

УДК 532.529+533.6

## РЕГИСТРАЦИЯ СКОРОСТИ И УДЕЛЬНОЙ МАССЫ ПОТОКА ЧАСТИЦ, ВЫБРАСЫВАЕМЫХ С ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ, ПРИ ИХ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Е. А. Чудаков, А. В. Фёдоров, С. А. Финюшин, Д. А. Калашников,  
И. В. Шмелёв

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, avfedorov@vniief.ru

С использованием гетеродин-интерферометра (методика PDV) исследовались особенности процесса выброса частиц со свободной поверхности образцов из свинца различной шероховатости при их ударно-волновом нагружении. В экспериментах регистрировались скорость свободной поверхности образцов и скорость пылевого потока, а также с помощью индикаторных фольг и тонких стекол — удельная масса пыли. Построены зависимости распределения удельной массы частиц от их относительной скорости. Проанализировано влияние шероховатости и фазового состояния вещества после ударно-волнового нагружения на возможности регистрации скорости свободной поверхности и определения удельной массы выброшенных частиц с помощью индикаторных фольг. Показано, что при заданной шероховатости поверхности удельная масса пыли, выбрасываемая с поверхности при плавлении свинца под воздействием ударной волны или волны разгрузки, существенно больше, чем в образце, находящемся в твердом состоянии.

Ключевые слова: ударная волна, удельная масса частиц, ударно-волновое пыление, скорость пылевого потока, индикаторная фольга, шероховатость поверхности.

DOI 10.15372/FGV20180512

### МЕТОД ИНДИКАТОРНЫХ ФОЛЬГ

Метод постановки преград-индикаторов для определения характеристик потоков частиц, выбрасываемых со свободной поверхности материалов при их ударно-волновом нагружении, исторически появился одним из первых [1]. В настоящее время при исследовании вопросов пыления частиц широко используются такие методики, как оптическая [2], пьезоэлектрическая [3] и рентгенографическая [4]. Разработка лазерного интерферометра PDV (гетеродин-интерферометр) [5–8], позволяющего регистрировать как скорость пылевого потока, так и, в отдельных случаях, скорость свободной поверхности (СП), расширила арсенал используемых методов. Создание многоканальных комплексов гетеродин-интерферометра привело к возможности одновременно получать информацию по значительному числу измерительных каналов и дополнить классические измерения скорости данными по движению тонких индикаторных фольг и стекол под действием налетающей на них пыли. Развитие данного метода связано с необ-

ходимостью измерения удельной массы пыли в условиях, когда применение других методик невозможно (сложная геометрия измерений, наличие сильных электромагнитных наводок, малое количество выбрасываемой массы и т. д.).

Суть методики определения удельной массы пыли с помощью лазерного интерферометра такова: на выбранном расстоянии от СП образца устанавливаются индикаторные фольги; пыль, выбрасываемая с СП образца, при ударе по фольге передает последней свой импульс, в результате чего фольга начинает двигаться с некоторой скоростью; с помощью лазерного интерферометра осуществляется непрерывная регистрация скорости движения фольги. Зная скорость потока частиц, расстояние до фольги и ее скорость, можно рассчитать массу пыли, налетающей на фольгу.

Пересчет удельной массы пыли, накопленной на фольге, проводится исходя из следующих принципов: выброс частиц с СП происходит мгновенно; скорость частиц не изменяется в процессе их движения (частицы движутся в вакууме); частицы неупруго тормозятся на фольге-индикаторе. Тогда согласно закону сохранения импульса скорость прироста массы

на фольге составляет

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{\phi}}{W - W_{\phi}} \frac{dW_{\phi}}{dt}, \quad (1)$$

