

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЫЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М. В. Антипов¹, А. Б. Георгиевская¹, В. А. Огородников¹,
 А. Л. Михайлов¹, И. А. Спирин¹, Д. А. Калашников¹, А. А. Утенков¹,
 И. В. Юртов¹, О. Б. Согрина¹, А. В. Федосеев¹, К. А. Тен²,
 Э. Р. Прууэл², А. О. Кашкаров², И. А. Рубцов²

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва, 607188 Саров, MVAntipov@vniiief.ru

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, pru@hydro.nsc.ru

При исследовании процесса ударно-индуцированного пыления, особенно когда потоки частиц движутся в газе или вызваны несколькими ударными волнами, необходимо получать экспериментальные данные о динамике изменения плотности в этих потоках в различные моменты времени начиная от выхода ударной волны на свободную поверхность образца. Для проведения таких измерений был использован метод скоростной рентгенографии с помощью синхротронного излучения. В экспериментах на свободную поверхность образцов из олова, имевших шероховатость Rz 5, 20 и 60, выходили одна или, последовательно, две ударные волны с давлением ≈ 40 ГПа. Разгрузка ударной волны происходила в вакуум или газовую среду (воздух, гелий, азот) с начальными давлениями $1 \div 8$ атм. В работе приведены постановки экспериментов и полученные в экспериментах данные по динамике изменения плотности в пылевых потоках, образовавшихся под действием одной и двух последовательных ударных волн после их выхода на свободную поверхность образцов в вакууме и газовых средах.

Ключевые слова: ударная волна, пыление, частицы, поток, плотность, синхротронное излучение.

DOI 10.15372/FGV2023.9361
 EDN ORJUJF

ВВЕДЕНИЕ

Явление выброса микрочастиц со свободной поверхности (СП) материалов при выходе на них ударных волн (УВ), так называемое ударно-индуцированное пыление, может существенно затруднять корректную интерпретацию получаемых результатов при использовании современных измерительных методик исследования ударно-волновых процессов, а также быть важным для некоторых технических применений. В последние десятилетия этому вопросу уделяется большое внимание [1–5].

Поток микрочастиц возникает из-за различного рода дефектов внутренней структуры материала и поверхности. Его появле-

ние можно объяснить частным случаем развития неустойчивости Рихтмайера — Мешкова. Обычно пыление связано с шероховатостью СП величиной от единиц до нескольких десятков микрометров, образованной при механической обработке. Из неровностей под действием УВ выбрасываются микрокумулятивные струи, которые затем распадаются на отдельные частицы. Скорости фронтов пылевых потоков зависят от соотношения амплитуды и длины волны возмущений на поверхности (параметров шероховатости) и обычно превышают примерно в 1.5–2 раза скорость СП. Масса выброшенного вещества в потоках также зависит от соотношения параметров начальных возмущений СП и составляет от единиц до нескольких десятков миллиграммов с одного квадратного сантиметра поверхности. На количество выброшенной массы частиц существенное влияние оказывает фазовое состоя-

© Антипов М. В., Георгиевская А. Б.,
 Огородников В. А., Михайлов А. Л., Спирин И. А.,
 Калашников Д. А., Утенков А. А., Юртов И. В.,
 Согрина О. Б., Федосеев А. В., Тен К. А.,
 Прууэл Э. Р., Кашкаров А. О., Рубцов И. А., 2024.

ние вещества. Значительное (по массе) ударно-индуцированное пыление наблюдается в условиях, когда вещество после ударно-волнового нагружения находится в жидкой фазе.

Для исследования пыления применяют следующие методы регистрации: импульсная радиография, теневая макро- и микросъемка, голография, лазер-гетеродинная методика (PDV), пьезодатчики, индикаторные фольги и др. Наиболее информативными с точки зрения определения распределения плотности и массы в потоке частиц являются методы импульсной радиографии [6]. Как правило, это импульсная рентгенография [7] и протонография [8]. Импульсная рентгенография позволяет получать изображения обычно в один-два момента времени, а при малых длинах потоков вдоль направления движения имеет недостаточное пространственное разрешение. Протонография (на ПРГК-100, г. Протвино) лишена этих недостатков и позволяет получать несколько последовательных кадров, однако возникают затруднения при регистрации низкоплотной части потока в диапазоне $0.001 \div 0.01 \text{ г/см}^3$.

Для корректного определения механизмов образования пылевых потоков и процессов, происходящих при их торможении в газе, а также при сложном ударно-волновом нагружении требуются экспериментальные данные об эволюции пространственного распределения плотностей в ударно-индуцированных пылевых потоках. Из-за ограничений по количеству кадров получение таких данных с помощью импульсной рентгенографии затруднительно. Напротив, использование синхротронного излучения (СИ) от циклических ускорителей позволяет проводить многокадровую рентгеновскую хронографию в широком временном интервале [9–11].

По сравнению с традиционными источниками рентгеновского излучения, возникающими при торможении ускоренных электрическим полем электронов на аноде, для СИ характерны более высокая интенсивность потока фотонов, стабильность, малая угловая расходимость и малое время экспозиции, а также высокая периодичность повторения, что позволяет проводить рентгеновскую хронографию взрывных процессов высокого пространственного и временного разрешения. В отличие от протонографии, СИ с мягким рентгеновским спектром позволяет регистрировать низкоплотные объ-

екты при высоком соотношении сигнал/шум, в частности ударно-индуцированные пылевые потоки [9, 11, 12].

