

УДК 539.04

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЫЛЕНИЯ И ДИСПЕРГИРОВАНИЯ СВИНЦА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ И ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКЕ

Н. В. Невмержицкий, Е. Д. Сеньковский, Е. А. Сотсков,  
А. Б. Георгиевская, А. Н. Малышев, Е. В. Бодров,  
Е. В. Левкина, В. И. Скоков, К. В. Анисифоров

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Саров 607188, postmaster@ifv.vniief.ru

Приведены результаты экспериментального исследования пыления и диспергирования свинцового образца в вакуум после ударно-волнового нагружения и изоэнтропической разгрузки с использованием электронно-оптической микроскопической методики и методики PDV. Исследовалась динамика и спектр преимущественно диспергированных частиц. Для обеспечения оптической визуализации из диспергированного облака при помощи диафрагмы со щелью «вырезался» тонкий поток (ширина 0.5 мм). Эксперименты проводились в герметичной бронекамере. Образец толщиной 1 или 2.5 мм нагружался твердым взрывчатым веществом через металлическую подложку толщиной 1 и 2 мм. Интенсивность ударной волны варьировалась примерно от 23 до 38 ГПа, градиент давления за фронтом волны — от 80 до 157 ГПа/см. После нагружения свинец находился либо в жидкой фазе, либо в твердой фазе, либо в смеси жидкой и твердой фаз. Показано, что при разном фазовом состоянии распределения частиц диспергированного свинца по размерам различны.

Ключевые слова: диспергирование, ударно-волновые процессы, спектр частиц, изоэнтропическая разгрузка.

DOI 10.15372/FGV2024.9461  
EDN UXBPUX

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при ударно-волновом нагружении конденсированного вещества с его свободной поверхности (СП) выбрасываются мелкие частицы материала. Этот процесс называют ударно-волновым пылением вещества (см., например, [1–3]). Затем при разгрузке из-за откольных процессов вещество начинает дробиться. Этот процесс называют диспергированием вещества. И пыление, и диспергирование могут существенно влиять на работу мишеней инерциального термоядерного синтеза. Поэтому необходимы подробные экспериментальные исследования этих явлений для получения базовых данных, использующихся при тестировании численных методик.

Для тестирования расчетных методик важно иметь экспериментальную информацию по размерам фрагментов разрушенного металла и их скоростям. В этой работе такие дан-

ные получены путем оптической микроскопической видеoreегистрации течения [4] и по методике PDV [5] в тонком слое ( $\approx 0.5$  мм) диспергированного свинца, сформированного при помощи танталовой диафрагмы. Диафрагма устанавливалась на расстоянии 100 мм от начального положения образца свинца. Ее применение обусловлено тем, что поток диспергированных частиц является оптически непрозрачным, а при прохождении через узкую щель диафрагмы его оптическая толщина примерно на два порядка уменьшается.

В работе представлены спектры и скорости частиц диспергированного свинца при различном его фазовом состоянии после прохождения ударной волны (УВ) и при различных градиентах давления за фронтом отраженной от СП волны.

### 1. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СХЕМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Расчеты нагружающего устройства для исследования диспергирования свинца проводились по двумерной газодинамической про-

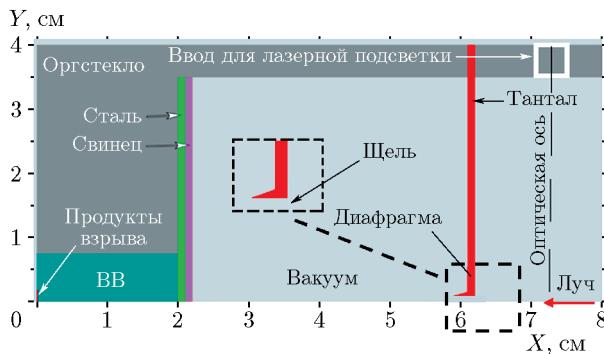


Рис. 1. Принципиальная схема постановки экспериментов (расчетная схема — осевая симметрия)

