

13. С. А. Лесняк, В. Г. Слуцкий. ФГВ, 1984, 20, 4.
14. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд, С. М. Шерпанев и др. ФГВ, 1982, 18, 5.
15. С. М. Фролов, Б. Е. Гельфанд, А. А. Борисов. ФГВ, 1985, 21, 1.
16. Я. Б. Зельдович, А. С. Комнанеев. Теория детонации. М.: Гостехиздат, 1955.

*Поступила в редакцию 20/XII 1985,
после доработки — 11/X 1986*

О РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЧЕПМЕНА — ЖУГЕ ПРИ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ¹

*К. К. Шведов
(Черноголовка)*

Регистрация параметров Чепмена — Жуге при детонации конденсированных ВВ представляет определенные трудности принципиального и технического характера. Поэтому до настоящего времени в значениях давления и показателя политропы продуктов детонации (ПД) имеется большой разброс, превосходящий часто методические погрешности измерений. Например, для высокоплотного тротила указываются давления от 17,7 до 22,0 ГПа [1].

Разброс в параметрах детонации конденсированных ВВ приводит к критике основных положений современной гидродинамической теории детонации, ставит под сомнение возможность однозначного определения состояния Чепмена — Жуге при детонации зарядов конечного диаметра, а также получения надежных исходных данных для построения уравнения состояния ПД и использования его для расчетов параметров детонации и действия взрыва. Причины несовпадения параметров детонации конденсированных ВВ неоднократно обсуждались в литературе [2—5], но единого мнения по этому вопросу до настоящего времени нет. Это связано с необходимостью установления структуры детонационной волны для однозначного определения состояния Чепмена — Жуге, что делается далеко не во всех работах. Важным этапом в решении этой задачи явилось экспериментальное обнаружение химпика в литом составе В и пресованном тротиле в первых исследованиях по методу преград [6, 7]. Их результаты и выводы оказали большое влияние как на методологию определения параметров детонации, так и на построение различных схем их расчета. Однако, как выяснилось позже [2, 3], в указанных работах допущены ошибки, что привело к количественному несовпадению полученных результатов с данными других авторов.

Впервые на факт несовпадения параметров детонации одних и тех же ВВ, полученных различными методами, указано в [2]. В [2—4] вскрыты основные причины разброса данных и указаны способы их устранения. Это привлекло внимание исследователей к проблеме, но к ее окончательному решению не привело. В [5], например, высказываются соображения о том, что в зарядах конечного диаметра в принципе невозможно однозначно определить состояние Чепмена — Жуге.

Такое положение заставляет вновь остановиться на некоторых вопросах определения параметров детонации конденсированных ВВ.

Следует отметить, что противоречивые выводы, прежде всего, связаны с рассмотрением данных конкретных работ без соответствующего анализа результатов предыдущих исследований, что не дает полного представления о действительном состоянии вопроса. Поэтому кажется целесообразным сделать подробный обзор результатов определения параметров Чепмена — Жуге широко известных ВВ, полученных в ранних работах, и сопоставить их с последними данными. Наиболее удобны для этих целей состав В (Г/ТНТ 60/40), сплав ТГ 50/50 и тротил.

¹ Обзор экспериментальных работ.

