

КОНТРОЛЬНЫЙ
ЭКЗЕМПЛЯР

ФГУП «РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР –
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ»

XIX ХАРИТОНОВСКИЕ ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ

**ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА.
ДЕТОНАЦИЯ. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

XIX KHARITON'S TOPICAL SCIENTIFIC READINGS

**EXTREME STATES OF SUBSTANCE.
DETONATION. SHOCK WAVES**

PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE

В двух томах

**Под редакцией
доктора технических наук
А.А. Михайлова**

Том 2

САРОВ. 2017

УДК 534.222.2+536.4

ББК 22.23

Э41

Э41 XIX Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Труды Международной конференции: В двух томах. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2018. Т.2. 376 с.

ISBN 978-5-9515-0379-4

ISBN 978-5-9515-0381-7 (т.2)

Ежегодные научные чтения, проводимые в РФЯЦ-ВНИИЭФ, носят имя академика АН СССР Юлия Борисовича Харитона – выдающегося ученого двадцатого века, основателя и научного руководителя (1946 – 1997 гг.) Российского федерального ядерного центра-Всероссийского НИИ экспериментальной физики.

Доклады российских и зарубежных авторов, представленные на XIX Харитоновских тематических научных чтениях «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (г. Саров Нижегородской обл., 17-21 апреля 2017 г.), отражают современное состояние исследований экстремальных состояний вещества при воздействии импульсных давлений и температур, проблем физики ударных и детонационных волн, энергетических материалов.

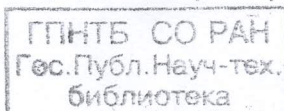
Труды этой международной конференции могут представлять интерес для широкого круга специалистов в области физики быстропротекающих процессов и высоких плотностей энергии, а также аспирантов и студентов старших курсов физических и физико-технических факультетов.

УДК 534.222.2+536.4

ББК 22.23

ISBN 978-5-9515-0379-4

ISBN 978-5-9515-0381-7 (т.2)



© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2018

1111

12. Борисов А.В., Мамаев И.С., Соколовский М.А. Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей. Москва-Ижевск: Изд-во "РХД", 2003. С.1-353.
13. Michaelides E.E. Particles, bubbles & drops. World Scientific. 2006. P.1-410.
14. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, Drops and particles. Academic Press. 1978. P.1-380.
15. Dominique Legendre, Roberto Zenit and J. Rodrigo Velez-Cordero. On the deformation of gas bubbles in liquids //Physics of fluids, Vol 24. 2012. P.043303(1-12).
16. A. Tomiyama, G. P. Celata, S. Hosokawa and S. Yoshida. Terminal velocity of single bubbles in surface tension force dominant regime //Int. J. Multiphase Flow, Vol. 28. 2002. P.1497-1519.

РЕГИСТРАЦИЯ ВЫБРОСА ЧАСТИЦ ИЗ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ СИ

*К.А.Тен¹, Э.Р. Прууэл¹, А.О. Кашикар¹, И.А. Рубцов¹, М.В. Антипов²,
А.Б. Георгиевская², И.А. Спирин², Л.И. Шехтман³, В.В. Жуланов³, Б.П. Толочко⁴*

¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

²РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров, Россия

³Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН Новосибирск, Россия

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

1. Введение

Выход сильной ударной волны на свободную поверхность (СП) металлического образца приводит к выбросу потока частиц из передней части образца [1-11]. Разрушение СП на микрочастицы происходит из-за растягивающих напряжений, которые возникают в результате взаимодействия падающих и отраженных ударных волн. Реальная СП всегда имеет мелкие неоднородности, в которых происходит концентрация напряжений, приводящая к отрыву микрочастиц от СП. В литературе рассматриваются варианты начального отрыва частиц из микроуглублений, так и из микробугорков [5]. Когда при ударно-волновом нагружении происходит плавление образца, растягивающие напряжения формируются в жидкой среде, и приводят к созданию расширяющегося облака жидких частиц [6]. Экспериментальное исследование этих процессов сильно затруднены из-за малых размеров микрочастиц (0,1 – 100 мкм) и больших скоростей их полета (1-3 км/с). Несмотря на приложенные большие усилия по регистрации этого явления, до сих пор не ясны полная масса частиц, выбрасываемая со СП, ее распределение, и ее эволюция вдоль движения во времени, динамика размеров частиц в потоке.

