

КАЛИБРОВКА УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ТРИАМИНОТРИНITРОБЕНЗОЛА НА ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО РАЗЛЕТУ МЕДНЫХ ТРУБОК ДИАМЕТРОМ 20 ММ

Кирюхина Маргарита Николаевна (mnkiryukhina@vniief.ru), Буренков Олег Михайлович, Свидинский Артем Владимирович, Титова Виктория Борисовна, Ширшова Мария Олеговна, Баранов Виктор Константинович, Дудай Павел Викторович, Ириничев Дмитрий Альбертович, Февралёв Алексей Юрьевич

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

В работе представлены результаты калибровки нового уравнения состояния продуктов взрыва для взрывчатого состава на основе ТАТБ, предложенного О. М. Буренковым. Для этого использовались экспериментальные данные по радиальному и торцевому метанию оболочек.

Проведено сравнение различных уравнений состояния ПВ, используемых в расчетах ВНИИЭФ. Выполнено сравнение экспериментальных и расчетных данных, полученных с учетом «идеальной» детонации и с учетом кинетики детонации МК с использованием численной методики ЛЭГАК. Приведен набор параметров нового УРС О. М. Буренкова для ВВ на основе ТАТБ. Показано, что предложенное УРС позволяет описывать экспериментальные данные при больших степенях расширения ПВ.

Ключевые слова: методика ЛЭГАК, кинетика Морозова-Карпенко, уравнение состояния продуктов взрыва, ТАТБ, калибровка.

CALIBRATION OF AN EQUATION OF STATE FOR DETONATION PRODUCTS OF A TRIAMINOTRINITROBENZENE-BASED EXPLOSIVE IN 20-MM-DIAMETER COPPER TUBE EXPANSION EXPERIMENTS

Kiryukhina Margarita Nikolaevna (mnkiryukhina@vniief.ru), Burenkov Oleg Mikhaylovich, Svidinskiy Artem Vladimirovich, Titova Viktoriya Borisovna, Shirshova Mariya Olegovna, Baranov Viktor Konstantinovich, Duday Pavel Viktorovich, Irinichev Dmitriy Albertovich, Fevraleev Alexey Yurievich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper reports calibration results for a new equation of state for detonation products of a TATB-based explosive proposed by Oleg M. Burenkov. The calibration was performed with respect to experimental data on radial and endwise shell firing.

Different equations of state for the detonation products used in VNIIEF calculations were compared. Experimental data were compared with data calculated by the LEGAK code for the case of «ideal» detonation and the case of using the MK detonation kinetics model. A set of parameters for Burenkov's new equation of state for the TATB-based explosive is presented. The proposed equation of state is shown to be suitable for describing experimental data at high detonation product expansion ratios.

Key words: LEGAK code, Morozov-Karpenko's kinetics, equation of state for detonation products, TATB, calibration.

Введение

Качество численного моделирования основных физических процессов в задачах газовой динамики во многом определяется точностью используемых моделей для описания процессов детонации основания взрывчатого вещества (ВВ), в том числе моделей уравнений состояния продуктов взрыва (ПВ).

В настоящее время разрабатываются новые уравнения состояния (УРС) ВВ и ПВ, новые экспериментальные методики и проводятся уникальные лабораторные эксперименты по исследованию процессов взрывчатого превращения в зарядах при различных режимах их подрыва. Данные работы требуют совершенствования расчетных методик и верификации численных моделей на современные экспериментальные данные.

В исследованиях УРС ПВ целесообразно привлечение современных невозмущающих методов диагностики (например, Photon Doppler Velosimetry (PDV) [1]), обладающих более высокой точностью и разрешением и позволяющих регистрировать широкий спектр экспериментальной информации.

Методика верификации УРС ПВ представляет собой расчетно-экспериментальный анализ, необходимый для корректного выбора формы УРС и набора параметров к нему. Для отработки данной методики могут быть использованы следующие экспериментальные данные:

- изэнтропа разгрузки ПВ из точки Чепмена-Жуге;
- эксперименты по радиальному метанию оболочек;
- эксперименты по торцевому метанию оболочек.

С использованием этих данных проводится подбор параметров УРС ПВ и затем – верификация на том классе расчетов, в котором УРС будет использоваться. Предполагается, что при этом используется модель кинетики детонации с уже подобранными параметрами. Например, в данной работе используется модель детонации Морозова-Карпенко (МК) [2]–[3], реализованная в методике ЛЭГАК [4]–[5].