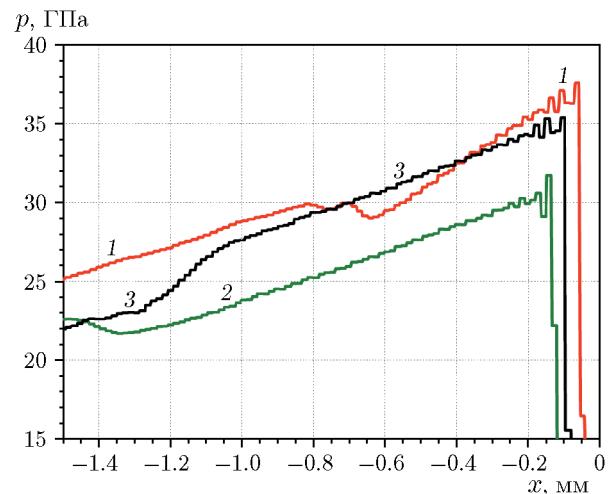


Рис. 2. Профиль УВ, выходящей на СП свинца:

линия 1 — опыты 3 и 9, линия 2 — опыт 8, линия 3 — опыт 12 (см. табл. 1)

граммме [6]. Принципиальная схема нагружающего устройства представлена на рис. 1. Для вариации интенсивности УВ и градиента давления за ее фронтом изменялись толщина свинцового образца, толщина и материал подложки, а также масса взрывчатого вещества (ВВ) (табл. 1).

На рис. 2 приведены расчетные профили давления УВ, выходящих на СП свинца, в опытах 3, 9, 8, 12. Градиент давления за фронтом УВ определялся по начальной линейной части зависимостей в диапазоне  $x = 0 \div -0.6$  мм. Предполагалось, что эта часть является определяющей в процессе диспергирования свинца. Отметим, что по данным расчетно-теоретической работы [7] для полного плавле-

ния свинца в волне разгрузки достаточно давления на фронте УВ  $p \approx 36$  ГПа, начало плавления —  $p \approx 26$  ГПа. По данным работы [8] свинец жидкий и при  $p \approx 34$  ГПа, при этом начало плавления согласно работе [5] составляет  $p \approx 25$  ГПа.

## 2. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились с использованием герметичной бронекамеры по схеме,

Таблица 1

Некоторые условия проведения экспериментов

Номер опыта	Подложка	$\delta$ , мм	ВВ	$L$ , мм	Наличие диафрагмы	$p_{\text{в}}$ , атм	$p$ , ГПа	$\Delta p/\Delta x$ , ГПа/см
3	Сталь $h = 1$ мм	1	$\varnothing 15 \times 20$ мм	111	+	0.01	38	157
8	Сталь $h = 2$ мм	2.5	$\varnothing 15 \times 25$ мм	112	-	0.025	31	80
9	Сталь $h = 1$ мм	1	$\varnothing 15 \times 20$ мм	111.8	+	0.015	38	157
11	Сталь $h = 2$ мм	2.5	$\varnothing 15 \times 10$ мм	112	-	0.025	23	107
12	Титан $h = 2$ мм	2.5	$\varnothing 15 \times 25$ мм	107	+	0.01	36	86

Примечания.  $h$  — толщина подложки,  $\delta$  — толщина образца из свинца,  $L$  — расстояние от СП до торца репера,  $p_{\text{в}}$  — давление воздуха в бронекамере,  $p$  — расчетное давление за фронтом УВ,  $\Delta p/\Delta x$  — градиент давления за фронтом УВ.

