

О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАСПЛАВА ВВ ТЭН К УДАРНО-ВОЛНОВОМУ ИМПУЛЬСУ

О. Л. Игнатов, А. А. Кабаев, С. А. Кабаев, Е. О. Ткач, С. Ю. Сулова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Выполнены экспериментальные исследования чувствительности расплава ВВ ТЭН к ударно-волновому импульсу и получены расчетные оценки параметров порогового (критического) уровня давления (амплитуда и длительность), при воздействии которого на расплав ВВ ТЭН происходит инициирование взрыва ВВ.

Ключевые слова: расплав ВВ, критическое давление, ударно-волновой импульс, чувствительность к ударно-волновому импульсу.

В отличие от жидких взрывчатых веществ (ЖВВ) слабо исследована ударно-волновая чувствительность расплавов ВВ. Механизм инициирования нормальной детонации ЖВВ мощными ударными волнами подробно изучен теоретически и экспериментально [1, 2]. Установлено, что взрывную реакцию возбуждают ударные волны амплитудой ≈ 100 кбар. В работах [3–6] показано, что если жидкость содержит разрывы сплошности – кавитационные пузырьки, которые образуются в процессе инициирования, то химическая реакция, распространяющаяся в форме нормальной детонации или детонации с малой скоростью, возникает под действием ударных волн с амплитудой 1–10 кбар.

Эксперимент

Для исследования ударно-волновой чувствительности расплава ВВ ТЭН во ВНИИЭФ были проведены эксперименты [7]. В ходе исследования влияния термических воздействий на взрывчатое вещество пентаэритриттетранитрат (ТЭН, PETN) в составе различных конструкций было выявлено, что при нагреве с низкой скоростью нарастания температуры (менее $1^\circ\text{C}/\text{мин}$) после плавления данное вещество переходит в состояние объемного терморазложения, при котором газообразные продукты терморазложения распределяются по всему объему расплава, образуется двухфазная среда. Внешне этот процесс напоминает кипение жидкости, в связи с этим он был назван авто-

рамы «псевдокипением» (рис. 1). Навеска ВВ ТЭН помещалась в стеклянный стакан диаметром 25 мм и высотой 40 мм.

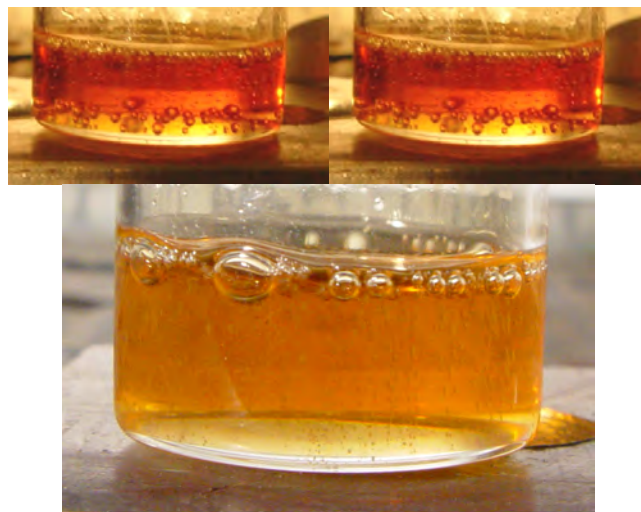


Рис. 1. Навеска ВВ ТЭН, разогретая до состояния расплава и начальной стадии «псевдокипения» (температура 143°C)

На примере ВВ ТЭН было установлено, что в состоянии «псевдокипения» в течение значительного времени расплав имеет повышенную чувствительность к механическим воздействиям различной интенсивности: от низкоскоростного до ударно-волнового. Авторами была разработана расчетно-экспериментальная методика определения чувствительности расплава ВВ к воздействию ударно-волнового импульса (УВИ). Для проведения экспериментов была изготовлена лабораторная

установка, схема которой представлена на рис. 2. Навеска ВВ ТЭН 4 массой $m \approx 3,2$ г в насыпном виде помещалась в стакан 5, изготовленный из термостойкого стекла. Стекланный стакан 5 устанавливался в стакан 3 из сплава Д16 в котором было сделано смотровое окно. Для варьирования амплитуды УВИ использовалась преграда, состоящая из двух частей: постоянной ба и переменной бб. Постоянная часть преграды устанавливалась сверху на стакан 3 и находилась в контакте с ВВ, причем после расплавления ВВ ее нижняя часть была погружена в расплав на ≈ 1 мм (толщина слоя расплава от торца преграды ба до дна стакана 5 составляла $\approx 2,3$ мм). Переменная часть преграды бб была соединена с генератором УВИ 7 и находилась вне зоны интенсивного нагрева. Нагрев стакана с ВВ производился плоским нагревателем через стальной экран 2 толщиной 4 мм. Корпус стакана 3 и стальной экран выполняли роль отметчиков взрывчатого превращения в расплаве ВВ. После нагрева ВВ ТЭН до состояния расплава и установления заданной температуры производилась стыковка переменной преграды, соединенной с генератором УВИ, с постоянной частью преграды и проводился подрыв генератора.

С помощью представленной установки была проведена серия экспериментов по инициированию расплава ВВ ТЭН, нагретого до температуры 149–150 °С. На рис. 3 в форме видеограммы показан процесс плавления ВВ ТЭН. На заключительном снимке видно, что навеска расплавилась полностью и постоянная часть преграды находится в контакте с расплавом.

