

Выброс частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных образцов из свинца в вакуумированную и газовую среду

Приведены 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.

**В. А. Огородников^{1,2}, А. Л. Михайлов^{1,2},
С. В. Ерунов¹, М. В. Антипов¹,
А. В. Федоров¹, М. А. Сырунин^{1,2},
Е. В. Кулаков¹, О. А. Клещевников¹,
И. В. Юртов¹, А. А. Утенков¹,
С. А. Финюшин¹, Е. А. Чудаков¹,
Д. А. Калашников¹, А. С. Пупков¹,
А. В. Чапаев¹, А. В. Мишанов¹,
В. В. Глушихин¹, А. В. Федосеев²,
Р. Р. Тагиров¹, С. А. Костюков¹,
И. Ю. Тагирова¹, Е. В. Сапрыкина¹**

Явление ударно-волнового «пыления» (или выброса) частиц со свободной поверхности (СП) материала при выходе на нее ударной волны (УВ) исследовали экспериментально достаточно долго и подробно, особенно в последнее время [1–15]. Известны также результаты моделирования процесса пыления на основе решения задачи 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 выброса частиц со свободной поверхности образца оказывают ее шероховатость (микрорельеф) и агрегатное состояние материала (твер-

© ЖЭТФ. 2017. Т. 152, № 6(12).

¹ РФЯЦ-ВНИИЭФ.

² СарФТИ НИЯУ «МИФИ».

дое или жидкое). При выходе 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 фазовым 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 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 размеры единичных частиц можно сравнительно просто оценить 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 трудную задачу. Это связано со сложным поведением частиц, выбрасываемых со свободной поверхности в газ, включающем в себя последовательность нескольких процессов: торможение и распад первичных частиц в неподвижном газе, если их начальная скорость больше скорости УВ в газе ($U_{нач} > U_{УВ}$); торможение и распад первичных частиц в сжатом и нагретом ударной волной газе, если начальная скорость частиц меньше скорости УВ в газе ($U_{нач} < U_{УВ}$); ускорение или торможение (в зависимости от соотношения скоростей $U_{нач}$, $U_{УВ}$ в момент догона) частиц газовым потоком за догоняющей их ударной волной. Поэтому если использование, например, пьезоэлектрических датчиков и тонких пластин (индикаторной фольги) для определения массы частиц в «подушке» при наличии перед СП вакуума оправданно, то в случае присутствия газа требуется более тщательный анализ их применения с введением соответствующих поправок. Таким образом, моделирование образования и дальнейшей эволюции газометаллической «подушки» перед СП при наличии газа представляет собой достаточно сложную задачу, требующую привлечения дополнительных экспериментальных результатов.

В данной работе представлены новые 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 Rz13 (амплитуда $2a_0 = 13$ мкм, длина волны $\lambda = 60$ мкм) и Ra0,4 ($2a_0 = 1,6$ 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 ~15–20 мм, в данной работе использовали специальные устройства с увеличенным до 90 мм диаметром площади нагружения СП образца. Это позволило задействовать большее количество пьезоэлектрических и PDV-датчиков для определения количественных характеристик выбрасываемых потоков частиц.

На рис. 1 приведены схемы нагружения образцов, позволяющие создавать различные давления на фронте УВ, выходящей на СП, при которых в свинце реализуются твердое состояние

(~17 ГПа) (рис. 1,*а*) и расплавленное в волне разгрузки (~30 ГПа) (рис. 1,*б*) или ударной волне (~50 ГПа) (рис. 1,*в*), что иллюстрируется диаграммой фазового состояния образцов из свинца при ударно-волновом нагружении (рис. 2) [17, 18].

