

ВЫБРОС ЧАСТИЦ СО СВОБОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СВИНЦА В ВАКУУМИРОВАННУЮ И ГАЗОВУЮ СРЕДЫ

*В. А. Огородников^{a,b}, А. Л. Михайлов^{a,b}, С. В. Ерунов^a, М. В. Антипов^a,
А. В. Федоров^a, М. А. Сырунин^{a,b}, Е. В. Кулаков^{a*}, О. А. Клещевников^a,
И. В. Юртов^a, А. А. Утенков^a, С. А. Финюшин^a, Е. А. Чудаков^a,
Д. А. Калашиников^a, А. С. Пупков^a, А. В. Чапаев^a, А. В. Мишианов^a,
В. В. Глушихин^a, А. В. Федосеев^b, Р. Р. Тагиров^a, С. А. Костюков^a,
И. Ю. Тагирова^a, Е. В. Сапрыкина^a*

*^a Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия*

*^b Саровский физико-технический институт-филиал НИЯУ МИФИ
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия*

Поступила в редакцию 16 апреля 2017 г.

Наличие и поведение газо-металлического слоя перед свободной поверхностью лайнеров, разгоняемых ударно-волновым способом в газах различного состава и плотности, исследовано не достаточно. В связи с этим в данной работе приводятся новые сравнительные результаты по исследованию «пыления» со свободной поверхности образцов из свинца при наличии перед ней вакуума или газа в зависимости от ее шероховатости и амплитуды давления на фронте ударной волны или фазового состояния материала. Предложены способы оценки массы потока частиц при наличии перед свободной поверхностью газовой среды.

DOI: 10.7868/S004445101712001X

1. ВВЕДЕНИЕ

Явление ударно-волнового «пыления» или выброса (ejection) частиц со свободной поверхности (СП, FS) материала при падении на нее ударной волны (УВ, SW) исследовалось экспериментально достаточно давно и подробно, особенно в последнее время [1–15]. Известны также результаты моделирования процесса «пыления» на основе решения Рихтмайера – Мешкова для малых периодических возмущений синусоидальной формы на СП при падении на нее стационарной или нестационарной УВ как для жидкости, так и для упругопластического материала [12, 14]. Согласно результатам этих исследований, превалирующее влияние на механизм вы-

броса частиц с СП образца оказывают ее шероховатость (микрорельеф) и агрегатное состояние материала (твердое или жидкое). При падении УВ на СП образца с микронеровностями, связанными, например, с токарной обработкой, происходит схлопывание стенок канавок, образовавшихся от резца. При этом формируются микроструи, которые из-за наличия градиента скорости вдоль направления движения и прочности материала, распадаются на отдельные фрагменты (частицы). Размер частиц связан с размером и геометрией микронеровности (канавки). В зависимости от агрегатного состояния материала (твердое, жидкое), скоростей частиц и параметров газовой среды более крупные частицы могут дробиться на более мелкие. Следует отметить, что в большей степени имеется информация об источнике «пыления», связанная с шероховатостью СП, структурой и дефектностью материала, его фазо-

* E-mail: k. evg. v@yandex. ru

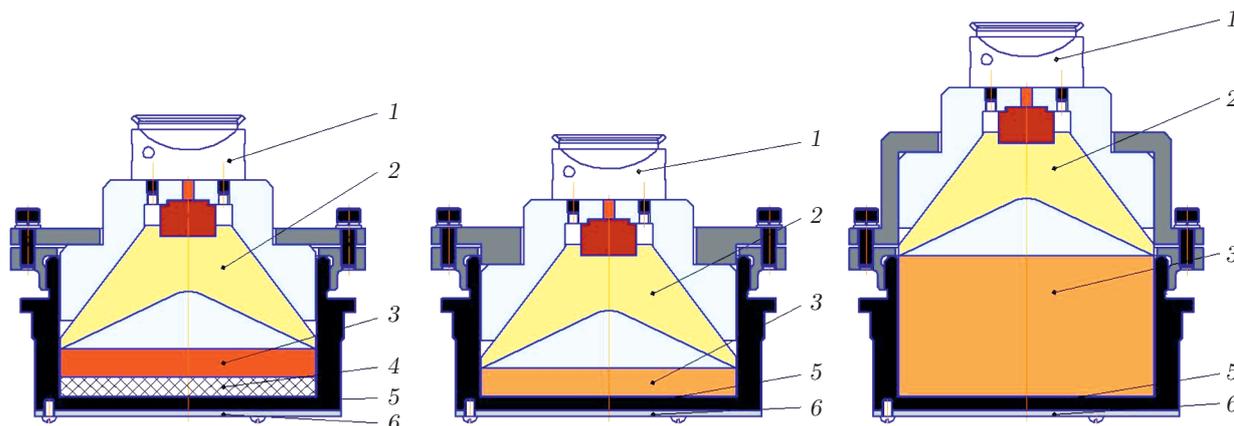


Рис. 1. Схемы нагружения исследуемых образцов: 1 — розетка с электродетонатором, 2 — линзовый генератор УВ, 3 — заряд ВВ, 4 — подложка из фторопласта, 5 — стенка капсулы, 6 — образец

вым состоянием (твердое, жидкое), и в меньшей степени — с факторами, влияющими на этот процесс, в частности, наличием газа перед СП, его плотностью, ударно-волновыми свойствами и начальным давлением в нем. Наличие и поведение слоя или «подушки» из частиц перед СП в газе представляет повышенный интерес, поскольку она экранирует СП и препятствует регистрации тонкой структуры ее движения с использованием, например, доплеровских методов [16].

