

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА РЕГИСТРАЦИИ МИНИМАЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ МАССЫ ЧАСТИЦ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УДАРНОВОЛНОВОГО ПЫЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ГЕТЕРОДИН-ИНТЕРФЕРОМЕТРА. РЕГИСТРАЦИЯ ЭФФЕКТА МНОГОКРАТНОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА

*А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, С.А. Финюшин, Д.А. Калашников,  
Е.А. Чудаков, Е.И. Бутусов, И.С. Гнутов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Известно, что в условиях ударноволнового нагружения с поверхности материалов происходит выброс частиц. В данной работе приведены результаты экспериментов по определению минимальных значений удельной массы частиц, при которых скорость их движения возможно зарегистрировать с помощью методики гетеродин-интерферометра (PDV) [1]-[2]. Описан эффект многократного сдвига частоты доплеровского сигнала при отражении лазерного излучения от поверхности металлов и полупрозрачного слоя пылевых частиц.

### Введение

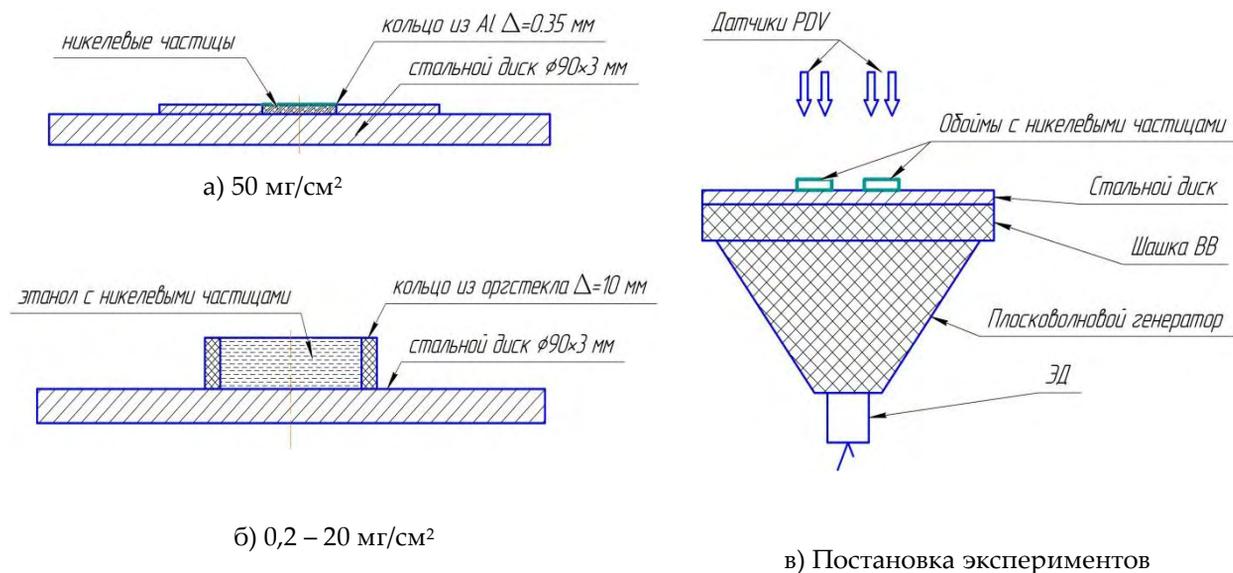
Определение характеристик потоков частиц при ударноволновом пылении материалов в последние годы является предметом исследования многих научных работ [3]-[11]. Новые результаты в этой области получают, в том числе, с помощью лазерного гетеродин-интерферометра (методика PDV). Гетеродин-интерферометр позволяет регистрировать спектр скоростей частиц, оценивать их размер по закону торможения в газе, с использованием индикаторных фольг – определять их удельную массу. Однако данная методика имеет и ряд особенностей, требующих детального анализа. Важно знать: как глубоко проникает зондирующее излучение в пылевой поток, как интерпретировать появление на спектрограммах треков скорости, каковы минимальные значения удельной массы частиц, при которых метод эффективно регистрирует дисперсию скорости пылевого облака.