где  $M$  — удельная масса выброшенных частиц образца на фольге, мг/см<sup>2</sup>;  $M_{\phi}$  — удельная масса фольги вместе с пылью, накопленной к моменту времени  $t$ , мг/см<sup>2</sup>;  $W$  — скорость подлетающих частиц в данный момент времени  $t$ , м/с;  $W_{\phi}$  — скорость фольги в момент времени  $t$ , м/с.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Нагружение образцов из свинца марки С1 (Ø105 × 2 мм) осуществлялось через прокладку из стали 3 (Ø110 × 4 мм) с помощью шашки взрывчатого вещества Ø90 × (10 ÷ 60) мм, инициируемой плоскоровновым генератором. Давление нагружения в опытах варьировалось от 18 до 45 ГПа (для дополнительного ослабления ударной волны в опыте с давлением 18 ГПа устанавливалась проставка из фторопласта толщиной 7 мм). Полость сборки вакуумировалась, остаточное давление газа не превышало 0.05 атм. На базе 42 мм от СП свинца располагался измерительный приемник (рис. 1) с установленными в нем датчиками методики PDV, при этом часть датчиков была закрыта индикаторными фольгами из алюминия толщиной 15 и 250 мкм, тантала толщиной 200 мкм и кварцевого стекла толщиной 270 ÷ 340 мкм. Датчики располагались на диаметрах измерения 13 и 35 мм. Шероховатость поверхности свинца в первых двух опытах составляла  $Ra \approx 3.2$  мкм (в пределах базовой длины  $\lambda \approx 60$  мкм), в третьем —  $Ra \approx 0.16$  мкм ( $\lambda \approx 60$  мкм).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

#### Образцы в твердом фазовом состоянии

Характерные спектрограммы, зарегистрированные датчиками PDV в опыте с давлением нагружения образца ≈18 ГПа, представлены на рис. 2. Согласно данным [8, 9] плавление свинца на волне разгрузки начинается при давлении 25 ГПа, а заканчивается при давлении 36 ГПа. Таким образом, в данном опыте образец оставался в твердом состоянии после ударно-волнового нагружения и последующей разгрузки.

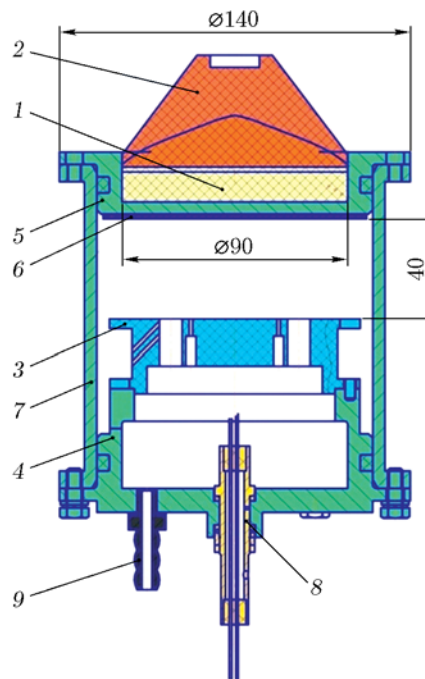


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:

1 — шашка ВВ, 2 — генератор плоской волны, 3 — измерительный приемник, 4 — основание, 5 — крышка, 6 — свинец, 7 — корпус, 8 — гермопереход, 9 — штуцер для откачки газа

При использовании датчика, закрытого кварцевым стеклом (рис. 2, а), получена запись скорости СП на всей базе полета (средняя скорость 1.085 км/с), а также дисперсия скорости пыли в диапазоне 1.1 ÷ 1.5 км/с. Отчетливо видно движение стекла под действием налетающей на него пыли вплоть до момента резкого набора скорости, связанного с ударом СП свинца по стеклу.

В данном опыте также удалось сделать полную запись движения танталовой фольги толщиной 200 мкм под действием налетающей пыли вплоть до удара СП. На увеличенном участке спектрограммы (рис. 2, б) отчетливо просматриваются момент удара СП по фольге, дальнейшее ускорение фольги (хорошо видны четыре ступени разгона) и выход скорости на «полку» со значением, равным скорости ударника. Зная момент удара СП по фольге, базу полета и среднее время выхода ударной волны на СП, можно оценить среднюю скорость поверхности, которая составила 1.097 км/с, что в пределах погрешности измерений совпадает с измеренной методом PDV средней скоростью 1.085 км/с.

