

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАРНО-ВОЛНОВОГО ПЫЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ОЛОВА И СВИНЦА ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

STUDIES OF A PROCESS OF SHOCK-WAVE EJECTION FOR TIN AND LEAD SAMPLES FROM LIQUID PHASE

К. А. Иванов, А. С. Конкин

K. A. Ivanov, A. S. Konkin

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Представлены результаты экспериментального исследования ударно-волнового пыления образцов олова и свинца из жидкой фазы. В работе отмечены особенности процесса пыления в данном режиме. Для анализа размерного спектра был применен подход, основанный на использовании искусственных нейросетей. Рассмотрены особенности применения данного подхода для анализа размерных спектров субмикронных частиц.

There are presented the experimental results of studying shock-wave ejection of tin and lead samples from liquid phase. The peculiarities the process of ejection from liquid phase are highlighted. To analyze particle size spectrum the approach based on employment of a neuronet is applied. The paper considers specific features of applying the neuronet approach to analyze spectra of submicron particles.

Введение

Проблеме микродеструкции вещества при выходе на свободную поверхность ударной волны уделяется значительное внимание уже длительное время [1–7]. Для разработки и верификации физических моделей процессов микродеструкции необходимы экспериментальные данные, характеризующие количественные параметры этих процессов. Такими данными, например, являются характеристики выброшенных со свободной поверхности частиц материала.

В данной работе представлены результаты экспериментов по изучению диспергирования олова и свинца под действием ударных волн, создаваемых сфокусированным импульсом фемтосекундного лазера. Исследовалось диспергирование олова и свинца из жидкой фазы. Измеряемыми характеристиками этого процесса являлись: пространственно-временная картина выброса материала, скорость выбрасываемого вещества, размерный спектр частиц пылевого потока. В данных экспериментах амплитуды давления ударных волн в образцах достигали величины 30–70 ГПа, что обеспечивало плавление исследуемых металлов.

Описание эксперимента

Оптическая схема эксперимента приведена на рис. 1. Фемтосекундный лазерный импульс заводится в вакуумную измерительную камеру и фокусируется на мишень нормально к ее поверхности внеосевым параболическим зеркалом в пятно размером ≈ 50 мкм. Мишень представляет собой тонкую металлическую фольгу (полоски) свинца или олова размером $\approx 3 \times 25$ мм толщиной 10 мкм. Фрагменты пыления вылетают с противоположной (тыльной) стороны мишени нормально к ее поверхности в виде струи диаметром, примерно равным диаметру пятна фокусировки лазерного луча. На некотором расстоянии от поверхности струя перехватывается преградой. Между преградой и мишенью струя просвечивается импульсом излучения вспомогательного лазера для регистрации пространственного распределения фрагментов пыления теньвым методом. Длительность импульса лазера подсветки составляет ≈ 7 нс. Длина волны излучения $\lambda = 353$ нм (3-я гармоника Nd – лазера). Момент подсветки струи может регулироваться с точностью до ≈ 10 нс в пределах 0–2500 нс. Амплитуда импульса подсветки и его задержка относительно момента облучения мишени фикси-

