

ХАРАКТЕРИСТИКИ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ С ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СВИНЦА И МЕДИ ПРИ ДАВЛЕНИИ В УДАРНОЙ ВОЛНЕ 45–50 ГПа И РАЗГРУЗКЕ В ВАКУУМ

В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, С. В. Ерунов, С. А. Финюшин, Д. Е. Зотов, Н. В. Невмержицкий, А. И. Быструев, М. А. Сырунин, М. В. Антипов, А. В. Федоров, К. Н. Панов, Е. В. Кулаков, А. А. Утенков, И. В. Юртов, Е. А. Чудаков, И. В. Шмелев, А. О. Яговкин, А. В. Чапаев, А. В. Романов, А. В. Мишанов, Н. Б. Давыдов, В. В. Глушихин, И. А. Калашник, Е. Д. Сеньковский, Е. В. Бодров, А. В. Руднев, Д. Н. Замыслов, М. О. Лебедева*

*Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия*

Поступила в редакцию 10 марта 2019 г.,
после переработки 3 апреля 2019 г.
Принята к публикации 12 апреля 2019 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса ударно-индуцированного выброса частиц («пыления») со свободной шероховатой ($R_z = 20$) поверхности образцов из свинца и меди в вакуумированную среду при совместном использовании методик, основанных на разных физических принципах. Для того, чтобы более эффективно использовать теневую лазерно-оптическую методику по определению размеров частиц, в центре свободной поверхности образца выделяли узкую полоску, из которой выбрасывался оптически прозрачный поток частиц. С остальной, существенно большей по размерам, поверхности выбрасывался поток частиц, параметры которого надежно регистрировали с использованием методики гетеродин-интерферометра, рентгенографической и пьезоэлектрической методик. Это позволило получить более надежные данные о распределении частиц по размерам, скорости фронта потока частиц и распределении плотности (массы) потока в направлении его движения, необходимые для уточнения имеющихся и создания более обоснованных моделей описания явления. Использование образцов из свинца и меди, материал которых при выбранных близких условиях нагружения (амплитуда ударной волны, шероховатость свободной поверхности) плавится или не плавится на ударной волне, позволили отчетливо показать влияние плавления на качественную картину и количественные характеристики процесса ударно-индуцированного «пыления».

DOI: 10.1134/S0044451019090104

1. ВВЕДЕНИЕ

Эффект выброса частиц со свободной поверхности металлических образцов при выходе на нее ударной волны, или эффект ударно-индуцированного «пыления», обнаружен и в какой-то мере был исследован

в США начиная с 1950-х гг. [1,2]. Примерно в это же время такой эффект был исследован сотрудниками РФЯЦ-ВНИИЭФ, хотя отдельные результаты этих работ, дополненные авторами, были опубликованы значительно позже [3]. В качестве диагностики в этих исследованиях использовали фотохронографическую и рентгенографическую методики с использованием пленочных систем регистрации. Регистрируемые изображения потоков частиц были сильно размытыми, что связано с большими време-

* E-mail: k.evg.v@yandex.ru

нами экспозиции ($\sim 0.3\text{--}0.5$ мкс), поэтому можно было говорить только о качественной картине процесса и об оценочных значениях его кинематических характеристик.

Интерес к этому эффекту возобновился в конце прошлого – начале нынешнего столетий в связи с развитием высокоточной лазерной и оптико-электронной техники. Это позволило, например, в [4] впервые получить для образцов из свинца и стали распределения частиц по размерам ($\Delta \geq 15$ мкм) и скоростям ($v \leq 1.5$ км/с), подтвердить выводы численных исследований [5] о том, что процесс ударно-индуцированного «пыления» формируется путем распада струйных течений из микрорельефа свободной поверхности образца при выходе на нее ударной волны, а также показать, что вслед за «пылением» может реализоваться, при определенных условиях, независимый процесс откольного разрушения – расслоение образца за счет образования растягивающих напряжений при взаимодействии волн разрежения после отражения падающей ударной волны от свободной поверхности.

Тем не менее, несмотря на большое внимание к проблеме определения параметров ударно-индуцированных пылевых потоков в последнее десятилетие [4–24], ее решение еще далеко от завершения. Наименее исследованными характеристиками процесса выброса частиц (ejection) со свободной поверхности материала образца при выходе на нее ударной волны на сегодня являются спектры размеров частиц, распределения плотности (массы) в потоке частиц, влияние на них структуры и фазового состояния материала образца, параметров ударной волны, наличия или отсутствия газовой среды перед свободной поверхностью. Это препятствует построению физически обоснованных математических моделей, используемых для описания процессов «пыления». Анализ попыток построения таких моделей свидетельствует о необходимости получения дополнительных экспериментальных данных, особенно для нижней части спектра размеров частиц (≤ 10 мкм) [8, 10, 15, 20, 23].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно, что размеры выбрасываемых со свободной поверхности частиц и их скорости связаны с микроструктурой образца и микрорельефом его поверхности, а также с интенсивностью ударной волны, в том числе фазовым состоянием материала, и могут достигать от 0.1 до 100 мкм и от 1 до 10 км/с соответственно. Среди используемых методов опре-

деления размеров частиц в потоке можно назвать такие, как импульсная голография [14, 19], рассеяния Ми [18], теневая лазерно-оптическая микроскопическая съемка [4, 9, 17], торможение частиц в газе [16] и их улавливание [6]. В указанных работах диаметр исследуемой поверхности не превышал 15–30 мм. Многие из этих методов не нашли широкого применения из-за технических трудностей при постановке экспериментов и обработке полученной информации или из-за недостаточной разрешающей способности, особенно в области высоких давлений.