Таблица 1

Номер п/п	азмеры заряда, мм	Метод измерения	Преграда				ρ_0 , г/см ³	D , км/с	p , ГПа	u , км/с	n	Ссылка
			материал	Δl , мм	b , мм	w , км/с						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	140×140×76 (линза)**	Откол w -электроконтактный	Al	0,2—7,0	1 5 *	3,23 3,05	1,67 1,67	7,87 7,87	27,2 26,0 *	2,08 1,98 *	2,80 3,00 *	[6]
2	245×245×200 (линза)	То же	Al	1,5—5,0	1 5 *	3,38 3,32	1,71 1,71	8,02 8,02	29,2 28,3 *	2,13 2,07 *	2,80 2,90 *	[8]
3	$d = 60, L = 180$	Электромагнитный Рентген с металлическими фольгами Рентген по волне разрежения	—	—	$t = 0,2$ мкс	—	1,71	8,00	26,6 *	1,94 *	3,10 *	[2]
4	100×100×6,35 (линза, $\varnothing 200$)		—	—	—	—	1,73	7,88	27,5 *	2,01 *	2,95 *	[9]
5	200×200×100 (линза, $\varnothing 200$)		—	—	—	—	1,73	7,91	26,8	1,96	3,02	
6	100×100×50 + + 9×6,35 с фольгой и без нее	Откол, ω -отражение света	Al	3—8	0 0 5 *	3,60 3,66 3,32	1,73 1,73 1,73	7,88 7,91 7,88	31,2 31,7 28,2 *	2,29 2,32 2,07 *	2,45 2,42 2,82 *	
7	$d = 25,4, L = 405$	Откол, ω -отражение тени	Al	2—2,8	0 2,8 *	3,60 2,93	1,73 1,73	7,91 7,91	31,5 24,2	2,30 1,77	2,45 3,47 *	[10]
8	$d = 51, L = 815$	То же	Al	2—2,8	0 2,8 *	3,60 3,11	1,73 1,73	7,91 7,91	31,5 26,3	2,30 1,92	2,45 3,15 *	
9	$d = 20, L = 75$	Преград, D — по засветкам зазоров	Плексиглас	3—8	0	5,00	1,69	7,93	26,7	1,93	3,10	[11]
10	$d = 100, L = 25$ (линза)	Преград, D — по отражению тени	»	3—6	0 2,7 *	—	1,69 1,69	7,84 7,84	28,0 26,7 *	2,12 2,00 *	2,70 2,91 *	[12]
11	$d = 75, L = 110$ (линза)***	Откол, ω -отражение проволоки	Mq	1,5—6	0 3 *	4,52 4,4	1,73 1,73	8,00 8,00	30,0 28,8 *	2,16 2,07 *	2,7 2,86 *	[13]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
12	$d = 127, L = 76$	Манганин	—	—	—	—	1,67 1,7	7,69 7,75	25,7 27,2 *	2,00 2,06 *	2,85 2,77 *	[14]
13	$d = 203, L = 203 \div 25$ (линза)	Непрерывная запись магнитным датчиком	Плексиглас	—	$t = 0,05$ мкс	—	1,73	8,00	30,5	2,22		[15]
14	$d = 72, L = 114$	Аквариумный	Вода	0—40	0	—	1,73	7,98	29,7 29,4 30,2	2,15 2,13 2,19	2,7 2,75 2,67	[16]
15	ТГ 50/50 литой, $d = 40, L = 100$	Электромагнитный	—	—	$t = 0$ мкс	—	1,68	7,65	26,0	203	2,77	[17]
16	ТГ 50/50 литой	»	—	—	$t = 0,2 \div 0,3$ мкс	—	1,68	7,65	24,8 *	1,93 *	2,96 *	[3]
17	$d = 60, L = 180$	Искусственный откол электромагнитный	Mg	0,8—16	5 *	4,47	1,68	7,65	24,7 *	1,92 *	3,0 *	
18	ТГ 50/50 литой, $d = 40, L = 15,$ линза (Т, К: 300; 77; 20,4)	Электромагнитный	—	—	$t = 0,2 \div 0,3$ мкс	—	1,68	7,64 7,80 7,80	25,0 * 25,1 * —	1,95 * 1,92 * 1,92 *	2,92 * 3,06 * 3,06 *	[18]
19	ТГ 50/50 литой, $d = 90, L = 5 \div 60$	Электромагнитный по автомоделльной волне	—	—	$t = 0,13$ мкс	—	1,68	7,65	24,6 *	1,92 *	3,0 *	[19]
20	ТГ 50/50 литой, $d = 120, L = 10 \div 440$	Преград, изм. D или w , искусственный откол	—	0,2—18	1,0 4,0 *	314 306	1,67 1,67	7,62 7,62	26,0 25,0 *	2,04 1,96 *	2,74 2,9 *	[20]

* Параметры Чепмена — Жуге,
** Состав содержит 1% воска,
*** Прессованный заряд.

В табл. 1 приведены размеры зарядов, методика измерений, плотность и детонационные характеристики литого состава В (строки 1—10, 12—14) и ТГ 50/50 (строки 15—20). Так как большинство результатов получено методом преград, то для них указан материал преграды, параметр и способ его измерения в преграде, диапазон применяемых толщин Δl , толщина преграды b и скорость свободной поверхности w , по которым рассчитывались детонационные характеристики в оригинальных работах (давление p , массовая скорость u , показатель политропы продуктов детонации n). Звездочкой отмечена толщина преграды и соответствующие ей параметры Чепмена — Жуге в новой интерпретации, которая обсуждается ниже. При использовании других методов вместо параметра b указано время записи массовой скорости от ударного фронта, с которым связывалось состояние Чепмена — Жуге (строки 3, 13, 15, 16, 18, 19).

Из данных табл. 1 виден большой разброс в параметрах детонации. Давление, например, для состава В по различным работам меняется от 25,7 до 31,7 ГПа. Практически такое различие наблюдается даже для одинаковых зарядов [10].

Для объяснения причин таких расхождений рассмотрим зависимость скорости свободной поверхности пластин от их толщины по различным работам (рис. 1). Основой для сравнения результатов может служить линия 5, полученная в [8] (пластины из Al толщиной от 1,5 до 50 мм и заряда размером $245 \times 245 \times 200$ мм). Здесь виден излом при $l = 4 \div 5$ мм, на который автор не обратил внимание и экстраполировал зависимость $w(l)$ линейно до $l = 1$ мм, ориентируясь на результаты работы [6] (кривая 2, пересчитана на состав 60/40, $\rho_0 = 1.713$ г/см³, как в [8]). Данные [6] имеют значительный разброс при $l = 1 \div 8$ мм. Приведенная по ним усредненная кривая 2 совпадает при $l = 1 \div 5$ мм с [8], а при $l > 5$ мм кривые 2 и 6 расходятся в соответствии с различиями в размерах заряда. Поэтому толщина пластины 5 мм может быть принята за размер стационарной зоны, отвечающей состоянию Чепмена — Жуге, как это следует из теории детонации.

