

УДК 532.529.+533.6

РЕГИСТРАЦИЯ ВЫБРОСА ЧАСТИЦ ИЗ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

К. А. Тен¹, Э. Р. Прууэл¹, А. О. Кашкаров¹, И. А. Рубцов^{1,5},
М. В. Антипов², А. Б. Георгиевская², А. Л. Михайлов², И. А. Спирин²,
В. М. Аульченко³, Л. И. Шехтман³, В. В. Жуланов³, Б. П. Толочко⁴

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, ten@hydro.nsc.ru

²РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров

³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск

⁴Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, 630158 Новосибирск

⁵Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Проведены измерения распределения массы вдоль потока микрочастиц с использованием синхротронного излучения от коллайдера ВЭПП-3. Использование мягкого спектра излучения позволило измерить потоки микрочастиц с рекордной (минимальной) удельной плотностью (1 мг/см^3). Одновременная регистрация потоков микрочастиц с помощью пьезодатчиков дает возможность сравнить и дополнить их показания.

Ключевые слова: ударная волна, свободная поверхность, пыление, синхротронное излучение, рентгеновский детектор.

DOI 10.15372/FGV20180514

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании воздействия ударно-волнового нагружения на различные материалы обнаружен эффект, известный как пыление [1]. Суть его заключается в образовании облака (потока) микро- и наночастиц при выходе сильной ударной волны на свободную поверхность (СП). Откольные разрушения на границе СП происходят из-за больших напряжений (как растягивающих, так и сжимающих), которые возникают в результате взаимодействия падающих и отраженных ударных волн. Ситуация осложняется тем, что поверхность границы вещества (СП) не является плоской (на ней есть неровности (возмущения) размерами $1 \div 100 \text{ мкм}$). Регистрация динамики облака микрочастиц дисперсной фазы вещества в быстропротекающих газодинамических процессах представляет собой сложную научно-техническую задачу.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-29-01050).

© Тен К. А., Прууэл Э. Р., Кашкаров А. О., Рубцов И. А., Антипов М. В., Георгиевская А. Б., Михайлов А. Л., Спирин И. А., Аульченко В. М., Шехтман Л. И., Жуланов В. В., Толочко Б. П., 2018.

Первые исследования этих процессов начались во ВНИИЭФ в 1960-е годы, но опубликованы были только в 1998 г. [2]. В дальнейшем эти исследования проводились во ВНИИЭФ [1–4] и Лос-Аламосской национальной лаборатории [5–8]. Было показано, что на поток микрочастиц облака сильно влияет шероховатость СП и выброшенная масса пропорциональна амплитуде шероховатости (Rz). На сегодняшний день это явление по-прежнему остается недостаточно изученным, а техника проведения экспериментов — недостаточно совершенной.

В последние годы началась новая волна интенсивных исследований процесса пыления [1]. Этому способствовало качественное улучшение экспериментальных методик, таких как лазерные [5, 6, 9–11], оптические [4, 6], с использованием пьезодатчиков [12, 13], рентгенография [1, 14]. Появились принципиально новые методы исследования с использованием ускорителей высоких энергий — протонография [15] и синхротронное излучение (СИ) [16–18]. Возросший интерес к пылению также связан с влиянием выброса пыли с СП на результаты измерения динамики ее движения теньвыми, электроконтактными и лазерными методами и, кроме того, связан с важной ролью этого

явления в ряде физических процессов, например в проблеме инерциального термоядерного синтеза при сжатии плазмы [19].

В исследованиях процесса пыления выделяется направление, в котором основным источником облака пыли считается развитие последствий неустойчивости Рихтмайера — Мешкова в металле (или жидкости). В экспериментах на СП задаются периодические возмущения различной амплитуды [1, 20–23]. Цель таких работ заключается в выяснении, как возмущения на поверхности металла, амплитуда и форма ударной волны влияют на распределение плотности вещества, выброшенного в пространство, на его массу, скорость частиц и их распределение по размерам.

Одним из перспективных направлений исследования динамики дисперсной фазы в быстротекающих процессах является регистрация движения частиц лазерным гетеродин-интерферометрическим методом (PDV), однако расшифровка записей пока сопряжена с множеством трудностей. Для того чтобы облегчить расшифровку, можно проводить измерения потоков частиц, для которых размер, масса и форм-фактор известны. В таких опытах на СП метаемой пластины наносится слой калиброванных частиц, после чего проводятся ударно-волновое нагружение пластины и разгон частиц дисперсной фазы. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов позволяет проверить корректность расчетных моделей и получить данные о динамике движения частиц с известными параметрами. Эти данные могут быть сопоставлены с результатами регистрации дисперсной фазы в процессе пыления, где параметры частиц изначально не известны [24].

Большинство экспериментальных исследований направлено на изучение влияния на выброс частиц формы и размера периодических неоднородностей (выемок, канавок) на поверхности металлов [25–27]. Существующие методики регистрации частиц (оптические, рентгеновские, лазерные) позволяют определять их максимальные скорости и импульсы частиц (пьезодатчики), размеры микрочастиц (оптические, голографические [11]). Наибольшие трудности во всех методиках вызывает регистрация распределения массы вдоль потока частиц (особенно в области малых плотностей потоков $1 \div 100 \text{ мг/см}^3$).