Выбор УРС ПВ и калибровка его параметров по экспериментальным данным

В настоящее время для проведения расчетов с ВВ на основе триаминотринитробензола (ТАТБ) широко используются следующие модели УРС:

- JWЛ (Джонс-Уилкинс-Ли) [6], [7];
- Зубарева (в упрощенной форме) [8], [9];
- Дэвиса [10], [11].

Применимость разных типов УРС определяется точностью, с которой они позволяют описывать состояние ПВ в требуемом диапазоне степеней расширения v/v_0 , где v – текущий удельный объем, v_0 – начальный. Например, для некоторых задач достаточно описывать ПВ в диапазоне от точки Жуге

до расширения $v/v_0 = 2-3$. В этом случае можно применять УРС Зубарева в упрощенной форме, т. к. он содержит минимальное число параметров, что облегчает их калибровку.

Если необходимо увеличить диапазон до степени расширения $v/v_0 > 6$, то УРС Зубарева в принципе не может обеспечить приемлемую точность. В этом случае широко применяется УРС JWЛ; наличие дополнительного экспоненциального члена позволяет описывать степени расширения до $v/v_0 = 10-30$, что достаточно для всех типовых задач, связанные с метанием оболочек. К его недостаткам относится нефизическая зависимость $\Gamma(v)$ при высокой плотности, и невозможность задания ее реалистичного значения при $v/v_0 \rightarrow \infty$ при корректном описании начальной стадии расширения.

УРС Дэвиса имеет структурные ограничения на соотношение параметров. Как следствие, хотя с его помощью удастся описать ПВ состава ТАТБ, его нельзя использовать для ряда других ВВ, что не располагает к его широкому применению в различных задачах.

На основе анализа достоинств и недостатков различных форм УРС ПВ О. М. Буренковым была предложена новая форма УРС типа Ми-Грюнайзена (1):

$$\begin{aligned} P(\rho, E) &= P_s(\delta) + \Gamma(\delta) \cdot \rho \cdot (E - E_s(\delta)), \\ P(\rho, T) &= E_s(\delta) + C_v \cdot (T - T_s(\delta)), \end{aligned} \quad (1)$$

где P_s, E_s, T_s – давление, энергия и температура на опорной адиабате, проходящей через точку Жуге.

Новый вариант УРС содержит экспоненциальный и два степенных члена для опорной адиабаты (2), где давление, энергия и скорость звука связаны соотношениями (3):

$$\begin{cases} E_s(\delta) = A \cdot e^{-\frac{\xi}{\delta}} + B \cdot \delta^m + C \cdot \delta^n; \\ P_s(\delta) = \rho_0 \cdot \left(\xi \cdot A \cdot e^{-\frac{\xi}{\delta}} + m \cdot B \cdot \delta^{m+1} + n \cdot C \cdot \delta^{n+1} \right); \\ C_s^2(\delta) = \frac{\xi^2}{\delta^2} \cdot A \cdot e^{-\frac{\xi}{\delta}} + m \cdot (m+1) \cdot B \cdot \delta^m + \\ \quad + n \cdot (n+1) \cdot C \cdot \delta^n. \end{cases} \quad (2)$$

$$P_s(\delta) = \rho_0 \cdot \delta^2 \cdot \frac{\partial E_s(\delta)}{\partial \delta}; \quad C_s^2(\delta) = \frac{\partial P_s(\delta)}{\rho_0 \partial \delta}. \quad (3)$$

В качестве задаваемых параметров берутся $m, n, C > 0$, а оставшиеся параметры $A, B, \xi = \xi(m, n, C)$ рассчитываются по значениям параметров в точке Жуге. Коэффициент Грюнайзена имеет вид (4):

$$\Gamma(\delta) = b \cdot n + (1-b) \frac{\delta \cdot \Omega'(\delta)}{\Omega(\delta)}, \quad (4)$$

где $\Omega = \Omega(\delta, L, \alpha, \delta_{\max})$.

