УДК 519.6

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В МЕТОДИКЕ "ЛЭГАК" ИЗМЕНЕНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВВ ТИПА ТАТБ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ ВОЛН

Н. А. Володина, В. Б. Титова, М. О. Ширшова
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Представлены результаты работы по развитию кинетической модели детонации МК в методике ЛЭГАК для универсального учета зависимости ударно-волновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ от его состояния перед фронтом инициирующей ударной волны. Изменения в модели коснулись формулы, "отвечающей" за плотность рождения горячих очагов разложения ВВ вблизи фронта ударной волны, а также алгоритма выделения фронта ударной волны и анализа состояния вещества перед этим фронтом. Реализованная модификация модели кинетики МК протестирована на экспериментальных данных для ВВ на основе ТАТБ при начальных плотностях $1{,}3\,\text{г/см}^3 \le \rho_0 \le$ $\le 1{,}91\,\text{г/см}^3$.

Предложенный алгоритм позволяет автоматически учитывать состояние ВВ перед фронтом ударной волны и единым образом описывать экспериментальные данные как по сенсибилизации, так и по десенсибилизации ВВ при многократных ударно-волновых воздействиях.

Ключевые слова: кинетика детонации, ударно-волновая чувствительность, ТАТБ.

Введение

Известно, что процесс инициирования детонации в ВВ на основе ТАТБ существенным образом зависит от начальной плотности, которая определяется как степенью запрессовки, так и технологией изготовления ВВ [1]. При уменьшении плотности ВВ увеличивается его ударно-волновая чувствительность (свойство *сенсибилизации*), и наоборот, при увеличении плотности ВВ уменьшается его ударно-волновая чувствительность, вплоть до отказа (свойство *десенсибилизации*). Особо сильная зависимость ударно-волновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ от начальной плотности наблюдается при $\rho_0 > 1{,}88\,\text{г/см}^3$. Поэтому учет влияния начальной плотности является необходимым требованием к современным моделям кинетики детонации при численном моделировании ударно-волновой чувствительности ВВ, и оно было выполнено при создании модели МК [2—4].

Отметим, что если эффект десенсибилизации учитывается и в других моделях, то алгоритм сенсибилизации в волне разгрузки впервые разработан и нашел применение в модели МК.

Данная работа посвящена совершенствованию кинетической модели детонации МК в методике ЛЭГАК [5, 6] для учета зависимости ударно-волновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ от его состояния перед фронтом ударной волны (УВ). Изменения в модели коснулись формулы, "отвечающей" за плотность рождения горячих очагов разложения ВВ вблизи фронта УВ, а также алгоритма выделения фронта УВ и анализа состояния вещества перед этим фронтом при последующих нагружениях.

Предложенный алгоритм позволяет автоматически учитывать состояние ВВ перед фронтом УВ и единым образом описывать экспериментальные данные как по сенсибилизации, так и по десенсибилизации.

Описание алгоритма учета сенсибилизации ВВ типа ТАТБ после предварительной разгрузки

Подробное описание модели кинетики МК и ее реализации в методике ЛЭГАК приведено в работах [3, 4]. Остановимся лишь на тех особенностях модели кинетики, которые необходимы при проведении исследований в данной работе.

Кинетическая модель детонации МК является двухстадийной. Уравнение для скорости реакции можно записать в следующем виде:

$$\frac{d\varphi}{dt} = f(\varphi, P, \rho) = \underbrace{\Phi_0(\varphi, P, \rho)}_{\text{1-я стадия}} + \underbrace{\Phi_1(\varphi, P) + \Phi_2(\varphi, P) + \Phi_3(\varphi, P)}_{\text{2-я стадия}}, \tag{1}$$

где φ — массовая концентрация продуктов взрыва, или выгорание. Первая стадия — формирование начального выгорания на инициирующей УВ. Эта стадия моделирует рождение очагов на фронте УВ, где скорость сжатия и деформация вещества максимальны. Значение выгорания на момент окончания первой стадии запоминается и является начальной степенью разложения ВВ для второй стадии. Вторая стадия включает в себя рост горячих пятен, их взаимодействие и слияние.

Из структуры уравнения для скорости реакции (1) видно, что кинетика МК предполагает выделение фронта первой УВ. В методике ЛЭГАК (как и в ряде других счетных методик) нет явного выделения УВ. Используется сквозной счет УВ, т. е. "размазывание" фронта УВ счетной вязкостью. Для выделения фронта УВ в методике ЛЭГАК для каждой ячейки заводится признак r_{ij}; в начальный момент $r_{ij} = 0$, что соответствует невозмущенной среде. Затем в каждой ячейке, по которой идет УВ, исследуется величина $gp = \dfrac{q}{P+q}$, где P — давление в ячейке, а q — квадратичная счетная вязкость. Если $gp > \varepsilon_1$, то считается, что по ячейке идет первая УВ и устанавливается $r_{ij} = 1$ (рис. 1). Как только впервые выполняется условие $gp \leq \varepsilon_1$, считается, что волна прошла ячейку и ставится признак $r_{ij} = 2$. Константа $\varepsilon_1 = 0{,}001$ была подобрана опытным путем и хорошо себя зарекомендовала в дальнейших расчетах.

Таким образом, если для ячейки $r_{ij} = 1$ (первая УВ), то расчет выгорания ВВ идет по первому слагаемому в формуле (1). Как только первая УВ проходит ячейку, т. е. появляется признак $r_{ij} = 2$, то значение Φ_0, полученное на этом этапе, запоминается и используется для вычисления выгорания за фронтом. Дальше расчет скорости выгорания ВВ ведется только по слагаемым $\Phi_1(\varphi, P)$, $\Phi_2(\varphi, P)$, $\Phi_3(\varphi, P)$, и возврата к формуле для первой волны уже не происходит.

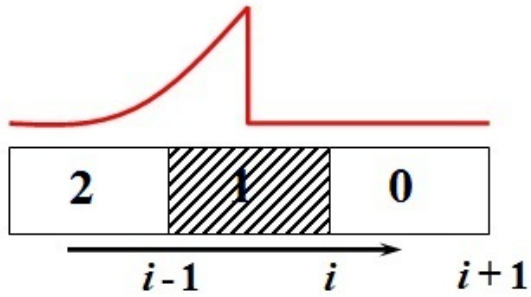

Рис. 1. Выделение фронта УВ

Если нагружение однократное, то плотность и давление, определяющие начальное состояние ВВ, заданы и выступают в качестве параметров при вычислении выгорания на фронте УВ. При описании многократного нагружения состояние ВВ перед фронтом последующих УВ изменяется, поэтому были заведены массивы для хранения фоновых значений плотности и давления ρ_{fon} и P_{fon}. Эти величины представляют собой плотности и давления в ячейке, когда $r_{ij} = 0$ или $r_{ij} = 2$. Когда в ячейке находится фронт УВ ($r_{ij} = 1$), значения величин ρ_{fon} и P_{fon} используются в качестве ρ_0 и P_0 при вычислении выгорания на фронте УВ. Таким образом, происходит автоматический учет состояния ВВ перед фронтом УВ.

За учет зависимости чувствительности ВВ типа ТАТБ от его состояния перед фронтом отвечает первое слагаемое в формуле, определяющее плотность рождения горячих очагов и выгорание на фронте УВ, которое описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\varphi}{dt} = A_0 e^{-b(V_0 - V)}(P - P_k)\frac{dV}{dt}, \tag{2}$$

где A_0, b — параметры кинетики МК; V_0 — начальный удельный объем; P_k — пороговое давление, ниже которого инициирование не происходит.

