

УДК 623.5

ПРОСТОЙ МЕТОД ОЦЕНКИ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗОГЕНЕРИРУЮЩИХ СОСТАВОВ

S. P. Sivapirakasam, G. Jeyabalaganesh, N. Venu Kumar, S. L. Aravind,
G. Aravind

Лаборатория промышленной безопасности, Департамент машиностроения, Национальный институт технологии, Тируччираппалли, Тамилнад, Индия – 620 015, sphivam@nitt.edu

Изучение баллистических свойств энергетических материалов жизненно важно для обеспечения безопасности их транспортировки, перемещения, хранения и использования. Экспериментальная оценка баллистических свойств может оказаться сложным, дорогим и длительным процессом. В настоящей работе предлагается простой численный метод предсказания баллистических свойств горючих энергетических материалов. Для выведения формул использовалась теоретическая оценка и обратная связь уравнений Ренкина — Гюгоню в приближении адиабатического и одномерного распространения волн. Формулы для определения баллистических свойств, таких как давление, температура и скорость частицы, получены с учетом массы реагентов в точке воспламенения. Скорость частиц и волны горения корреляции определяли в зависимости от массы и расстояния от точки воспламенения. Достоверность результатов теоретических расчетов проверена сопоставлением с экспериментальными данными. Расхождение не превышало 2 %. Применение этого простого расчета позволяет без проведения сложных экспериментов оценивать и сравнивать баллистические свойства различных горящих энергетических материалов.

Ключевые слова: баллистические свойства, энергетический материал, дефлаграция, уравнения Ренкина — Гюгоню, корреляции.

DOI 10.15372/FGV20210304

ВВЕДЕНИЕ

Исследование характеристик энергетических материалов достаточно сложный процесс. В известных трехмерных моделях, применяемых для исследования ударных волн и волн горения, используются различные подходы к оценке характеристик детонации или воспламенения и содержатся различные допущения о распространении волн в замкнутых, частично замкнутых и открытых пространствах. Для определения характеристик процесса, включая давление, температуру и скорость, широко использовалась термодинамическая теория Чепмена — Жуге [1–4]. Другой фундаментальной теорией для изучения волновых характеристик являются уравнения Навье — Стокса, в которых учитываются тепловые и вязкостные эффекты среды. Однако для упрощения расчетов параметров волн некоторые авторы применяли уравнения Эйлера, в которых не учитываются

вязкостные и тепловые эффекты.

В работе [5] для численного моделирования распространения ударных волн в ограниченном пространстве использовалось одномерное уравнение Эйлера, затем результаты были преобразованы в трехмерные данные с использованием методов переназначения. В [6, 7] выполнен расчетный анализ детонации взрывчатого вещества ТНТ с использованием программного обеспечения AUTODYN как в замкнутой, так и в частично замкнутой среде. Аналогичным образом в [8] с помощью программы AUTODYN предсказаны характеристики детонации сжиженного нефтяного газа в замкнутом пространстве. В [9] разработаны трехмерные программы для исследования хронологии избыточного давления для ТНТ в частично закрытой камере с использованием уравнений Навье — Стокса, результаты моделирования подтверждены экспериментами. В [10] разработана общая теория сферических ударных волн в открытом космосе. В отличие от других моделей, в ней учитывалось изменение плотности по мере распространения ударной волны, что способствовало распознаванию

© Sivapirakasam S. P., Jeyabalaganesh G., Venu Kumar N., Aravind S. L., Aravind G., 2021.

Industrial Safety Lab, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Tiruchirappalli, Tamil Nadu, India – 620 015.

характеристик детонации во всех трех измерениях.

При синтезе новых энергетических материалов определение волновых свойств, а именно температуры, давления и скорости частицы в заданной точке, имеет важное значение для использования энергетических материалов в приложениях. Поскольку существующие трехмерные модели требуют высокопроизводительного компьютера и длительного времени расчета баллистических характеристик, разработка простой модели для получения сравнительно точных результатов в короткие сроки является насущной необходимостью. Кроме того, можно отметить, что выполнение трехмерного анализа для изучения характеристик воспламенения и распространения волн любого энергетического материала в линейных условиях представляется излишним.