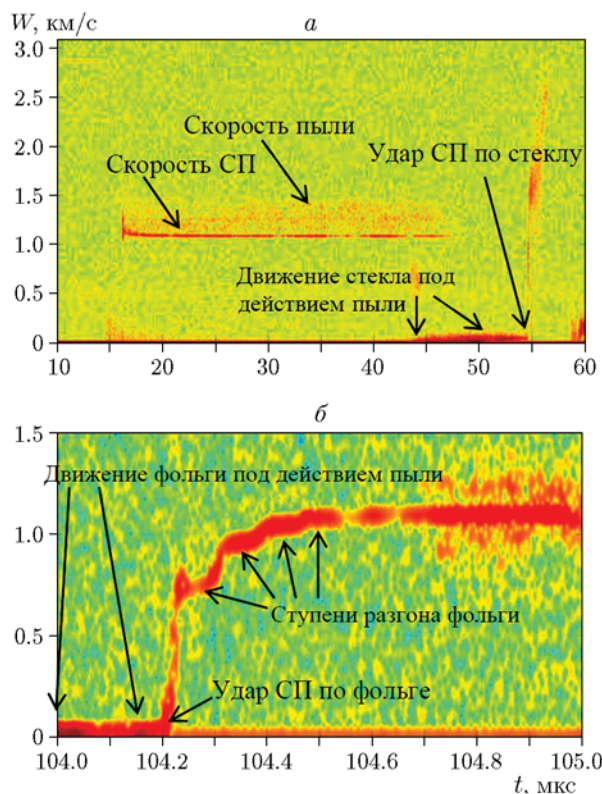


Рис. 2. Спектрограммы, полученные в опыте с давлением нагружения 18 ГПа,  $Ra \approx 3.2$  мкм:

*a* — спектрограмма, зарегистрированная с помощью датчика, закрытого кварцевым стеклом, *б* — спектрограмма движения танталовой фольги

Зависимости удельной массы пыли  $M_{уд}$ , накопленной на фольгах, от времени  $t$  и относительной скорости  $W_{пыль}/W_{СП}$  представлены на рис. 3. На графиках рис. 2, 4, 6 приведено осциллографическое время, на графиках рис. 3, 5, 7 используется время начиная от выхода ударной волны на СП. Скорость СП для датчика, закрытого кварцевым стеклом, брали непосредственно из спектрограммы, а для датчика, закрытого танталовой фольгой, определяли по моменту удара СП по фольге. Полная удельная масса пыли составила  $\approx 3$  мг/см<sup>2</sup>.

### Образцы в жидком (смешанном) фазовом состоянии

Характерные спектрограммы, полученные с помощью датчиков PDV в опытах с давлением нагружения образца  $\approx 30$  ГПа, представлены на рис. 4. При использовании датчика, закрытого кварцевым стеклом (рис. 4, *a*), на

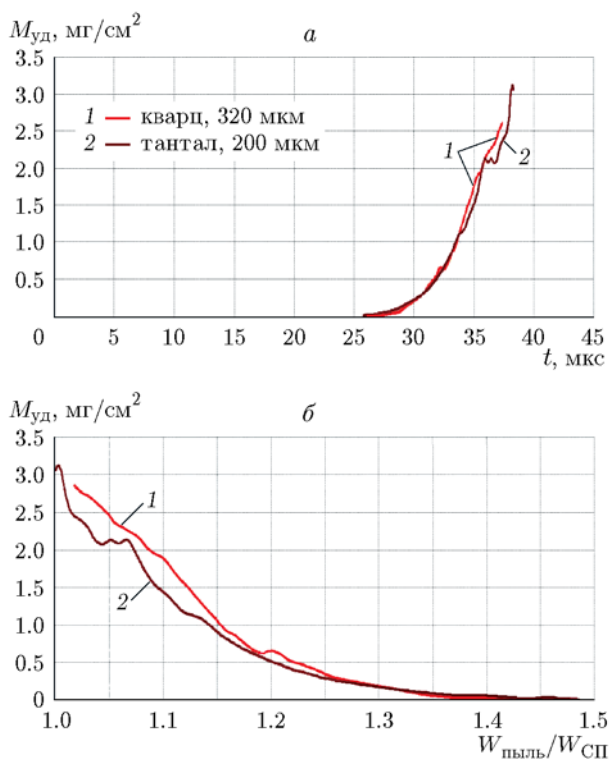


Рис. 3. Зависимости удельной массы пыли от времени (*a*) и относительной скорости (*б*) в опыте при давлении нагружения 18 ГПа,  $Ra \approx 3.2$  мкм

спектрограмме видна запись скорости СП длительностью  $\approx 5$  мкс (скорость 1.66 км/с). Зарегистрированная скорость пыли в момент выхода составила  $2.0 \div 2.6$  км/с с последующим падением до значений  $1.9 \div 2.2$  км/с в момент подлета к приемнику. Момент подлета СП к стеклу однозначно не выражен, регистрируется достаточно плавный набор скорости стеклом под действием налетающей на него пыли.