При численной реализации модели кинетики МК для вычисления выгорания вблизи фронта УВ предложено использовать не дифференциальное уравнение (2) для нахождения выгорания ВВ на фронте УВ, а проинтегрированное выражение вдоль прямой Михельсона $\left|\dfrac{dP}{dV}\right| = \rho_0^2 D^2$, где D — скорость распространения стационарной детонации. В этом случае выгорание на фронте УВ вычисляется следующим образом:

$$\Phi_0 = \frac{A_0 e^{-b(V_{1,93}-V_{\text{кр}})}}{b^2}\frac{P-P_0}{V_0-V}\left\{1-e^{-b(V_{\text{кр}}-V)}\left[1+b\left(V_{\text{кр}}-V\right)\right]\right\}, \tag{3}$$

где $V_{1,93} = 1/1{,}93$ — теоретически максимально достижимый удельный объем ВВ типа ТАТБ, который соответствует плотности 1,93 г/см^3; P_0 — начальное давление; $V_{\text{кр}} = V_0 - \dfrac{dV}{dP}\left(P_k - P_0\right)$ — удельный объем, соответствующий пороговому давлению P_k. Выгорание на фронте УВ в кинетике МК регулируется параметрами b и A_0. В методике ЛЭГАК для ВВ типа ТАТБ эти параметры имеют следующие значения: $b = 95$; $A_0 = 14$.

На второй стадии происходит рост горячих пятен, их взаимодействие и слияние. Параметры кинетики МК, отвечающие за выгорание ВВ за фронтом УВ для состава ВВ типа ТАТБ, приведены в работе [4].

В формуле (3) член $A_0 e^{-b(V_{1,93}-V_{\text{кр}})}$ тождественно преобразуется к следующему виду:

$$A_0 e^{-b(V_{1,93}-V_{\text{кр}})} = A_0 e^{-b(V_0-V_{\text{кр}})} e^{-b(V_{1,93}-V_{1,91})} e^{-b(V_{1,91}-V_0)}.$$

Удобно считать в качестве номинальной начальную плотность $\rho_{0\text{н}} = \rho_{1,91} = 1{,}91$ г/см^3, по отношению к которой определяется изменение ударно-волновой чувствительности в [7], тогда ρ_0 — фактическая начальная плотность ВВ на основе ТАТБ в интересующем диапазоне плотностей. При этом функциональный вид формулы (3) кинетики МК не изменяется. Первый множитель определяет выгорание за счет ударного сжатия ВВ относительно фактической начальной плотности, второй множитель является константой, а третий отвечает за изменение чувствительности ВВ при изменении его плотности относительно нормальной.

После довольно большой расчетно-теоретической работы авторами модели кинетики МК было предложено заменить член $e^{-b(V_{1,91}-V_0)}$ на $e^{-kb(V_{1,91}-V_0)}$, где зависимость k от пористости α имеет вид

$$k = \frac{k_1}{k_2+\alpha}, \qquad \alpha = \left(1-\frac{\rho_0}{\rho_{1,91}}\right)\cdot 100\,\%.$$

Окончательно формула для вычисления выгорания на фронте УВ принимает вид

$$\Phi_0 = \frac{A_0 e^{-b(V_{1,93}-V_{1,91})}\rho_0^2 D^2 e^{-kb(V_{1,91}-V_0)}}{b^2} e^{-b(V_0-V_{\text{кр}})}\left\{1-e^{-b(V_{\text{кр}}-V)}\left[1+b\left(V_{\text{кр}}-V\right)\right]\right\}.$$

Параметры k_1 и k_2 подбирались так, чтобы описать всю совокупность имеющихся экспериментальных данных.

Верификация алгоритма учета зависимости чувствительности ВВ типа ТАТБ от начальной плотности

В настоящий момент в РФЯЦ-ВНИИЭФ имеются следующие экспериментальные данные для ВВ на основе ТАТБ с начальными плотностями в диапазоне от 1,3 до 1,91 г/см^3:

1) кривая Пополато — зависимость глубины детонации от нагружающего давления для ВВ с различной начальной плотностью (1,91; 1,895; 1,886; 1,874 г/см^3) [1, 8];
2) инициирование ВВ на расходящейся УВ:

– влияние начальной плотности ВВ (1,91; 1,89; 1,853; 1,79 г/см^3) на размер невыгоревших зон при постоянном размере инициатора [9];
– влияние поперечного размера инициатора в образцах ВВ с начальной плотностью 1,782 г/см^3 [10];
– ударно-волновое инициирование детонации в образцах ВВ с малой плотностью (1,4 и 1,6 г/см^3) [1].

Для описания этой совокупности экспериментальных данных оказалось возможным выделить 6 интервалов по плотности (в г/см^3), в которых k_1 и k_2 являются постоянными:

$$(k_1, k_2) = \begin{cases} (0;0) & \text{при} \quad \rho_0 \geq 1{,}915; \\ (0{,}22;0{,}023) & \text{при} \quad 1{,}8925 \leq \rho_0 < 1{,}915; \\ (0{,}8;1) & \text{при} \quad 1{,}888 \leq \rho_0 < 1{,}8925; \\ (1{,}53;1{,}82) & \text{при} \quad 1{,}8775 \leq \rho_0 < 1{,}888; \\ (3{,}41;6{,}28) & \text{при} \quad 1{,}741 \leq \rho_0 < 1{,}8775; \\ (917;4\,202) & \text{при} \quad \rho_0 > 1{,}741. \end{cases}$$

Поведения k_1 и k_2 имеют кусочно-постоянный характер. Как следует из рис. 2, экспериментальная зависимость ударно-волновой чувствительности ВВ типа ТАТБ от начальной плотности [1] существенно различается в разных диапазонах по плотности. Для наглядности на рис. 2 нанесены интервалы плотности, в которых k_1 и k_2 являются постоянными.

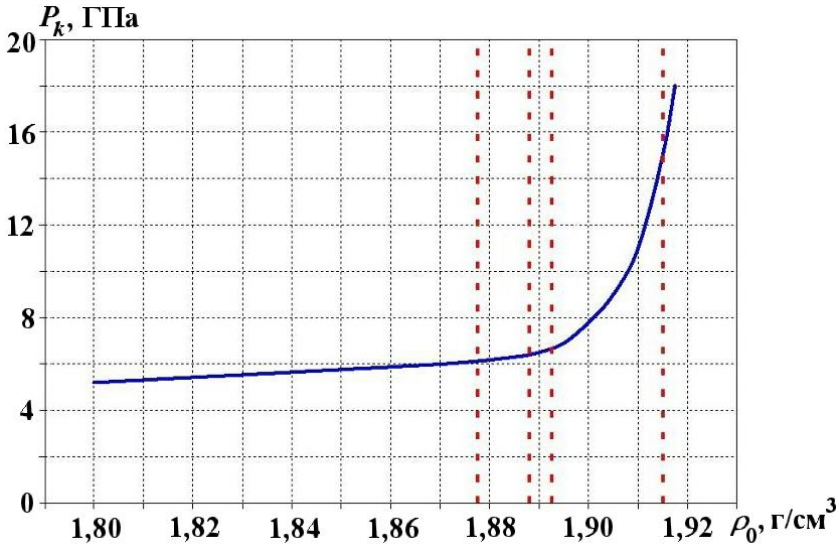

Рис. 2. Экспериментальная зависимость порогового давления от начальной плотности ВВ типа ТАТБ [1]

Таким образом, не изменяя функционального вида формул кинетики и значений ее параметров при вычислении выгорания ВВ вблизи фронта УВ, авторы ввели коэффициент k, зависящий от пористости ВВ и кусочно-постоянных коэффициентов k_1 и k_2, что позволяет автоматически учитывать зависимость чувствительности ВВ на основе ТАТБ от начальной плотности.