В данной работе регистрация потока частиц со свободной поверхности металлов проводилась при помощи синхротронного излучения (СИ) от коллайдера ВЭПП-3 в Институте ядерной физики им. Будкера (Новосибирск) [13-14]. СИ от ВЭПП-3 обладает мягким рентгеновским спектром (до 30 кэВ), идентичными короткими импульсами (менее 1 нс), малой расходимостью (менее 0.5 мрад), что позволяет регистрировать очень малые плотности потока частиц. Высокая повторяемость СИ позволяет проводить тщательную калибровку детектора до и после проведения взрывного эксперимента. Точность калибровки детектора дает возможность определить распределение массы потока частиц вдоль их движения. В экспериментах визуализация потока микрочастиц с помощью СИ проводилась одновременно с записью показаний пьезодатчиков [3,7, 19]. Сопоставление (сравнение) данных СИ о распределении плотности потока микрочастиц с данными полученными пьезодатчиком дает возможность проводить независимую калибровку показаний датчика.

Исследовались потоки микрочастиц из канавок с размером от 6 мкм до 60 мкм выполненных на поверхности олова. Ударная волна создавалась прессованным октогеном. Полученные распределения масс вдоль потока микрочастиц находятся в хорошем соответствии с расчетами, выполненными во ВНИИЭФ [2-3].

2. Постановка экспериментов

Эксперименты проводились на станции «Экстремальное состояние вещества» на коллайдере ВЭПП-3. Энергия электронов составляла 2 ГэВ, а спектр СИ из 3-х полюсного вигглера приведен в [13, 14]. Излучение СИ формировалось коллиматором в виде полосы шириной 18 мм и высотой 0.2 мм. Положение оловянного диска (Свободной Поверхности) с канавками и детектора относительно пучка СИ показано на рис.1. Ускоренный взрывом диск двигался вдоль детектора [15, 16], поперек пучка СИ. Детектор регистрировал распределение проходящего излучения СИ (один кадр) через 1 мкс с экспозицией 1 нс. Всего детектор может записывать 100 кадров.

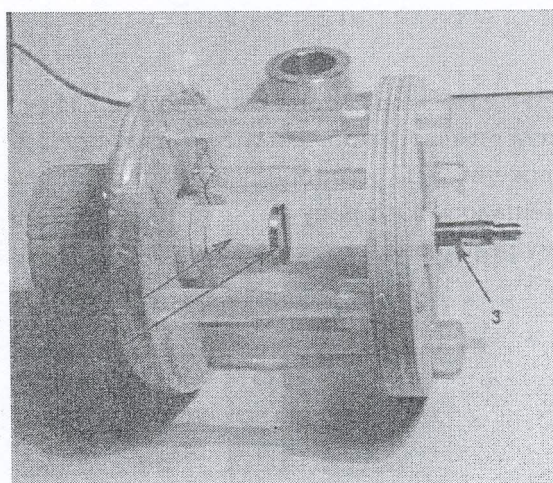
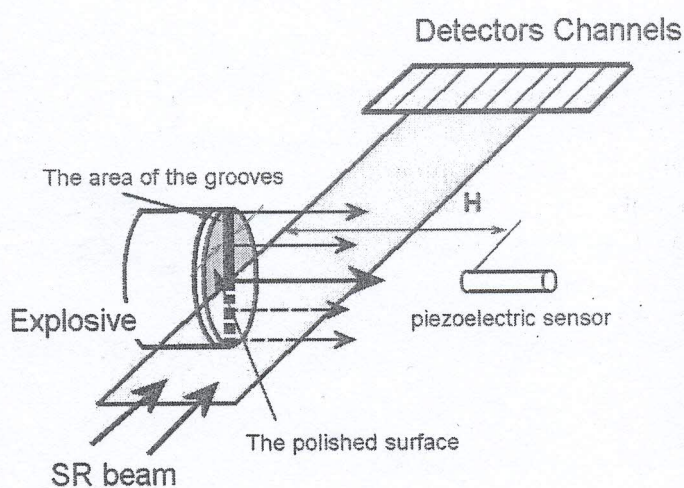


Рисунок 1. Схема взаимного расположения образца, детектора и плоскости СИ

Рисунок 2. Общий вид экспериментального узла по ударному нагружению образца из олова.
 1 – заряд ВВ, 2 – пластина из олова,
 3 – пьезодатчик

Фото экспериментального узла приведено на рис. 2. Ускорение диска из олова проводилось прессованным октогеном диаметром 20 мм и длиной 20 мм. Инициирование заряда проводилось взрывной линзой. Общий вес ВВ в сборке (с детонатором) не превышал 12 грамм. Взрывной узел помещался во взрывную камеру, которая откачивалась перед экспериментом до давления 0.03-0.05 атм. Во всех экспериментах запуск детектора и пьезодатчика проводился от проволочного датчика, расположенного во взрывной линзе.

