Характеристики “пылевых” потоков с поверхности лайнеров из меди и свинца при выходе на нее одной или последовательно двух ударных волн

В. А. Огородников, С. В. Ерунов, К. Н. Панов, Е. А. Чудаков, И. А. Блинов[1)], *А. Б. Георгиевская, Д. Н. Замыслов, И. Р. Фарин*

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 603155 Н. Новгород, Россия

Поступила в редакцию 10 марта 2023 г.
После переработки 12 апреля 2023 г.
Принята к публикации 18 апреля 2023 г.

Приведены результаты впервые проведенных сравнительных экспериментальных исследований процесса ударно-индуцированного выброса частиц (“пыления”) со свободной шероховатой (Rz20) поверхности лайнеров из меди и свинца при выходе на нее одной или последовательно двух ударных волн, разделенных по времени на 0.2 мкс. Такая ситуация возникает, как правило, в кумулирующих системах для сжатия плазмы цилиндрическими или сферическими лайнерами при их ударно-волновом или квазиизэнтропическом ускорении продуктами взрыва. С использованием методик импульсной рентгенографии, лазерно-оптической съемки, пьезоэлектрических датчиков давления и гетеродин-интерферометра исследована качественная картина и определены количественные характеристики процесса выброса частиц со свободной поверхности (СП): скорости СП и фронта потока (ФП) частиц, распределения плотности (массы) потока частиц в направлении его движения, необходимые для уточнения имеющихся особенностей и создания более обоснованных моделей описания эффекта.

DOI: 10.31857/S1234567823100063, EDN: cmiech

1. Введение. Эффект ударно-индуцированного пыления в физике ударных волн (УВ), связанный с выбросом частиц со свободной поверхности (СП) вещества при выходе на нее УВ, достаточно подробно исследовали в последнее десятилетие теоретически и экспериментально [1–24]. Получены данные о влиянии на эффект характеристик шероховатости поверхности, амплитуды УВ и фазового состояния материала, наличия газа перед СП и давления в нем. Обсуждены способы подавления эффекта.

Однако существуют схемы разгона лайнеров с помощью взрывчатых веществ, при использовании которых на СП выходит не одна, а последовательно несколько УВ. При этом ситуация с выбросом частиц с СП заметно усложняется. С одной стороны, казалось бы, после выхода на СП первой УВ микронеровности частично устраняются, а ускоренная второй УВ СП может подхватить поток частиц от первой УВ. С другой стороны, при выходе на СП второй УВ могут формироваться, при определенных условиях, струйные течения из областей между струями, которые сформировались после выхода на СП первой УВ. Кроме того, при разгрузке материала лайнера после выхода на СП первой УВ, могут в нем формироваться микродефекты, которые будут являться дополнительным источником “пыления” для второй УВ.

В данной работе приведены новые результаты по исследованию эффекта ударно-индуцированного “пыления”, связанного с выходом на СП лайнеров в виде пластин из свинца (С1) и меди (М1) последовательно двух УВ с интервалом времени между ними ~ 0.2 мкс. Причем амплитуда первой и второй УВ составляла 46 и 67 ГПа для меди и 39 и 59 ГПа – для свинца, что было недостаточно для плавления меди в волне разгрузки и достаточно для плавления свинца на первой УВ [13, 19, 25].

Полученные результаты сравниваются с результатами работы [23], в которой исследовали качественную картину и количественные характеристики процесса ударно-индуцированного “пыления” при выходе на СП аналогичных лайнеров из меди и свинца только одной УВ с примерно той же амплитудой 50 и 45 ГПа. Впервые установлено и количественно подтвержденно, что выход второй ударной волны на свободную поверхность лайнера может заметно повлиять на количественные характеристики эффекта ударно-индуцированного “пыления” для лайнеров, материал которых не плавится в условиях ударно-волнового нагружения.

2. Постановка экспериментальных исследований. В данной работе использовали постановку