Приведем результаты некоторых расчетов для иллюстрации возможностей кинетики МК при описании поведения ВВ типа ТАТБ при пониженной начальной плотности $\left(\rho_0 < 1{,}91\,\text{г/см}^3\right)$.

Расчет диаграммы Пополато. Наиболее простыми для численного моделирования и подбора параметров моделей кинетики детонации являются эксперименты по определению глубины детонации в зависимости от приложенного давления. Обычно результаты таких экспериментов представлены в виде так называемой диаграммы Пополато.

Постановка экспериментов по определению глубины детонации такова, что позволяет проводить расчеты в одномерном приближении. Моделируемая система представляет собой одномерный образец ВВ, нагружаемый с одной из сторон плоским импульсом давления.

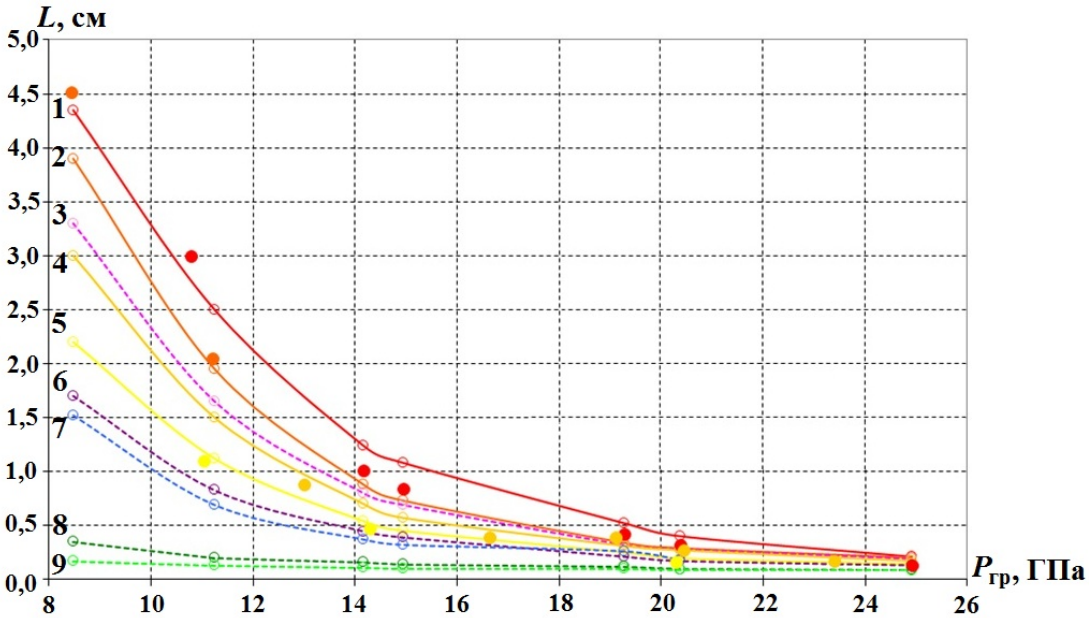

Рис. 3. Диаграмма Пополато (зависимость глубины детонации от нагружающего давления) для ВВ типа ТАТБ пониженной плотности: • — эксперимент, $\rho_0 = 1{,}91$ г/см^3; • — эксперимент, $\rho_0 = 1{,}895$ г/см^3; • — эксперимент, $\rho_0 = 1{,}886$ г/см^3; • — эксперимент, $\rho_0 = 1{,}874$ г/см^3; 1 — расчет, $\rho_0 = 1{,}91$ г/см^3; 2 — расчет, $\rho_0 = 1{,}895$ г/см^3; 3 — расчет, $\rho_0 = 1{,}89$ г/см^3; 4 — расчет, $\rho_0 = 1{,}886$ г/см^3; 5 — расчет, $\rho_0 = 1{,}874$ г/см^3; 6 — расчет, $\rho_0 = 1{,}79$ г/см^3; 7 — расчет, $\rho_0 = 1{,}782$ г/см^3; 8 — расчет, $\rho_0 = 1{,}6$ г/см^3; 9 — расчет, $\rho_0 = 1{,}4$ г/см^3

В рассматриваемом случае использовались данные экспериментов [1, 8], в которых определена глубина возбуждения детонации в зависимости от приложенного к ВВ давления. Из рис. 3 (см. также цветную вкладку) видно, что в расчетах воспроизводится характер изменения чувствительности ВВ типа ТАТБ в зависимости от начальной плотности и приложенного давления на границе.

Численное моделирование влияния начальной плотности ВВ на основе ТАТБ на размер невыгоревших зон при постоянном размере инициатора. В этой серии расчетов демонстрируется влияние начальной плотности ВВ на основе ТАТБ ($\rho_0 = 1{,}91$; 1,89; 1,853; 1,79 г/см^3) на размер зон непрореагировавшего ВВ. Начальная геометрия задачи приведена на рис. 4. На образце ВВ на основе ТАТБ размером 3 см × 5 см расположен накладной инициатор из высокочувствительного ВВ размером 1 см × 1,5 см. Постановка экспериментов [9] позволяет проводить расчеты 1/2 части геометрии в плоском двумерном приближении.

Инициирование накладного инициатора осуществлялось в точке на плоскости симметрии слева, а процесс распространения детонации в нем моделировался как идеальный. Процесс возникновения

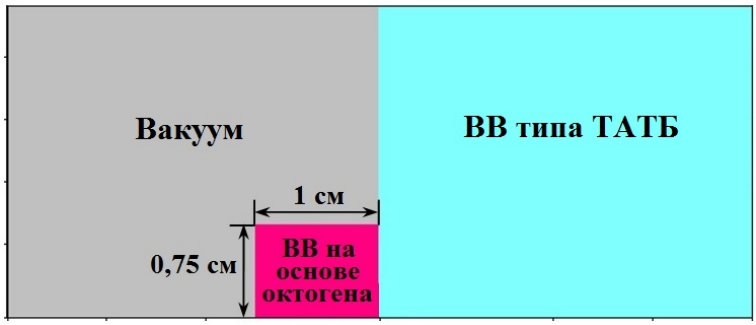

Рис. 4. Начальная геометрия (1/2 часть) расчетной задачи для ВВ типа ТАТБ с различной начальной плотностью

и распространения детонации в исследуемом образце ВВ на основе ТАТБ моделировался с использованием кинетики МК.

На рис. 5 (см. также цветную вкладку) приведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. Видно, что в расчетах, как и в эксперименте, при уменьшении начальной плотности ВВ на основе ТАТБ происходит значительное уменьшение зон непрореагировавшего ВВ. Расчеты хорошо согласуются с экспериментом по положению фронта детонационной волны (ДВ) и размеру невыгоревших зон ВВ.