По нашему мнению, еще не потерял привлекательности метод теневой микроскопической съемки, с успехом примененной для определения спектра размеров частиц в [4, 9]. Это единственный метод, который позволяет напрямую визуализировать частицы и определять их размеры. Известно, что его ограничение связано с малой глубиной резкости и недостаточной разрешающей способностью, не превышающих в практических применениях 1 мм и 1 мкм соответственно [4]. Эти ограничения находятся в противоречии с желанием использовать большие размеры свободной поверхности исследуемого образца с целью создания более корректных условий нагружения и повышения информативности эксперимента путем использования в одном и том же эксперименте дополнительных методик измерения: рентгенографической, пьезоэлектрического датчика и гетеродин-интерферометра.

Для преодоления указанных выше ограничений в данной работе авторы использовали относительно большие образцы со специфической формой свободной поверхности, что позволило эффективно применить все указанные выше методики в одном и том же эксперименте. Образцы выполняли из свинца марки С1 и меди марки М1, материал которых при выбранных условиях нагружения плавится или не плавится на ударной волне соответственно [16, 22, 25]. Реализация плавления представляет определенный интерес, поскольку может заметно влиять на интенсивность ударно-индуцированного «пыления» и спектр размеров частиц [16]. Образцы из свинца и меди диаметром 108 мм и толщиной 2 мм были изготовлены со специально обработанной свободной поверхностью, вид которой показан на рис. 1. Особенностью свободной поверхности является наличие на ней узкой полоски (шириной 0.4 мм и длиной 12 мм), которая имеет ту же шероховатость, что и основная часть поверхности образца $R_z \approx 20$ (свинец — $2\alpha_0 = 18$ мкм, $\lambda = 150$ мкм; медь — $2\alpha_0 = 20$ мкм, $\lambda = 150$ мкм), а часть поверхности слева и справа от полоски обработана до шероховатости $R_a = 0.1$ (зер-