В зависимости от интенсивности УВ, выходящей на СП, начальных значений размеров и скоростей частиц, плотности, вязкости газа и его ударно-волновых свойств частицы могут тормозиться в газе, дробиться на более мелкие, будут опережать фронт УВ в газе или находиться между СП и фронтом УВ, образуя своеобразную «подушку» [15]. Если оценку размеров единичных частиц можно сравнительно просто получить по результатам измерения их скоростей при торможении в неподвижном газе [17], то нахождение распределения плотности и массы частиц в «подушке» перед СП в направлении ее движения представляет более сложную задачу. Это связано со сложным поведением частиц, выбрасываемых с СП в газ, включающим в себя последовательность таких процессов, как торможение и распад первичных частиц в неподвижном газе, если их начальная скорость больше скорости УВ в газе ($U_{PF} > U_{SW}$); торможение и распад первичных частиц в сжатом и нагретом УВ газе, если начальная скорость частиц меньше скорости УВ в газе ($U_{PF} < U_{SW}$); ускорение или торможение (в зависимости от соотношения скоростей U_{PF} , U_{SW} в мо-

мент догона) частиц газовым потоком за догоняющей их УВ. Таким образом, если использование, например, пьезоэлектрических датчиков и тонких пластин (индикаторных фольг) для определения массы частиц в «подушке» при наличии перед СП вакуума оправдано, то в присутствии газа требуется более тщательный анализ их использования с введением соответствующих поправок. Таким образом, моделирование образования и дальнейшей эволюции газо-металлической «подушки» перед СП при наличии газа представляет собой достаточно сложную задачу, требующую привлечения дополнительных экспериментальных результатов.

В данной работе представлены экспериментальные результаты исследования процесса «пыления» при выходе УВ с амплитудой на фронте от 17 до 50 ГПа на СП образцов из свинца марки С1 с шероховатостью $R_z = 13$ (амплитуда $2a_0 = 13$ мкм, длина волны $\lambda = 60$ мкм) и $R_a = 0.4$ ($2a_0 = 1.6$ мкм, $\lambda = 40$ мкм), которая граничила с разреженным воздухом (вакуумом) при давлении $P \leq 10^3$ Па или газовой смесью гелия и азота с плотностью $\rho_0 = 0.04$ г/см³ при давлении $P = 8 \cdot 10^5$ Па. В отличие от многих работ по исследованию «пыления», в которых диаметр нагружаемого участка СП составлял около 15–20 мм в данной работе использовались специальные устройства с увеличенным диаметром площади нагружения СП образца до 90 мм. Это позволило использовать большее количество пьезоэлектрических и PDV-датчиков для определения количественных характеристик выбрасываемых потоков частиц. На рис. 1 приведены схемы нагружения образцов, позволяющие создавать

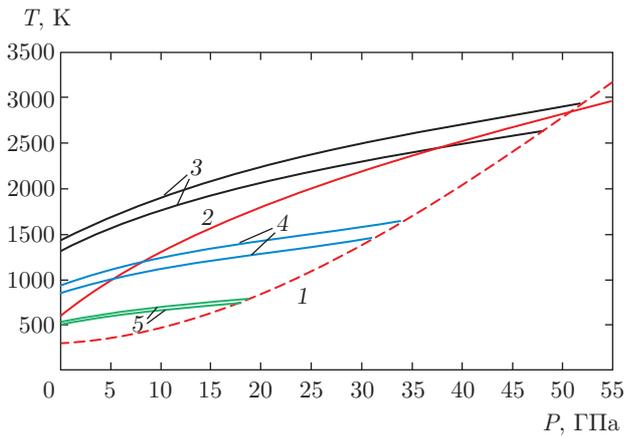


Рис. 2. Фазовая диаграмма при разгрузке свинца: 1 — ударная адиабата, 2 — линия плавления, 3, 4, 5 — изэнтропы разгрузки соответственно при $P = 50$ ГПа, 30 ГПа, 17 ГПа

различные давления на фронте УВ, выходящей на СП, при которых в свинце реализуются состояния: твердое (~ 17 ГПа) и расплавленное в волне разгрузки (~ 30 ГПа) или ударной волне (~ 50 ГПа), соответственно (рис. 1а,б,в), что иллюстрируется диаграммой фазового состояния образцов из свинца при ударно-волновом нагружении (рис. 2) [17, 18].

Результаты предварительных сравнительных рентгенографических опытов с образцами из свинца с шероховатостью СП $R_z = 13$ в вакууме и в атмосфере воздуха при нормальном давлении около 10^5 МПа свидетельствуют о вполне удовлетворительной одновременности движения пылевых потоков частиц (рис. 3).

Основные эксперименты проводились на модернизированном комплексе «ПЫЛЕНИЕ» [14] с увеличенным количеством датчиков в приемнике: восемь пьезоэлектрических (четыре кварцевых и четыре пьезокерамических (ЦТС-21)) и двенадцать PDV-датчиков методики гетеродин — интерферометр (шесть датчиков для регистрации СП, два датчика для регистрации движения индикаторных фольг из алюминия толщиной 12 и 200 мкм, по два датчика для регистрации движения пластин из кварцевого стекла и тантала толщиной 210 мкм). Образцы и приемники с установленными датчиками помещались в капсулы (рис. 4а), которые вакуумировались или заполнялись газом. При этом вплоть до проведения эксперимента осуществлялся контроль величин разрежения (рис. 4б) или давления в капсуле (рис. 4в).