В данной работе регистрация потока ча-

стиц с СП металлов проводилась при помощи синхротронного излучения (СИ), генерируемого ускорителями ВЭПП-3 Института ядерной физики им. Г. И. Будкера (Новосибирск) [28]. СИ от ВЭПП-3 обладает мягким рентгеновским спектром ($8 \div 30 \text{ кэВ}$), идентичными короткими импульсами (менее 1 нс), малой расходимостью (менее 0.5 мрад), что позволяет регистрировать потоки частиц очень малой плотности [29, 30]. Высокая повторяемость импульсов СИ обеспечивает тщательную калибровку детектора DIMEX до и после взрывного эксперимента [31, 32]. Точность калибровки детектора дает возможность определять распределение удельной массы потока частиц вдоль траектории их движения. В экспериментах визуализация потока микрочастиц с помощью СИ проводилась одновременно с записью показаний пьезодатчиков. Пьезодатчики нашли широкое применение благодаря простоте получения информации о динамических потоках микрочастиц [12]. Основным недостатком этой методики состоит в трудности динамической калибровки пьезодатчиков. Их желательно использовать совместно с другими методиками, которые позволяют оценить массу и скорости потоков. Использование СИ является идеальным дополнением к пьезодатчикам. Сравнение данных по потоку микрочастиц (скорость и масса) с величиной сигнала от пьезодатчика дает возможность проводить независимую калибровку показаний датчика.

Исследовались потоки микрочастиц из канавок (шероховатостей) размеров $6 \div 60 \text{ мкм}$ на поверхности олова. Полученные распределения масс вдоль потока микрочастиц находятся в хорошем соответствии с расчетами, выполненными во ВНИИЭФ [1, 14]. Эти данные необходимы для численного моделирования процессов выброса частиц.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на станции «Экстремальное состояние вещества» на коллайдере ВЭПП-3. Энергия электронов составляла 2 ГэВ, а спектр СИ из 3-полюсного вогнутого зеркала находится в пределах $8 \div 30 \text{ кэВ}$ [28, 30]. Излучение СИ формировалось коллиматором в виде полосы шириной 20 мм и высотой 0.2 мм. Положение СП оловянного диска с канавками и детектора относительно пучка СИ показано на рис. 1. Ускоренный взрывом диск двигался вдоль детектора DIMEX [31], поперек пучка

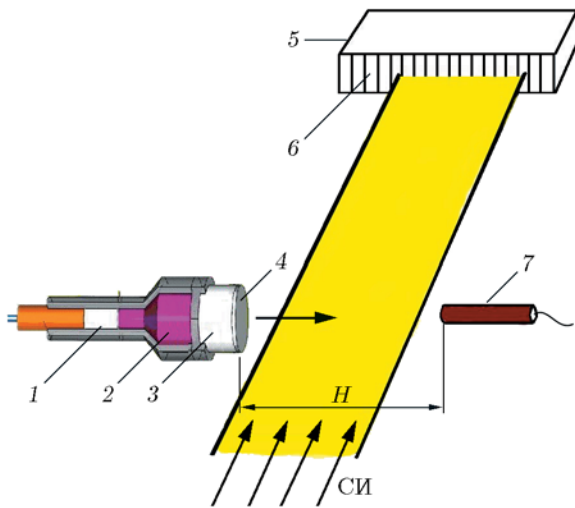


Рис. 1. Схема взаимного расположения образца, детектора и плоскости СИ в опытах по продольной регистрации распределения массы потока микрочастиц:

1 — промежуточный заряд ВВ, 2 — взрывная линза, 3 — основной заряд ВВ, 4 — исследуемый образец (диск из олова), 5 — детектор DIMEX, 6 — каналы детектора, 7 — пьезодатчик

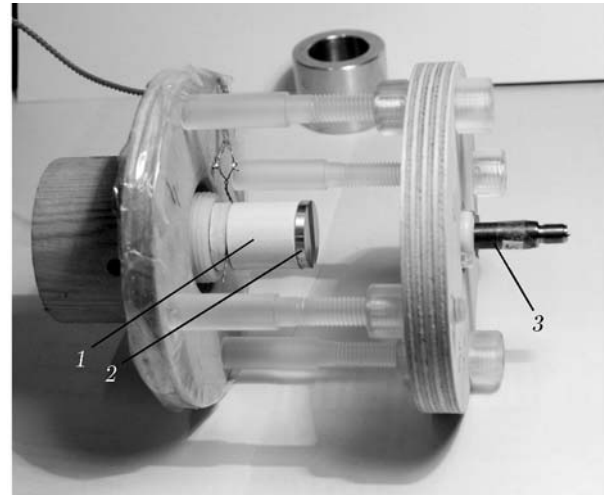


Рис. 2. Общий вид экспериментального узла по ударному нагружению образца с использованием СИ:

1 — заряд ВВ, 2 — пластина из олова, 3 — пьезодатчик

СИ. Регистрирующая часть детектора состоит из каналов размеров (ширина, высота и глубина) $0.1 \times 1.0 \times 30$ мм. Всего в детекторе 512 каналов, т. е. длина зоны регистрации равна 51 мм, линейное разрешение 0.1 мм. Для калибровки использовалась медная фольга толщиной 15, 30 и 50 мкм. В экспериментах с помощью DIMEX измерялось распределение проходящего излучения СИ, на основании которого рассчитывалось распределение линейной массы (количество вещества вдоль луча СИ ρd , $г \cdot см^2$) вдоль детектора. Регистрация распределения линейной массы (512 каналов, которые составляют один кадр) проводилась с шагом 0.5 мкс с экспозицией 1 нс. Всего DIMEX может записывать 32 кадра.