[1)]e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

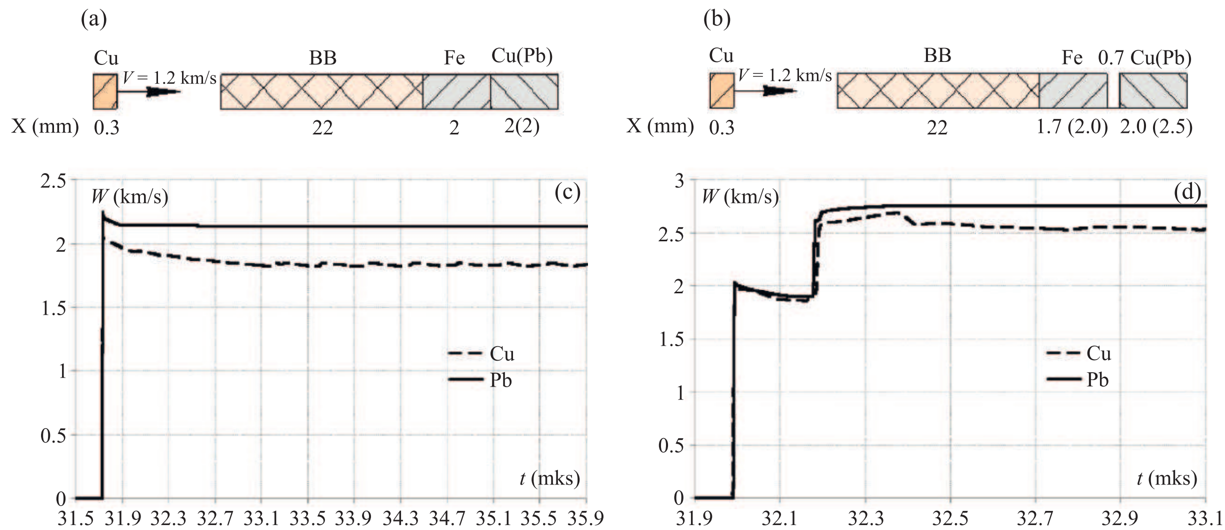

Рис. 1. (Цветной онлайн) Схемы нагружения образцов и профили скорости $W(t)$ для одно- и двухволновой конфигурации выхода УВ на СП

опытов из [23], приведенную на рис. 1a. Для реализации двухволновой конфигурации лайнеры из меди (М1) и свинца (С1) в виде пластин диаметром 108 мм и толщиной 2.0 и 2.5 мм отделяли от пластин из стали 12Х18Н10Т вакуумированным зазором величиной 0.7 мм (рис. 1b). Пространство перед СП также вакуумировали ($P_{\rm ost} = 1.2$ кПа).

На рисунке 1c, d приведены зависимости скорости СП от времени, рассчитанные по одномерным программам РФЯЦ-ВНИИЭФ [26], для случая с одноволновым и двухволновым нагружением СП лайнеров из меди и свинца.

Двухволновой режим нагружения СП связан с циркуляцией ударных волн и волн разрежения в образцах из меди (или свинца) после схлопывания указанного зазора. Выбранные схемы нагружения позволяют реализовывать близкие величины скоростей и амплитуд давления при выходе на СП первой и второй УВ для образцов из меди и свинца и интервал времени между ними ~ 0.2 мкс. Причем медь не плавится в этих условиях нагружения ($P_1 = 46$ ГПа, $P_2 = 67$ ГПа), а свинец плавится уже на первой УВ ($P_1 = 39$ ГПа, $P_2 = 59$ ГПа) [13, 19, 25]. Эти особенности важны с точки зрения исследования процесса ударно-индуцированного “пыления”. Также как и в [23] образцы из меди и свинца диаметром 108 мм и толщиной 2 мм изготовляли со специально обработанной СП, полоска которой шириной ~ 0.4 мм имела ту же шероховатость Rz20 ($2\alpha_0 = 20$ мкм, $\lambda = 150$ мкм).

С целью повышения информативности и достоверности получаемых результатов одновременно использовали несколько измерительных методик, основанных на разных физических принципах: теневую лазерно-оптическую, рентгенографическую, пьезоэлектрическую и методику гетеродин-интерферометра (PDV-датчиков).

Эксперименты проводили на измерительно-испытательном комплексе “Пыление” [17]. В каждом опыте с использованием перечисленных выше методик получали качественную картину и определяли количественные характеристики процесса ударно-индуцированного “пыления”: скорости свободной поверхности и фронта потока частиц, распределения плотности и массы потока частиц в направлении его движения. Более подробное описание постановки опытов можно найти в работе [23].

3. Результаты экспериментов и их обсуждение. Полученные в данной работе результаты с использованием методик теневой лазерно-оптической съемки и PDV-датчиков приведены на рис. 2, 3. Здесь же приведены для сравнения результаты, полученные в экспериментах при выходе на СП одной УВ [23]. С использованием этих методик наиболее рельефно визуализируется качественная картина процесса ударно-индуцированного “пыления” при выходе одной или двух УВ.