С помощью фольг из тантала и алюминия (рис. 4, *б*) получены записи скорости, обрывающиеся незадолго до расчетного момента подлета СП к фольге. Зависимости удельной массы пыли, накопленной на фольгах, от времени и относительной скорости представлены на рис. 5. В качестве скорости СП для датчиков, закрытых фольгой, брали среднее значение, полученное с помощью датчиков, закрытых кварцевым стеклом, что вносит дополнительную погрешность при получении зависимости массы пыли от относительной скорости и, соответственно, при оценке полной удельной массы пыли.

По нашим оценкам, ошибка между за-

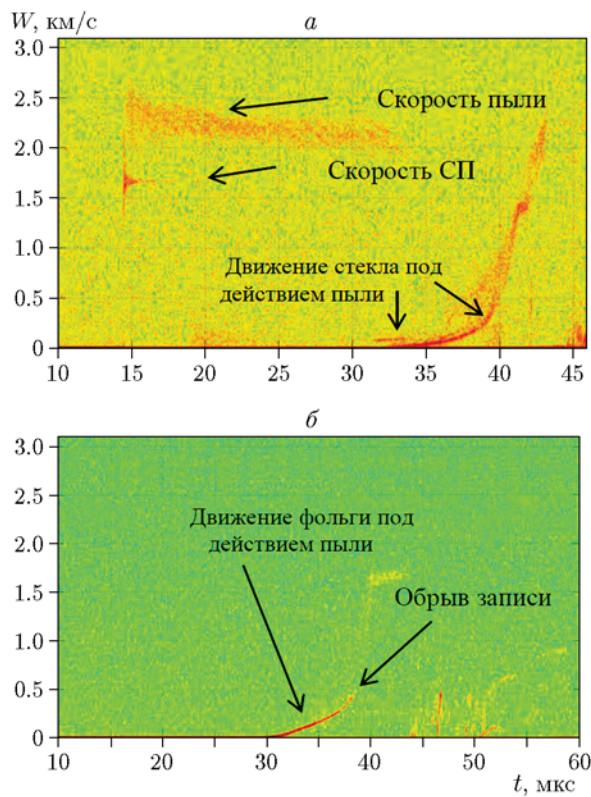


Рис. 4. Спектрограммы, полученные в опыте с давлением нагружения 30 ГПа,  $Ra \approx 3.2$  мкм:

*a* — зарегистрирована с помощью датчика, закрытого кварцевым стеклом, *б* — с помощью датчика, закрытого алюминиевой фольгой

регистрированной осредненной и фактической скоростями движения СП образца в различных точках поверхности в указанной постановке опытов может достигать  $1 \div 5$  %. При этом наибольший прирост удельной массы пыли на фольге приходится как раз на область относительной скорости  $W_{\text{пыль}}/W_{\text{СП}} = 1 \div 1.05$ . Для того чтобы уменьшить указанную погрешность, под полной массой потока в случае плавления образца будем подразумевать массу лишь тех частиц, которые движутся быстрее некоторой пороговой скорости относительно скорости СП. В данной работе значение пороговой скорости пыли выбрано равным  $1.05W_{\text{СП}}$ . Полная удельная масса пыли в опыте с давлением нагружения 30 ГПа составила  $\approx 12$  мг/см<sup>2</sup>.