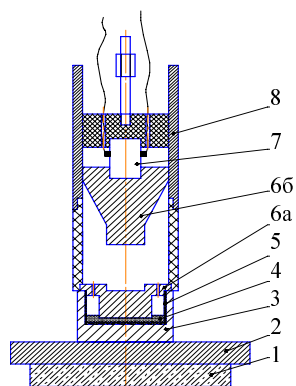


Рис. 2. Схема лабораторной установки: 1 – нагреватель; 2 – стальной экран; 3 – стакан из сплава Д16; 4 – навеска ВВ ТЭН; 5 – стеклянный стакан; 6а и 6б – постоянная и переменная часть преграды из Д16; 7 – генератор УВИ; 8 – направляющая

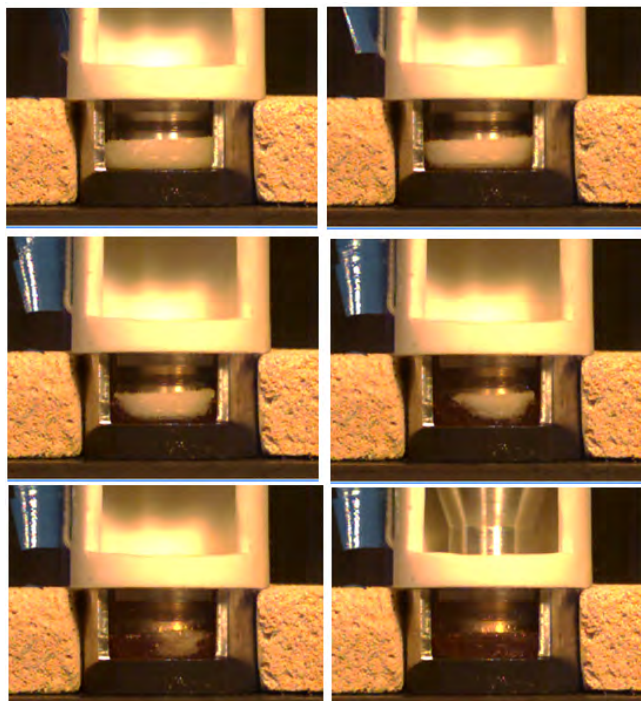


Рис. 3. Видеограмма процесса плавления ВВ ТЭН в ходе эксперимента

Использование в опытах преграды разной толщины позволяло изменять параметры УВИ, воздействующего на исследуемый образец. С увеличением толщины преграды уменьшается амплитуда УВИ. В ходе проведения серии экспериментов была определена критическая толщина преграды $\Delta = 40$ мм, т. е. максимальная толщина, при которой происходит инициирование расплава ВВ ТЭН. Результаты экспериментов приведены в табл. 1, а также на рис. 4.

Таблица 1

Результаты опытов

Δ, мм	Результат опыта
50	Нет взрыва
45	Нет взрыва
40	Взрыв
35	Взрыв
30	Взрыв
20	Взрыв