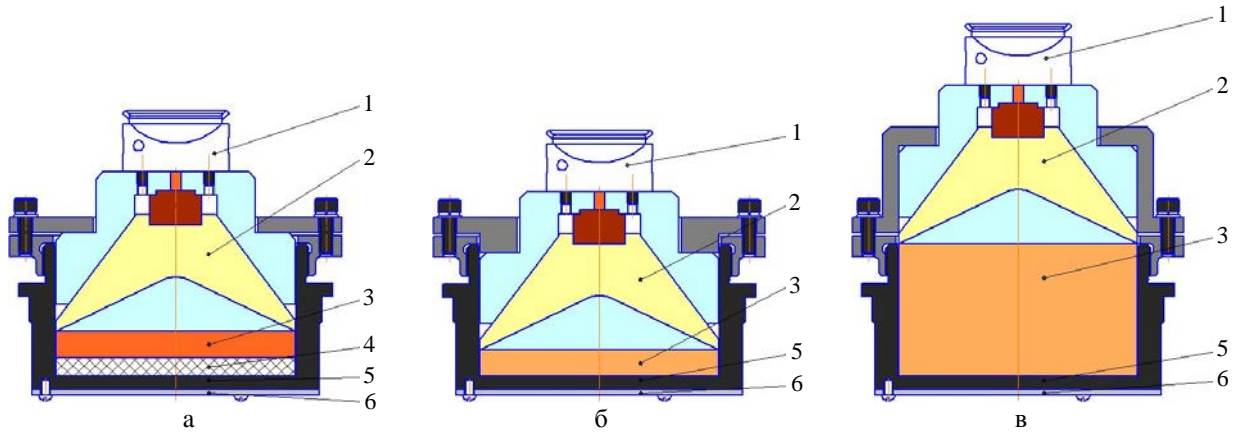


Рис. 1. Схемы нагружения исследуемых образцов: 1 – розетка с электродетонатором, 2 – линзовый генератор УВ, 3 – заряд ВВ, 4 – подложка из фторопласта, 5 – стенка капсулы, 6 – образец

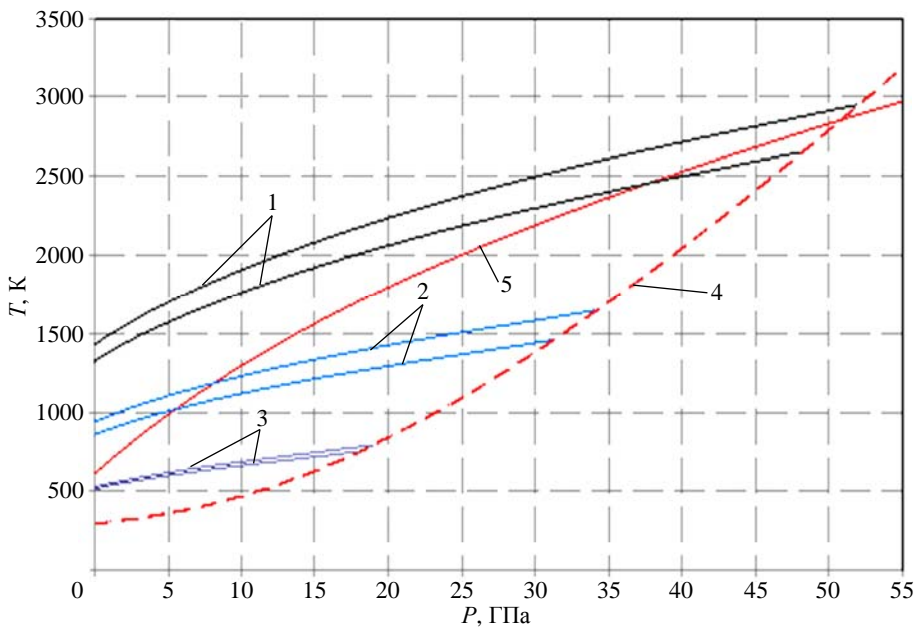


Рис. 2. Фазовая диаграмма при разгрузке свинца из состояний на УВ: 1 – при $P = 50$ ГПа; 2 – при $P = 30$ ГПа; 3 – при $P = 17$ ГПа; 4 – ударная адиабата; 5 – линия плавления

Результаты предварительных сравнительных рентгенографических опытов с образцами из свинца с шероховатостью СП Rz13 в вакууме (рис. 3,*а*) и воздухе (рис. 3,*б,в*) при нормальном давлении ($\sim 10^5$ МПа) свидетельствуют о вполне удовлетворительной одновременности движения пылевых потоков частиц (рис. 3).