Фотография экспериментального узла приведена на рис. 2. Диск из олова ускорялся в результате взрыва прессованного октогена

диаметром 20 мм и длиной 20 мм. Заряд инициировался взрывной линзой через промежуточный заряд из октогена. Общая масса взрывчатого вещества в сборке (с детонатором) не превышала 12 г. Взрывной узел помещался в камеру, которая откачивалась перед экспериментом до давления 0.01 атм. Часть опытов выполнена при начальном атмосферном давлении. Во всех экспериментах запуск детектора и осциллографа, регистрирующего сигнал пьезодатчика, проводился от проволочного датчика, расположенного во взрывной линзе. Пьезоэлектрический датчик 7 [12] регистрировал давление пылевого потока, налетающего на него. Датчик (диаметр приемной части 5 мм) располагался на расстоянии $H = 18, 28$ и 62 мм от СП (таблица).

СП образца из олова фрезеровали для нанесения шероховатости, которая варьировалась от опыта к опыту. Шероховатость представляла собой канавки с шагом λ и глубиной A . На рис. 3 приведен измеренный профиль ка-

Начальные данные в постановках экспериментов

Шероховатость, мкм	Параметры профиля СП			H , мм	Давление во взрывной камере, атм
	A , мкм	λ , мкм	L , мм		
$Rz6$	6	50	20	18, 62	0.01, 1.0
$Rz60$	60	250	5	18, 28	0.01, 1.0

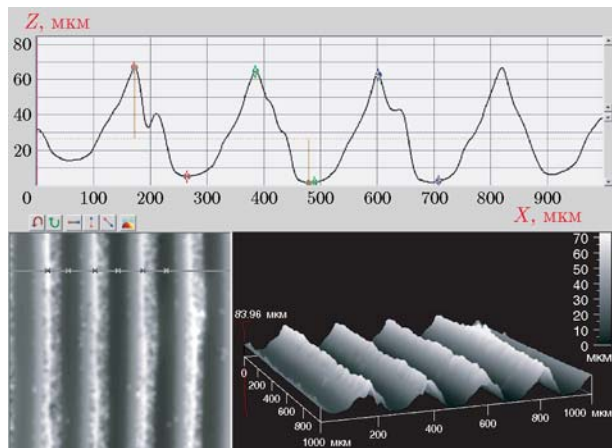


Рис. 3. Профиль канавок на свободной поверхности

навок на образце. Шероховатость сделана в виде полосы шириной L , а остальная часть СП образца была заполирована. Толщина всех образцов из олова составляла 3 мм, диаметр 20 мм. Параметры канавок A , λ и L , используемые в опытах, приведены в таблице.

Поскольку длина зоны регистрации СИ (≈ 20 мм) в ряде опытов была меньше расстояния от СП до пьезодатчика, эксперименты проводили в двух постановках. В варианте 1 детектор регистрировал начальное движение СП, образование пылевого облака, а также момент удара (взаимодействие пылевого облака с пьезодатчиком). В варианте 2 (при больших расстояниях до датчика) в поле регистрации детектора попадал либо начальный этап образования пылевого облака, либо момент удара в пьезодатчик.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Ниже описаны результаты для двух вариантов постановки экспериментов.

Вариант 1 ($Rz = 6$ мкм, $A_0/\lambda/L = 6/50/20$)

В этих экспериментах кадры в детекторе (один кадр — это регистрация распределения проходящего излучения вдоль движения струи) снимались через 1 мкс, поэтому для удобства сопоставления осциллограмм и кадров детектора номера кадров соответствуют числу микросекунд от начала движения СП (диска). На рис. 4 приведена запись детектора DIMEX, в которой 17-й кадр выбран в качестве нулевого отсчета времени (в этом кадре начинается

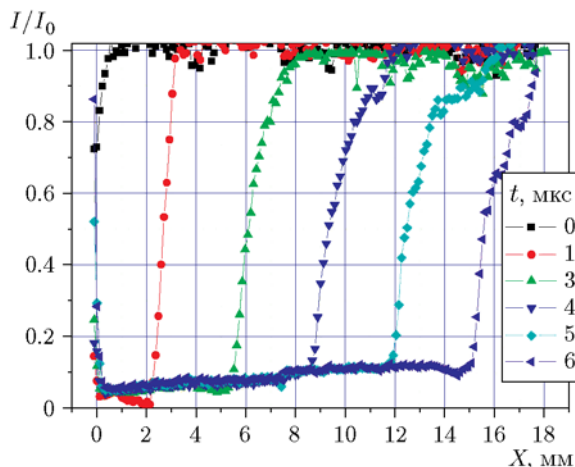


Рис. 4. Запись относительной интенсивности СИ в первых кадрах детектора (номера кадров соответствуют числу микросекунд от начала движения диска)

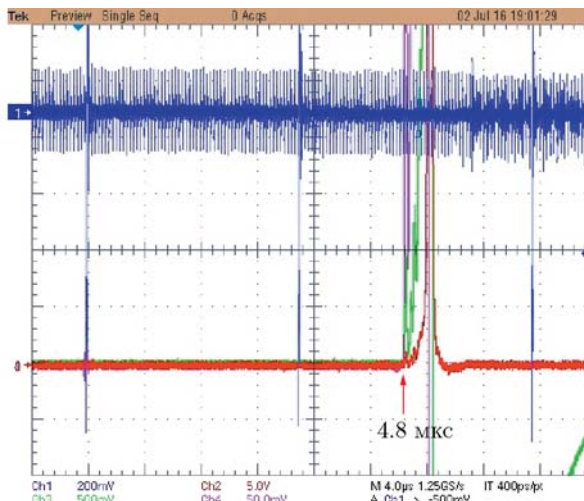


Рис. 5. Осциллограмма сигнала от пьезоэлектрического датчика (время отсчитывается от начала движения диска)

движение СП (диска)). На рисунке этот кадр обозначен как $t = 0$. Соответственно, на осциллограмме (рис. 5) начало роста сигнала ($t = 4.8$ мкс) отсчитывается от этого же времени.

