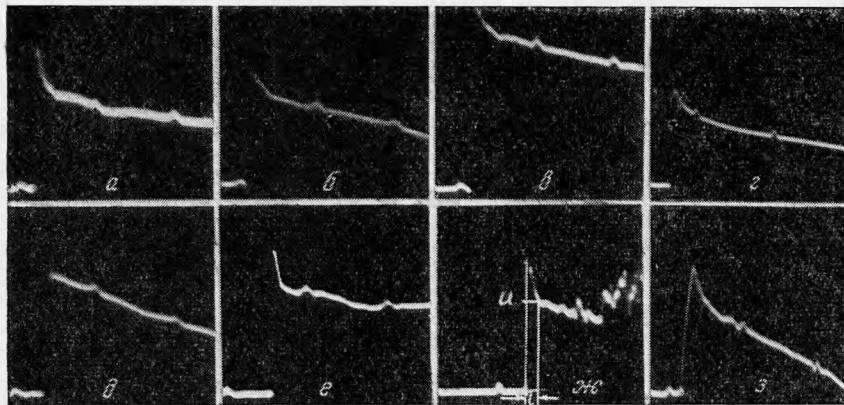
из этих экспериментов видно, что измерительный тракт вместе с датчиком сам по себе не вносит заметных искажений в записи массовой скорости.

Для проверки работы методики непосредственно на ВВ было решено промерить u на фронте детонационной волны в тротиле различной плотности и литом составе B , для которых эти данные были получены ранее откольным методом. В этих опытах использовались заряды диаметром 60 мм, длиной 2.0—2.5 диаметра. Размер зерна тротила составлял ~ 0.12 мм. В качестве инициатора применялись вспомогательная таблетка и взрывная линза, формирующая плоский фронт детонационной волны. Примеры осциллограмм записи u в тротиле и составе B показаны на фиг. 2а, б, в.



Фиг. 1

Как видно из сравнения фиг. 1 и фиг. 2а, б, в, записи в ВВ резко отличаются от записей в инертных материалах наличием «шика» на переднем фронте. Естественно предположить, что этот пик определяется повышенными скоростями в зоне химической реакции. Исходя из этого, при обсчете осциллограмм были приняты следующие обозначения: u_1 — массовая скорость в точке резкого перегиба на записи $u = u(t)$, равная массовой скорости в плоскости Чепмена — Жуге, τ — время от начала движения датчика до точки резкого перегиба $u = u(t)$, соответствующего положению плоскости Чепмена — Жуге во времени. Определенное таким образом τ характеризует время протекания основной части химической реакции в детонационной волне. Для пояснения принятые обозначения показаны на кадре в фиг. 2.



Фиг. 2

В таблице приведены полученные значения u_1 , τ , скорости детонации D , давление в плоскости Чепмена — Жуге p , показатель политропы продуктов взрыва n , ширина зоны реакции a . Величины p , n и a вычислялись по формулам

$$p = \rho_0 u_1 D, \quad n = D/u_1 - 1, \quad a = (D - \langle u \rangle) \tau$$

Здесь $\langle u \rangle$ — средняя скорость движения вещества в области химика.

Таблица

$\rho_0, \frac{e}{\text{см}^3}$	$D, \frac{\text{мм}}{\text{сек}}$	$u_1, \frac{\text{мм}}{\text{сек}}$	$p, 10^3 \text{ атм}$	n	$\tau, \mu \text{ сек}$	$a, \text{ мм}$	$d_*, \text{ мм}$
Тротил прессованный							
1.59	6.94	1.6	176.5	3.33	≤ 0.1	≤ 0.5	~ 3
1.45	6.50	1.51	142.0	3.3	≤ 0.1	≤ 0.5	~ 3
1.36	6.20	1.45	122.2	3.27	0.32	1.35	~ 5
1.00	5.10	1.23	62.5	3.15	0.50	1.75	~ 8
0.80	4.34	1.05	36.4	3.13	0.85	2.53	~ 11
1.59	6.94	1.76	194	2.94	0.039	0.17	[5]
1.45	6.48	1.66	156	2.90	0.048	0.19	[5]
1.30	5.99	1.58	123	2.80	0.058	0.21	[5]
1.00	5.10	1.30	64	2.92	0.1	0.32	[5]
1.63	6.94	1.66	189.1	3.18	—	—	[10]
Тротил литой							
1.62	6.85	1.61	177.0	3.25	0.3	1.41	~ 15
Гексоген							
1.72	8.50	2.12	310	3.0	≤ 0.1	≤ 0.5	≤ 1
1.59	8.14	2.00	259	3.07	≤ 0.10	≤ 0.5	≤ 1
1.0	6.05	1.43	87.0	3.20	0.3	1.26	~ 3.0
1.76	8.64	2.21	337.9	2.91	—	—	[10]
Прессованное ТГ 36/64							
1.68	7.83	1.96	257.8	3.00	< 0.1	< 0.5	—
1.40	6.93	1.66	161	3.17	0.3	1.43	—
0.85—0.9	5.40	1.38	67	2.91	0.6	2.16	—
1.68	7.65	ТГ литое 50/50 1.93	248.0	2.96	0.26	1.33	—
1.71	8.0	ТГ литое 36/64 1.94	266	3.13	0.32	1.76	—
1.71	8.02	ТГ литое 36/64 2.12	292	2.78	—	—	[10]
1.67	7.86	ТГ литое 37/63 2.07	272	2.79	0.027	0.13	[4]
Тетрил							
1.68	7.50	1.87	235.6	3.01	< 0.1	< 0.5	—
1.36	6.68	1.54	140.0	3.30	0.21	0.98	—
0.9—0.95	5.36	1.34	64.6	3.0	0.41	1.48	~ 8
ТЭН							
1.66	8.10	1.83	246	3.42	< 0.1	< 0.5	—
1.51	7.42	1.67	187	3.44	0.16	0.84	—
0.95	5.30	1.28	64.5	3.14	0.33	1.53	~ 5
Дина							
1.64	7.80	2.08	266	2.76	< 0.1	< 0.5	—
1.36	7.00	1.64	156.1	3.26	0.21	1.02	—
0.95	5.80	1.20	66.1	3.83	0.34	1.44	~ 8