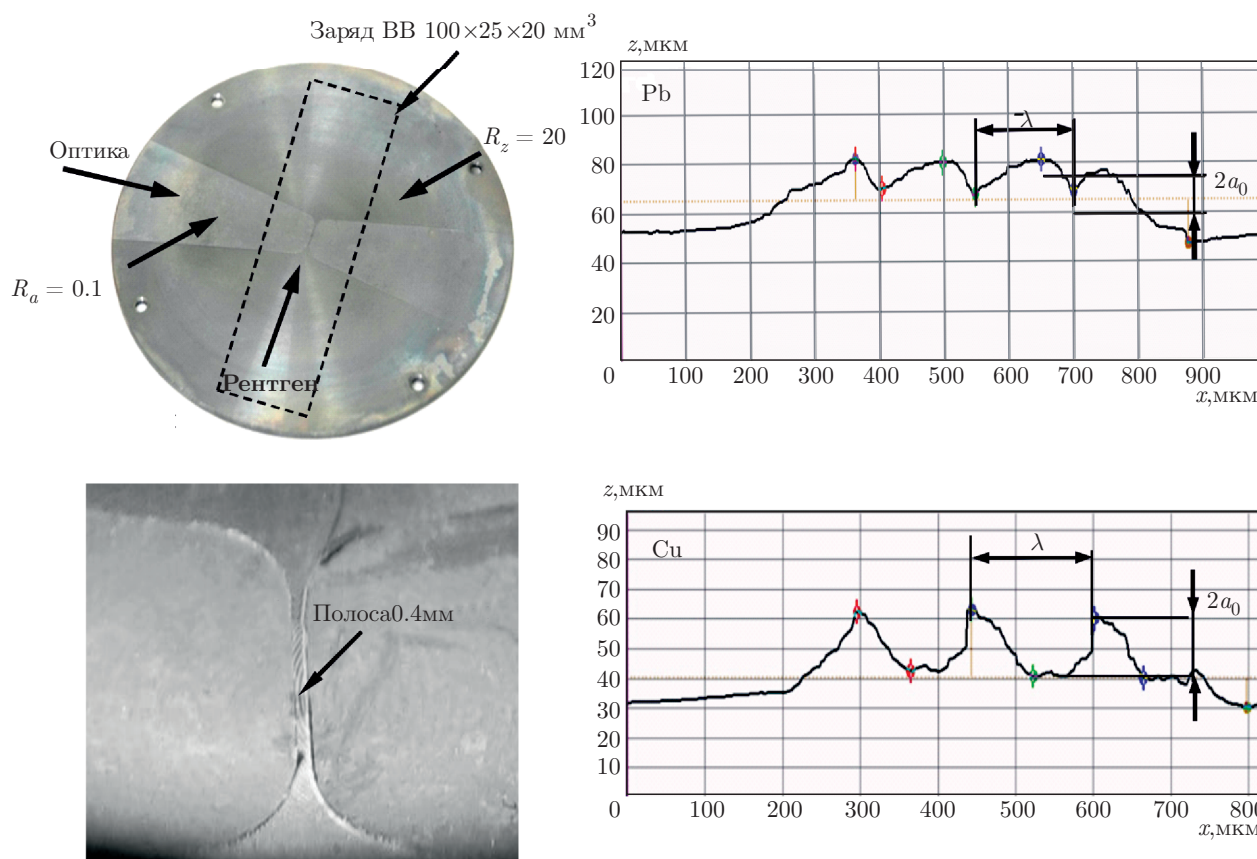


Рис. 1. Фотографии свободной поверхности и профилограммы поверхности полосы для образцов из свинца и меди

кало). Исследуемые образцы были изготовлены из дисков-заготовок большего диаметра для того, чтобы центр точения (центральная точка от токарной обработки) был сдвинут относительно центра полоски приблизительно на 5 мм. Это позволило иметь у полоски и основной части исследуемой свободной поверхности идентичный микрорельеф или шероховатость $R_z \approx 20$, обусловленную токарной обработкой. Из такой узкой полоски выбрасывается оптически прозрачный поток пыли, в котором возможно разрешение отдельных частиц размером до 5 мкм с использованием оптической съемки [24].

Регистрацию процесса «пыления» с использованием лазерно-оптической микроскопической методики проводили перпендикулярно длине полоски ССD-видеокамерами (разрешение кадра 2048×2048 Мп², размер пикселя 7 мкм) через телескопическую систему от микроскопа ИМЦ 100 $\times$ 50 А. Оптическое увеличение составляло $k \approx (5-7)$ крат. Для подсветки пылевого потока использовали двухимпульсный лазер с длиной волны 532 нм и длительностью импульса 4 нс. На расстоянии около 16 мм от свободной поверхности

образца по центру узкой полоски устанавливали репер (проволоку диаметром 220 мкм), по которому масштабировали размеры частиц. При таких параметрах оптической системы возможна регистрация частиц с размерами 5 мкм и более (подробно схему регистрации методики и ее разрешение можно найти в работе [24]).

Регистрацию с использованием рентгенографической методики проводили в направлении, перпендикулярном направлению регистрации оптической методики (показано стрелками на рис. 1). В этом направлении протяженность (l) шероховатой поверхности составляла 90 мм. Такая оптическая толщина (ρl) пылевого потока позволяла обеспечить повышение точности определения его плотности и массы. В этом же направлении под свободной поверхностью образца устанавливали четыре пьезоэлектрических датчика и четыре оптических датчика методики гетеродин-интерферометра на расстоянии 75 и 77 мм от нее соответственно.

На рис. 1 пунктиром обозначено место расположения на тыльной поверхности образца заряда взрывчатого вещества (ВВ) на основе октогена пря-

моугольной формы с размерами $100 \times 25 \times 20 \text{ мм}^3$, который инициировали по наружной поверхности ударом фольги из меди толщиной 0.3 мм со скоростью $\approx 1.2 \text{ км/с}$. Удлиненную часть заряда взрывчатого вещества располагали в направлении рентгенографирования. В исследуемых образцах из свинца и меди формировалась ударная волна тейлоровского вида с амплитудой давления на фронте ≈ 45 и 50 ГПа и скоростью уменьшения за фронтом ≈ 65 и 31 ГПа/см , что соответствовало нахождению этих материалов на ударной адиабате ниже и выше их давления плавления на ударной волне [16, 22, 25]. Свободная поверхность образцов граничила с вакуумированной средой при давлении $P \leq 10^3 \text{ Па}$.

Эксперименты проводили на аппаратном комплексе «Пыление» [21]. В каждом опыте с использованием перечисленных выше методик определяли качественную картину и количественные характеристики процесса «пыления»: распределения частиц по размерам, плотности, массы и скорости потока частиц в направлении его движения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 и 3 приведены отдельные видеокадры, фотохронограммы, рентгенограммы, осциллограммы и спектрограммы, полученные в проведенных опытах. Результаты их обработки в виде распределений частиц по размерам, плотности и массе потока частиц в направлении их движения, $x(t)$ -диаграмм движения свободной поверхности (СП) и фронта потока (ФП) частиц приведены на рис. 4 и в таблице.

Видеокадры микросъемки обрабатывали по специальной математической программе, с помощью которой определяли площадь изображения S частиц, лежащих в фокусе оптической системы (т.е. частиц с гистограммой почернения, близкой к гистограмме репера) [20]. Диаметр частицы d определяли по площади ее изображения S и масштабировали на размер репера. По результатам метрологической экспертизы относительная погрешность измерения диаметра частицы по этой программе составляет 17 %. Распределение частиц «пыли» по размерам $R(d)$ определяли по формуле

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

где N — общее количество рассматриваемых частиц в видеокадре, n_i — количество частиц в i -интервале диаметров с учетом количества в предыдущем интервале.

