

# 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<sup>1,2</sup>, А. Л. Михайлов<sup>1,2</sup>,  
С. В. Ерунов<sup>1</sup>, М. В. Антипов<sup>1</sup>,  
А. В. Федоров<sup>1</sup>, М. А. Сырунин<sup>1,2</sup>,  
Е. В. Кулаков<sup>1</sup>, О. А. Клещевников<sup>1</sup>,  
И. В. Юртов<sup>1</sup>, А. А. Утенков<sup>1</sup>,  
С. А. Финюшин<sup>1</sup>, Е. А. Чудаков<sup>1</sup>,  
Д. А. Калашников<sup>1</sup>, А. С. Пупков<sup>1</sup>,  
А. В. Чапаев<sup>1</sup>, А. В. Мишанов<sup>1</sup>,  
В. В. Глушихин<sup>1</sup>, А. В. Федосеев<sup>2</sup>,  
Р. Р. Тагиров<sup>1</sup>, С. А. Костюков<sup>1</sup>,  
И. Ю. Тагирова<sup>1</sup>, Е. В. Сапрыкина<sup>1</sup>**

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).

<sup>1</sup> РФЯЦ-ВНИИЭФ.

<sup>2</sup> 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/см<sup>3</sup> 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].

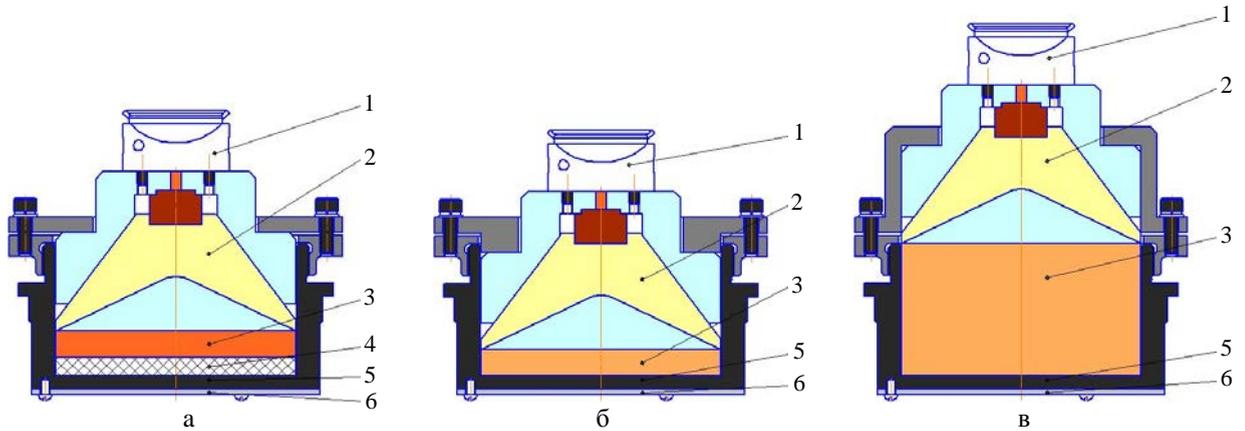


Рис. 1. Схемы нагружения исследуемых образцов: 1 – розетка с электродетонатором, 2 – линзовый генератор УВ, 3 – заряд ВВ, 4 – подложка из фторопласта, 5 – стенка капсулы, 6 – образец