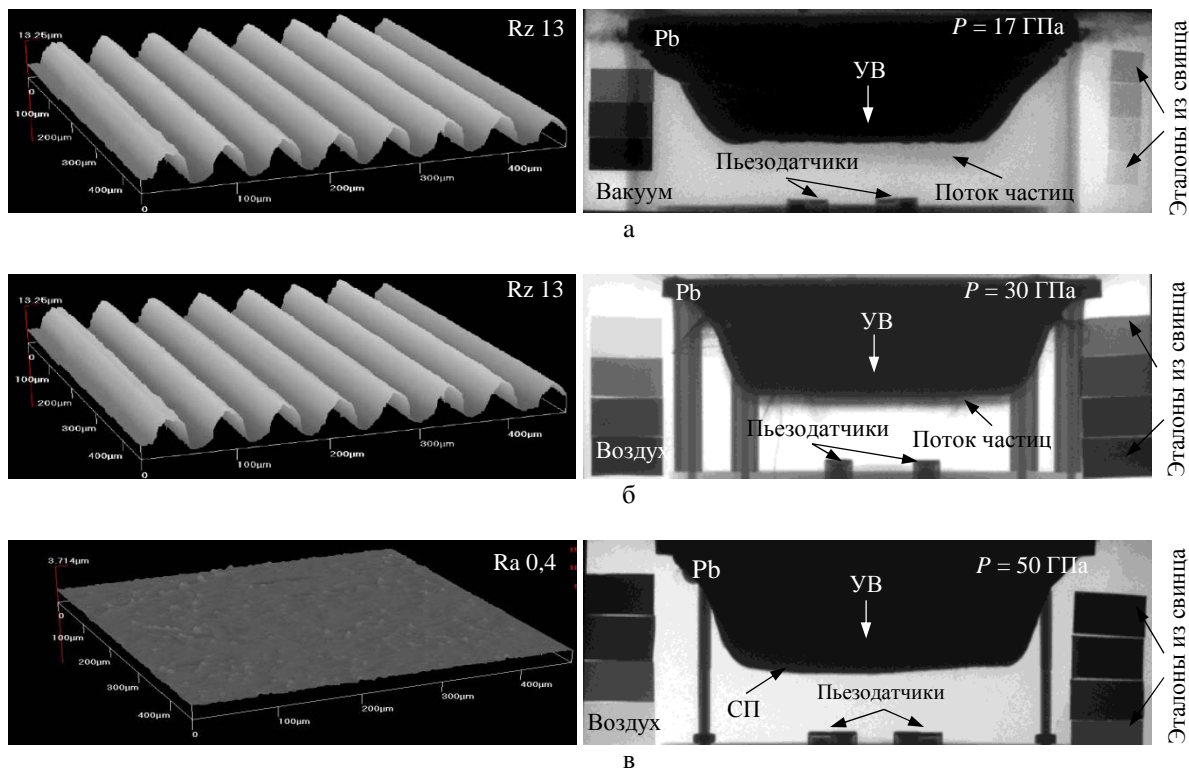


Рис. 3. Начальная шероховатость и форма СП образцов в предварительных опытах

Основные эксперименты проводили на модернизированном комплексе «Пыление» [14] с увеличенным количеством датчиков в приемнике: 8 пьезоэлектрических (4 кварцевых и 4 пьезо-керамических (ЦТС-21)) и 12 PDV-датчиков методики гетеродин-интерферометра (6 датчиков для регистрации СП, 2 датчика для регистрации движения индикаторной фольги 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 помещали в капсулы (рис. 4,а), в которых создавали вакуумированную или газонаполненную среду. При этом вплоть до проведения эксперимента осуществляли контроль разрежения (рис. 4,б) или давления в газе (рис. 4,в).

На рис. 5 приведены типичные профили давления, регистрируемые с помощью пьезоэлектрических датчиков в опытах с вакуумом (рис. 5,а) и газом (рис. 5,в) перед СП; профили скорости движения пылевого потока, СП и индикаторной фольги, регистрируемые PDV-датчиками в вакууме (рис. 5,д); $x-t$ -диаграммы (рис. 5,б,г,е) исследуемых процессов, где T_0 – время выхода УВ на СП образца; T_1 – время прихода к пьезодатчику (ПД) пылевого потока в вакууме или ударной волны 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.

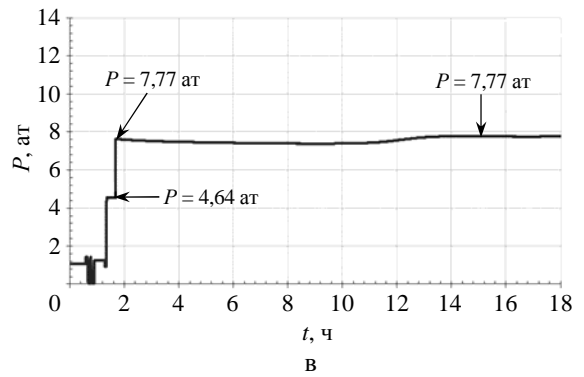
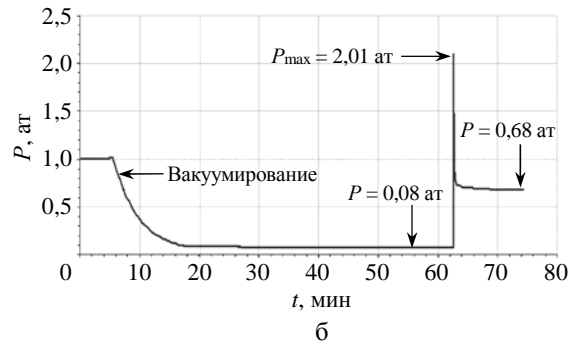
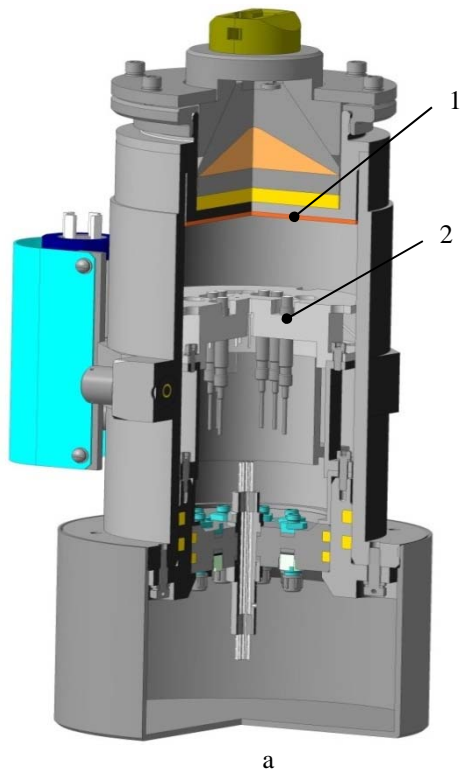