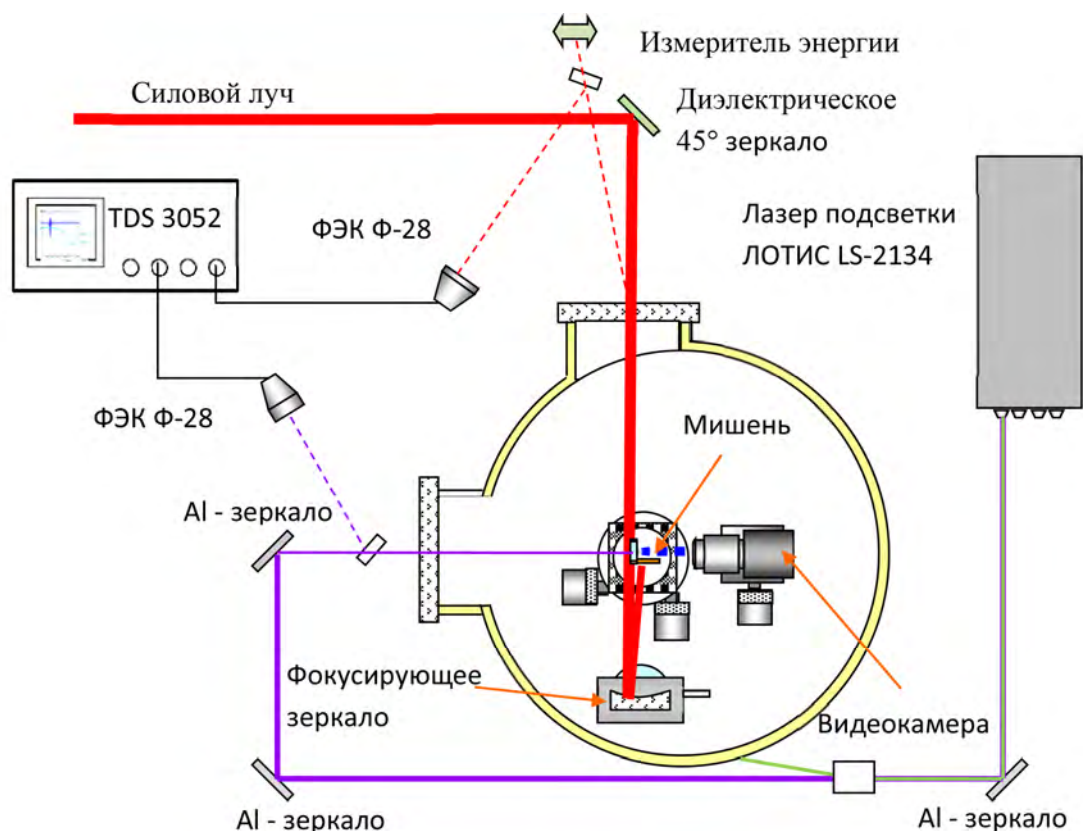


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента

руется на осциллографе с помощью фотоприемника Ф28.

Энергия силового луча лазера, входящего в измерительную камеру и падающего на фокусирующее зеркало и, соответственно, на мишень, контролируется в каждом облучении электронным измерителем энергии лазерного импульса (ЭИЭЛИ) и вторым фотоприемником Ф-28 путем измерения интенсивности составляющей силового луча, отраженной от входного окна камеры (кварц КУ-1). При этом световой импульс, направляемый на Ф-28, дополнительно отражается от прозрачной светоделительной пластины.

Максимальная энергия лазерного импульса составляла ~ 5 мДж. Давление в образце определялась расчетным путем. В расчетах (в одномерной постановке) задавалось значение поглощенной в образце энергии лазерного импульса.

Экспериментальные результаты

2.1. Метод теневой фотографии

На рис. 2–3 приведены полученные методом теневой фотографии кадры процесса пыления образцов Sn и Pb в различных условиях ударно-волнового нагружения (УВН) и в различные мо-

менты времени. Для каждого кадра приведены значения поглощенной энергии в образце ($E_{\text{погл}}$) и соответствующее этому давление (P) при выходе УВ на свободную поверхность. Указано также время задержки (T_z) кадра относительно момента облучения и в некоторых случаях – скорость струи частиц. Экспозиция кадра Δt , определяемая длительностью импульса подсветки, везде одинакова и составляет ≈ 7 нс. Численная обработка изображений проводилась по первичным кадрам с учетом калибровки системы видеорегистрации по мерной линейке фирмы ЛОМО для микроскопов.

На кадрах 2,а, 3,а приведена картина начала пыления. Видеокадры сделаны спустя 22 нс после облучения фронтальной стороны образца силовым импульсом фемтосекундного лазера. В этот момент времени выброс вещества еще только формируется. Плотность вещества большая и внутренняя структура выброса не просматривается. Вещество движется со скоростью 2,2–2,6 км/с.

Далее, на кадрах 2,б, 3,б, 2,в, 3,в представлен следующий временной срез этого процесса. Видеокадры сделаны спустя примерно 250 нс после облучения мишени (первые два кадра) и спустя примерно 490 нс, – следующие два кадра. Видно, что течение вещества сформировалось в хоро-