В [11] экспериментально изучали распространение ударной волны в туннелях, а также в военных целях. Образцы тротила поджигали в длинной трубке, детонация сначала генерировала сферическую ударную волну, а затем при распространении по трубе сходилась к одномерным волнам. В [10] проведена оценка характеристик одномерной ударной волны с использованием метода Римана для изоэнтропических условий, а также уравнений Ренкина — Гюгонио в адиабатических условиях. В [12] уравнения Ренкина — Гюгонио использовали для расчета баллистического давления и плотности среды для жидкого тротила. В [13] с использованием уравнений Ренкина — Гюгонио получены данные о динамическом давлении для различных взрывчатых веществ и сопоставлены с экспериментальными.

Горение энергетического материала обычно сопровождается выделением газов независимо от того, горение это или детонация. В основе дефлаграции энергетических материалов лежит волна горения, основанная на реакции тепловыделения. Для сравнения, процессы в детонирующих энергетических материалах основаны на ударной волне. Большинство порохов и пиротехнических составов считались горючими энергетическими материалами. Схема распространения в горючем энергетическом материале аналогична распространению энергетического материала, способного к детонации, с той разницей, что тепло дополнительно выделяется во фронте волны [14]. В теории Ренкина — Гюгонио используются два фундамен-

тальных подхода. Один из них — это скачок уплотнения Ренкина — Гюгонио для распространения ударной волны, а другой — реакция Ренкина — Гюгонио для распространения волны горения на основе тепловой реакции. Хотя во многих исследованиях сообщалось о моделировании характеристик ударных волн в детонирующем энергетическом материале с помощью ударной теории Ренкина — Гюгонио, модели дефлаграции энергетического материала не существует. Исследование баллистических свойств исходя из расстояния от точки воспламенения также представляется важным аспектом. Эти характеристики имеют решающее значение для безопасности транспортировки, погрузки-разгрузки, хранения и переработки энергетических материалов.

В данной работе предложен простой численный метод расчета баллистических свойств, таких как давление, температура и скорость частицы на различных расстояниях от точки воспламенения. В этом методе используется концепция тепловыделения в химической реакции, применяемая в теории реакции Ренкина — Гюгонио, особенно для газогенерирующих составов для подушек безопасности, содержащих NaN_3 в качестве основного топлива с различными окислителями, такими как нитрат калия, нитрат натрия, нитрат стронция, периодат калия и нитрат бария. Проведено сравнение результатов численного анализа с экспериментальными данными.

1. МЕТОДОЛОГИЯ

1.1. Баллистические характеристики в точке воспламенения

Энергия, выделяющаяся в любой реакции горения, определяется соотношением

$$E = \Delta H_{f(\text{products})} - \Delta H_{f(\text{reactants})}, \quad (1)$$

где ΔH_f — энтальпия образования (продуктов и реагентов).

Часть общей энергии E , высвободившейся в реакции, поглощается частицами твердого продукта. Эта часть пропорциональна отношению теплоемкости твердых частиц к теплоемкости всех продуктов:

$$(n_1 m_1 + n_2 m_2) / (n_1 m_1 + n_2 m_2 + n_3 m_3). \quad (2)$$

Здесь n_1 и n_2 — число молей твердых частиц, n_3 — число молей азота, m_1 и m_2 — молярная

теплоемкость твердых частиц, m_3 — молярная теплоемкость азота в стехиометрическом соотношении. Оставшаяся часть энергии (ΔH) использована для повышения температуры газообразных продуктов (ΔT) в соответствии с уравнением

$$\Delta H = mc_p \Delta T, \quad (3)$$

где c_p — теплоемкость при постоянном давлении. При сжигании газогенерирующих составов обычно образуется газообразный азот. Следовательно, давление, создаваемое при горении, можно рассчитать с использованием уравнения идеального газа следующим образом:

$$\frac{p}{\rho} = nRT, \quad (4)$$

где p — давление в волне горения, бар, ρ — плотность в волне горения, кг/м³, R — газовая постоянная, Дж/(моль · К), T — температура в волне горения, К.