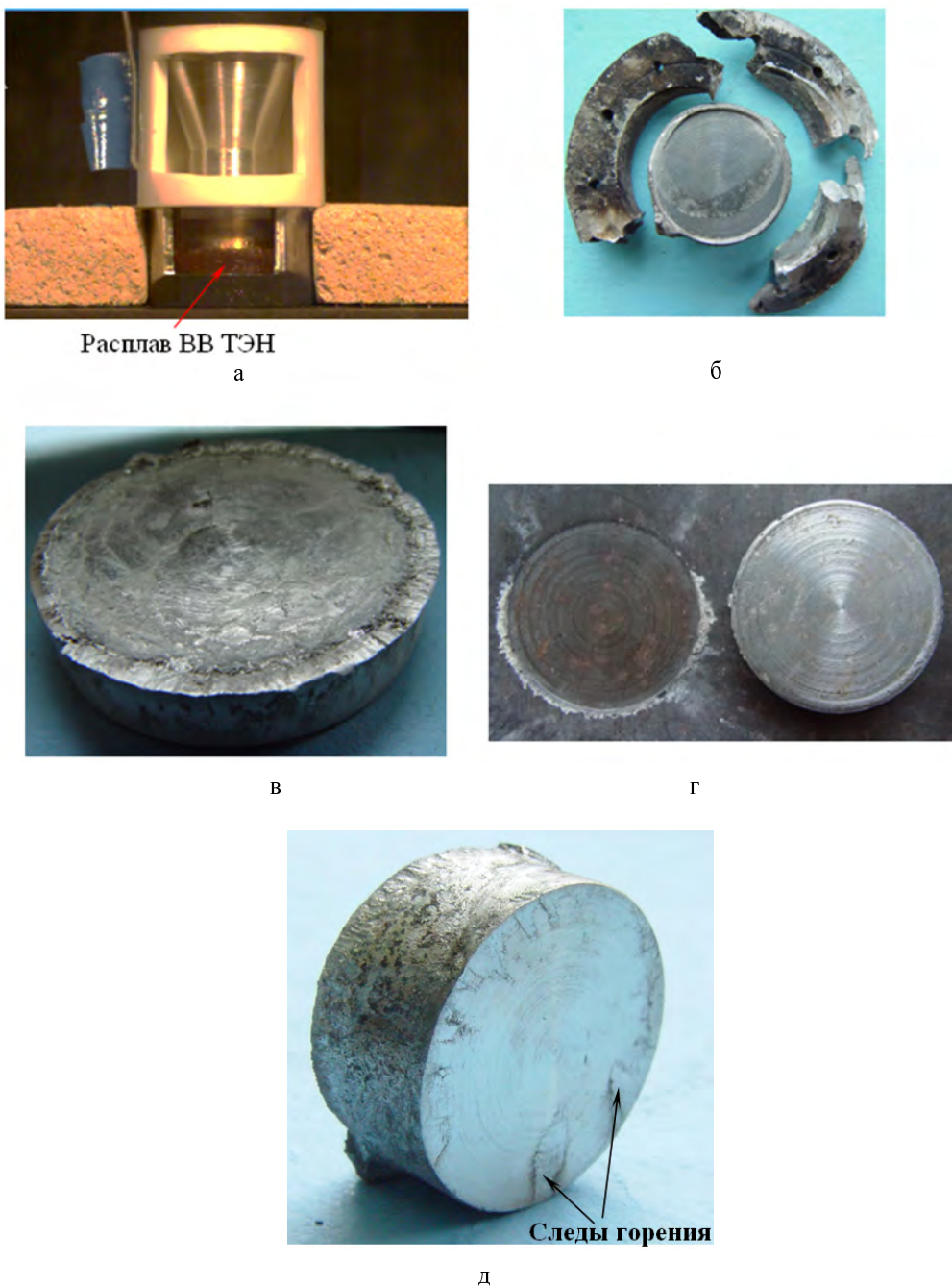


Рис. 4. Состояние экспериментальной сборки [7] с толщиной преграды $\Delta = 40$ мм перед опытом (а – сборка) и после опыта (б – преграда – крышка; в – верхнее дно опорного стакана (контактирует с расплавом ВВ); г – защитный экран-отметчик и нижнее дно опорного стакана; д – нижняя поверхность неподвижной преграды)

Численное моделирование опытов

По программному комплексу МИД-Д2 [8] были выполнены расчетные оценки порогового (критического) уровня давления ударно-волнового импульса, при воздействии которого на расплав ВВ ТЭН происходит инициирование взрыва ВВ. Расчетная геометрия задачи приведена на рис. 5.

Для получения различных параметров ударно-волнового импульса (амплитуда давления P_{\max} и длительность τ нарастания давления), возникающего при инициировании ВВ в генераторе УВИ, в расчетах варьировались размеры преграды в соответствии с постановкой опытов (диапазон изменения толщины преграды Δ от 20 мм до 50 мм).

Расчетная сетка задачи приведена на рис. 6.

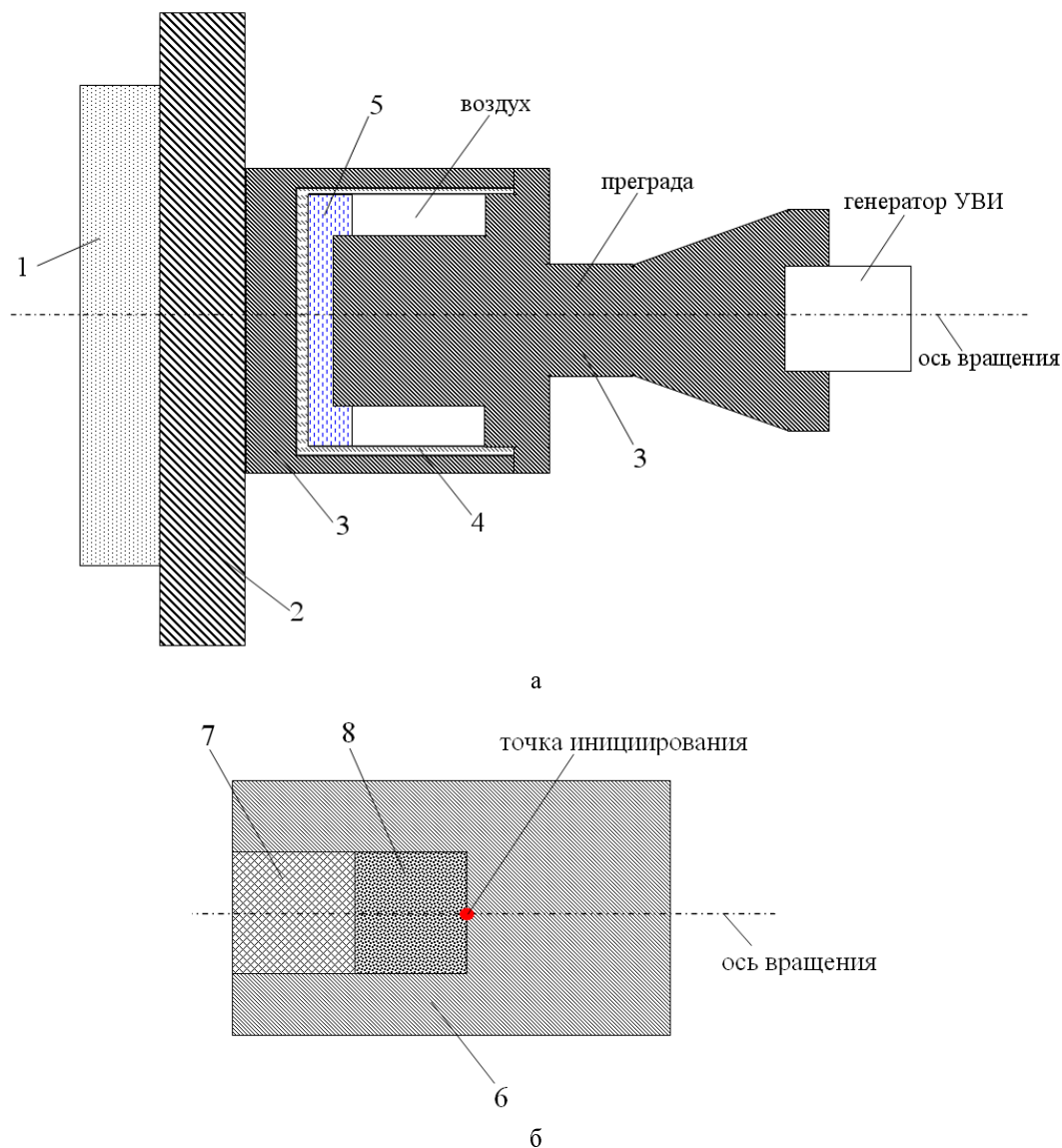


Рис. 5. Двумерная осесимметричная расчетная геометрия задачи: а – сборка; б – генератор УВИ; 1 – асбестоцемент; 2 – сталь; 3 – алюминиевый сплав Д16; 4 – стекло; 5 – расплав ВВ ТЭН; 6 – пресс-материал АГ-4; 7 – ТЭН ($\rho_{00} = 1,72 \text{ г/см}^3$); 8 – ТЭН ($\rho_{00} = 1 \text{ г/см}^3$)