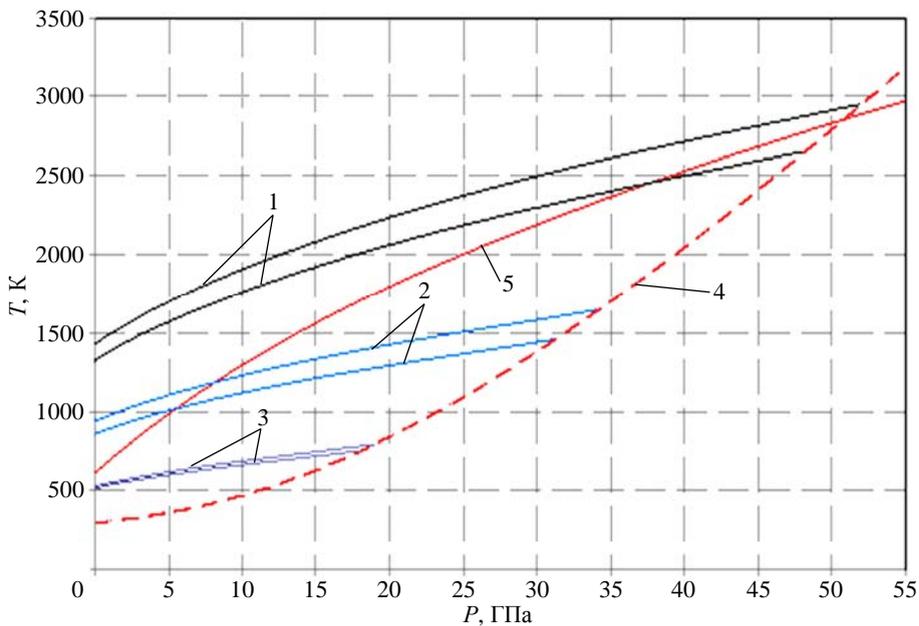


Рис. 2. Фазовая диаграмма при разгрузке свинца из состояний на УВ: 1 – при  $P = 50$  ГПа; 2 – при  $P = 30$  ГПа; 3 – при  $P = 17$  ГПа; 4 – ударная адиабата; 5 – линия плавления

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).

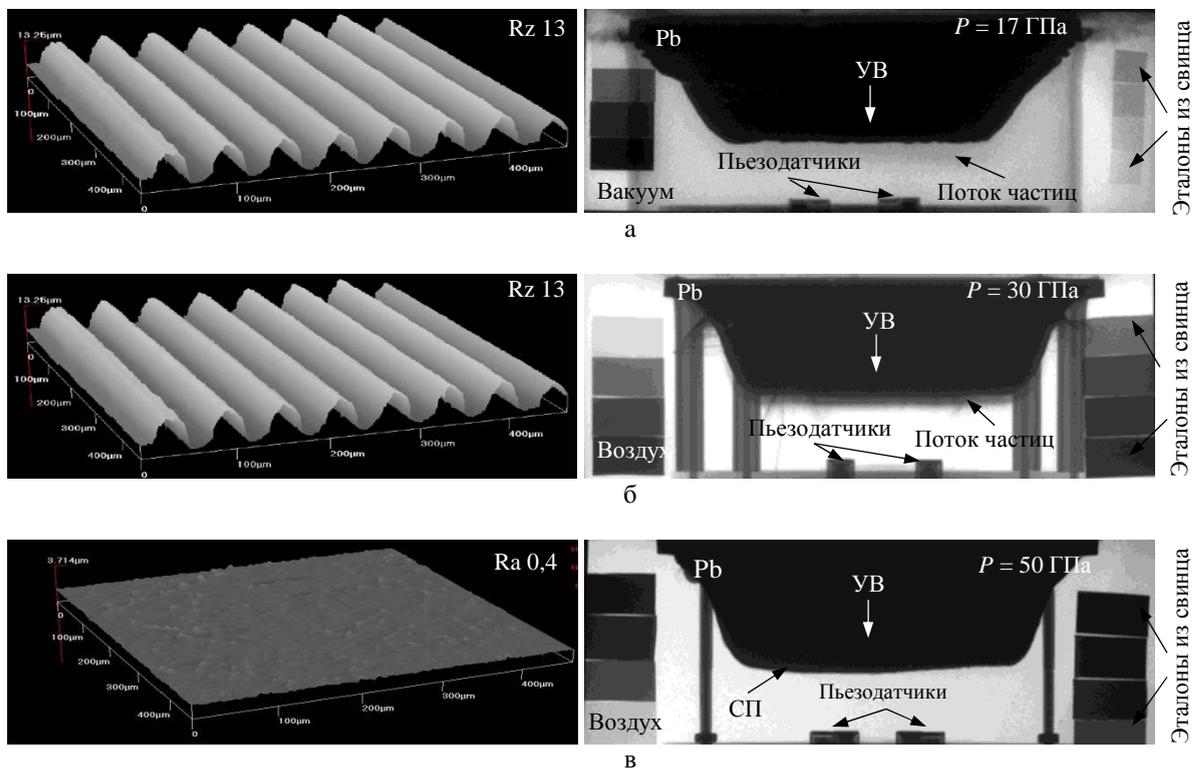


Рис. 3. Начальная шероховатость и форма СП образцов в предварительных опытах

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 UV 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.