Линии 3, 4, 6 — результаты работы [10], в которой сделана попытка получить данные для состава В различными методами. Для наглядности прямые построены в координатах $w(l)$ в трактовке авторов ($w = 3,66$ и $3,6$ км/с при $l = 0$). Видно, что данные этой работы отрывочные, а экстраполяция $w(l)$ к $l = 0$ противоречит другим результатам. Не обосновано и отождествление с состоянием Чепмена — Жуге излома на $w(l)$ для алюминиевых пластин при $l = 1$ мм, который зарегистрирован в [6] (см. рис. 1, 2). Появление этого излома обусловлено образованием естественной откольной пластины, на что указывает ряд факторов. В опытах с искусственным отколом (см. рис. 1, 1) не наблюдается резкого излома кривой. Искажение зависимости $w(l)$ из-за образования естественной откольной пластины в обычной постановке эксперимента [6] подтверждено специальными опытами с улавливанием пластин [3].

Справедливость такого объяснения подтверждается также результатами работ, в которых вместо w измеряли скорость ударной волны (УВ) в преграде (рис. 2). Кривые затухания средних \bar{D} и мгновенных значе-

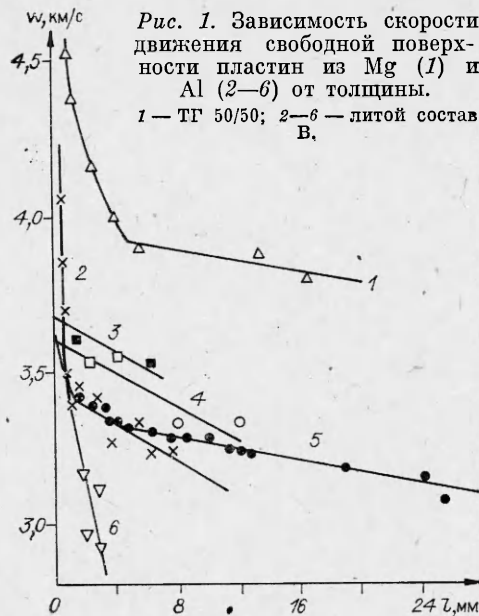


Рис. 1. Зависимость скорости движения свободной поверхности пластин из Mg (1) и Al (2—6) от толщины. 1 — ТГ 50/50; 2—6 — литой состав В.

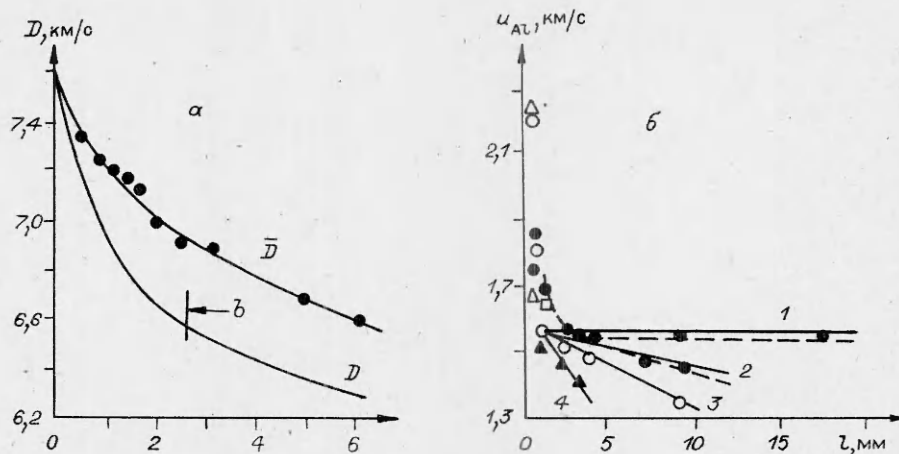


Рис. 2. Кривые затухания ударных волн в плексигласе (а) и алюминии (б). а) заряд состава В диаметром $d=100$ и длиной заряда $L=25$ мм [12]; б) заряд ТГ 50/50, $d=120$ мм, L , мм: 1 — 440, 2 — 40, 3 — 20, 4 — 10 [20].

ний скорости D УВ на рис. 2 ясно демонстрируют отсутствие излома при $l \approx 1$ мм. К сожалению, из-за малых длин заряда и толщин использованных преград в [12] не выявлена надежно величина b , на которой затухает химпик (принятое в работе значение 2,5 мм, по-видимому, занижено). Противоположный вывод сделан в [20] на основе приведенных на рис. 2, б результатов. Идея опытов этой работы состояла в выделении стационарной зоны (химпик) одномерной детонации, которая создавалась в зарядах различной длины ударом тонкой пластины. Значение толщины преграды, соответствующее ширине стационарной зоны ВВ, авторы [20], следуя [6], принимают равным 1 мм и считают, что в эту точку сходятся кривые затухания зарядов различной длины. Такая трактовка результатов произвольна, так как нет уверенности в том, что на коротких зарядах (10 и 20 мм) при выбранном способе инициирования детонация является установившейся.

