

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МИШЕНЕЙ С НАПОЛНИТЕЛЕМ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

Н. Н. Пилюгин

Институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова, 119192 Москва, pilyugin@yandex.ru

Приведен анализ результатов экспериментов на баллистической установке по соударению (со скоростями  $0.6 \div 6.26$  км/с) ударников из капролона, полиэтилена, а также составных ударников (из капролона с шариками из стали или алюминия) с мишенями из эпоксидной смолы с наполнителем ( $Al_2O_3$ ) и без него. Исследовался удар по торцевой поверхности цилиндрических мишеней с характерным размером 0.05 м. При скоростях выше 1 км/с зафиксировано полное разрушение мишеней. Проведен статистический анализ собранных осколков по массам и размерам. Вычислены средние значения размеров осколков и удельной поверхностной энергии разрушения.

Ключевые слова: баллистический эксперимент, высокоскоростной удар, полимер с наполнителем, разрушение мишени, статистика осколков, удельная поверхностная энергия разрушения.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение ударного взаимодействия тел за последние годы вышло на передний план исследований в механике твердого тела [1–3]. Реакция материалов на высокие давления, возникающие при высокоскоростном ударе, имеет фундаментальное значение для изучения уравнений состояния материалов [4] и их отдельных механических характеристик [5]. При создании композиционных материалов на основе полимеров в качестве упрочняющей фазы применяются мелкозернистые порошки металлических соединений (нитридов, карбидов, оксидов, боридов). Полимерные материалы с наполнителем широко используются в качестве теплоизоляционных материалов в космической технике [6]. В [7–10] нами было установлено, что инжектирование в плазму тугоплавких пылевидных частиц  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  микронного размера заметно снижает концентрацию свободных электронов. Поэтому использование сравнительно легких аблирующих полимерных материалов с наполнителем из микрочастиц  $Al_2O_3$  в качестве теплозащиты вблизи радиоприемных космических аппаратов позволяет управлять процессами радиосвязи с космическим аппаратом при входе в атмосферу. Приведенные примеры свидетельствуют о важности изучения физико-

механических свойств полимерных материалов с наполнителем.

В работе [11] проведено предварительное исследование высокоскоростного соударения ударников с мишенями из эпоксидной смолы с наполнителем ( $Al_2O_3$ ) и без него. При скоростях свыше 1 км/с зафиксировано полное разрушение мишеней на фрагменты разных размеров. Установление законов распределения фрагментов по размерам и массам в зависимости от скорости удара и характеристик материала [12–14] позволяет дать объективную оценку прочности материала мишени. При статистическом анализе осколков наиболее часто применяют нормальный закон распределения по логарифмам размеров (или масс) частиц [15], степенной закон [13], а также закон Пуассона [16]. Кроме них существует еще ряд эмпирических законов, используемых в горнодобывающей промышленности [17] и в технике измельчения твердых тел [14], основным из которых является закон Розина — Рамллера. Этот закон применялся для анализа осколков, образуемых при взрыве металлических цилиндрических оболочек под действием взрывчатого вещества [18–21], и при расчете числа фрагментов, образующихся при соударении и дроблении двух частиц космического мусора [22]. В [23] дано теоретическое обоснование закона распределения Розина — Рамллера и установлена его связь с логарифмически-нормальным и степенным распределениями.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ-835.2006.1) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-01-00033).

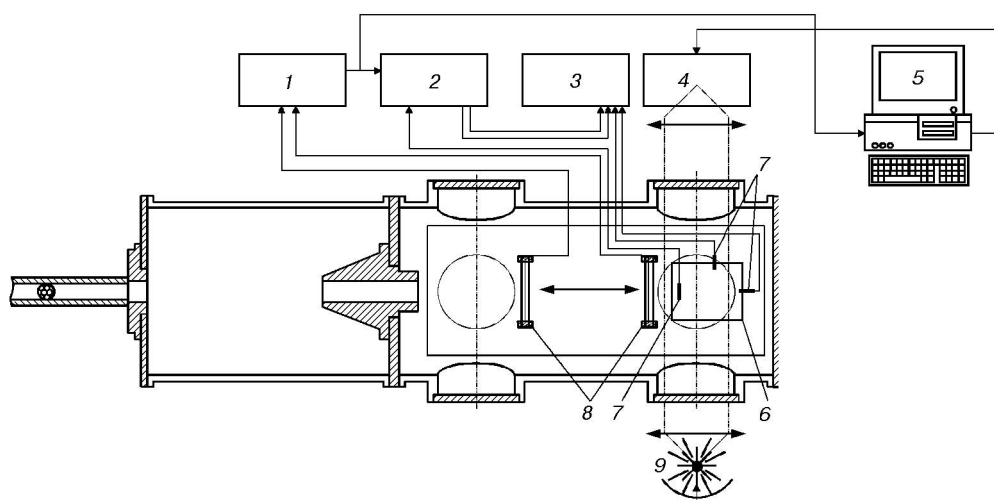


Рис. 1. Схема экспериментальной баллистической установки:

1 — блок измерения скорости и запуска системы регистрации; 2 — импульсный источник питания манганинового датчика; 3 — 4-канальный цифровой запоминающий осциллограф (100 МГц); 4 — приемная камера скоростной фоторегистрирующей системы Мосам-4000; 5 — компьютер для управления камерой Мосам-4000 и обработки результатов эксперимента; 6 — исследуемый образец; 7 — манганиновые датчики давления; 8 — контактные датчики скорости пролета пули; 9 — лампа с системой коллимации света

## 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗРУШЕНИЮ МИШЕНЕЙ НА БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

Эксперименты по высокоскоростному соударению (при скоростях  $3 \div 6$  км/с) проводились на пороховой двухступенчатой легкогазовой баллистической установке Института механики МГУ. Для метания моделей со скоростями менее 2 км/с использовалась только одна ступень этой установки, которая заполнялась сжатым водородом. Схема такой модифицированной установки приведена на рис. 1. Мишени из эпоксидной смолы с наполнителем представляли собой цилиндры длиной  $L = 0.05 \div 0.1$  м и диаметром  $D = 0.05$  м. В экспериментах № 2, 3 применялись цилиндрические ударники из капролона, а в экспериментах № 11–20 — из полиэтилена в виде цилиндров длиной 0.013 м и диаметром 0.0129 м. Используемые в экспериментах № 5–8 цилиндрические (составные) ударники тех же размеров изготавливались из капролона с полусферической выемкой впереди, куда закреплялся металлический шарик. Условия экспериментов приведены в табл. 1, где указаны номер эксперимента (по журналу регистрации), скорость ударников  $v_0$ , массовая доля  $\alpha_1$  частиц  $Al_2O_3$  в материале мишени, масса мишеней  $M_t$  и их плотность  $\rho_t$ , масса ударников  $m_0$  и их средняя плотность

$\rho_p$ , начальная кинетическая энергия ударников  $E_0$ , а также удельная энергия  $E_0/\Delta M_t$ , приходящаяся на единицу массы разрушенной мишени. Средний размер частиц порошка наполнителя  $Al_2O_3$  был равен  $\approx 5$  мкм. Плотность частиц  $Al_2O_3$  составляла  $3969$  кг/м<sup>3</sup>. Плотность образцов мишени определяли двумя способами: гидростатическим методом и по измерениям геометрических размеров тела и его массы. Перед каждым экспериментом мишень взвешивали и устанавливали в аэробаллистической трассе на расстоянии более 2.5 м от дульного среза ствола.

Полет ударника проходил в трассе диаметром 0.5 м, заполненной воздухом до давления  $3 \div 5$  Торр. Сигналы с датчиков скорости регистрировались на 4-канальном (100 МГц) цифровом запоминающем осциллографе. В экспериментах № 2–8 наблюдалось частичное разрушение мишеней, в экспериментах № 11–20 — полное разрушение мишеней на осколки разных форм и размеров. В отдельных экспериментах использовались скоростные съемки видеокамерами процесса разрушения мишени.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Возникающие при ударе обломки мишеней собирались и распределялись по группам в со-

Таблица 1

## Условия проведения экспериментов

Номер эксперимента	$v_0$ , км/с	$\alpha_1$ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$M_t$ , кг	$\rho_t$ , кг/м <sup>3</sup>	$m_0$ , 10 <sup>-3</sup> кг	$\rho_p$ , кг/м <sup>3</sup>	$E_0$ , кДж	$E_0/\Delta M_t$ , кДж/кг
2	0.973	0	0.236	1200	2.07	1200	0.978	23.44
3	0.632	0	0.234	1200	2.03	1200	0.405	12.67
5	0.673	0	0.172	1200	3.0	1677	0.739	52.41
6	0.976	0.40	0.303	1665	2.62	1502	1.248	28.92
7	0.962	0.40	0.299	1665	2.71	1583	1.254	32.53
8	1.120	0	0.1169	1186	2.60	1470	1.631	23.43
11	6.260	0.40	0.1659	1652	1.55	930	30.37	183.1
12	5.937	0.40	0.1656	1658	1.54	930	27.14	163.9
13	5.094	0.10	0.1280	1375	1.43	930	18.55	144.9
14	5.292	0.10	0.1410	1412	1.46	930	20.44	145.0
15	1.278	0	0.1170	1186	1.46	930	1.192	10.19
16	5.150	0.20	0.1605	1643	1.49	930	19.76	123.1
17	1.376	0.20	0.1272	1310	1.46	930	1.382	10.87
20	1.051	0.40	0.1578	1658	1.47	930	0.8119	5.145