В работе приведены постановки и основные результаты исследования процессов зарождения и развития пылевых потоков, образующихся при выходе УВ на поверхность образцов из олова, с использованием СИ. Эксперименты проводили как в вакууме, так и в среде различных газов (воздух, гелий, азот) при одно- и двукратном ударно-волновом нагружении образцов с шероховатостью СП Rz 5, 20 и 60.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В представленных экспериментах использовали СИ, возникавшее при работе ускорителя ВЭПП-3: пучки СИ с энергией $10 \div 30 \text{ кэВ}$, длительностью $\approx 1 \text{ нс}$, следующие с интервалом 124 нс. Мягкое рентгеновское излучение такого диапазона позволяет исследовать объекты, имеющие радиографическую толщину до 3 г/см^2 [6]. Опыты проводили на станции «Субмикросекундная диагностика».

Регистрацию интенсивности проходящего через исследуемый объект СИ осуществляли линейным детектором рентгеновского излучения DIMEX (разработка ИЯФ СО РАН) [13]. Детектор DIMEX работает при следовании пучков СИ через 124 нс и имеет 512 чувствительных каналов шириной 0.1 мм. Апертура детектора $51.2 \times 2 \text{ мм}$. Можно регистрировать до 100 кадров. Эффективность регистрации квантов 50 % при энергии 30 кэВ. Параметры СИ и детектора, а также возможность проведения дополнительных калибровок позволяют измерять плотность пылевых потоков с точностью не менее 5 % [6].

В опытах плоскость луча СИ направляли вдоль оси симметрии сборки, как показано на рис. 1,а, и регистрировали интенсивность СИ, проходившего через пылевые потоки, а затем с помощью зарегистрированных значений определяли распределение плотности $\rho L(X)$ вдоль потока.

Для определения объемной плотности $\rho(X)$ необходимо разделить $\rho L(X)$ на толщину потока $L(X)$ в предположении его однородности по поперечному сечению. В опытах с образцами, на которых шероховатость задавалась на полосе шириной 5 мм, деление проводили на эту величину. В опытах с образцами, поверхность которых имела однородную шероховатость, толщину потока принимали рав-

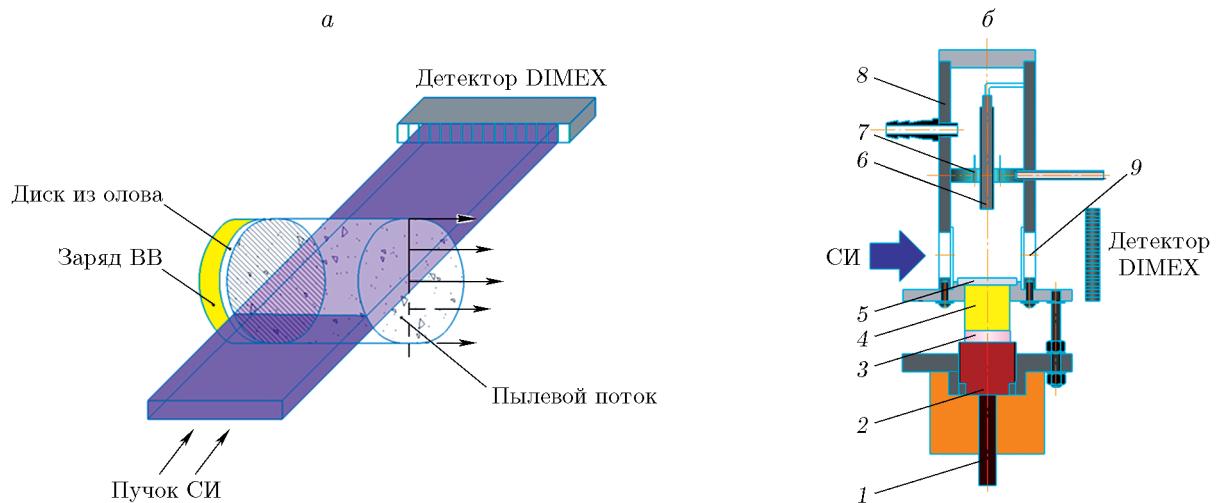


Рис. 1. Постановка измерений методом СИ (а) и конструкция экспериментальных сборок (б):

1 — электродетонатор, 2 — генератор плоской ударной волны, 3 — пластическое взрывчатое вещество $\varnothing 20 \times 4$ мм, 4 — заряд взрывчатого вещества $\varnothing 20 \times 20$ мм, 5 — образец, 6 — пьезодатчик, 7 — коллиматоры PDV, 8 — корпус, 9 — окно, прикрытое лавсаном

ной 12 мм. Это значение было определено в предварительных двумерных численных расчетах и подтверждено в специально проведенном опыте, в котором плоскость луча СИ направляли перпендикулярно к оси сборки (потока). Над центрами образцов на расстояниях $28 \div 32$ мм устанавливали пьезодатчики, при помощи которых независимо измеряли время подлета к ним потоков и распределение плотности в потоках [14]. Во всех опытах с выходом одной УВ на СП образцов использовали пьезодатчики с пьезокерамическими (ЦТС-21) элементами диаметром 4 мм. В опытах с выходом двух УВ на СП использовали пьезодатчики с кварцевыми пьезоэлементами диаметром 4 мм. В некоторых опытах устанавливали также датчики PDV для фиксирования момента выхода УВ из образца и измерения скорости потока [6].