В [19] отмечалось, что на длине 10 мм при таком же способе инициирования отличия от автомодельности в составе ТГ 50/50 велики и только на зарядах с $L=30$ и 60 мм ($d=90$ мм) результаты описываются автомодельной волной с исключением начального участка, соответствующего стационарной зоне в 0,13 мкс по времени или толщине преграды из А1 около 5 мм. Поэтому можно считать, что кривые 1 и 2 рис. 2, б относятся к установившимся режимам детонации. Они сходятся на толщине 4,5 мм (см. штриховые линии), что совпадает с рассмотренными выше результатами. С этими результатами совпадают и данные электромагнитного метода, по которому химпик регистрируется непосредственным измерением профиля массовой скорости в ВВ [2, 3].

Таким образом, из сказанного выше следует вывод о существовании в составах В и ТГ 50/50 зоны повышенных давлений — химпика, который затухает в пластинах из А1 и Mg при $b=4,5 \div 5,0$ мм. Поэтому нет оснований экстраполировать зависимости $w(l)$ или $D(l)$ к $l=0$ или отождествлять излом при $l=1$ мм с состоянием Чепмена — Жуке, как это делалось в ряде работ (см. табл. 1, строки 1, 2, 6—11, 14, 15, 20). Такая экстраполяция является главной причиной разброса значений параметров детонации рассматриваемых ВВ.

Кроме того, анализ данных, полученных на зарядах литого состава В и ТГ 50/50 различного диаметра, показывает, что в этих ВВ наблюдается влияние диаметра заряда на параметры детонации. На рис. 3 приведены зависимости давления, массовой скорости и показателя политропы продуктов детонации литого состава В плотностью 1,71—1,73 г/см³ от диаметра заряда. Цифры около точек означают порядковый номер в

Рис. 3. Зависимости $p(d)$, $u(d)$ и $n(d)$ (\times — пересчитаны на $\rho_0 = 1,71 \text{ г/см}^3$).

табл. 1. В соответствии с приведенным выше анализом исключены из рассмотрения данные, измеренные методом преград при $l=0$ или $l=1$ мм, и те, для которых не приводятся кривые затухания, позволяющие выявить надежно точку излома. Видно, что результаты измерений различными методами (преград, электромагнитный, рентгеновский по смещению металлических фольг, манганинового датчика) и разными авторами ложатся на одну кривую. Из общей зависимости выпадают точки, зарегистрированные рентгеновским методом по торцевой волне разрежения (точка 5). Это не удивительно, так как такой метод определения параметров Чепмена — Жуге наименее точен.

Совпадающие результаты дают различные методы, что означает их достоверность и подтверждает правильность трактовки результатов измерений параметров детонации по методу преград. Однако абсолютные значения p , u , n зависят от диаметра заряда. Давление детонации состава В при $d=50 \div 60$ мм составляет 26,2—26,6 ГПа и растет до 28,0—28,5 ГПа при $d \geq 130$ мм. По существу, идеальный режим детонации достигается в зарядах $d \approx 140$ мм, что часто не учитывается при анализе результатов. В прессованных зарядах состава В идеальный режим достигается при $d=75$ мм (см. рис. 3, 11).

Показатель политропы ПД состава В в идеальных режимах детонации составляет 2,9 и увеличивается до 3,1—3,5 при $d=50 \div 60$ мм.

Рассмотренные причины несоответствия результатов определения параметров Чепмена — Жуге в составах В и ТГ 50/50 подтверждаются данными по исследованию прессованного и литого тротила. На рис. 4 показаны кривые затухания ударных волн в А1 от детонации зарядов прессованного тротила по данным некоторых работ. Все кривые указывают на существование области повышенных давлений (химпик) независимо от выбора параметра (D , W) и способа его измерения по методу преград. Излом, обнаруженный в [7] при $l=1$ мм, не отмечается в опытах с искусственным отколом или при измерениях D . Единственный излом, разделяющий зону влияния химпика и зависящую от геометрии заряда область разлета ПД в волне разрежения, соответствует $b=4 \div 5$ мм.

При этом результаты определения параметров детонации в точке Чепмена — Жуге совпадают для неоднородного (см. рис. 4, а) и одномерного (б) потоков, если длина заряда достаточна для достижения стационарного режима.