На рис. 6 показана $X-t$ -диаграмма положения струи и СП (диска) (время от начала движения диска). Начало отсчета X ведется от начального положения СП (диска). Пьезодатчик находится на расстоянии 18 мм от диска. Начальные скорости потока частиц и диска составляли 3.86 и 2.8 км/с, что хорошо совпадает с расчетом. Поток пылевого облака (струя) до

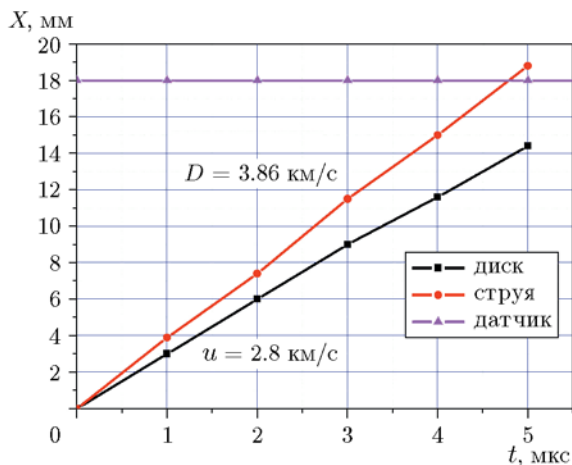


Рис. 6. Расчетные положения диска, струи и датчика (X — расстояние от начального положения диска (СП))

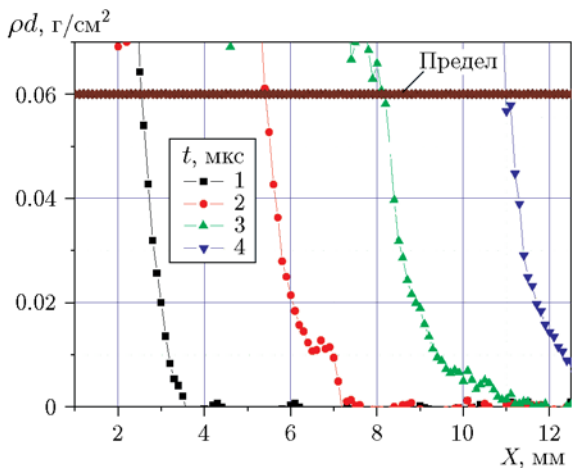


Рис. 7. Распределение во времени удельной массы на луче СИ

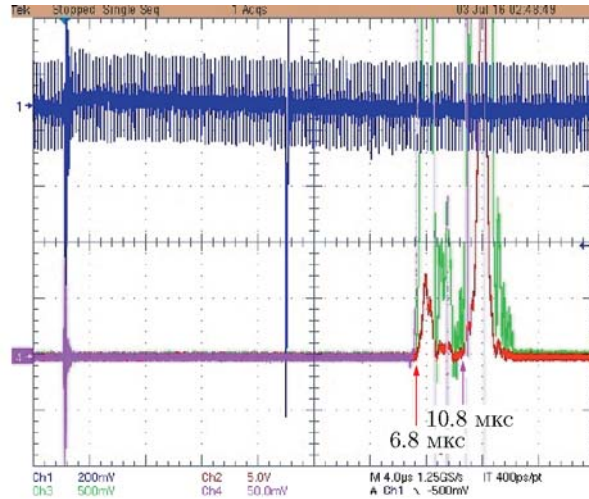


Рис. 8. Осциллограмма сигнала от пьезоэлектрического датчика

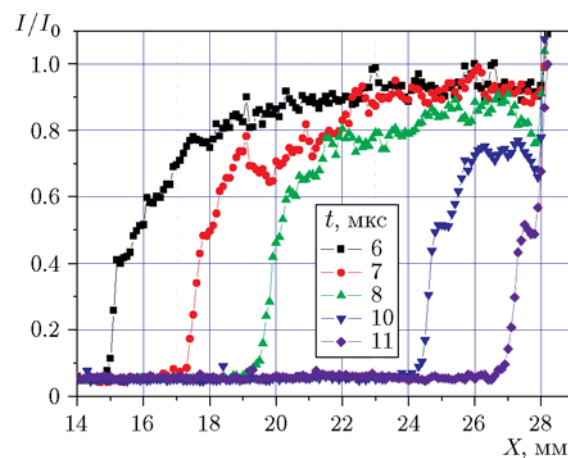


Рис. 9. Регистрограмма распределения относительного проходящего излучения в моменты времени $t = 6, 7, 8, 10, 11$ мкс (положение пьезодатчика — 28 мм от СП)

стигает датчика на 5-й микросекунде, что соответствует показаниям датчика на осциллограмме (см. рис. 5).