Пьезоэлектрический датчик [3,7] регистрировал давление пылевого потока, налетающего на него. Датчик располагался на расстоянии (H, мм) от СП (рис. 1).

На СП образца из олова токарным станком нанесена шероховатость, которая варьировалась от опыта к опыту. Шероховатость представляла собой канавки с шагом λ и глубиной A_0 . На рис. 3 приведен измеренный профиль с канавками для образцов. Шероховатость сделана в виде полосы, шириной L (рис. 4). Остальная часть свободной поверхности образца была заполирована. Толщина всех образцов из олова составляла 3 мм, диаметр 20 мм. Данные канавок A_0 , λ и L для проведенных опытов приведены в таблице 1.

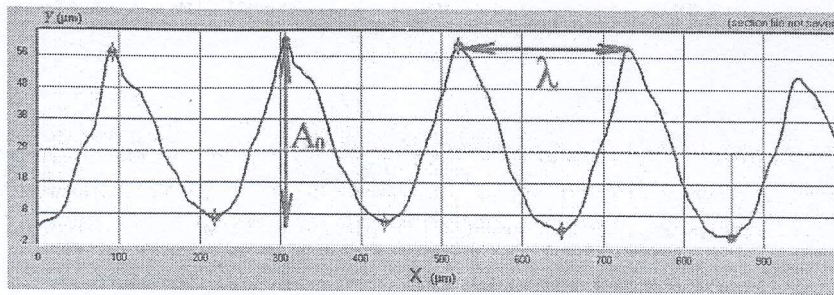


Рисунок 3. Профиль канавок на свободной поверхности

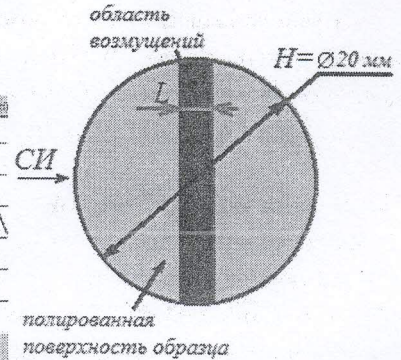


Рисунок 4. Вид на образец (СП) с торца. L – ширина зоны с канавками

Поскольку зона регистрации СИ (~ 14 мм) была меньше расстояния от СП до пьезодатчика, эксперименты проводились в двух постановках. В варианте 1 детектор регистрировал начальное движение СП и процесс образования пылевого облака. В варианте 2 – поле зрения детектора смещалось в сторону датчика на строго определенное расстояние так, чтобы детектор показывал распределение потока перед, и в момент удара фронта потока в пьезодатчик.

Таблица 1. Исходные данные экспериментов

№ варианта	Параметры шероховатости СП			H, мм	Давление в камере, бар.
	A ₀ , мкм	λ, мкм	L, мм		
1	6	50	20	65	0.05
2	60	250	5	28	0.038

A₀ – глубина канавок,
λ – расстояние между канавками

Результаты экспериментов

Ниже описаны результаты для двух вариантов постановки экспериментов.

Вариант 1. (A₀/λ/L = 6/50/20)

Запуск осциллографа (рис. 5) и детектора (рис.6) произошел от сигнала на подрыв детонатора. Время между кадрами детектора 1 мкс, поэтому номер кадра соответствует текущему времени. Движение СП начинается в 17 кадре (через 17 мкс), этот кадр на рис. 6 соответствует кадру с t=0.

На рис. 7. приведены расчетные положения струи и пластины. По оси X дан номер кадра (номер кадра совпадает с временем в мкс). Начало отсчета Y ведется от СП пластины. Положение пьезодатчика показано зелеными точками (62 мм от СП). До 20 кадра положение частиц и СП определялось из рис.6, далее их положения экстраполировались за пределы измерения до положения датчика. Начальные скорости потока частиц и СП составляли 3.86 км/с и 2.8 км/с, что хорошо совпадает с расчетом. Струя достигает датчика на 30 кадре (t=30 мкс), что соответствует показаниям датчика на осциллограмме (рис. 5).

На рис. 8. приведено распределение массы вдоль струи через 1 мкс после начала движения СП (кадр t=1 на рис. 6). Калибровка поглощения детектора была сделана по медной фольге (во время эксперимента оловянной фольги не было). Видимая длина струи составляет ~ 1 мм. Детектор позволяет регистрировать массу на луче > 0.001 g/cm².

