

УДК 629.198.624

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСКОЛКОВ ПО МАССЕ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ РАЗРЫВЕ СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКИ

X.-X. Huo¹, W.-B. Li¹, J.-J. Zhu², X.-M. Wang¹, W.-B. Li¹¹ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China, njustlwb@163.com²China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333000, Jiangxi, China

Расширение и разрушение металлического корпуса под действием внутренних взрывных нагрузок может привести к образованию большого количества осколков. Понимание того, как соответствующие параметры металлического корпуса влияют на распределение осколков по массе, необходимо для прогнозирования мощности взрывных устройств в металлическом корпусе и для эффективного проектирования систем защиты. В статье методом анализа размерности определены существенные факторы (механические свойства материала корпуса, геометрия корпуса, характеристики взрывчатого вещества), влияющие на распределение осколков. Проведено несколько тестов с полным сохранением фрагментов. Установлено, что вышеперечисленные основные параметры связаны линейным соотношением с модулем распределения фрактальной модели в двойных логарифмических координатах. Для прогнозирования модуля распределения получена формула, в которой параметры влияния представлены в безразмерном виде. Применимость метода оценки проверена на данных испытаний оболочки с нерегулярной осевой геометрией. Расхождение между результатами расчета и испытаний составило всего 6.9 %. Сравнение данных испытаний с прогнозами двух теорий показало лучшую точность фрактальной модели распределения естественных фрагментов по массе. Эта работа может стать основой для оценки опасности, которую представляют взрывные устройства в металлическом корпусе, и быть полезной при проектировании систем защиты.

Ключевые слова: металлический корпус, внутреннее взрывное нагружение, распределение осколков по массе, теория фракталов, анализ размерности.

DOI 10.15372/FGV2023.9420

EDN JIKUSS

ВВЕДЕНИЕ

Типовой металлический корпус широко применяется в промышленности, военной и других сферах. Безопасности взрывных устройств, состоящих из металлических корпусов и взрывчатых веществ (ВВ), уделяется большое внимание с точки зрения промышленной безопасности, конструкции защиты и урона от применения оружия. При детонации заряда, заключенного в металлический корпус, химическая энергия ВВ преобразуется в кинетическую энергию и тепловое электромагнитное излучение. Под действием внутренней взрывной динамической нагрузки оболочка быстро расширяется и в конце концов разрывается на фрагменты, как показано на рис. 1. Точное предсказание скорости, количества и массы осколков является основой при оценке опасности взрывных устройств [1, 2], а также важно при проектировании эффективных систем защиты.

Процесс образования осколков металлической оболочки под действием взрывной нагрузки носит случайный характер, но количество и масса осколков удовлетворяют математическому закону распределения. Теоретические основы случайного разрушения нагруженных взрывом оболочек и одномерная модель распределения осколков по массе,

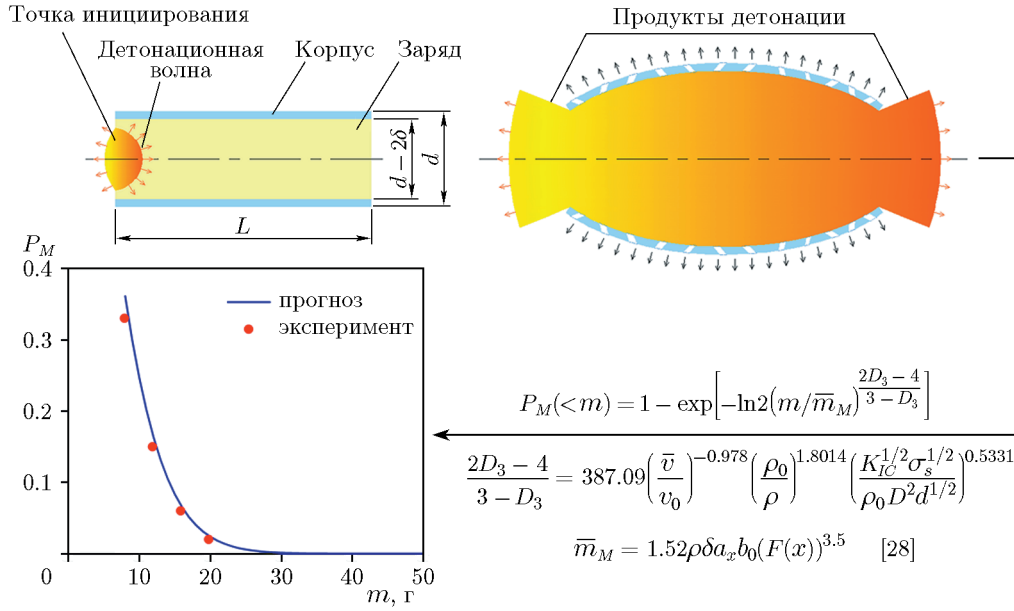


Рис. 1. Динамическое разрушение металлического корпуса при взрывной динамической нагрузке

основанная на принципе случайного образования осколков, была сформулирована в [3]. На основе анализа большого количества результатов испытаний была разработана модель распределения Мотта [4], в которой для описания изменения количества фрагментов с увеличением их массы использовались статистические законы. Однако модель Мотта не позволяла точно описывать распределение верхних и нижних крайних фрагментов. Этот недостаток был устранен в [5]. Модификация модели распределения Мотта в работе [6] позволила ограничить размер фрагментов, что решило проблему, заключающуюся в том, что модель Мотта переоценивала количество фрагментов слишком большого размера. В [7] предложена простая формула (распределение Пеймана), описывающая связь между количеством осколков и их массой, которая эквивалентна одномерной форме модели распределения Мотта. Распределение Мотта представляет собой распределение Вейбулла, контролируемое одним параметром, поэтому его точность описания распределения масс фрагментов ограничена. Двухпараметрическая модель распределения Хелда [8] основана на количестве и совокупной массе фрагментов и превосходит по точности распределение Мотта. Для описания образования и распределения фрагментов по массе был введен стохастический процесс Пуассона [9]. В [10, 11] выдвинуто предположение о том, что двухпараметрическое распределение Вейбулла может более точно описать распределение массы оболочки при трехмерном фрагментировании. Распределение Вейбулла, описывающее массовое распределение фрагментов, выглядит следующим образом:

$$N(m_f) = \frac{M}{\eta \Gamma(1 + 1/\beta)} \exp\left(-\frac{m_f}{\mu}\right)^\beta, \quad (1)$$

где $N(m_f)$ — количество фрагментов, масса которых больше или равна m_f , г; η — коэффициент масштаба; Γ — гамма-функция; M — масса оболочки, г; μ — параметр масштаба, характеристическая масса фрагмента, г; β , $0 < \beta < 1$, — параметр формы, отражающий однородность фрагментов корпуса. Чем ближе к 1 значение β , тем более однородными являются фрагменты. При $\beta = 0.5$ распределение Вейбулла вырождается в распределение Мотта.

Параметр μ в уравнении (1) представляет собой характеристическую массу фрагментов, которая положительно коррелирует со средней массой фрагментов. Были проведены обширные исследования [4, 12–16] влияния свойств материалов на μ с макроскопической, мезоскопической и микроскопической точек зрения в различных масштабах. Более того, была выведена физическая модель для параметра μ .

Из-за случайности, разнообразия и сложности процесса фрагментации оболочки упомянутые выше модели распределения фрагментов по массе позволяют лишь качественно анализировать результаты фрагментации оболочки [17, 18]. Конкретный физический смысл параметров функции распределения остается неясным [19].

Для описания нерегулярных явлений и объектов, которые не могут быть описаны евклидовой геометрией [20], можно использовать теорию фракталов. За почти 60 лет, прошедших с тех пор, как ее предложил Мандельброт, теория фракталов достигла определенных результатов в области физики, химии, математики, биологии и материаловедения и стала мощным математическим методом, позволяющим исследовать природные явления, которые удовлетворяют концепции случайных фракталов [21–24]. Распределение фрагментов, образуемых металлическим корпусом при взрывной динамической нагрузке, удовлетворяет подобию [25, 26], что очень хорошо согласуется с концепцией о статистическом самоподобию случайных фракталов в теории. Фрактальная модель распределения естественных фрагментов по массе, основанная на двухпараметрическом распределении Вейбулла, выглядит следующим образом [27]:

$$P_M(<m) = 1 - \exp \left[- \ln 2(m/\bar{m}_M)^{\frac{2D_3-4}{3-D_3}} \right], \quad (2)$$

где $P_M(<m)$ — вероятность того, что масса фрагмента будет меньше m ; $\bar{m}_M$ — средняя характеристическая масса фрагмента; $\frac{2D_3-4}{3-D_3}$ — модуль распределения; D_3 — объемная фрактальная размерность. Здесь $\bar{m}_M$ и $\frac{2D_3-4}{3-D_3}$ определяют характеристики распределения. Поскольку между объемной D_3 и линейной D_1 фрактальными размерностями, описывающими контур фрагмента, существует количественная связь ($D_2 + 2D_1 = 5$) [27], то уравнение (2) включает в себя характеристики морфологии фрагментов и распределения масс фрагментов, что компенсирует недостатки распределения Мотта, которое не учитывает этих взаимосвязей.