На рис. 7 приведено распределение линейной массы в первые микросекунды после начала движения СП. Калибровка поглощения детектора сделана по медной фольге с пересчетом для олова. Видимое распределение массы неоднородно и меняется со временем.

Вариант 2 ($Rz = 60$ мкм, $A_0/\lambda/L = 60/250/5$)

Датчик находится на расстоянии 28 мм от СП. Струя долетает до него через 7 мкс, а СП достигает датчика через 11 мкс, что совпадает с осциллограммой на рис. 8. Датчик на-

чал писать сигнал через 6.8 мкс. Еще через 4.0 мкс сигнал стал резко нарастать. Здесь время также отсчитывалось от начала движения СП (диска). На рис. 9 приведены кадры детектора DIMEX — относительные распределения проходящего излучения СИ. В момент времени $t = 7$ мкс струя достигает пьезодатчика, а диск ударяется об него при $t = 11$ мкс. $X-t$ диаграмма положений струи и СП (диска) приведена на рис. 10.

Совместная запись пьезодатчика и рентгеновской радиографии позволила получить распределение массы струи в моменты времени $t = 7$ мкс (струя достигает датчика) и $t = 11$ мкс

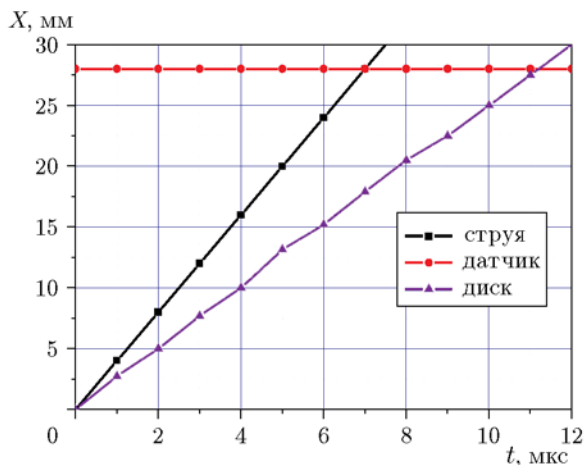


Рис. 10. Положение струи и СП (диска) во времени

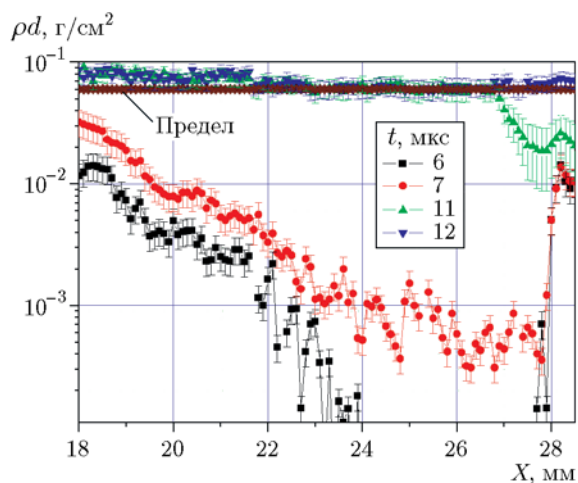


Рис. 11. Распределение удельной массы струи перед ударом в пьезодатчик в моменты времени 6, 7, 11, 12 мкс (положение датчика — 28 мм от СП)

(удар СП о датчик). На рис. 11 они представлены вместе с ошибками вычисления (тонкие линии). Указан также предел калибровки измерений. Полная масса струи (с 18 по 28 мм на рис. 11) составляет 5.6 мг/см^2 , что совпадает с данными [14] $3.9 \div 8 \text{ мг/см}^2$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Впервые возможности использования СИ для исследования потока микрочастиц из больших (более 200 мкм) шероховатостей на медной поверхности описаны в [16]. В [14] приведены опытные данные о пылевом облаке, вылетающем из ударно-нагруженного свинца с шерохо-

ватостью $Rz = 5 \div 60 \text{ мкм}$. Для рентгенографирования применялась съёмка вдоль канавок на образце (длина образца около 10 см). Вид полученных распределений массы вдоль струи из работы [14] совпадает с распределениями, полученными в данной работе. Использование СИ от ВЭПП-3 позволило измерять распределения массы потока частиц вдоль движения с точностью 5 % до плотности 1 мг/см^3 . На какадровых снимках (см. рис. 7) потока частиц видна деформация распределения плотности вдоль струи в различные моменты времени ($t = 1, 2, \text{ и } 3 \text{ мкс}$). Измерение скорости головы струи методикой PDV [9, 10] показывает ее уменьшение после первых $2 \div 4 \text{ мкс}$. По нашим измерениям (см. рис. 6 и 10) скорость струи практически постоянна.

Математическое моделирование процесса выброса частиц проводилось в ВНИИЭФ. В расчетах получены профиль ударной волны в образце, скорость СП образца (2.72 км/с), скорость фронта частиц в вакууме (3.25 км/с). Измеренные значения скорости СП совпадают с расчетными, скорость струи (3.8 км/с) оказалась чуть больше расчетной (3.25 км/с). Возможно, это связано с тем, что расчет выполнен при $Rz = 50 \text{ мкм}$, а эксперименты проводили при $Rz = 60 \text{ мкм}$.