Синхронизацию регистрирующих методик с моментом подрыва осуществляли следующим образом. Детектор DIMEX запускали от электроконтактов, установленных под электродетонатором. При запуске DIMEX генерирует сигнал, от которого отсчитывается время регистрации кадров, следующих с интервалом 124 нс. Этот сигнал использовали для запуска осциллографов и согласования их временных шкал. Начало движения поверхности образца определяли по данным СИ и PDV.

Было проведено три серии экспериментов. В первой серии образцы нагружали одной УВ, сборки находились в вакууме (0.01 атм).

Во второй серии образцы также нагружали одной УВ, но пылевые потоки вылетали в газовую среду (воздух, гелий или азот) при давлениях $1 \div 8$ атм. В третьей серии образцы нагружали двумя УВ, сборки находились в вакууме (0.01 атм). Конструкции использовавшихся экспериментальных сборок показаны на рис. 1, б. В опытах с вакуумом или при давлении воздуха 1 атм эксперименты проводили со сборками без корпуса. В опытах с гелием использовали сборки со стальным герметичным корпусом. В корпусе имелись две сквозные щели шириной по 2 мм и длиной 20 мм, расположенные напротив друг друга, предназначенные для ввода-вывода луча СИ. Щели изнутри были прикрыты двумя слоями лавсана толщиной 0.1 мм каждый. Опыты выполняли во взрывозащитной камере.

Объектом исследований являлись образцы из олова (марка О1, ГОСТ 860-75) толщиной 3 мм с шероховатостью СП $Rz 6 \div Rz 60$, нанесенной в результате токарной обработки. В некоторых опытах на СП образцов оставляли полосу шириной 5 мм с заданной шероховатостью, остальную часть поверхности полировали. Параметры шероховатости контролировали оптическим профилометром.

Нагружение образцов осуществляли зарядами взрывчатого вещества размером $\varnothing 20 \times 20$ мм, инициируемыми плоской детонационной волной. При нагружении одной УВ заряд контактировал с поверхностью образца, при этом расчетное давление перед выхо-

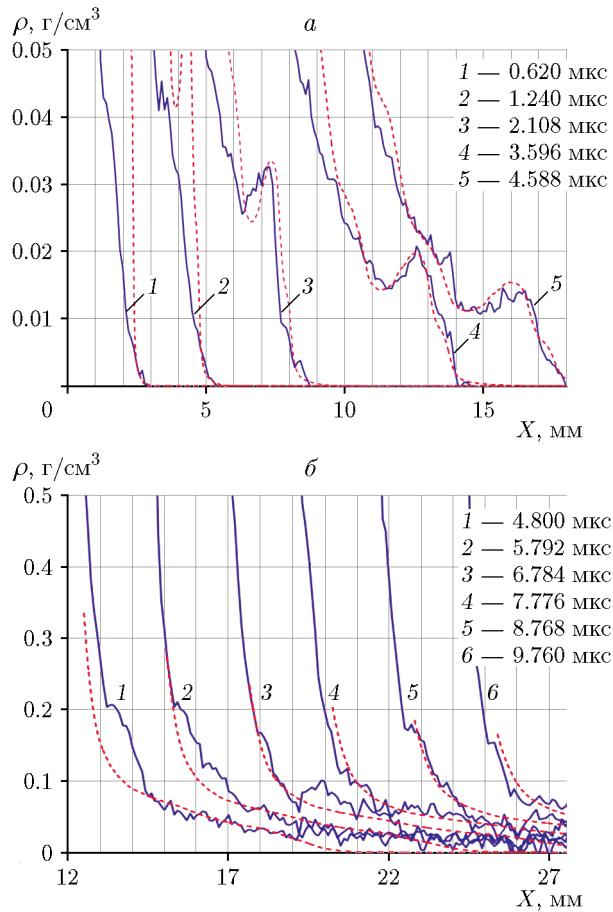


Рис. 2. Результаты нагружения одной ударной волной при движении потоков в вакууме (0.01 atm воздуха): сплошные линии — данные СИ, пунктирные — данные пьезодатчиков; *а* — луч СИ рядом с образцом, *б* — луч СИ рядом с пьезодатчиком

дом УВ на СП металла составляло 44 ГПа, спад давления за фронтом УВ 65 ГПа/см, а скорость движения СП 2.72 км/с. При нагружении двумя УВ заряд контактировал с медной пластиной толщиной 1.5 мм, между медной пластиной и образцом устанавливался зазор 0.5 мм. При этом расчетное давление составляло в первой УВ ≈ 33.5 ГПа, во второй УВ — 54 ГПа, а интервал между волнами 0.18 мкс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены результаты, полученные методом СИ (сплошные линии) в опытах с нагружением образцов одной УВ в вакууме. Пунктирными линиями показаны распре-