Используя теорию реакции Ренкина — Гюгонио, связь между давлением и плотностью ударной волны можно записать в виде

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\frac{p}{\rho} - \frac{p_0}{\rho_0} \right] - \frac{1}{2} [p - p_0] \left[\frac{1}{\rho_0} + \frac{1}{\rho} \right] = Q, \quad (5)$$

где Q — тепло, выделяемое газообразным продуктом на единицу массы, а неизвестные давление и плотность могут быть определены из уравнений (4) и (5) путем записи квадратного уравнения. Согласно теории реакции Ренкина — Гюгонио [14] баланс массы и импульса реакций задается уравнениями

$$\rho_0 \hat{R}_s = \rho(\hat{R}_s - U), \quad (6)$$

$$p - p_0 = \rho_0 \hat{R}_s U. \quad (7)$$

Решив уравнения (6) и (7), можно вычислить скорость частицы U и скорость волны горения \hat{R}_s . Наконец, упрощенная корреляция баллистических свойств, а именно давления, температуры и скорости частицы в точке воспламенения, может быть установлена как функция массы газообразующего состава.

1.2. Баллистические характеристики на разных расстояниях от точки воспламенения

Баллистические свойства на различных расстояниях [14] от точки возгорания можно оценить с помощью соотношений

$$R_s U^{2/3} = \text{const}, \quad (8)$$

$$R_s^{3/2} \hat{R}_s = \text{const}. \quad (9)$$

Баллистические свойства в точке воспламенения предполагаются постоянными между центром образца и точкой расположения датчика, которая находится на расстоянии 30 мм. Эти допущения также используются при расчете и построении кривых R_s-U , $R_s-\hat{R}_s$. Из уравнений (8) и (9) оцениваются скорость частицы U и скорость волны горения \hat{R}_s в определенной точке относительно точки воспламенения. Подставляя значения U и \hat{R}_s в уравнения (6) и (7), можно рассчитать давление и плотность. Кроме того, с помощью уравнения (4) можно рассчитать повышение температуры.

1.3. Экспериментальная проверка баллистических характеристик

Работоспособность разработанной нами теоретической модели была подтверждена путем сравнения с экспериментальными данными. В экспериментах образец газогенерирующего состава для подушки безопасности, состоящий из смеси $\text{NaN}_3/\text{KNO}_3$, помещали в цилиндрическую камеру сгорания (рис. 1) и поджигали нихромовой проволокой. Для записи данных о пиковом давлении использовался датчик с водяным охлаждением. Поскольку настоящее исследование направлено на обоснование теоретической оценки модели, во время экспериментальной проверки были получены только данные о максимальном давлении.

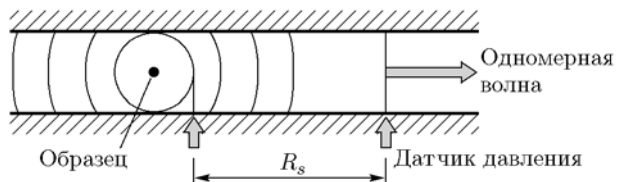


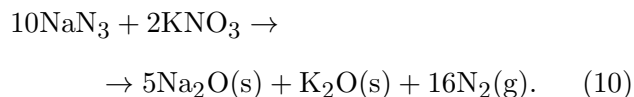
Рис. 1. Схема процесса сгорания

В теоретическом исследовании предполагалось распространение одномерной адиабатической волны дефлаграции в открытом космосе. Диаметр камеры сгорания принят равным $60 \pm R_a$ [мм], где R_a — коэффициент шероховатости поверхности. Предполагалось, что баллистические свойства останутся неизменными на радиусе 30 мм от точки воспламенения, который предположительно считался минимальным расстоянием, на котором сферическая волна может трансформироваться в одномерную в экспериментальной установке.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Баллистические характеристики в точке воспламенения

Газогенерирующий состав $\text{NaN}_3/\text{KNO}_3$ является наиболее широко применяемым в подушках безопасности автомобилей [15]. Стехиометрическая смесь реагирует следующим образом:



Энергия, выделяющаяся при горении стехиометрической смеси массой 2.5 г, по данным расчетов с использованием уравнения (1) составила 4.9 кДж. Расчеты проводились с числом молей $n_1 = 5$, $n_2 = 1$, $n_3 = 16$ и средними молярными теплоемкостями $m_1 = 72.95$ Дж/(моль·К), $m_2 = 83.70$ Дж/(моль·К) и $m_3 = 29.12$ Дж/(моль·К) для $\text{Na}_2\text{O}(\text{s})$, $\text{K}_2\text{O}(\text{s})$ и $\text{N}_2(\text{g})$ соответственно, оцененными в рабочем диапазоне температур [16] на основе стехиометрического уравнения (10).