Расчетное распределение массы приведено на рис. 12 и хорошо совпадает с измеренным (рис. 13). Расчетная общая выброшенная масса (8.55 мг/см^2 [22]) чуть превышает измеренную (5.6 мг/см^2). Такую разницу можно объяснить

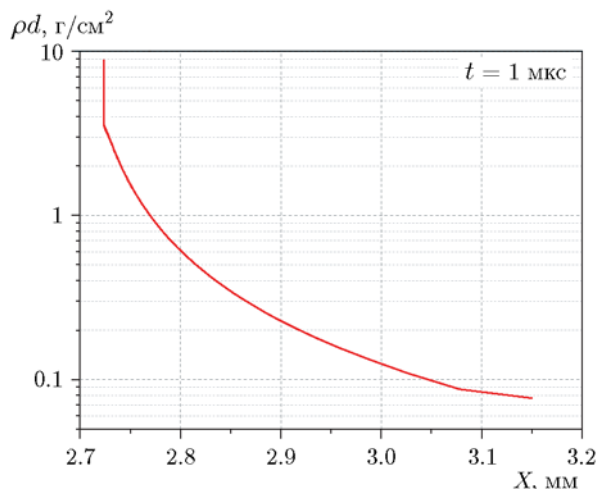


Рис. 12. Расчетное распределение удельной массы в облаке частиц в момент времени $t = 1 \text{ мкс}$

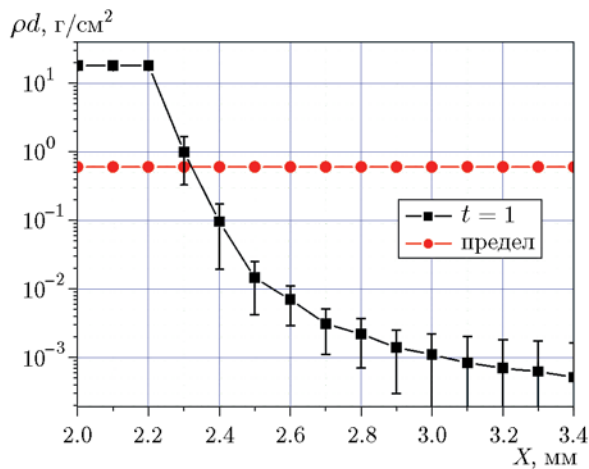


Рис. 13. Измеренное распределение удельной массы на луче СИ через 1 мкс после движения СП

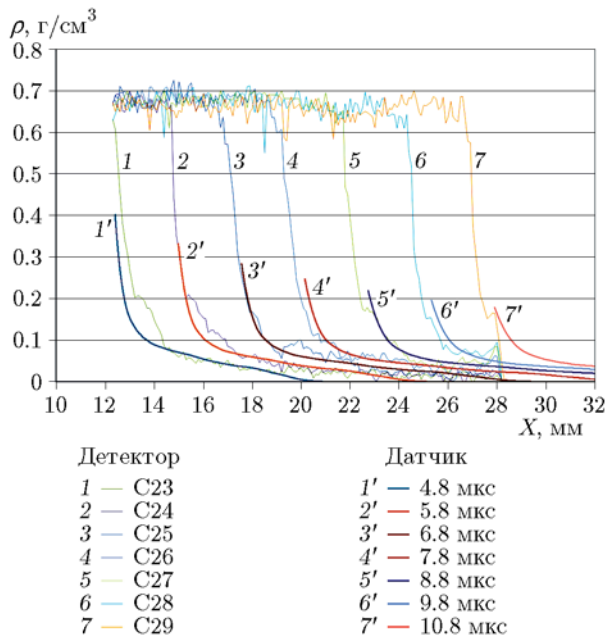


Рис. 14. Сравнение измерений удельной плотности струи пьезоэлектрическим датчиком и детектором СИ

кривизной передней поверхности пылевого облака.

На рис. 14 приведены показания распределений масс, измеренные пьезодатчиком и детектором СИ. В диапазоне $0.02 \div 0.2 \text{ г/см}^3$ они практически совпадают. Это подтверждает правильность используемого в пьезоэлектрическом методе допущения об автономности движения потоков микрочастиц в вакууме [12]. По данным на рис. 13 можно точнее

рассчитать импульс частиц, переданный пьезодатчику. Полученные распределения плотности позволяют точнее калибровать показания пьезодатчиков и тем самым точнее измерять массу и импульс потока частиц в более широком диапазоне.

Для повышения точности измерений можно повысить частоту кадров детектора (коллайдер ВЭПП-3 может выдавать импульсы СИ через 124 нс) и провести съемку с разных проекций. Большая интенсивность СИ позволяет также измерять малоугловое рассеяние от пылевых частиц, что показано в работе [17].

ВЫВОДЫ

Проведены эксперименты по одновременной регистрации положения потоков микрочастиц и распределения плотностей с помощью синхротронного излучения и пьезодатчика.

1. Зарегистрировано распределение удельной массы вдоль потока микрочастиц с удельной массой от 1 мг/см^2 . Распределение неоднородно, но в среднем совпадает с расчетами, выполненными в ВНИИЭФ.

2. Измерены положения свободной поверхности и струи в зависимости от времени, получена динамика скорости их движения.