Так, например, при выходе одной УВ на СП образца из меди на кадрах теневой лазерно-оптической съемки наблюдается поток частиц, заметно ее опережающий, и откольные фрагменты вблизи СП (рис. 2b). При выходе на СП аналогичного образца последовательно двух УВ качественная картина не изменяется, однако частицы и фрагменты отко-

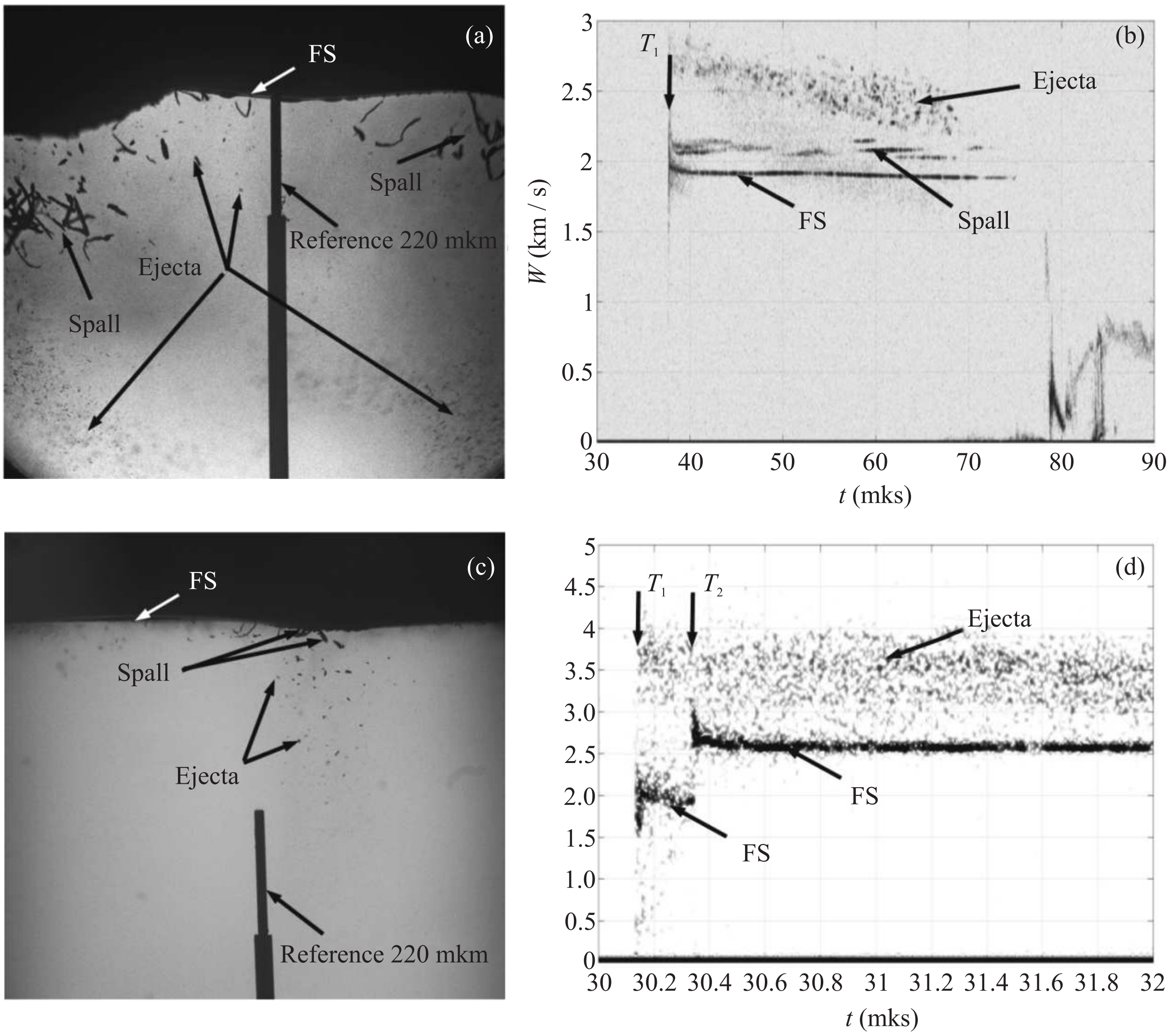

Рис. 2. Результаты экспериментов с образцами из меди при выходе на СП одной (a), (b) и двух (c), (d) УВ, T_1 – выход на СП первой УВ, T_2 – выход на СП второй УВ

лов частично собираются СП, ускоренной второй УВ (рис. 2d).