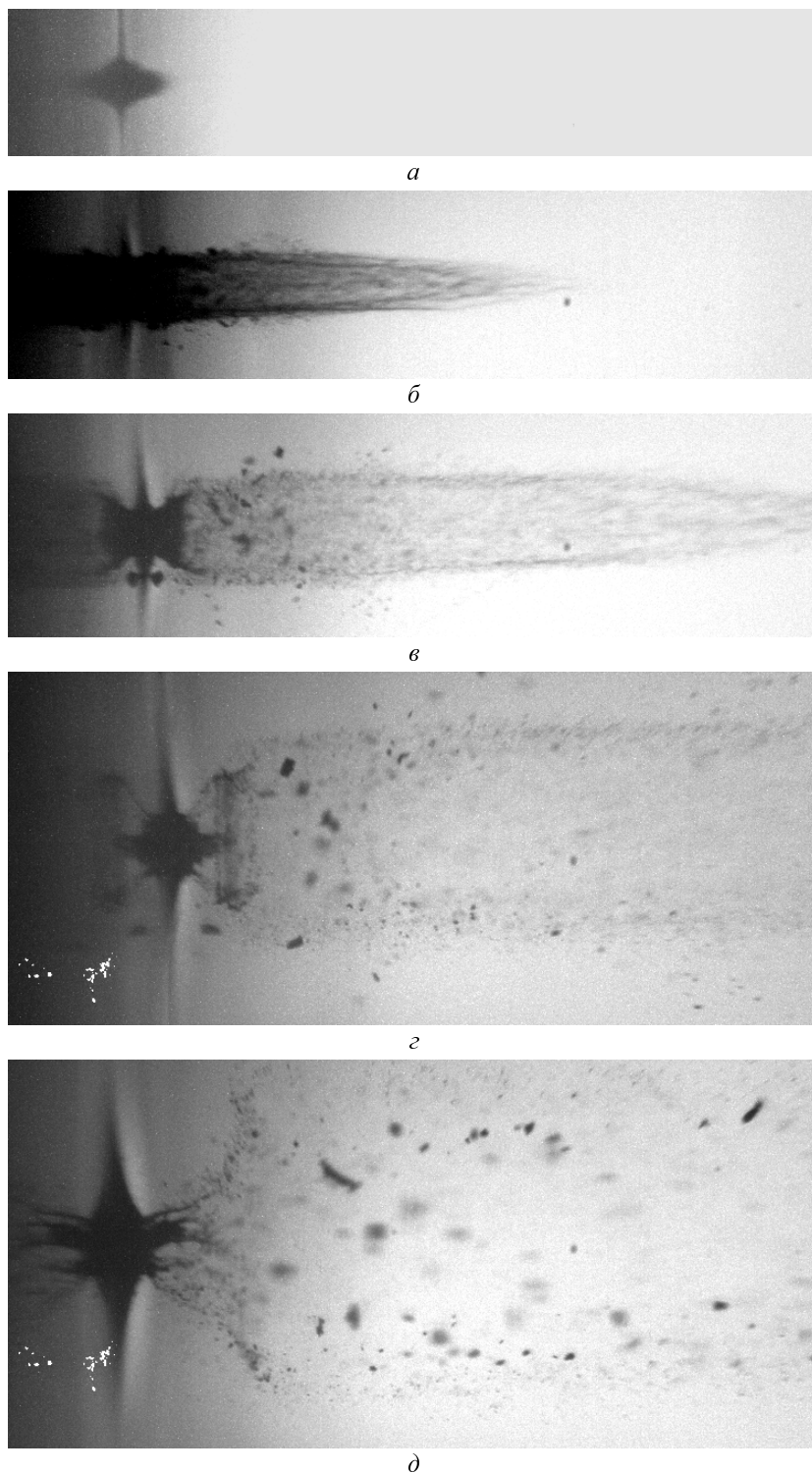


Рис. 2. Картины пыления Sn фольги на различных стадиях разлета:
a – Sn 10 мкм, $T_z = 22$ нс, $E_{\text{погл}} = 1,3$ мДж, $P = 66$ ГПа $V = 2,6$ км/с;
б – Sn 10 мкм, $T_z = 254$ нс, $E_{\text{погл}} = 1,31$ мДж, $P = 66$ ГПа;
в – Sn 10 мкм, $T_z = 488$ нс, $E_{\text{погл}} = 1,2$ мДж, $P = 62$ ГПа;
г – Sn 10 мкм, $T_z = 1120$ нс, $E_{\text{погл}} = 1,43$ мДж, $P = 70$ ГПа;
д – Sn 10 мкм, $T_z = 2020$ нс, $E_{\text{погл}} = 1,5$ мДж, $P = 74$ ГПа

шо выраженную струю. Каждая такая струя содержит множество тонких микрокумулятивных струй, которые по мере движения распадаются и