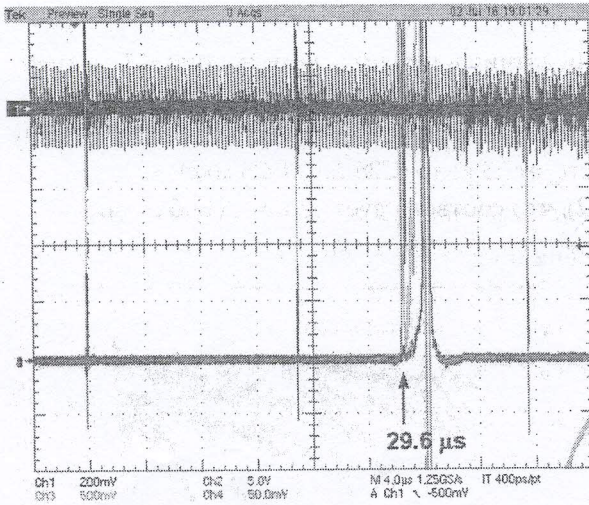


Рисунок 5. Осциллограмма сигнала от пьезоэлектрического датчика. Сигнал на датчике начинает расти через 29.6 мкс

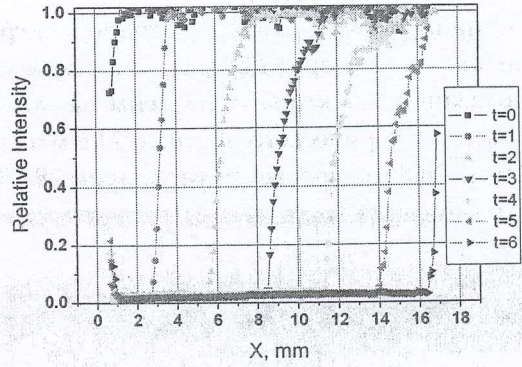


Рисунок 6. Запись относительной интенсивности СИ в первых кадрах опыта 1. Скорость струи 3.8 км/с, скорость пластины 2.75 км/с

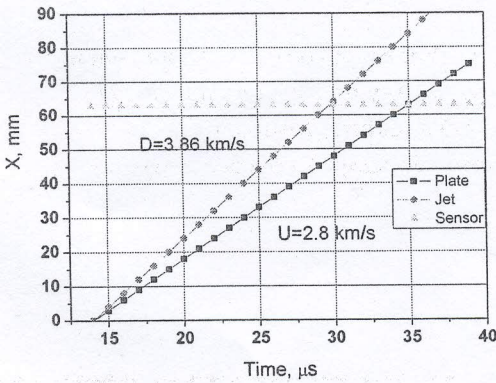


Рисунок 7. Расчетные положения пластины, струи и датчика. По оси X – номер кадра (время от подрыва детонатора), по оси Y – расстояние от начального положения пластины (СП) в мм

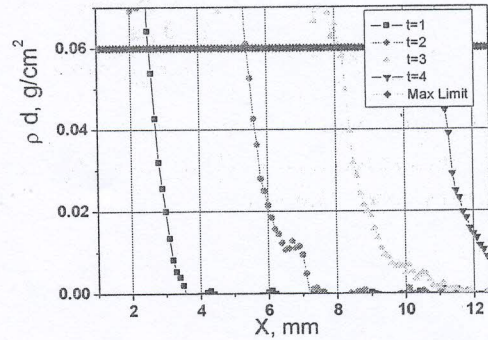


Рисунок 8. Динамика распределения массы на луче СИ от времени (кадры через 1 мкс)

На рис. 9 приведено распределение массы вдоль струи через 1 мкс после начала движения СП (кадр t=1 на рис. 6 и рис.8). Калибровка поглощения детектора была сделана по медной фольге с пересчетом для олова.

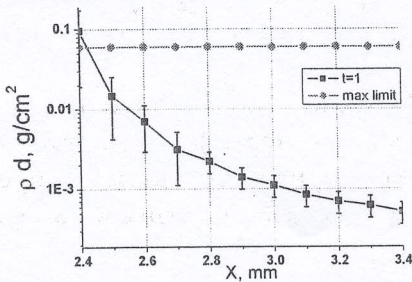


Рисунок 9. Распределение массы на луче СИ через 1 мкс после движения СП. Красной линией обозначен предел калибровки измерений массы

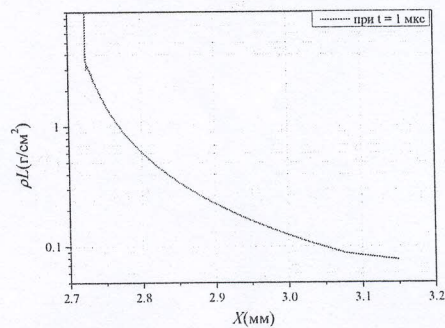


Рисунок 10. Распределение ρL в облаке частиц на момент времени $t = 1$ мкс (из расчета длины «пылящего» участка $L = 2$ см).