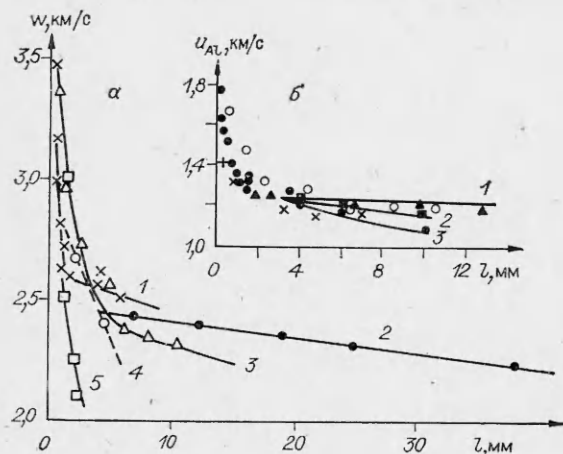


Рис. 4. Кривые затухания ударных волн в алюминии от детонации зарядов прессованного тротила.

а) данные работ [7] (1), [8] (2), [13] (3, 4) и [21] (5); б) [20]; $d=90$ мм, $L=200$ (1), 40 (2) и 20 мм (3).

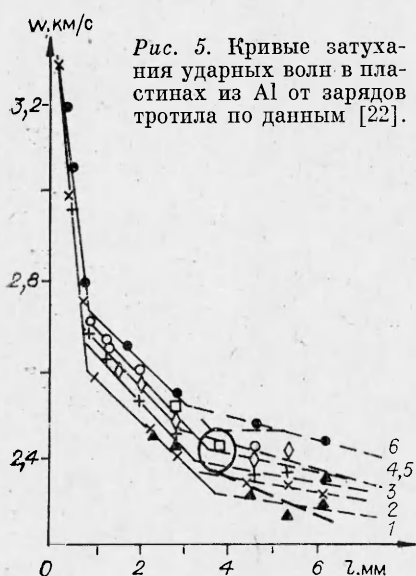


Рис. 5. Кривые затухания ударных волн в пластинах из Al от зарядов тротила по данным [22].

Детальные исследования структуры газодинамических потоков во фронте ДВ на зарядах прессованного ТНТ различного диаметра и длины в обычной постановке эксперимента по методу преград с измерениями w проведены в [22]. Получено два излома на зависимости $w(l)$ пластин из Al при $l = 1$ и 4 мм (рис. 5). Первый излом отождествлялся в [22] с состоянием Чепмена — Жуге по аналогии с данными [7], без соответствующего анализа возможных технических ошибок. Опыты в [22] проводились на зарядах диаметром 41,6 (кривые 1, 2), 50,8 (3, 4) и 76,4 мм (5, 6) и длиной от 5,5 до 15 диаметров. При такой геометрии заряда спад давления в волне разрежения целиком определяется диаметром заряда, что в работе надежно не выявлено из-за недостаточной толщины использованных пластин. Очевидно, что пер-

вый излом ($l = 1$ мм), как и в [6, 7], не связан с состоянием Чепмена — Жуге. Усреднение всех результатов [22] с учетом различия в градиентах спада волны в зарядах различного диаметра (штриховые линии) дает для излома при $b = 4$ мм $w = 2,4 \pm 0,05$ км/с, что совпадает с результатами других работ.

На рис. 6 приведены кривые затухания ударных волн в пластинах из алюминия в опытах с литым тротилом. За основу для сравнения здесь взята кривая 1, заимствованная из [23]. Диаметр и длина заряда в [23] не указываются. Можно выделить точку излома на толщине ~ 9 мм. Параметры в этой точке полностью совпадают с результатами электромагнитного метода (штриховые прямые), которые получены обратным пересчетом профиля $u(t)$ в зоне реакции литого ТНТ ($\rho_0 = 1,6$ г/см³, $d = 60$ мм [3]).

Кривая 2 относится к зарядам с $\rho_0 = 1,63$ г/см³, $d = 100$ и $L = 25$ мм [12]. Иницирование осуществлялось плосковолновой линзой, измерялась скорость фронта. Эта зависимость подтверждает наличие зоны повышенных давлений (химпик), но нигде, кроме ударного фронта, не совпадает с другими кривыми. Аналогичное положение имеет место в прессованном тротиле (см. рис. 4, а, кривая 5). Поэтому выделять состояние Чепмена — Жуге по кривым затухания на зарядах различной длины с одномерным течением, как уже отмечалось при анализе рис. 2, б, нужно с большой осторожностью, так как нет уверенности в стационарности взрывного процесса на выбранной длине. Как показано в [24], в процессе развития УВ до детонационной сначала устанавливается скорость фронта, а зона реакции и состояние Чепмена — Жуге окончательно формируются позже. Поэтому более надежно привлечение данных по разлету ПД стационарной детонации в

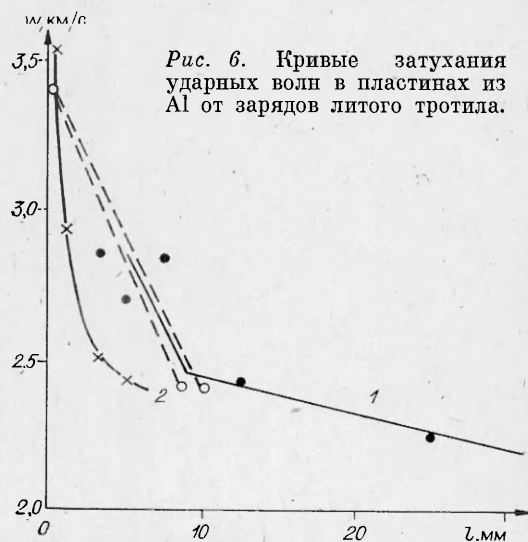


Рис. 6. Кривые затухания ударных волн в пластинах из Al от зарядов литого тротила.