Оставшееся количество энергии, переданное газовой смеси воздуха и азота, составило 2.5 кДж. Исходя из уравнения (3) установлено, что повышение температуры составило $\Delta T = 1435$ К.

Расчеты выполнялись при среднем значении удельной теплоемкости газообразных продуктов при рабочей температуре $c_p = 1.19$ кДж/(кг·К) и общей массе газообразного азота (1.33 г) и воздуха (0.13 г) в сферическом объеме радиусом 30 мм, равной $m = 1.46$ г. После подстановки значения $Q = 1668$ Дж/г в уравнения (4) и (5) были рассчитаны давление и плотность путем решения квадратного уравнения: 11.1 бар и 4.81 кг/м³ соответственно.

Скорость волны горения \hat{R}_s оценена путем решения уравнений (6) или (7) из рассчитанных значений давления и плотности. Далее была определена скорость частицы в точке воспламенения — $U = 785$ м/с.

В табл. 1 приведены баллистические свойства, рассчитанные по разработанной модели, для различных газообразующих смесей, таких как $\text{NaN}_3/\text{KNO}_3$, $\text{NaN}_3/\text{NaNO}_3$, $\text{NaN}/\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{NaN}_3/\text{KIO}_4$ и $\text{NaN}_3/\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, при различных массах в точке воспламенения. Путем обработки экспериментальных данных получены следующие зависимости:

$$T = am^b + c, \quad (11)$$

$$p = em^f + g, \quad (12)$$

$$U = xm^y + z. \quad (13)$$

В табл. 2 представлены значения констант a , b , c , e , f , g , x , y , z для уравнений (11)–(13). Среди всех составов, приведенных в табл. 1, давление и температура состава $\text{NaN}_3/\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ в точке воспламенения оказались выше из-за высокой скорости выделения энергии в точке воспламенения. Хотя композиция $\text{NaN}_3/\text{NaNO}_3$ характеризуется более высоким энерговыделением, ее давление и температура были меньше по сравнению с композицией $\text{NaN}_3/\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, особенно для образцов большей массы. Это связано с тем, что образование большего количества молей продуктов $\text{Na}_2\text{O}(\text{s})$ в реакции горения состава $\text{NaN}_3/\text{NaNO}_3$ поглощало большую часть общей энергии, что приводило к нехватке энергии, приходящейся на долю газообразного продукта, для повышения давления и температуры.

2.2. Баллистические характеристики на разных расстояниях от точки воспламенения

Для образца $\text{NaN}_3/\text{KNO}_3$ массой 2.5 г расчетные значения скорости частицы и скорости волны горения в точке воспламенения составили $U = 785$ м/с и $\hat{R}_s = 1052$ м/с соответственно. Эти значения считались постоянными до расстояния 30 мм (по радиусу) в цилиндрической камере сгорания.

Скорость частицы на расстоянии 100 мм от точки воспламенения по данным расчетов с использованием уравнения (8) равна 220.1 м/с. В табл. 3 приведены скорость частицы и соответствующие корреляции для образцов различной массы на расстояниях 100, 200, 300, 400 и