Исследование характеристик разрушения оболочки в различных осевых координатах при взрывном динамическом нагружении позволило получить закон изменения средней характеристической массы осколка вдоль оси оболочки и создать соответствующую теоретическую модель, которая заложила основу для исследования вероятностного распределения массы фрагментов в различных осевых координатах нагруженной взрывом оболочки [28]. Эта работа расширила понимание уравнения (2). Но оно, тем не менее, не описывает полностью фрагментацию. Большинство исследований показало, что такие параметры взрывных устройств, как свойства материала, геометрия, тип ВВ и т. д., влияют на фрагментацию [29–32] и тем самым на массу, форму и скорость осколков. При описании результатов распределения осколков по массе разным параметрам взрывных устройств соответствуют разные характеристики распределения. Необходимо провести углубленное исследование влияния различных параметров взрывных устройств (в данной статье не рассматривается влияние объективных факторов, таких как атмосферное давление) на распределение масс осколков. Данная работа способствует пониманию физического смысла каждого параметра в уравнении (2) и пригодности уравнения (2) для прогноза распределения масс фрагментов. Кроме того, рассмотрение свойства материалов и ВВ в этой работе способствует решению проблемы неточного описания массового

распределения осколков традиционными моделями при использовании новых материалов и новых ВВ. На практике точное предсказание массового распределения осколков является весьма необходимым.

В настоящей работе на основе анализа размерности определены существенные факторы, влияющие на результаты фрагментации металлической оболочки. В ходе нескольких испытаний с полным сохранением фрагментов проанализировано влияние материала и конструкции оболочки, а также характеристик ВВ на массовое распределение фрагментов. На основе результатов испытаний был определен модуль распределения в уравнении (2), а параметры, оказывающие влияние на распределение, рассматривались в безразмерном виде. Наконец, результаты испытаний оболочки с нерегулярной осевой геометрией были использованы для проверки применимости безразмерной модели и точности фрактальной модели массового распределения естественных осколков. Данное исследование предоставит теоретическую базу для прогнозирования мощности взрывных устройств с металлическим корпусом и для проектирования систем защиты от взрывного воздействия.

1. АНАЛИЗ РАЗМЕРНОСТИ

Факторы, влияющие на фрагментацию оболочки при взрывной нагрузке, можно классифицировать в следующем порядке: геометрия, физика и граница.

Геометрия. Конструкция металлической оболочки обладает определенной универсальностью. Независимыми геометрическими размерами являются длина оболочки L , толщина стенки δ и диаметр заряда d (см. рис. 1).

Физика. Механические свойства для оценки влияния состава материала, метода термообработки и других факторов [30, 33–35] на поведение оболочки при фрагментации исчерпывающе представлены ударной вязкостью A_k или вязкостью разрушения K_{IC} , прочностью (предел текучести σ_s , предел прочности σ_b), площадью поперечного сечения Ψ , плотностью материала ρ_m .

Для ВВ список свойств обычно включает в себя теплоту, температуру, скорость и давление детонации, а также плотность наполнения оболочки, среди которых только два параметра являются независимыми. В этой статье были выбраны обычно используемые параметры, а именно скорость детонации ВВ D и плотность наполнения ρ_0 .

Граница. Как правило, поведение оболочки при фрагментации под действием взрывной динамической нагрузки не учитывает существования границ и окружающей среды. Однако из-за наличия воздуха после детонации ВВ на обоих концах оболочки возникает волна разрежения, которая влияет на процесс фрагментации. Ее влияние связано с геометрическими факторами, такими как отношение длины к диаметру корпуса [2]. Подводя итог, перечислим параметры, влияющие на фрагментацию оболочки: L , δ , d , K_{IC} , σ_s , ρ_m , D , ρ_0 .

Связь между модулем распределения и указанными выше параметрами выражается следующим образом:

$$\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3} = f(L, \delta, d, K_{IC}, \sigma_s, \rho_m, D, \rho_0). \quad (3)$$

Масса (M), длина (L) и время (T) выбраны в качестве базисных параметров. В табл. 1 перечислены параметры, входящие в уравнение (3). Кроме того, ρ_0 , d и σ_s выбраны в качестве основных величин. Согласно теории размерностей и П-теореме введены следующие безразмерные величины:

$$\Pi_1 = \frac{\delta}{d}, \quad \Pi_2 = \frac{L}{d}, \quad \Pi_3 = \frac{\rho_0}{\rho_m}, \quad \Pi_4 = \frac{\rho_0 D^2}{\sigma_s}, \quad \Pi_5 = \frac{\rho_0 D^2 d^{1/4}}{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}, \quad \Pi = \frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}. \quad (4)$$

Таблица 1

Размерности параметров									
Физическая величина	$\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}$	L	δ	d	K_{IC}	σ_s	ρ_m	D	ρ_0
Размерность	0	L	L	L	$ML^{-1/2}T^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$	ML^{-2}	LT^{-1}	ML^{-2}

Тогда уравнение (3) можно преобразовать в безразмерную форму:

$$\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3} = f\left(\frac{\delta}{d}, \frac{L}{d}, \frac{\rho_0}{\rho}, \frac{\rho_0 D^2}{\sigma_s}, \frac{\rho_0 D^2 d^{1/4}}{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}\right). \quad (5)$$

Поскольку $\Pi_5 = \left(\frac{\rho_0 D^2}{\sigma_s}\right)^{1/2} \left(\frac{\rho_0 D^2 d^{1/2}}{K_{IC}}\right)$ включает в себя член Π_4 , уравнение (5) упрощается:

$$\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3} = f\left(\frac{\delta}{d}, \frac{L}{d}, \frac{\rho_0}{\rho}, \frac{\rho_0 D^2 d^{1/4}}{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}\right). \quad (6)$$

2. ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД

2.1. Образцы

Все образцы состояли из металлических корпусов, ВВ и нейлоновых торцевых крышек. Слабое заземление нейлоновой торцевой крышки не влияет на результаты испытаний [36], она лишь выполняет функцию фиксации и позиционирования детонатора. Применялось одноточечное инициирование в центре одного торца.

2.2. Испытание на полное сохранение фрагментов

Схема испытательной установки показана на рис. 2. Корпус с ВВ закреплялся в изолированной воздушной камере. Для предотвращения попадания воды из взрывного колодца в воздушную камеру наружный слой камеры был покрыт пластиковой пленкой. Размеры воздушной камеры соответствуют требованиям проводимых испытаний. Заполненный ВВ

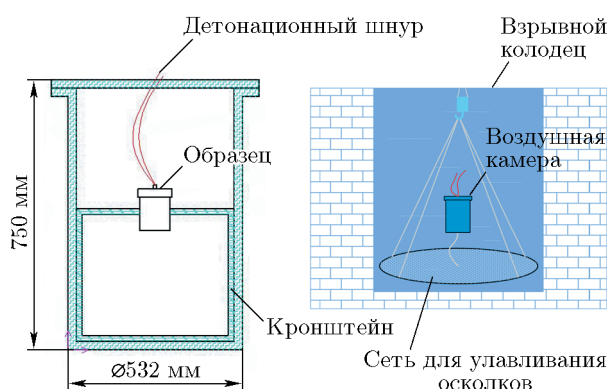


Рис. 2. Схема испытаний

корпус был зафиксирован в центре воздушной камеры с помощью пластикового кронштейна. Герметичная воздушная камера была помещена на стальную раму, поддерживающую сетку для сохранения осколков, и соединена с рамой пеньковой веревкой. Камера и сетка с помощью крана были опущены на глубину 4 м во взрывной колодец. Глубина колодца составляла 8 м. Колодец заполнялся водой. Во время испытания воздушный насос нагнетал в воду давление, и из-за сопротивления воды фрагменты тормозились, проходя небольшое расстояние.

2.3. Схемы испытаний

Свойства материала корпуса. Состав, микроструктура и размер зерна материала влияют на его механические свойства, что приводит к различиям в поведении оболочки при фрагментации. Различные микроструктуры материалов и размеры зерен получают путем их различной термической обработки. В качестве испытуемых материалов выбраны сталь 50SiMnVB и сталь 40CrMnSiB в трех состояниях отпуска, а также сталь 82 в двух состояниях термической обработки. Корпуса из стали 50SiMnVB были закалены при 900 °C, а затем отпущены при 450, 550 и 650 °C. Корпуса из стали 40CrMnSiB были закалены при 860 °C, а затем отпущены при 350, 500 и 600 °C. Корпуса из стали 82 были подвергнуты нормализации, закалке и отпуску. Механические параметры материалов после

Таблица 2

Схемы испытаний для исследования влияния механических свойств материала на фрагментацию оболочки [31, 34, 37]

Номер	Материал	ρ_m , г/см ³	σ_s , МПа	K_{IC} , МПа · м ^{1/2}	$K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}$, МПа · м ^{1/4}
1	50SiMnVB (450 °C)	7.86	1 421	62	296.82
2	50SiMnVB (550 °C)	7.86	1 047	78	285.77
3	50SiMnVB (650 °C)	7.86	768	97	272.94
4	40CrMnSiB (350 °C)	7.56	1 580	62	315.50
5	40CrMnSiB (500 °C)	7.56	1 080	84	307.94
6	40CrMnSiB (600 °C)	7.56	780	114	299.50
7	Сталь 82 (нормализация)	7.78	1 802	41	271.81
8	Сталь 82 (закалка и отпуск)	7.78	844	109	303.31

Таблица 3

Схемы испытаний по исследованию влияния свойств ВВ на фрагментацию оболочки

Номер	Материал	ВВ	d , мм	σ , мм	L , мм
1	Закаленная и отожженная сталь 45	TNT	20	4.4	80
2		ЖН-14			
3	Сталь 45	TNT			
4		ЖН-14			
5	Сталь D60	TNT			
6		ЖН-14			

Таблица 4

Основные механические параметры материалов [38]

Материал	ρ_m , г/см ³	σ_s , МПа	K_{IC} , МПа · м ^{1/2}	$K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}$, МПа · м ^{1/4}
Закаленная и отожженная сталь 45	7.85	476	88.46	205.20
Сталь 45		395	72.88	169.67
Сталь D60		501	49.09	156.83

термической обработки и испытаний представлены в табл. 2. Для того чтобы на результаты испытаний влияли только механические свойства, размеры и конструкция корпусов были идентичны ($L = 80$ мм, $d = 50$ мм, $\delta = 6$ мм) и, кроме того, использовалось одно и то же ВВ — смесевое ВВ на основе CL-20 с параметрами $\rho_0 = 1.94$ г/см³, $D = 9061$ м/с, $P_{CJ} = 38.3$ ГПа [38].