Вариант 2. . ($A_0/\lambda/L = 60/250/5$)

Осциллограмма сигнала от пьезоэлектрического датчика представлена на рис. 11. Датчик начал писать сигнал через 24,8 мкс. Через еще 4,1 мкс сигнал стал резко нарастать.

Показания детектора приведены на рис. 12. По оси X приведено расстояние от СП. Началу записи пьезоэлектрического датчика (24,8 мкс) соответствует 25 кадр (C25 или $t=25$ мкс).

Время 28,8 мкс соответствует кадрам 28-29 (рис. 12), что соответствует удару СП об датчик.

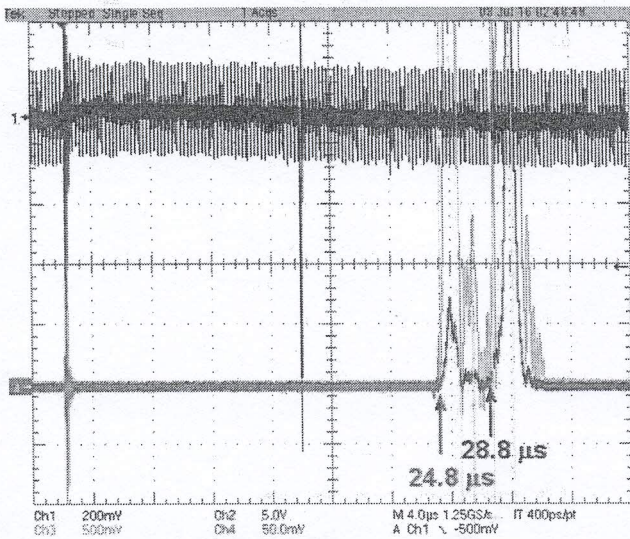


Рисунок 11. Осциллограмма сигнала от пьезоэлектрического датчика. Пьезодатчик начал работать через 24,8 мкс..

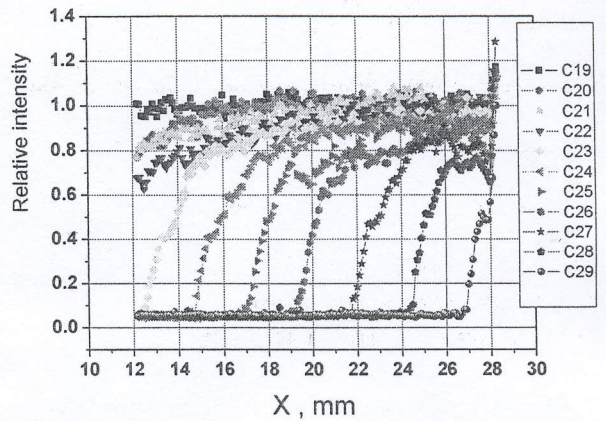


Рисунок 12. Регистрограмма относительного проходящего излучения. Началу записи пьезоэлектрического датчика (24,8 мкс) соответствует 25 кадр (C25-красный)

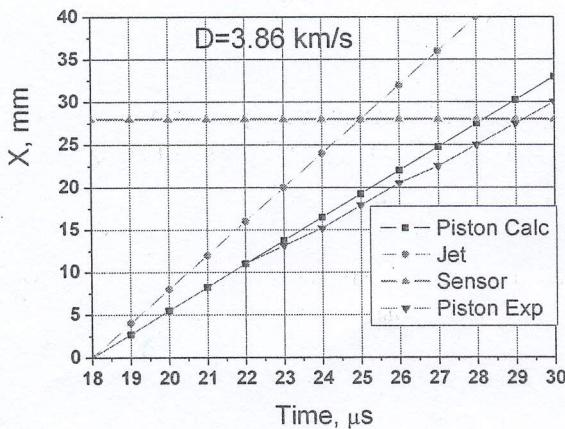


Рисунок 13. Оценочное и экспериментальное положение струи и СП (олова) в опыте 4. Струя долетает до датчика на 25 кадре (за 7 мкс), а СП достигает датчика на 29 кадре (через 11 мкс)