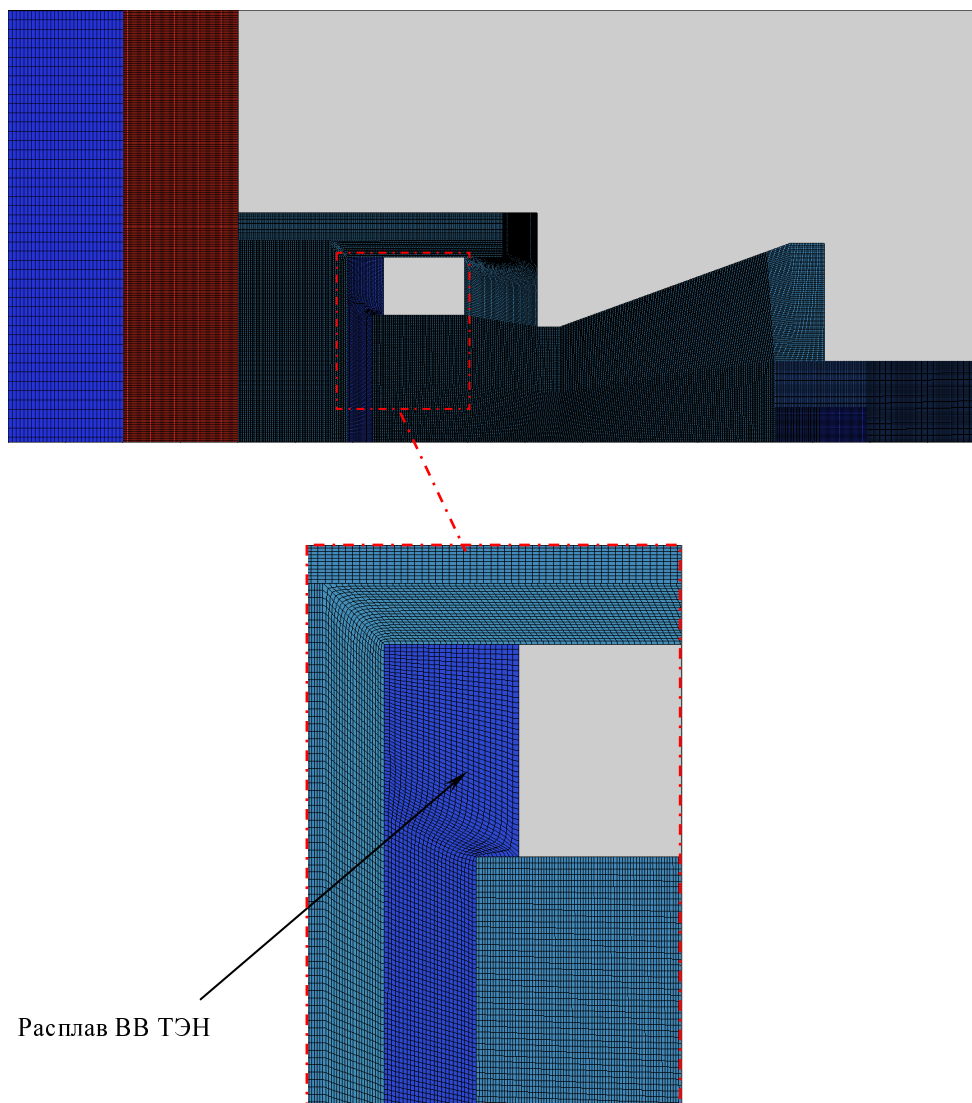


Рис. 6. Расчетная сетка задачи

Параметры уравнений состояния (УРС) и упругопластики (УП) конструкционных материалов, использованных в расчетах, даны в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Параметры УРС в форме Ми–Грюнайзена [9] для веществ

Область	Вещество	ρ_{00} , г/см ³	ρ_0 , г/см ³	C_0 , км/с	n	Γ
1	Асбестоцемент	0,65	1,05	2,51	4,3	0,4
2	Сталь	7,85	7,85	3,8	5	1,667
3	Алюминиевый сплав Д16	2,78	2,78	5,532	3,477	0,8
4	Стекло	2,65	2,65	4,728	3,708	1
5	ВВ ТЭН (расплав)	1,3	1,45	1,73*	7,2	1,64
6	Пресс-материал АГ-4	2,19	2,19	2,045	4,972	1,481

В табл. 2 даны значения следующих физических величин: ρ_{00} и ρ_0 – соответственно начальная и кристаллическая плотность вещества; C_0 – объемная скорость звука; n и Γ – параметры УРС в форме Ми–Грюнайзена.

* Скорость звука в расплаве ВВ ТЭН неизвестна и для выполнения расчетных оценок принималась равной скорости звука в нитроглицерине.