деления плотности $\rho(X)$ в потоке частиц в соответствующие моменты времени, пересчитанные из распределения $\rho(t)$, измеренного пьезодатчиком, находившимся на расстоянии 28 мм от начального положения СП, в предположении автомодельности движения потока [14, 15]. Шероховатость образцов — Rz 60 ($2a_0/\lambda = 60/260$ мкм). Из рис. 2 видно, что данные пьезодатчика хорошо согласуются с данными СИ после 4.588 мкс от выхода УВ на СП образца. На более ранних кадрах заметны различия между данными, полученными методом СИ и с использованием пьезодатчиков, для частей потоков, прилегавших к СП образца. Чем меньше время (момент) регистрации, тем ближе к фронту потока место, с которого проявляется отличие. Это свидетельствует о том, что на ранних стадиях движение потока неавтомодельно, что предположительно связано с процессом формирования потока. В частях потока, где заметны различия в данных пьезодатчиков и СИ, происходит втекание вещества в струи, развивающиеся на СП образцов при микрокумуляции, на которое затрачивается определенное время.

На рис. 3, *а* представлены результаты опыта в воздушной среде при давлении 1 атм с образцом шероховатостью Rz 60 ($2a_0/\lambda = 60/220$ мкм). Видно, что распределение $\rho(X)$, пересчитанное из данных пьезоизмерений, отличается от измеренного методом СИ, что связано с торможением потоков в газе, приводящим к нарушению автомодельности движения пылевого потока. На рис. 3, *б* показано распределение плотности в потоке в момент времени 4.712 мкс после выхода УВ на СП образца и расчетное положение воздушной УВ в этот же момент времени. В этом опыте шероховатость СП образца составляла Rz 6 ($2a_0/\lambda = 6/60$ мкм). Из рис. 3, *б* видно, что, хотя расчетная плотность воздуха за фронтом УВ $0.0098 \text{ г}/\text{см}^3$ и превышает плотность передней части пылевого потока, на регистрацию потока наличие сжатого воздуха не влияет. Это связано с тем, что ослабление рентгеновского излучения пылевым потоком олова значительно больше (>10 раз), чем ударно-сжатым воздухом. Так, при 15 кэВ сечение ослабления составляет: для олова $46.6 \text{ см}^2/\text{г}$, для азота $1.2 \text{ см}^2/\text{г}$, для кислорода $1.8 \text{ см}^2/\text{г}$ [16].

На рис. 4 приведены результаты опытов с гелием при давлениях 1, 2 и 8 атм, шероховатость образцов Rz 20 ($2a_0/\lambda = 18/110$ мкм).

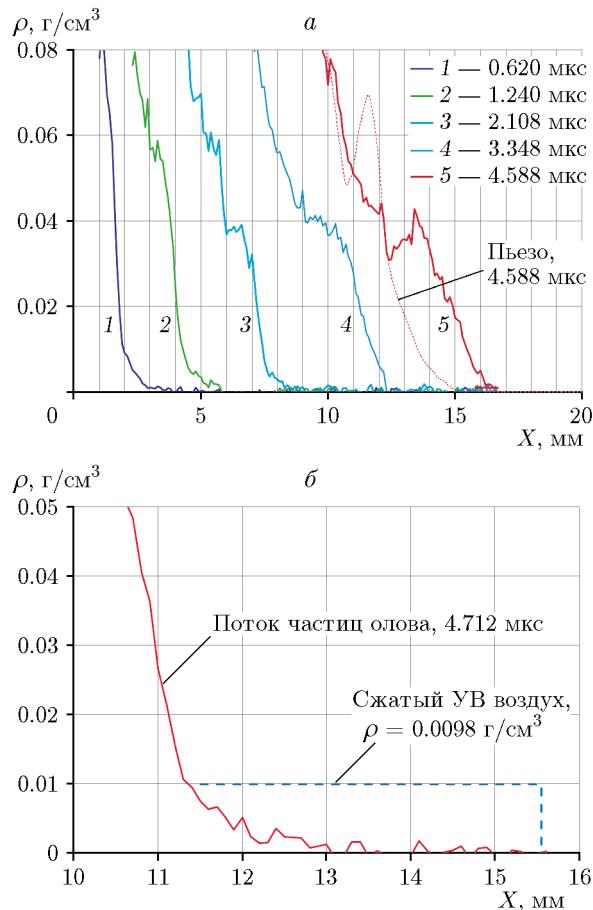


Рис. 3. Распределение плотности в пылевых потоках, двигавшихся в воздухе при начальном давлении 1 атм:

а — образец с шероховатостью Rz 60, б — образец с шероховатостью Rz 6

Во всех опытах с гелием фронт потока частиц, измеренный методом СИ (сплошные линии), опережает фронт потока, пересчитанный из данных пьезоизмерений (пунктирные линии), подобно тому, как это было в опытах с воздухом. При этом для распределений плотности в более плотных частях потоков данные, полученные обоими методами, хорошо согласуются. На рис. 5 приведены распределения плотности, зарегистрированные методом СИ в момент времени 3.1 мкс от выхода УВ на СП образца во всех опытах с гелием при начальных давлениях 1, 2 и 8 атм.