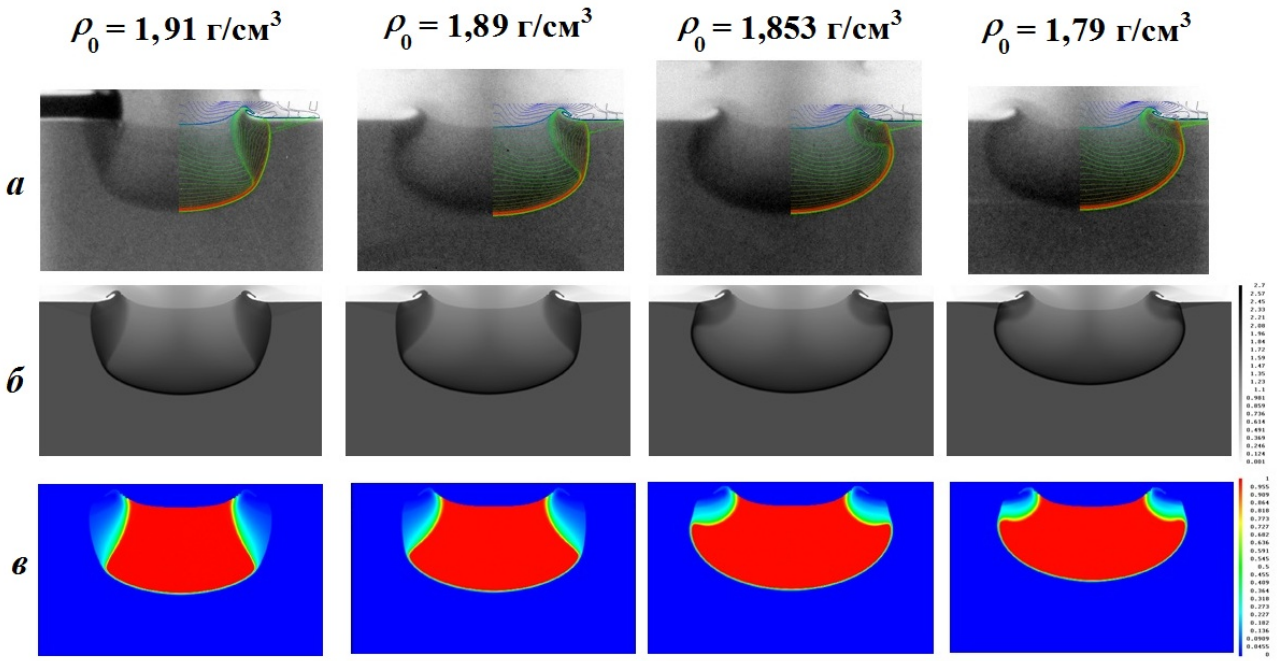

Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных данных задачи для ВВ типа ТАТБ с различной начальной плотностью: *а* — изолинии плотности, наложенные на рентгенограммы; *б* — расчетное поле плотности; *в* — поле выгорания ВВ, $t = 3{,}33$ мкс

Верификация алгоритма автоматического учета состояния ВВ перед фронтом УВ на основе экспериментальных данных

Численное моделирование процесса формирования и распространения детонации в ВВ на основе ТАТБ пониженной начальной плотности с использованием кинетики МК и алгоритма учета начального состояния ВВ показало качественное и количественное согласие с экспериментальными данными. Однако плотность ВВ может отличаться от нормальной ($\rho_0 = 1{,}91$ г/см^3) не только из-за технологии изготовления, но и в результате различных предварительных воздействий, не вызывающих детонацию. Поэтому разработанный алгоритм автоматического учета состояния ВВ перед фронтом нагружающей волны использовался для численного моделирования экспериментов с многократным нагружением ВВ типа ТАТБ.

Инициирование ВВ на основе ТАТБ после разгрузки в зазор. В [11] приведены данные экспериментов, в которых образцы ВВ ТАТБ плотностью 1,9—1,91 г/см^3 нагружались расходящейся УВ. В экспериментах исследовался процесс возбуждения детонации на отраженной от преграды волне при наличии зазора между ВВ и преградой (т. е. когда ВВ подвергается разгрузке) и при его отсутствии. Начальная геометрия задачи приведена на рис. 6.

Исследуемое ВВ на основе ТАТБ нагружалось УВ от накладного инициатора из ВВ на основе ТЭНа. Процесс детонации в инициаторах моделировался в приближении идеальной детонации.

Процесс взрывчатого превращения в ВВ на основе ТАТБ (возбуждение или отказ детонации) моделировался с использованием кинетики МК с алгоритмом учета зависимости чувствительности от плотности вещества перед нагружающей волной.

На рис. 7 приведено сравнение полей плотности, полученных в расчетах, с экспериментальными рентгенограммами. В расчетах так же, как и в эксперименте, инициирование ВВ на основе ТАТБ произошло на отраженной УВ только в случае с зазором в 0,1 см и большим инициатором (1 см).

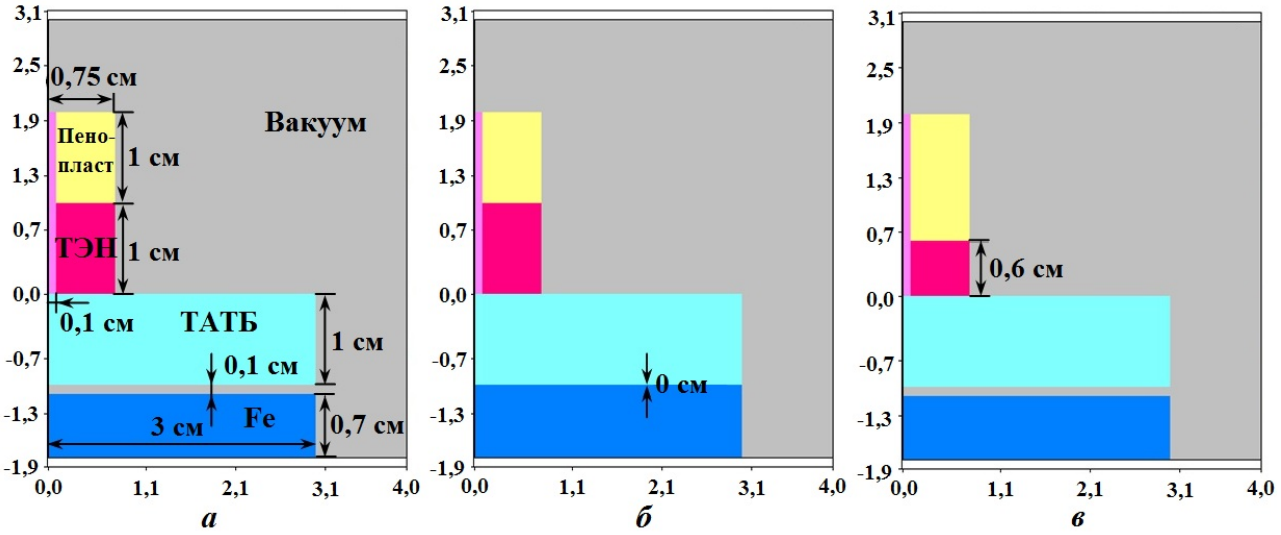

Рис. 6. Начальная геометрия задачи с разгрузкой в зазор: *а* — инициатор высотой 1 см, зазор в 0,1 см; *б* — инициатор высотой 1 см, без зазора; *в* — инициатор высотой 0,6 см, зазор в 0,1 см