Параметры УП веществ

Область	Вещество	Y_0 , ГПа	ϵ_0 , кДж/г	ν	$P_{отк}$, ГПа	Вид модели
1	Асбестоцемент	г/д приближение			—	—
2	Сталь	1,5	0,6	0,28	-2	«1»
3	Алюминиевый сплав Д16	0,29	—	0,34	-0,5	[10]
4	Стекло	0,139	—	0,25	-0,5	[10]
5	ВВ ТЭН (расплав)	г/д приближение			—	—
6	Пресс-материал АГ-4	г/д приближение			—	—

В табл. 3 приведены значения следующих физических величин: Y_0 – предел текучести при нормальных условиях; ϵ_0 – эффективная энергия плавления; ν – коэффициент Пуассона; $P_{отк}$ – откольная прочность.

Модель прочности «1» предложена Шемякиным В. Ю., в которой предел текучести является линейной функцией тепловой энергии:

$$Y(E_T) = \begin{cases} Y_0 \left(1 - \frac{E_T}{E_0} \right) & \text{при } E_T < E_0; \\ 0 & \text{при } E_T \geq E_0, \end{cases}$$

где Y_0 – предел текучести при нормальных условиях; E_T – тепловая составляющая удельной внутренней энергии; E_0 – эффективная энергия плавления вещества. В этой модели эффективно учитывается термическое разупрочнение.

При моделировании распространения ударной волны (УВ) в преграде из алюминиевого сплава Д16 использовалось уравнение состояния в форме Ми–Грюнайзена [9, 11], калиброванное на экспериментальные данные [12] (см. рис. 7, 8).

Расплав ВВ ТЭН (см. на рис. 5 обл. 5) рассматривался как инертное пористое вещество. Пористостью имитировалось наличие газовых продуктов терморазложения ВВ, которые образуются в виде газовых пузырьков в расплаве при нагреве. По экспериментальной оценке, полученной авторами, плотность расплава ВВ составляет $\approx 1,45 \text{ г/см}^3$, когда в нем практически отсутствуют пузырьки (для сравнения плотность жидкого тротила (ТНТ) при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $1,46 \text{ г/см}^3$ [13]).

В опытах для расплавления всей навески ВВ ТЭН массой $\approx 3,2 \text{ г}$ образец был нагрет до температуры $\approx 149 \text{ }^\circ\text{C}$, что выше температуры плавления $140 \text{ }^\circ\text{C}$. При температуре $\approx 149 \text{ }^\circ\text{C}$ происходило терморазложение расплава с образованием газовых пузырьков, которые всплывали к поверхности расплава. По оценкам средняя плотность расплава с учетом газовых пузырьков составляла $\approx 1,3 \text{ г/см}^3$, что эквивалентно пористости 10 %.

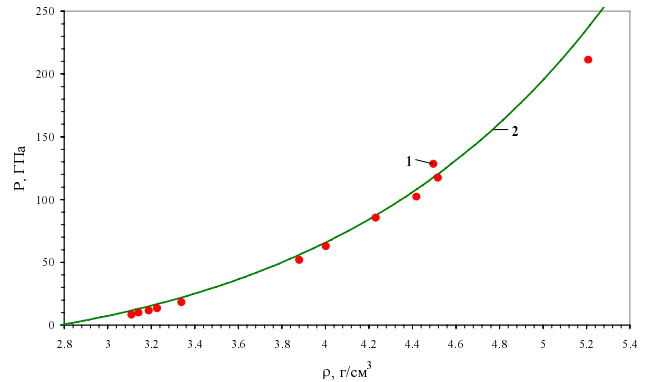


Рис. 7. Зависимость давления P от плотности ρ на ударной адиабате сплава Д16: 1 – эксперимент [12]; 2 – расчет

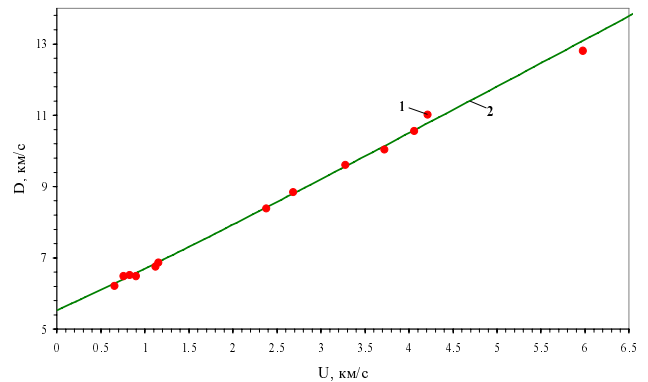


Рис. 8. D-U зависимость на ударной адиабате сплава Д16: 1 – эксперимент [12]; 2 – расчет

В расчетах ударно-волновой импульс генерировался в результате одноточечного инициирования ВВ генератора УВИ в режиме нормальной детонации (см. рис. 5, 6).

Для веществ 7 и 8 задавалось уравнение состояния в форме JWL (Джонс – Уилкинс–Ли) [14].

Расчет детонации проводился в режиме идеальной детонации с параметрами ВВ $D = 5,55 \text{ км/с}$ и $Q = 5,706 \text{ кДж/г}$ для области 8. Переход детонации из области 8 в область 7 в расчетах осуществлялся по критерию предельного сжатия вещества ($\delta_{max} = 1,2$) и затем в области 7 детонация также рассчитывалась в режиме идеальной детонации с параметрами ВВ $D = 8,408 \text{ км/с}$ и $Q = 5,706 \text{ кДж/г}$.

Расчетные оценки параметров ударно-волнового импульса, воздействующего на расплав ВВ ТЭН, представлены в табл. 4.