Данные, отмеченные знаком литературного источника, получены откольным методом на тонких пластинах [4, 5], а также на толстых пластинах [10].

Значение массовой скорости на ударном фронте u_f определялось экстраполяцией записи $u = u(t)$ к $t = 0$. В описываемых экспериментах найденное таким образом u_f для различных ВВ составляло 1.3—1.6 от u_1 . Поэтому везде при вычислении a принималось $\langle u \rangle = 1.3 u_1$. Точность определения $u_1 \sim 3\%$, $\tau \sim 10 \div 15\%$.

В этой же таблице приведены для сравнения данные, полученные разными авторами для тротила, гексогена и состава В откольным методом. Из приведенных в таблице данных видно, что полученные в настоящей работе u_1 , p и τ резко отличаются от значений этих величин, полученных откольным методом на тонких пластинах [4, 5].

Рассмотрим причины этих расхождений.

В опытах с инертными материалами было показано, что измерительный тракт вместе с датчиком не вносит заметных ошибок в измерения. Однако можно предположить, что при измерениях в ВВ могут появиться ошибки, связанные с влиянием датчика на сам процесс детонации. Поэтому были проведены опыты по выяснению этого влияния. Очевидно, что если пик, обнаруженный на осциллограммах в ВВ, действительно будет зоной химической реакции, то он должен проявиться на осциллограммах, когда датчик стоит на границе раздела ВВ — инертный материал.

На фиг. 2г, приведена осциллограмма записи u в опыте, когда датчик стоял на границе раздела тротил — парафин. Как видно из осциллограммы, в этом случае также наблюдается пик.

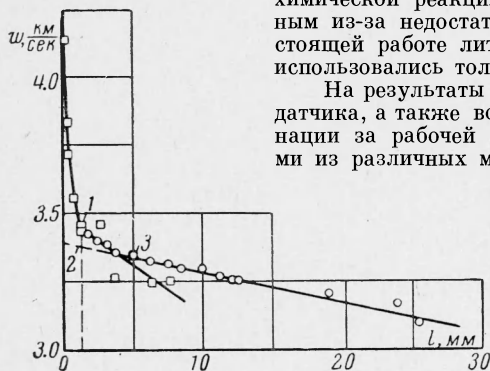
Следует отметить, что во всех опытах должен соблюдаться тщательный монтаж датчика в заряде, исключаяющий воздушные зазоры и раковины, которые могут привести к сильному искажению записи и результатов. Так, приведенное в работе [8] время

химической реакции литого состава B оказалось завышенным из-за недостаточного качества отливок. Поэтому в настоящей работе литые заряды просвечивались рентгеном и использовались только качественные отливки.

На результаты измерений может влиять инерционность датчика, а также возможная задержка инициирования детонации за рабочей поверхностью датчика. Опыты с датчиками из различных материалов и разной толщины показали,

что в пределах точности обработки осциллограмм получаются одинаковые результаты при любой толщине датчика меньше 0.15 мм. Поэтому все измерения, результаты которых приведены в таблице, производились с датчиками из алюминиевой фольги толщиной ~ 0.1 мм.

Для проверки возможной задержки инициирования детонации за датчиком были проведены опыты с датчиками, рабочая поверхность которых была часто просверлена.