Параметры УРС Буренкова в расчетах

Параметр	ρ_0 , г/см ³	D^* , км/с	U^* , км/с	Q , кДж/г	m	n	C , кДж/г	b	δ_{\max}	L	α
Значение	1,90	7,51	1,96	3,653	2,05	0,25	1,25	0,32	1,1	0,55	1,5

Формально, новая форма УРС является модификацией упрощенной формы УРС Зубарева, полученная добавлением дополнительного степенного члена. Отличительной особенностью данного УРС является более простая и удобная возможность качественной аппроксимации опорных адиабат уравнений состояния ПВ. Экспериментальные значения параметров точки Жуге (ρ_0 , D^* , U^* , Q) являются исходными параметрами уравнения состояния. Это удобно тем, что при корректировке этих параметров, рабочие параметры уравнения состояния будут пересчитываться автоматически, исключая несогласованность вариантов УРС ПВ по точке Жуге. Это делает УРС Буренкова простым и удобным инструментом для инженерных расчетов, с возможностью дополнительной настройки под описание каждой конкретной системы и выбранного способа ее расчетного моделирования. Таким образом, задавая необходимые значения в точке Жуге и варьируя 3 параметра (m , n , C), определяющие зависимость, аппроксимирующую данные на изэнтропе разгрузки ПВ, были подобраны параметры УРС Буренкова, приведенные в табл. 1. Параметры подбирались так, чтобы описать экспериментальные данные и на изэнтропе разгрузки, и по радиальному и торцевому метанию оболочки.

На рис. 1 представлены расчетные и экспериментальные изэнтропы расширения ПВ состава на основе ТАТБ. Заметен большой разброс в экспериментальных данных разных авторов, что может быть связано с отличиями в составе ВВ, масштабным фактором и с особенностями проведения опытов. Рассматриваемые УРС JWL, Дэвиса и Зубарева группируются вокруг экспериментов [12]–[14], причем УРС JWL, Дэвиса и Зубарева лежат ближе к нижней границе, а УРС Буренкова – к середине экспериментальных данных.

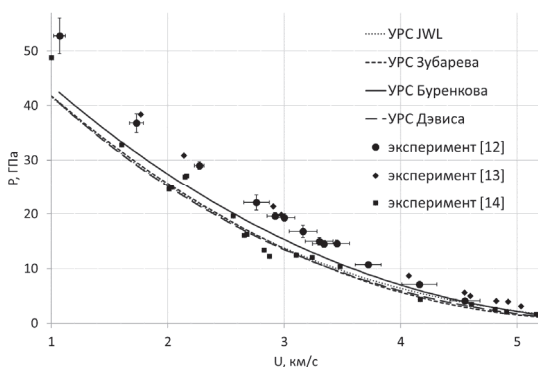


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные изэнтропы расширения ПВ ТАТБ

Следующим шагом по отработке и верификации УРС ПВ Буренкова является численное моделирование экспериментов по измерению метательной способности ВВ, в которых исследуется разгон металлической оболочки под действием ПВ в радиальном и продольном направлении.

В методиках радиального метания (например, зарубежный цилиндр-тест или отечественная методика Т-20) определяется скорость медной трубки в зависимости от времени или пройденного расстояния. Эти данные позволяют калибровать УРС ПВ в диапазоне от точки Жуге до степени расширения 10–30.

В связи с появлением новых средств диагностики (в частности микроволновой и лазерно-доплеровской методик измерения скорости) точность и информативность экспериментов по взрывному метанию резко выросла. Ранее в опыте фактически определялась $x(t)$ -диаграмма оболочки, которую затем было необходимо дифференцировать с потерей точности по амплитуде и по временному разрешению. PDV позволяет проводить непосредственное измерение скорости с высокой точностью (~0,5 % по амплитуде и разрешением порядка 1 нс) одновременно для нескольких точек; помимо метательной способности, это дает возможность определить скорость детонации в данной конкретной сборке, а также контролировать динамику и воспроизводимость процессов распространения детонации при численном моделировании. Кроме того, поскольку экспериментальные зависимости массовой скорости $V(t)$ и $V(x)$ получаются в цифровом виде, их можно напрямую сравнивать с расчетами, без интерполяции и усреднения.

Экспериментальные данные по метательной способности

В рамках данной работы калибровка УРС ПВ состава на основе ТАТБ проводилась на опытах с совмещенной метательной сборкой Т-20/М-20, приведенной на рис. 2 и рис. 3.

На рис. 4 представлены временные зависимости радиальной скорости разлета поверхности медной трубки, полученные в эксперименте.

По началу сигналов на разных коллиматорах была определена скорость детонации, которая составила примерно 7,45 км/с.