Таблица 4

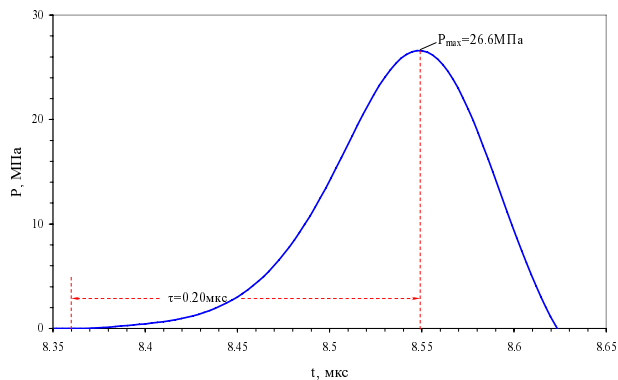
Результаты расчетов

Δ , мм	P_{\max} , МПа	τ , мкс	Результаты опытов
50	26,6	0,20	—
45	29,8	0,19	—
40	33,9	0,18	+
35	39,0	0,17	+
30	45,1	0,16	+
20	67,9	0,15	+

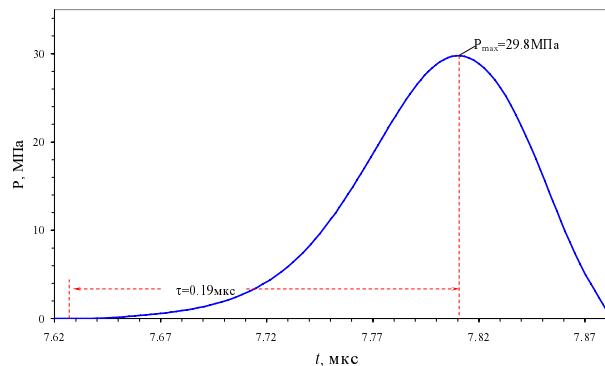
В табл. 4 приведены следующие величины: Δ – толщина преграды от генератора УВИ до расплава ВВ ТЭН; P_{\max} – максимальное давление на фронте ударно-волнового импульса; τ – длительность нарастания ударно-волнового импульса, а также результаты опытов – «—» – нет взрыва и «+» – есть взрыв исследуемого образца ВВ.

По результатам расчетов в серии опытов [7] из-за больших толщин преград, составляющих несколько сантиметров, амплитуда ударно-волнового импульса, входящего в расплав ВВ ТЭН, не превышает ≈ 68 МПа. Изменение давления $P(t)$ в граничной точке алюминиевого сплава Д16 (вблизи контактной поверхности Д16 – расплав) для различных значений Δ представлены на рис. 9.

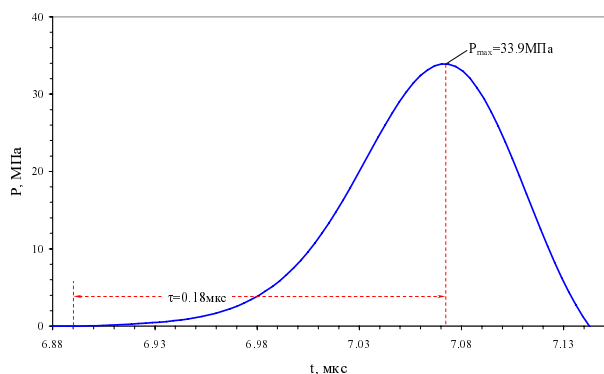
На исследуемый образец ВВ, представляющий собой тонкий слой расплава толщиной $\Delta_{ВВ} = 2,3$ мм, через преграду диаметром 22 мм воздействует ударно-волновой импульс, имеющий близкий к плоскому фронт. Радиус фронта ударно-волнового импульса при подходе к границе Д16 (преграда) – расплав для двух случаев с максимальной ($\Delta = 50$ мм) и минимальной ($\Delta = 20$ мм) толщиной преграды соответственно составляет $R_{УВ} \approx 15$ и 10 мм, что заметно больше $\Delta_{ВВ} = 2,3$ мм (см. рис. 10).



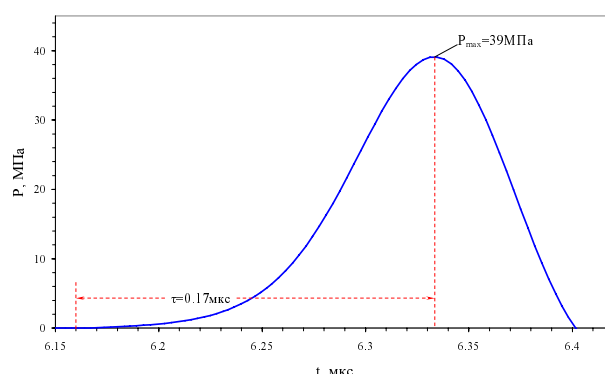
а



б



в



г

Рис. 9. Расчетные временные зависимости давления $P(t)$ «входящего» в расплав ВВ ТЭН ударно-волнового импульса: а – $\Delta = 50$ мм; б – $\Delta = 45$ мм; в – $\Delta = 40$ мм; г – $\Delta = 35$ мм; д – $\Delta = 30$ мм; е – $\Delta = 20$ мм (окончание на с. 20)