Таблица 2

## Массы групп фрагментов

Номер эксперимента	$M$ , г, при $d$ , мм										$M_\Sigma$ , г
	0 ÷ 0.5	0.5 ÷ 1	1 ÷ 3	3 ÷ 5	5 ÷ 7	7 ÷ 10	10 ÷ 15	15 ÷ 20	20 ÷ 30	30 ÷ 45	
11	4.6	5.95	7.5	21.65	24.8	22.10	14.45	18.55	31.3	–	150.9
12	7.05	5.95	6.9	17.1	12.65	26.3	15.9	33.6	27.0	–	152.45
13	3.55	12.5	27.0	42.9	19.8	12.7	7.22	–	–	–	125.67
14	2.6	13.75	25.35	35.9	14.8	12.4	8.85	9.35	–	–	123.0
15	0.5	2.5	6.15	13.0	16.3	12.4	16.15	12.5	33.6	–	113.1
16	6.74	9.22	25.81	6.67	45.27	37.86	12.5	–	–	–	144.07
17	0.75	1.1	2.1	8.2	8.6	10.0	16.8	14.55	32.1	30.1	124.3
20	0.62	1.92	2.87	5.45	5.6	8.0	13.1	13.17	24.64	77.8	153.17

ответствии с размерами после просеивания через ряд сит. Группы обломков фотографировались и взвешивались для дальнейшей статистической обработки. Результаты такой первичной обработки представлены в табл. 2. В последней ее графе приведена суммарная масса  $M_\Sigma$  собранных осколков. Сравнение данных из табл. 1 и 2 показывает, что потери массы со-

бранного материала (за счет рассеяния и испарения мельчайших частиц) составляют менее 10 %.

Обычно предполагается, что каждый фрагмент характеризуется только одним линейным размером, т. е. осколки считаются изометрическими.

В [17] предложено характеризовать фор-

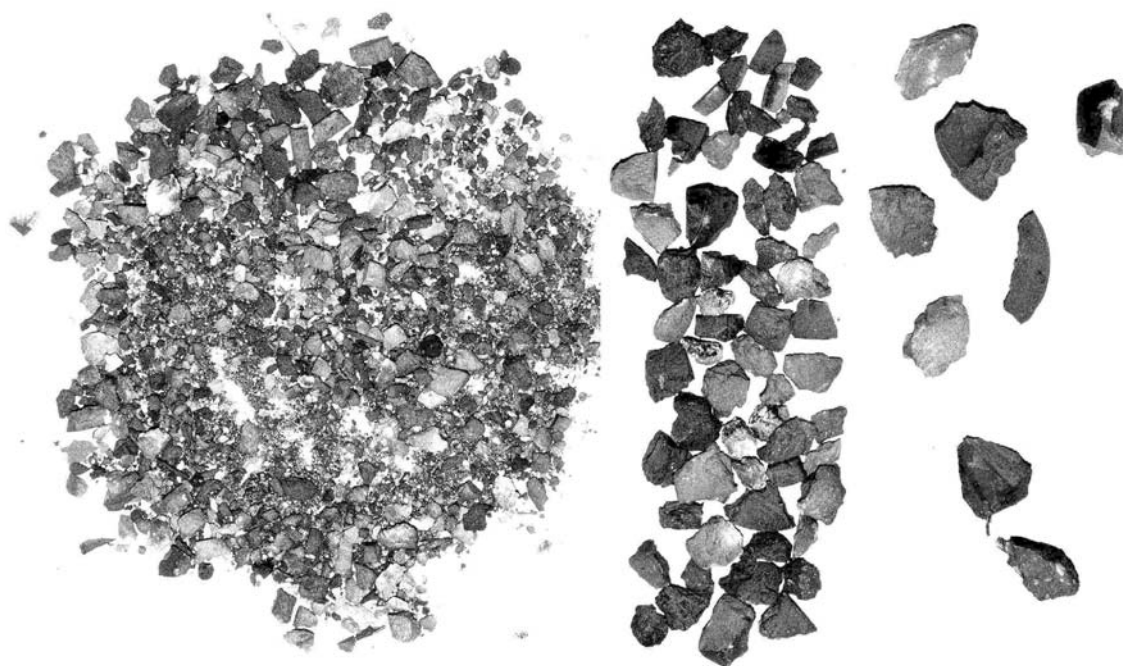


Рис. 2. Фотография собранных после удара осколков в эксперименте № 12

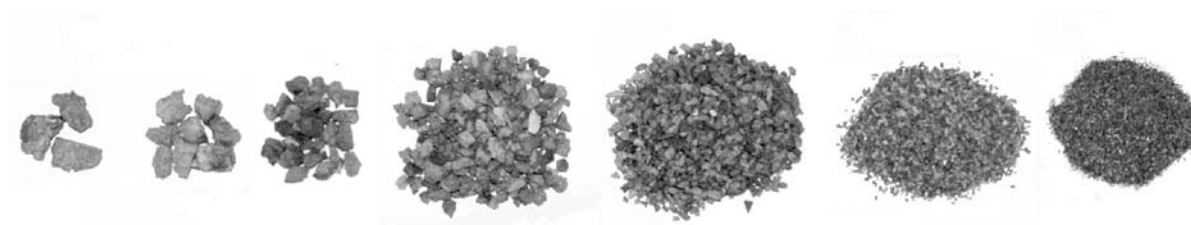


Рис. 3. Фотография собранных после удара осколков в эксперименте № 14

му осколков соотношением их максимальных протяженностей по трем взаимно-перпендикулярным направлениям, т. е. между наибольшим размером — длиной  $a$ , средним размером — шириной  $b$  и наименьшим размером — толщиной  $c$ . В качестве относительной характеристики отклонения формы осколков от изометрической предложено использовать величину  $Y = a/c$ , которая названа показателем расхождения размеров осколков. Вполне однозначно линейный размер описывает только геометрически правильные частицы — шар, куб и другие формы, для которых достаточно одного параметра. Во всех остальных случаях необходимо дополнительное определение того, что подразумевается под линейным размером.