Свойства ВВ. В качестве материалов образцов выбраны сталь 45, закаленная и отпущенная, и сталь Д60. Размеры каждого корпуса были одинаковыми: внутренний диаметр 20 мм, толщина стенки 4.4 мм и длина 80 мм. Корпуса были заполнены двумя типами ВВ с различными свойствами: тротилом и ЖН-14. Схемы испытаний приведены в табл. 3. Основные механические параметры трех типов стали приведены в табл. 4. Параметры ВВ [38, 39] следующие: TNT — $\rho_0 = 1.45$ г/см³, $D = 6500$ м/с, $P_{CJ} = 14.4$ ГПа; ЖН-14 — $\rho_0 = 1.69$ г/см³, $D = 8300$ м/с, $P_{CJ} = 29.1$ ГПа.

Различные геометрии корпуса. В табл. 5 представлены восемь схем испытаний с корпусом из одного материала (сталь 45) и с тротилом в качестве ВВ. Схемы 1–3 разработаны для исследования подобия геометрически пропорционального разрушения оболочки, схемы 6–8 — для установления связи между различными структурами при фрагментации. Схемы 1, 4, 5 и схемы 2, 5, 6 разработаны для исследования влияния отношения длины к диаметру на фрагментацию оболочки.

Таблица 5

Схемы испытаний для изучения влияния геометрии на фрагментацию оболочки

Схема	d , мм	σ , мм	L , мм	σ/d	L/d
1	15.1	2.65	70	0.176	4.64
2	20.0	3.50	70	0.175	3.50
3	32.2	5.65	70	0.175	2.17
4	15.1	2.65	30	0.175	1.99
5	15.1	2.65	50	0.175	3.31
6	25.3	4.45	100	0.176	3.95
7	20.0	4.45	100	0.223	5.00
8	15.1	4.45	100	0.295	6.62

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

По описанным выше схемам проведено несколько испытаний, каждое из них повторено дважды в одних и тех же условиях. Для улавливания фрагментов использовалась многослойная нейлоновая сетка с размером ячеек 0.1×0.1 мм. Фрагменты замачивали в техническом спирте, чтобы предотвратить их окисление, высушивали, взвешивали на весах с точностью до 0.01 г, а затем классифицировали в соответствии с методом испытания. Рассматривалось среднее значение для каждой группы данных. Поскольку мелкие фрагменты из заполненного водой колодца не могли быть полностью извлечены, по мере проведения испытаний накопление остаточных мелких фрагментов привело к увеличению общей массы и числа фрагментов в последующих опытах. Поэтому для обеспечения согласованности и точности исследования рассматривались только фрагменты массой более 0.1 г.

3.1. Влияние свойств материала оболочки

Данные, полученные в ходе испытаний с сохранением фрагментов, представлены в табл. 6. Степень сохранения всех фрагментов превысила 85 %. Учитывая, что фрагменты оболочек были небольшими, их сохранение можно считать удовлетворительным.

В тестах определялась масса всех фрагментов. В качестве примера на рис. 3 показано распределение масс осколков для корпусов из стали 50SiMnVB, отожженной при 450, 550 и 650 °C, — соответственно $0 \div 6$, $0 \div 7$ и $0 \div 8$ г, а общее количество осколков составляет 4 588, 3 935 и 3 349. По сравнению с максимальным значением общее количество фрагментов при температурах отпуска 550 и 650 °C сократилось на 14.2 и 27 % соответственно. Согласно критериям отбора наименьших эффективных фрагментов в тесте с сохранением осколков, минимально эффективными оказались осколки массой 1 г. При повышении температуры отпуска количество фрагментов массой более 1 г составило 84, 120 и 149 соответственно. По сравнению с минимальным значением общее количество фрагментов при температурах отпуска 550 и 650 °C увеличилось на 42.9 и 77.4 % соответственно.

Проанализировано массовое распределение естественных осколков, образованных оболочками при взрывном динамическом нагружении. На рис. 4 показан результат применения алгоритма Гаусса — Ньютона для подгонки монотонно убывающей кумулятивной

Таблица 6

Данные испытаний (по схемам из табл. 2) по сохранению фрагментов

Номер схемы	Суммарная масса фрагментов, г	Степень сохранения, %	Суммарное количество фрагментов (>0.1 г)
1	712.83	90	1 340
2	696.90	88	1 136
3	690.66	87	1 249
4	599.76	85	1 152
5	610.40	95	1 132
6	646.66	99	1 247
7	625.18	90	987
8	609.24	88	1 136

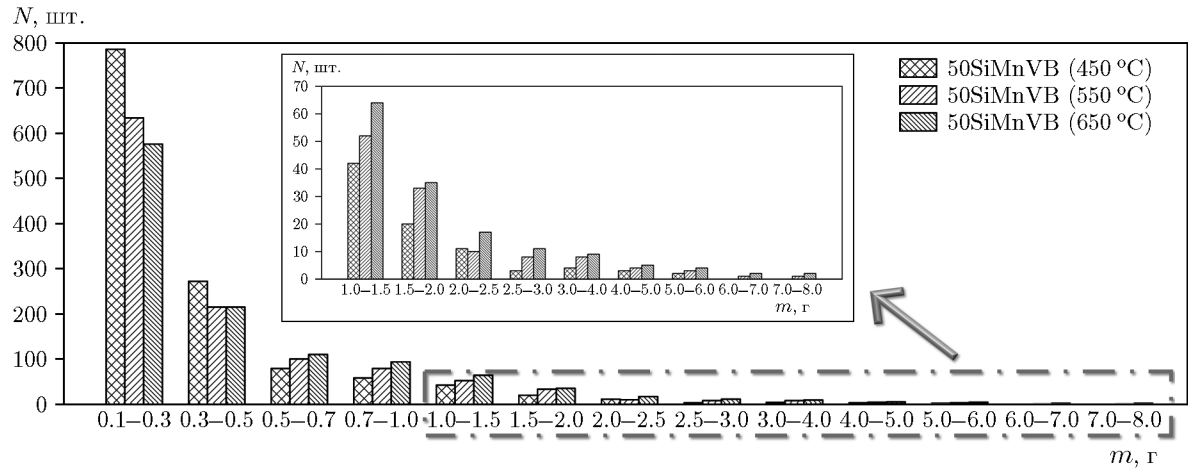


Рис. 3. Распределение фрагментов по массе для 50SiMnVB

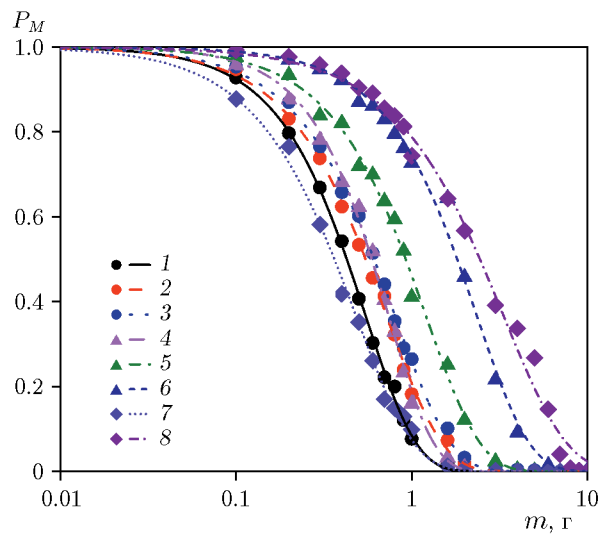


Рис. 4. Влияние свойств материала на распределение фрагментов по массе: точки 1–8 — испытания по схемам из табл. 2, линии — соответствующие интерполяции

Таблица 7

Влияние свойств материала на параметры распределения осколков по массе (схемы испытаний см. в табл. 2)

Схема	$\frac{2D_3-4}{3-D_3}$	m_e , г	$\bar{m}_M$, г
1	1.442	0.65	0.45
2	1.422	0.84	0.59
3	1.401	0.90	0.64
4	1.495	0.89	0.58
5	1.462	1.36	0.93
6	1.443	1.89	1.31
7	1.339	0.46	0.36
8	1.434	2.95	2.06

функции распределения относительной массы осколка $P_M(<m) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{m}{m_e} \right)^{\frac{2D_3-4}{3-D_3}} \right]$ к данным испытаний. В табл. 7 приведены параметры распределения Вейбулла: характеристическая масса фрагмента m_e и модуль распределения $\frac{2D_3-4}{3-D_3}$, а также математическое ожидание, рассчитанное по формуле $E(\xi) = m_e \Gamma \left(\frac{D_3-1}{2D_3-4} \right)$. Математическое ожидание согласуется со значением массы фрагмента, соответствующей степени накопления относительной массы 0.5 на графике рис. 4. Эта масса называется средней характеристической массой фрагмента и обозначается $\bar{m}_M$. Для оболочки из стали 50SiMnVB с ростом температуры отпуска средняя характеристическая масса осколков имеет тенденцию к уве-

личению, а модуль распределения — к уменьшению. Изменения средней характеристической массы фрагментов при температуре отпуска 550 и 650 °C составляют 31.1 и 8.5 % соответственно, а изменение модуля распределения — 1.42 и 1.45 % соответственно. Для оболочки из стали 40CrGnSiB средняя характеристическая масса и модуль распределения фрагментов имеют ту же тенденцию изменения, что и для стали 50SiGnVB. Изменение средней характеристической массы фрагментов при температуре отпуска стали 550 и 650 °C составляет 60.3 и 40.9 % соответственно, а изменение модуля распределения — 2.17 и 1.31 % соответственно. Для оболочки из стали 82 средняя характеристическая масса фрагментов оболочки после закалки и отпуска на 472 % больше, чем у оболочки после нормализующей обработки, а модуль распределения увеличивается на 7.1 %.