Рис. 4. Вид капсулы с установленным приемником и образцом (а), графики контроля давления разрежения воздуха (б) и давления газа в капсуле (в): 1 – образец с нагружающим устройством, 2 – приемник с установленными датчиками

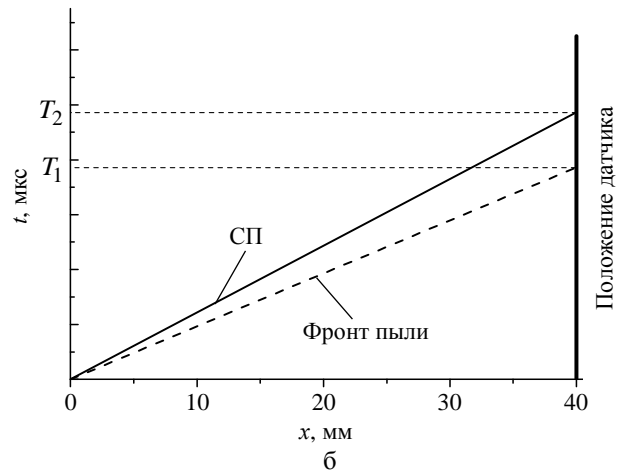
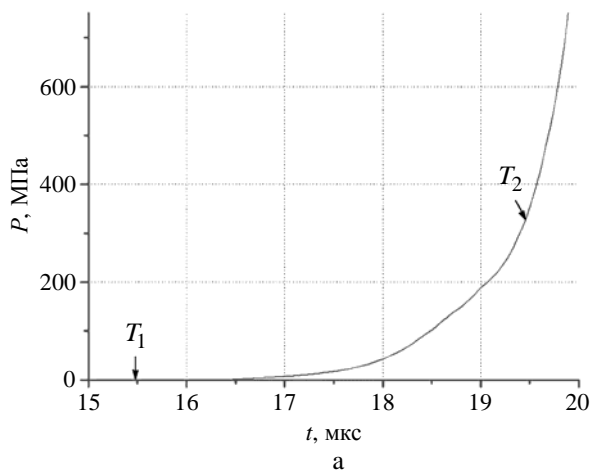


Рис. 5. Типичные профили давления, регистрируемые с помощью пьезоэлектрических датчиков в различных опытах (окончание рис. на с. 121)