Таблица 1

Баллистические характеристики в точке воспламенения

$10\text{NaN}_3 + 2\text{KNO}_3 \rightarrow 5\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + 16\text{N}_2$						
Состав	Масса образца, г	Выделяющаяся энергия, кДж	Энергия, поглощаемая азотом и воздухом, кДж	Температура, К	Давление, бар	Скорость частицы, м/с
NaN ₃ /KNO ₃	1.5	2.9	1.5	1 653	10.3	749
	2	3.9	2	1 705	10.8	771
	2.5	4.9	2.5	1 738	11.1	785
	5	9.8	5	1 809	11.8	814
	10	19.6	10	1 848	12.2	829
	15	29.4	14.9	1 861	12.3	834
$10\text{NaN}_3 + 2\text{NaNO}_3 \rightarrow 6\text{Na}_2\text{O} + 16\text{N}_2$						
NaN ₃ /NaNO ₃	1.5	3.3	1.7	1 779	11.5	802
	2	4.3	2.3	1 834	12.1	824
	2.5	5.4	2.8	1 869	12.4	837
	5	10.9	5.6	1 944	13.1	866
	10	21.7	11.3	1 985	13.5	881
	15	32.6	16.9	1 999	13.7	886
$10\text{NaN}_3 + \text{Sr}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow 5\text{Na}_2\text{O} + \text{SrO} + 16\text{N}_2$						
NaN ₃ /Sr(NO ₃) ₂	1.5	3.3	1.6	1 789	11.6	806
	2	4.4	2.2	1 847	12.2	829
	2.5	5.5	2.7	1 884	12.5	843
	5	11.1	5.4	1 964	13.3	874
	10	22.1	10.8	2 008	13.7	890
	15	33.15	16.2	2 022	13.9	895
$10\text{NaN}_3 + 1.25\text{KIO}_4 \rightarrow 5\text{Na}_2\text{O} + 1.25\text{KI} + 15\text{N}_2$						
NaN ₃ /KIO ₄	1.5	2.7	1.2	1 544	8.3	654
	2	3.6	1.6	1 599	8.8	679
	2.5	4.5	2	1 635	9.1	695
	5	8.9	4	1 712	9.8	727
	10	17.8	8	1 754	10.2	745
	15	26.7	12	1 769	10.4	751
$10\text{NaN}_3 + \text{Ba}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow 5\text{Na}_2\text{O} + \text{BaO} + 16\text{N}_2$						
NaN ₃ /BaNO ₃	1.5	3.1	1.5	1 767	11.4	796
	2	4.1	2	1 827	12	821
	2.5	5.2	2.5	1 866	12.4	836
	5	10.3	5.1	1 949	13.2	868
	10	20.7	10.1	1 995	13.6	885
	15	31.1	15.2	2 010	13.8	891

Таблица 2
Константы $a, b, c, e, f, g, x, y, z$, используемые в уравнениях (11)–(13)

Состав	a	b	c	e	f	g	x	y	z
$\text{NaN}_3/\text{KNO}_3$	-343.5	-0.85	1896	-3.32	-0.83	12.67	-140.9	-0.91	846.1
$\text{NaN}_3/\text{NaNO}_3$	-363.1	-0.85	2036	-3.53	-0.84	14.03	-138.9	-0.90	898.4
$\text{NaN}_3/\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	-385.5	-0.84	2062	-3.74	-0.81	14.3	-147.6	-0.89	908.5
$\text{NaN}_3/\text{KIO}_4$	-371.4	-0.83	1808	-3.35	-0.83	10.71	-159.8	-0.90	765.0
$\text{NaN}_3/\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	-401.8	-0.84	2052	-3.92	-0.88	14.15	-156.5	-0.90	904.6

500 мм от точки воспламенения, в табл. 4 — скорость волны горения и ее корреляции для образцов различной массы на расстояниях 100, 200, 300, 400 и 500 мм от точки воспламенения, рассчитанные с помощью разработанной теоретической модели для различных газогенерирующих составов. Исходя из значений скорости частицы и скорости волны горения с использованием уравнений (6)–(8) было рассчитано давление на расстоянии 100 мм от точки воспламенения, оно составило 1.81 бар.

2.3. Проверка экспериментальных данных теоретической формулой

Образец состава $\text{NaN}_3/\text{KNO}_3$ массой 2.5 г сжигали в цилиндрической камере сгорания. Выполнено два эксперимента. Давление измеряли на расстоянии 100 мм от точки воспламенения. Результаты представлены на рис. 2.