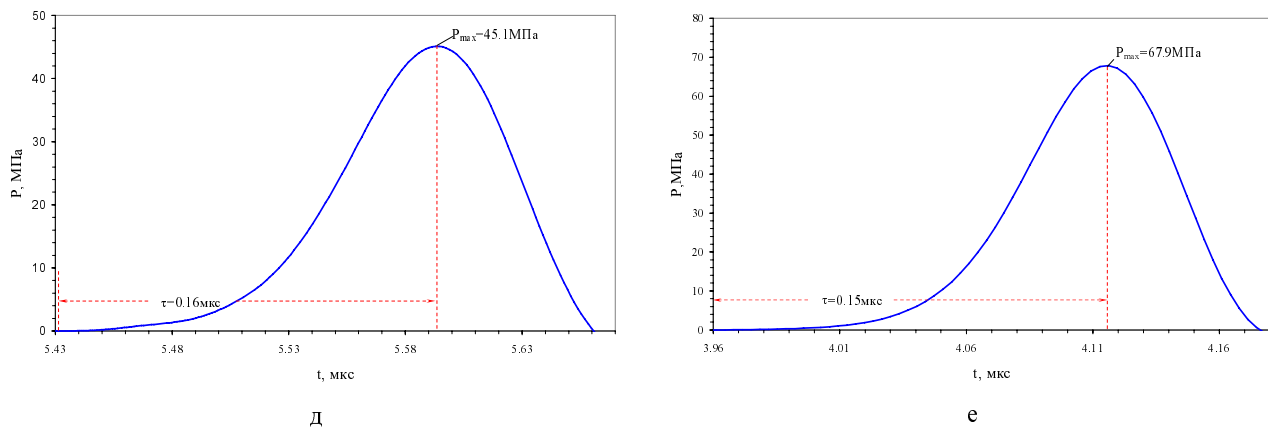


Рис. 9. Окончание

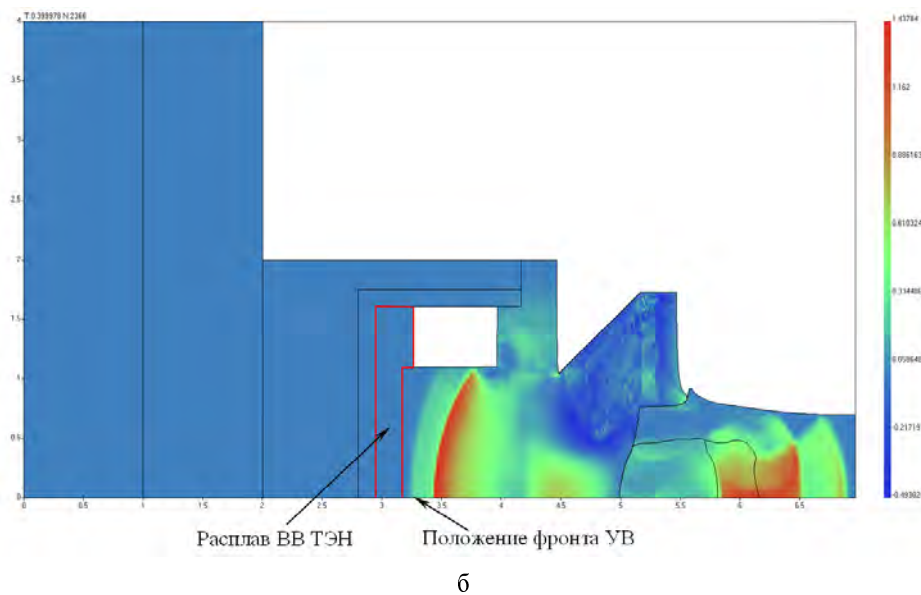
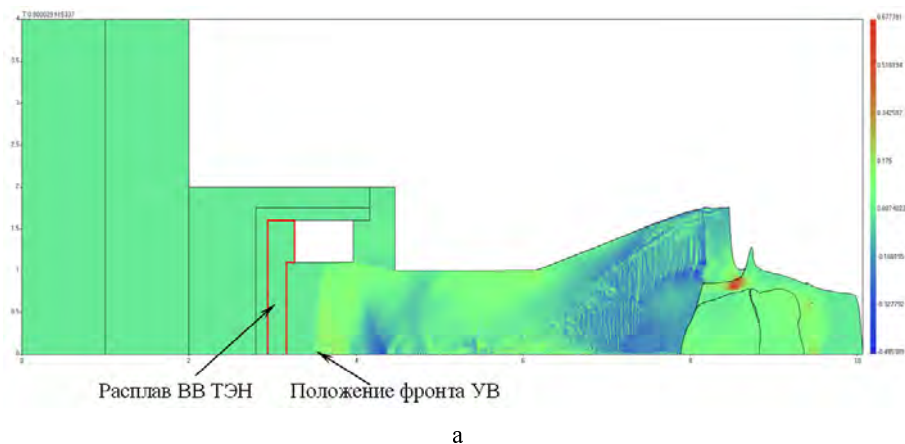


Рис. 10. Поле давлений $P(x, y)$ [ГПа] на момент времени перед воздействием ударно-волнового импульса на расплавы ВВ ТЭН для различных значений преград Δ : а – $\Delta = 50$ мм ($t = 8$ мкс); б – $\Delta = 20$ мм ($t = 4$ мкс)

В серии опытов была определена критическая толщина преграды ($\Delta = 40$ мм), при прохождении через которую ударно-волновой импульс инициирует взрыв расплава ВВ ТЭН. Полученная оценка порогового уровня давления, соответствующего указанной толщине, составляет $P_{кр} \approx 34$ МПа. Величина $P_{кр}$ для расплава ВВ ТЭН оказалась существенно ниже, чем для твердого ВВ ТЭН с начальной плотностью ρ_0 от 1,4 до 1,72 г/см³ [15]:

- $P_{кр} \approx 650$ МПа для $\rho_0 = 1,4$ г/см³;
- $P_{кр} \approx 800$ МПа для $\rho_0 = 1,6$ г/см³;
- $P_{кр} \approx 1900$ МПа для $\rho_0 = 1,72$ г/см³.