На рис. 5 приведены типичные профили давления, регистрируемые с помощью пьезоэлектриче-

ских датчиков в опытах с вакуумом (рис. 5а) и газом (рис. 5в) перед СП; профили скорости движения пылевого потока, СП и индикаторной фольги, регистрируемые PDV-датчиками в вакууме (рис. 5д); $x-t$ -диаграммы (рис. 5б,з,е) исследуемых процессов, где T_0 — время выхода УВ на СП образца, T_1 — время прихода к ПД пылевого потока в вакууме или УВ в газе, T'_1 — время подлета пылевого потока к индикаторной фольге, T_2 — время подлета к ПД поверхности образца, T'_2 — время удара образца по индикаторной фольге, T_3 — время подлета к ПД фронта потока частиц в газе.

Время T_1 определялось по моменту превышения сигналом пьезодатчика уровня приборного шума на наиболее чувствительном канале осциллографа. Время T_2 определялось по моменту, в который скорость нарастания давления на рассматриваемый датчик резко увеличивалась. Время T_3 определялось по началу повторного плавного нарастания давления на профиле $P(t)$. Эти моменты времени сверялись по $x-t$ -диаграммам, построенным с учетом измерений, проведенных с использованием как пьезоэлектрических, так и PDV-датчиков.

На рис. 6 приведены типичные графики распределения массы частиц в потоке в направлении их движения, полученные формально с использованием соотношений, используемых в методе пьезодатчиков [19]:

$$p(t) = \frac{1}{d_{ps}S} \int_{T_1}^t \frac{V(t)}{R} dt, \tag{1}$$

$$\rho(t) = \frac{t^2}{d_{ps}Sh^2} \int_{T_1}^t \frac{V(t)}{R} dt, \tag{2}$$

$$m(t) = h \int_{T_1}^t \frac{\rho(t)}{t} dt, \tag{3}$$

$$u(t) = h/t, \tag{4}$$

где d_{ps} — пьезомодуль чувствительного элемента пьезодатчика; S — площадь чувствительного элемента пьезодатчика; $V(t)$ — напряжение, регистрируемое на осциллографах; R — согласующее сопротивление; h — база пролета, соответствующая расстоянию от свободной поверхности исследуемого образца до поверхности пьезодатчика.

Удельные массы $m(T_2)$, вычисленные с использованием формул (1)–(4), при интегрировании на интервале от T_1 до T_2 для опытов с вакуумом, соответствуют массам потока частиц. Однако для опытов с газом на измерения масс $m(T_2)$ может оказать вли-

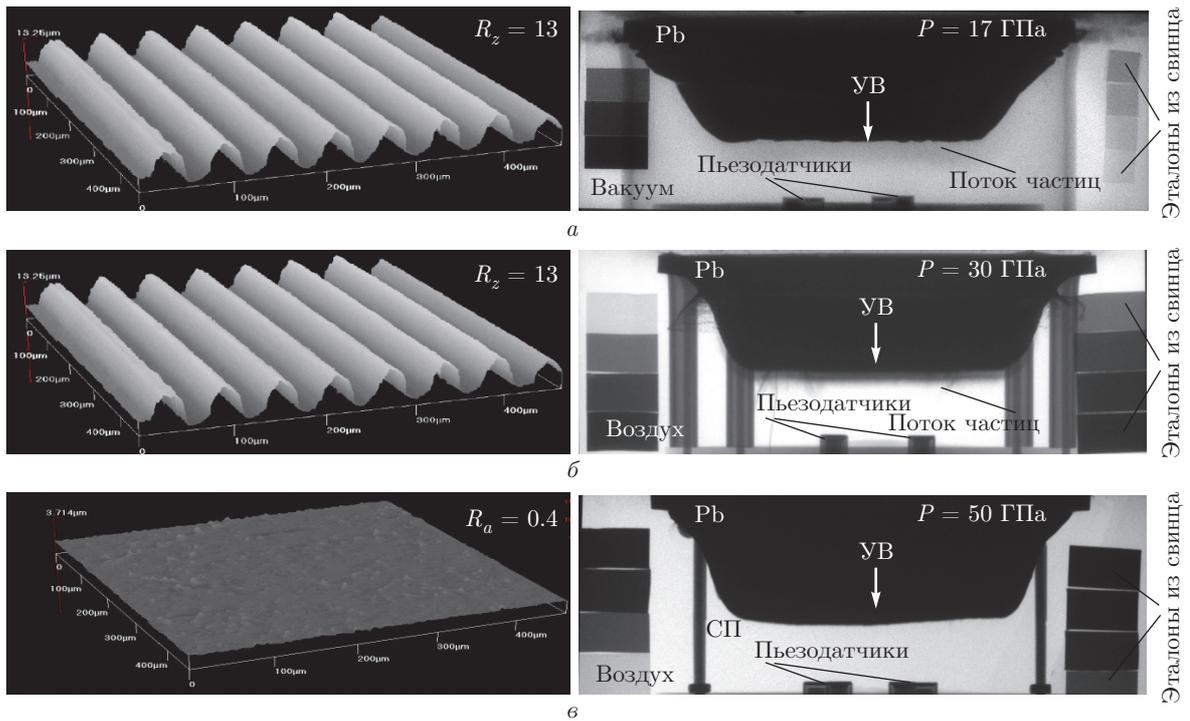


Рис. 3. Начальная шероховатость и форма СП образцов из свинца в предварительных опытах