формируют единое поле из микродисперсных частиц. Далее в наших экспериментах такая струя перехватывается «мягкой» преградой. Массив час-

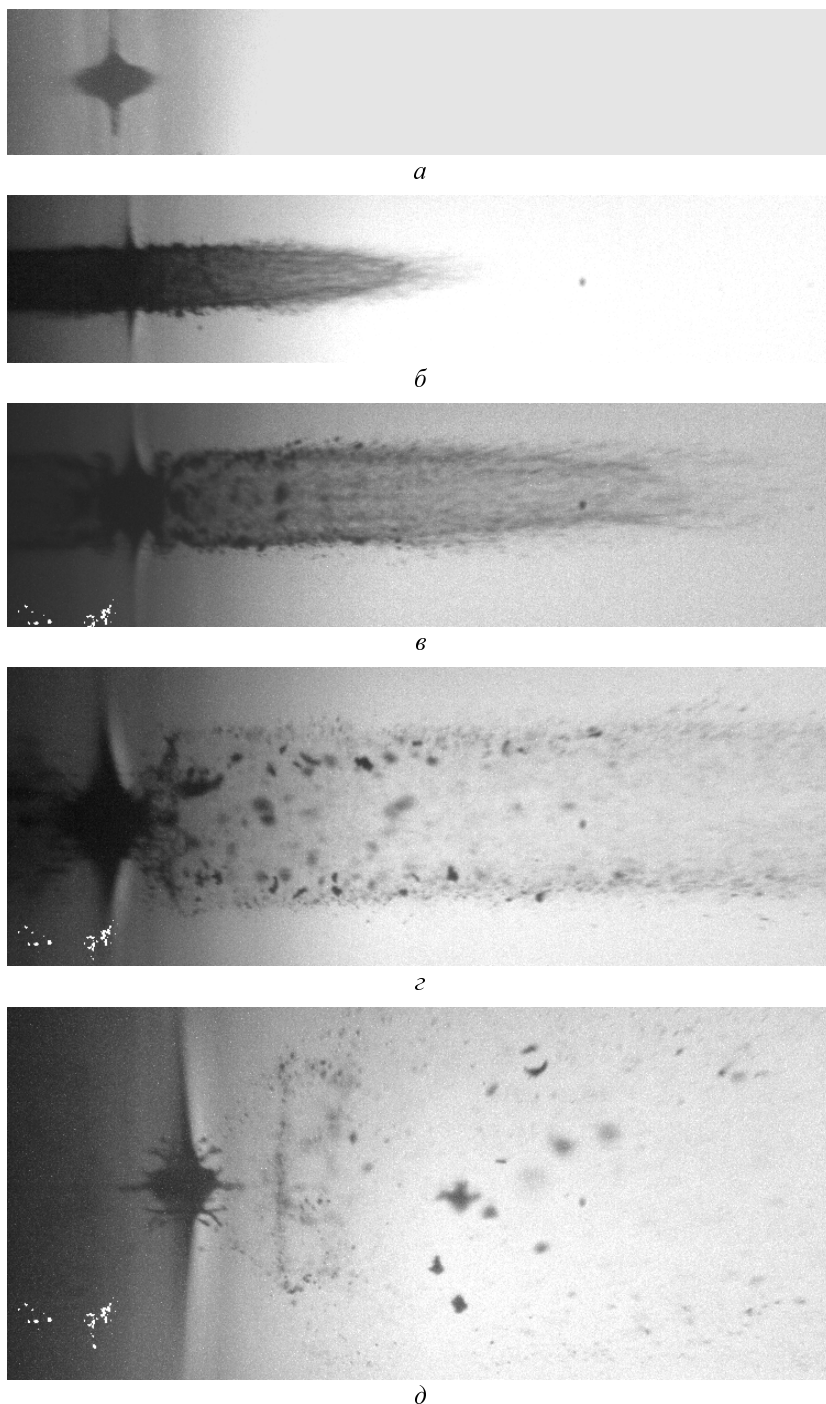


Рис. 3. Картины пыления Pb фольги на различных стадиях разлета:
a – Pb 10 мкм, $T_z = 23$ нс, E погл = 0,935 мДж, $P = 30$ ГПа, $V = 2,2$ км/с.
б – Pb 10 мкм, $T_z = 262$ нс, E погл = 1,30 мДж, $P = 38$ ГПа;
в – Pb 10 мкм, $T_z = 484$ нс, E погл = 1,28 мДж, $P = 38$ ГПа;
г – Pb 10 мкм, $T_z = 1080$ нс, E погл = 1,44 мДж, $P = 40$ ГПа;
д – Pb 10 мкм, $T_z = 2180$ нс, E погл = 1,55 мДж, $P = 42$ ГПа

тиц на ней потом анализируется средствами оптической микроскопии и путем программной обработки определяется спектр частиц по размерам.