При увеличении пористости ВВ происходит падение критического давления $P_{кр}$ до минимального значения $P_{кр_min}$, далее начинается рост $P_{кр}$ (падает ударно-волновая чувствительность), поскольку требуется большее давление для инициирования взрыва, чтобы компенсировать разгрузку УВ на порах (качественное поведение кривой $P_{кр}(\delta)$ приведено на рис. 11).

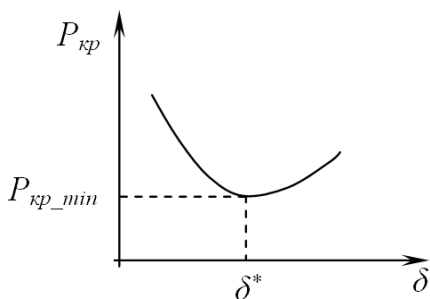


Рис. 11. Качественная зависимость критического давления $P_{кр}$ инициирования твердого ВВ от пористости δ

Поскольку не известны данные по $P_{кр}$ для начальной плотности ВВ ТЭН $\rho_0 = 1,3$ г/см³, то, если принять в качестве минимального значения $P_{кр_min} = 650$ МПа, соответствующее плотности $\rho_0 = 1,4$ г/см³ (пористость 20 %), получим, что чувствительность расплава выше в ≈ 19 раз чувствительности твердого ВВ. Если формально линейно экстраполировать данные [15] до плотности 1,3 г/см³, то $P_{кр}$ будет равно ≈ 575 МПа, что в ≈ 17 раз выше, чем у расплава.

В опыте при терморазложении расплава газовые пузырьки покидали расплав, всплывая к открытой поверхности расплава. Из-за этого сложно точно оценить количество пузырьков в расплаве на момент воздействия ударной волны. В связи с этим были выполнены расчеты с различной «пористостью» расплава – от 10 до 20 % (см. рис. 12).

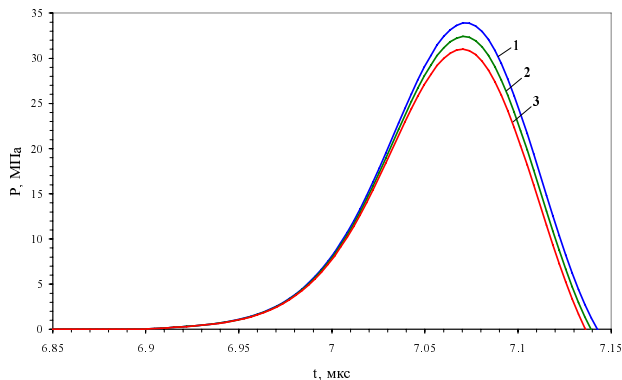


Рис. 12. Расчетные временные зависимости давления $P(t)$ «входящего» в расплав ВВ ТЭН ударно-волнового импульса для различных значений «пористости» расплава: 1 – 10 %; 2 – 15 %; 3 – 20 %

При изменении пористости, имитирующей содержание газовых пузырьков в расплаве, от 10 до 20 % максимальное давление падающего ударно-волнового импульса меняется незначительно – от 34 до 31 МПа.

В опытах [7] инициирование расплава ВВ ТЭН было на прямой ударной волне, что подтверждено в недавно выполненных авторами экспериментах с массой навески ВВ ТЭН, равной $m \approx 6,4$ г (толщина слоя расплава ≈ 5 мм), в которых критическая толщина преграды составила $\Delta = 40$ мм, как в [7], а также было зафиксировано начало процесса взрывчатого превращения образца ВВ вблизи торца преграды, погруженной в расплав.

Выводы

1. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения чувствительности расплава ВВ ТЭН к ударно-волновому импульсу.
2. По результатам выполненного расчетно-экспериментального исследования определена критическая величина амплитуды ударно-волнового импульса, инициирующего расплав ВВ ТЭН, которая более, чем на порядок меньше амплитуды ударно-волнового импульса, инициирующего малоплотный заряд твердого ВВ ТЭН.

Список литературы

1. Боуден Ф. П. и Иоффе А. Д. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М.: Иностран. лит., 1955.
2. Дремин А. Н., Савров С. Д. и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.

3. Winning C. H. // Explosivstoffe. 1963. Vol. 11, N 2. P. 34.
4. Дубовик А. В., Боболев В. К. // ФГВ. 1969. Т. 5, № 3. С. 354.
5. Гордеев Е. В., Сербинов А. И., Трошин Я. К. // Докл. АН СССР, 1967. Т. 172, № 2. С. 383.
6. Гончаров А. А., Дубовик А. В., Боболев В. К. Инициирование жидких ВВ слабыми ударными волнами // ФГВ. 1977. Т. 13, № 1.
7. Исследования влияния термических воздействий на чувствительность взрывчатых веществ // Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2016, г. Саров, 2017. С. 32–34.
8. Софронов И. Д., Делов В. И., Дмитриев Н. А. и др. Методика Д для расчета многомерных задач механики сплошной среды в переменных Лагранжа на регулярной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 42–45.
9. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука. 1966.
10. Мизес Р. Механика твердых тел в пластически-деформированном состоянии // Теория пластичности. М.: ИЛ., 1948.
11. Забабахин Е. И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск, 1997.
12. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред Р. Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
13. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М.: Физматгиз, 1959.
14. Lee E. L., Tarver C. M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // Phys. Fluids. 1980. Vol. 23 (12). P. 2362–2372.
15. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, испр. В 2 т. Т.1 М.: Физматлит, 2004.

Статья поступила в редакцию 30.11.2017