Установлено, что предельно допустимое расхождение размеров «правильных» осколков  $Y = 3$  [17]. Наглядное представление о форме и размерах осколков дают фотографии, представленные на рис. 2–4.

Осмотр собранных осколков показал, что наибольшие расхождения в размерах наблюдаются для крупных осколков, а мелкие осколки имеют форму, близкую к изометрической, при этом значительных изменений в форме обломков в зависимости от их размера не наблюдается. Морфологический анализ наиболее крупных осколков для каждого эксперимента показал, что  $Y < 2.5$ , т. е. осколки по критерию [17] ( $Y < 3$ ) можно считать изометрическими. Визуальный анализ просеянного вещества (см.

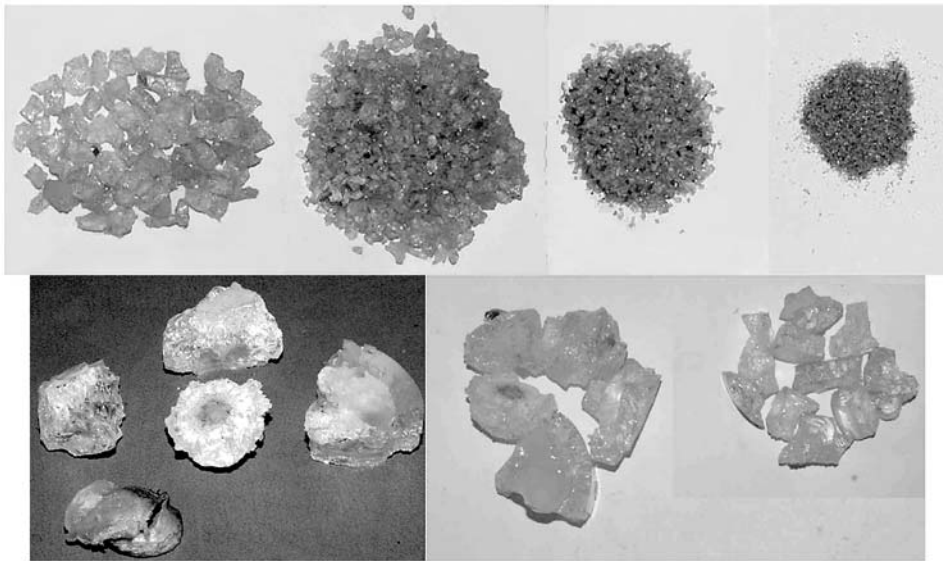


Рис. 4. Фотография собранных после удара осколков в эксперименте № 15

рис. 2–4) показал, что с возрастанием скорости удара  $v_0$  увеличивается доля мелкой фракции.

### 3. РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ С НАПОЛНИТЕЛЕМ ПО МОДЕЛИ ПЛОСКОГО УДАРА

Для оценки прочности исследуемых материалов были выполнены расчеты параметров за ударной волной в начальный момент соударения в зависимости от скорости ударника. Наибольшие давления в ударной волне при ударах достигаются на начальной стадии контакта и сжатия ударника и мишени [2, 5, 12]. Их можно рассчитать в приближении плоского удара [24]. Сразу после первого касания ударника и мишени от границы раздела расходятся два ударных фронта, один из которых уходит в мишень, а второй распространяется по ударнику. Между двумя ударными фронтами материал ударника и мишени сжат до одинакового давления, и обе сжатые области движутся вместе с одинаковой массовой скоростью. Состояние между двумя фронтами можно определить с помощью уравнений Гюгоньо для каждого ударного фронта отдельно, используя соответствующее уравнение состояния [1–5] для каждого материала и дополнительное условие равенства скоростей и давлений на границе раздела. Если ударник движется со скоростью  $v_0$  (в системе координат, где покоится мишень),