После закалки при температуре 860 °C микроструктура материала 40CrMnSiB состояла из закаленного мартенсита и остаточного аустенита. Температура мартенситного фазового перехода стали 40CrMnSiB составляет 362 °C. При температуре отпуска 350 °C трансформируется только аустенит, а окончательная микроструктура представляет собой отпущенный мартенсит. При повышении температуры отпуска до 500 °C мартенсит постепенно распадается, а остаточный аустенит продолжает трансформироваться в процессе отпуска. При повышении температуры отпуска до 600 °C происходит основное превращение из мартенсита в перлит (смешанная микроструктура феррита и крупнозернистого цементита). Из-за высокой прочности и низкой вязкости мартенсита сталь 40CrMnSiB при низкотемпературном отпуске наиболее склонна к хрупкому разрушению при высоких скоростях деформации, а осколки получаются более мелкими. С повышением температуры отпуска постепенно образуется феррит, вязкость которого выше, чем у мартенсита. Сталь 40CrMnSiB при средне- и высокотемпературном отпуске более склонна к пластическому разрушению при высокой скорости деформации, при этом образуются более крупные осколки. Однако с повышением температуры отпуска снижение динамической прочности материала, вызванное термической обработкой, стало очевидным и отчасти компенсировало улучшение динамической пластичности и ударной вязкости. Таким образом, анализ результатов по исследованию влияния свойств оболочки показал, что средняя характеристическая масса фрагментов непрерывно увеличивалась, а модуль распределения непрерывно уменьшался с возрастанием номера схемы испытаний.

Температура мартенситного фазового превращения стали 50SiMnVB после закалки при 900 °C составляет 290 °C. Таким образом, 450 °C соответствует среднетемпературному отпуску, а 550 и 600 °C — высокотемпературному отпуску. В процессе термической обработки микроструктура стали 50SiMnVB претерпела изменения, аналогичным образом изменялась и микроструктура стали 40CrMnSiB. С повышением температуры отпуска мартенсит трансформировался в перлит, и снижение динамической прочности материала, вызванное термической обработкой, становилось всё более очевидным. Аналогичные изменения в микроструктуре привели к схожим изменениям в механических свойствах материала и в конечном итоге — к аналогичным изменениям в результатах фрагментации. Однако из-за различия компонентов стали 40CrMnSiB и стали 50SiMnVB конечные результаты не совпали полностью.

Микроструктура стали 82 после нормализации представляет собой сорбит (двухфазная смешанная структура, состоящая из пластинчатого феррита и цементита), а после закалки и отпуска — отпущенный сорбит (сложная структура, состоящая из равноосного феррита и мелкозернистых карбидов). Микроструктура закаленной и отпущенной стали 82 более мелкая, а ее пластичность и ударная вязкость выше. Поэтому осколки, образующиеся под действием взрывной динамической нагрузки, крупнее, а средняя характеристическая масса осколков больше.

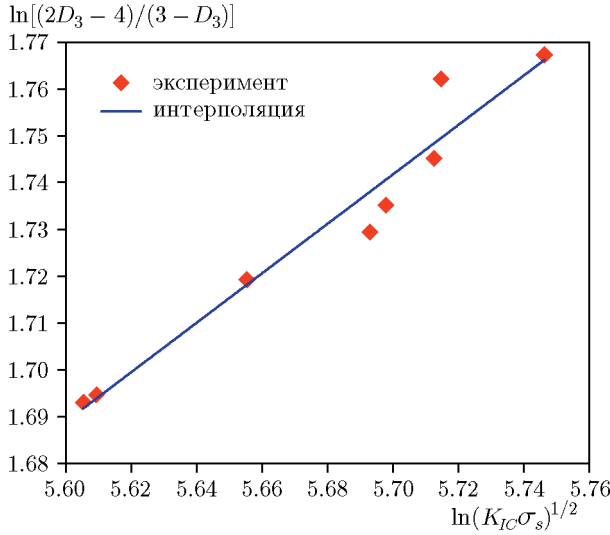


Рис. 5. Соотношение между механическими параметрами и модулем распределения

Согласно данным табл. 2 и 7 параметр $\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}$ увеличивается с ростом параметра $K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}$, который в полном объеме учитывает ударную вязкость и предел текучести материалов. Логарифмы этих параметров $\ln\left(\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}\right)$ и $\ln\left(K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}\right)$ связаны между собой линейной зависимостью с наклоном 0.5331 и коэффициентом линейной корреляции 0.935 (рис. 5). Таким образом, была установлена функциональная связь в уравнении

$$\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3} \propto \left(K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}\right)^{0.5331}. \quad (7)$$

Геометрия оболочки каждой схемы испытаний в табл. 2 одинакова, плотность материала также практически одинакова. Следовательно, δ/d , L/d и ρ_0/ρ_m являются константами. Можно считать, что величина $\frac{\rho_0 D^2 d^{1/4}}{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}$ не связана с параметрами $\frac{L}{d}$, $\frac{\delta}{d}$ и $\frac{\rho_0}{\rho_m}$. На основании уравнений (6) и (7) установлено, что

$$\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3} \propto \left(\frac{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}{\rho_0 D^2 d^{1/4}}\right)^{0.5331}. \quad (8)$$

3.2. Влияние свойств ВВ

На рис. 6 показаны результаты распределения масс фрагментов, полученные в испытаниях по шести схемам из табл. 3. При одинаковой взрывной нагрузке степень фрагментации закаленной и отпущенной стали 45 ниже. Для корпусов с различными механическими свойствами материалов наблюдается тенденция к увеличению степени фрагментации по мере уменьшения параметра $K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}$ при различных взрывных нагрузках. Кроме того, плотность энергии ЖН-14 выше, чем у тротила, поэтому при его использовании оболочка с теми же механическими свойствами будет образовывать более мелкие осколки. Для подгонки монотонно убывающей кумулятивной функции распределения относительной массы фрагмента использовался алгоритм Гаусса — Ньютона: $P_M(<m) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{m}{m_e}\right)^{\frac{2D_3-4}{3-D_3}}\right]$, а параметры распределения масс фрагментов приведены в табл. 8. Структура и материал оболочки одинаковы, но свойства ВВ различны, поэтому $\frac{\rho_0}{\rho_m}$ не связан с $\frac{L}{d}$, $\frac{\delta}{d}$ и $K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}$.

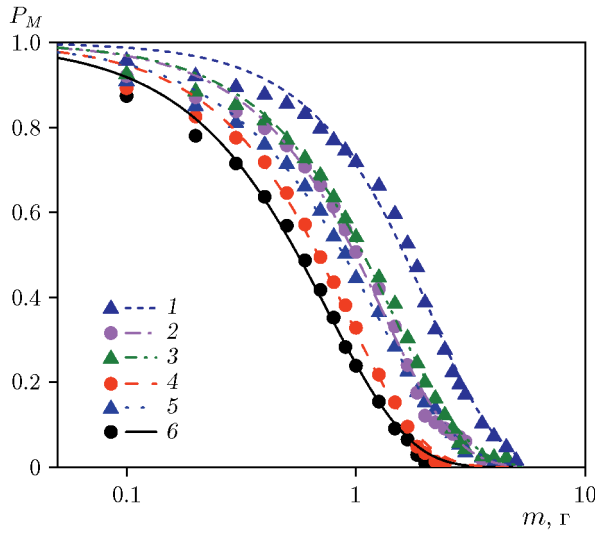


Таблица 8

Влияние свойств ВВ на параметры
распределения осколков по массе
(схемы испытаний см. в табл. 3)

Схема	ρ_0/ρ_m	$\frac{2D_3-4}{3-D_3}$
1	0.184	1.441
2	0.215	1.354
3	0.184	1.325
4	0.215	1.340
5	0.184	1.191
6	0.215	1.223

Рис. 6. Влияние свойств ВВ на распреде-
ление осколков по массе:
точки 1–6 — испытания по схемам из табл. 3,
линии — соответствующие интерполяции

Таблица 9

Влияние геометрии на параметры
распределения фрагментов по массе
(схемы испытаний см. в табл. 5)

Схема	$\frac{2D_3-4}{3-D_3}$	$\bar{m}_M, \text{ г}$
1	1.389	0.27
2	1.361	0.57
3	1.347	2.50
4	1.535	0.25
5	1.443	0.26
6	1.303	1.02
7	1.339	1.06
8	1.354	1.11