Фиг. 3

Осциллограммы в этом случае не отличались от осциллограмм, полученных на сплошных датчиках. Таким образом, рассмотренные причины не могут объяснить резкого расхождения полученных в настоящей работе u_1 , p и t тротила и литого состава B с данными откольного метода [4, 5].

В действительности это расхождение объясняется следующей причиной. На фиг. 3 представлены графики зависимости w от l , полученные Даффом и Хаустоном [4] (квадратные точки) и Диллом [10] (круглые точки) для литого состава B на алюминиевых пластинах. Размеры зарядов примерно одинаковые. Дафф и Хаустон работали на пластинах толщиной до 7 мм и обнаружили точку перегиба на зависимости $w = w(l)$ при $l \approx 1$ мм (на фигуре 3 точка 1). По этой толщине была рассчитана зона химической реакции $a = 0.13$ мм и параметры в плоскости Чепмена—Жуге (см. таблицу). Однако, как видно из фиг. 3, зависимость $w(l)$, полученная Диллом на толстых пластинах (до 70 мм), имеет вторую точку перегиба (на фигуре точка 3). Дилл ее не отметил. Он рассчитывал u и p в плоскости Чепмена—Жуге по значениям параметров в металле на глубине 1 мм в соответствии с результатами Даффа и Хаустона (на фигуре точка 2). Вычисления u , p и a по точке 3 дают значения, грубо совпадающие с полученными в настоящей работе.

Приводим значения u и a , вычисленные по точкам 1, 2, 3, и значения u_1 и a , полученные в настоящей работе электромагнитным методом

$$u^1 = 2.10, \quad u^2 = 2.03, \quad u^3 = 1.98, \quad u_1 = 1.94, \quad a^1 = 0.13, \quad a^3 = 1.2, \quad a = 1.76$$

В расчете и на графике фиг. 3 параметры литого состава B (ТГ 36/63/1% воска) $\rho_0 = 1.67$ из работы [4] подправлены на состав B (ТГ 36/64) $\rho_0 = 1.71$ по имеющимся в работе [4] поправочным формулам. Отметим, что a^3 несколько меньше величины a , по-видимому, из-за влияния на химическую реакцию отраженной от пластины ударной волны. Таким образом, отмеченная Даффом и Хаустоном для состава B точка перегиба при $l = 1$ мм относится к зоне химической реакции, а точка перегиба, соответствующая положению плоскости Чепмена—Жуге в ВВ лежит гораздо дальше, на толщине металла 5—7 мм, и не могла быть обнаружена ими из-за недостаточной толщины использованных пластин. Аналогичная картина наблюдается при сравнении u_1 и p в ТНТ $\rho_0 = 1.57$ — 1.63 , полученных откольным методом на тонких (до 5—7 мм) [3] и толстых (до 70 мм) пластинах [10] и данных настоящей работы.

Из данных в таблице видно, что полученные в настоящей работе значения u_1 и p для тротила $\rho_0 = 1.59$ г/см³ в соответствии с приведенными соображениями ближе (хотя и несколько ниже) значений u и p , полученных Диллом откольным методом на

толстых пластинах, чем к u и p , полученных откольным методом на тонких пластинах [5]. Ширина зоны химической реакции тротила $\rho_0 = 1.59 \text{ г/см}^3$ лежит, очевидно, между $0.17 \div 0.5 \text{ мм}$. Экстраполяция полученной в настоящей работе зависимости τ от p для тротила дает для $\rho_0 = 1.59 \text{ а} \approx 0.5 \text{ мм}$. В книге Кука [11] приводится график зависимости $w = w(l)$ для литого тротила $\rho_0 = 1.58 \text{ г/см}^3$ и тротила $\rho_0 = 1.0 \text{ г/см}^3$, полученные на пластинах от ~ 2 до 40 мм , заимствованные из работы [12]. Из этого графика видно, что для литого ТНТ и ТНТ $\rho_0 = 1.0 \text{ г/см}^3$ зависимость $w = w(l)$ имеет перегиб на толщине пластины $\sim 10\text{--}12 \text{ мм}$. Это соответствует зоне реакции в литом ТНТ $a \approx 1.3 \text{ мм}$, а в ТНТ $\rho_0 = 1.0 \text{ г/см}^3$ $a \approx 1 \text{ мм}$. Эти величины также очень близки к полученным в настоящей работе. В книге Кука не приводятся табличные данные, так что не было возможности провести точное сравнение результатов. Следует отметить, что u и p гексогена $\rho_0 = 1.72\text{--}1.76 \text{ г/см}^3$, полученные откольным методом на толстых пластинах, также близки к u_1 и p , полученным в настоящей работе (см. табл.).