В первом опыте давление оказалось равным 1.8 бар, во втором — 1.78 бар, теоретическое значение 1.81 бар, т. е. отклонение составило 0.6 и 1.7 % соответственно. Теоретическое значение давления рассчитывалось исходя из величины скорости R_g на расстоянии 70 мм от точки инициирования с учетом нашего предположения о том, что баллистические свойства на расстоянии 30 мм остаются постоянными. Из уравнения сохранения импульса (7) следует, что давление прямо пропорционально произведению скорости частицы и скорости волны горения. Кроме того, из уравнений (8) и (9) понятно, что скорость частицы и скорость волны горения обратно пропорциональны расстоянию в степени $3/2$. Это подтвердило, что давление падает с расстоянием в степени $3/2$, что стало причиной его резкого падения по мере удаления от точки воспламенения. В [5] при численном моделировании детонации сжиженного нефтяного газа в замкнутой среде наблюдали

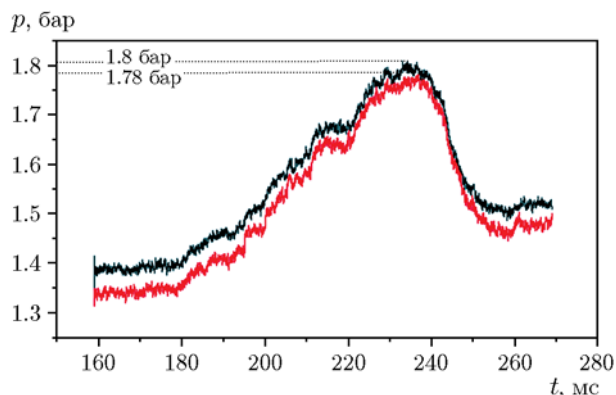


Рис. 2. Зависимость давления от времени

аналогичную тенденцию изменения давления.

Рассчитанное значение давления отклонялось от экспериментальных результатов, как указано выше, менее чем на 2 % на расстоянии 100 мм от точки воспламенения. Это небольшое отклонение может быть связано с потерями тепла на стенки камеры во время эксперимента. Результаты экспериментов (см. рис. 2) показывают, что продолжительность горения составляет миллисекунды, этого времени недостаточно для передачи тепла в окружающую среду. Это подтверждает наше предположение об адиабатических условиях при расчете баллистических свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье показана методология последовательного вывода формулы для прогнозирования баллистических свойств, таких как давление, температура, скорость частицы, в точке воспламенения для любых дефлагрирующих энергетических материалов. Были проверены возможности модели для типичных газогенерирующих составов типа $\text{NaN}_3/\text{KNO}_3$, $\text{NaN}_3/\text{NaNO}_3$, $\text{NaN}_3/\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, NaN/KIO_4 и

Таблица 3

Скорость частицы и ее корреляции на разных расстояниях

Состав	Расстояние R_s , мм	Скорость частицы, м/с, при массе, г					
		1.5	2	2.5	5	10	15
NaN ₃ /KNO ₃	100	210.0	216.2	220.1	228.3	232.6	234.0
	200	55.5	57.1	58.2	60.3	61.4	61.8
	300	27.7	28.5	29.1	30.1	30.7	30.9
	400	17.3	17.8	18.1	18.8	19.1	19.3
	500	12.1	12.4	12.7	13.1	13.4	13.5
	$U = 10^4[5.42\log m + 112.6]R_s^{-1.87}$						
NaN ₃ /NaNO ₃	100	224.9	231.1	234.9	243.0	247.3	248.7
	200	59.4	61.1	62.1	64.2	65.3	65.7
	300	29.7	30.5	31.0	32.1	32.6	32.8
	400	18.5	19.0	19.3	20.0	20.3	20.5
	500	12.9	13.3	13.5	14.0	14.2	14.3
	$U = 10^4[5.38\log m + 120.7]R_s^{-1.87}$						
NaN ₃ /Sr(NO ₃) ₂	100	226.0	232.5	236.6	245.1	249.6	251.2
	200	59.7	61.4	62.5	64.8	66.0	66.4
	300	29.8	30.7	31.2	32.4	33.0	33.2
	400	18.6	19.1	19.5	20.2	20.5	20.7
	500	13.0	13.4	13.6	14.1	14.3	14.4
	$U = 10^4[5.68\log m + 121]R_s^{-1.87}$						
NaN ₃ /KIO ₄	100	183.5	190.5	194.9	204.1	209	210.6
	200	48.5	50.3	51.5	53.9	55.2	55.7
	300	24.2	25.1	25.7	26.9	27.6	27.8
	400	15.1	15.7	16.0	16.8	17.2	17.3
	500	10.5	10.9	11.2	11.7	12	12.1
	$U = 10^4[6.14\log m + 98.4]R_s^{-1.87}$						
NaN ₃ /BaNO ₃	100	223.4	230.3	234.6	243.6	248.3	249.9
	200	59.0	60.8	62.0	64.4	65.6	66.0
	300	29.5	30.4	31.0	32.2	32.8	33.0
	400	18.4	18.9	19.3	20.0	20.4	20.6
	500	12.8	13.2	13.5	14.0	14.3	14.4
	$U = 10^4[5.98\log m + 119.8]R_s^{-1.87}$						