Постановка и результаты расчетов по оценке метательной способности

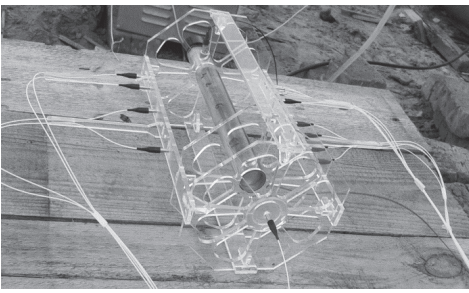


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной сборки

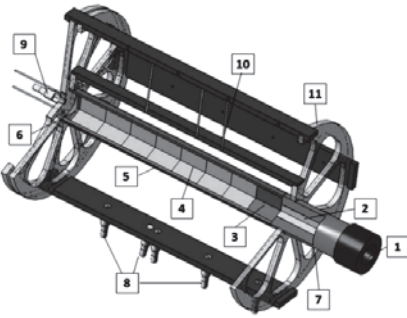


Рис. 3. Схема экспериментальной сборки «Т-20+М-20» в опытах 2018 г: 1 – гнездо для электродетонатора, 2 – шашка из ТЭН, 3 – шашка промежуточного состава, 4 – исследуемое ВВ, 5 – трубка из меди, 6 – диск из меди, 7 – световод для контроля времени инициирования; 8 – коллиматоры для измерения радиальной скорости медной оболочки, 9 – коллиматор для измерения продольной скорости диска, 10 – световоды для измерения радиальной скорости трубки с другой стороны трубки, 11 – конструкция для фиксации элементов сборки из ПММА

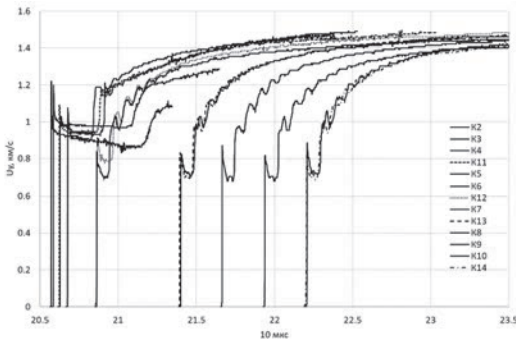


Рис. 4. Временные зависимости радиальной скорости разлета поверхности медной трубки, полученные в эксперименте

Численное моделирование опыта со сборкой Т-20/М-20 проводилось в методике ЛЭГАК. В расчетах измерялась скорость разлета медной трубки, снаряженной ВВ на основе ТАТБ; геометрия расчетов представлена на рис. 5.

Расчеты проводились в двумерной осесимметричной постановке на эйлеровой квадратной сетке с $h=0,005$ см. Детонация задавалась в начальный момент времени на левом торце шашки из ТЭН, инициирование и распространение детонации в ней моделировалось с помощью итерационного пошагового алгоритма контроля скорости «fast-deton» [15], а в шашках октогена и ТАТБ расчет детонации осуществлялся с контролем скорости или с учетом кинетики взрывчатых превращений по модели МК.

Для измерения скорости разлета внешней поверхности медных трубки и диска использовался метод маркерных точек, реализованный в методике ЛЭГАК, предназначенный для регистрации положения маркера в любой момент времени. В качестве результатов в маркерах/датчиках снимались скорости U_x и U_y .

Первая серия расчетов проводилась с использованием УРС различного типа для ПВ ТАТБ с применением алгоритма контроля скорости детонации. Во второй серии проводились расчеты с УРС Зубарева и Буренкова с использованием кинетики детонации МК.

В табл. 2 приведены УРС и характеристики ВВ в первой серии расчетов.

Таблица 2

Перечень проведенных расчетов

№	УРС ПВ ТАТБ	Q , кДж/г	D , км/с	ρ , г/см ³
1.	JWL	3,622	7,59	1,905
2.	Зубарев	3,65	7,62	1,91
3.	Буренков	3,706	7,63	1,91
4.	Дэвис	3,651	7,64	1,90