При выходе одной УВ на СП образца из свинца качественная картина процесса ударно-индуцированного "пыления" заметно отличается (рис. 3a), что связано, по-видимому, с его плавлением. Из микрорельефа на СП выбрасываются микропотоки в виде кумулятивных струйных течений, которые распадаются со временем на частицы за счет наличия градиента скорости вдоль струй. Так же, как и для образцов из меди, при выходе на СП образца из свинца второй УВ происходит поджатие ею потока частиц (рис. 3c).

Вид спектрограмм профилей скорости движения СП и пылевых потоков при выходе одной (рис. 2b, 3b) или двух (рис. 2d, 3d) УВ не противоречит качественной картине процесса ударно-индуцированного "пыления", регистрируемого с помощью теневой лазерно-оптической съемки (рис. 2a, c, 3a, c). Так для лайнера из меди при выходе на СП одной УВ на спектрограмме наблюдаются особенности, связанные с наличием перед ней частиц и откольных фрагментов. При выходе на СП лайнера из меди двух УВ, которые отчетливо регистрируются в моменты времени T_1 и T_2, наблюдается выброс только частиц. Из рисунка 2d следует, что скорость СП после выхода второй УВ увеличивается с 2.0 до 2.7 км/с, при этом скорость ФП частиц не изменяется и составляет $W_{FP} \approx 3.8$ км/с. Это может свидетельствовать о том, что заметного дополнительного выброса частиц, связанного с выходом на СП второй УВ, не наблюдается. Для лайнеров из