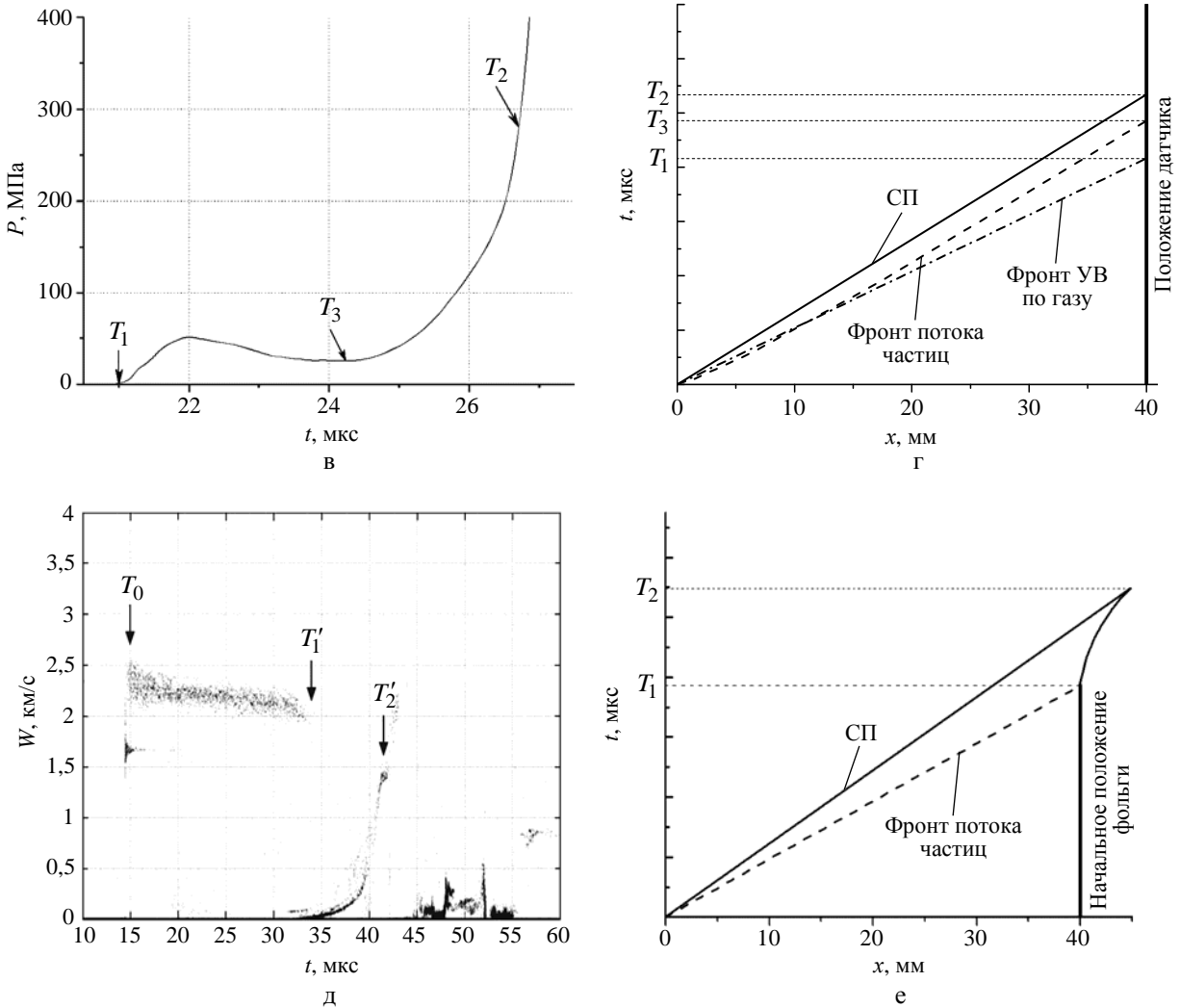


Рис. 5. Окончание

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

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

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

$$\rho(t) = \frac{t^2}{d_{\text{ПД}} S h^2} \int_{T_1}^t \frac{V(t)}{R} dt, \quad (2)$$

$$m_{\text{уд}}(t) = h \int_{T_1}^t \frac{\rho(t)}{t} dt, \quad (3)$$

$$U(t) = h/t, \quad (4)$$

где $d_{\text{ПД}}$ – пьезомодуль чувствительного элемента пьезодатчика; S – площадь чувствительного элемента ПД; $V(t)$ – напряжение, регистрируемое на осциллографах; R – согласующее сопротивление; h – база пролета, соответствующая расстоянию от СП исследуемого образца до ПД.

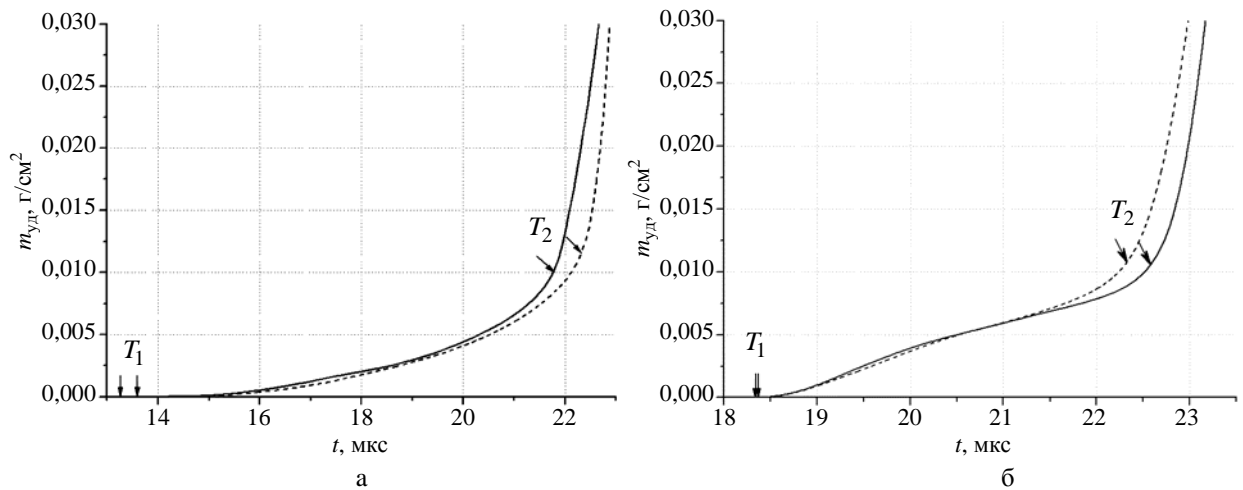


Рис. 6. Типичные зависимости распределения массы потока частиц по формулам (1)–(3), полученные при использовании профилей давления в вакууме (а) и газе (б)