зарядах различного диаметра для выделения состояния Чепмена — Жуге, что неоднократно делалось в наших работах [2, 3].

Параметры детонации тротила, полученные рядом авторов различными методами, приведены в табл. 2. В ней указаны также размеры зарядов и параметры в преграде, которые в соответствии с проведенным анализом отвечают состоянию Чепмена — Жуге. Из табл. 2 следует, что при $\rho_0 = 1,59 \text{ г/см}^3$ в зарядах прессованного ТНТ диаметром 40—200 мм давление детонации составляет 17,7—17,9 ГПа, а в случае $\rho_0 = 1,6 \div 1,63 \text{ г/см}^3$, $p = 18,0 \div 18,5 \text{ ГПа}$ независимо от способа измерения. Показатель политропы ПД тротила с $\rho_0 = 1,59 \div 1,63 \text{ г/см}^3$ в идеальных режимах детонации составляет 3,25—3,3.

Таким образом, из анализа результатов измерений p и n литого состава В, ТГ 50/50 и тротила следует, что большинство экспериментальных методов (метод преград, электромагнитный, рентгеновский с использованием металлической фольги и манганинового датчика) дают согласующиеся в пределах 2—3% результаты при обоснованном подходе к их техническому выполнению с учетом основных положений современной гидродинамической теории детонации. Численные значения по p , u и n для этих ВВ могут служить в качестве «опорных» точек при разработке других экспериментальных методик или проверке различных предположений, обычно закладываемых в схемы расчетов параметров детонации.

Обсуждаемые результаты, получены в основном давно разработанными методами, обладающими сравнительно невысоким временным разрешением. В последнее время развиты и использованы для регистрации состояния ВВ в зоне химической реакции более чувствительные методы [26—32]. Это позволило обнаружить химпик в октогене, тэне и других веществах [30, 31].

Однако применение их не привело к принципиально новым результатам в параметрах Чепмена — Жуге, а во многих работах были повторены рассмотренные ошибки. Так, при определении показателя политропы ПД тротила в [26] методом отражения, в котором измеряемым параметром была температура ударного фронта в жидкости-индикаторе, не обнаружен химпик, а в традиционных измерениях по методу аквариума и откола данные по w на экранах из Al толщиной 3,5 и 88 мм экстраполировались линейно к $l = 0$ без анализа известных данных. В результате для ТНТ ($\rho_0 = 1,53 \div 1,55 \text{ г/см}^3$) значения n оказались равным от 2,75 до 2,8, что не согласуется с приведенными выше результатами. В [27] этим же методом с применением темного экрана между детонирующим ВВ и индикаторной жидкостью удалось обнаружить зону повышенных давлений (химпик) в литом и прессованном ТНТ, сплаве ТГ 50/50, что качественно подтверждает выводы предыдущих работ. Количественные данные по времени реакции ТНТ работы [27] оказались близкими к известным, хотя точка излома кривой затухания по этому методу регистрируется с большой ошибкой. Найденная для высокоплотного ТНТ величина $p = 20,3 \text{ ГПа}$, очевидно, завышена. Это связано, вероятно, с погрешностью калибровочной кривой $T - p$ для CCl_4 , которая построена с использованием результатов ранних работ, не учитывающих конечную зону химической реакции.

В работах [28, 29] с применением лазерной интерферометрии показано, что область влияния химпика от зарядов прессованного ТНТ ($\rho_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$) в плексиглазе и воде составляет 0,2—0,25 мкс по времени. Количественные данные по кривой затухания УВ от зарядов ТНТ с $\rho_0 = 1,56 \text{ г/см}^3$, $d = 64$ и $L = 120$ мм в диапазоне толщин плексиглаза от 0,2 до 8 мм, полученные этим методом, приведены в [30]. Кривая затухания имеет плавный спад, что затрудняет выделение толщины, соответствующей состоянию Чепмена — Жуге. В [30] за это состояние принято $b = 3 \text{ мм}$, $p = 18,2 \text{ ГПа}$, а время реакции 0,14 мкс.