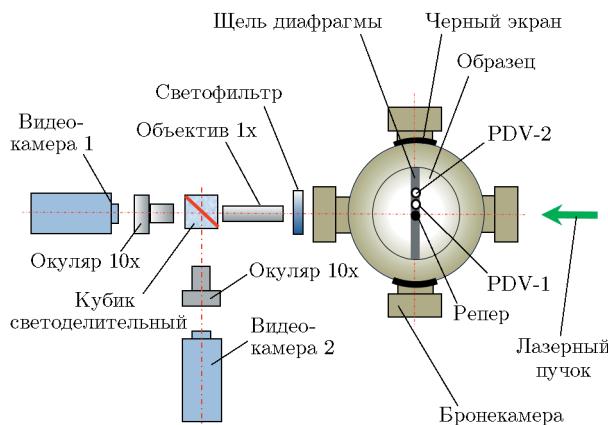


Рис. 3. Схема проведения экспериментов

представленной на рис. 3. Внутри бронекамеры монтировалась капсула с образцом свинца диаметром 30 мм. Шероховатость СП образцов составляла  $R_a \approx 43 \div 91$  нм (зеркало). Образцы нагружались ударной волной, создаваемой при помощи заряда твердого ВВ через металлическую подложку диаметром 36 мм. Над образцом монтировалась диафрагма со щелью шириной 0.5 мм, конструкция которой подбиралась на основании численного моделирования для минимального воздействия на поток частиц. Над ней на дополнительных стойках устанавливается диск из оргстекла. В диске закреплялись два датчика PDV и репер из оптоволокна (рис. 4). В опытах 8 и 11 диафрагма отсутствовала. Бронекамера вакуумировалась до давления воздуха  $p_v \approx 0.01 \div 0.25$  атм.

Регистрация течения проводилась в проходящем излучении по микроскопической электронно-оптической методике [4] при коэффициенте оптического увеличения  $k = 10$  и по методике PDV [5]. Для подсветки использовался лазер с длиной волны 532 нм и

энергией 180 мДж, работающий в трехимпульсном режиме, длительность импульса 7 нс. В опытах регистрировалось по три видеокадра в различные моменты времени. В статье представлено по одному видеокадру. Глубина оптической резкости составляла  $\approx 0.2$  мм, поэтому частицы, взаимодействующие с краями диафрагмы (вне фокуса), микроскопической методикой регистрировались размытыми и не учитывались при обработке.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 5, 6 представлены видеокадры диспергирования свинца, полученные видеосъемкой, и данные, полученные по методике PDV. На рисунках время  $t$  отсчитывается от подачи электроимпульса на детонатор, инициирующий ВВ. По видеокадрам видно, что изначально с СП вылетают мелкие частицы (идет процесс пыления свинца). Затем образец разрушается на относительно крупные струи и частицы, которые хорошо видны в опытах 8, 9, 12. Эти струи и частицы образовались в результате диспергирования свинца. Поток частиц в опыте 8 более optически прозрачен, чем в опыте 9, где свинец после ударно-волнового нагружения был расплавлен (см. рис. 5). Относительно высокая прозрачность потока в опыте 8 характерна для дробления свинца не полностью расплавленного.

Поэтому можно утверждать, что в опыте 8 свинец был в смеси жидкой и твердой фаз. В опыте 11 наблюдаются отколы свинца, что характерно для твердой фазы; в опыте 12, как и в опытах 3 и 9, разрешаются диспергированные частицы свинца, находящиеся в жидкой фазе.

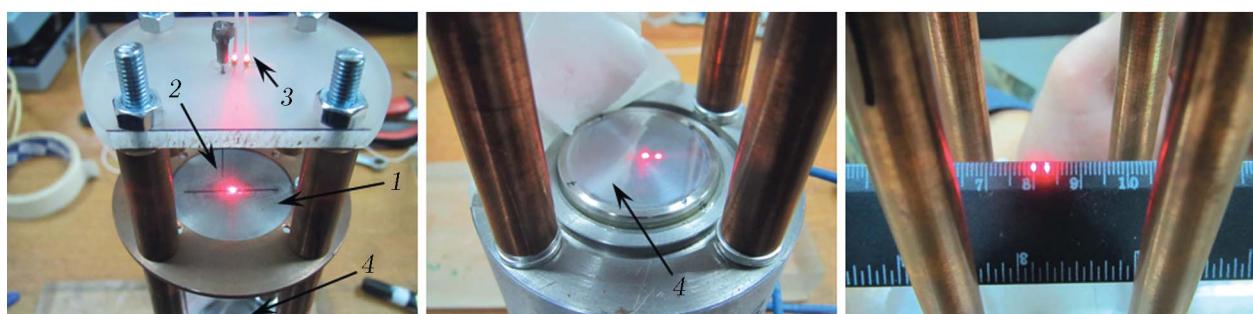


Рис. 4. Внешний вид капсулы с диафрагмой и зонами диагностики датчиков PDV:

1 — диафрагма, 2 — репер, 3 — датчики PDV, 4 — образец свинца

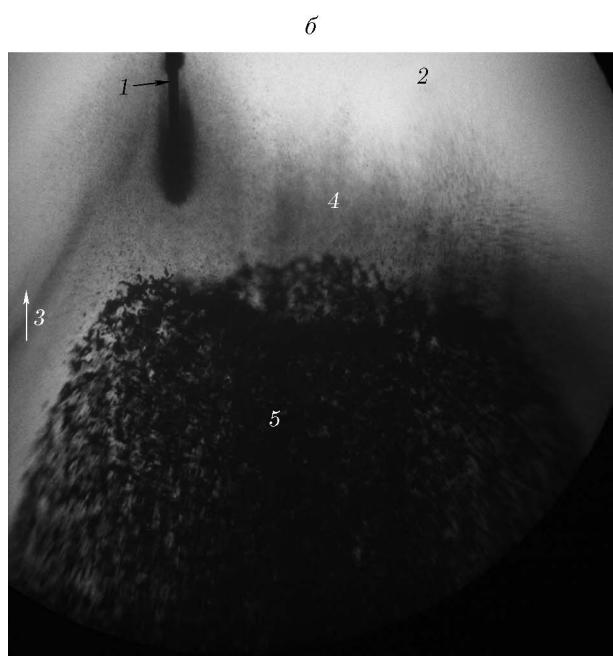
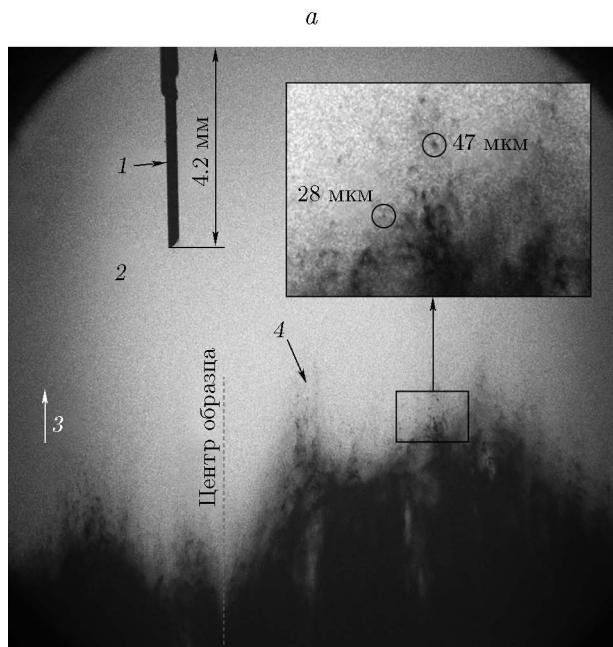


Рис. 5. Диспергирование свинца:

1 — репер диаметром 0.23 мм, 2 — вакуум, 3 — направление движения УВ, 4 — пылевое облако, 5 — диспергированный свинец; поле  $12.8 \times 12.8$  мм;  
*a* — опыт 9,  $t = 63.7$  мкс,  $p = 38$  ГПа; *б* — опыт 8,  $t = 76.2$  мкс,  $p = 31$  ГПа