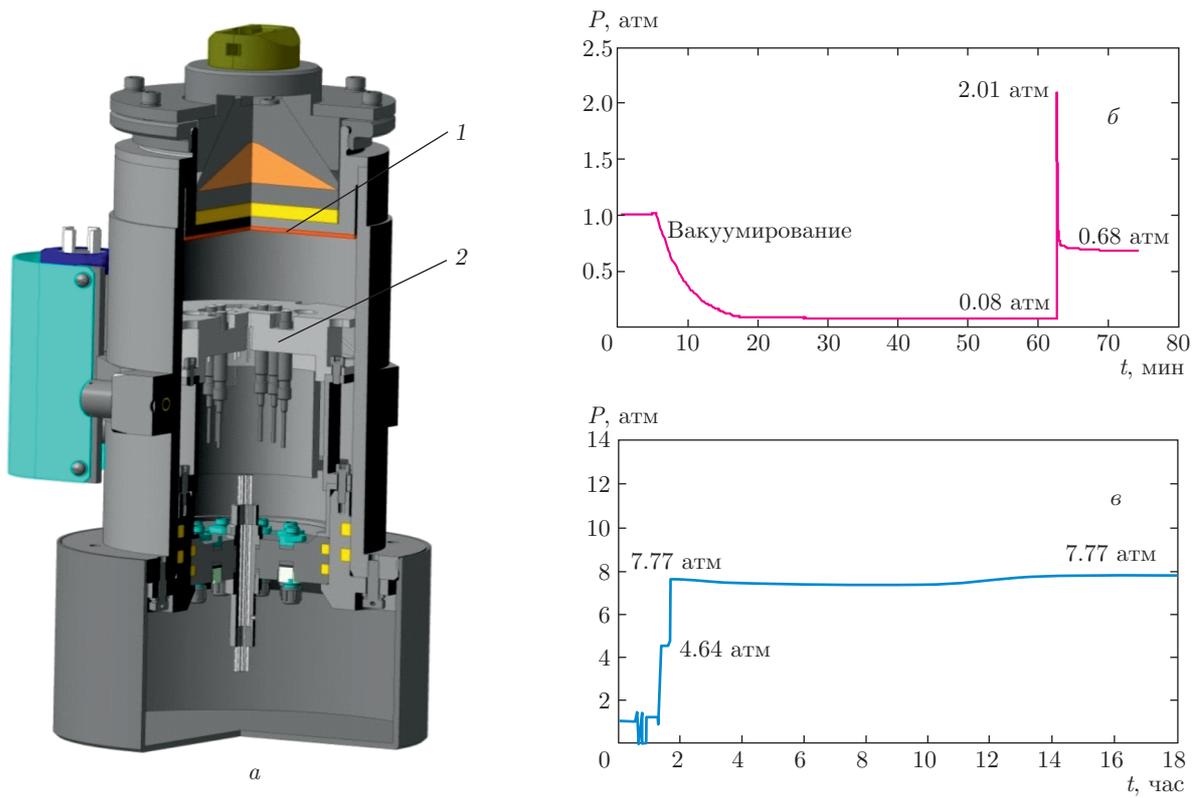


Рис. 4. Вид капсулы с установленным приемником и образцом (а), графики контроля разрежения (б) и давления газа (в) в полости: 1 — образец с нагружающим устройством, 2 — приемник с установленными датчиками