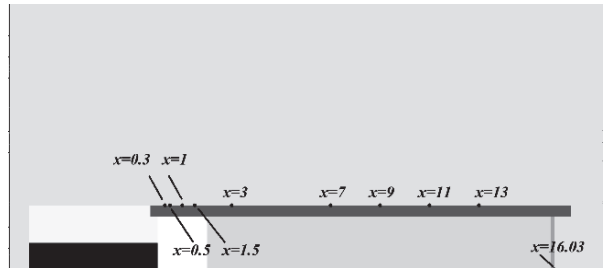
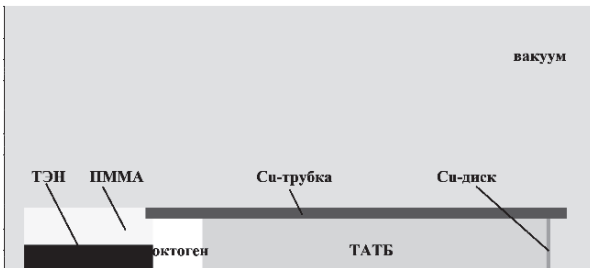


Рис. 5. Начальная геометрия расчетов: а – вещества, б – положение маркеров

Во всех рассмотренных наборах скорость детонации несколько выше наблюдавшейся в эксперименте. Поэтому удобнее сравнивать результаты в виде зависимостей массовой скорости от пройденного расстояния $V(x)$, так как это позволяет привязать все результаты к $x=0$ см, некоторые из которых представлены на рис. 6.

Для радиального разгона трубки параметры первого пика в расчетах ниже экспериментальных на 0,1–0,2 км/с. Это может быть связано с влиянием кинетики горения – замедление реакции приводит к увеличению радиуса кривизны детонационного фронта и вместо скользящей на стенку приходит падающая волна, что приводит к росту амплитуды давления. Кроме того, это дает задержку по времени начала второго и последующего пика. Поэтому сравнивался участок разгона после второго пика.

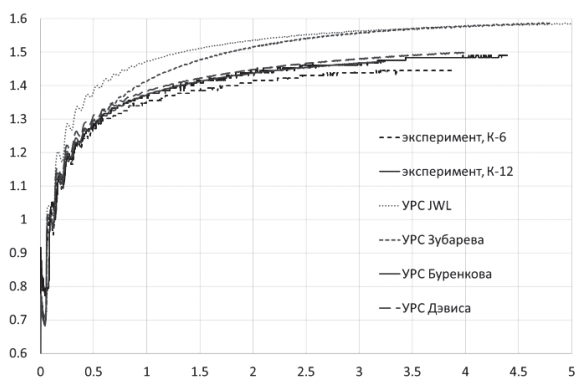
Наилучшее соответствие по всем коллиматорам дает расчет с УРС Буренкова. Расчет с УРС Дэвиса хорошо описывает радиальный разгон, но несколько занижает скорость метания на торце. Расчет с УРС JWЛ заметно завышает скорость во всем диапазоне. В расчете с УРС Зубарева скорость занижается в начале разгона, до $x=1$ см, а после – заметно

завышается. Исходя из этого, для дальнейшей обработки был выбран УРС Буренкова.

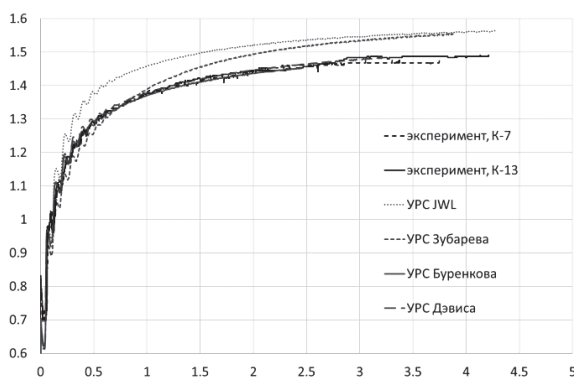
Вторая серия расчетов проводилась с учетом кинетики детонации МК. Для сравнения проводился расчет с УРС Зубарева, поскольку параметры МК для состава ТАТБ подбирались для него. Для УРС Буренкова использовались те же параметры кинетики МК. На рис. 7 приведены зависимости массовой скорости от пройденного расстояния $V(x)$ для различных коллиматоров.

Так же, как в расчетах с контролем детонации, УРС Зубарева в рассматриваемом диапазоне расширения не позволяет описать разгон, давая неплохое согласие в окрестности точки Жуге.