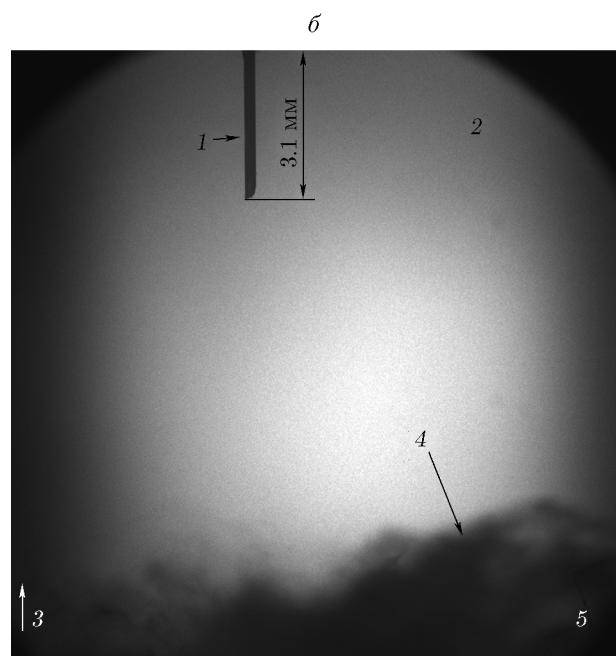
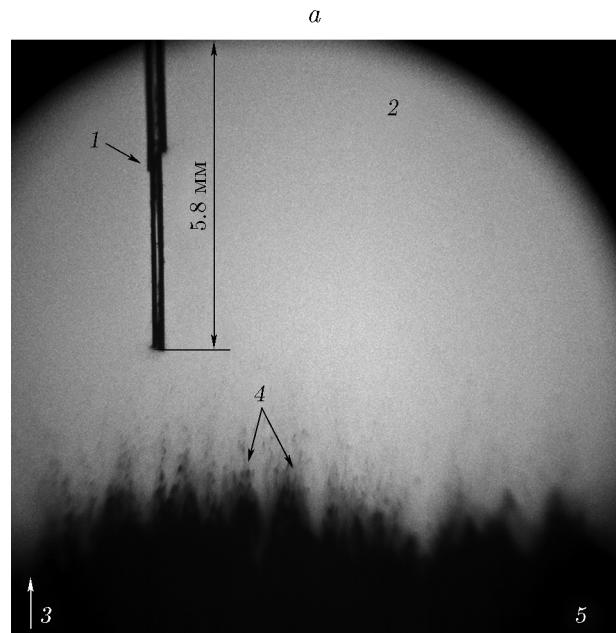


Рис. 6. Диспергирование свинца:

1 — репер диаметром 0.23 мм, 2 — вакуум, 3 — направление движения УВ, 4 — струи диспергированного свинца (микроотколы в опыте 11), 5 — диспергированный свинец; *а* — опыт 12 с диафрагмой,  $t = 65.5$  мкс,  $p = 36$  ГПа, размер поля  $11.5 \times 11.5$  мм; *б* — опыт 11 без диафрагмы,  $t = 85$  мкс,  $p = 23$  ГПа, размер поля  $12 \times 12$  мм