#### Образцы с шероховатостью поверхности 0.16 мкм

Спектрограммы, полученные с помощью фронтальных датчиков в опыте с давлением

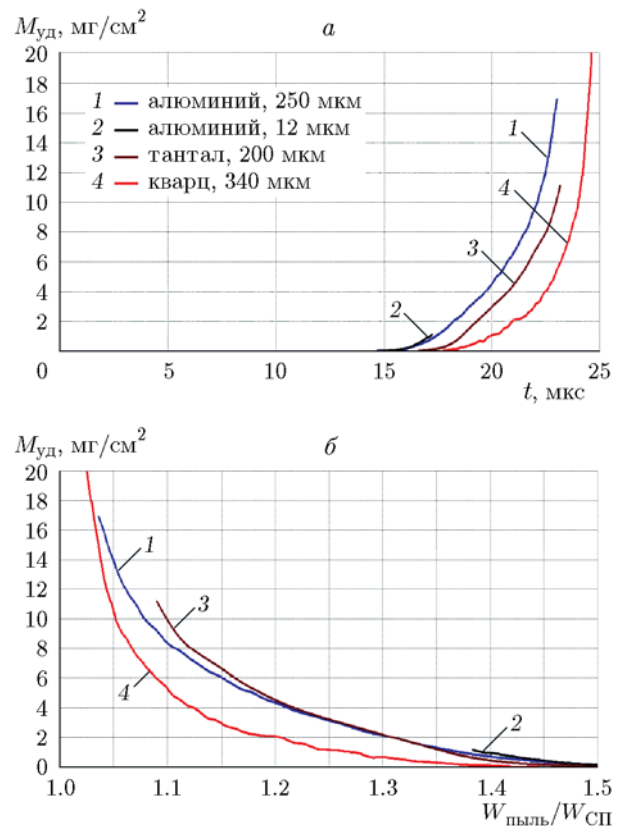


Рис. 5. Зависимости удельной массы пыли от времени (*a*) и относительной скорости (*б*) в опыте при давлении нагружения 30 ГПа,  $Ra \approx 3.2$  мкм

нагружения образца 30 ГПа и шероховатостью поверхности, близкой к зеркальной ( $Ra \approx 0.16 \pm 0.05$  мкм), представлены на рис. 6. Они дают информацию о скорости СП в течение всего движения (средняя скорость 1.61 км/с), а также о дисперсии скорости пылевого потока — 0.3 км/с. В данном опыте впервые с помощью методики PDV зарегистрировано движение откольного слоя свинца, находящегося в смешанной фазе, на всей базе полета в течение более чем 23 мкс (обычно длительность регистрации скорости откольного слоя в смешанной фазе не превышает нескольких микросекунд). Зарегистрированная скорость пыли в момент выхода составила  $1.6 \div 1.9$  км/с с последующим падением до  $1.6 \div 1.7$  км/с в момент подлета к приемнику.

Зависимости удельной массы пыли от времени и относительной скорости, полученные с помощью индикаторных фольг, приведены на рис. 7. В качестве скорости СП для датчиков, закрытых фольгой, брали среднее значение, по-



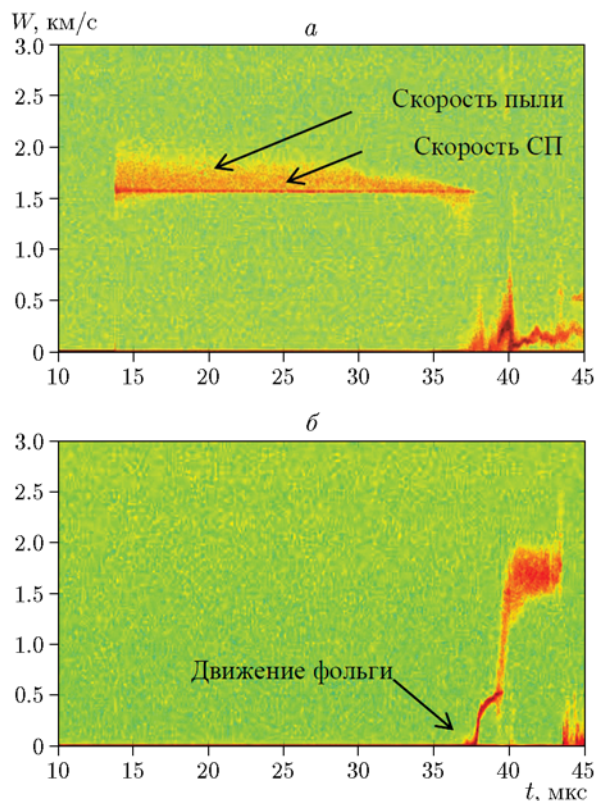


Рис. 6. Спектрограммы, полученные в опыте при давлении нагружения 30 ГПа,  $Ra \approx 0.16$  мкм:

*a* — зарегистрирована с помощью открытого датчика, *б* — с помощью датчика, закрытого танталовой фольгой

лученное с помощью датчиков, закрытых кварцевым стеклом. Видно (рис. 7, б), что удельная масса пыли начинает асимптотически возрастать при относительной скорости  $\approx 1.04W_{СП}$ . Это означает, по всей видимости, что скорость СП в проекциях точек установки индикаторных фольг выше средней, зарегистрированной с помощью фронтальных датчиков. Масса пыли при пороговой скорости  $1.05W_{СП}$  составила  $1.4 \text{ мг/см}^2$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Удельные массы пыли, выброшенные с поверхности свинца с шероховатостью  $Ra \approx 3.2$  мкм ( $\lambda \approx 60$  мкм), в опытах с давлением нагружения 18 и 30 ГПа различаются в четыре раза (3 и 12 мг/см<sup>2</sup> соответственно). Также качественно отличаются формы импульса, прописываемого индикаторными фольгами. Для образца, находящегося в твердом состоя-

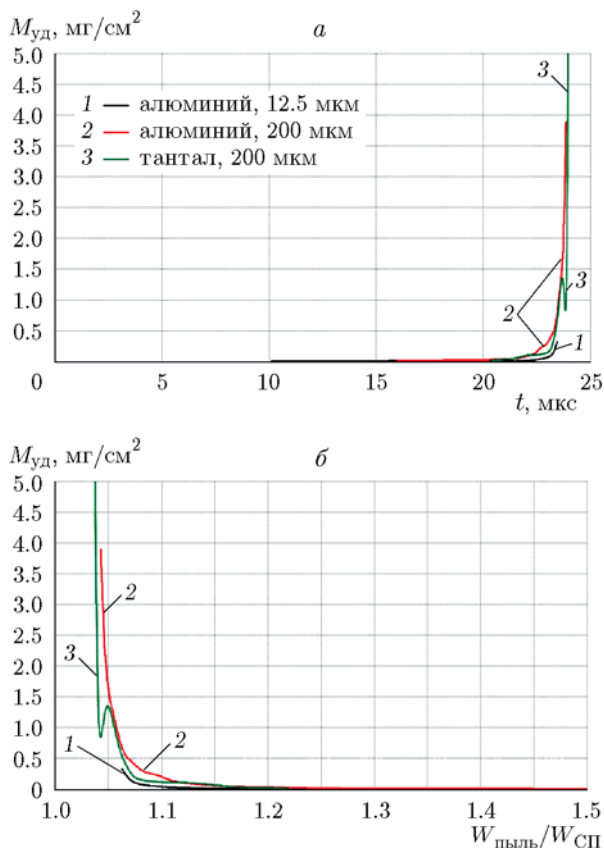


Рис. 7. Зависимости удельной массы пыли от времени (*a*) и относительной скорости (*б*) в опыте при давлении нагружения 30 ГПа,  $Ra \approx 0.16$  мкм

нии, момент удара СП по фольге обычно явно виден на спектрограмме, что позволяет определить скорость движения СП непосредственно в точке расположения фольги и точно рассчитать как полную удельную массу, так и ее зависимость от относительной скорости. В тех же опытах, в которых образец начинает плавиться при воздействии волны разгрузки, ожидаемый импульс от удара СП, воспринимаемый фольгами, оказывается размытым во времени и момент удара поверхности по фольге однозначно определить не удастся, запись скорости различных фольг также зачастую обрывается незадолго до ожидаемого момента подлета. Указанные факторы не позволяют с необходимой точностью рассчитать зависимость удельной массы пыли от относительной скорости и определить полную удельную массу выбрасываемой пыли. Для уменьшения возможной ошибки выбирается пороговое значение относительной скорости (в данной работе  $1.05W_{СП}$ ),

для которого и вычисляется указанная масса, что, однако, не может в полной мере быть точной характеристикой выбрасываемого потока частиц.