### Постановка экспериментов

Минимальная удельная масса частиц, регистрируемая методикой PDV, определялась с использованием никелевых частицы размером  $\leq 3$  мкм и насыпной плотностью  $\rho = 1,35$  г/см<sup>3</sup>. Они наносились на поверхность стальных дисков ( $\varnothing 90 \times 3$  мм) двумя способами. В первом случае частицы ровным слоем насыпались в кольцо  $\varnothing 20 \times 0,35$  мм. Удельная масса частиц в этих опытах составила 50 мг/см<sup>2</sup> (рисунок 1а). Во втором случае для создания на поверхности дисков равномерного распределения частиц с удельной массой от 0,2 мг/см<sup>2</sup> до 20 мг/см<sup>2</sup> использовалась следующая методика. Сначала в емкости с этанолом известного объема помещались никелевые частицы заданной массы, затем полученная взвесь тщательно перемешивалась и заливалась в кольцо из оргстекла  $\varnothing 20 \times 10$  мм, закрепленное на поверхности стального диска (см. рисунок 1б). После высыхания этанола на поверхности металлических дисков оставался слой никелевых частиц известной удельной массы. Распределение этих частиц по поверхности дисков не всегда было равномерным. Для опытов готовилось несколько образцов и из них для проведения эксперимента выбирались лучшие по указанному признаку. Одним из факторов неравномерного распределения частиц, например, являлось то, что при малых удельных массах частиц (0,2 – 1 мг/см<sup>2</sup>) в конечной стадии испарения жидкий слой разбивается на капли, которые при высыхании стягивают за собой никелевые частицы и формируют области их концентрации в виде круглых пятен размером  $\sim 0,1$  мм. Такая полупрозрачная сетчатая структура слоя частиц позволила зарегистрировать новые физические эффекты, о чем речь пойдет ниже.

Всего проведено восемь экспериментов: семь из них со сборками с удельной массой частиц от 0,2 до 20 мг/см<sup>2</sup> (причем в каждом опыте исследовались по четыре сборки с двумя разными удельными массами, т.е. в центральной части стального диска размещалось четыре кольца с

никелевыми частицами) и один опыт с удельной массой частиц  $50 \text{ мг/см}^2$  (см. рис.1а). Схема постановки экспериментов представлены на рисунке 1в. Пыление никелевых частиц происходило при нагружении плоской ударной волной от заряда ВВ из октогена или ТГ 5/5  $\text{Ø}90$  и толщиной 5-25 мм, инициируемого плосковолновым генератором (ПГ)  $\text{Ø}90$  (рисунок 1в). Давление ударной волны (УВ) в стальных образцах составило 10-40 ГПа. В ряде экспериментов для уменьшения давления УВ в стальных образцах  $\text{Ø}90$  ( $P < 20 \text{ ГПа}$ ) нагружение стального диска происходило через слой пенопласта толщиной 30 мм.



**Рисунок 1.** Нанесение частиц на поверхность стальных образцов и постановка экспериментов

Кольца из оргстекла (рисунок 1б) перед опытами удалялись для исключения их откольного разрушения и формирования дополнительных источников пыления. Так как плотность никелевых частиц ( $\rho = 1,35 \text{ г/см}^3$ ) меньше плотности стальной подложки, то частицы заведомо должны отлетать от неё после выхода ударной волны на СП.

**Экспериментальные результаты**

Результаты экспериментов с никелевым порошком в порядке уменьшения удельной массы частиц (от  $50 \text{ мг/см}^2$  до  $0,2 \text{ мг/см}^2$ ) представлены в таблице 1, где  $W_{СП}$  – скорость движения свободной поверхности (СП) стального образца (км/с),  $P$  – давление в стальном образце (ГПа),  $d$  – диаметр никелевых частиц (мкм), рассчитанный по закону их торможения в газе [9-12].

**Таблица 1.** Результаты экспериментов

Рисунок	$M_{уд}$ , мг/см <sup>2</sup>	$W_{ФП}^{max}$ , м/с	$W_{СП}$ , км/с	$P$ , ГПа	$d$ , мкм
2.1	50	0,82	0,65	10,8	1,6
2.2	20	4,15	1,85	38,4	1,3
2.3	10	3,05	1,45	28,1	1,0
2.4	2	4,15	1,85	38,4	1,4
2.5	2	4,15	1,85	38,4	1,4
2.6	1	3,65	1,73	35,2	1,1
2.7	0,5	1,05	1,05	18,9	-
2.8	0,2	1,05	1,05	18,9	-

На рисунке 2 приведены характерные спектрограммы опытов. В ряде экспериментов зарегистрированы характерные откольные импульсы для материала подложки – сталь 20. Величина откольной прочности составила  $\sigma_{отк} = 3,1 - 3,4$  ГПа.