Из рис. 5 видно, что с ростом давления газа положения фронтов потоков стремятся к положению фронта УВ в гелии. Даже при начальном давлении гелия 2 атм наблюдается заметное торможение фронта потока. С увеличением плотности газа торможение становится

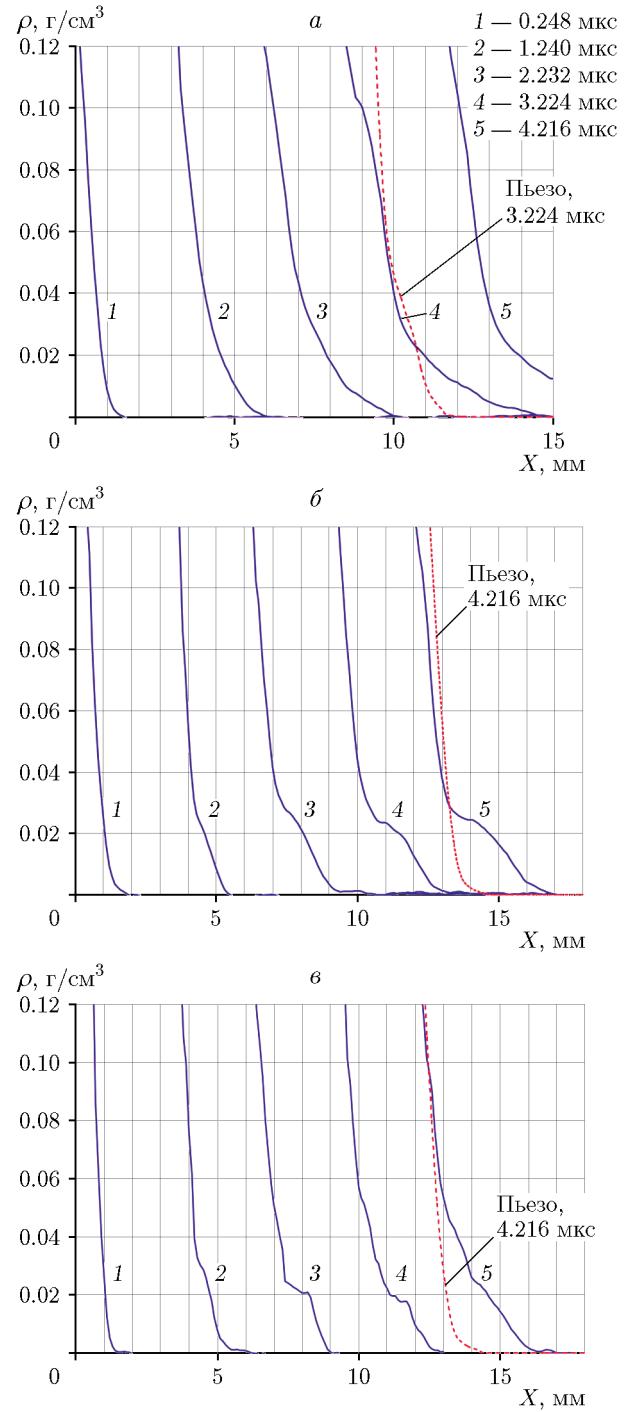


Рис. 4. Распределение плотности в пылевых потоках, двигавшихся в среде гелия при начальных давлениях 1 атм (а), 2 атм (б), 8 атм (в), при нагружении одной ударной волной (шероховатость свободной поверхности образцов Rz 20)

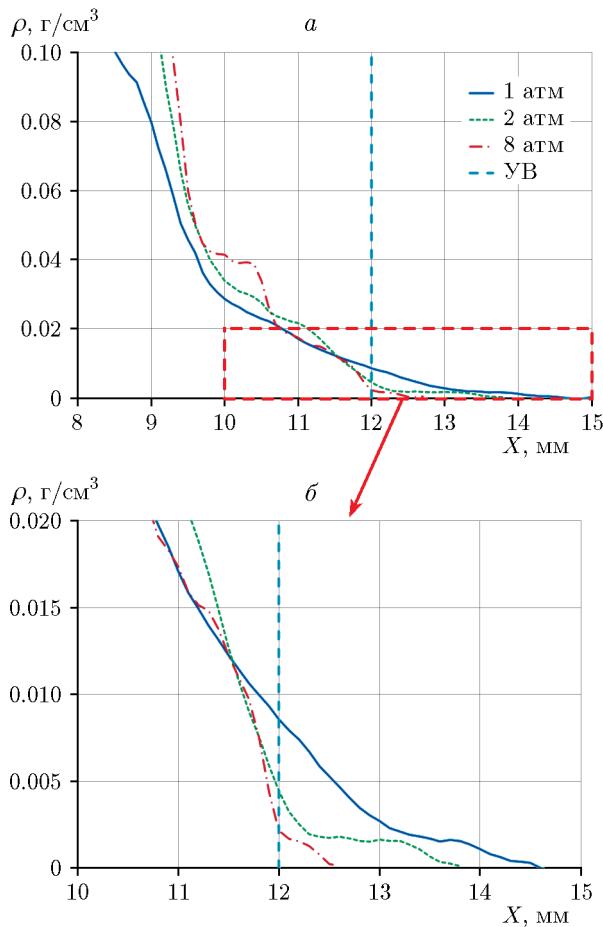


Рис. 5. Распределение плотности пылевых потоков в момент времени 3.1 мкс от начала движения СП в опытах с гелием при разных начальных давлениях:

сплошные линии — данные СИ, пунктирные — данные пьезодатчиков

более выраженным. При этом за фронтом УВ в гелии распределения плотности, зарегистрированные методом СИ, практически одинаковы для всех опытах. Эти данные показывают, что при движении пылевых потоков в гелии интенсивно тормозятся частицы, которые опережают фронт УВ в газе, а на движение частиц, движущихся медленнее УВ, наличие газа влияет слабо.

На рис. 6 приведены результаты опытов с образцами из олова с шероховатостью СП Rz 20 ($2a_0/\lambda = 18/110$ мкм) при начальных давлениях азота 2 и 4.5 атм. В этих опытах фронты пылевых потоков затормозились до массовой скорости движения сжатого газа, равной скорости поверхности образца, через ≈ 2.2 мкс при 4.5 атм и через ≈ 3 мкс при 2 атм. После

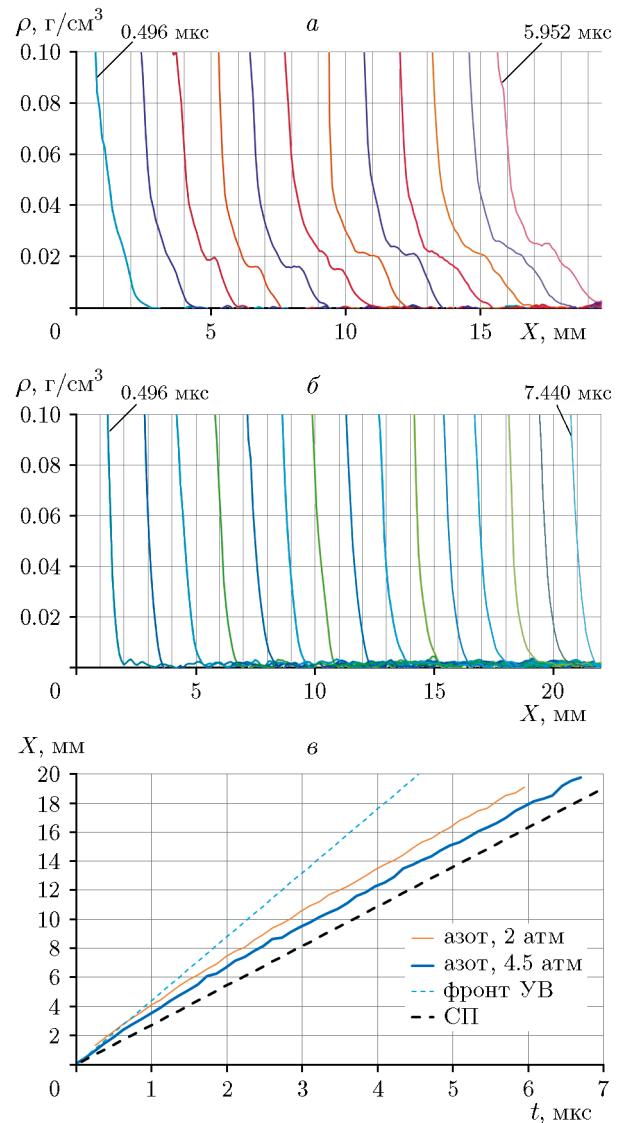


Рис. 6. Распределение плотности пылевого потока в разные моменты времени (с интервалом 0.496 мкс) начиная от момента движения СП 0.496 мкс:

шероховатость образца Rz 20, *а* — 2 атм, *б* — 4.5 атм азота, *в* — $X-t$ -диаграмма движения фронтов потоков, ударной волны в азоте и свободной поверхности образца

этого скорости фронтов заметно не менялись до конца регистрации.

Представленные распределения плотности в пылевых потоках, измеренные методом СИ, показали, что на движение фронтов потоков в неподвижном газе заметно влияет давление даже в 1 атм при разгрузке в гелии, в более плотных газах фронт потока быстро тормозится до