Использование узкой полоски на свободной поверхности образцов и лазерно-оптической микроскопической методики регистрации позволило выявить принципиальное отличие в качественной картине (рис. 2) пылевых потоков в случае ударно-волнового нагружения образцов из меди и свинца с амплитудами давлений ≈ 50 и 45 ГПа соответственно, при которых медь не плавится, а свинец плавится на ударной волне [16, 22, 25]. В первом случае (медь) наблюдается выброс частиц (рис. 2б), которые образуются при распаде микроструй, формирующихся из микронеровностей свободной поверхности при выходе на нее ударной волны. Затем формируется область откольного разрушения в виде тонких пластин, связанная с взаимодействием волны разрежения, идущей за падающей ударной волной и возникающей после ее отражения от свободной поверхности. В зависимости от рельефа поверхности (выделенной полоски) откольные слои могут иметь вид «чешуек», наблюдаемых на рис. 2б,г и 3б. Подобную качественную картину исследуемого процесса отчетливо наблюдали в работе [4] для свинца при давлении на фронте ударной волны 15 ГПа , при котором свинец находится в твердом состоянии (не плавится на ударной волне). Однако в данном случае ($P \approx 45 \text{ ГПа}$ и свинец плавится на ударной волне) имеет место образование струйных потоков частиц из впадин микрорельефа свободной поверхности, которые со временем из-за градиента скорости вдоль струи распадаются на отдельные частицы (рис. 2а,в). На рис. 4а дополнительно приведен спектр размеров потока частиц из свинца при давлении 15 ГПа из [17], при котором свинец не плавится на ударной волне и волне разгрузки. Видно, что в этом случае спектр размеров частиц сдвинут вправо, т.е. отчетливо видно влияние плавления материала в ударной волне на качественную картину и количественные характеристики спектра размеров частиц [4, 16]. Подобную качественную картину ударно-индуцированного пыления наблюдали в [3] для цилиндрических оболочек из меди и свинца при их нагружении ударной волной с амплитудой $\sim 60 \text{ ГПа}$. В целом можно отметить, что выбранный способ выполнения свободной поверхности с узкой полоской для оптических измерений вполне оправдан. Использование в дальнейшем оптической системы с увеличением $k \geq 10$ и лазера с пикосекундной длительностью импульса для подсветки потока позволит отчетливо регистрировать частицы с размерами 1–5 мкм, т.е. продвинуться в более интересную область спектра их размеров.