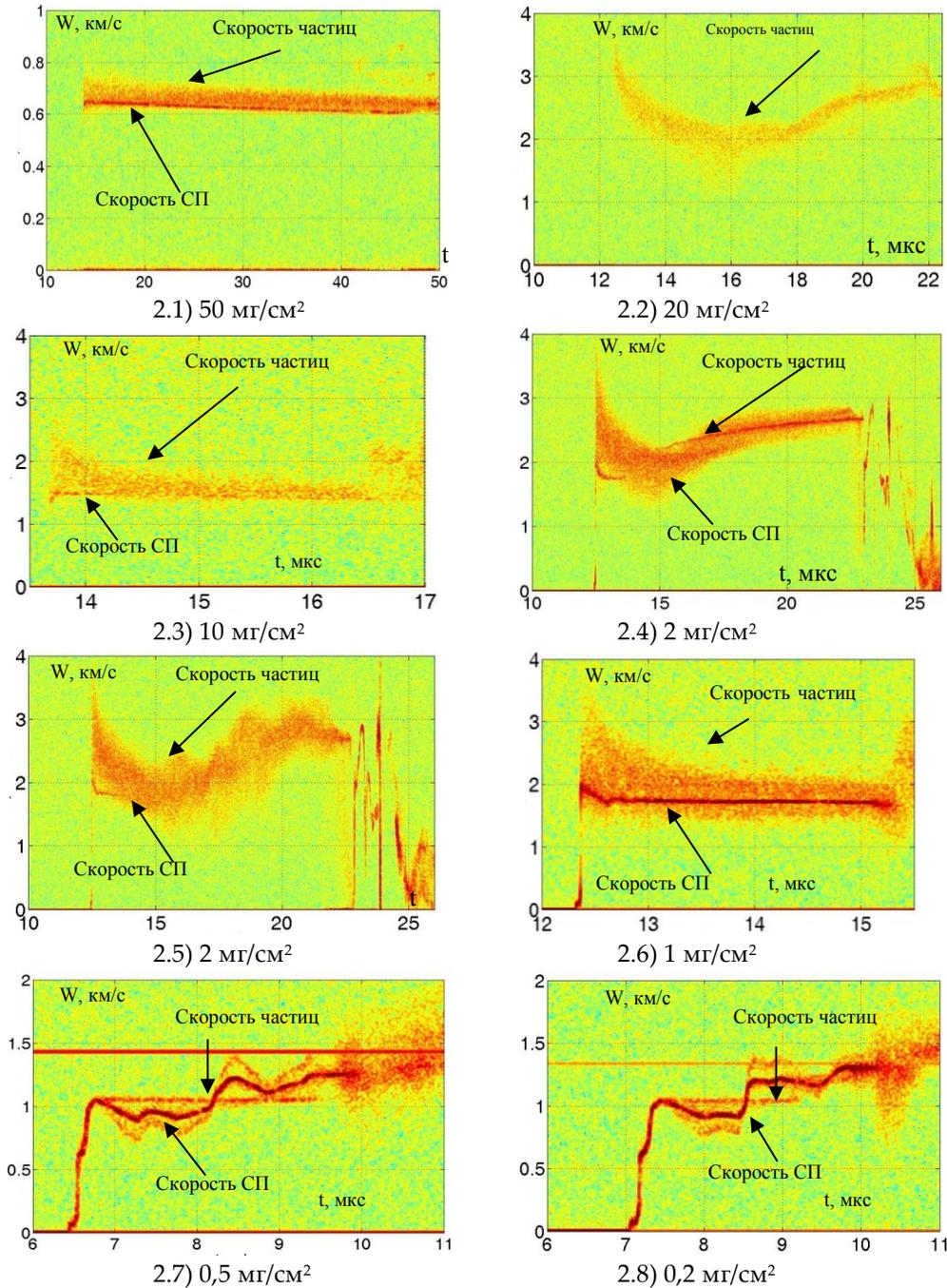


Рисунок 2. Спектрограммы экспериментов

В экспериментах 2.1 – 2.6 на спектрограммах зарегистрированы скорости облака никелевых частиц. Спад скорости частиц обусловлен их торможением на воздухе. Максимальные значения скорости фронта потока частиц при выходе ударной волны на СП могут достигать 3 – 3,5 км/с (рис.2.2-2.6). На рисунках 2.7 и 2.8 представлены результаты экспериментов с удельной массой 0,5 мг/см<sup>2</sup> и 0,2 мг/см<sup>2</sup>. Видно, что зарегистрирована постоянная скорость частиц. Однако, предел порога регистрации удельной массы частиц еще не достигнут. Это видно из спектрограмм опытов