так что  $u_p$  — массовая скорость за ударной волной в системе координат, где покоится ударник, то массовая скорость за ударной волной в мишени находится из соотношения

$$u_t = v_0 - u_p. \quad (3.1)$$

Получить алгебраическое решение системы соотношений Гюгоньо для всех параметров за ударной волной удается [24], если предположить, что соотношение между скоростью фронта ударной волны  $D_t$  и массовой скоростью  $u_t$  является линейным:

$$D_t = c_{0t} + S_t u_t, \quad (3.2)$$

где  $c_{0t}$  и  $S_t$  — константы для данного материала мишени. Аналогичное соотношение используется для материала ударника:

$$D_p = c_{0p} + S_p u_p. \quad (3.3)$$

Параметры  $c_{0t}$ ,  $c_{0p}$ ,  $S_t$ ,  $S_p$  для многих материалов мишени и ударника найдены эмпирическим путем и представлены, например, в [1, 5, 25]. Если использовать выражения (3.2), (3.3), то для давления в ударной волне  $p_m$ , массовых скоростей  $u_t$ ,  $u_p$ , плотностей сжатых материалов  $\rho_t$ ,  $\rho_p$ , удельных внутренних энергий  $E_t$ ,  $E_p$ , объемных деформаций  $\varepsilon_t$ ,  $\varepsilon_p$  получаются алгебраические выражения, приведенные в [24]. Можно показать [24], что относительные доли начальной энергии ударника  $E_0 =$

$m_0 v_0^2/2$ , перешедшие в кинетическую энергию мишени  $f_{tk}$  и внутреннюю энергию  $f_{tv}$ , равны:

$$f_{tk} = f_{tv} = u_p u_t / v_0^2. \quad (3.4)$$

Относительные доли кинетической энергии  $f_{pk}$  и внутренней энергии  $f_{pv}$ , остающиеся в конце сжатия в ударнике и не равные между собой, определяются с помощью уравнений:

$$f_{pk} = u_t^2 / v_0^2, \quad f_{pv} = u_p^2 / v_0^2. \quad (3.5)$$

Для расчета параметров ударных волн  $c_0$  и  $S$  в композитах, состоящих из двух материалов с известными параметрами  $c_{0i}$  и  $S_i$ , были разработаны приближенные методы [3, 5, 25]. Рассмотрим композиционный материал, состоящий из эпоксидной смолы и примеси (например,  $Al_2O_3$ ) как простую смесь двух компонентов, для каждой из которых известны уравнения состояния и механические характеристики. Если  $\rho_i$ ,  $V_i$  — плотность и объем  $i$ -го компонента, то вся масса в образце композита из двух веществ равна

$$m = \rho V = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2, \quad V = V_1 + V_2. \quad (3.6)$$

Если ввести объемную долю  $x_i$  для  $i$ -го компонента в смеси, то можно записать

$$x_1 = V_1/V, \quad x_2 = 1 - x_1.$$

Тогда из (3.6) получим соотношение для плотности смеси

$$\rho = \rho_1 x_1 + \rho_2 x_2. \quad (3.7)$$

Если массовая доля  $i$ -го компонента равна

$$\alpha_i = m_i/m, \quad i = 1, 2, \quad (3.8)$$

то из (3.6), (3.7) следует выражение для массовой доли наполнителя:

$$\alpha_1 = 1/(1 + \rho_2 x_2 / \rho_1 x_1). \quad (3.9)$$

Разрешая (3.9) относительно  $x_1$ , получим зависимость

$$x_1 = 1/(1 + \rho_1 \alpha_2 / \rho_2 \alpha_1). \quad (3.10)$$

Для расчета коэффициента Грюнайзена смеси  $\Gamma$  используется соотношение [5]

$$\frac{1}{\Gamma \rho} = \sum_{i=1}^2 \frac{\alpha_i}{\Gamma \rho_i}. \quad (3.11)$$

Безразмерный наклон ударной волны  $S_t$  для умеренных давлений находится из соотношения [1, 5]

$$S_t = (1 + \Gamma)/2.$$

Для расчета скоростей упругих волн в гетерогенных средах предложено два метода: метод идеального смешения двух веществ и метод слоистой среды.

В методе идеального смешения объемная скорость звука  $c_0$  смеси находится из соотношения

$$\frac{1}{\rho^2 c_0^2} = \sum_{i=1}^2 \frac{\alpha_i}{(\rho c_0)_i^2}. \quad (3.12)$$

Это выражение можно преобразовать к зависимости между объемными модулями сжатия  $K_i$ :

$$\frac{1}{K} = \frac{x_1}{K_1} + \frac{x_2}{K_2}. \quad (3.13)$$

В методе слоистой среды объемная скорость звука находится из выражения

$$\frac{1}{c_0} = \frac{x_1}{c_{01}} + \frac{x_2}{c_{02}}. \quad (3.14)$$

Выражаемый уравнением (3.14) результат обычно служит верхним прогнозируемым пределом измеряемых скоростей, в то же время соотношение (3.12) дает значение, близкое к нижнему прогнозируемому пределу [5].

С использованием соотношений (3.9)–(3.14) были рассчитаны параметры за ударной волной для типичных экспериментов № 6, 8, 11, 15, 20 из табл. 1. В эксперименте № 6 ударник имел стальной наконечник, в эксперименте № 8 — наконечник из Al, а в экспериментах № 11, 15, 20 ударники выполнены из полиэтилена. В табл. 3 приведены исходные параметры для расчетов, используемые в уравнениях (3.1), (3.2), (3.11)–(3.14), которые заимствованы из [5, 25].