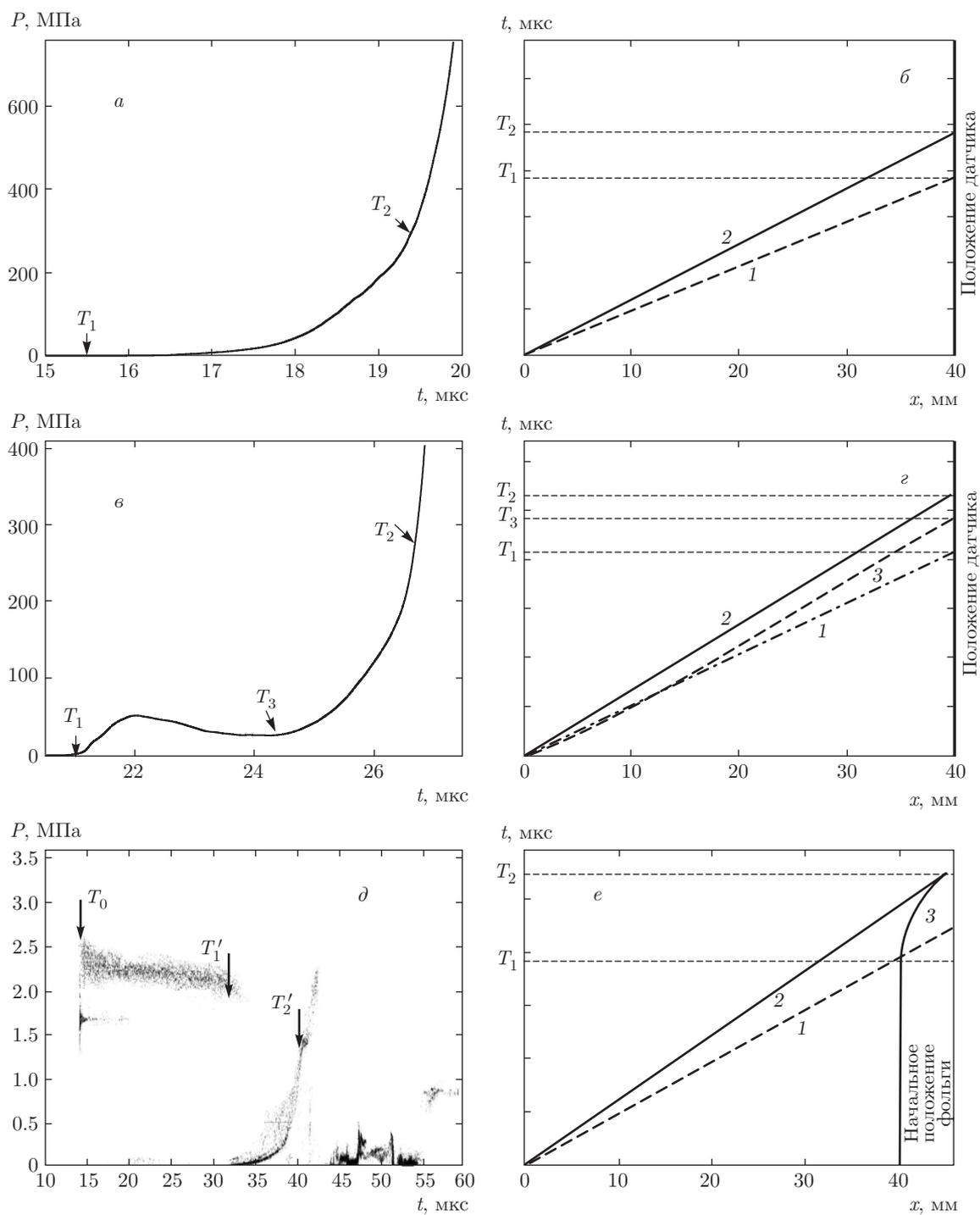


Рис. 5. Типичные профили давления, регистрируемые с помощью пьезоэлектрических датчиков в опытах с вакуумом (а) и с газом (в) перед СП, профили скоростей СП и индикаторных фольг, регистрируемые PDV-датчиками в вакууме (д), а также $x-t$ -диаграммы исследуемых процессов: б) 1 – фронт пыли, 2 – СП образца; г) 1 – фронт УВ по газу, 2 – СП образца, 3 – фронт потока частиц; е) 1 – фронт потока частиц, 2 – СП образца, 3 – движение фольги

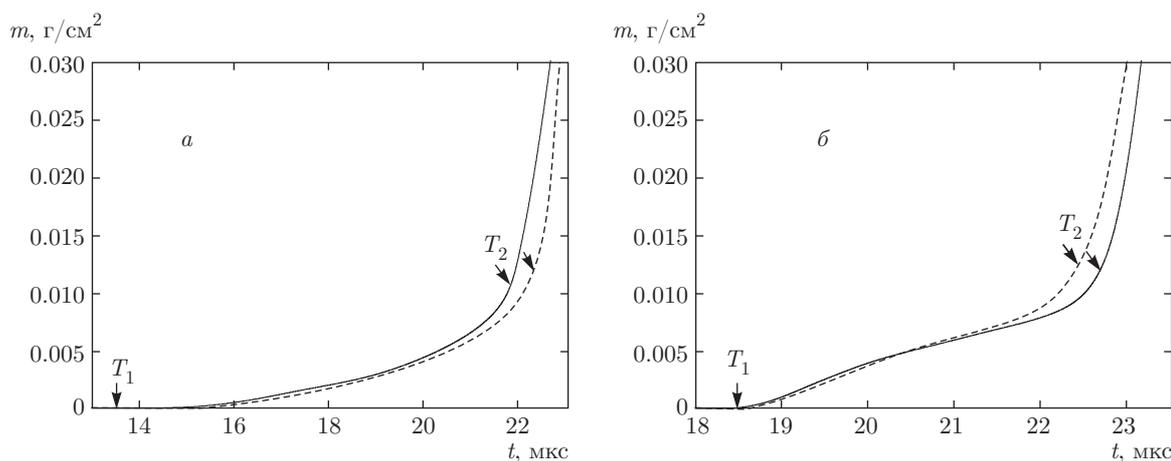


Рис. 6. Типичные зависимости распределения массы потока частиц, полученные по формулам (1)–(3) при использовании профилей давления в вакууме (а) и в газе (б) для керамики (сплошные линии) и кварца (штриховые)

яние наличие газа. Для определения удельных масс собственно потока частиц использовались два способа: в первом способе эта масса определялась путем обработки сигналов только на интервале от T_3 до T_2 по формулам (1)–(4), а во втором — из полученной массы $m(T_2)$ на интервале от T_1 до T_2 вычиталась поправка δm , учитывающая влияние газа на измерения.

Первый способ основан на предположении о том, что сигналы от пьезодатчиков в интервале времени от T_3 до T_2 связаны, главным образом, с воздействием потока частиц. Проведенные с использованием комплекса программ ЛЭГАК [20] двумерные расчеты показывают, что возрастание давления в моменты T_3 (рис. 5в) нельзя связать с влиянием газа, поэтому данное нарастание давления может быть связано только с воздействием потока частиц в газе. Поскольку известно [19], что пьезодатчики генерируют сигналы только при изменении давления, то сигналы, связанные с влиянием газа, возникают в момент прихода ударной волны в газе T_1 , а к моменту T_3 , когда давление газа на датчики становится постоянным, сигналы под действием газа не генерируются. Можно предположить, что и газ, находящийся между частицами в газо-металлической «подушке», продолжает оказывать на датчики постоянное давление, как это наблюдалось и до момента T_3 . В этом случае, проводя процедуры по обработке сигналов с использованием формул (1)–(4) в интервале от T_3 до T_2 , можно оценить массу только потока частиц. Такой способ является в определенной степени оценочным, поскольку неизвестна степень влияния газа, находящегося между частицами, на измерения.