2.6-2.8, где скорость частиц регистрируется в виде достаточно яркой линии или облака. Таким образом, имеется запас по интенсивности отражённого сигнала и проведённые по большой серии экспериментов по ударноволновому пылению материалов [9]-[11] оценки показывают, что минимальный предел может составлять 0,02 – 0,05 мг/см<sup>2</sup>. По результатам экспериментов данной работы мы можем утверждать, что методика PDV надёжно регистрирует удельную массу частиц 0,2 мг/см<sup>2</sup>.

### Регистрация эффекта многократного сдвига частоты доплеровского сигнала

В опытах с малой удельной массой частиц (рисунки 2.7, 2.8) на спектрограммах наблюдаются интересные физические эффекты. Первый эффект связан со взаимодействием лазерного излучения с полупрозрачным слоем частиц [12]. На спектрограммах (см. рисунок 3) наряду со скоростью СП регистрируется так называемый переотражённый сигнал – удвоенная скорость СП относительно скорости полупрозрачного слоя частиц. Механизм возникновения данного эффекта схематично показан на рисунке 4 и заключается в следующем. При отражении зондирующего излучения от СП происходит сдвиг частоты сигнала  $\omega_1 = 2 \frac{V_1}{c} \omega_0$ . Далее лазерный луч переотражается назад со

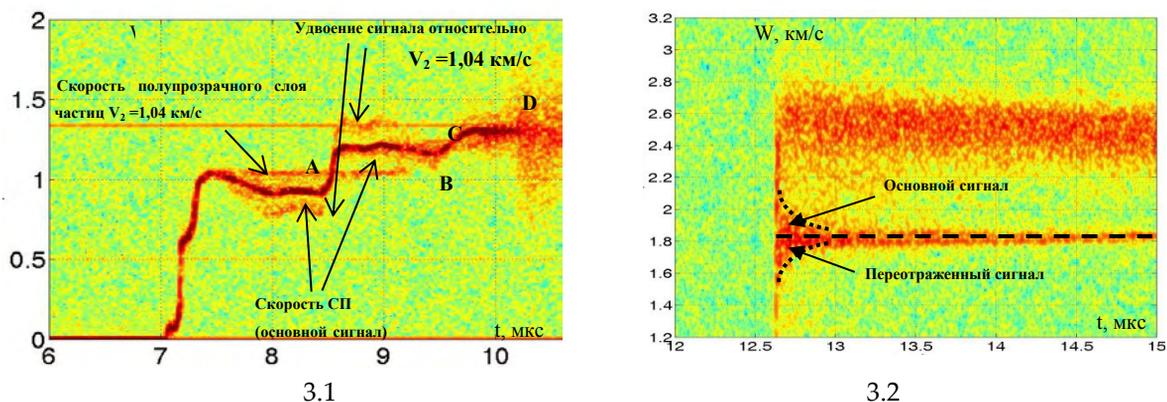
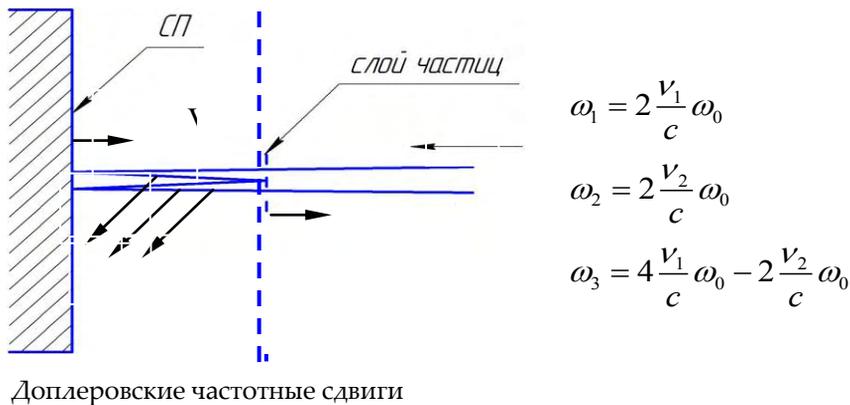