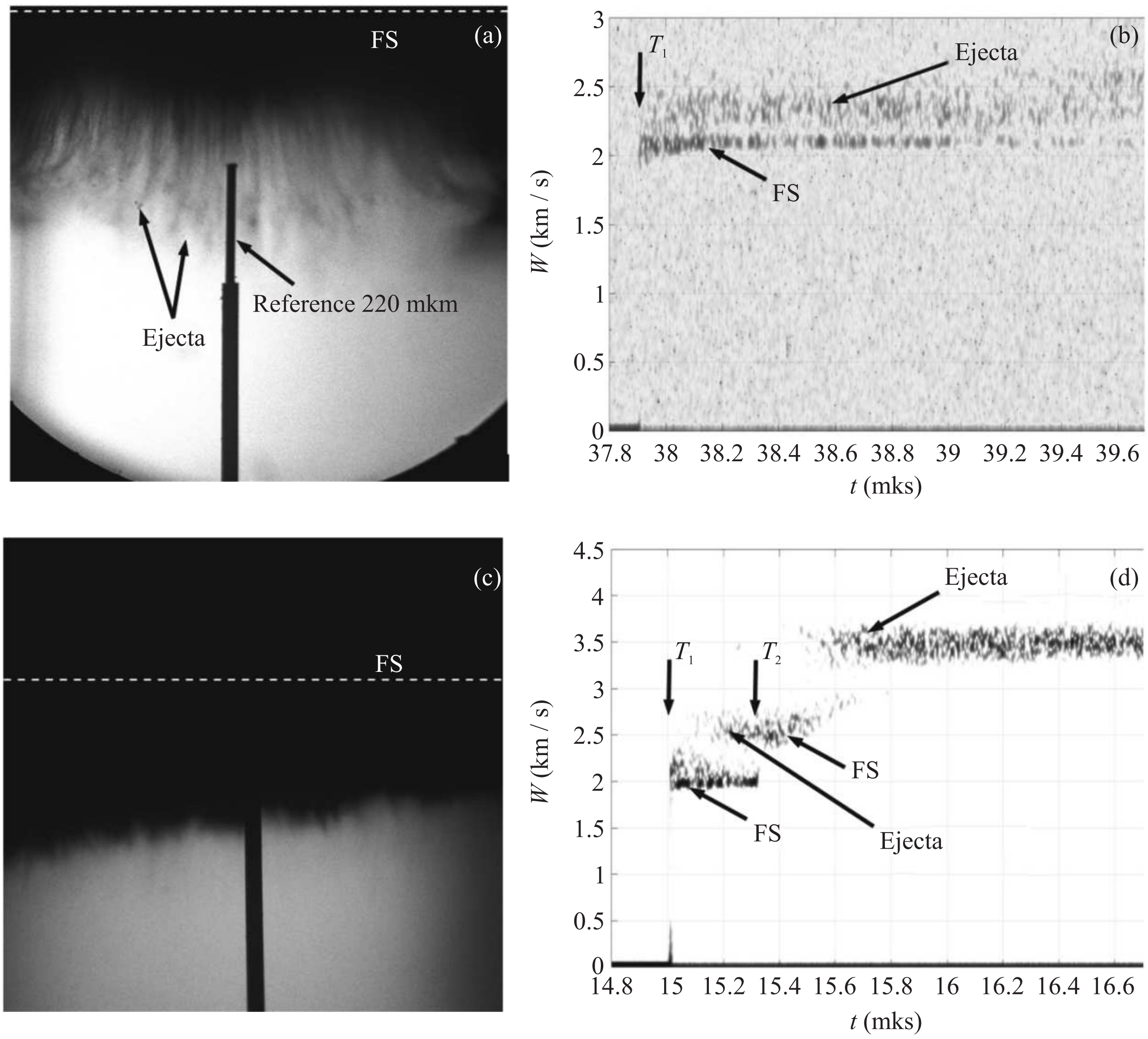

Рис. 3. Результаты экспериментов с образцами из свинца при выходе на СП одной (a), (b) и двух (c), (d) УВ, T_1 – выход на СП первой УВ, T_2 – выход на СП второй УВ

свинца при выходе на СП одной УВ на спектрограмме наблюдаются особенности, связанные только с наличием перед ней частиц, а при выходе на СП двух УВ в моменты времени T_1 и T_2 наблюдается выброс частиц на первой УВ ($W_{FP} \approx 2.8$ км/с) и второй УВ ($W_{FP} \approx 3.6$ км/с).

На рисунке 4 приведены $X{-}t$ диаграммы движения СП и переднего фронта потоков частиц, построенные с использованием данных всех применяемых методик, которые свидетельствуют об их удовлетворительном согласии.

Что касается ответа на вопрос о количественных характеристиках массы потоков выброшенных частиц при выходе на СП двух УВ, то здесь необходимо привлечь количественные данные, полученные в этих экспериментах с использованием рентгенографической методики (рис. 5a, c) и методики пьезоэлектрических датчиков (рис. 5b, d). При определении распределения плотности (массы) в потоке частиц (рис. 6) для перевода матрицы отсчетов почернения по изображению на рис. 5a и c в матрицу массовых толщин использовали эталонные клинья из меди и свинца соответственно [27].

На рисунке 6 приведены распределения плотности и массы потока частиц в направлении его движения в зависимости от времени и от относительной скорости частиц в потоке, полученные при обработке по обеим методикам. Массы потоков частиц определяли для частиц, имеющих скорость больше скорости СП в 1.05 раз. Распределения плотности потока частиц из меди с использованием рентгенографической методики не определяли, так как ее значения

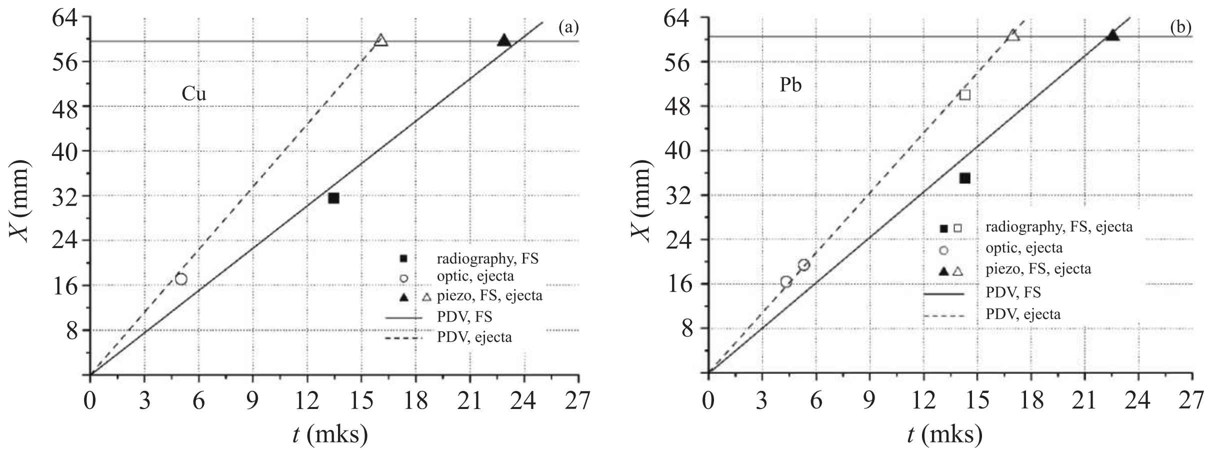

Рис. 4. $X-t$ диаграммы процесса "пыления" с СП образцов из меди (a) и свинца (b) при выходе на СП двух УВ

находятся ниже уровня разрешающей способности методики ($\rho_{\min}\Delta l = 1\,$мг/см^2).