Безразмерный элемент Π_5 содержит свойства ВВ (ρ_0, D), поэтому Π_5 необходимо учиты-
тывать при исследовании связи между параметрами $\frac{2D_3-4}{3-D_3}$ и $\frac{\rho_0}{\rho_m}$. В результате подгонки
зависимостей $\ln\left(\frac{2D_3-4}{3-D_3}\right) + 0.5331 \ln(\rho_0 D^2)$ и $\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho_m}\right)$ установлено соотношение

$$\frac{2D_3-4}{3-D_3} \propto \left(\frac{\rho_0}{\rho_m}\right)^{1.8014} \left(\frac{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}{\rho_0 D^2 d^{1/4}}\right)^{0.5331}. \quad (9)$$

3.3. Влияние геометрии корпуса

Испытания с полным сохранением фрагментов проводились по схемам, приведенным
в табл. 5. После опытов подсчитывалось количество сохраненных фрагментов. Безраз-
мерная масса $m/\bar{m}_M$ фрагмента подгонялась к экспериментальным данным посредством
выражения $P_M(<m) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{m}{m_e}\right)^{\frac{2D_3-4}{3-D_3}}\right]$. Результаты распределения масс осколков

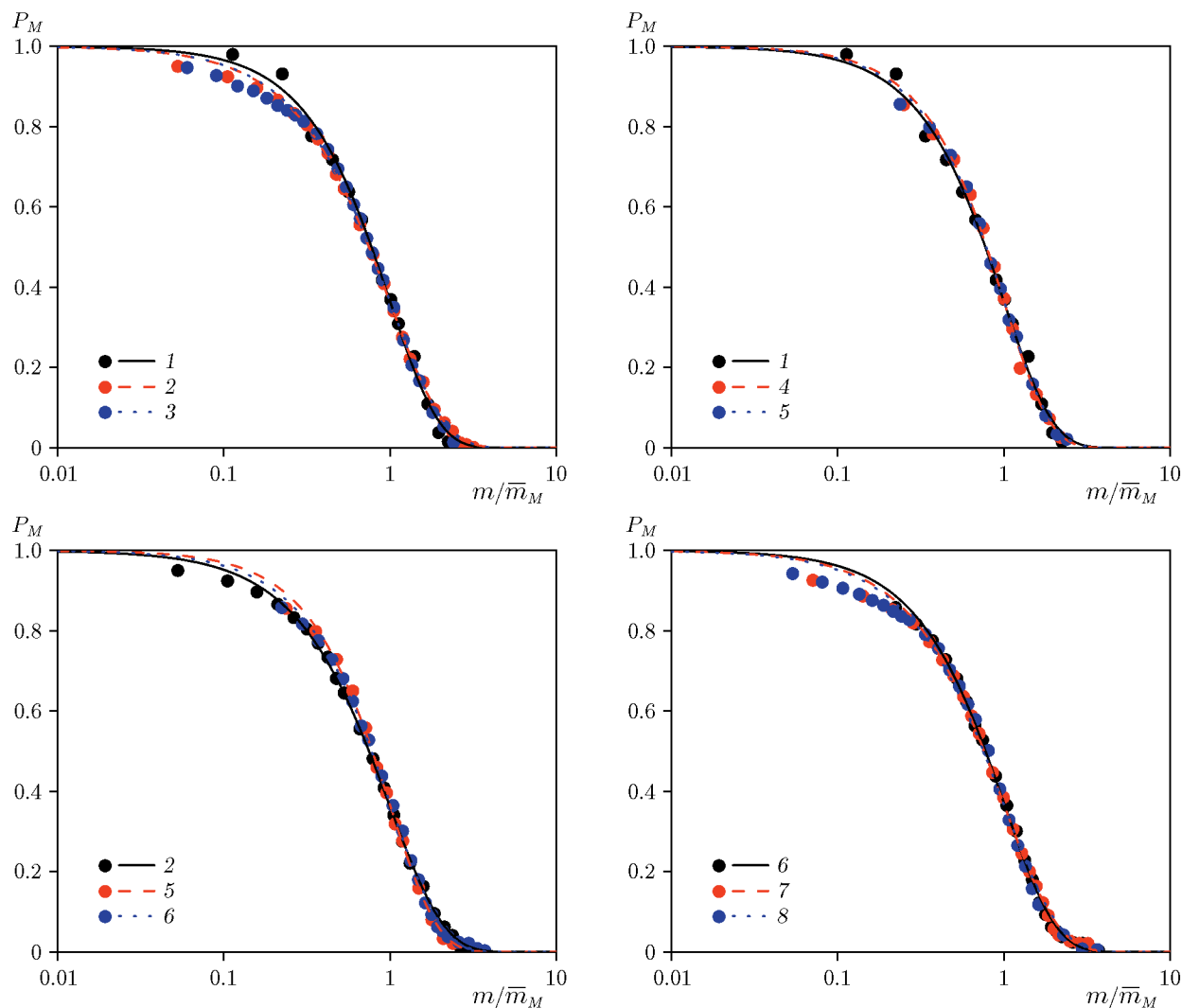


Рис. 7. Влияние геометрии на распределение фрагментов по массе:
 точки 1–8 — испытания по схемам из табл. 5, линии — соответствующие интерполяции

показаны на рис. 7. Экспериментальные данные и результаты теоретических расчетов приведены в табл. 9.

В схемах испытаний 1–3 (см. табл. 5) длина оболочки одинакова, относительная толщина стенки практически одинакова, а радиальный размер оболочки описывается прямо пропорциональной зависимостью. Для оболочки определенной длины, в силу ее структурной симметрии и одинаковых структурных параметров в любом поперечном сечении, в идеальных условиях (т. е. без учета влияния концевых эффектов и распространения взрывной волны) характер фрагментации каждого единичного элемента оболочки должен быть согласованным. Другими словами, процесс фрагментации не имеет ничего общего с разделением оболочки на несколько частей разной длины. В реальном процессе детонации, несмотря на схожесть геометрии, влияние волны разгрузки на обоих концах оболочки неодинаково. Таким образом, несмотря на то что в результатах испытаний по схемам 1–3 имеются небольшие различия в параметре $\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}$, можно полагать, что оболочки с одинаковой длиной и схожей радиальной геометрией демонстрируют схожую фрагментацию.

Для схем испытаний 6–8 (см. табл. 5) отношение длины к диаметру оболочки и отно-

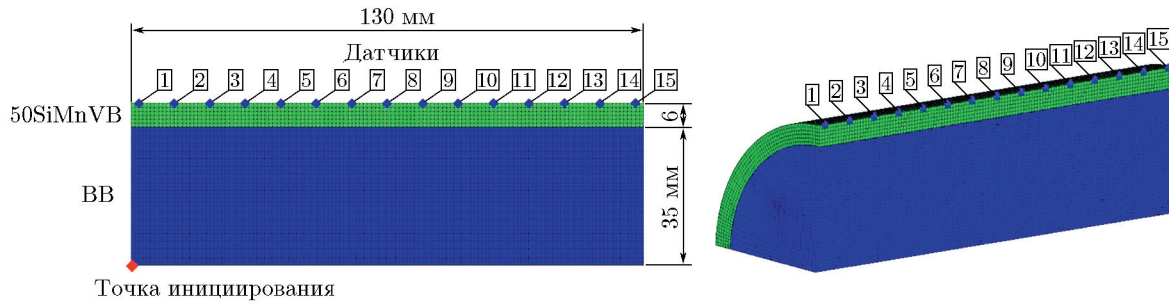


Рис. 8. Численная имитационная модель

сительная толщина стенки увеличились в одинаковой пропорции, поэтому параметр δ/L является константой. Из табл. 9 видно, что в этих схемах средняя характеристическая масса фрагментов практически одинакова.

Для схем испытаний 1, 4, 5 внутренний диаметр и толщина стенки оболочек идентичны, изменяется только отношение длины к диаметру. По мере увеличения отношения длины к диаметру параметр $\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}$ очевидно имеет тенденцию к снижению. Причина заключается в том, что большое отношение длины к диаметру уменьшило влияние осевой волны разрежения, что привело к снижению степени фрагментации оболочки. Для схем испытаний 2, 5, 6 длина, внутренний диаметр и толщина стенки оболочки изменились. Относительная толщина стенки практически постоянная, в то время как отношение длины к диаметру сильно изменилось. Однако из табл. 5 и 9 видно, что параметр $\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}$ не уменьшается с ростом отношения длины к диаметру. Это демонстрирует сложность влияния геометрии на фрагментацию оболочки.

Поэтому необходимо всесторонне рассмотреть влияние отношения длины к диаметру, а также относительной толщины стенки на поведение оболочки при фрагментации. Оба эти параметра влияют не только на форму и массу осколков, но и существенно влияют на скорость осколков [2, 32, 40, 41]. В данном исследовании для характеристики всестороннего влияния отношения длины к диаметру и относительной толщины стенки на фрагментацию оболочки использовался такой параметр, как отношение средней скорости осколков к идеальной скорости оболочки (скорость Герни), которая получается при рассмотрении оболочки как целого.