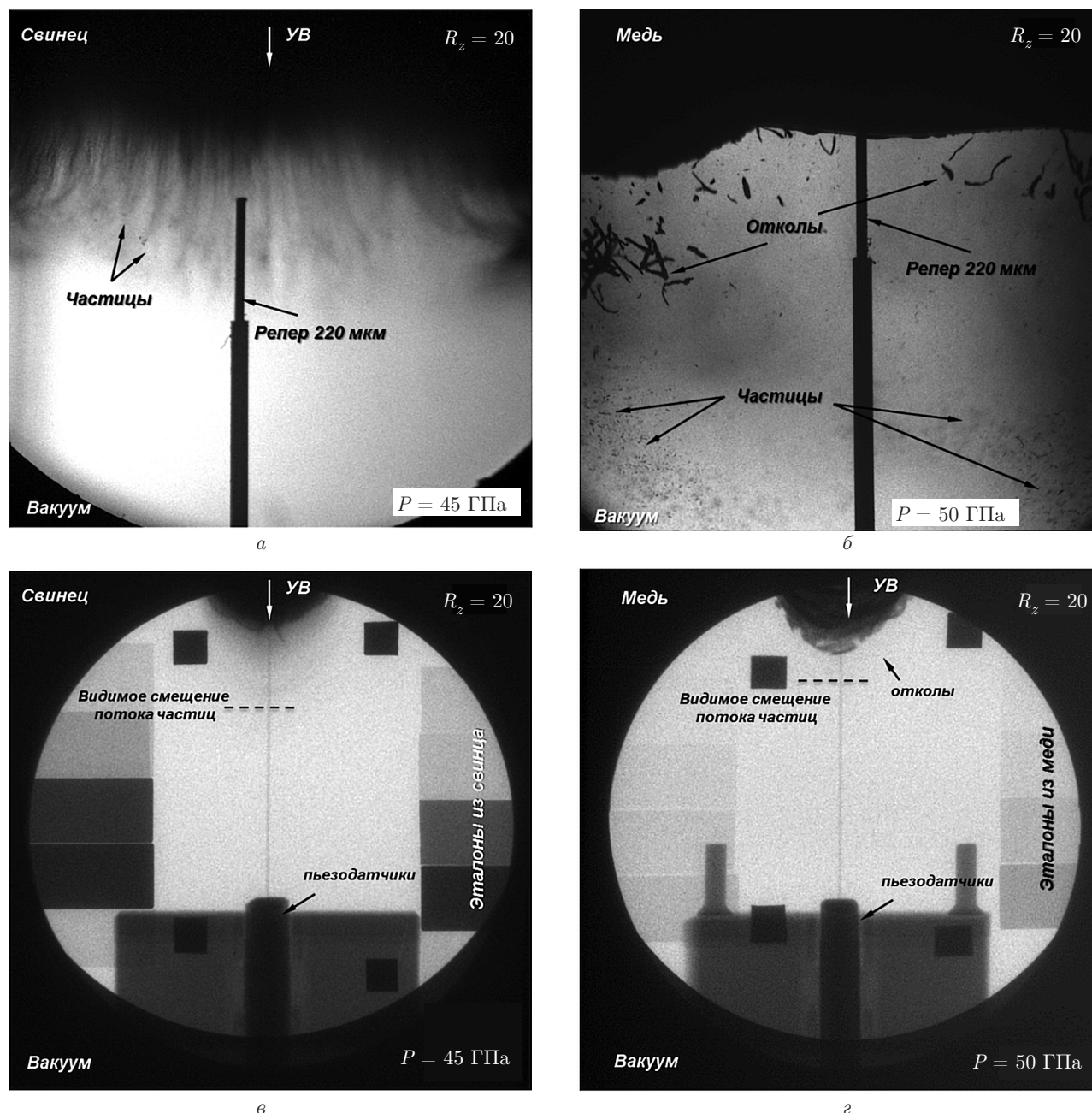


Рис. 2. Фотохронограммы (а,б) и рентгенограммы (в,г) опытов для образцов из свинца и меди

Интересно отметить, что с помощью датчиков методики гетеродин-интерферометра удалось зарегистрировать в опытах со свинцом поток частиц (рис. 3а), а в опытах с медью — как частицы, так и отдельные откольные слои (рис. 3б), что согласуется с данными оптической и рентгенографической методик (рис. 2). Этот экспериментальный результат подтверждает сделанный ранее на основе расчетов вывод о первичности и независимости удар-

но-индуцированного пыления от процесса откольного разрушения [5]. Из таблицы и рис. 4б следует, что скорости движения свободной поверхности и фронта потока частиц, определенные с использованием различных методик, близки. При этом скорости частиц из свинца и меди превышают скорости свободной поверхности приблизительно в 1.6 и 1.4 раза соответственно. Как следует из рис. 4б,в, распределения величин плотности и массы потока частиц из свин-