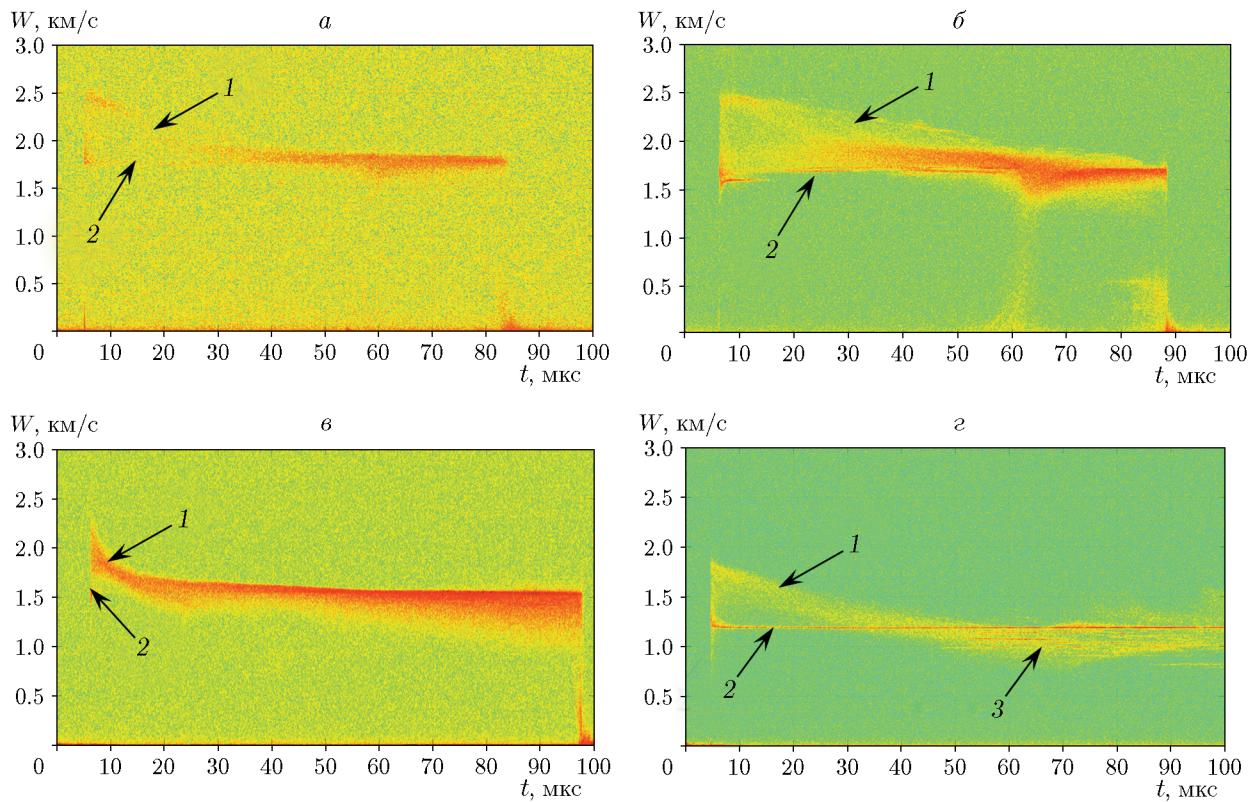


Рис. 7. Спектрограммы PDV:

1 — частицы «пыли» свинца, 2 — частицы диспергированного свинца, 3 — микроотколы; *a* — опыт 9;  
*b* — опыт 12; *c* — опыт 8; *d* — опыт 11

На рис. 7 приведены характерные спектрограммы скоростей СП свинцового образца и пылевых потоков, зарегистрированных в опытах. На всех спектрограммах фиксируются начальный момент выхода УВ на поверхность свинцового образца, скорость ее движения и максимальная скорость пылевого потока.

На спектрограмме опыта 11 со свинцом в твердом состоянии (см. рис. 7,*г*) изменение скорости СП видно на протяжении всей записи, что свидетельствует о сравнительно низкой плотности пылевого потока. Для образца в состоянии плавления (опыты 9 и 12) высокая плотность пылевых потоков практически сразу перекрывает отражение зондирующего излучения от поверхности образца, позже при прохождении через диафрагму поток становится более прозрачным, что приводит к зондированию частиц, лежащих ниже условной СП (см. рис. 7,*а*,*б* при  $t = 58 \div 64$  мкс).

Наблюдаемое на рис. 7 торможение частиц пыли связано с недостаточно высоким вакуумом в бронекамере. Интенсивность сигналов

на спектрограммах не дает возможности проводить сравнительную оценку реальной плотности пылевых потоков, что в первую очередь связано с интенсивностью полезного сигнала на фоне шума паразитной засветки.