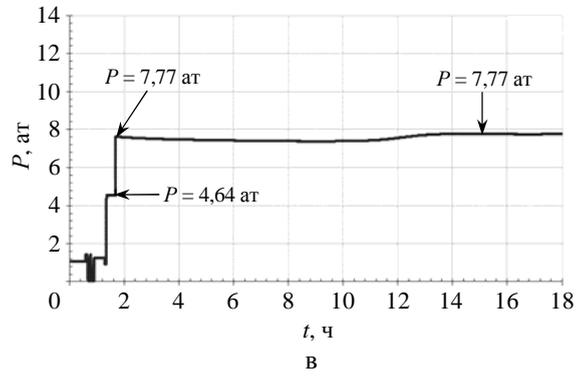
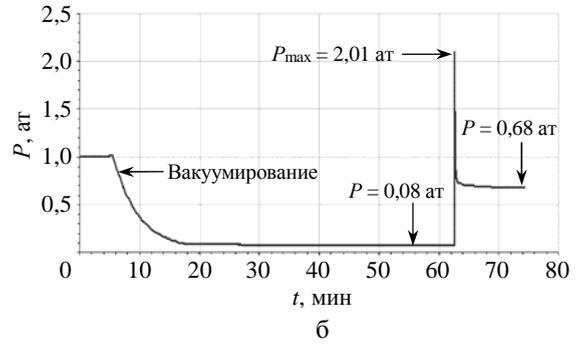
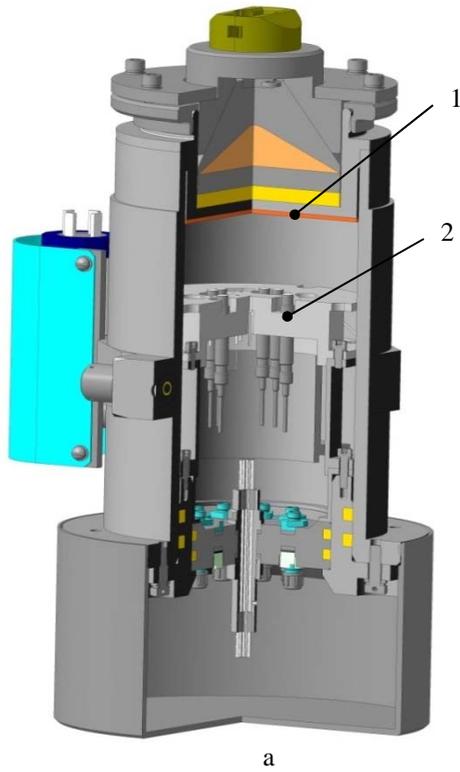


Рис. 4. Вид капсулы с установленным приемником и образцом (а), графики контроля давления разрежения воздуха (б) и давления газа в капсуле (в): 1 – образец с нагружающим устройством, 2 – приемник с установленными датчиками

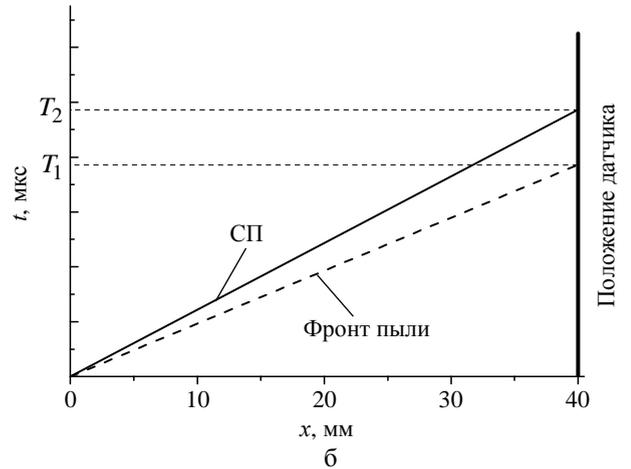
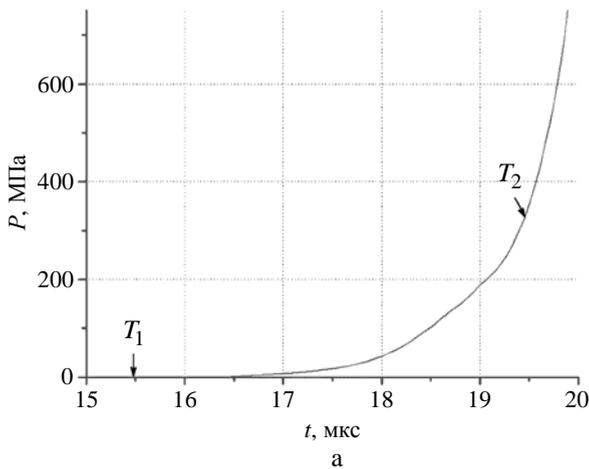