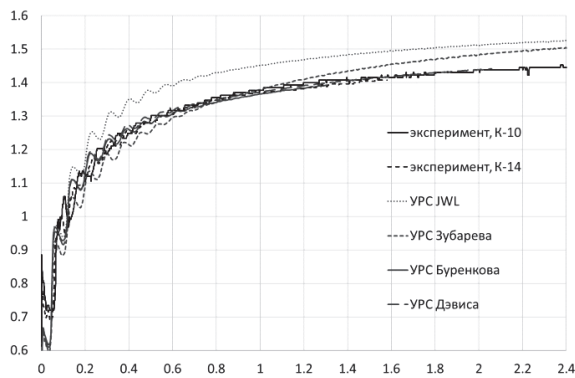
Расчеты с УРС Буренкова с кинетикой хорошо описывают экспериментальные данные, отличие находится в пределах различий в опыте на разных коллиматорах. Так как некоторые параметры (скорость детонации, амплитуда первого пика) чувствительны к кинетике, возможно необходимо уточнение параметров кинетики для лучшего согласия результатов расчетов с экспериментами. Для этого планируется провести серию расчетов с варьированием параметров кинетики МК в методике ЛЭГАК.



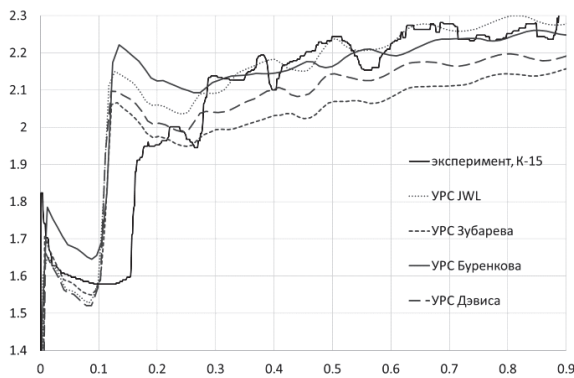
а



б

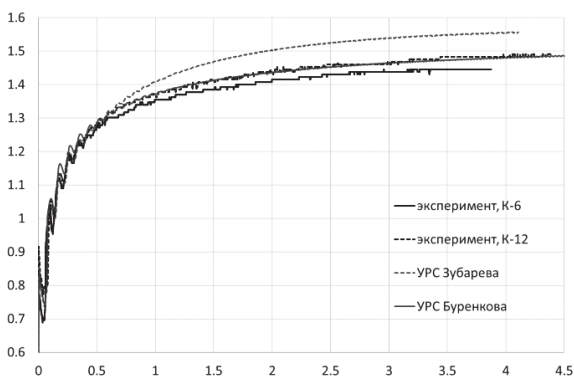


в

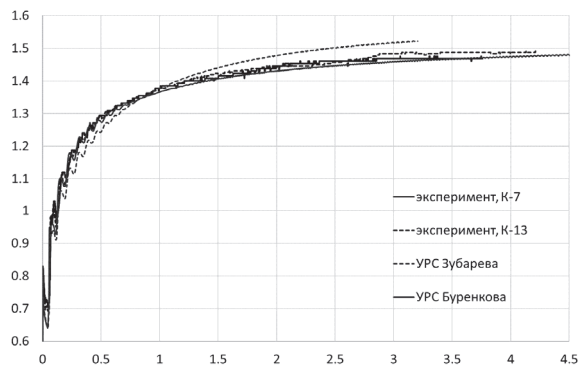


г

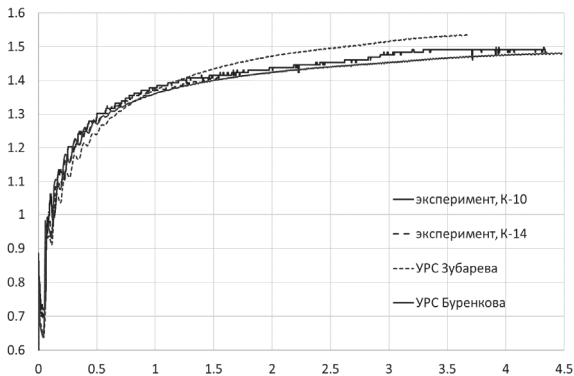
Рис. 6. Зависимости массовой скорости от пройденного расстояния для коллиматоров с учетом «идеальной» детонации: а – К6 и К12 (трубка), б – К7 и К13 (трубка), в – К10 и К14 (трубка), г – К15 (диск)