Другой способ определения массы пыли в газе — с использованием измеренных зависимостей давления от времени, основан на определении величины превышения измеряемой с помощью пьезодатчиков массы $m(T_2)$ из-за наличия над ним газа. Зная превышение измеряемой массы при наличии газа на величину δm можно определить количество пыли, намешанной в газ, путем вычитания из общей, оцененной по соотношению (3) удельной массы $m(T_2)$ при интегрировании от T_1 до T_2 , значения величины δm . Величина δm может быть определена по известным профилям давления, регистрируемому пьезодатчиками при отсутствии пыления, например, в опытах с образцами, имеющими высокую чистоту обработки поверхности (рис. 3в), или из двумерных численных расчетов, моделирующих обтекание газом пьезодатчика при отсутствии «пыления», с учетом реальной геометрии.

Так, при давлениях около 30 и 50 ГПа величина δm_1 была определена из опыта с образцом, у которого чистота обработки поверхности была высокой ($R_a = 0.4$) и поэтому наличием пыли в потоке можно пренебречь. Тогда для этих опытов можно принять, что оцененная по методике пьезоэлектрических датчиков масса равна величине превышения, связанного с влиянием газа: $m(T_2) = \delta m_1 = 10.3 \text{ мг/см}^2$.

Для опыта со свинцом при давлении 17 ГПа измеренные зависимости профиля давления от времени на интервале (T_1, T_3) согласуются с рассчитанным для этого опыта профилем давления газа на торец пьезодатчика (без учета эффекта «пыления») (рис. 7). Это позволяет использовать расчетную за-

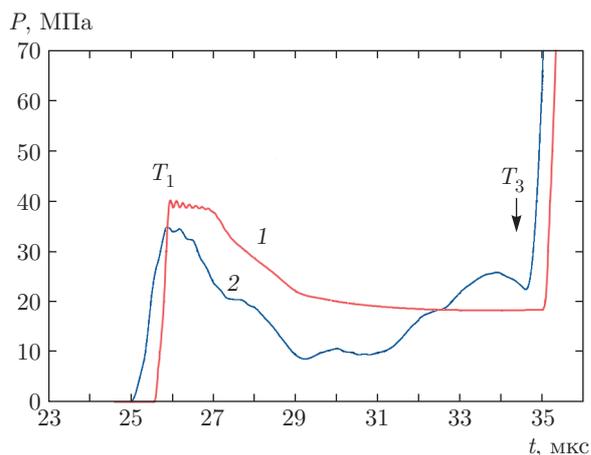


Рис. 7. Профили давления газа на пьезодатчик, рассчитанные по программе ЛЭГАК в 2D-постановке (1) и измеренные пьезодатчиком в опыте без «пыления» ($R_a = 0.4$) (2)

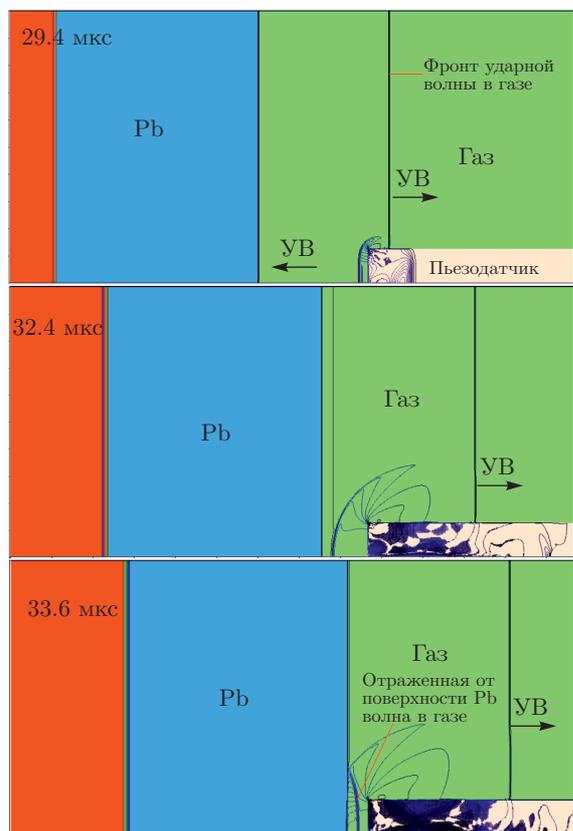


Рис. 8. Процесс обтекания УВ в газе пьезодатчика по результатам расчета по программе ЛЭГАК

висимость для определения поправки δm_2 . Расчет величины δm_2 дает значение 15.9 мг/см^2 .

Общая картина обтекания пьезодатчика УВ в газе по результатам двумерного расчета, выполненного по методике ЛЭГАК, приведена на рис. 8 (приведено распределение давления).

Таким образом, для опытов со свинцом в газе использовались поправки $\delta m_2 = 15.9 \text{ мг/см}^2$ (при давлении в УВ около 17 ГПа) и $\delta m_1 = 10.3 \text{ мг/см}^2$ (при давлении в УВ около 30 и 50 ГПа).