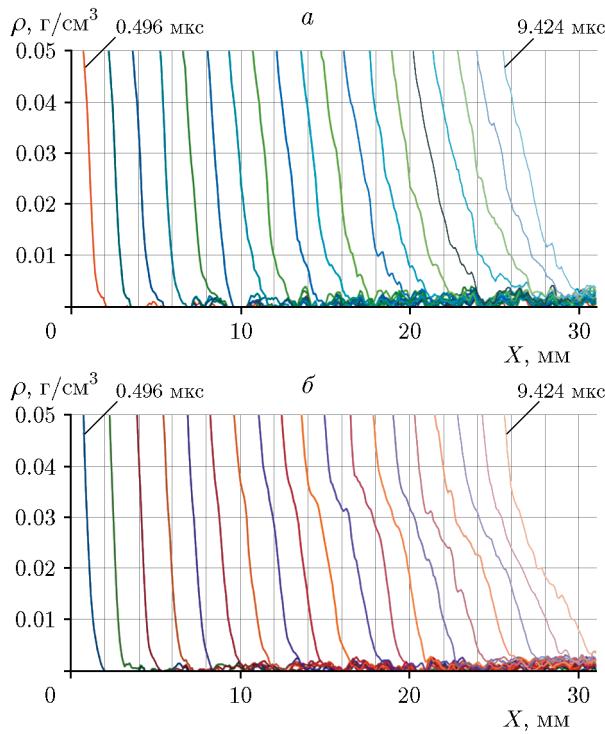


Рис. 7. Распределения плотности пылевого потока в разные моменты времени (с интервалом 0.496 мкс) начиная от момента движения СП 0.496 мкс, полученные в опытах с двухволновым нагружением образцов:
 а — шероховатость образца Rz 5, б — Rz 20; давление воздуха 0.01 атм

скорости, равной или меньшей скорости фронта УВ в газе. При движении в гелии газ мало влияет на движение частиц потока при их скорости ниже скорости УВ в газе. В более плотном азоте уже при давлении 2 атм частицы в потоке быстро тормозятся до скорости сжатого ударной волной газа.

Результаты измерений методом СИ в опытах с двухволновым нагружением в вакууме показаны на рис. 7. На рис. 8 приведены распределения плотности, полученные по данным пьезодатчиков, и распределения плотности в момент времени 7.192 мкс, полученные методом СИ (б), в опытах с образцами шероховатостью Rz 5 и Rz 20. Передние части потоков по данным обоих методов совпадают, несмотря на существенную разницу исходных шероховатостей поверхности образцов. При этом задние части потоков существенно различаются и коррелируют с исходной шероховатостью. В такой постановке было проведено по два опыта — с образцами шероховатостью Rz 5 и Rz 20.

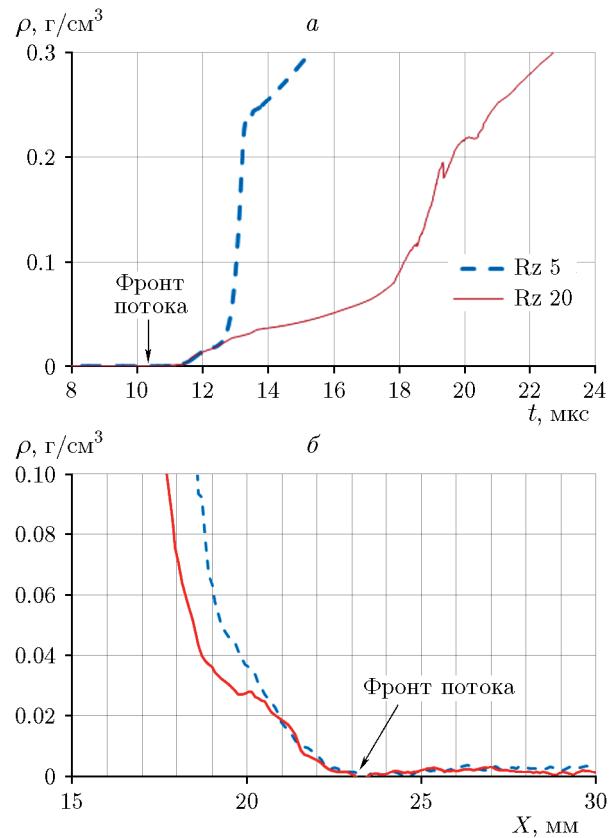


Рис. 8. Распределения плотности пылевого потока, полученные по данным пьезодатчиков, установленных на расстоянии 35 мм от СП образца (а), и распределения плотности в момент времени 7.192 мкс, полученные методом СИ (б), в опытах с образцами шероховатостью Rz 5 (штриховые линии) и Rz 20 (сплошные линии)

Следует отметить, что скорости распределения плотностей и масс в пылевых потоках, выбрасываемых под действием одиночных УВ, существенно зависят от исходной шероховатости СП. Развитая теория выброса потоков частиц, индуцированного одиночными УВ, основана на развитии микрокумулятивных выбросов из неоднородностей поверхности. Моделирование, основанное на этой теории, хорошо описывает экспериментальные результаты [1–5, 7]. Совпадение распределений плотности в передних частях потоков, выброшенных под действием двух УВ, наблюдаемое в проведенных опытах, указывает на то, что механизм их образования не связан с микрокумуляцией в неоднородностях свободной поверхности образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием синхротронного излучения и линейного детектора получены данные о динамике изменения плотности в ударно-индуцированных одиночной ударной волной пылевых потоках, движущихся в вакууме, воздухе, гелии и азоте при разных давлениях, а также данные о движении пылевых потоков, индуцированных двумя волнами, на основании которых можно сделать следующие выводы.

1. Использование СИ позволяет исследовать процесс формирования ударно-индуцированных потоков частиц, движущихся как в вакууме, так и в газах.