Рисунок 3. Удвоение сигнала при отражении от слоя частиц

Например, скорость СП в точке А (рисунок 3.1) составляет  $V_1 = 0,92$  км/с. Лазерное излучение, отраженное от СП ( $V_1 = 0,92$  км/с), переотражается от слоя частиц в сторону СП ( $V_2 = -1,04$  км/с) и затем снова отражается от СП ( $V_1 = 0,92$  км/с). В результате скорость дважды отраженного от СП сигнала составляет  $V_3 = 0,92 + 0,92 - 1,04 = 0,8$  км/с. Удвоенный сигнал с данной скоростью мы и наблюдаем на спектрограмме. СП в точке В догоняет полупрозрачный слой частиц, он приобретает скорость СП и эффект исчезает.

Данный эффект удвоения скорости часто наблюдается при регистрации торможения выброшенных с поверхности частиц (рисунок 3.2). В результате переотражения зондирующего излучения между свободной поверхностью и тормозящимися частицами на спектрограмме возникает составляющая, которая лежит ниже скорости СП.

Второй эффект заключается в том, что на спектрограммах опытов с малой удельной массой (рисунки 2.7, 2.8) дисперсия скорости частиц практически отсутствует. Вместо скоростей облака частиц регистрируется линия, которая соответствует движению тонкого полупрозрачного слоя со скоростью, равной скорости пика откольного импульса. По нашему мнению, это связано с тем, что время взаимодействия УВ, выходящей со стороны металлической подложки с тонким слоем частиц, крайне мало. В результате выброса облака частиц и распределения частиц по скоростям (дисперсия скорости) не происходит, а тонкому слою частиц передается импульс откольного пика. Действительно, исходя, например, из удельной массы 0,5 мг/см<sup>2</sup>, средняя толщина слоя никелевых частиц плотностью 1,35 г/см<sup>3</sup> должна составлять ~ 4 мкм. Таким образом, ударная волна со скоростью ~ 4 мм/мкс проходит этот слой за одну наносекунду.



Доплеровские частотные сдвиги

Рисунок 4. Удвоение сигнала при отражении от слоя частиц

### Заключение

Проведены эксперименты по определению минимальных значений удельной массы частиц, при которых скорость их движения регистрируется методом PDV. Показано, что метод PDV надежно регистрирует поток частиц с удельной массой  $\geq 0,2$  мг/см<sup>2</sup>. Зарегистрирован эффект трёхкратного сдвига частоты лазерного излучения, который приводит к удвоению доплеровского сигнала скорости СП относительно скорости полупрозрачного слоя частиц. Данный эффект имеет важное значение при интерпретации результатов по ударноволновому пылению поверхности материалов. При удельной массе  $\leq 0,5$  мг/см<sup>2</sup> дисперсия скорости частиц не зарегистрирована, тонкий слой частиц летит со скоростью, равной скорости пика отскольного импульса.

### Список литературы

1. D.S. Sorenson, R.W. Minich, J.L.Romero, T.W. Tunnell, R.M. Malone. "Ejecta particle size distributions for shock-loaded Sn and Al targets". Shock Compression of Condensed Matter, 2001.
2. D.B. Holtkamp. Survey of Advanced Velocimetry Experiments: A Year (or Two) in the Life of Photon Doppler Velocimetry. Доклад на международную конференцию «Megagauss Magnetic Field Generation 2007».
3. Н.В. Невмержицкий, А.Л. Михайлов, В.А. Раевский, В.С. Сасик и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца. Сборник докладов XIII Харитоновских чтений. Саров. 2011. стр. 604.
4. L. Signor, T. de Resseguier, G. Roy, A. Dragon and F. Llorca. "Fragment-Size Prediction during Dynamic Fragmentation of Shock-Melted Tin: Recovery Experiments and Modeling Issues". Shock Compression of Condensed Matter, 2007.
5. M. B. Zellner, W. Vogan McNeil, J. E. Hammerberg, R. S. Hixson, A. W. Obst et al. "Probing the underlying physics of ejecta production from shocked Sn samples". J. Appl. Phys. 103, 023502. 2008.
6. Yongtao Chen, Haibo Hu et. al. "Experimental study of ejecta from shock melted lead". J. Appl. Phys. 111, 053509. 2012.
7. D. Loison, T. de Resseguier et. al. "Laser shock-induced melting and fragmentation in metals". Shock Compression of Condensed Matter, 2001. p. 1545-1548.
8. O.T. Strand, D.R. Goosman, C. Martinez, and T.L. Whitworth. Compact system for high-speed Velocimetry using heterodyne techniques. Rev. Sci. Instrum. 77. 2006. p. 083108-1 - 083108-8.
9. А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, С.А. Финюшин, Д.А. Калашников, Е.А. Чудаков, Е.И. Бутусов, И.С. Гнутов. Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака

- частиц при ударно-волновом нагружении металлов. Журнал Экспериментальной и теоретической Физики, т. 149, выпуск 2, 2016 г.
10. А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, С.А. Финюшин, Д.А. Калашников, Е.А. Чудаков, Е.И. Бутусов, И.С. Гнутов. Регистрация спектра скоростей частиц при выходе ударной волны на поверхность жидкостей различной вязкости. Физика Горения и Взрыва, т. 52, № 4, 2016 г.
11. А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, Л.К. Антонюк, И.В. Шмелев. Экспериментальные исследования срывного разрушения капель и струй при их выбросе с поверхности жидкостей. Физика Горения и Взрыва, т. 52, № 4, 2016 г.
12. А.В. Андрияш, М.В. Асташкин, В.К. Баранов, А.Г. Голубинский, С.Е. Куратов и др. Оптогетеродинные доплеровские измерения баллистического разлёта продуктов разрушения поверхности ударной волны: эксперимент и теория. Журнал Экспериментальной и теоретической Физики, т. 149, выпуск 2, 2016 г.

## НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЫБРОСА ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТИ УДАРНО-НАГРУЖЕННОГО СВИНЦОВОГО ОБРАЗЦА

*Н.В. Невмержицкий, Е.А. Сотсков, Е.Д. Сеньковский, Е.В. Бодров, С.В. Фролов,  
К.В. Анисифоров, А.Б. Георгиевская, Е.В. Левкина, О.Л. Кривонос, А.Р. Гавриш*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса выброса частиц с поверхности ударно-нагруженного образца свинца.

Выброс происходил в воздух и низкий (0,1 атм) вакуум с узкой (0,2-1 мм) шероховатой (Rz15 – Rz50) поверхности образца под действием ударной волны интенсивностью  $P \approx 15$  ГПа и  $P \approx 34$  ГПа. Регистрация течения проводилась видеокамерами в микроскопическом режиме при короткой лазерной подсветке.

Благодаря малой оптической толщине пылевого потока получены спектры частиц примерно в 90 процентах его высоты, отсчитываемой от фронта. Установлено, что в твердом состоянии свинца ( $P \approx 15$  ГПа) выброс частиц происходит преимущественно под действием неустойчивости Рихтмайера-Мешкова; в жидком ( $P \approx 34$  ГПа) – с поверхности металла выбрасывается множество микрокумулятивных струй, которые со временем распадаются на частицы.

### Введение

При выходе сильной ударной волны на свободную поверхность (СП) конденсированного материала, происходит выброс частиц материала с этой поверхности. Этот процесс еще называют пылением материала. Причины выброса частиц связывают, в частности, с развитием неустойчивости Рихтмайера-Мешкова [1], [2], с микрокумуляцией, возникающей на неоднородной свободной поверхности материала под действием ударно-волновых процессов. Размер частиц пыли составляет от единиц до сотен микрон, а их скорости – несколько километров в секунду.

Для регистрации процесса пыления применяются различные экспериментальные методы: рентгенографический [3], голографический [4], оптический [5], метод индикаторных фольг [6] и т.д. Но отметим, что ни один из приведенных методов не позволяет напрямую отчетливо визуализировать размеры частиц пыли на уровне единиц микрон и установить закономерности этого процесса. Размер частиц определяют, например, по точкам осредненной траектории их движения [5], или восстанавливают голографическим методом. Авторами разработан микроскопический электронно-оптический метод [7], который позволяет регистрировать частицы