Основные кинематические характеристики и значения масс пыли в вакуумированных капсулах и в газе, оцененные описанными выше способами, приведены соответственно в табл. 1 и 2, где приняты следующие обозначения: U_1 — скорость движения фронта пылевого потока в вакууме или УВ в газе; U_2 — скорость движения поверхности образца; U_3 — скорость потока частиц в газе, регистрируемая пьезодатчиками в момент времени T_3 ; $m(T_2)$ и $m(T_3, T_2)$ — удельные массы потока частиц, вычисленные с использованием соотношений (1)–(4) для интервалов времени соответственно (T_1, T_2) и (T_3, T_2) ; оценка массы частиц в газе сделана в предположении, что превышение измеренной массы $m(T_2)$ равно удельной массе газа, измеренной в опыте без «пыления» (δm_1), либо полученной с использованием расчетной поправки на влияние газа (δm_2).

Анализ результатов опытов (табл. 1 и 2) в вакууме и газе свидетельствует о том, что скорости фронтов потоков и скорости образцов, измеренные с использованием пьезоэлектрических и PDV-датчиков, хорошо согласуются.

В опытах в вакууме, как по пьезоэлектрической методике, так и по методике индикаторных фольг, получены близкие значения удельных масс. В этих опытах при давлениях в УВ равных примерно 30 и 50 ГПа, при которых свинец плавится в волне разгрузки или в УВ, измеренные удельные массы потоков частиц примерно в два раза больше, чем в опыте с давлением около 17 ГПа, при котором плавление образца не реализуется, что не противоречит известным экспериментальным данным [4]. При фиксированном давлении в УВ, равном 50 ГПа, измеренная масса потока частиц оказалась в 2.5 раза меньше для опыта с образцом, имеющим меньшую шероховатость. Отмеченные закономерности имели место также при расчетном моделировании опытов с использованием программного комплекса ЛЭГАК [20], как по скоростям образцов и фронтов потоков частиц, так и по удельным массам потоков частиц.

В опытах с газом значения подлетных скоростей пыли, измеренные датчиками PDV, оказались близки к скоростям пылевых потоков, регистрируемых

Таблица 1. Результаты измерений и оценок основных кинематических характеристик процесса выброса частиц

P_{SW} , ГПа	P_G , атм	U_1 , км/с			U_2 , км/с			U_3 , км/с
		Пьезо	PDV	Расчет	Пьезо	PDV	Расчет	
15	0.1	1.9	2.0	1.7	1.1	1.1	1.2	—
30		3.0	3.4	2.7	1.8	1.8	1.7	—
50		3.6	4.1	3.4	2.4	2.3	2.3	—
		3.1	3.4	3.4	2.4	2.3	2.3	—
15	8	1.6	1.5	—	1.1	1.1	1.2	1.2
30		2.2	2.3	—	1.8	—	1.7	1.8
50		2.9	2.8	—	2.4	—	2.3	2.5
		2.8	2.8	—	2.4	2.3	2.3	2.4

Таблица 2. Результаты измерений и оценок массы потоков частиц

P_{SW} , ГПа	P_G , атм	m , мг/см ²					
		Пьезо				PDV	Расчет
		$m(T_2)$, мг/см ²	$m(T_3, T_2)$, мг/см ²	m , мг/см ² (оценка)	\bar{m} , мг/см ² (среднее)		
15	0.1	4.8	—	—	4.8 ± 0.5	2.9 ± 0.1	3.9
30		10.2	—	—	10.2 ± 1	11.6 ± 2.0	8.4
50		7.4	—	—	7.4 ± 0.7	8.0 ± 1.0	5.9
		3.0	—	—	3.0 ± 0.3	3.7 ± 1.8	—
15	8	16.2	2.2	0.3	1.3 ± 1.0	—	—
30		10.7	1.6	0.4	1.0 ± 0.6	—	—
50		11.4	0.9	1.1	1.0 ± 0.2	—	—
		10.3	0.4	0	0.2 ± 0.2	—	—

пьезоэлектрической методикой на фоне газа (фиксируемых в моменты T_3 , рис. 5з). Это подтверждает правильность интерпретации регистрируемого нарастания давления после моментов T_3 как следствие воздействия пылевых потоков в газе.

Сравнение скоростей фронтов потоков частиц в вакууме с подлетными скоростями частиц в газе по обоим используемым методикам показывает их уменьшение примерно в 1.6 раза в использованной газовой смеси, а оцененные значения удельных масс пыли в опытах с газом оказались почти на порядок меньше, чем в опытах без газа, и не превышают 1.3 мг/см^2 . Можно отметить, что учет влияния газа обоими способами оценки дает близкие значения величин массы частиц в потоке.

По нашему мнению начальное количество материала (частиц), выбрасываемого со свободной поверхности за счет микрокумуляции в вакууме и газовой смеси близко, однако измеренная меньшая масса частиц в газовой смеси свидетельствует о том, что основная часть частиц прижимается к свободной поверхности. В результате получается более плотная и тонкая газо-металлическая «подушка», воспринимаемая пьезодатчиком как удар СП.

По измерениям с помощью PDV-датчиков траекторий торможения частиц в газе сделана оценка их размеров, которые составили от 1 до 3 мкм.