Закон изменения скорости осколков вдоль осевого направления оболочки при различных условиях можно описать экспоненциальным поправочным коэффициентом $F(x) = [1 - A_* \exp(-B_* x)][1 - C_* \exp(-D_*(1 - x))]$, предложенным в [42], который имеет простой вид и удовлетворительную точность. При одновременном рассмотрении поправочного коэффициента, параметра отношения длины к диаметру и относительной толщины стенки можно установить следующую модель распределения поля скоростей осколков вдоль оси оболочки:

$$v_{0x} = F(x) \sqrt{2E_{G\sigma}} \sqrt{\frac{C/M}{1 + 0.5(C/M)}}, \quad (10)$$

$$F(x) = \left[1 - A_* \exp\left(-B_* \frac{L}{d} \left(\frac{\delta}{d}\right)^{k_1} x\right)\right] \left[1 - C_* \exp\left(-D_* \frac{L}{d} \left(\frac{\delta}{d}\right)^{k_1} (1 - x)\right)\right],$$

где M — масса оболочки; C — масса заряда; x — относительная осевая координата корпуса, $0 \leq x \leq 1$; A_* , B_* , C_* , D_* и k_1 — неопределенные константы.

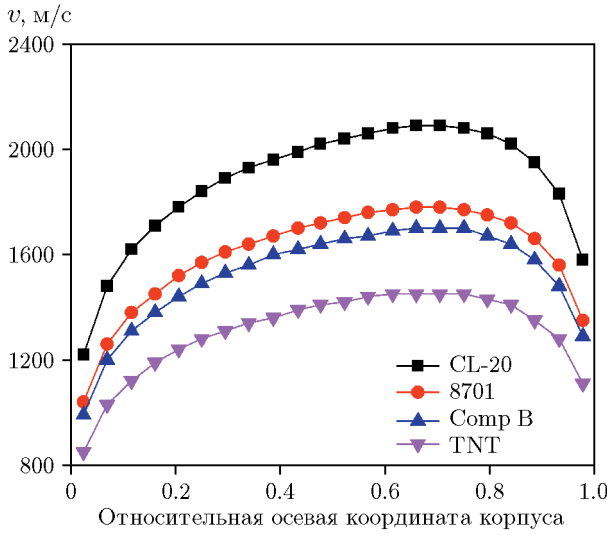


Рис. 9. Скорость осколков при детонации различных ВВ

Для удобства нахождения неопределенных коэффициентов в уравнении (10) в ходе данного исследования проведено численное моделирование с целью получения скорости фрагмента в каждой точке в осевом направлении. Была создана трехмерная конечно-элементная модель, показанная на рис. 8, которая была упрощена до двух областей: ВВ и цилиндрической оболочки. Материал оболочки — сталь 50SiMnVB, основные механические параметры взяты из справочника [43]. Для заряда использовались четыре смесевых ВВ: состав 8701, Comp B, TNT и CL-20, свойства которых взяты из работы [38]. Применялось одноточечное инициирование в центре одного из торцов корпуса. Для оболочки использовался алгоритм Лагранжа, для заряда — алгоритм ALE, размер сетки составлял 1 мм. Процесс расширения продуктов детонации описывался уравнением состояния JWL [44]. Модель Джонсона — Кука широко используется для описания механического отклика металлических материалов, подвергающихся большим деформациям, высоким скоростям деформации и высоким температурам [45]. Уравнение состояния принимает линейную форму, а для моделирования образования естественных фрагментов использовалась модель стохастического случайного разрушения.

Данные по скорости фрагментов, полученные в результате моделирования, показаны на рис. 9. На основе моделирования были найдены неопределенные коэффициенты функции $F(x)$. Коэффициент поправки на скорость, учитывающий отношение длины к диаметру и относительную толщину стенки, выражается следующим образом:

$$F(x) = \left[1 - 0.424 \exp \left(-0.686 \frac{L}{d} \left(\frac{\delta}{d} \right)^{-0.5} \right) x \right] \left[1 - 0.315 \exp \left(-1.666 \frac{L}{d} \left(\frac{\delta}{d} \right)^{-0.5} (1-x) \right) \right]. \quad (11)$$

Скорость осколка в любой осевой координате x оболочки записывается в виде

$$v_x = v_0 F(x) = v_0 \left[1 - 0.424 \exp \left(-0.686 \frac{L}{d} \left(\frac{\delta}{d} \right)^{-0.5} \right) x \right] \times \\ \times \left[1 - 0.315 \exp \left(-1.666 \frac{L}{d} \left(\frac{\delta}{d} \right)^{-0.5} (1-x) \right) \right], \quad (12)$$

где v_0 — скорость Герни [46].

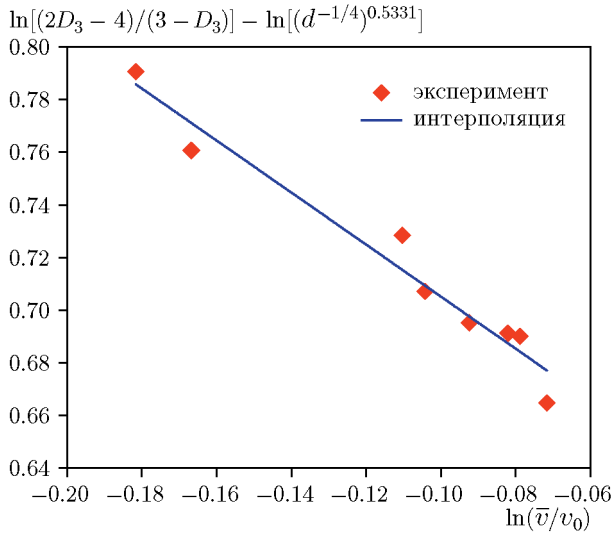


Рис. 10. Соотношение между относительной средней скоростью и модулем распределения

Таким образом, средний коэффициент пропорциональности скорости осколков $\bar{v}/v_0$, образованных оболочкой, которая рассматривается как целое, выражается следующим образом:

$$\bar{F} = \frac{\bar{v}}{v_0} = \int_0^1 F(x) dx. \quad (13)$$

Расчет $\bar{F}$ путем объединения уравнений (12) и (13) дал следующие значения для схем испытаний 1–8 из табл. 5: 1 — 0.927; 2 — 0.904; 3 — 0.848; 4 — 0.836; 5 — 0.898; 6 — 0.914; 7 — 0.924; 8 — 0.934.

Объединение уравнений (6) и (13) дает

$$\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3} = f\left(\frac{\bar{v}}{v_0}, \frac{\rho_0}{\rho_m}, \frac{\rho_0 D^2 d^{1/4}}{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}\right). \quad (14)$$

Комбинируя уравнения (9) и (14), получаем соотношение между $\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}$ и $\bar{F} = \frac{\bar{v}}{v_0}$:

$$\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3} \propto f\left(\frac{\bar{v}}{v_0}\right) \left(\frac{\rho_0}{\rho_m}\right)^{1.8014} \left(\frac{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}{\rho_0 D^2 d^{1/4}}\right)^{0.5331}. \quad (15)$$

Поскольку испытания проводились с использованием одних и тех же ВВ и материалов, изменение $\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}$ с $\frac{\bar{v}}{v_0}$ не зависит от ρ_0 , ρ_m , K_{IC} , σ_s и D . Требуется только проанализировать члены, содержащие геометрические факторы и относительную среднюю скорость, т. е. влияние $d^{-1/4}$ в безразмерной комбинации Π_5 необходимо учитывать при рассмотрении связи между $\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}$ и $\frac{\bar{v}}{v_0}$. После логарифмирования модуля распределения и относительной средней скорости связь между $\ln\left(\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}\right) - \ln\left[\left(d^{-1/4}\right)^{0.5331}\right]$ и $\ln\left(\frac{\bar{v}}{v_0}\right)$ становится линейной (рис. 10). Наклон равен -0.9783 , а коэффициент линейной корреляции 0.978 .

Таким образом, установлено, что

$$\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3} \propto \left(\frac{\bar{v}}{v_0}\right)^{-0.978} \left(\frac{\rho_0}{\rho_m}\right)^{1.8014} \left(\frac{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}{\rho_0 D^2 d^{1/4}}\right)^{0.5331}. \quad (16)$$

Окончательный вид уравнения (16) получен путем подгонки экспериментальных данных:

$$\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3} = 387.09 \left(\frac{\bar{v}}{v_0}\right)^{-0.978} \left(\frac{\rho_0}{\rho_m}\right)^{1.8014} \left(\frac{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}{\rho_0 D^2 d^{1/4}}\right)^{0.5331}. \quad (17)$$

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ

В данном исследовании распределение массы осколков оболочки с нерегулярной осевой геометрией использовалось для проверки точности и универсальности уравнения (17). В качестве материала корпуса применялась сталь 58SiMn, предел текучести — 620 МПа, ударная вязкость — 67.09 МПа · м^{1/2}, плотность — 7.85 г/см³. ВВ представляло собой литой тротил плотностью 1.45 г/см³ со скоростью детонации 6 500 м/с. Корпус был изготовлен путем термической обработки, горячего прессования, естественного охлаждения и механической обработки. Упрощенная структура этого корпуса показана на рис. 11.

Поскольку в верхнем отверстии образца не было ВВ, а дно было толстым, исследовались только осколки, образуемые корпусом от точки инициирования до дна зарядной колонки в координатах на оси изделия. Изменение скорости осколка вдоль осевого направления оболочки выражается следующим образом:

$$v_x = F(x) \sqrt{2E} \sqrt{\frac{C/M}{1 + 0.5(C/M)}},$$

$$F(x) = \left[1 - 0.424 \exp \left(-0.686 \frac{360}{d(x)} \left(\frac{\delta(x)}{d(x)} \right)^{-0.5} \right) x \right] \times$$

$$\times \left[1 - 0.315 \exp \left(-1.666 \frac{360}{d(x)} \left(\frac{\delta(x)}{d(x)} \right)^{-0.5} (1 - x) \right) \right], \quad (18)$$

где x ($0 \leq x \leq 1$) — осевая относительная координата корпуса.