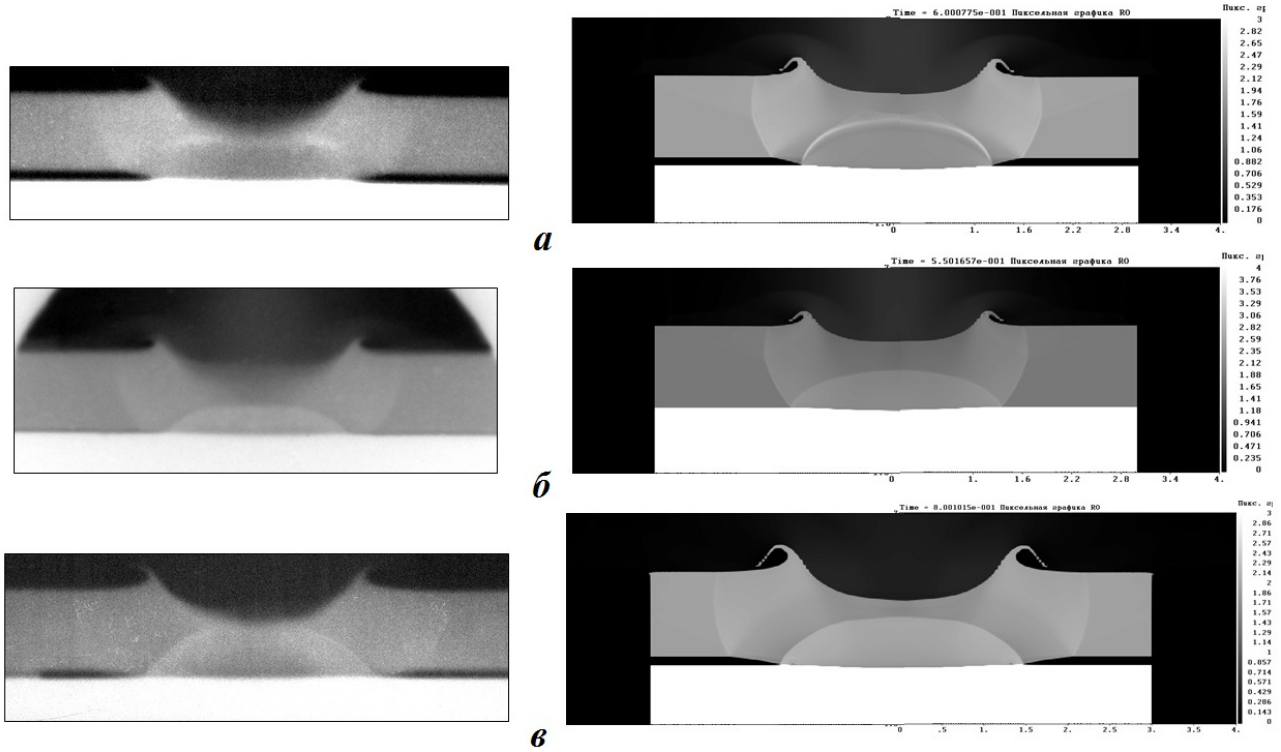

Рис. 7. Сравнение экспериментальных рентгенограмм (слева) и расчетных полей плотности (справа) для задачи с разгрузкой в зазор: *а* — инициатор высотой 1 см, зазор в 0,1 см; *б* — инициатор высотой 1 см, без зазора; *в* — инициатор высотой 0,6 см, зазор в 0,1 см

При отсутствии зазора между исследуемым ВВ и преградой инициирование на отраженной волне не происходит. Инициирование ВВ типа ТАТБ не происходит и в случае инициатора высотой 0,6 см.

Детальное изучение расчетных полей плотности и нагружающих импульсов дает объяснение полученных результатов. В расчетах с инициатором высотой 1 см нагружающее давление на отраженной волне составляет ≈ 15 ГПа. Однако в случае с зазором ВВ успевает разгрузиться до плотности $\rho_{fon} = 1{,}6$ г/см^3 и происходит инициирование детонации, а в расчете без зазора ВВ остается пережатым, $\rho_{fon} = 2{,}3$ г/см^3, и детонации не возникает. В случае же с инициатором высотой 0,6 см ВВ разгружается до плотности $\rho_{fon} = 1{,}6$ г/см^3, как и в случае с инициатором в 1 см, но нагружающего давления около 7 ГПа оказывается недостаточно для формирования детонации.

Инициирование ВВ на основе ТАТБ плоской волной после разгрузки в пенопласт. В опыте [12] образец ВВ на основе ТАТБ (рис. 8) плотностью $\rho = 1{,}91$ г/см^3 в форме параллелепипеда с размерами 12 см × 2 см × 4,5 см нагружался косой УВ (с допороговой интенсивностью) с нижней поверхности от скользящей детонации тонкого слоя (0,2 см) ВВ на основе ТЭНа, инициируемого справа по торцу. Косая УВ проходит по образцу и в части образца выходит в легкий слой (пенопласт), расположенный на противоположной поверхности образца. Обратно в образец идет волна разгрузки, а УВ продвигается дальше по образцу. В некоторый момент времени одна часть образца остается в исходном невозмущенном состоянии, вторая, соседняя часть, нагружена УВ, а в третьей части образца уже произошла разгрузка. С задержкой происходит нагружение плоской УВ от другого заряда, размещенного на пенопласте. В результате все указанные зоны образца одновременно нагружаются плоской УВ, которая распространяется по исследуемому образцу и создает область однократного и двукратного сжатия, воздействуя на область разгрузки.

Процесс распространения детонации в инициирующих слоях ВВ моделировался в приближении идеальной детонации, а процесс формирования и распространения детонации в исследуемом ВВ ТАТБ — с использованием кинетики МК.

На рис. 9 (см. также цветную вкладку) приведено сравнение результатов расчета с экспериментальной рентгенограммой. Видно, что и в эксперименте, и в расчете в ВВ на основе ТАТБ формируются три зоны: ненагруженное ВВ, поджатое ВВ и разгруженное ВВ. В обоих случаях инициирование исследуемого образца от верхней нагружающей волны происходит только в зоне с разгруженным ВВ, а в зоне, не подвергавшейся воздействию, и в поджатом ВВ детонации не возникает.