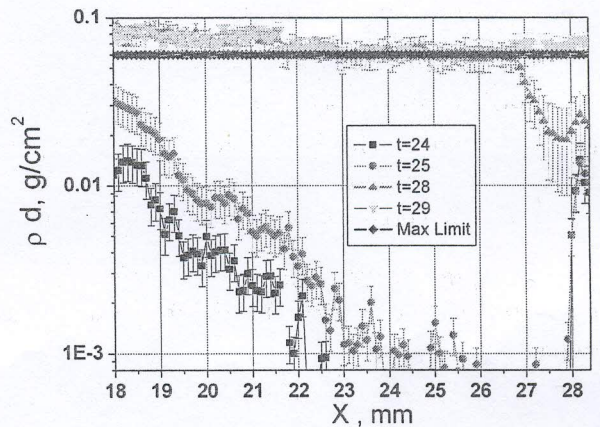


Рисунок 14. Распределение массы струи перед ударом в пьезодатчик (кадр 24) и в момент удара СП (кадр 28-29). Коричневая линия – предел измерения массы. Положение датчика $X=28$ мм

На рис. 13 приведены рассчитанные и экспериментальное положения струи и СП (олова) в опыте. Положение датчика – 28 мм от СП.

Калибровка поглощения детектора по фольге из меди дает возможность измерить распределение массы вдоль пучка в зависимости от времени. На рис. 14 дано распределение массы

струи в кадрах С25 и С28 (время 28.78 мкс) и С29 вместе с ошибками вычисления (тонкие линии). Коричневая линия показывает предел калибровки измерений. Полная масса струи (с 18 по 24 мм на рис. 14) составляет 5.6 мг/см^2 , что совпадает с данными в [3, (от 3.9 до 8 мг/см^2)].

Обсуждения

Впервые возможности СИ для исследования потока микрочастиц из больших (более 200 мкм) шероховатостей на медной поверхности приведены в [18]. В [3] приводятся опытные данные о пылевом облаке, вылетающем из ударно-нагруженного свинца с шероховатостью 5-50 мкм. Для рентгенографирования применялась съемка вдоль канавок на образце (длина около 10 см). Вид полученных распределений массы вдоль струи совпадает с распределениями, полученными в данной работе. Использование СИ от ВЭПП-3 позволило измерять распределения масс потока частиц вдоль движения с точностью 5% до плотностей 0.001 г/см^2 . На поккадровых снимках (рис.7) потока частиц видна деформация распределения плотности вдоль струи (кадры $t=1$, $t=2$, и $t=3$) от времени.

Математическое моделирование процесса выброса частиц проводилось в ВНИИЭФ. В расчетах были получены профиль УВ в образце, скорость свободной поверхности (СП) образца – $2,72 \text{ км/с}$; скорость фронта частиц в вакууме – $3,15 \text{ км/с}$, Общая расчетная выброшенная масса – $9,55 \text{ мг/см}^2$.

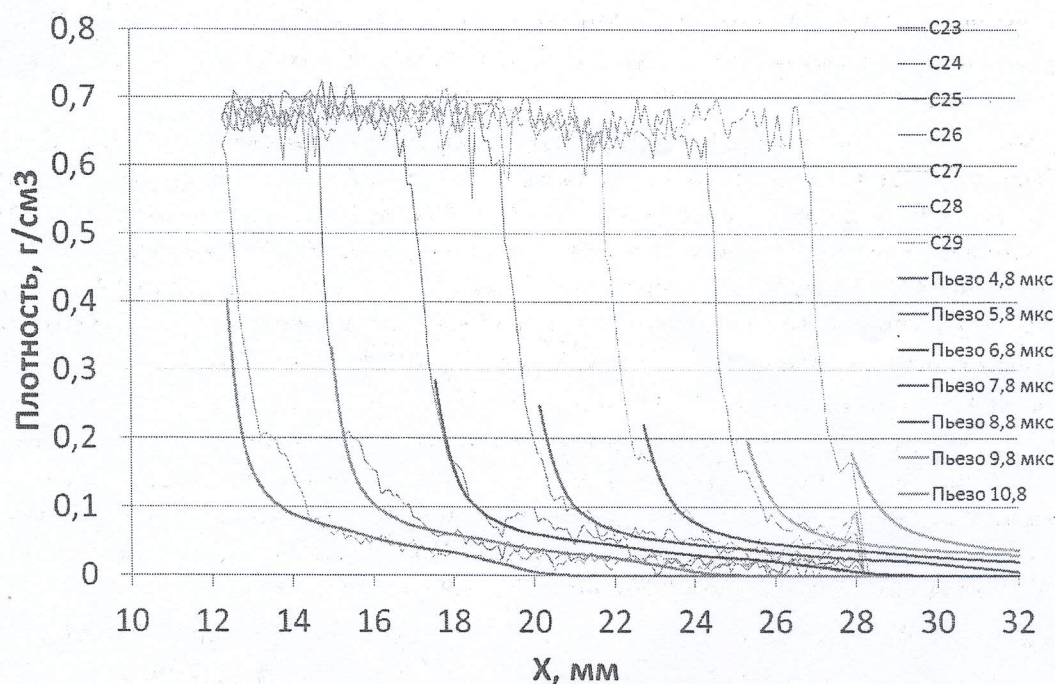


Рисунок 15. Сравнение измерений плотности струи пьезоэлектрическим датчиком и детектором СИ

На рис. 10 представлено расчетное распределение массы частиц вдоль струи. Видно хорошее соответствие измеренных распределений масс (рис.9) с расчетным.