Удельные массы $m_{\text{уд}}(T_2)$, 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 $m_{\text{уд}}(T_2)$ может оказать влияние наличие газа. Для определения удельных масс собственно потока частиц использовали два способа: в первом эту массу определяли путем обработки сигналов только на интервале от T_3 до T_2 по формулам (1)–(4), во втором из полученной массы $m_{\text{уд}}(T_2)$ на интервале от T_1 до T_2 вычитали поправку $\delta m_{\text{уд}}$, учитывающую 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 помощью комплекса программ ЛЭГАК [20] двумерные расчеты показывают, что увеличение давления в моменты T_3 (см. рис. 5, в) нельзя связать с влиянием газа, поэтому рост давления может быть связан 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 УВ 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 газометаллической «подушке», продолжает оказывать на датчики постоянное давление, как 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.

Способ определения массы пыли в газе с использованием измеренных зависимостей давления от времени основан на определении завышения измеряемой с помощью пьезодатчиков массы $m_{уд}(T_2)$ из-за наличия газа. Зная завышение измеряемой массы при наличии газа на величину $\delta m_{уд}$, можно определить количество пыли, намешанной в газ, путем вычитания из общей, оцененной по соотношению (3), удельной массы $m_{уд}(T_2)$ при интегрировании от T_1 до T_2 значения $\delta m_{уд}$. Определить $\delta m_{уд}$ можно по известным профилям давления, регистрируемым пьезодатчиками при отсутствии пыления, например в опытах с образцами, имеющими высокую чистоту обработки поверхности (см. рис. 3, в), или из двумерных численных расчетов, моделирующих обтекание газом ПД при отсутствии пыления, с учетом реальной геометрии.

Так, при давлении ~ 30 и 50 ГПа значение $\delta m_{уд}^1$ было определено из опыта с образцом, чистота обработки поверхности которого была высокой (Ra0,4), поэтому наличием пыли в потоке можно пренебречь. Тогда для этих опытов можно принять, что оцененная по методике пьезоэлектрических датчиков масса равна завышению, связанному с влиянием газа: $m_{уд}(T_2) = \delta m_{уд}^1 = 10,3 \text{ мг/см}^2$.

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 ПД (без учета эффекта пыления) (рис. 7). Это позволяет использовать расчетную зависимость для определения поправки $\delta m_{уд}^2$. Расчет $\delta m_{уд}^2$ дает значение $15,9 \text{ мг/см}^2$.

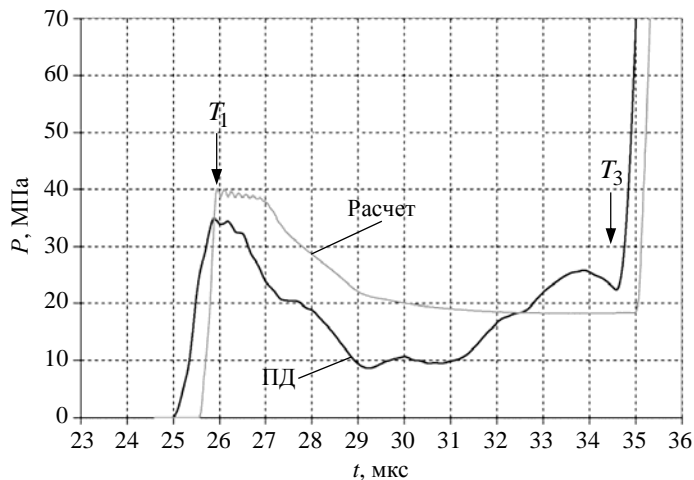


Рис. 7. Профили давления газа на пьезодатчик, рассчитанные по программе ЛЭГАК в двумерной постановке и измеренные пьезодатчиком в опыте без пыления (Ra0,4)