Таким образом, по результатам опытов с образцами из свинца можно утверждать, что наличие газовой смеси гелия и азота с плотностью $\rho_0 = 0.04 \text{ г/см}^3$ при давлении $P_G = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ перед СП

приводит к тому, что поток частиц прижимается к образцу в виде газо-металлического слоя («подушки») толщиной около 1 мм, а регистрируемая пьезодатчиками удельная на единицу поверхности масса частиц в потоке газа, намного меньше изначально выброшенной.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. S. Vogan, 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. Veaser, and W. T. Buttler, *J. Appl. Phys.* **98**, 113508 (2005).
2. Н. Д. Семкин, К. Е. Воронов, Л. С. Новиков, Н. Г. Богоявленский, ПТЭ № 2, 123 (2005).
3. T. Resseguier, L. Signor, A. Dragon, M. Boustie, G. Roy, and F. Llorca, *J. Appl. Phys.* **101**, 013506 (2007).
4. M. B. Zellner, M. Grover, J. E. Hammerberg, R. S. Hixson, A. J. Iverson, G. S. Macrum, K. B. Morley, A. W. Obst, R. T. Olson, J. R. Payton, P. A. Rigg, N. Routley, G. D. Stevens, W. D. Turley, L. Veaser, and W. T. Buttler, *J. Appl. Phys.* **102**, 013522 (2007).
5. T. C. Germann, J. E. Hammerber, and G. Dimonte, *7th Biannual Int. Conf. New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter*, Portugal, May (2008), pp. 18–23.
6. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, В. В. Бурцев, С. А. Лобастов, С. В. Ерунов, А. В. Романов, А. В. Руднев, Е. В. Кулаков, Ю. Б. Базаров, В. В. Глушихин, И. А. Калашник, В. А. Цыганов, Б. И. Ткаченко, *ЖЭТФ* **136**, 6 (2009).
7. Н. В. Невмержицкий, А. Л. Михайлов, В. А. Раевский, В. С. Сасик, Ю. М. Макаров, Е. А. Сотсков, С. А. Абакумов, А. В. Руднев, В. В. Бурцев, С. А. Лобастов, А. А. Никулин, Е. Д. Сеньковский, О. Л. Кривонос, А. А. Половников, О. Н. Апрельков, ВАНТ, Сер. Теоретическая и прикладная физика, № 3, 3 (2010).
8. G. Dimonte, G. Terrones, and F. Cherne, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 264502 (2011).
9. Yongtao Chen, Haibo Hu, Tiegang Tang, Guowu Ren, and Qingzhong Li, *J. Appl. Phys.* **111**, 053509 (2012).
10. D. M. Oró, J. E. Hammerberg, W. T. Buttler, F. G. Mariam, C. Morris, C. Rousculp, and J. B. Stone, *AIP Conf. Proc.* **1426**, 1351 (2012).
11. D. S. Sorenson, R. M. Malone, G. A. Capelle, P. Pazuchanics, R. P. Johnson, M. L. Kaufman, A. Tibbitts, T. Tunnell, D. Marks, M. Grover, B. Marshall, G. D. Stevens, W. D. Turley, and B. LaLone, *Proc. NEDPC 2013*, Livermore, California, US, LA-UR-14-23036 (2013).
12. М. В. Антипов, А. Б. Георгиевская, В. В. Игонин, В. Н. Князев, А. И. Лебедев, М. О. Лебедева, К. Н. Панов, В. А. Раевский, В. Д. Садунов, А. А. Утенков, И. В. Юртов, Труды XV международной конференции Харитоновские научно-тематические чтения, Саров (2013), с. 666.
13. S. K. Monfared, D. M. Oró, M. Grover, J. E. Hammerberg, B. M. LaLone, C. L. Pack, M. M. Schauer, G. D. Stevens, J. B. Stone, W. D. Turley, and W. T. Buttler, *J. Appl. Phys.* **116**, 063504 (2014).
14. А. Л. Михайлов, В. А. 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. Лобастов, 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. Филияев, А. В. Чапаев, А. В. Андраманов, М. О. Лебедева, В. В. Игонин, *ЖЭТФ* **145**, 5 (2014).
15. В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, В. С. Сасик, С. В. Ерунов, М. А. Сырунин, А. В. Федоров, Н. В. Невмержицкий, Е. В. Кулаков, О. А. Клещевников, М. В. Антипов, И. В. Юртов, А. В. Руднев, А. В. Чапаев, А. С. Пупков, Е. Д. Сеньковский, Е. А. Сотсков, В. В. Глушихин, И. А. Калашник, С. А. Финюшин, Е. А. Чудаков, Д. А. Калашников, *ЖЭТФ* **149**, 6 (2016).
16. J. R. Asay and L. M. Barker, *J. Appl. Phys.* **45**, 2540 (1974).
17. А. В. Федоров, А. Л. Михайлов, С. А. Финюшин, Д. В. Назаров, Е. А. Чудаков, Д. А. Калашников, Е. И. Бутусов, Труды XV международной конференции Харитоновские научно-тематические чтения, Саров (2013), с. 274.
18. В. П. Копышев, А. Б. Медведев, *Термодинамическая модель сжимаемого коваллума*, Препринт, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (1995), с. 121.
19. W. S. Vogan, W. W. Anderson et al., *J. Appl. Phys.* **98**, 113508 (2005).
20. П. А. Авдеев, М. В. Артамонов, С. М. Бахрах, *Вопросы атомной науки и техники*, Сер. Математическое моделирование физических процессов, вып. 3, 14 (2001).