Для скорости ударной волны в эпоксидной смоле с наполнителем в зависимости от массовой скорости найдены следующие соотношения:

по методу идеального смешения:

$$D_t = 2.449 + 1.572 u_t \text{ [км/с]}, \quad (3.15)$$

по методу слоистой среды:

Таблица 3  
 Параметры расчета адиабаты Гюгоню

Материал	$c_0$ , км/с	$S$	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>
Сталь	4.509	1.49	7 800
Алюминий	5.27	1.429	2 700
Полиэтилен	2.9	1.481	930
Эпоксидная смола	2.64	1.66	1 186
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.14	1.28	3 969

$$D_t = 2.977 + 1.572u_t \text{ [км/с]}. \quad (3.16)$$

По этим зависимостям для условий соударения экспериментов № 6, 8, 11, 15, 20 с использованием теории плоского удара были рассчитаны (табл. 4) массовая скорость  $u_t$  в мишени, скорость ударной волны  $D_t$ , давление  $p_m$  в ударной волне, относительное изменение плотности  $\varepsilon_t$  (деформации). По найденным значениям  $c_{0t}$  и  $\rho_t$  были вычислены [1] модуль объемного сжатия  $K$  и модуль сдвига  $G$ , при этом предполагалось, что коэффициент Пуассона  $\mu = 0.36$  [25]. Сдвиговая прочность  $\sigma_2$  оценена как  $1/30$  модуля сдвига [2, 5]. Результаты этих расчетов приведены в последних графах табл. 4. Из таблицы следует, что напряжения во фронте ударной волны более чем на порядок превышают теоретическую прочность данных материалов на сдвиг. Из табл. 4 видно, что наполнитель Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> увеличивает теоретическую прочность эпоксидной смолы в  $1.5 \div 2$  раза. Отметим, что величина  $c_{0t}$  для эпоксидной смолы с наполнителем Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, измеренная в [25], равна 2.46 км/с и заключена в интервале значе-

ний, которые рассчитаны методами идеального смешения (3.15) и слоистой среды (3.16). Для понимания процессов, происходящих при высокоскоростном ударе с мишенями из эпоксидной смолы с наполнителем, были также выполнены серийные расчеты параметров за ударной волной для скоростей удара  $0.5 \div 5$  км/с. В качестве ударников рассматривались пластины из алюминия и полиэтилена. Расчеты показали, что удар по мишени более плотным ударником из Al вызывает большую амплитуду давления  $p_m$  и большую деформацию, чем при ударе полиэтиленом. Наличие наполнителя в мишени также усиливает давление  $p_m$  за ударной волной, но снижает деформацию мишени.

#### 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАГМЕНТОВ ПО РАЗМЕРАМ

В статистических расчетах обычно принимается [14, 18], что фрагмент однозначно характеризуется массой  $m$ , объемом  $V$ , площадью поверхности  $A$  и размером  $s = d$ , где  $d$  — диаметр эффективной сферы, равной по массе данному фрагменту:  $d = \sqrt[3]{6m/\pi\rho_t}$ .

Для описания статистического распределения фрагментов по размерам используются [19] функции распределения в массовой форме

$$F(s) = \frac{M(< s)}{M_\Sigma} \quad (4.1)$$

либо в числовой —

$$\Phi(s) = \frac{N(< s)}{N_\Sigma}, \quad (4.2)$$

Таблица 4  
 Результаты расчетов по теории плоского удара

Номер эксперимента	Уравнение состояния	$u_t$ , км/с	$D_t$ , км/с	$p_m$ , ГПа	$\varepsilon_t$	$G$ , ГПа	$\sigma_2$ , ГПа
6	(3.15)	0.834	3.760	5.222	0.222	3.083	0.127
6	(3.16)	0.818	4.264	5.813	0.192	4.557	0.152
8	Эпоксидная смола	0.851	4.054	4.095	0.210	2.553	0.0851
11	(3.15)	2.601	6.537	28.31	0.398	3.084	0.103
11	(3.16)	2.527	6.951	29.25	0.364	4.557	0.152
15	Эпоксидная смола	0.587	3.615	2.519	0.163	2.553	0.0851
20	(3.15)	0.428	3.122	2.215	0.137	3.129	0.104
20	(3.16)	0.386	3.761	2.405	0.103	4.624	0.154

где  $M(< s)$ ,  $N(< s)$  — суммарная масса фрагментов с размером меньше  $s$  и их число,  $N_\Sigma$  — полное число фрагментов,  $M_\Sigma$  — масса образца. Наиболее широко для гранулометрической обработки [14, 17–20] используется функция распределения Розина — Рамллера (известная также под другим названием — распределение Вейбулла [23]):

$$F(s) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{s}{s_0} \right)^n \right], \quad (4.3)$$

где  $s_0$  — характеристический размер распределения,  $n$  — показатель качества фрагментации. Оба параметра ( $n$  и  $s_0$ ) находятся из обработки экспериментов. Функция плотности распределения определяется соотношением

$$f(s) = \frac{dF}{ds} = \frac{n}{s_0} \left( \frac{s}{s_0} \right)^{n-1} \exp \left[ - \left( \frac{s}{s_0} \right)^n \right]. \quad (4.4)$$