На видеокадрах рис. 2,з, 3,з, 2,д, 3,д представлена конечная стадия пыления.

Спустя 1–2 мкс после облучения из области ударно-волнового нагружения все еще происходит выброс вещества, в том числе и в виде достаточно крупных фрагментов.

2.2. Метод захвата частиц на преграде

Для определения полной массы, пространственного распределения и размерного спектра выбрасываемого вещества использовался следующий подход: на расстоянии 0,7–1,5 мм от свободной поверхности мишени устанавливалась преграда с нанесенным на нее удерживающим слоем (коллектор). В ходе эксперимента выбрасываемые со свободной поверхности частицы вещества на большой скорости сталкиваются с коллектором и захватываются удерживающим слоем, формируя на нем пятна мелкодисперсной пыли, допускающие длительную обработку по завершению эксперимента. Удерживающий слой и преграда обладают высокой оптической чистотой и состоят из элементов с небольшим атомным порядковым номером. Оптическая чистота обеспечивает возможность микрофотографической обработки пятен на коллекторе, а низкий порядковый номер позволяет использовать рентгено-флуоресцентный метод для определения полной массы захваченного вещества. На рис. 4 приведен характерный вид пятен пыли, захваченной на коллекторе.

2.3. Определение размерных спектров частиц

Спектральный состав частиц выброса определялся путем анализа массива частиц, специально сформированного из первичного изображения на коллекторе с помощью процедуры глубинно фокусного сканирования. Формирование производится по специально разработанному алгоритму, при исполнении которого определяется глубина расположения каждой отдельной частицы и соответствующее ей резкое изображение. Конечное изображение собиралось из набора резких изображений всех анализируемых частиц.

Подробно остановимся на алгоритме формирования массива частиц. В качестве исходных данных алгоритм принимает набор изображений определенного участка коллектора, но с различно выставленной глубиной резкости оптической системы. Пятно на коллекторе состоит из частиц, залегающих на различной глубине в удерживающем слое, вследствие чего, на изображении из подобного набора присутствуют как частицы с резкими границами, так и с размытыми. Стандартный подход для обработки изображений подобного рода – подобрать набор свертков определяющих степень резкости определенного участка изображения и сформировать из наиболее резких участков суммарное изображение. Однако данный алгоритм в виду специфичности исследуемых объектов порождает чрезмерно большое количество артефактов. Для решения этой проблемы был предложен следующий алгоритм. Для всех изображений из набора производится бинаризация по яркости с определенным порогом. После этой процедуры в трехмерном пространстве совокупности изображений возникает набор связанных скоплений, соответствующих сумме резких и нерезких изображений определенной частицы. В этом трехмерном пространстве производится процедура разделения по принципу связности, и каждая выделенная область рассматривается как отдельная частица. Далее на каждой выделенной области находится перетяжка соответствующая резкому изображению частицы. Из подобных резких участков собирается суммарное изображение, по которому уже и формируется массив частиц. Применение такой процедуры обработки дает удовлетворительные результаты для частиц размером более ≈ 2 мкм. В то же время при изучении пыления жидкости важным является форма размерного спектра для частиц $< 1,5$ –2 мкм.