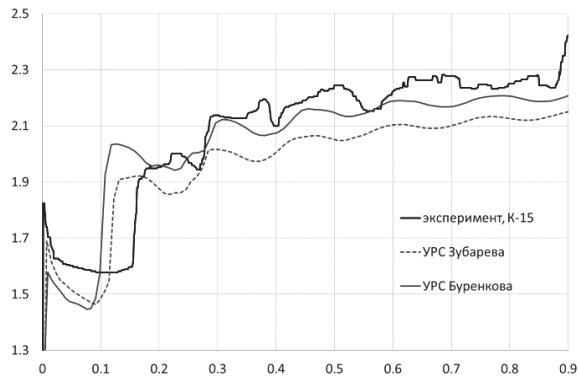
а



б



в



г

Рис. 7. Зависимости массовой скорости от пройденного расстояния для коллиматоров с учетом кинетики детонации МК: а – К6 и К12 (трубка), б – К7 и К13 (трубка), в – К10 и К14 (трубка), г – К15 (диск)

Заключение

В работе представлены результаты калибровки нового уравнения состояния продуктов взрыва для взрывчатого состава на основе ТАТБ, предложенного О. М. Буренковым. Для этого использовались экспериментальные данные по радиальному и торцевому метанию медных трубок диаметром 20 мм.

Проведено численное моделирование экспериментов по методике ЛЭГАК с использованием «идеальной» детонации и кинетики детонации МК.

Выполнено сравнение различных уравнений состояния ПВ, используемых в расчетах ВНИИЭФ. На расчетах, проведенных с учетом «идеальной» детонации, все рассмотренные УРС дают отклонение от опыта в той или иной области. Наиболее точное соответствие с опытом показывает УРС в форме Буренкова. С учетом экспериментальных данных на изэнтропе разгрузки и экспериментальных данных по радиальному и торцевому метанию получены параметры данного УРС.

Расчеты с учетом кинетики детонации МК с использованием УРС в форме Буренкова хорошо описывают экспериментальные данные, отличие находится в пределах различий в опыте на разных коллиматорах.

Показано, что новый УРС в форме О. М. Буренкова с предложенным набором параметров позволяет

описывать экспериментальные данные при больших степенях расширения ПВ (10÷30) при численном моделировании с учетом кинетики детонации МК.

Список литературы

1. Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C. and Whitworth T. L. Compact System for High-Speed Velocimetry using Heterodyne Techniques. Rev. Sci. Instr. 2006. 77. 083108.
2. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Куратов С. Е., Соколов С. С., Шамраев Б. Н., Дмитриева Л. В., «Теоретическое обоснование феноменологической модели ударноволновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ». «Химическая физика», Т. 14. № 2–3. 1995.
3. Бахрах С. М., Володина Н. А., Зайцева М. О., Карпенко И. И., Ковтун А. Д., Комрачков В. А., Маркаров 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.
4. Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф., Шанин А. А. Метод расчета течений неоднородной среды в лагранжево-эйлеровых координатах // ДАН СССР. 1984. В. 4. С. 829–833.

5. Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф. и др. 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. Методики и программы численного решения задач математической физики. 2004. Вып. 4. С. 41–50.
6. Urtiev P. A., Hayes V. Parametris study of dynamic JWL-EOS for detonation products // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27. № 4. С. 126–137.
7. Lee E. L., Tarver C. M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // Phys. Fluids. Vol. 23. № 12. 1980.
8. Зубарев В. Н., Евстигнеев А. А. Уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных ВВ. ФГВ. 1984. Т. 20. № 6. С. 114–126.
9. 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.
10. Davis W. C. Equation of state for detonation products // Tenth International Detonation symposium July 12–16. 1993. P. 369–376.
11. Аминов Ю. А., Никитенко Ю. А. Уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных ВВ // VIII Забабахинские научные чтения: Снежинск, 5–9 сентября, 2005.
12. Аминов Ю. А., Горшков М. М., Заикин В. Т., Коваленко Г. В., Никитенко Ю. Р., Рыкованов Г. Н. Исследование торможения продуктов детонации взрывчатого вещества на основе ТАТБ // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 2. С. 121–124.
13. Chirat R., Baute J. An extensive application of WCA4 equation of state for detonation products // Eighth Symp. (intern.) on Detonation. Albuquerque. New Mexico. 1985. P. 751.
14. Pinegre M., Avelle J., Leroy J. C. et. al. Expansion isentropes of ТАТВ composition released into argon // Eighth Symp. (intern.) on Detonation. Albuquerque. New Mexico. 1985.
15. Володина Н. А., Краюхин С. А. Алгоритм итерационной коррекции времен детонации за счет учета направления движения детонационной волны в методике ЛЭГАК // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Вып. 3. С. 35–47.