Рис. 5. Типичные профили давления, регистрируемые с помощью пьезоэлектрических датчиков в различных опытах (окончание рис. на с. 121)

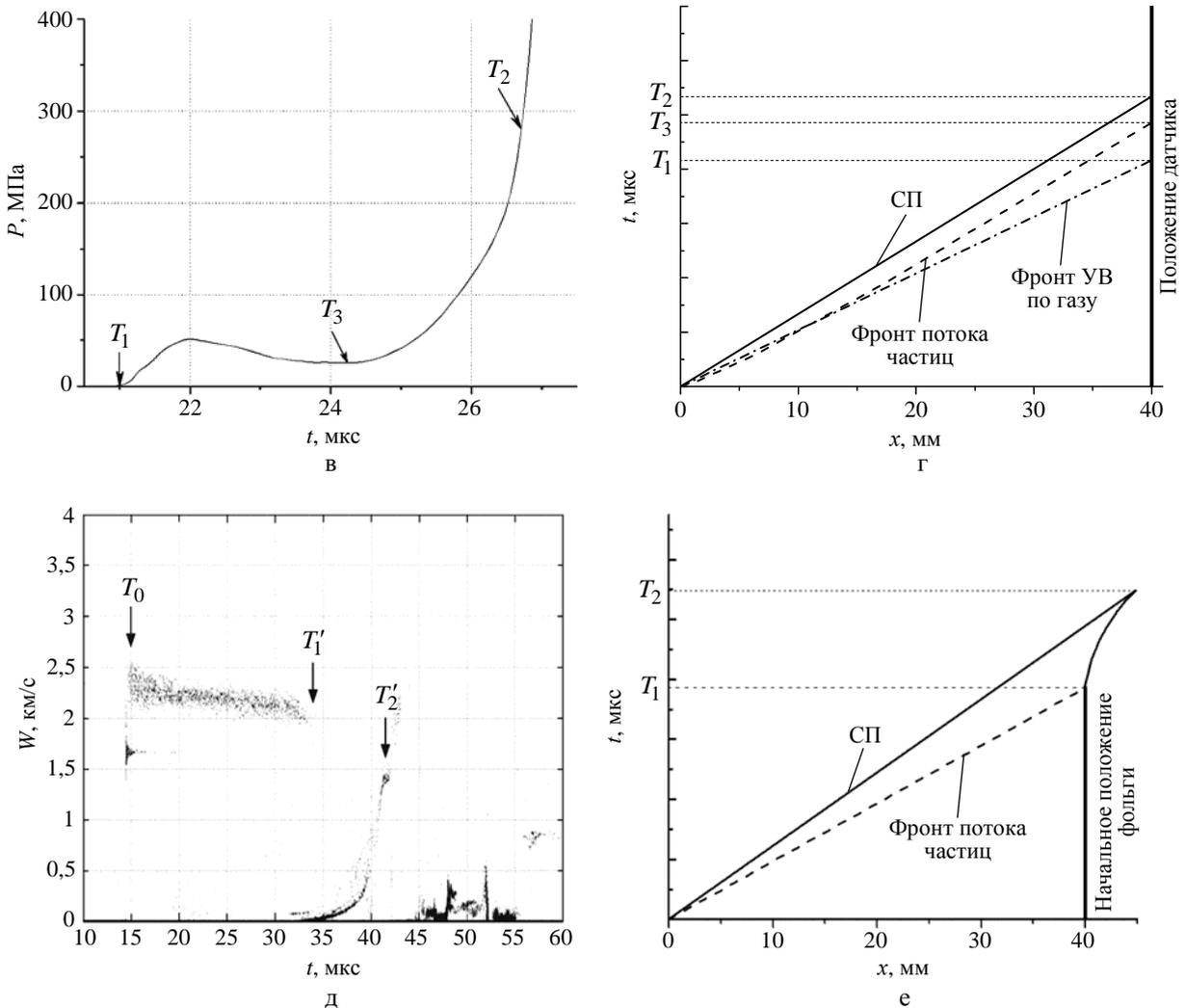


Рис. 5. Окончание

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.