Усредненные результаты их обработки в виде удельной на единицу поверхности массы потока частиц, проведенные в той же манере, что и в [23], приведены в табл. 1.

Таблица 1. Усредненные массы потоков частиц, полученные рентгенографической и пьезоэлектрической методиками

Материал	Количество УВ	Шероховатость $2\alpha/\lambda$, мкм	m, мг/см^2
Медь	1 [23]	20/150	12.5 ± 1.9
	2	15/150	0.7 ± 0.3
Свинец	1 [23]	18/150	25.0 ± 3.8
	2	20/120	26.5 ± 4.0

Данные по распределению массы потоков от удельной скорости, полученные по обеим методикам, демонстрируют их удовлетворительное согласие. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что в случае лайнеров из меди, материал которой не плавится в условиях проводимого эксперимента, при выходе второй УВ, по-видимому, дополнительного выброса частиц не происходит, а СП, ускоренная второй УВ, собирает более медленные частицы, образованные при выходе первой УВ. Поэтому масса потока частиц после выхода на СП двух УВ заметно меньше, чем при выходе одной УВ (таблица). Для лайнеров из свинца, который плавится после выхода на СП первой УВ, массы потока частиц при выходе на СП одной или двух УВ близки. Это может быть связано с тем, что при выходе второй УВ происходит дополнительный выброс частиц из межструйного пространства, а после ускорения ею СП происходит подхват более крупных и медленных частиц, что приводит к уменьшению общего числа частиц в потоке. В результате этих процессов массы потоков частиц при одно- и двухволновом нагружении лайнеров из свинца, материал которого плавится в данных условиях нагружения, оказались близки.

4. Выводы. При выходе на СП образцов с чистотой ее обработки Rz20 последовательно двух УВ амплитудой 46 и 67 ГПа (для меди) и 39 и 59 ГПа (для свинца) с интервалом ~ 0.2–0.3 мкс:

◦ качественная картина процесса ударно-индуцированного "пыления", так же, как и при выходе одной УВ, определяется прочностью или фазовым состоянием материала и характеризуется выбросом потока частиц и микрооткольных фрагментов, если материал (медь) не плавится, и выбросом струйных течений с последующим их распадом на микрочастицы, если материал (свинец) плавится в условиях ударно-волнового нагружения;

◦ при выходе на СП второй УВ происходит дополнительный выброс частиц, если материал лайнера не обладает прочностью (плавление свинца), и не происходит заметного дополнительного выброса частиц, если материал обладает прочностью (медь не плавится);

◦ скорости фронта потока частиц для лайнеров из меди и свинца составляют 3.8 и 3.6 км/с и определяются выходом на СП первой и второй УВ соответственно;

◦ за счет подхвата выброшенных откольных фрагментов и частиц СП, ускоренной второй УВ, удельная на единицу поверхности масса потока частиц для лайнеров из меди уменьшается с (12.5 ± 1.5) мг/см^2 до (0.7 ± 0.3) мг/см^2, а для лайнеров из свинца – практически не изменяется, за счет