Размер диспергированных частиц (диаметр  $d$ ) определялся, как и в [3], по специальной математической программе: сначала определялась площадь изображения частицы, а по площади — эффективный диаметр  $d$ . Частицы пыли свинца в этих опытах были относительно малы (из-за низкой шероховатости поверхности), они слабо разрешались, поэтому не измерялись. Относительное распределение диспергированных частиц по размерам  $R$  определялось как

$$R = \frac{N - \sum_{i=1}^n n_i}{N}, \quad (1)$$

где  $N$  — общее количество частиц в эксперименте;  $n_i$  — количество частиц в  $i$ -м интервале диаметров с учетом количества в предыдущем интервале. На рис. 8 представлены зависи-

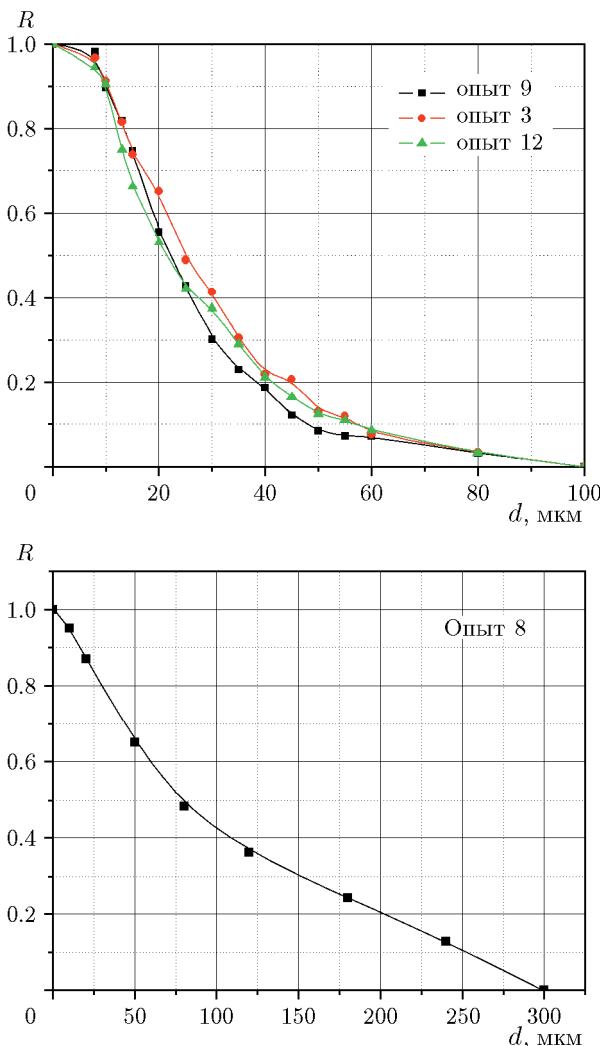


Рис. 8. Распределение диспергированных частиц по размерам в опытах 3, 8, 9 и 12

мости  $R(d)$  в опытах. Погрешность измерения диаметров частиц составляла 14 %.

Из результатов опытов, приведенных в табл. 2, можно сделать следующие выводы:

- скорость фронта диспергированных частиц близка к расчетной скорости СП;
- в жидкой фазе свинца при расчетной скорости СП  $W_{calc} \approx 1.89 \div 1.83$  км/с средний размер диспергированных частиц при градиенте давления  $\Delta p/\Delta x = 107$  ГПа/см составил 24 мкм (опыты 3 и 9), при  $\Delta p/\Delta x = 86$  ГПа/см — 26 мкм (опыт 12), т. е. в данных постановках экспериментов не наблюдается существенного влияния градиента давления на размеры частиц;

- в смеси твердой и жидкой фаз при расчетной скорости СП  $\approx 1.64$  км/с и градиенте

Таблица 2  
Некоторые результаты экспериментов

Номер опыта	$W_{calc}$ , км/с	$W_{PDV}$ , км/с	$W_{max}$ , км/с	$d$ , мкм
3	1.89	1.78	2.6	20
8	1.64	1.55	2.3	117
9	1.89	1.79	2.5	28
11	1.34	1.2	1.8	—
12	1.83	1.72	2.48	26

Примечания.  $W_{calc}$  — расчетная скорость свободной поверхности;  $W_{PDV}$  — максимальная скорость фронта диспергированных частиц по данным PDV;  $W_{max}$  — максимальная скорость фронта пыли по данным PDV;  $d$  — среднее значение диаметра диспергированных частиц.