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

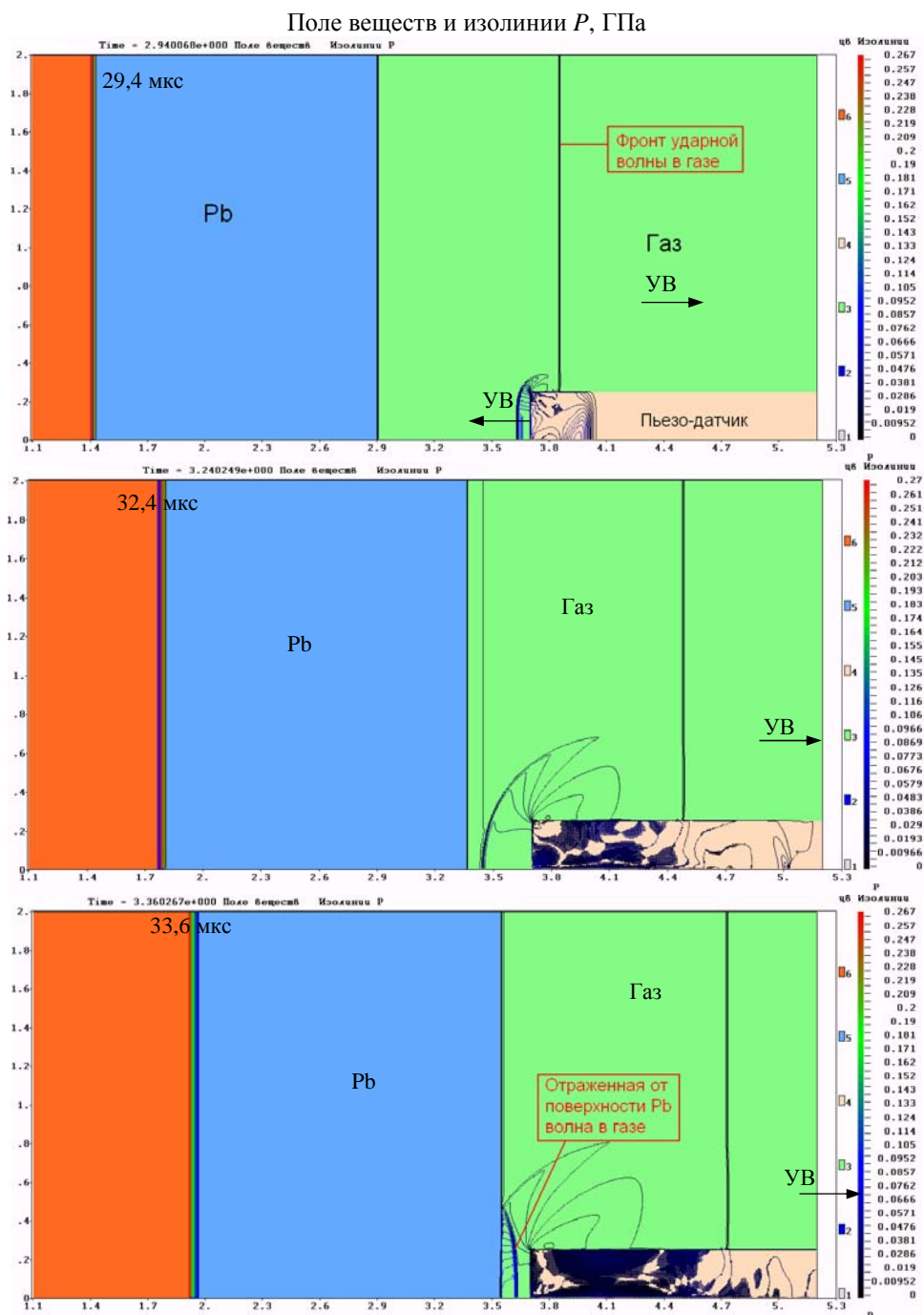


Рис. 8. Процесс обтекания УВ в газе пьезодатчика в расчете по программе ЛЭГАК

Основные кинематические характеристики и значения масс пыли в вакуумированных капсулах и газе, оцененные описанными выше способами, приведены в табл. 1 и 2. Анализ данных в таблицах свидетельствует о том, что скорости фронтов потоков и скорости образцов, измеренные с использованием пьезоэлектрических и PDV-датчиков, хорошо согласуются.

Таблица 1

Результаты измерений и оценок основных кинематических характеристик процесса выброса частиц

$P_{УВ}$, ГПа	$P_{Г}$, атм	U_1 , км/с			U_2 , км/с			U_3 , км/с
		ПД	PDV	Расчет	ПД	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

Примечание: 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 .

Таблица 2

Результаты измерений и оценок массы потоков частиц

$P_{УВ}$, ГПа	$P_{Г}$, атм	$m_{уд}$, мг/см ²					
		Пьезоэлектрическая методика				PDV	Расчет
		$m_{уд}(T_2)$, мг/см ²	$m_{уд}(T_3, T_2)$, мг/см ²	$m_{уд_оцен}$, мг/см ²	$m_{уд_сред}$, мг/см ²		
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	–	–

Примечание: $m_{уд}(T_2)$ и $m_{уд}(T_3, T_2)$ – удельная масса потока частиц, вычисленная с использованием соотношений (1)–(4) для интервалов времени (T_1, T_2) и (T_3, T_2) соответственно; $m_{уд_оцен}$ – оценка массы частиц в газе, сделанная в предположении, что завышение измеренной массы $m_{уд}(T_2)$ равно удельной массе газа, измеренной в опыте без пыления ($\delta m_{уд}^1$) или полученной с использованием расчетной поправки на влияние газа ($\delta m_{уд}^2$).