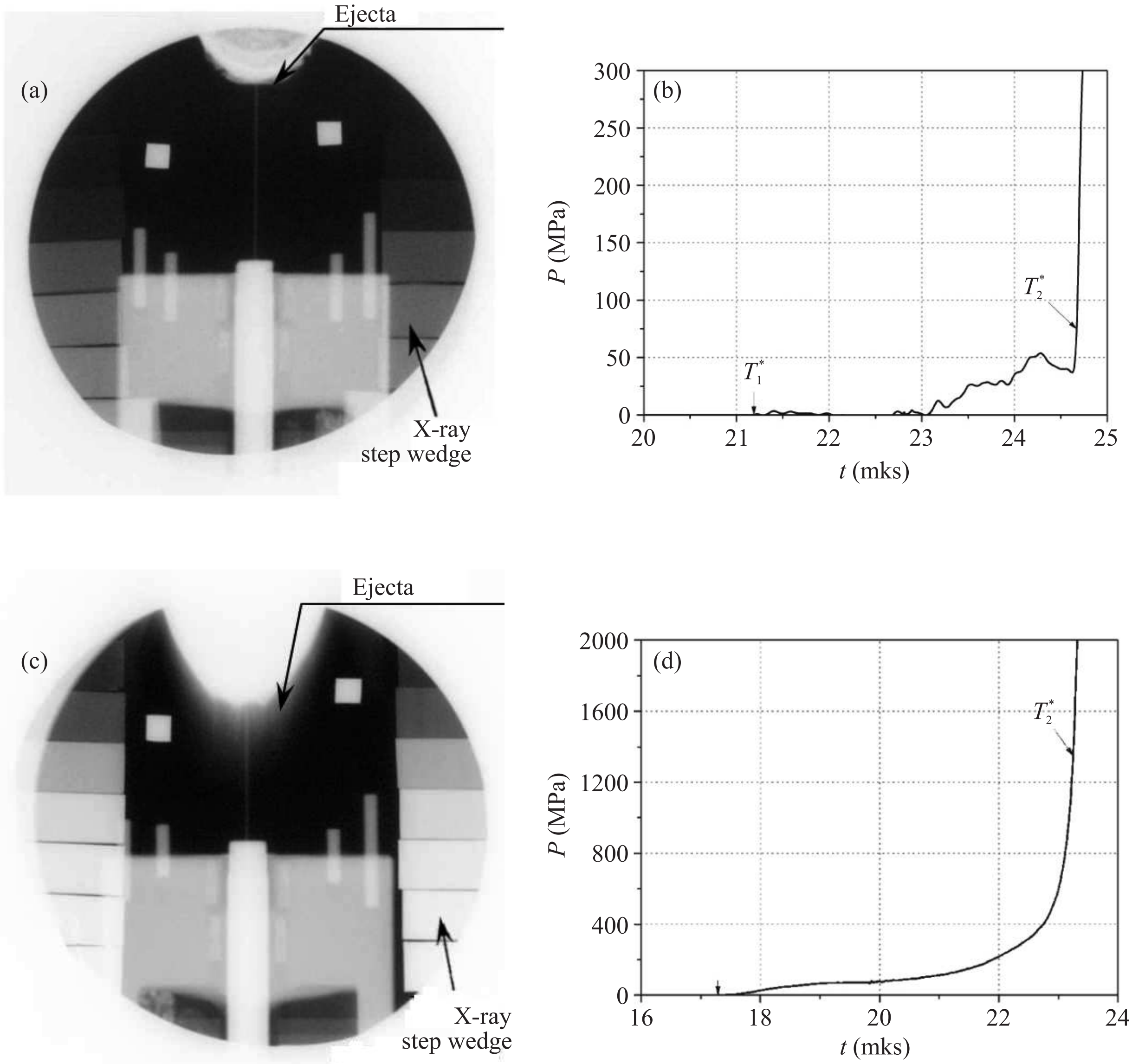

Рис. 5. Рентгенограммы и профили давления, полученные при выходе на СП двух УВ для меди (a), (b) и свинца (c), (d), T_1^* – момент подлета к пьезодатчикам потока частиц, T_2^* – момент подлета к пьезодатчикам СП

дополнительного выброса частиц на второй УВ и подхвата более медленных частиц СП, и составляет (26.0 ± 4.0) мг/см^2.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда # 23-22-00051, https://rscf.ru/project/23-22-00051/.

1. 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**, 615 (2009).
2. С. Б. Бахрах, И. Ю. Безрукова, А. Д. Ковалева, С. С. Косарин, О. В. Ольхов, ВАНТ, сер.: Матем. Моделирование физических процессов **3**, 14 (2005).
3. T. de Resseguier, L. Signor, A. Dragon, M. Boustie, G. Roy, and F. Llorca, J. Appl. Phys. **101**, 013506 (2007).
4. M. B. Zellner, M. Grover, J. E. Hammerberg et al. (Collaboration), J. Appl. Phys. **102**, 013522 (2007).
5. T. C. Germann, J. E. Hammerber, and G. Dimonte, *7th Biannual Int. Conf. New models and hydrocodes for shock wave processes in condensed matter*, Portugal, Estorie [Lisbon]: ADAI, 18–23 May (2008).