3. Получены распределения удельной массы вдоль струи перед ударом о пьезодатчик. Имеется возможность калибровать пьезодатчики при очень малой плотности потоков микрочастиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А. Л., Огородников В. Л., Сасик В. С., Раевский В. А., Лебедев А. И., Зотов Д. Е., Ерунов С. В., Сырунин М. А., Садунов В. Д., Невмержицкий Н. В., Лобастов С. А., Бурцев В. В., Мишанов А. В., Кулаков Е. В., Сатарова А. В., Георгиевская А. Б., Князев В. Н., Клещевников О. А., Антипов М. В., Глушихин В. В., Юртов И. В., Утенков А. А., Сеньковский Е. Д., Абакумов С. А., Пресняков Д. В., Калашник И. А., Панов К. Н., Аринин В. А., Ткаченко Б. И., Филяев В. Н., Чапаев А. В., Андраманов А. В., Лебедев М. О., Игонин В. В. Экспериментально-расчетное моделирование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности // ЖЭТФ. — 2014. — Т. 145, вып. 5. — С. 892–905.
2. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л., Крюков Н. И., Толочко А. П.,

- Голубев В. А. 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.
3. Михайлов А. Л., Огородников В. А., Сасик В. С., Лебедев А. И., Зотов Д. Е., Ерунов С. В., Сырунин М. А., Садунов В. Д., Невмержицкий Н. В., Лобастов С. А., Бурцев В. В., Мишанов А. В., Кулаков Е. В., Сатарова А. В., Клещевников О. А., Антипов М. В., Глушихин В. В., Юртов И. В., Утенков А. А., Сеньковский Е. Д., Абакумов С. А., Пресняков Д. В., Калашник И. А., Панов К. Н., Аринин В. А., Ткаченко Б. И., Филяев В. Н., Чапаев А. В., Андраманов А. В. Экспериментальное исследование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности // XV Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 564.
 4. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Бурцев В. В., Лобастов С. А., Ерунов С. В., Романов А. В., Руднев А. В., Кулаков Е. В., Базаров Ю. Б., Глушихин В. В., Калашник И. А., Цыганов В. А., Ткаченко Б. И. Регистрация выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных образцов // ЖЭТФ. — 2009. — Т. 136, вып. 3 (9). — С. 615–620.
 5. Signor L., Lescoute E., Loison D., De Ressaiguier T., Dragon A., Roy G. Experimental study of dynamic fragmentation of shock-loaded metals below and above melting // EPJ Web of Conf. — 2010. — V. 6. — 39012.
 6. De Ressaiguier T., Loison D., Lescoute E., Signor L., Dragon A. Dynamic fragmentation of laser shock-melted metals: some experimental advances // J. Theor. Appl. Mech. — 2010. — V. 48, N 4. — P. 957–972.
 7. Zellner M. B., Dimonte G., Germann T. C., Hammerberg J. E., Rigg P. A., Stevens G. D., Turley W. D., Buttler W. T. Influence of shockwave profile on ejecta // J. Appl. Phys. — 2007. — V. 101. — 063547.
 8. Zellner M. B., Byers M., Hammerberg J. E., Germann T. C., Dimonte G., Rigg P. A., Buttler W. T. Influence of shockwave profile on ejection of micron-scale material from shocked Sn surfaces: An experimental study // Proc. of Dynamic Materials Conf., 2009, Brussels, Belgium.
 9. 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.
 10. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Антонюк Л. К., Шмелев И. В. Экспериментальное исследование срывного разрушения капель и струй при их выбросе с поверхности жидкости // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 4. — С. 115–121.
 11. Sorenson D. S., Pazuchanics P., Johnson R., Malone R. M., Kaufman M. I., Tibbitts A., Tunnell T., Marks D., Capelle G. A., Grover M., Marshall B., Stevens G. D., Turley W. D., LaLone B. Ejecta particle-size measurements in vacuum and helium gas using ultraviolet in-line fraunhofer holography // Los Alamos. Natl. Lab., 2014. — LA-UR-14-24722.
 12. Антипов М. В., Юртов И. В., Утенков А. А., Блинов А. В., Садунов В. Д., Трищенко Т. В., Огородников В. А., Михайлов А. Л., Глушихин В. В., Вишневецкий Е. Д. Применение пьезоэлектрического метода для измерения параметров ударно-индуцированных пылевых потоков // XIX Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2017.
 13. Vogan W. S., Anderson W. W., Grover M., Hammerberg J. E., King N. S. P., Lamoreaux S. K., Macrum G., Morley K. B., Rigg P. A., Stevens G. D., Turley W. D., Veaser L. R., Buttler W. T. Piezoelectric characterization of ejecta from shocked tin surfaces // J. Appl. Phys. — 2005. — V. 98. — 113508.
 14. Антипов М. В., Георгиевская А. Б., Игонин В. В., Лебедева М. О., Панов К. Н., Утенков А. А., Садунов В. Д., Юртов И. В. Результаты исследований процесса выброса частиц со свободной поверхности металлов под действием ударной волны // XVII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. — С. 702.
 15. Buttler W. T., Oro D. M., Preston D. L., Mikaelian K. O., Cherne F. J., Hixson R. S., Mariam F. G., Morris C., Stone J. B., Terrones G., Tupa D. The study of high-speed surface dynamics using a pulsed proton beam // AIP Conf. Proc. on the Shock Compression of Condensed Matter, 2011. — Los Alamos. Natl. Lab. — LA-UR-2011-04269.
 16. Ten K. A., Prueel E. R., Kashkarov A. O., Rubtsov I. A., Shechtman L. I., Zhulanov V. V., Tolochko B. P., Rykovanov G. N., Muzyrya A. K., Smirnov E. B., Stolbikov M. Yu., Prosvirnin K. M. Detection of microparticles in dynamic processes // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — V. 774, N 1. — 012070.
 17. Ten K. A., Prueel E. R., Kashkarov A. O., Rubtsov I. A., Kosov A. V., Shechtman L. I., Zhulanov V. V., Tolochko B. P., Rykovanov G. N., Muzyrya A. K., Smirnov E. B., Stolbikov M. Yu., Prosvirnin K. M. Syn-