На рис.15 приведены совмещенные показания распределений масс, измеренные пьезодатчиком и детектором СИ. От уровня 0.02 до 0.2 г/см^3 они практически совпадают. Это подтверждает правильность используемого в пьезоэлектрическом методе допущения об автоточности движения потоков микрочастиц в вакууме [19]. По данным на рис. 14 можно более точно сосчитать импульс частиц, переданный пьезодатчику. Полученные распределения плотности также позволяют точнее калибровать показания пьезодатчиков, позволяя 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. Также большая интенсивность СИ позволяет измерять мало-угловое рассеяние от пылевых частиц, что показано в работе [17].

Выводы

Проведены эксперименты по одновременной регистрации положения потоков микрочастиц и распределения плотностей с помощью СИ и пьезодатчиком. Были измерены:

1. Динамика распределений массы вдоль потока микрочастиц с удельной массой от 0.001 г/см^2 . Распределение массы вдоль струи не однородно, но в среднем совпадает с расчетами ВНИИЭФ.
2. Измерены положения СП и струи в зависимости от времени, получена динамика скорости их движения.
3. Получены распределения массы вдоль струи перед ударом в пьезодатчик. Имеется возможность калибровать пьезодатчики при очень малых плотностях потоков микрочастиц.
4. Имеется возможность улучшения точности измерений по времени, а также получения данных о размерах частиц в потоках методом СИ.

Список литературы

1. В.А. Огородников, А.Г. Иванов, А.Л. Михайлов, Н.И. Крюков, А.П. Толочко, В.А.Голубев. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц. // ФГВ, 1998, т. 34, № 6. Стр. 103-107.
2. А.Л. Михайлов, В. Л. Огородников, В. С. Сасик, В.А. Раевский, А. И. Лебедев, Д. Е. Зотов, С. В. Ерунов, М. А. Сырунин, В. Д. Садунов, Н. В. Невмержицкий, С. А. Лобастое, В. В.Бурцев, А.В. Мишанов, Е. В. Кулаков, А.В. Сатарова, А.Б. Георгиевская, В.Н. Князев, О. А. Клещевников, М. В. Антипов, В.В. Глушихин, И. В. Юртов, А. А. Утенков, Е. Д. Сеньковский, С. А. Абакумов, Д. В. Пресняков, И. А. Калашник, К.Н. Панов, В. А. Аринин, Б. И. Ткаченко, В. Н. Филяев, А.В. Чапаев, А.В. Андраманов, М.О. Лебедев, В.В. Игонин. Экспериментально-расчетное моделирование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности. ЖЭТФ, 2014, том 145, вып. 5, стр. 892-905.
3. 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. // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Труды Международной конференции «XVII Харитоновские Тематические научные чтения». 23-27 марта 2015. Под редакцией А.Л. Михайлова. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров. 2015. Стр. 702-709. ISBN 978-5-9515-0309-1
4. Огородников В.А., Михайлов А.Л., Сасик В.С., Ерунов С.В., Сырунин М.А., Федоров А.В., Невмержицкий Н.В., Кулаков Е.В., Клещевников О.А., Антипов М.В., Юртов И.В., Руднев А.В., Чапаев А.В., Пупков А.С., Сеньковский Е.Д., Сотсков Е.А., Глушихин В.В., Калашник И.А., Финюшин С.А., Чудаков Е.А., Калашников Д.А. Влияние газа на процесс выброса частиц со свободной поверхности образца при выходе на нее ударной волны различной интенсивности.// ЖЭТФ, 2016 г., Том 150, Вып. 2, стр. 411-417
5. В.В. Мохова, А.Л. Михайлов, А.В. Тилькунов, Н.И. Орлов, Л.И. Канунова, В.А. Брагунец, М.И. Ткаченко, В.Г. Симаков, С.С. Соколов, А.М. Подурец. Механизмы разрушения свободной поверхности ударно-сжатых металлов. // ЖЭТФ, 2015, том 148, вып. 6 (12, декабрь), стр. 1146-1154.
6. L. Signor, E. Lescoute1, D. Loison, T. De Rességuier, A. Dragon1, and G. Roy. Experimental study of dynamic fragmentation of shockloaded metals below and above melting. EPJ Web of Conferences v.6, N.39012, (2010)