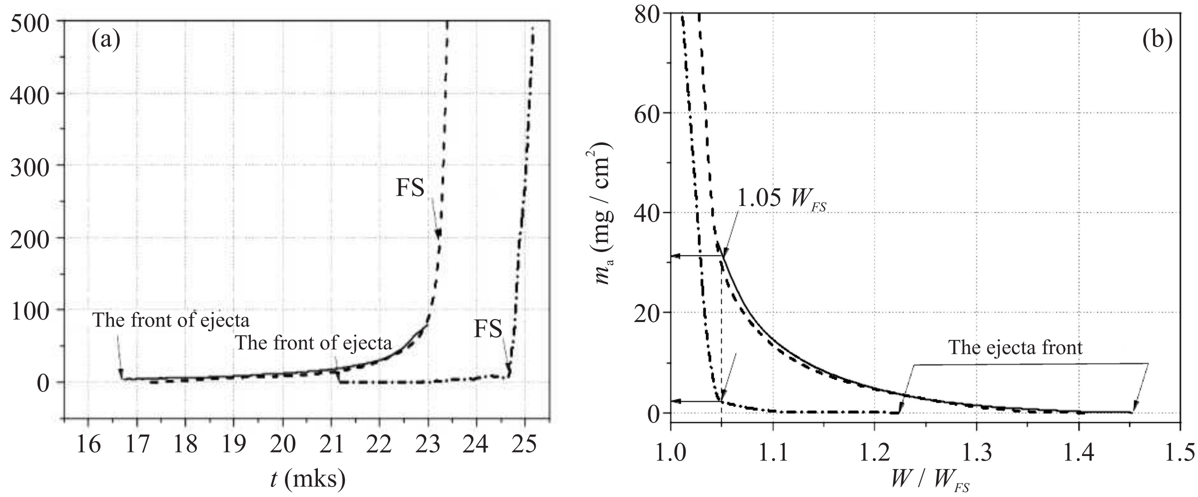

Рис. 6. Распределения плотности (a) и массы (b) потока частиц в направлении его движения в зависимости от времени и относительной скорости частиц в потоке, свинец: — рентген, - - пьезо; медь: - · - пьезо

6. 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*, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", Саров (2011), с. 604.
7. А. Б. Георгиевская, В. А. Раевский, Труды XIII международной конференции. Харитоновские научно-тематические чтения, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", Саров (2011), с. 597.
8. G. Dimonte, G. Terrones, and F. Cherne, Phys. Rev. Lett. **107**, 264502 (2011).
9. Y. Chen, H. Hu, T. Tang, G. Ren, and Q. Li, J. Appl. Phys. **111**, 053509 (2012).
10. D. M. Or'o, J. E. Hammerberg, W. T. Buttler, F. G. Mariam, C. Morris, C. Rousculp, and J. B. Stone, AIP Conf. Proc. **1426**, 1351 (2012).
11. 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).
12. 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*, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", Саров (2013), с. 666.
13. 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*, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", Саров (2013), с. 274.
14. Н. В. Невмержицкий, Е. А. Сотсков, Е. Д. Сеньковский, С. А. Абакумов, С. В. Фролов, О. А. Кривонос, А. В. Руднев, О. Н. Апрелков, А. Б. Георгиевская, *Труды XV международной конференции. Харитоновские научно-тематические чтения*, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", Саров (2013), с. 655.
15. S. K. Monfared, D. M. Or'o, 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).
16. 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).
17. А. Л. Михайлов, В. А. Огородников, В. С. Сасик и др. (Collaboration), ЖЭТФ **145**, 892 (2014).
18. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, В. С. Сасик и др. (Collaboration), ЖЭТФ **149**, 411 (2016).
19. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, С. В. Ерунов и др. (Collaboration), ЖЭТФ **152**, 1156 (2017).
20. W. T. Buttler, S. K. Lamoreaux, R. K. Schulze et al. (Collaboration), J. Dyn. Behav. Mater. **3**, 334 (2017).
21. V. A. Ogorodnikov, A. L. Mikhaylov, S. V. Erunov et al. (Collaboration), J. Dyn. Behav. Mater. **3**, 225 (2017).
22. 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, Физика горения и взрыва **54**, 5 (2018).
23. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, С. В. Ерунов и др. (Collaboration), ЖЭТФ **156**, 474 (2019).
24. В. А. Огородников, С. В. Ерунов, А. О. Бликов и др. (Collaboration), ЖЭТФ **160**, 621 (2021).

25. В. П. Копышев, А. В. Медведев, *Термодинамическая модель сжимаемого ковалюма. Препринт*, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (1995).
26. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Семин, В. Н. Софронов, ВАНТ, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики **3**, 11 (1982).
27. М. В. Антипов, А. Б., Георгиевская, В. В. Игонин, М. О. Лебедева, К. Н. Панов, А. А. Утенков, В. Д. Садунов, И. В. Юртов, *Труды XVII международной конференции Харитоновские тематические научные чтения*, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", Саров (2015), с. 702.