Узкий пик, отмеченный на зависимости $w = w(l)$ при $l \approx 1 \text{ мм}$, возможно, связан с самим металлом, а не с профилем детонационной волны в ВВ. Может оказаться, что, вследствие быстрого падения давления в зоне химической реакции, в пластинах, на толщине которых повышенное давление от химика не успевает затухнуть, происходит откол. Если имеет место такое явление, все пластины с толщиной меньше толщины откольной тарелочки летят как целое с повышенными скоростями. При толщине пластины большей, чем толщина откольной тарелочки, скорость w меняется медленнее, так как практически летит одна и та же масса (отдельная тарелочка), а уменьшение w связано лишь с затуханием «химика» в металле. Наконец, при некоторой толщине повышенное давление химика затухнет в металле полностью. Тогда будет отмечена вторая точка перегиба, соответствующая параметрам в плоскости Чепмена — Жуге.

Полученные в настоящей работе значения u_1 и p несколько ниже значений, полученных электромагнитным методом в работе [7]. Это объясняется тем, что в работе [7] завал переднего фронта был значительно больше времени существования химика, поэтому последний не мог быть обнаружен. Массовая скорость в плоскости Чепмена — Жуге находилась линейной экстраполяцией записи к $t = 0$, так как считалось, исходя из ранее полученных данных откольного метода [4, 5], что a очень мало. Естественно, это привело к завышению массовой скорости и занижению показателя политропы ПВ.

Таким образом, выявилось расхождение в значениях u и p , определенных откольным методом на тонких и толстых пластинах, и действительная ширина зоны химической реакции оказалась значительно больше ранее определенной для ТНТ и литого состава В; поэтому были проведены измерения величин u , p и τ в идеальном режиме детонации ряда других мощных ВВ в зависимости от начальной плотности, аналогичных данных по которым не опубликовано. В этих опытах использовались заряды диаметром 40 мм . Длина заряда составляла $2\text{--}2.5$ диаметра. В качестве инициатора также использовались вспомогательная таблетка и взрывная линза. Использовались штатные ВВ со следующим средним размером зерна: гексоген $\sim 0.1 \text{ мм}$, тетрил $\sim 0.25 \text{ мм}$, ТЭН флегматезированный $\sim 0.45 \text{ мм}$, дина $\sim 0.7 \text{ мм}$. На фиг. 2 представлены примеры осциллограмм записей u некоторых ВВ, так: (д) в тэне $\rho = 1.66 \text{ г/см}^3$, (ж) в тэне $\rho_0 = 1.51 \text{ г/см}^3$, (з) в тэне — $\rho_0 = 1.0 \text{ г/см}^3$, (и) в тетриле $\rho_0 = 0.9 \text{ г/см}^3$.

В осциллограммах z , z , u фиг. 2 масштаб времени между метками — 2 мксек , в остальных — 1 мксек . Трансформация пика в зависимости от плотности видна на кадрах д, ж, з фиг. 2. С увеличением начальной плотности пик в исследованных ВВ становится уже. На больших плотностях (за исключением литых зарядов) ширина пика по времени становится сравнимой со временем завала переднего фронта осциллограмм u , и его трудно обнаружить электромагнитным методом. Поэтому для исследованных прессованных ВВ при больших плотностях ($\rho_0 \sim 1.6\text{--}1.7 \text{ г/см}^3$) можно дать лишь приближенное максимальное значение τ . В случае же литых, насыпных и прессованных ВВ небольшой плотности ($\rho_0 \sim 1.0\text{--}1.5 \text{ г/см}^3$) пик обнаруживается всегда.

Полученные значения u , p , τ и другие параметры детонации ряда ВВ приведены в таблице. Там же приведены для сравнения критические диаметры d_* при тех же размерах зерна, которые использовались в этой работе. Критические диаметры заимствованы из работ Л. Н. Стесика, выполненных в Институте химической физики АН СССР.

Из таблицы видно, что значения показателя политропы продуктов взрыва для каждого из исследованных ВВ несколько отличаются между собой, хотя в общем близки к тройке. Для большинства ВВ зависимость n от начальной плотности не проявлялась, за исключением длины, у которой с уменьшением начальной плотности n заметно растет. Для всех исследованных ВВ время и соответственно зона химической реакции уменьшаются с ростом начальной плотности. Уменьшение τ с увеличением начальной плотности наблюдается и в смесях тротила с гексогеном в насыпных и прессованных зарядах; время реакции смеси близко ко времени реакции тротила как наиболее медленно реагирующего компонента при тех давлениях, которые развиваются в смеси.

Некоторое увеличение τ наблюдается в литых смесях тротила с гексогеном при увеличении % гексогена. Возможно, это связано с относительно невысокой точностью