Необходимо отметить, что для опытов с давлением нагружения 30 ГПа и шероховатостью поверхности свинца  $Ra = 3.2$  и 0.16 мкм получены качественно отличающиеся данные при использовании фронтальных датчиков (рис. 6,а) и индикаторных фольг (рис. 6,б). Так, в случае фронтальных датчиков при уменьшении шероховатости скорость СП регистрируется на всей базе полета, частицы не экранируют поверхность; зарегистрировано отражение от низкоскоростной части пылевого потока. Обрыв записей движения фольги происходит гораздо позже, и практически все фольги полностью прописывают импульс налетающих частиц. Оценки удельной массы пыли, полученные с помощью индикаторных фольг при том же давлении нагружения 30 ГПа, свидетельствуют об уменьшении массы выбрасываемой пыли более чем в восемь раз (с 12 до 1.4 мг/см<sup>2</sup>) при уменьшении шероховатости с 3.2 до 0.16 мкм. При этом наиболее резко уменьшается масса более скоростной части потока: если общая масса пыли по порогу  $1.05W_{СП}$  отличается в восемь раз, то масса части пылевого потока, распространяющегося со скоростью более  $1.1W_{СП}$ , отличается уже в семьдесят раз (7.4 и 0.1 мг/см<sup>2</sup>).

## ВЫВОДЫ

Методами PDV и индикаторных фольг зарегистрированы скорость и удельная масса потока частиц, выбрасываемых с поверхности свинца при ударно-волновом нагружении.

Показано, что для свинца с шероховатостью поверхности  $Ra \approx 3.2$  мкм ( $\lambda \approx 60$  мкм), находящегося в жидком (смешанном) фазовом состоянии при его ударно-волновом нагружении и последующей разгрузке удельная масса выбрасываемых частиц возрастает в четыре раза по сравнению со случаем выброса частиц с поверхности образца, остающегося в твердом фазовом состоянии.

При давлении выше порога начала плавления под воздействием волны разгрузки (30 ГПа) шероховатость поверхности свинца уменьшается примерно от 3.2 до 0.16 мкм, что приводит к уменьшению удельной массы выбрасываемой пыли в восемь раз (с 12 до

1.4 мг/см<sup>2</sup>), при этом наиболее резко уменьшается масса более скоростной части потока.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Asay J. R., Mix L. P., Perry F. C. Ejection of material from shocked surfaces // Appl. Phys. Lett. — 1976. — V. 29, N 5. — P. 284–287.
2. Михайлов А. Л., Раевский В. А., Сасик В. С., Невмержицкий Н. В. и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца // ВАНТ. Сер. Теор. и прикл. физика. — 2010. — Вып. 3. — С. 3–6.
3. Zellner M. B., Vogan McNeil W., Hammerberg J. E., Hixson R. S., Obst A. W., et al. Probing the underlying physics of ejecta production from shocked Sn // J. Appl. Phys. — 2008. — V. 103. — 123502.
4. Аринин В. А., Ткаченко Б. И., Игонин В. В., Панов К. Н., Лебедева М. О. Рентгенографический метод определения массы вещества, выброшенного со свободной поверхности материала при его ударно-волновом нагружении // XV Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 790–796.
5. Strand O. T. et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // Rev. Sci. Instrum. — 2006. — V. 77, N 8. — 083108.
6. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А., Калашников Д. А., Чудаков Е. А., Бутусов Е. И., Гнутов И. С. Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударно-волновом нагружении металлов // ЖЭТФ. — 2016. — Т. 149, вып. 2.
7. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А., Калашников Д. А., Чудаков Е. А., Бутусов Е. И., Гнутов И. С. Регистрация спектра скоростей частиц при выходе ударной волны на поверхность жидкостей различной вязкости // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 4. — С. 122–128.
8. 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 тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 274.
9. Копышев В. П., Медведев А. Б. Термодинамическая модель сжимаемого ковалюма. — Саров, 1995. — (Препринт/РФЯЦ-ВНИИЭФ).