Тщательные исследования состояния ВВ в зоне реакции ДВ высокоплотного ТНТ предприняты в [31]. К сожалению, из-за малых времен наблюдения состояние Чепмена — Жуге в этой работе экспериментально

Таблица 2

Номер п/п	Размеры заряда, мм	Метод	Преграда			ρ_0 , г/см ³	D , км/с	p , ГПа	u , км/с	n	Ссылка	
			материал	Δl , мм	b , мм							w , км/с
1	$d = 40, L = 85$	Откол, w	Al	0,2—5,0	1,3 5,0 *	2,6 2,4	1,59 1,59	6,94 6,94	19,4 17,9 *	1,76 1,62 *	2,94 3,28 *	[7]
2	$d = 200 \div 300, L = 200$	»	Al	2,5—50	1,0 5,0 *	2,46 2,42	1,64 1,64	6,94 6,94	18,9 18,5 *	1,66 1,63 *	3,18 3,26 *	[8]
3	$d = 40, 50, 76, L =$ $= (5,5 \div 16)d$	»	Al	0,2—7,0	1,0 4,0 *	2,6—7,0 2,4	1,63 1,63	6,94 6,94	20,0—21,3 18,5 *	1,77—1,91 1,63 *	2,92—2,64 3,26 *	[22]
4	$d = 90, L = 20 \div 200$	Откол, w -искусственный или D	Al	0,2—16,0	4,0 *	2,44	1,63	6,94	18,3 *	1,62 *	3,28 *	[20]
5	$d = 60, L = 150$	Искусственный откол	Al	0,5—12	5,0 *	2,4	1,59	6,91	17,8 *	1,61 *	3,3 *	[3]
	$d = 40, L = 100$	Электромагнитный	—	—	$t = 0,1$ мкс	—	1,59	6,91	17,7 *	1,61 *	3,3 *	[3]
	$d = 100, L = 250$	»	—	—	$t = 0,1$ мкс	—	1,59	6,93	17,9 *	1,63	3,25	[3]
6	$d = 51, L = 25$ (линза)	»	—	—	$t = 0,1$ мкс	—	1,60	6,94	18,1 *	1,63	3,25	[25]
7	Литой ТНТ	Откол, w	Al	3—38	9 *	2,45	1,58	6,90	17,8 *	1,63 *	3,23 *	[23]
8	Литой ТНТ, $d = 60,$ $L = 150$	Электромагнитный	—	—	$t = 0,2 \div$ $\div 0,3$ мкс	—	1,60 1,62	6,85 6,98	17,5 * 18,3 *	1,60 * 1,62 *	3,28 * 3,3 *	[3]
9	Литой ТНТ, $d = 51$ $L = 13 \div 76$	»	—	—	$t = 0,2 \div$ $\div 0,3$ мкс	—	1,60	6,94	17,8 *	1,60	3,34	[25]

* Параметры Чепмена — Жуге.

не определено, а приводимая расчетная величина давления 21 ГПа завышена. Это, по-видимому, связано с использованием ВКВ-уравнения состояния, коэффициенты в котором подобраны по полученным в ранних исследованиях ошибочным данным. Основная ценность работы [31] состоит в том, что в ней удалось экспериментально зарегистрировать состояние вещества на ударном фронте (время около 6 нс). Оно оказалось совпадающим с расчетом по ударной адиабате исходного ВВ, полученной в области низких давлений. Конечно, состояние вещества непосредственно за ударным фронтом ДВ может несколько отличаться от исходного из-за частичного разложения ВВ. Для выделения состояния Чепмена — Жуге это не имеет принципиального значения. Важно само наличие химпика, что облегчает трактовку результатов. Однако, вообще говоря, наличие химпика не обязательно. Например, он не наблюдается в детонации зарядов индивидуальных и смесевых ВВ различной структуры при диаметрах, близких к критическим. В этих случаях электромагнитным методом регистрируется близкий к треугольному спад массовой скорости и для выделения состояния Чепмена — Жуге, если оно есть, необходимы дополнительные экспериментальные данные.

В заключение хотелось бы остановиться на точности расчетов давления и показателя политропы ПД. В настоящее время предложено несколько упрощенных схем расчета параметров детонации конденсированных ВВ, основанных на использовании ограниченных экспериментальных данных. Сопоставление результатов расчетов по ним показывает, что различия в значениях давления и показателя политропы достигают 20%. Такая же погрешность наблюдается и при сопоставлении с экспериментальными данными.