В результате анализа свойств оболочки средний модуль распределения осколков, полученный по уравнению (17), равен 1.525, а средний модуль распределения осколков, полученный в результате испытания, равен 1.42 с расхождением результатов в 6.9 %. Экспериментальный результат удовлетворительно соответствует теоретическому прогнозу. Рассчитанная средняя характеристическая масса фрагментов составляла $\bar{m}_M = 7.01$ г [28], экспериментальная величина $\bar{m}_M = 6.1$ г, расхождение результатов 12.9 %. Относительная средняя скорость фрагментов $\bar{F} = \frac{\bar{v}}{v_0} = 0.7586$.

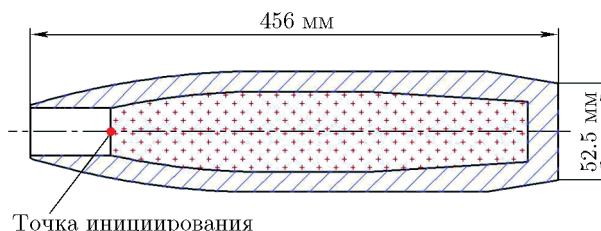


Рис. 11. Схема корпуса с нерегулярной осевой геометрией

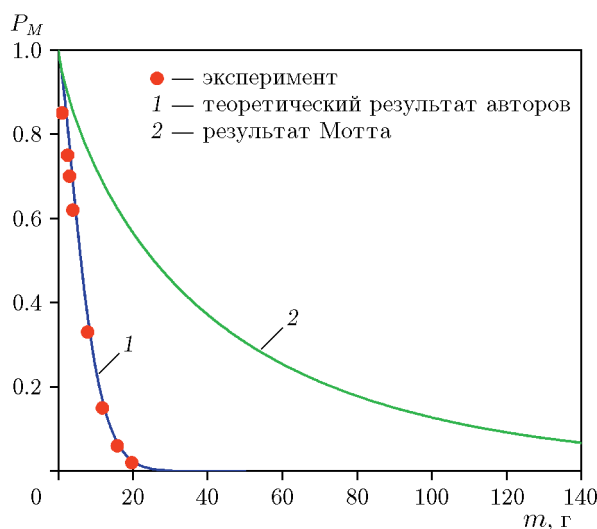


Рис. 12. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов распределения масс фрагментов

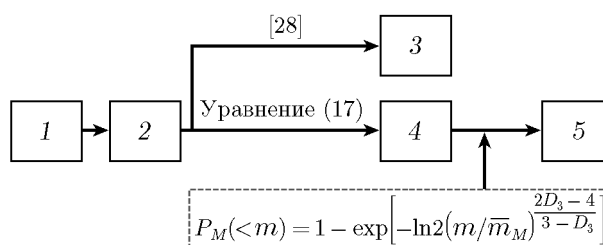


Рис. 13. Процесс прогнозирования распределения фрагментов по массе:

1 — начальные параметры взрывного устройства, 2 — корпус разделен на n частей вдоль оси, 3 — распределение фрагментов по массе, 4 — модуль распределения, 5 — средняя характеристическая масса фрагмента

С использованием специализированного программного обеспечения на основе распределения Мотта (модуль распределения равен $1/2$) рассчитаны массы фрагментов, которые сравнивались с данными экспериментов и теоретическими прогнозами, полученными с помощью уравнения (2) (рис. 12). Необходимо отметить, что распределение Мотта представляет собой не зависимость между массой и количеством фрагментов, а зависимость между качеством фрагмента и относительной кумулятивной вероятностью массы фрагмента, выведенной из зависимости между массой и количеством фрагментов. Результаты, предсказанные распределением Мотта, существенно отличаются от эксперимента. Однако фрактальная модель распределения естественных фрагментов по массе более точно описывает это распределение.

Объединяя результаты из [28] с теорией, представленной в данном исследовании для исходных параметров взрывного устройства с металлическим корпусом (материал корпуса, геометрические размеры, ВВ), можно предсказать его мощность. Процесс прогнозирования представлен на рис. 13.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проводились динамические испытания взрывных устройств с металлическими оболочками. По результатам серии испытаний с полным сохранением осколков про-

анализировано влияние свойств материала, ВВ и геометрии на массовое распределение осколков, образованных в результате взрывной динамической нагрузки. Основные выводы заключаются в следующем.

(1) Для оценки влияния свойств материалов, ВВ и геометрии на распределение по массе естественных фрагментов был использован анализ размерности, в рамках которого определен важный фактор $f\left(\frac{\bar{v}}{v_0}, \frac{\rho_0}{\rho}, \frac{\rho_0 D^2 d^{1/4}}{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}\right)$ влияния на распределение фрагментов.

(2) Испытания показали, что различные методы термообработки, от которых зависят механические свойства материала, влияют на распределение фрагментов по массе. Для сталей 40CrMnSiB и 50SiMnVB после высокотемпературной закалки с повышением температуры отпуска средняя характеристическая масса фрагментов увеличивалась, а модуль распределения уменьшался. Однако, поскольку снижение динамической прочности материала, вызванное термообработкой, частично компенсируется улучшением пластичности и ударной вязкости, диапазон средней характеристической массы и модуля распределения фрагментов постепенно уменьшался. Закаленная и отожженная сталь 82 показала лучшие механические свойства, чем нормализованная сталь 82, а средняя характеристическая масса фрагментов была выше. Фактор $K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}$ описывал влияние механических свойств на распределение фрагментов по массе. Модуль распределения уменьшался с уменьшением $K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}$. Существует линейная связь между $\ln\left(\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}\right)$ и $\ln\left(K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}\right)$.

(3) Результаты испытаний показали, что чем выше плотность энергии заряда, тем меньше фрагменты, образованные корпусом, и выше степень фрагментации. Существует также линейная связь между $\ln\left(\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}\right) + 0.5331 \ln(\rho_0 D^2)$ и $\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho_m}\right)$.

(4) Результаты испытаний оболочек с пропорциональными геометрическими размерами показали, что модули распределения и фрагментация были по существу одинаковыми. Только путем изменения длины корпуса, что позволило увеличить отношение длины к диаметру, было достигнуто уменьшение степени фрагментации корпуса и модуля распределения. Тем не менее, изменение многих размеров привело к неупорядоченному изменению модуля распределения. Для описания влияния множественных геометрических факторов на фрагментацию оболочки использовалась относительная средняя скорость фрагментов, установлена линейная связь между $\ln\left(\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3}\right) - \ln\left[\left(d^{-1/4}\right)^{0.5331}\right]$ и $\ln\left(\frac{\bar{v}}{v_0}\right)$.

(5) В работе предложена прогностическая формула для определения модуля распределения фрагментов по массе: $\frac{2D_3 - 4}{3 - D_3} = 387.09 \left(\frac{\bar{v}}{v_0}\right)^{-0.978} \left(\frac{\rho_0}{\rho_m}\right)^{1.8014} \left(\frac{K_{IC}^{1/2} \sigma_s^{1/2}}{\rho_0 D^2 d^{1/4}}\right)^{0.5331}$.

Применимость метода оценки была проверена с помощью тестовых данных для оболочки с нерегулярной осевой геометрией. Расхождение между результатами расчета и теста составило всего 6.9 %. Кроме того, по сравнению с результатами прогнозирования распределения массы естественных фрагментов по модели Мотта, результаты прогнозирования массы естественного фрагмента по фрактальной модели лучше соответствуют экспериментальным данным.

ВКЛАД АВТОРОВ

Х.-Х. Нюо: написание, осмысление, методология, программное обеспечение; W.-B. Li: обзор, редактирование, теория, надзор; J.-J. Zhu: обзор, компьютерное программирование; X.-M. Wang: надзор; W.-B. Li: анализ, обзор.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке National Natural Science Foundation of China (№ 11972018).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wei D. M., Yang G. T.** Catastrophe fracture of thin-wall pressure tubes // *Appl. Math. Mech.* — 2002. — V. 23, N 2. — P. 146–149. — DOI: 10.1007/BF02436555.
2. **Liu H., Huang G., Guo Z., Feng S.** Fragments velocity distribution and estimating method of thin-walled cylindrical improvised explosive devices with different length-to-diameter ratios // *Thin-Walled Struct.* — 2022. — V. 175. — 109212. — DOI: 10.1016/j.tws.2022.109212.
3. **Lienau C. C.** Random fracture of a brittle solid // *J. Franklin Inst.* — 1936. — V. 221, N 5. — P. 673–686. — DOI: 10.1016/S0016-00323690526-4.
4. **Mott N. F., Linfoot E. H.** A theory of fragmentation // *Fragmentation of Rings and Shells.* — Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. — P. 207–225. — (Shock Wave and High Pressure Phenomena). — DOI: 10.1007/978-3-540-27145-1_9.
5. **Cohen E. A., Jr.** New formulas for predicting the size distribution of warhead fragments // *Math. Model.* — 1981. — V. 2, N 1. — P. 19–32. — DOI: 10.1016/0270-02558190008-7.
6. **Strømsøe E., Ingebrigtsen K. O.** A modification of the Mott formula for prediction of the fragment size distribution // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 1987. — V. 12, N 5. — P. 175–178. — DOI: 10.1002/prep.19870120508.
7. **Walsh B.** The influence of geometry on the natural fragmentation of steel cylinders // Rep. 533. — Department of Supply, Maribyrnong, Australia, 1974.
8. **Held M.** Fragment mass distribution of HE projectiles // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 1990. — V. 15, N 6. — P. 254–260. — DOI: 10.1002/prep.19900150606.
9. **Grady D. E.** Particle size statistics in dynamic fragmentation // *J. Appl. Phys.* — 1990. — V. 68, N 12. — P. 6099–6105. — DOI: 10.1063/1.347188.
10. **Grady D. E.** Fragment size distributions from the dynamic fragmentation of brittle solids // *Int. J. Impact Eng.* — 2008. — V. 35, N 12. — P. 1557–1562. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.042.
11. **Grady D. E.** Length scales and size distributions in dynamic fragmentation // *Int. J. Fracture.* — 2010. — V. 163, N 1-2. — P. 85–99. — DOI: 10.1007/s10704-009-9418-4.
12. **Grady D. E., Hightower M. M.** Natural fragmentation of exploding cylinders // Rep. of Sandia Nat. Lab., Albuquerque, NM (USA), 1990.
13. **Grady D. E.** Fragmentation of rings and shells: the legacy of N. F. Mott. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
14. **Mock J. W., Holt W. H.** Fragmentation behavior of Armco iron and HF-1 steel explosive-filled cylinders // *J. Appl. Phys.* — 1983. — V. 54, N 5. — P. 2344–2351. — DOI: 10.1063/1.332346.
15. **Chhabildas L., Reinhart W., Wilson L. T., Reedal D. R., Grady D. E., Black J. W.** Fragmentation properties of AerMet 100 steel in two material conditions // Proc. of the 19th Int. Symp. on Ballistics, Interlaken, Switzerland, 7–11 May, 2001. — P. 663–669.
16. **Zhao C., Wang S., Guo C., Liu D., Ma F.** Experimental study on fragmentation of explosive loaded steel projectile // *Int. J. Impact Eng.* — 2020. — V. 144. — 103610. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103610.
17. **Zhang H., Ravi-Chandar K.** Dynamic fragmentation of ductile materials // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2009. — V. 42, N 21. — 214010. — DOI: 10.1088/0022-3727/42/21/214010.