давления  $\Delta p/\Delta x = 80$  ГПа/см средний размер частиц составил 117 мкм (опыт 8), т. е. значительно больше, чем в жидкой фазе;

- при твердом состоянии свинца при расчетной скорости СП  $\approx 1.34$  км/с и градиенте давления  $\Delta p/\Delta x = 107$  ГПа/см на СП наблюдаются микроотколы размером до 1 мм, движущиеся со скоростью  $\approx 1 \div 1.2$  км/с (опыт 11);

- скорости фронтов пыли с «зеркальных» поверхностей СП для всех его фазовых состояний примерно в 1.3 раза больше скорости СП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием микроскопической электронно-оптической методики и методики PDV проведены экспериментальные исследования процесса пыления и диспергирования свинцового образца после ударно-волнового нагружения и изоэнтропической разгрузки при различных фазовых состояниях свинца после нагружения. Получено, что градиент давления за фронтом УВ при жидким состоянии свинца не влияет существенно на размер частиц; в смеси жидкой и твердой фаз размер диспергированных частиц примерно в пять раз больше, чем в жидкой фазе; при твердом состоянии свинца на СП наблюдаются микроотколы.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета РФЯЦ-ВНИИ экспериментальной физики.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л., Крюков Н. И., Толочко А. П., Голубев В. А. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 6. — С. 103–107.
2. Невмержицкий Н. В., Михайлов А. Л., Раевский В. А., Сасик В. С., Макаров Ю. М., Сотсков Е. А., Абакумов С. А., Руднев А. В., Бурцев В. В., Лобастов С. А., Никулин А. А., Сеньковский Е. Д., Кривонос О. Л., Половников А. А., Апрелков О. Н. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца // ВАНТ. Сер. Теорет. и прикл. физика. — 2010. — № 3. — С. 3–6. — EDN: OKDPFH.
3. Невмержицкий Н. В., Раевский В. А., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д., Давыдов Н. Б., Бодров Е. В., Фролов С. В., Анисифоров К. В., Георгиевская А. Б., Левкина Е. В., Кривонос О. Л., Кучкарева А. С., Гавриш А. Р., Ткаченко Б. И. Некоторые особенности выброса частиц с поверхности ударно-нагруженного свинцового образца // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 5. — С. 82–89. — DOI: 10.15372/FGV20180511. — EDN: UXZFR.
4. Пат. РФ 139204 У1 на полезную модель. Устройство для регистрации микронных частиц в газодинамическом потоке / Абакумов С. А., Кривонос О. Л., Невмержицкий Н. В., Руднев А. В., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д., Точилина Л. В., Фролов С. В. — Зарегистр. 13.03.2014.
5. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А., Назаров Д. В., Чудаков Е. А., Калашников Д. А., Бутусов Е. И. Исследование особенностей поведения свинца при ударно-волновом нагружении и последующей разгрузке // XV Харитоновские тематич. науч. чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. — 2013. — С. 274–282.
6. Antipov M. V., Arinin V. A., Georgievskaya A. B. et al. Experimental and computational damage and ejecta studies of Pb explosively shock loaded to  $P_{SL} \approx 32$  — to 40-GPa // J. Dynamic Behavior Mater. — 2017. — V. 3, N 2. — P. 300–315. — DOI: 10.1007/s40870-017-0113-7.
7. Копышев В. П., Медведев А. Б. Термодинамическая модель сжимаемого коволюма. — Саров, 1995. — (Препр. / ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»).
8. Невмержицкий Н. В., Бодров Е. В., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д., Князев В. Н., Давыдов Н. Б., Анисифоров К. В., Кривонос О. Л., Соколова А. С., Гавриш А. Р., Фролов С. В. Структура потока частиц, выброшенных с поверхности ударно-нагруженных образцов свинца и меди // XXI Харитоновские тематич. науч. чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2019. — Т. 2. — С. 128–137.

Поступила в редакцию 16.02.2024.

После доработки 25.03.2024.

Принята к публикации 03.07.2024.