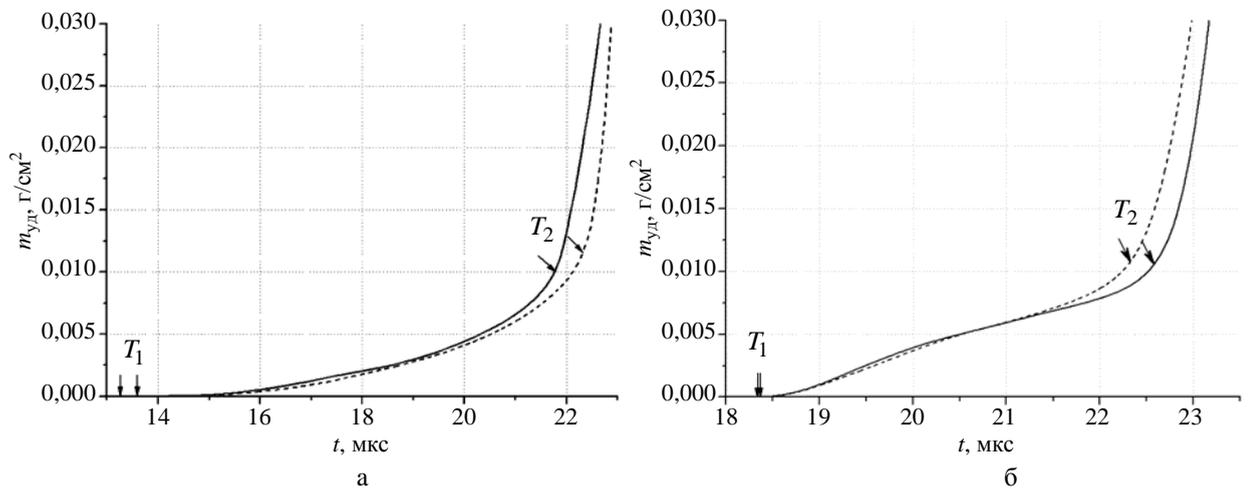


Рис. 6. Типичные зависимости распределения массы потока частиц по формулам (1)–(3), полученные при использовании профилей давления в вакууме (а) и газе (б)

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  $\sim 30$  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  $15,9 \text{ мг/см}^2$ .

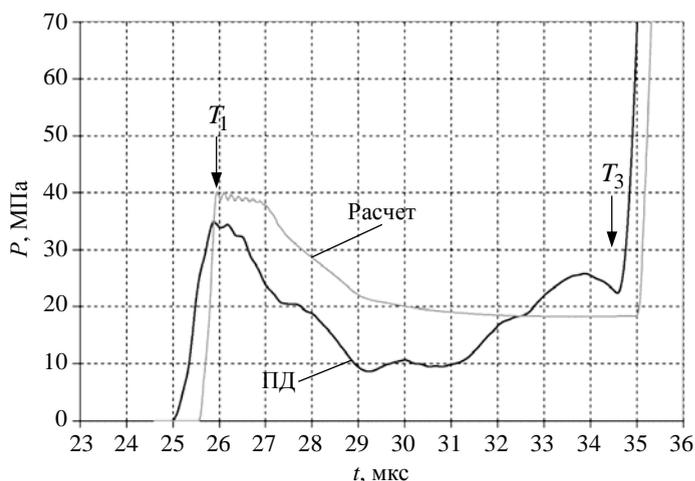


Рис. 7. Профили давления газа на пьезодатчик, рассчитанные по программе ЛЭГАК в двумерной постановке и измеренные пьезодатчиком в опыте без пыления (Ra0,4)