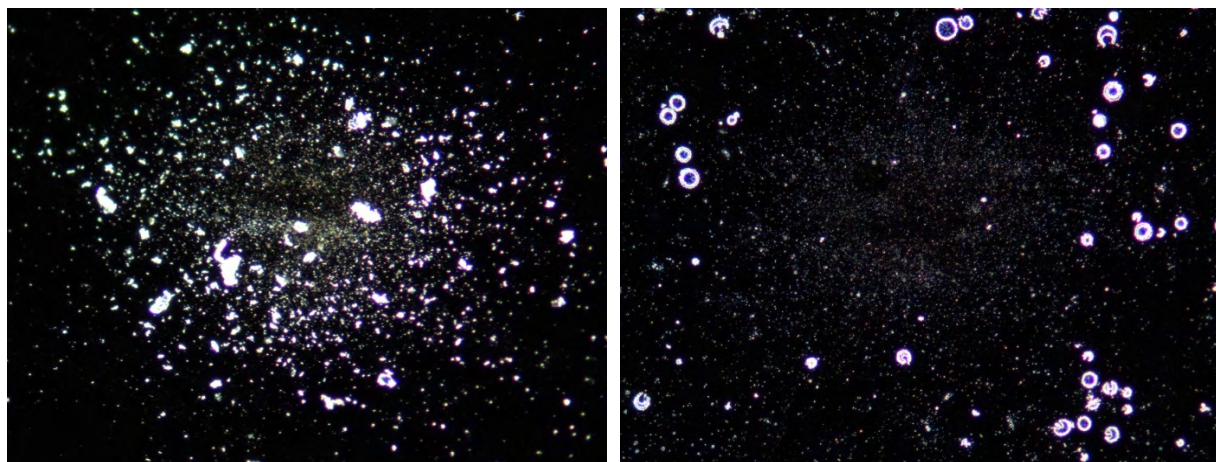


Рис. 4. Характерный вид пылевых пятен на коллекторе Sn (слева) и Pb (справа)

С целью улучшения разрешения метода в области малых размеров была произведена его модернизация. Добавлена предварительная нейросетевая обработка входного набора изображений, уменьшающая ореол размытия частиц, который при бинаризации порождает артефакты, влияющие на форму спектра.

В качестве нейросети выбран многослойный перцептрон с экспоненциальной функцией возбуждения следующей архитектуры [8]: 6 слоев – 4 скрытых, 1 входной, 1 выходной. Количество нейронов: 1 слой – 150, 2-слой – 300, 3 слой – 150, 4 слой – 100, 5 слой – 50, 6 слой – 1. Количество связей у нейрона $\sim 1/10$ от количества нейронов в следующем слое. Веса, индексы связей и смещающие значения выбирались случайно в заданных промежутках.

Обучающая выборка нейросети формировалась по следующему алгоритму: в наборе входных данных, представляющем собой сканирование по глубине резкости участка изображения, выбиралась случайная частица. Находилась резкое изображение этой частицы, и определялись его границы. Данное изображение размечалось в специальном редакторе, так что резкий участок частицы

без ореола определял положительный ответ сети, а ореол и нерезкие участки – отрицательный. Совокупность из небольшого числа размеченных подобным образом частиц и принималась за обучающую выборку, по которой проводилось обучение.

На рис. 5 приведены участки изображения, полученные с использованием нейросетевой обработки и без. Можно отметить существенное сокращение ореола крупных частиц, при более эффективном выделении мелких частиц. Последнее проявляется в фиксации нейросетью мелких отдельно расположенных частиц, обладающих малой яркостью, которые стандартным алгоритмом отбрасывались при бинаризации. Кроме того, существенно снижено количество артефактов изображения, порождаемых границей частиц.

На рис. 6 приведены спектры захваченных коллектором частиц в опыте от 9.06.2017. Как результат нейросетевой обработки можно отметить смещение спектра в область малых частиц и исчезновения роста спектра в области сверхмалых размеров, который, как мы считаем, был обусловлен артефактами изображения.

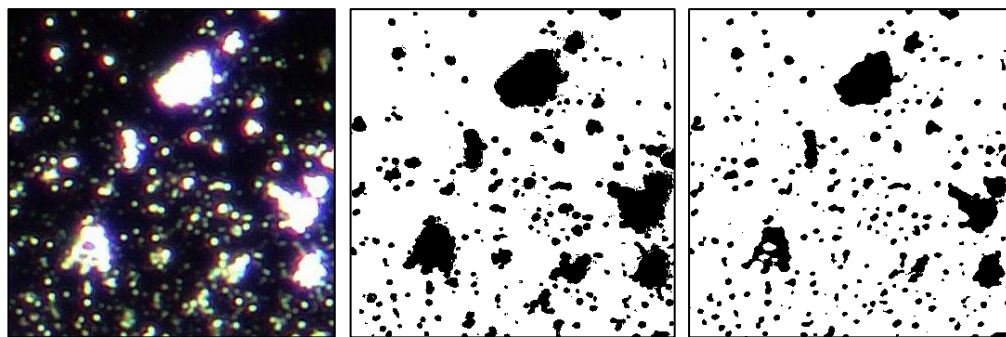


Рис. 5. Пример обработки участка изображения с использованием нейросети (справа) и без (в центре). Слева приведено исходное изображение