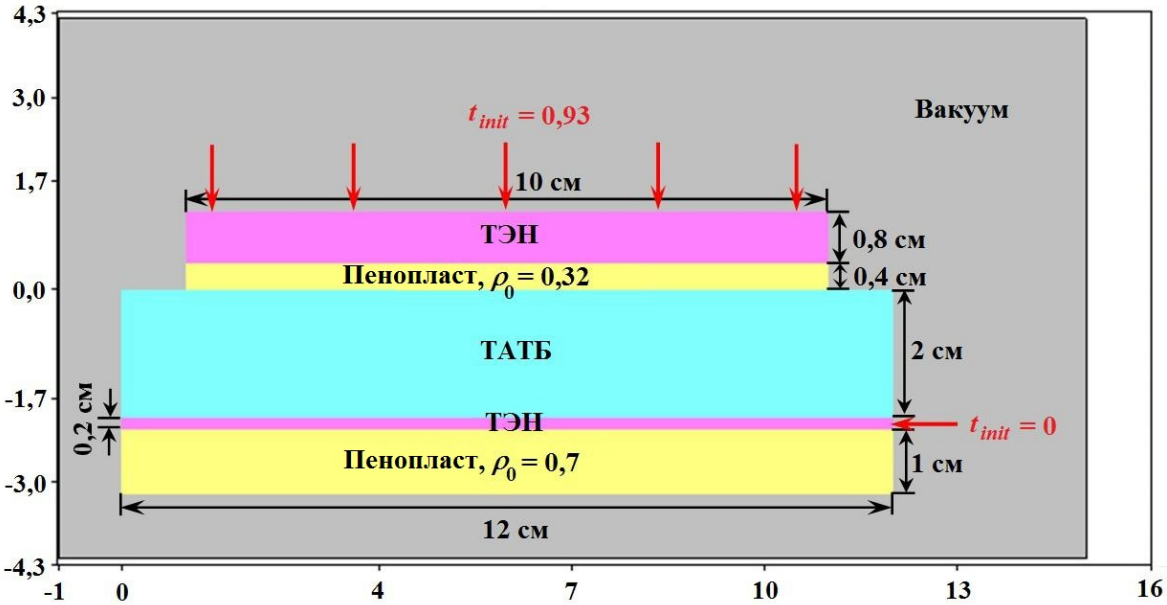

Рис. 8. Начальная постановка задачи с разгрузкой в пенопласт

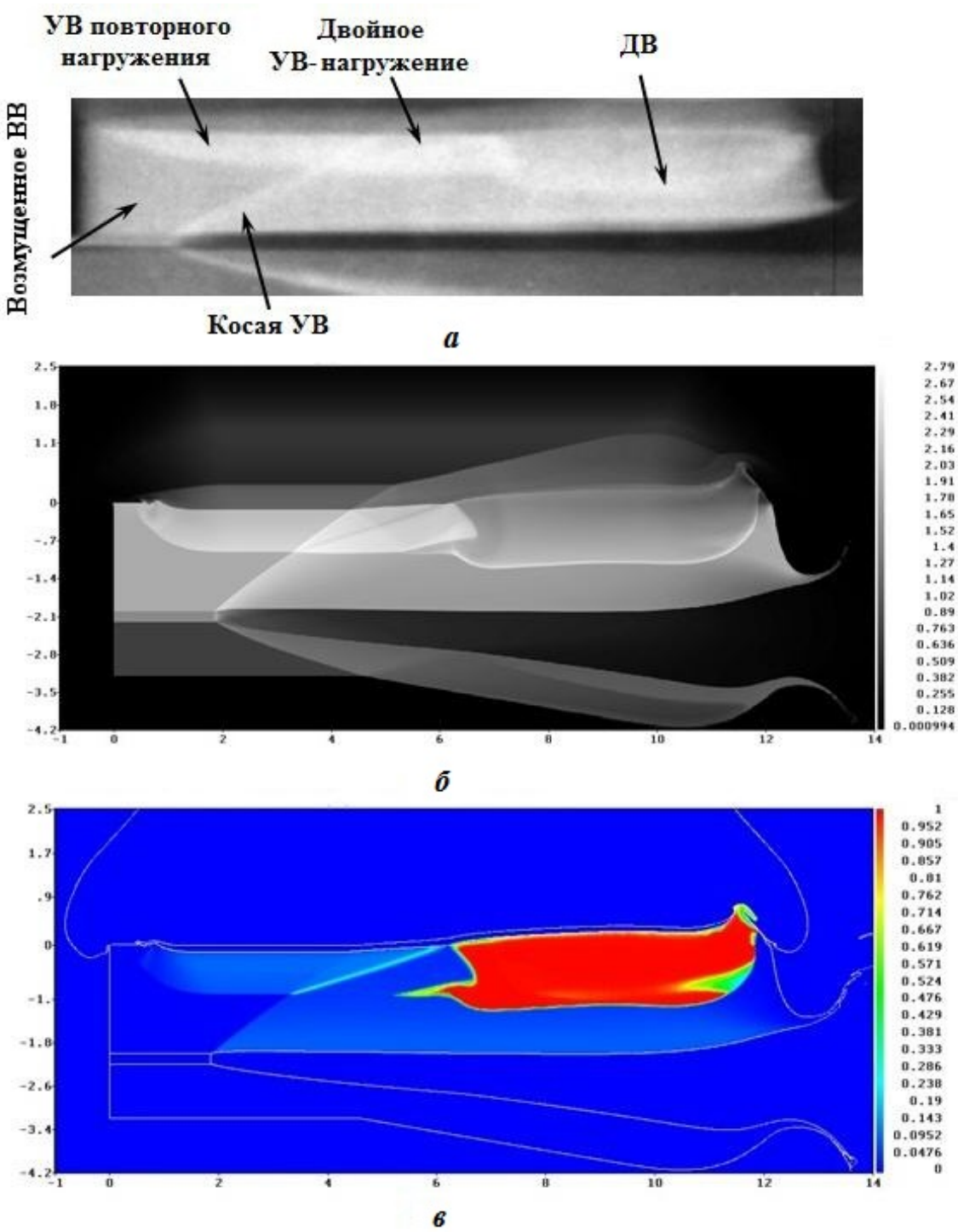

Рис. 9. Сравнение экспериментальных рентгенограмм (*а*), расчетных полей плотности (*б*) и выгорания ВВ (*в*) для задачи с разгрузкой в пенопласт

Расчеты показали, что от верхнего инициатора через демпфер приходит нагружающий импульс давления около 18 ГПа. Этого импульса оказывается недостаточно для инициирования невозмущенного (ρ_{fon} = 1,91 г/см^3) и поджатого (ρ_{fon} = 2,4 г/см^3) ВВ. В области разгрузки плотность ВВ на основе ТАТБ падает до ρ_{fon} = 1,4 г/см^3 и происходит инициирование ДВ и ее дальнейшее распространение.

Моделирование снижения ударно-волновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ при сжатии слабой УВ (десенсибилизация ВВ). Необходимо, чтобы наряду с опытами, в которых ВВ проявляет свои сенсибилизационные свойства, предложенный алгоритм автоматического учета зависимости чувствительности ВВ от начальной плотности описывал эксперименты, в которых проявляются десенсибилизационные свойства ВВ типа ТАТБ, т. е. снижение ударно-волновой чувствительности в области предварительного сжатия ВВ. Эти экспериментальные данные широко известны. Подробное описание постановки эксперимента можно найти в работе [2].

Экспериментальные данные позволяют проводить численное моделирование в плоской двумерной постановке. Начальная геометрия задачи приведена на рис. 10. Система представляет собой 1/4 часть цилиндра из ВВ типа ТАТБ, на срезах которого помещены две инициирующие шашки одинакового размера. Сначала инициировалась шашка $ВВ_1$ на основе ТЭНа, а затем с задержкой 0,49 мкс — шашка из $ВВ_2$ на основе октогена. Инициирование шашек производилось в приближении идеальной детонации в точках A и B (см. рис. 10) соответственно.

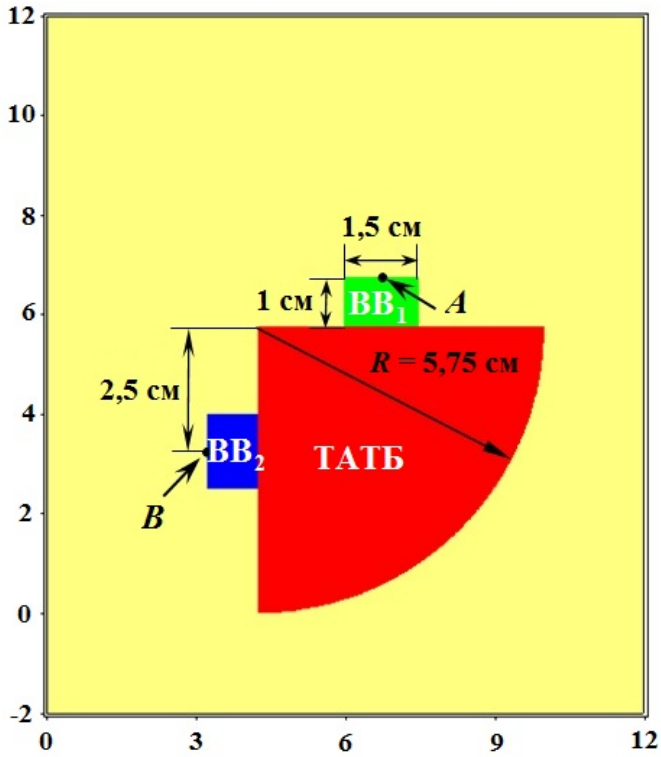

Рис. 10. Начальная геометрия задачи по моделированию десенсибилизации ВВ

Результаты расчетов сравнивались с экспериментальной рентгенограммой (рис. 11) по размеру непрореагировавшей области и положению фронтов УВ и ДВ. Из рис. 11 видно, что в обоих случаях от инициатора из $ВВ_1$ распространяется слабая УВ, а от инициатора из $ВВ_2$ распространяется ДВ до тех пор, пока она не попадает в область, предварительно сжатую слабой УВ (в эту область детонация не распространяется). Расчеты показали, что в данной серии экспериментов, когда инициирующее давление достаточно велико ($P > 15$ ГПа), ВВ находится в сжатом состоянии ($\rho_{fon} > 2$ г/см^3) и его чувствительность резко падает. Когда же нагружающая волна проходит в разгруженную область ($1{,}85 < \rho_{fon} < 1{,}91$ г/см^3), то ее интенсивность уже недостаточна для инициирования ($P < 6$ ГПа).