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

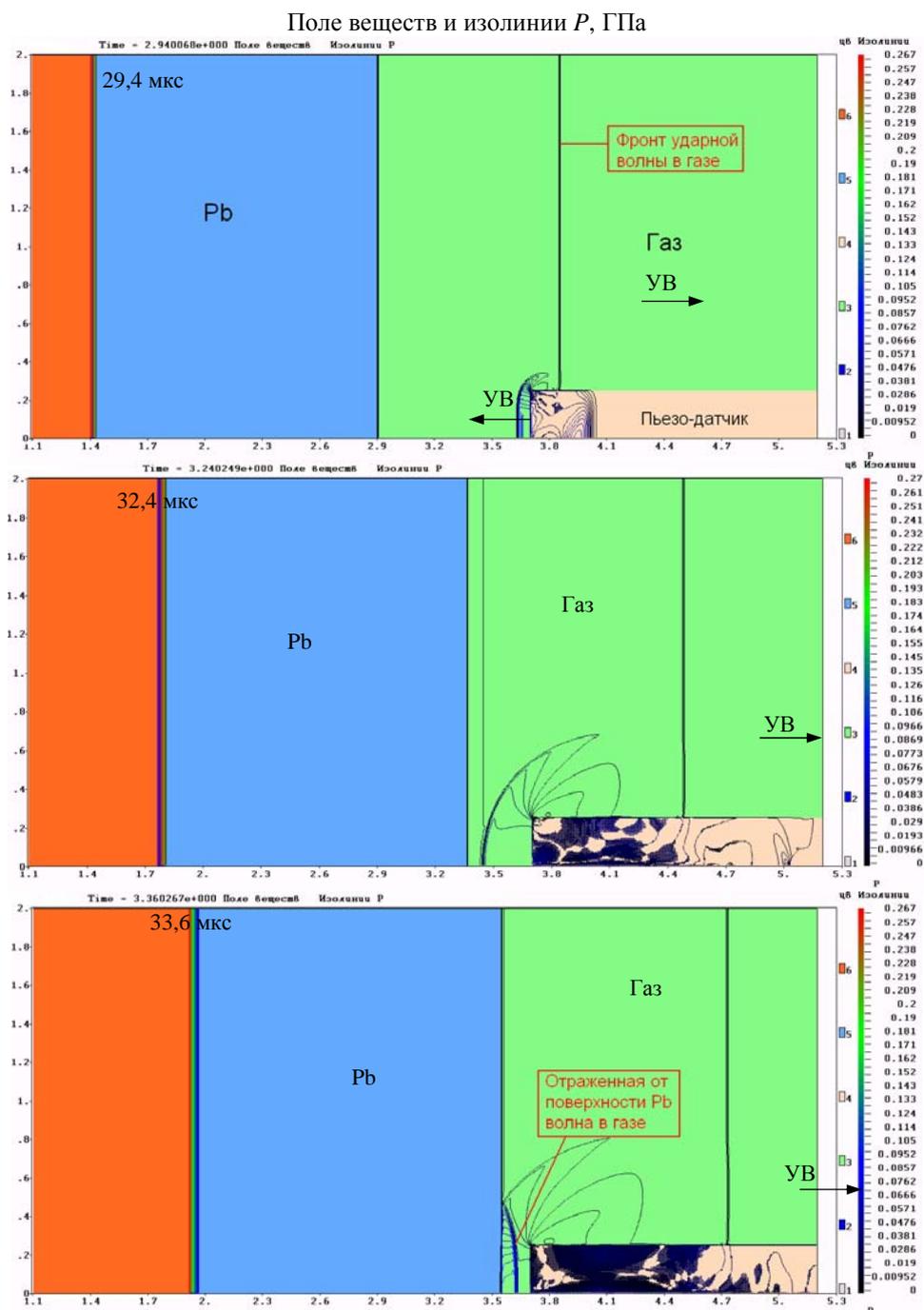


Рис. 8. Процесс обтекания УВ в газе пьезодатчика в расчете по программе ЛЭГАК

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 <sup>2</sup>					
		Пьезоэлектрическая методика				PDV	Расчет
		$m_{уд}(T_2)$ , мг/см <sup>2</sup>	$m_{уд}(T_3, T_2)$ , мг/см <sup>2</sup>	$m_{уд\_оцен}$ , мг/см <sup>2</sup>	$m_{уд\_сред}$ , мг/см <sup>2</sup>		
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. // 7<sup>th</sup> 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.*