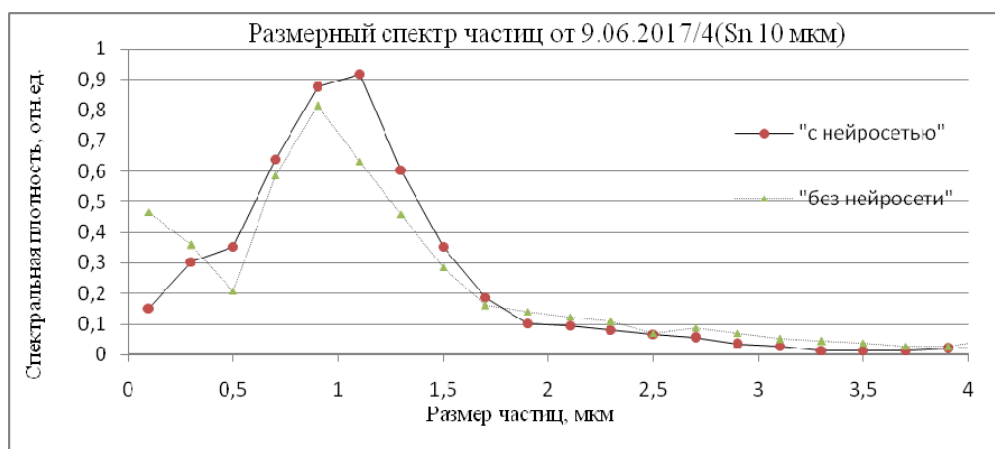


Рис. 6. Размерный спектр микрочастиц олова с использованием нейросетевой обработки и без

Заключение

Описанные выше эксперименты показали, что в основных чертах параметры пыления исследованных образцов Sn и Pb близки. По теневым картинам можно отметить, что выбрасываемый с поверхности жидкости поток вещества сформирован в виде тонких струй, которые с течением времени распадаются и формируются в единое облако микрочастиц. На поздних стадиях разлета видны и относительно крупные фрагменты вещества, свидетельствующие, вероятно, о процессах разрушения вещества на границе области воздействия.

Спектр микрочастиц, выбрасываемых со свободной поверхности образцов Sn и Pb, заключен в пределах 0,5–10 мкм. Использование нейросетевой обработки позволило получить данные по спектру частиц для интервала размеров частиц от 0,5 до 2 мкм.

Список литературы

1. Sorenson D. S., Minich R. W., Romero J. L. et al. Ejecta particle size distributions for shock loaded Sn and Al metals // *J. Appl. Phys.* 2002. V. 92. N 10. P. 5830–5836.
2. B. Zellner, M. Grover, J. E. Hammerberg et al. Effects of shock-breakout pressure on ejection of micron-scale material from shocked tin surfaces // *J. Appl. Phys.* 2007. 102, 013522.

3. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л. и др. 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.

4. Бабин А. А., Киселев А. М., Кулагин Д. И. и др. Генерация ударных волн при аксиконной фокусировке фемтосекундного лазерного излучения в прозрачных диэлектриках // *Письма в ЖЭТФ*. 2004. Т. 80. Вып. 5–6. С. 344–348.

5. Агранат М. Б., Анисимов С. И., Ашитков С. И. и др. Прочностные свойства расплава алюминия в условиях экстремально высоких температур растяжения при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов // *Письма в ЖЭТФ*. 2010. Т. 91. Вып. 9. С. 517–523.

6. S. Chaurasia, P. Leshma, S. Tripathi. Simultaneous measurement of particle velocity and shock velocity for megabar laser driven shock studies // *ISSUE*, 2010. N. 317, p. 13–21.

7. Васин М. Г., Завьялов Н. В., Иванов К. А., Конкин А. С., Лахтиков А. Е., Моротов А. П., Пунин В. Т., Учаев А. Я. Исследования динамического разрушения материалов под действием фемтосекундных лазерных импульсов // *Деформация и разрушение материалов*, 2013. № 1. С. 40–46.

8. Минский М., Пейперт С. М. Перцептроны. Мир. 1971. С. 261.