NaN₃/BaNO₃. Предсказанные с использованием разработанной модели значения давления и плотности в точке воспламенения оказались больше начальных условий, т. е. $p > p_0$ и $\rho > \rho_0$. Это свидетельствует о том, что сжа-

тие происходило в среде за волнами горения. Выведена простая формула для прогнозирования баллистических свойств в точке воспламенения в зависимости от массы. Кроме того, при прогнозировании характеристик волны го-

Таблица 4

Скорость волны горения и ее корреляции на разных расстояниях

Состав	Расстояние R_s , мм	Скорость волны горения, м/с					
		1.5	2	2.5	5	10	15
NaN ₃ /KNO ₃	100	284.3	291.0	295.3	304.1	308.8	310.4
	200	75.1	76.9	78.0	80.4	81.6	82.0
	300	37.5	38.4	39.0	40.2	40.8	41.0
	400	23.4	24.0	24.3	25.0	25.4	25.5
	500	16.3	16.7	17.0	17.5	17.8	17.8
	$U = 10^4[5.9\log m + 152.4]R_s^{-1.87}$						
NaN ₃ /NaNO ₃	100	300.4	307.2	311.4	320.3	325.0	326.6
	200	79.4	81.2	82.3	84.6	85.9	86.3
	300	39.7	40.6	41.1	42.3	42.9	43.1
	400	24.7	25.3	25.6	26.4	26.7	26.9
	500	17.3	17.7	17.9	18.4	18.7	18.8
	$U = 10^4[5.9\log m + 161]R_s^{-1.87}$						
NaN ₃ /Sr(NO ₃) ₂	100	301.7	308.8	313.3	322.7	327.6	329.3
	200	79.7	81.6	82.8	85.3	86.6	87.0
	300	39.8	40.8	41.4	42.6	43.2	43.5
	400	24.8	25.4	25.8	26.6	27.0	27.1
	500	17.3	17.7	18.0	18.5	18.8	18.9
	$U = 10^4[6.24\log m + 161.8]R_s^{-1.87}$						
NaN ₃ /KIO ₄	100	256	263.4	268.1	278	283.2	285
	200	67.7	69.6	70.8	73.4	74.8	75.3
	300	33.8	34.8	35.4	36.7	37.4	37.6
	400	21.1	21.7	22.1	22.9	23.3	23.5
	500	14.7	15.1	15.4	16	16.3	16.4
	$U = 10^4[6.55\log m + 137.1]R_s^{-1.87}$						
NaN ₃ /BaNO ₃	100	298.9	306.3	311.0	320.9	326.2	327.9
	200	79.0	80.9	82.2	84.8	86.2	86.7
	300	39.5	40.4	41.1	42.4	43.1	43.3
	400	24.6	25.2	25.6	26.4	26.8	27.0
	500	17.2	17.6	17.9	18.4	18.7	18.8
	$U = 10^4[6.57\log m + 160.1]R_s^{-1.87}$						

рения газогенерирующего состава на различных расстояниях было замечено, что для отдельных компонентов требовалась другая формула. Полученные формулы для баллистических свойств со значением $R^2 = 0.99$ оказа-

лись более целесообразными и понятными, чем экспериментальный метод оценок. Поскольку отклонение рассчитанного значения давления от экспериментального составляет менее 2 %, предложенный метод может быть использован