Момент  $k$ -го порядка случайной величины  $s$  вычисляется через  $\Gamma$ -функцию:

$$I_k = \int_0^\infty s^k f(s) ds = s_0^k \Gamma \left( 1 + \frac{k}{n} \right), \quad (4.5)$$

$$\Gamma(p) = \int_0^\infty e^{-t} t^{p-1} dt.$$

Отсюда при  $k = 1$  получаем математическое ожидание (средний размер) фрагмента:

$$\bar{s} = s_0 \Gamma \left( 1 + \frac{1}{n} \right). \quad (4.6)$$

Полагая в (4.5)  $k = 2$  и  $3$ , находим среднюю площадь  $\bar{A}$  и средний объем  $\bar{V}$  фрагментов.

В механике разрушения [14, 26] важную роль играет понятие удельной поверхности частицы, равное отношению поверхности к ее массе (или объему). Из (4.5) при  $k = -1$  получим

$$\left( \frac{\bar{A}}{\bar{V}} \right) = \frac{1}{s_0} \Gamma \left( 1 - \frac{1}{n} \right).$$

Тогда удельная поверхностная энергия  $\gamma$  находится из соотношения [26]

$$\gamma = \frac{\varepsilon_* \rho t s_0}{6\Gamma(1 - 1/n)}, \quad \varepsilon_* = \frac{f_t}{N_\Sigma} \left( \frac{E_0}{\bar{m}} \right), \quad (4.7)$$

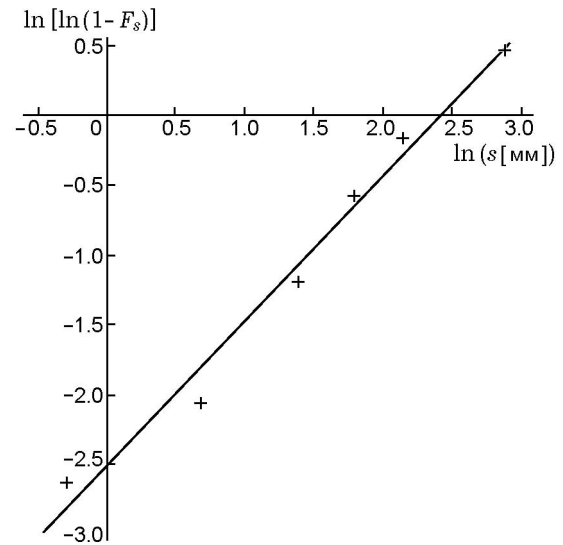


Рис. 5. Распределение Розина — Рамллера: сплошная линия — регрессия, точки — данные измерений

где  $f_t$  — доля энергии, переданной мишени при ударе, которая рассчитывается по теории плоского удара [1–3].

Пример расчета распределения Розина — Рамллера на основе данных из табл. 2 для эксперимента № 11 представлен на рис. 5.

В табл. 5 приведены найденные значения параметров. Из табл. 5 видно, что с увеличением скорости удара  $v_0$  показатель  $n$  приближается к единице, т. е. распределение приближается к экспоненциальному.

В табл. 6 приведены осредненные по проведенным экспериментам значения удельной

Таблица 5  
Результаты статистических расчетов

Номер эксперимента	$v_0$ , км/с	$n$	$s_0$ , $10^{-3}$ м	$\bar{m} = \frac{M_\Sigma}{N_\Sigma}$ , г	$\gamma$ , эрг/см <sup>2</sup>
11	6.260	1.04	11.28	$4.43 \cdot 10^{-4}$	794
12	5.937	1.03	11.42	$2.84 \cdot 10^{-4}$	481
13	5.094	1.298	3.72	$3.47 \cdot 10^{-4}$	170
14	5.292	1.199	4.84	$4.48 \cdot 10^{-4}$	301
15	1.278	1.297	13.47	$9.98 \cdot 10^{-3}$	215
16	5.150	1.03	5.62	$2.71 \cdot 10^{-4}$	178
17	1.376	1.198	23.93	$1.67 \cdot 10^{-3}$	381
20	1.051	1.073	41.28	$2.97 \cdot 10^{-3}$	569



Таблица 6  
Средние значения удельной поверхностной энергии разрушения

Параметр	$\alpha_1$ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )				MgO	Стекло	Эпоксидная смола
	0	0.1	0.2	0.40			
$\gamma$ , эрг/см <sup>2</sup>	215	236	280	615	3 300	2 320	1243

поверхностной энергии  $\gamma$  в зависимости от концентрации наполнителя  $\alpha_1$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и сравнение с данными для других материалов, рассчитанными по модифицированной модели Борна для эффективной кристаллической решетки [26]. Эти данные служат теоретическим верхним пределом  $\gamma$ . Из табл. 6 видно, что добавление наполнителя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  увеличивает удельную поверхностную энергию разрушения эпоксидной смолы, а теоретическое ее значение существенно превышает экспериментальное. Для чистой эпоксидной смолы ( $\alpha_1 = 0$ ) поверхностная энергия близка к таковой для аморфного кремнезема —  $\gamma = 275$  эрг/см<sup>2</sup> [14], а при увеличении доли наполнителя ( $\alpha_1 = 0.40$ ) в смоле  $\gamma$  приближается к поверхностной энергии для кварца  $\gamma = 980$  эрг/см<sup>2</sup> [14]. Полученные результаты показывают, что из статистического анализа осколков, образующихся при разрушении материалов под действием высокоскоростных ударов, можно определить удельную поверхностную энергию и другие механические параметры.