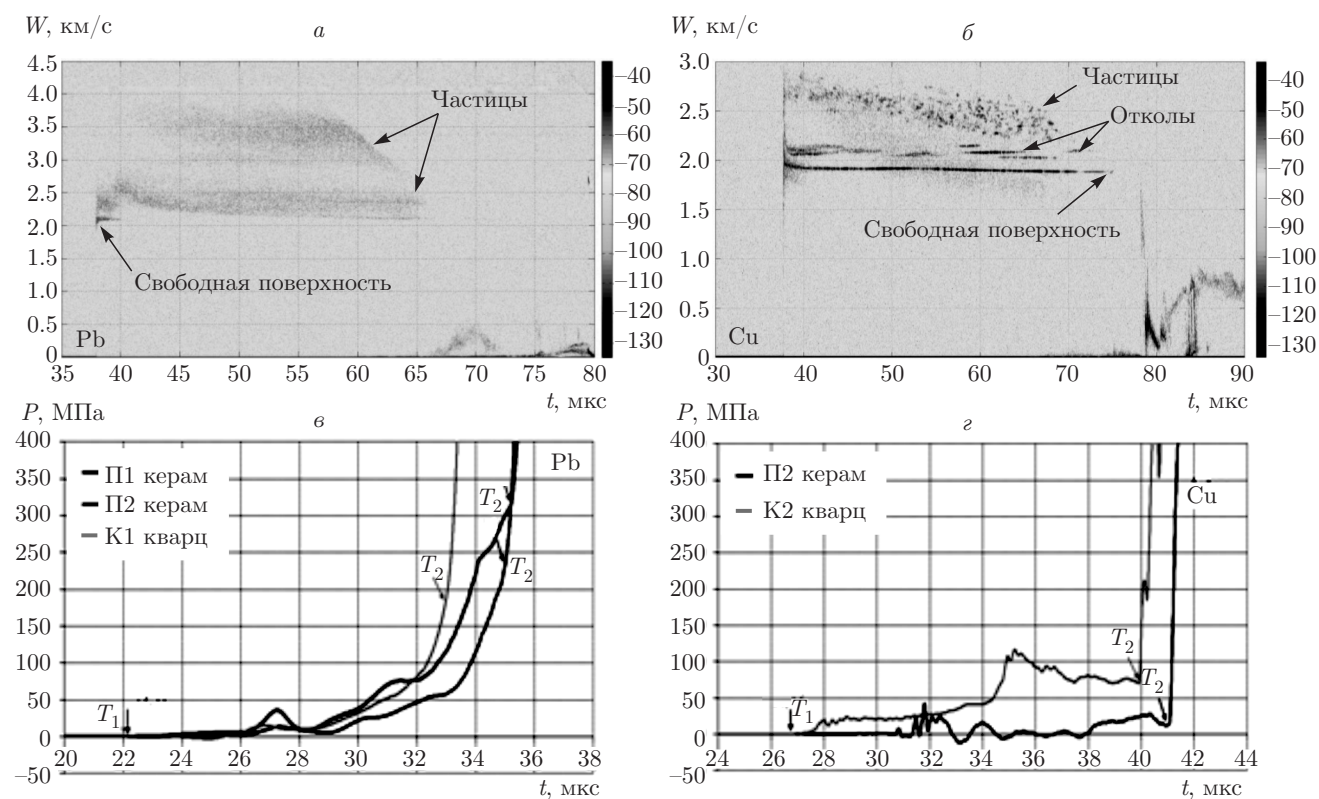


Рис. 3. Спектрограммы с оптических датчиков методики гетеродин-интерферометра (*а,б*) и осциллограммы с пьезодатчиков (*в,г*). T_1 , T_2 — моменты времени нагружения пьезодатчика соответственно фронтом потока частиц и свободной поверхностью образца

Таблица. Результаты измерений и оценок основных характеристик процесса выброса частиц

Методика	Свинец						Медь					
	Скорость СП, км/с		Скорость ФП, км/с		Удельная масса пыли, мг/см ²		Скорость СП, км/с		Скорость ФП, км/с		Удельная масса пыли, мг/см ²	
№ опыта	1	2	1	2	1	2	3	4	3	4	3	4
Рентген	2.1	2.2	3.8	3.2	26.0	24.0	1.9	2.0	2.8	—	17.0	9.0
Оптика	—	—	4.0	2.8–3.0	—	—	—	2.0	3.3	3.2	—	—
Пьезо	2.2	2.2	3.5	3.4	26.4	22.9	1.9	1.9	2.7	3.3	14.1	10.5
Гетеродин-интерферометр	2.2	—	4.0	3.4	—	—	1.8	—	—	—	—	—