Основная причина погрешности расчетов заключается, видимо, в том, что реальная теплота превращения ВВ в зоне реакции и коэффициенты в принятых уравнениях состояния весьма чувствительны к условиям детонации. Так, решение термодинамических задач по программе TIGER с использованием трех широко известных уравнений состояния (БКВ, ДКЦ-3 и БКВ-R) дало для тротила ($\rho_0 = 1,63 \text{ г/см}^3$) значения $D = 7,3; 6,79$ и $7,08 \text{ км/с}$, $p = 22,3; 18,1$ и $19,9 \text{ ГПа}$, $n = 2,5; 3,3$ и $2,87$ соответственно [33]. По набору трех основных параметров детонации ни один из методов не обеспечивает хорошего совпадения с экспериментом. Это, в свою очередь, означает, что по расчетным данным трудно судить о деталях поведения вещества в зоне реакции детонационной волны. Уточнение экспериментальных результатов, очевидно, приведет в дальнейшем и к совершенствованию методов расчета параметров детонации конденсированных ВВ. Особый интерес представляют смесевые ВВ и системы с различного рода добавками.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. J. Kamlet, S. J. Jacobs. J. Chem. Phys., 1968, 48, 43.
2. А. Н. Дремин, К. К. Шведов. ПМТФ, 1964, 2.
3. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
4. В. А. Веретенников. — В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1980.
5. С. М. Бахрах, А. А. Евстигнеев, В. И. Зубарев и др. ФГВ. 1981, 17, 6, 117.
6. R. E. Daff, E. Hauston. J. Chem. Phys., 1955, 23, 7, 1268.
7. А. Н. Дремин, П. Ф. Шохид. Докл. АН СССР, 1959, 127, 6, 1245.
8. W. E. Deal. J. Chem. Phys., 1957, 17, 3.
9. W. C. Rivard, D. Venable, W. Fickett e. a. Fifth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research, ACR-184, 1970.
10. W. C. Davis, D. Venable. Ibid.
11. A. Persson, P. A. Persson. Swed. Det. Res. Fond Box. 32058—12611, 1976.
12. R. L. Jameson, A. Hawkins. Fifth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research, ACR-184, 1970.
13. J. C. Cast, H. C. Hornig, J. W. Kury. Standard test for detonation pressure measurements. — UCRL 50645.
14. K. Burrows, D. K. Chilvers, R. Cyton e. a. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research Dept, ACR-221, 1976.

15. W. C. Davis. Ibid.
16. J. K. Rigdon, L. B. Akst. Fifth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research. ACR-184, 1970.
17. В. М. Зайцев, П. Ф. Похил, К. К. Шведов. Докл. АН СССР, 1960, 132, 6.
18. В. Ф. Нестеренко. ФГВ, 1975, 11, 2, 324.
19. В. Н. Зубарев. ПМТФ, 1965, 2, 54.
20. В. Н. Зубарев, Н. В. Попов, Г. С. Телегин. ФГВ, 1970, 6, 1, 107.
21. О. А. Кузнецов, В. С. Соловьев. ФГВ, 1974, 10, 3, 401.
22. V. G. Craig. 10-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, USA, 1964.
23. M. A. Cook. The Science of high explosives. Reinhold publ. Corp., 1958.
24. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ПМТФ, 1963, 6.
25. S. I. Jacobs, D. J. Edwards. Fifth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research, ACR-184, 1970.
26. И. М. Воскобойников, А. Н. Кирюшкин, А. Н. Афанасенков и др. Докл. I Все-союз. симпозиума по импульсным давлениям. Т. 1. М., 1974.
27. И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя. Хим. физика, 1984, 3, 7, 1036.
28. J. E. Kennedy, J. W. Nunziato, D. R. Hardesty. Acta Astronautica, 1975, 3, 811.
29. Л. В. Альтшулер, В. А. Ашаев, Г. С. Доронин и др.— В кн.: Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. Черноголовка, 1978.
30. Л. В. Альтшулер, В. К. Ашаев, Г. С. Доронин и др.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1980.
31. V. Hayes, V. Graig, M. Tarver. UCRL, 1981, 84987.
32. S. A. Sheffield, D. D. Bloomqvist, C. M. Tarver. J. Chem Phys., 1984, 80(8), 3831.
33. M. Finger, E. Lee, F. Helm e. a. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation, ACR-224, 1976.

Поступила в редакцию 30/IV 1986

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВВ И ТЕХНИКИ ВЗРЫВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

*В. Н. Минеев, Ю. Н. Тюняев, В. А. Рыжанский,
А. Г. Иванов
(Москва)*

В настоящее время ряд ключевых для экономики отраслей промышленности (химическая, атомная энергетика), а также некоторые перспективные научно-технические программы (например, управляемый термоядерный синтез) испытывают возрастающую потребность в достаточно прочных крупногабаритных системах для локализации взрывообразных процессов. При всем различии природы этих процессов (химический, тепловой, физический взрывы, реакции деления или синтеза) и их места в технологическом цикле (нормальный или аварийный режим) процессы со взрывообразным выделением энергии обладают одним общим свойством — передавать на конструкции механические нагрузки большой амплитуды и малой длительности (динамические нагрузки). Опасность таких нагрузок состоит в том, что они могут привести к неконтролируемому пластическим деформациям или даже к разрушению конструкций.

Ценность крупномасштабных, часто уникальных объектов повышенной ответственности, такие как ядерная энергетическая установка (ЯЭУ), исключает возможность проведения их разрушающих испытаний для выяснения фактического запаса прочности при динамическом нагружении. Поэтому параллельно с совершенствованием подобных конструкций развиваются методы экспериментальных исследований по моделированию динамической неупругой реакции этих объектов.

Настоящая работа представляет собой краткий обзор методов экспериментальных исследований динамической прочности силовых и защитных структур ЯЭУ (корпусов и защитных оболочек реакторов, зданий АЭС).