- chrotron radiation methods for registration of particles ejected from free surface of shock-loaded metals // *Phys. Procedia*. — 2016. — V. 84. — P. 366–373.
18. Ramos K. J., Jensen B. J., Iverson A. J., Yeager J. D., Carlson C. A., Montgomery D. S., Thompson D. G., Fezza K., Hooks D. E. In situ investigation of the dynamic response of energetic materials using IMPULSE at the Advanced Photon Source // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2014. — V. 500. — 142028.
 19. Попов Н. А., Щербаков В. А., Минеев В. Н., Зайдель Р. М., Фунтиков А. И. О термоядерном синтезе при взрыве сферического заряда (проблема газодинамического термоядерного синтеза) // *Успехи физ. наук*. — 2088. — Т. 178, № 10. — С. 1087–1094.
 20. Асташкин М. В., Баранов В. К., Георгиевская А. Б., Голубинский А. Г., Ирничев Д. А., Мешков Е. Е., Степушкин С. Н., Сюндюков А. Ю., Хатункин В. Ю. Неустойчивость свободной границы слоя воды, ускоряемой волной Тейлора // *Письма в ЖЭТФ*. — 2014. — Т. 99, № 3. — С. 146–148.
 21. Михайлов С. В., Тяпин А. С., Серов Б. С., Руденко В. В. Кинетическая модель откольного разрушения материалов в условиях высокоинтенсивного ударноволнового воздействия // XV Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 420.
 22. Георгиевская А. Б., Раевский В. А. Влияние профиля ударной волны на распределение размеров частиц, выброшенных со свободной поверхности металлов под действием ударной волны (расчетно-теоретические исследования) // XVII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. — С. 709.
 23. Антипов М. В., Георгиевская А. Б., Игонин В. В., Князев В. Н., Лебедев А. И., Лебедева М. О., Панов К. Н., Раевский В. А., Садунов В. Д., Утенков А. А., Юртов И. В. Расчетное моделирование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности // XV Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 666.
 24. Бандуркин К. В., Каменев В. Г., Каплюков Г. В., Куратов С. Е., Кондратьев А. Н., Микулин А. Ю., Rogozkin Д. Б., Сержкин А. А., Тихов А. А., Тур И. В. Экспериментальные (лазерно-интерферо-метрическая методика PDV) и расчетные исследования движения частиц дисперсной фазы // *Физико-хим. кинетика в газ. динамике*. — 2015. — Т. 16, № 4. — С. 1–14.
 25. Мохова В. В., Михайлов А. Л., Тилькунов А. В., Орлов Н. И., Канунова Л. И., Брагунец В. А., Ткаченко М. И., Симаков В. Г., Соколов С. С., Подурец А. М. Механизмы разрушения свободной поверхности ударно-сжатых металлов // *ЖЭТФ*. — 2015. — Т. 148, вып. 6. — С. 1146–1154.
 26. Мохова В. В., Михайлов А. Л., Тилькунов А. В., Орлов Н. И., Канунова Л. И., Брагунец В. А., Ткаченко М. И., Глазков В. С., Подурец А. М. Разрушение свободной поверхности ударно-сжатых металлов с искусственно нанесенными углублениями // XVII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. — С. 307.
 27. Kullback V. A., Terrones G., Carrara M. O., Hajj M. R. Quantification of ejecta from shock loaded metal surfaces // *Proc. on Shock Compression Conf.*, 2011, Chicago.
 28. Levichev E. V. Status and perspectives of VEPP-4 complex (in Russian) // *Phys. Part. and Nuclei Lett.* — 2016. — V. XIII, N 7.
 29. Прууэл Э. Р., Тен К. А., Толочко Б. П., Мержиевский Л. А., Лукьянчиков Л. А., Аульченко В. М., Жуланов В. В., Шехтман Л. И., Титов В. М. Реализация возможностей синхротронного излучения в исследованиях детонационных процессов // *Докл. АН*. — 2013. — Т. 448, № 1. — С. 38–42.
 30. Титов В. М., Прууэл Э. Р., Тен К. А., Лукьянчиков Л. А., Мержиевский Л. А., Толочко Б. П., Жуланов В. В., Шехтман Л. И. Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов // *Физика горения и взрыва*. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 3–16.
 31. Aulchenko V. M., Bondar A. E., Kudryavtsev V. N., Nikolenko D. M., Papushev P. A., Prueel E. R., Rachek I. A., Ten K. A., Titov V. M., Tolochko V. P., Zhilich V. N., Zhulanov V. V. GEM-based detectors for SR imaging and particle tracking // *J. Instrum.* — 2012. — V. 7, iss. 3. — P. 1–18.
 32. Shekhtman L. I., Aulchenko V. M., Kudryavtsev V. N., Kutovenko V. D., Titov V. M., Zhulanov V. V., Prueel E. L., Ten K. A., Tolochko V. P. Upgrade of the detector for imaging of explosions // *Phys. Procedia*. — 2016. — V. 84. — P. 189–196.