2. Наличие низкоплотного газа (гелия) в случае образцов с шероховатостью СП Rz 20 приводит к торможению частиц, опережающих фронт ударной волны в газе, а на более медленные частицы наличие газа влияет слабо. В плотном газе (азот, воздух) при шероховатости СП менее Rz 20 частицы в потоке относительно быстро тормозятся до массовой скорости сжатого ударной волной газа.

3. В опытах с нагружением образцов двумя ударными волнами параметры передних частей потоков оказались одинаковыми, несмотря на различие шероховатостей СП (Rz 5 и Rz 20), что указывает на то, что механизм формирования этих потоков не связан с микрокумуляцией из неоднородностей на СП, играющей определяющую роль при формировании пылевых потоков под действием одиночной ударной волны.

Полученные данные могут быть использованы для уточнения физической модели образования ударно-индуцированных пылевых потоков, а также для разработки физических и расчетных моделей взаимодействия потоков с газами и образования потоков при сложном ударно-волновом воздействии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики по государственному контракту № Н.4п.241.4Д.23.1085.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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. В., Глущихин В. В., Калашник И. А., Цыганов В. А., Ткаченко Б. И. Регистрация выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных образцов // ЖЭТФ. — 2009. — Т. 136, № 3. — С. 615–620. — EDN: NIUJKT.
3. Monfared S. K., Oró D. M., Grover M., Hammerberg J. E., LaLone B. M., Pack C. L., Schauer M. M., Stevens G. D., Stone J. B., Turley W. D., Buttler W. T. Experimental observations on the links between surface perturbation parameters and shook-induced mass ejection // J. Appl. Phys. — 2014. — V. 116. — 063504. — DOI: 10.1063/1.4891449.
4. Михайлов А. Л., Огородников В. А., Сасик В. С. и др. Экспериментально-расчетное моделирование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности // ЖЭТФ. — 2014. — Т. 145, № 5. — С. 892–905. — EDN: SNVCXR.
5. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Ерунов С. В. и др. Выброс частиц со свободных поверхностей ударно-нагруженных образцов из свинца в вакуумированную и газовую среды // ЖЭТФ. — 2017. — Т. 152, № 6. — С. 1156–1164. — DOI: 10.7868/S004445101712001X. — EDN: ZUQJEZ.
6. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / под ред. А. Л. Михайлова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015.
7. Панов К. Н., Антипов М. В., Георгиевская А. Б. и др. Результаты исследований процесса выброса частиц со свободной поверхности металлов под действием ударной волны // Тр. конф. РФЯЦ-ВНИИЭФ. — 2016. — № 21, Ч. 2. — С. 112–123.
8. Аринин В. А., Картанов С. А., Куропаткин Ю. П., Лебедев А. И., Михайлов А. Л., Михайлуков К. Л., Огородников В. А., Орешков О. В., Панов К. Н., Сырунин М. А., Таценко М. В., Ткаченко Б. И., Ткаченко И. А., Храмов И. В., Цой А. П. Новые возможности протонной радиографии для регистрации быстропротекающих газодинамических процессов // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 5. — С. 3–12. — DOI: 10.15372/FGV20180501. — EDN: XXRRNR.

9. Тен К. А., Прууэл Э. Р., Кацкаров 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. Регистрация выброса частиц из ударно-нагруженных металлов методами синхротронного излучения // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 5. — С. 103–111. — DOI: 10.15372/FGV20180514. — EDN: UXZFSS.
10. Jensen B. J., Ramos K. J., Iverson A. J., Bernier J., Carlson C. A., Yeager J. D., Fezzaa K., Hooks D. E. Dynamic experiment using IMPULSE at the Advanced Photon Source // J. Phys.: Conf. Ser. — 2014. — V. 500. — 042001. — DOI: 10.1088/1742-6596/500/4/042001.
11. Bober D. B., Mackay K. K., Akin M. C., Najjar F. M. Understanding the evolution of liquid and solid microjets from grooved Sn and Cu samples using radiography // J. Appl. Phys. — 2021. — V. 130, N 4. — 045901. — DOI: 10.1063/5.0056245.
12. Ten K. A., Pruuvel E. R., Kashkarov A. O., Rubtsov I. A., Shechtman L. I., Zhulanov V. V., Tolochko B. P., Rukovanov G. N., Muzyrya A. K., Smirnov E. B. Detection of microparticles in dynamic processes // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — V. 774. — 012070. — DOI: 10.1088/1742-6596/774/1/012070.
13. Aulchenko V. M., Evdokov O. V., Zhogin I. L., Zhulanov V. V., Pruuvel E. R., Tolochko B. P., Ten K. A., Shekhtman L. I. A detector for imaging of explosions on a synchrotron radiation beam // Instrum. Exp. Tech. — 2010. — V. 53, N 3. — P. 334–349. — DOI: 10.1134/S0020441210030036.
14. 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-индущенных пылевых потоков // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 5. — С. 96–102. — DOI: 10.15372/FGV20180513. — EDN: XXRRRJ.
15. Zellner M. B., Buttler W. T. Exploring Richtmyer–Meshkov instability phenomena and ejecta cloud physics // Appl. Phys. Lett. — 2008. — V. 93, N 11. — 114102. — DOI: 10.1063/1.2982421.
16. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.

Поступила в редакцию 09.06.2023.

После доработки 20.07.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.