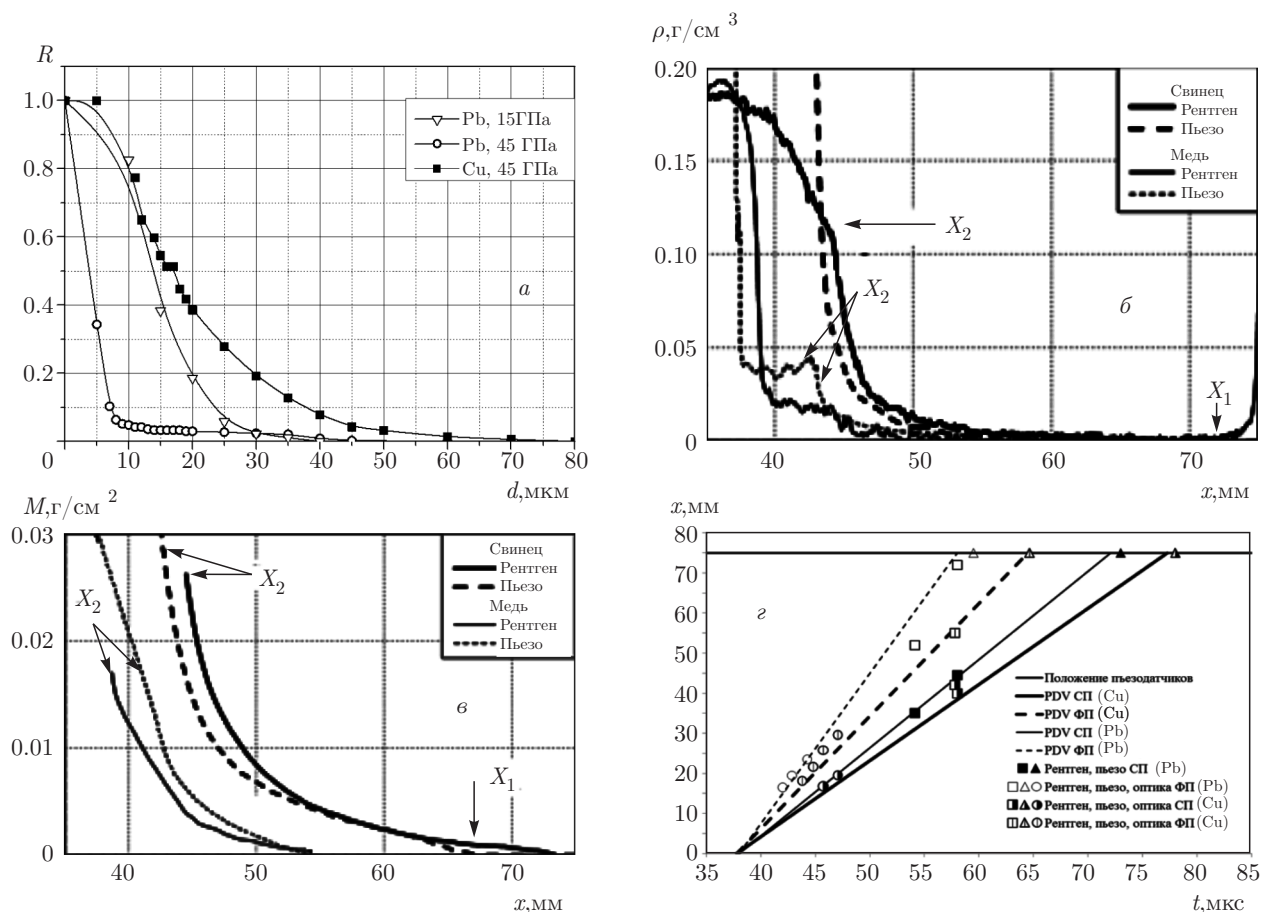


Рис. 4. Распределение частиц по размерам (а), плотности (б), массе (в) в потоке и x - t -диаграммы движения свободной поверхности и фронта потока частиц (г). X_1 , X_2 — координаты соответственно фронта потока частиц и свободной поверхности образца

ца в направлении их движения расположены выше, чем для потока частиц из меди. При этом удельная на единицу поверхности масса частиц в потоке для образцов из свинца ($m \approx 20\text{--}30 \text{ мг/см}^2$) примерно в два раза больше аналогичной величины для меди ($m \approx 10\text{--}15 \text{ мг/см}^2$). Такое различие связано, по-видимому, с механизмом более развитого струйного течения со свободной поверхности расплавленного на ударной волне свинца (рис. 2а,б).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных данных следует, что совместное использование методик, основанных на различных физических принципах, и выполнение свободной поверхности образца с узкой полоской позволило более надежно определить основные количественные характеристики процесса ударно-индуцированного

пыления: скорости движения фронта потока частиц, распределения частиц по размерам (в области спектра $\geq 5 \text{ мкм}$), плотности и массы потока частиц в направлении его движения, и отчетливо показать влияние фазового состояния (плавления) материала образца на качественную картину и количественные характеристики процесса, что особенно важно для построения его физически обоснованной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. M. Walsher, R. G. Shreffler, and F. J. Willing, J. Appl. Phys. **24**, 349 (1953).
2. J. R. Asay and L. M. Barker, J. Appl. Phys. **45**, 2540 (1974).
3. В. А. Огородников, А. Г. Иванов, А. Л. Михайлов, Н. И. Крюков, А. П. Толочко, В. А. Голубев, Физика горения и взрыва **34**, 103 (1998).

4. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, В. В. Бурцев, С. А. Лобастов, С. В. Ерунов, А. В. Романов, А. В. Руднев, Е. В. Кулаков, Ю. Б. Базаров, В. В. Глушихин, И. А. Калашник, В. А. Цыганов, Б. И. Ткаченко, *ЖЭТФ* **136**, 6 (2009).
5. С. Б. Бахрах, И. Ю. Безрукова, А. Д. Ковалева, С. С. Косарин, О. В. Ольхов, ВАНТ, сер.: Матем. моделирование физических процессов, вып. 3, 14 (2005).
6. T. Resseguier, L. Signor, A. Dragon, M. Boustie, G. Roy, and F. Llorca, *J. Appl. Phys.* **101**, 013506 (2007).
7. M. B. Zellner, M. Grover, J. E. Hammerberg, R. S. Hixson, A. J. Iverson, G. S. Macrum, K. B. Morley, A. W. Obst, R. T. Olson, J. R. Payton, P. A. Rigg, N. Routley, G. D. Stevens, W. D. Turley, L. Veaser, and W. T. Buttler, *J. Appl. Phys.* **102**, 013522 (2007).
8. T. C. Germann, J. E. Hammerberg, and G. Dimonte, *7th Biannual Int. Conf. New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter*, Portugal (2008), pp. 18–23.
9. Н. В. Невмержицкий, А. Л. Михайлов, В. А. Раевский, В. С. Сасик, Ю. М. Макаров, Е. А. Сотсков, А. В. Руднев, *Труды XIII международной конференции Харитоновские научно-тематические чтения*, Саров (2011), с. 604.
10. А. Б. Георгиевская, В. А. Раевский, *Труды XIII международной конференции Харитоновские научно-тематические чтения*, Саров (2011), с. 597.
11. G. Dimonte, G. Terrones, and F. Cherne, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 264502 (2011).
12. Yongtao Chen, Haibo Hu, Tiegang Tang, Guowu Ren, and Qingzhong Li, *J. Appl. Phys.* **111**, 053509 (2012).
13. D. M. Or'о, J. E. Hammerberg, W. T. Buttler, F. G. Mariam, C. Morris, C. Rousculp, and J. B. Stone, *AIP Conf. Proc.* **1426**, 1351-4 (2012).
14. D. S. Sorenson, R. M. Malone, G. A. Capelle, P. Pazuchanics, R. P. Johnson, M. L. Kaufman, A. Tibbitts, T. Tunnell, D. Marks, M. Grover, B. Marshall, G. D. Stevens, W. D. Turley, and B. LaLone, *Proc. NEDPC 2013*, Livermore, California, US, LA-UR-14-23036 (2013).
15. М. В. Антипов, А. Б. Георгиевская, В. В. Игонин, В. Н. Князев, А. И. Лебедев, М. О. Лебедева, К. Н. Панов, В. А. Раевский, В. Д. Садунов, А. А. Утенков, И. В. Юртов, *Труды XV международной конференции Харитоновские научно-тематические чтения*, Саров (2013), с. 666.
16. А. В. Федоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин, Д. В. Назаров, Е. А. Чудаков, Д. А. Калашников, Е. И. Бутусов, *Труды XV международной конференции Харитоновские научно-тематические чтения*, Саров (2013), с. 274.
17. Н. В. Невмержицкий, Е. А. Сотсков, Е. Д. Сеньковский, С. А. Абакумов, С. В. Фролов, О. А. Кривонос, А. В. Руднев, О. Н. Апрельков, А. Б. Георгиевская, *Труды XV международной конференции Харитоновские научно-тематические чтения*, Саров (2013), с. 655.
18. S. K. Monfared, D. M. Or'о, M. Grover, J. E. Hammerberg, B. M. LaLone, C. L. Pack, M. M. Schauer, G. D. Stevens, J. B. Stone, W. D. Turley, and W. T. Buttler, *J. Appl. Phys.* **116**, 063504 (2014).
19. S. K. Monfared, W. T. Buttler, D. K. Frayer, M. Grover, J. E. Hammerberg, B. M. LaLone, G. D. Stevens, J. B. Stone, W. D. Turley, and M. M. Schauer, *J. Appl. Phys.* **117**, 223105 (2015).
20. А. Л. Михайлов, В. А. Огородников, В. С. Сасик, В. А. Раевский, А. И. Лебедев, Д. Е. Зотов, С. В. Ерунов, М. А. Сырунин, В. Д. Садунов, Н. В. Невмержицкий, С. А. Лобастов, В. В. Бурцев, А. В. Мишанов, Е. В. Кулаков, А. В. Сатарова, А. Б. Георгиевская, В. Н. Князев, О. А. Клещевников, М. В. Антипов, В. В. Глушихин, И. В. Юртов, А. А. Утенков, Е. Д. Сеньковский, С. А. Абакумов, Д. В. Пресняков, И. А. Калашник, К. Н. Панов, В. А. Аринин, Б. И. Ткаченко, В. Н. Филияев, А. В. Чапаев, А. В. Андраманов, М. О. Лебедева, В. В. Игонин, *ЖЭТФ* **145**, 5 (2014).
21. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, В. С. Сасик, С. В. Ерунов, М. А. Сырунин, А. В. Федоров, Н. В. Невмержицкий, Е. В. Кулаков, О. А. Клещевников, М. В. Антипов, И. В. Юртов, А. В. Руднев, А. В. Чапаев, А. С. Пупков, Е. Д. Сеньковский, Е. А. Сотсков, В. В. Глушихин, И. А. Калашник, С. А. Финюшин, Е. А. Чудаков, Д. А. Калашников, *ЖЭТФ* **149**, 6 (2016).
22. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, С. В. Ерунов, М. В. Антипов, А. В. Федоров, М. А. Сырунин, Е. В. Кулаков, О. А. Клещевников, И. В. Юртов, А. А. Утенков, С. А. Финюшин, Е. А. Чудаков, Д. А. Калашников, А. С. Пупков, А. В. Чапаев, А. В. Мишанов, В. В. Глушихин, А. В. Федосеев, Р. Р. Тагиров, С. А. Костюков, И. Ю. Тагирова, Е. В. Сапрыкина, *ЖЭТФ* **152**, 6 (2017).
23. W. T. Buttler, S. K. Lamoreaux, R. K. Schulze, J. D. Schwarzkopf, J. C. Cooley, M. Grover, J. E. Hammerberg, B. M. LaLone, A. Llobet, R. Manzanares, J. I. Martinez, D. W. Schmidt, D. G. Sheppard, G. D. Stevens, W. D. Turley, and

- L. R. Veaser, J. Dynamic Behavior Mater. **3**, 334 (2017).
24. Н. В. Невмержицкий, В. А. Раевский, Е. А. Сотсков, Е. Д. Сеньковский, Н. Б. Давыдов, Е. В. Бодров, С. В. Фролов, К. В. Анисифоров, А. Б. Георгиевская, Е. В. Левкина, О. Л. Кривонос, А. С. Кучкарева, А. Р. Гавриш, Б. И. Ткаченко, Физика горения и взрыва **54**, 5 (2018).
25. В. П. Копышев, А. Б. Медведев, *Термодинамическая модель сжимаемого ковалюма*, Препринт, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (1995).