В опытах в вакууме, как по пьезоэлектрической методике, так и по методике индикаторной фольги, получены близкие значения удельных масс. В этих опытах при давлении в УВ ~30 и 50 ГПа, когда свинец плавится в волне разгрузки или в УВ, измеренные удельные массы потоков частиц примерно в 2 раза больше, чем в опыте с давлением ~17 ГПа, при котором плавление материала 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 фронтам 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 пьезоэлектрической методикой на фоне газа (фиксируемых в моменты T_3 , см. рис. 5,2). Это подтверждает правильность интерпретации регистрируемого нарастания давления после моментов T_3 как следствия воздействия пылевых потоков в газе.

Сравнение скоростей фронтов потоков частиц в вакууме с подлетными скоростями частиц в газе по обоим используемым методикам показывает их снижение в $\sim 1,6$ 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 $1,3 \text{ мг/см}^2$. Можно отметить, что учет влияния газа по обоим способам оценки дает близкие значения 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 наблюдается более плотная и тонкая газометаллическая «подушка», воспринимаемая пьезодатчиком как удар СП.

По измерениям с помощью PDV-датчиков траекторий торможения частиц в газе оценены их размеры, 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 $P_T = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ перед СП приводит к тому, что поток частиц прижимается к образцу в виде газометаллического слоя («подушки») толщиной $\sim 1 \text{ мм}$, а регистрируемая пьезодатчиками удельная на единицу поверхности масса частиц в потоке газа намного меньше изначально выброшенной.

Список литературы

1. Vogan W. S., Anderson W. W., Grover M. et al. // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98. P. 113508.
2. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Новиков Л. С., Богоявленский Н. Г. // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 2. С. 123.
3. Resseguier T., Signor L., Dragon A. et al. // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 013506.
4. Zellner M. B., Grover M., Hammerberg J. E. // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 102. P. 013522.
5. Germann T. C., Hammerber J. E., Dimonte G. // 7th Biannual Int. Conf. New models and hydrocodes for shock wave processes in condensed matter. Portugal, 2008.
6. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Бурцев В. В. и др. // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. С. 6.
7. Невмержицкий Н. В., Михайлов А. Л., Раевский В. А. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теор. и прикл. физика. 2010. № 3. С. 3.
8. Dimonte G., Terrones G., Cherne F. // Phys. Rev. Lett. 2011. Vol. 107. P. 264502.

9. Yongtao Chen, Haibo Hu, Tiegang Tang, Guowu Ren, Qingzhong Li // J. Appl. Phys. 2012. Vol. 111. P. 053509.
10. Or'о D. M., Hammerberg J. E., Buttler W. T. et al. // AIP Conf. Proc. 2012. P. 1351–4.
11. Sorenson D. S., Malone R. M., Capelle G. A. et al. // Proc. NEDPC 2013 (Livermore, California, US), LA-UR-14-23036, 2013.
12. Антипов М. В., Георгиевская А. Б., Игонин В. В. // Сб. докл. Международ. науч. конф. «XV Харитоновские чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 666.
13. Monfared S. K., Or'о D. M., Grover M. et al. // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 116. P. 063504.
14. Михайлов А. Л., Огородников В. А., Сасик В. С. и др. // ЖЭТФ. 2014. Т. 145. С. 5.
15. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Сасик В. С. и др. // ЖЭТФ. 2016. Т. 149. С. 6.
16. Asay J. R., Barker L. M. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 2540.
17. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А. и др. // Сб. докл. Международ. науч. конф. «XV Харитоновские чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2013. С. 274.
18. Копышев В. П., Медведев А. Б. Термодинамическая модель сжимаемого ковалюма: препринт РФЯЦ-ВНИИЭФ № 121. – Саров, 1995.
19. Vogan W. S., Anderson W. W., Grover M. et al. Piezoelectric characterization of ejecta from shocked tin surface // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98. P. 113508.
20. Авдеев П. А., Артамонов М. В., Бахрах С. М. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 2001. Вып. 3. С. 14.

Particle Ejection from Free Surfaces of Shock-Loaded Lead Samples into Vacuum and Gaseous Media

V. A. Ogorodnikov, A. L. Mikhailov, S. V. Erunov, M. V. Antipov, A. V. Fedorov,
M. A. Syrunin, E. V. Kulakov, O. A. Kleshchevnikov, I. V. Yurtov, A. A. Utenkov,
S. A. Finyushin, E. A. Chudakov, D. A. Kalashnikov, A. S. Pupkov, A. V. Chapaev,
A. V. Mishanov, V. V. Glushikhin, A. V. Fedoseev, R. R. Tagirov, S. A. Kostyukov,
I. Yu. Tagirova, E. V. Saprykina

Contains comparative results for the studies of «ejection» from free surfaces of lead samples with vacuum or gas in front of it depending on roughness and pressure amplitude in a shock wave front or on a material phase state. Techniques were suggested to estimate a mass of a particle flux with a gaseous medium before a free surface.