для определения баллистических свойств любого горящего энергетического материала. Эта методология обеспечивает точные оценки, когда размер частиц одинаков по всему составу, однако ограничивается условиями, при которых изменение плотности, влажность и эффекты старения незначительны.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Duff R. E., Houston E.** Measurement of the Chapman — Jouguet pressure and reaction zone length in a detonating high explosive // *J. Chem. Phys.* — 1955. — V. 23, N 7. — P. 1268–1273. — <https://doi.org/10.1063/1.1742255>.
2. **Chue R. S., Clarke J. F., Lee J. H.** Chapman — Jouguet deflagrations // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A: Math. Phys. Sci.* — 1993. — V. 441, N 1913. — P. 607–623. — <https://doi.org/10.1098/rspa.1993.0082>.
3. **Levin V. A., Skopina G. A.** Detonation wave propagation in rotational gas flows // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* — 2004. — V. 45, N 4. — P. 457–460. — <https://doi.org/10.1023/B:JAMT.0000030320.77965.c1>.
4. **Saif M., Wang W., Pekalski A., Levin M., Radulescu M. I.** Chapman — Jouguet deflagrations and their transition to detonation // *Proc. Combust. Inst.* — 2017. — V. 36, N 2. — P. 2771–2779. — <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.122>.
5. **Benselama A. M., Mame J. P., Monnoyer F.** A 1D–3D mixed method for the numerical simulation of blast waves in confined geometries // *J. Comput. Phys.* — 2009. — V. 228, N 18. — P. 6796–6810. — <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2009.06.010>.
6. **Feldgun V. R., Karinski Y. S., Yankelevsky D. Z.** The effect of an explosion in a tunnel on a neighboring buried structure // *Tunnelling and Underground Space Technol.* — 2014. — V. 44 — P. 42–55. — <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.07.006>.
7. **Feldgun V. R., Karinski Y. S., Yankelevsky D. Z.** Some characteristics of an interior explosion within a room without venting // *Structur. Eng. Mech.* — 2011. — V. 38, N 5. — P. 633. — <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2011.38.5.633>.
8. **Costin N. S.** Numerical simulation of detonation of an explosive atmosphere of liquefied petroleum gas in a confined space // *Defence Technol.* — 2014. — V. 10, N 3. — P. 294–297. — <https://doi.org/10.1016/j.dt.2014.06.008>.
9. **Xu W. Z., Kong X. S., Zheng C., Wu W. G.** Numerical method for predicting the blast wave in partially confined chamber // *Math. Problems in Eng.* — 2018. — <https://doi.org/10.1155/2018/2530239>.
10. **Bethe H. A.** Shock Hydrodynamics and Blast Waves. — US Atomic Energy Commission, Technical Information Division, 1944.
11. **Skjeltorp A.** One-dimensional Blast Wave Propagation. — Norwegian Defence Construction Service OSLO Office of Test and Development, 1968.
12. **Garn W. B.** Determination of the unreacted Hugoniot for liquid TNT // *J. Chem. Phys.* — 1959. — V. 30, N 3. — P. 819–822. — <https://doi.org/10.1063/1.1730051>.
13. **Coleburn N. L., Liddiard T. P., Jr.** Hugoniot equations of state of several unreacted explosives // *J. Chem. Phys.* — 1966. — V. 44, N 5. — P. 1929–1936. — <https://doi.org/10.1063/1.1726963>.
14. **Ramamurthi K.** Explosion and Explosion Safety. — Tata Mcgraw Hill Publ. Co Ltd, 2011.
15. **Aravind S. L., Paramashivan S. S., Mahadevan S.** Thermo-kinetic studies of $\text{NaN}_3/\text{KNO}_3$ air bag gas generant mixture // *J. Therm. Anal. Calorim.* — 2019. — V. 136, N 5. — P. 2183–2193. — <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7838-y>.
16. **Berman R. G., Brown T. H.** Heat capacity of minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}—\text{K}_2\text{O}—\text{CaO}—\text{MgO}—\text{FeO}—\text{Fe}_2\text{O}_3—\text{Al}_2\text{O}_3—\text{SiO}_2—\text{TiO}_2—\text{H}_2\text{O}—\text{CO}_2$: representation, estimation, and high temperature extrapolation // *Contrib. Mineral. Petrol.* — 1986. — V. 94, N 2. — P. 262. — <https://doi.org/10.1007/BF00592944>.

Поступила в редакцию 25.02.2020.

После доработки 15.09.2020.

Принята к публикации 16.10.2020.