18. **Cereceda D., Graham-Brady L., Daphalapurkar N.** Modeling dynamic fragmentation of heterogeneous brittle materials // *Int. J. Impact Eng.* — 2017. — V. 99. — P. 85–101. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.09.012.
19. **Levy S., Molinari J. F., Vicari I., Davison A. C.** Dynamic fragmentation of a ring: Predictable fragment mass distributions // *Phys. Rev. E.* — 2010. — V. 82, N 6. — 066105. — DOI: 10.1103/PhysRevE.82.066105.
20. **Mandelbrot B. B.** *The Fractal Geometry of Nature.* — New York: W. H. Freeman and Co., 1982.
21. **Huang J. Y., Hu S. S., Xu S. L., Luo S. N.** Fractal crushing of granular materials under confined compression at different strain rates // *Int. J. Impact Eng.* — 2017. — V. 106. — P. 259–265. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.04.021.
22. **Radhakrishnan K., Vyas R. J., Murray M., Bryant D., Duan Y., Grant M. B., Chalam K. V., Parsons-Wingter P. A.** Association between vascular density and loss of protective RAS during early NPDR by fractal dimension // *Investigative Ophthalmol. Visual Sci.* — 2017. — V. 58, N 8. — 2508.
23. **Zhou B., Wang J., Wang H.** Three-dimensional sphericity, roundness and fractal dimension of sand particles // *Géotechnique.* — 2018. — V. 68, N 1. — P. 18–30. — DOI: 10.1680/jgeot.16.P.207.
24. **Florindo J. B., Bruno O. M.** Closed contour fractal dimension estimation by the Fourier transform // *Chaos, Solitons Fractals.* — 2011. — V. 44, N 10. — P. 851–861. — DOI: 10.1016/j.chaos.2011.07.008.
25. **Zhang G. R.** A co-relation of dynamic fragmental fractal dimension with the loading // *Chin. J. High Pressure Phys.* — 1997. — V. 11, N 2. — P. 81–84. — DOI: 10.11858/gywlxb.1997.02.001.
26. **Zhang G. R.** Geometrical statistics and fractal method for the fragment distribution of dynamic loading // *Chin. J. High Pressure Phys.* — 1996. — V. 10, N 03. — P. 215–219. — DOI: 10.11858/gywlxb.1996.03.008.
27. **Zhu J., Zheng Y., Yang Y., Li W., Wang X., Li W., Qiao X.** Research on the volume and line fractal dimension of fragments from the dynamic explosion fragmentation of metal shells // *Powder Technol.* — 2018. — V. 331. — P. 129–136. — DOI: 10.1016/j.powtec.2018.01.084.
28. **Zhu J., Zheng Y., Li W., Yang Y., Wang X., Qiao X., Li R.** Axial distribution of fragments from the dynamic explosion fragmentation of metal shells // *Int. J. Impact Eng.* — 2019. — V. 123. — P. 140–146. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.09.020.
29. **Li J., Li W., Wang X., Zou B.** Influence of combination of coaxial cylindrical explosives on fragmentation and shock waves of a shelled composite charge // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2023. — V. 48, N 6. — e202200318. — DOI: 10.1002/prop.202200318.
30. **Li W., Chen Z., Wang X., Li W.** Research on the intermediate phase of 40CrMnSiB steel shell under different heat treatments // *Defence Technol.* — 2021. — V. 17, N 3. — P. 1032–1041. — DOI: 10.1016/j.dt.2020.06.009.
31. **Gold V. M.** Fragmentation model for large L/D (Length over Diameter) explosive fragmentation warheads // *Defence Technol.* — 2017. — V. 13, N 4. — P. 300–309. — DOI: 10.1016/j.dt.2017.05.007.
32. **Gao Y., Feng S., Xiao X., Feng Y., Huang Q.** Fragment characteristics from a cylindrical casing constrained at one end // *Int. J. Mech. Sci.* — 2023. — V. 248. — 108186. — DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108186.
33. **Zhu J., Li W., Wang X., Li W.** Effect of tempering temperature on expansion and fracture mechanism of 40CrMnSiB steel cylinder shell // *Int. J. Impact Eng.* — 2017. — V. 107. — P. 38–46. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.05.007.
34. **Chen C., Li W. B., Wang X. M., Li W. B., Liu H. X.** Influence of various warhead materials characteristics on fragments forming // *Chin. J. High Pressure Phys.* — 2014. — V. 28, N 5. — P. 611–616. — DOI: 10.11858/gywlxb.2014.05.016.

35. **Li J., Li W., Wang X., Li W., Hong X.** Mechanical properties and constitutive model of aluminum powder/rubber matrix composites compressed at various strain rates // *Int. J. Impact Eng.* — 2018. — V. 121. — P. 55–62. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.07.005.
36. **Gao Y. G., Feng S. S., Liu Y. H., Huang Q.** Initial velocity distribution of fragments from cylindrical charge shells with different thick end caps // *Acta Armamentarii.* — 2022. — V. 43, N 7. — P. 1527–1536. — DOI: 10.12382/bgxb.2021.0443.
37. **Чжу Ц. Ц., Ли В. Б., Ван С. М., Ли В. Б.** Сохранение расширяющейся цилиндрической металлической оболочки в промежуточной фазе разрушения // *Физика горения и взрыва.* — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 131–139. — DOI: 10.15372/FGV20180214. — EDN: YWJNIO.
38. **Xin C. L., Xue Z. Q., Tu J., et al.** Handbook of common material parameters for finite element analysis. — Beijing: China Machine Press, 2019.
39. **Hobbs M. L., Baer M. R.** Calibrating the BKW-EOS with a large product species data base and measured CJ properties // 10th Symp. (Int.) on Detonation, Boston, MA, 1993.
40. **Gao Y. G., Feng S. S., Zhang B., Zhou T.** Effect of the length-diameter ratio on the initial fragment velocity of cylindrical casing // *IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng.* — 2019. — V. 629, N 1. — 012020. — DOI: 10.1088/1757-899X/629/1/012020.
41. **Li F.** Multi-objective optimization design of lethal power for blast-fragmentation Warhead: PhD Thes. / National Univ. of Defense Technol. — Changsha, Hunan, China, 2020.
42. **Huang G., Li W., Feng S.** Axial distribution of fragment velocities from cylindrical casing under explosive loading // *Int. J. Impact Eng.* — 2015. — V. 76. — P. 20–27. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.08.007.
43. **Zhu J., Li W., Wang X., Cheng X., Li W., Lu H.** Effect of tempering temperature on the forming properties of fragments of 50SiMnVB steel shell // *Acta Amamentarii.* — 2015. — V. 36, N 11. — P. 2080–2086. — DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.11.009.
44. **Li J., Li W., Hong X., Yu J., Zhu J.** Blast wave characteristics of multi-layer composite charge: Theoretical analysis, numerical simulation, and experimental validation // *Defence Technol.* — 2023. — V. 19. — P. 91–102. — DOI: 10.1016/j.dt.2021.11.012.
45. **Mirzaei M., Tavakoli S., Najafi M.** On the role of stress waves in dynamic rupture of cylindrical tubes // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* — 2017. — V. 40, N 12. — P. 2008–2018. — DOI: 10.1111/ffe.12621.
46. **Li J., Li W., Yu J., Xiao W., Xu H.** Blast performance of layered charges enveloped by aluminum powder/rubber composites in confined spaces // *Defence Technol.* — 2022. — V. 18, N 4. — P. 583–592. — DOI: 10.1016/j.dt.2021.03.014.

Поступила в редакцию 27.10.2023.

После доработки 14.12.2023.

Принята к публикации 07.02.2024.