Заключение

В рамках методики ЛЭГАК для модели кинетики МК был разработан и реализован алгоритм, автоматически учитывающий зависимость чувствительности ВВ на основе ТАТБ от начальной плотности в диапазоне плотностей $1{,}3$ г/см$^3 \le \rho_0 \le 1{,}91$ г/см^3. Математический алгоритм кинетики МК был обобщен на случай многократных ударно-волновых воздействий.

Проведенная модификация модели кинетики МК в методике ЛЭГАК позволила провести численное моделирование опытов по сенсибилизации ВВ типа ТАТБ, которые ранее единым образом описать не удавалось. Модифицированная модель также позволяет описать экспериментальные данные по десенсибилизации ВВ, которые воспроизводились и в предыдущей версии модели кинетики.

Таким образом, в методике ЛЭГАК реализована универсальная модель кинетики МК для ВВ ТАТБ, которая позволяет описывать всю совокупность имеющихся экспериментальных данных и проводить численное моделирование взрывчатого превращения ВВ при многократном воздействии.

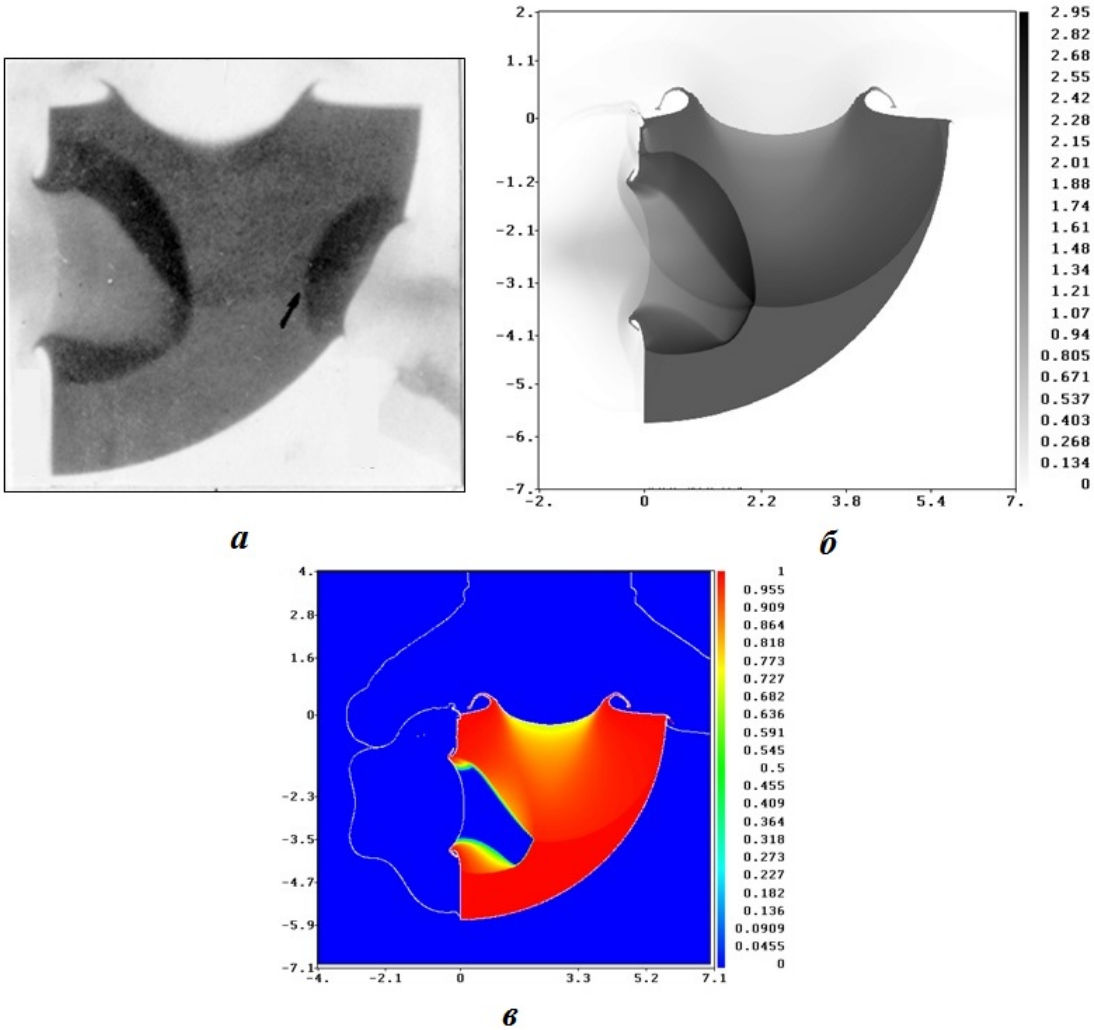

Рис. 11. Сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов с автоматическим учетом фоновой плотности для задачи по моделированию десенсибилизации ВВ: *а* — экспериментальная рентгенограмма; *б* — расчетное поле плотности; *в* — расчетное поле концентрации ВВ

Список литературы

1. *Власова Ю. А., Косолапов В. Б., Фомичёва Л. В., Хабаров И. П.* Влияние температуры, плотности и технологических факторов на ударно-волновую чувствительность пластифицированного ТАТБ // ФГВ. 1998. Т. 34, № 4. С. 110—112.
Vlasova Yu. A., Kosolapov V. B., Fomicheva L. V., Khabarov I. P. Vliyanie temperatury, plotnosti i tekhnologicheskikh faktorov na udarno-volnovuyu chuvstvitelnost plastifitsirovannogo TATB // FGV. 1998. T. 34, N 4. S. 110—112.

2. *Морозов В. Г., Карпенко И. И., Ольхов О. В., Соколов С. С., Шамраев Б. Н., Дмитриева Л. В., Плаксин И. В., Евстигнеев А. А., Ковтун А. Д., Герасименко В. Ф., Шуйкин А. Н., Комрачков В. А., Макаров Ю. М., Герасимов В. М., Шутов В. Н.* Расчетное моделирование с опорой на эксперименты инициирования и развития детонации ВВ на основе ТАТБ с учетом десенсибилизации при взаимодействии ударной и детонационной волн: Препринт 37—95. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1995.
Morozov V. G., Karpenko I. I., Olkhov O. V., Sokolov S. S., Shamraev B. N., Dmitrieva L. V., Plaksin I. V., Evstigneev A. A., Kovtun A. D., Gerasimenko V. F., Shuykin A. N., Komrachkov V. A., Makarov Yu. M., Gerasimov V. M., Shutov V. N. Raschetnoe modelirovanie s oporoy na eksperimen-

ty initsiirovaniya i razvitiya detonatsii VV na osnove TATB s uchetom desensibilizatsii pri vzaimodeystvii udarnoy i detonatsionnoy voln: Preprint 37—95. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 1995.