Автор выражает искреннюю благодарность П. В. Козлову и С. В. Кочергину-Никитскому за помощь в измерениях, а также А. Н. Ватопедскому за помощь в изготовлении моделей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Глушак Б. Л., Куропатенко В. Ф., Новиков С. А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992.
2. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортон В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996.
3. Фомин В. М., Гулидов А. И., Сапожников Г. А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
4. Альтшулер Л. В., Трунин Р. Ф., Урлин В. Д. и др. Развитие в России динамических методов исследования высоких давлений // Успехи физ. наук. 1999. Т. 169, № 2. С. 323–344.
5. **Высокоскоростные** ударные явления / Под ред. Р. Хинслоу. М.: Мир, 1973.
6. **Strauss B. L.** New ablative heat shield materials for mars landers // J. of Spacecraft and Rockets. 1967. V. 4, N 10. P. 1304–1309.
7. **Пилюгин Н. Н.** Определение из баллистических экспериментов скоростей прилипания электронов к окислам алюминия // Теплофизика высоких температур. 1994. Т. 32, № 3. С. 339–353.
8. **Пилюгин А. Н., Пилюгин Н. Н.** Определение констант скоростей реакций рекомбинации и прилипания из баллистических экспериментов // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 70–82.
9. **Пилюгин Н. Н.** Исследование скоростей прилипания электронов к оксидам алюминия в смесях воздуха с ксеноном // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 3. С. 65–73.
10. **Пилюгин Н. Н.** Лабораторное определение константы скорости рекомбинации ионов кремния: приложения к изучению метеорного следа // Астроном. вестн. 1997. Т. 31, № 6. С. 550–557.
11. **Козлов П. В., Кочергин-Никитский С. В., Пилюгин Н. Н.** Исследование разрушения полимерных материалов при высокоскоростном ударе // Аннотации докл. IX Всерос. съезда по теоретической и прикладной механике. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та им. Н. И. Лобачевского, 2006. Т. 3. С. 112–113.
12. **Керрен Д., Шоки Д., Симен Л., Остин М.** Механизмы и модели кратерообразования в природных средах // Удар, взрыв и разрушение: Пер. с англ. М.: Мир, 1981. С. 81–115.
13. **Fujiwara A.** Results obtained by laboratory simulations of catastrophic impact // Memore S. A. It. 1986. V. 57, N 1. P. 47–63.
14. **Ходаков Г. С.** Физика измельчения. М.: Наука, 1972.
15. **Колмогоров А. Н.** О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // Докл. АН СССР. 1942. Т. 31, № 2.
16. **Gilvary J. J.** Fracture of brittle solids // J. Appl. Phys. 1961. V. 32, N 3.
17. **Барон Л. И., Хмельковский И. Е.** Разрушаемость горных пород свободным ударом. М.: Наука, 1971.
18. **Кошелев Э. А., Кузнецов В. М., Софронов С. Г., Черников А. Г.**

- Статистика осколков, образующихся при разрушении твердых тел взрывом // ПМТФ. 1971. № 2. С. 87–100.
19. **Одинцов В. А.** Бимодальное распределение фрагментов цилиндров // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 5. С. 118–122.
  20. **Одинцов В. А.** Гиперэкспоненциальные спектры взрывного разрушения металлических цилиндров // Механика твердых тел. 1992. № 5. С. 48–55.
  21. **Kun F., Wittel F. K., Herrmann H. J., Kropf B. H., Maloy K. J.** Scaling behavior of fragment shapes // Phys. Rev. Lett. 2006. N 96, 025504. P. 1–4.
  22. **Киселев А. Б.** Модель фрагментации при высокоскоростном соударении частиц космического мусора // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Математика, механика. 2001. № 3. С. 50–55.
  23. **Brown W. K., Wohletz K. H.** Derivation of the Weibull distribution based on physical principles and its connection to the Rosin — Rammler and lognormal distributions // J. Appl. Phys. 1995. N 78(4). P. 2758–2763.
  24. **Мелощ Г. Дж.** Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир, 1994.
  25. **Munson D. E., Boade R. R., Schuler K. W.** Stress-wave propagation in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-epoxy mixtures // J. Appl. Phys. 1978. V. 49, N 9. P. 797–807.
  26. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.

*Поступила в редакцию 20/II 2007 г.*

---