7. А.А. Утенков, М.В. Антипов, А.Б. Блинов, А.Л. Михайлов, В.Д. Садунов, В.А. Огородников, И.В. Юртов К.Н. Панов. Применение пьезоэлектрических материалов в источниках энергии и в датчиках диагностики динамических процессов. // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Труды Международной конференции «XVII Харитоновские Тематические научные чтения». 23-27 марта 2015. Под редакцией А.Л. Михайлова. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2015. Стр. 887-894. ISBN 978-5-9515-0309-1
8. Thibaut De Resseguier, Didier Loison, EmilienLescoute, Loic Signor, Andre Dragon. Dynamic fragmentation of laser shock-melted metals: some experimental advances. Journal of theoretical and applied mechanics, 48, 4, pp. 957-972, Warsaw, 2010
9. M.V. Zellner, M. Byers, G. Dimonte J.E. Hammerberg, T.E. Germann, P.A. Rigg, W.T. Buttler. Influence of shockwave profile on ejection of micron-scale material from shocked Sn surfaces: An experimental study.// EPJ Web of Conferences v.6, N 39012, (2010)
10. B. J. Jensen, F. J. Cherne, M. B. Prime, K. Fezzaa, A. J. Iverson, C. A. Carlson, J. D. Yeager, K. J. Ramos, D. E., Hooks, J. C. Cooley, and G. Dimonte. Jet formation in cerium metal to examine material strength. Journal of Applied Physics 118, 195903 (2015)
11. W. S. Vogan¹, W. W. Anderson, M. Grover, J. E. Hammerberg, N. S. P. King, S. K. Lamoreaux, G. Macrum, K. B. Morley, P. A. Rigg, G. D. Stevens, W. D. Turley, L. R. Veaser and W. T. Buttler. Piezoelectric characterization of ejecta from shocked tin surfaces. J. Appl. Phys. 98, 113508 (2005);
12. Michael B. Zeller, Guy Dimonte, Timothy C. Germann, James E. Hammerberg, Paulo A. Rigg, Gerald D. Stevens, William D. Thrley and William T. Buttler Influence of shockwave profile on ejecta. J Appl Phys., 101, 063547 (2007).
13. Э. Р. Прууэл, К. А. Тен, Б. П. Толочко, Л. А. Мержиевский, Л. А. Лукьянчиков, В. М. Аульченко, В. В. Жуланов, Л. И. Шехтман, академик В. М. Титов. Реализация возможностей синхротронного излучения в исследованиях детонационных процессов. // ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2013, том 448, № 1, с. 38–42.
14. В. М. Титов, Э.Р. Прууэл, К.А. Тен, Л.А. Лукьянчиков, Л.А. Мержиевский, Б.П. Толочко, В.В. Жуланов, Л.И. Шехтман. Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов.// Физика горения и взрыва, 2011, т.47, № 6, стр. 1-13.
- 15 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 B.P., Zhilich V.N., Zhulanov V.V. GEM-based detectors for SR imaging and particle tracking. Shekhtman L.I., // Journal of Instrumentation, Volume 7, Issue 03 (March 2012), pp. 1-18.
16. L.I. Shekhtman, V.M. Aulchenko, V.N. Kudryavtsev, V.D. Kutovenko, V.M. Titov, V.V. Zhulanov, E.L. Prueel, K.A. Ten, B.P. Tolochko. Upgrade of the Detector for Imaging of Explosions. Physics Procedia. Vol. 84. pp. 189 - 196, 2016.
- 17 K.A. Ten, E.R. Prueel, A.O. Kashkarov, I.A. Rubtsov, A.V. Kosov, L.I. Shekhtman, V.V. Zhulanov, B.P. Tolochko, G.N. Rykovanov, A. K. Muzyrya, E.B. Smirnov, M.Yu. Stolbikov, K.M. Prosvirnin. Synchrotron radiation methods for registration of particles ejected from free surface of shock-loaded metals. Physics Procedia. Vol. 84. pp. 366 - 373, 2016.
18. Ten K.A., Prueel E.R., Kashkarov A.O., Rubtsov I.A., Shekhtman 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. Journal of Physics: Conference Series, Volume 774, Number 1, Page 012070.
- 19 М.В. Антипов, И.В. Юртов, А.А. Утенков, А.В. Блинов, В.Д. Садунов, Т.В. Трищенко, В.А. Огородников, А.Л. Михайлов, В.В. Глушихин, Е.Д. Вишневецкий Применение пьезоэлектрического метода для измерения параметров ударно-индуцированных пылевых потоков Доклад на XVII Харитоновских чтениях, Саров, 2017 г.