3. *Бахрах С. М., Володина Н. А., Зайцева М. О., Карпенко И. И., Ковтун А. Д., Комрачков В. А., Макаров Ю. М., Морозов В. Г., Рябчун Л. А.* Экспериментальное и численное исследование развития процесса детонации ВВ типа ТАТБ // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 1. С. 41—56.
Bakhrakh S. M., Volodina N. A., Zaytseva M. O., Karpenko I. I., Kovtun A. D., Komrachkov V. A., Makarov Yu. M., Morozov V. G., Ryabchun L. A. Eksperimentalnoe i chislennoe issledovanie razvitiya protsessa detonatsii VV tipa TATB // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 2005. Vyp. 1. S. 41—56.

4. *Володина Н. А., Мышкина И. Ю., Спиридонов В. Ф.* Исследование влияния счетных параметров при численном моделировании процесса взрывчатого превращения ВВ по кинетике МК в методике ЛЭГАК // Там же. 2010. Вып. 2. С. 3—14.
Volodina N. A., Myshkina I. Yu., Spiridonov V. F. Issledovanie vliyaniya schetnykh parametrov pri chislennom modelirovanii protsessa vzryvchatogo prevrashcheniya VV po kinetike MK v metodike LEGAK // Tam zhe. 2010. Vyp. 2. S. 3—14.

5. *Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф., Шанин А. А.* Метод расчета течений неоднородной среды в лагранжево-эйлеровых координатах // Докл. АН СССР. 1984. Т. 4. С. 829—833.
Bakhrakh S. M., Spiridonov V. F., Shanin A. A. Metod rascheta techeniy neodnorodnoy sredy v lagranzhevo-eylerovykh koordinatakh // Dokl. AN SSSR. 1984. T. 4. S. 829—833.

6. *Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Бакулина Е. А., Безрукова И. Ю., Борляев В. В., Володина Н. А., Наумов А. О., Огнева Н. Э., Резвова Т. В., Резяпов А. А., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Тихонова А. П., Циберев К. В., Шанин А. А., Ширшова М. О., Шувалова Е. В.* Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 41—50.
Bakhrakh S. M., Velichko S. V., Spiridonov V. F., Avdeev P. A., Artamonov M. V., Bakulina E. A., Bezrukova I. Yu., Borlyaev V. V., Volodina N. A., Naumov A. O., Ogneva N. E., Rezvova T. V., Rezyapov A. A., Starodubov S. V., Taraday I. Yu., Tikhonova A. P., Tsiberev K. V., Shanin A. A., Shirshova M. O., Shuvalova E. V. Metodika LEGAK-3D rascheta trekhmernykh nestatsionarnykh techeniy mnogokomponentnoy sploshnoy sredy i printsipy ee realizatsii na mnogoprotsessornykh EVM s raspredelennoy pamyatyu // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 2004. Vyp. 4. S. 41—50.

7. *Костицын О. В., Баталов С. В., Вершинин А. В., Никулин А. А., Мирошкин К. М., Смирнов Е. Б., Лобойко Б. Г., Филин В. П.* Относительное изменение ударно-волновой чувствительности образцов ВВ на основе ТАТБ при их термическом старении // Семинар по старению энергетических материалов. Монтерей, США. 22—26 июля 2002 г.
Kostitsyn O. V., Batalov S. V., Vershinin A. V., Nikulin A. A., Miroshkin K. M., Smirnov E. B., Loboyko B. G., Filin V. P. Otnositelnoe izmenenie udarno-volnovoy chuvstvitelnosti obraztsov VV na osnove TATB pri ikh termicheskom starenii // Seminar po stareniyu energeticheskikh materialov. Monterey, SShA. 22—26 iyulya 2002 g.

8. *Родионов А. В., Бельский В. М., Богданов Е. Н., Михайлов А. Л., Комиссаров В. В., Седов А. А.* Определение глубины возбуждения детонации радиоволновым методом в пластифицированных октогене и ТАТБ // Межд. конф. "Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны". XI Харитоновские тематические науч. чтения: сб. науч. тр. / Под ред. А. Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 69—73.
Rodionov A. V., Belskiy V. M., Bogdanov E. N., Mikhaylov A. L., Komissarov V. V., Sedov A. A. Opredelenie glubiny vozbuzhdeniya detonatsii radiovolnovym metodom v plastifitsirovannykh oktogene i TATB // Mezhd. konf. "Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye

volny". XI Kharitonovskie tematicheskie nauch. chteniya: sb. nauch. tr. / Pod red. A. L. Mikhaylova. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 2009. S. 69—73.

9. *Комрачков В. А., Ковтун А. Д., Макаров Ю. М.* Применение импульсной рентгенографии для исследования ударно-волнового инициирования ТАТБ // ФГВ. 1999. Т. 35, № 2. С. 96—101.
Komrachkov V. A., Kovtun A. D., Makarov Yu. M. Primenenie impulsnoy rentgenografii dlya issledovaniya udarno-volnovogo initsiirovaniya TATB // FGV. 1999. T. 35, N 2. S. 96—101.

10. *Бурцев В. В., Комрачков В. А., Панов К. Н., Ковтун А. Д., Руднев А. В., Сырунин М. А.* Исследования инициирования детонации в ТАТБ методом протонной радиографии // Там же. 2012. Т. 48, № 3. С. 1—8.
Burtsev V. V., Komrachkov V. A., Panov K. N., Kovtun A. D., Rudnev A. V., Syrunin M. A. Issledovaniya initsiirovaniya detonatsii v TATB metodom protonnoy radiografii // Tam zhe. 2012. T. 48, N 3. S. 1—8.

11. *Панов К. Н., Комрачков В. А.* Исследование рентгенографическим методом эволюции профиля плотности вещества за фронтом расходящейся ударной волны во взрывчатом веществе // Там же. 2004. Т. 40, № 5. С. 102—108.
Panov K. N., Komrachkov V. A. Issledovanie rentgenograficheskim metodom evolutsii profilya plotnosti veshchestva za frontom raskhodyashcheysya udarnoy volny vo vzryvchatom veshchestve // Tam zhe. 2004. T. 40, N 5. S. 102—108.

12. *Бурцев В. В., Михайлов А. Л., Панов К. Н., Руднев А. В., Сырунин М. А.* Исследование инициирования детонации во взрывчатом веществе на протонном ускорителе У-70 // Там же. 2011. Т. 47, № 3. С. 115—121.
Burtsev V. V., Mikhaylov A. L., Panov K. N., Rudnev A. V., Syrunin M. A. Issledovanie initsiirovaniya detonatsii vo vzryvchatom veshchestve na protonnom uskoritele U-70 // Tam zhe. 2011. T. 47, N 3. S. 115—121.

Статья поступила в редакцию 03.12.18.

RESULTS OF NUMERICAL SIMULATIONS OF VARIATIONS IN THE SHOCK SENSITIVITY OF TATB-TYPE HIGH EXPLOSIVES IN RESPONSE TO MULTIPLE SHOCK WAVES IN THE LEGAK CODE / N. A. Volodina, V. B. Titova, M. O. Shirshova (FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, Nizhny Novgorod Region).

The paper presents the results of modification of the MK detonation kinetics model in the LEGAK code to enable universal accounting for the shock sensitivity of TATB-based HE depending on its state before the front of the initiating shock wave. The changes in the model apply to the formula responsible for the density of hot-spot formation near the shockwave front, and to the algorithm for shock wave front tracking and analysis of the state of matter before the shock-wave front. The realized modification of the MK model was tested using experimental data for TATB-based HE with initial densities of $1{,}3\,\text{г/см}^3 \le \rho_0 \le$ $\le 1{,}91\,\text{г/см}^3$.

The proposed algorithm enables automatic accounting for the state of HE before the shock front and uniform description of experimental data for both sensitizing and desensitizing of HE in response to multiple shock waves.

Keywords: detonation kinetics, shock sensitivity, TATB.