

УДК 681.586.773:534.222.2

## ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ

М. В. Антипов, И. В. Юртов, А. А. Утенков, А. В. Блинов, В. Д. Садунов, Т. В. Трищенко, В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, В. В. Глушихин, Е. Д. Вишневецкий

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт физики взрыва, 607188 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

Описан пьезоэлектрический метод измерения плотности и массы пылевых потоков, выбрасываемых со свободной поверхности конденсированного материала при выходе на нее ударной волны, а также особенности его реализации в ИФВ РФЯЦ ВНИИЭФ (г. Саров). Представлены конструкции пьезодатчиков, способы регистрации и обработки сигналов. Проведено сравнение данных измерения плотности и массы пылевых потоков пьезоэлектрическим, рентгенографическим и протонографическим методами, а также методом с использованием индикаторных фольг.

Ключевые слова: ударная волна, пыление, пьезодатчик, плотность, кварц, пьезокерамика.

DOI 10.15372/FGV20180513

### ВВЕДЕНИЕ

При выходе ударной волны на свободную поверхность образца конденсированного материала при определенных условиях происходит выброс (эжекция) высокоскоростных микроструй и частиц. Данное явление часто называют ударно-волновым пылением [1, 2]. Образующиеся при этом пылевые потоки характеризуются большими, до нескольких километров в секунду, скоростями, малыми плотностями  $\approx 0.1 \div 100 \text{ мг/см}^3$  и малыми размерами  $\approx 10^{-5} \div 10^{-7} \text{ м}$  выбрасываемых частиц.

Для изучения ударно-волнового пыления используются такие методы, как фотографический, рентгенографический, пьезоэлектрический, метод индикаторных фольг, лазерный гетеродин-интерферометрический метод (PDV), голографический, метод рассеяния Ми. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. При исследовании эффекта пыления важно получать информацию о количестве (массе) выброшенного вещества, распределении плотности частиц в потоке, а также о распределении частиц по размерам и скоростям. Пьезоэлектрический метод позволяет определять плотность, массу и скорость пылевых потоков и отличается относительной простотой и удобством применения. Первая публикация

о применении пьезоэлектрического метода для исследования пыления появилась в 1989 г. [3], и затем этот метод активно использовался разными исследователями [4–9].

Ниже представлены особенности применения пьезоэлектрического метода в ИФВ РФЯЦ ВНИИЭФ (г. Саров), а также некоторые экспериментальные данные, полученные с его помощью, которые сравниваются с данными рентгенографической и протонографической методик.

### 1. ОСНОВЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА И КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОДАТЧИКОВ

При установке пьезодатчика напротив пылящей поверхности, как показано на рис. 1, пылевой поток, ударяясь об экран датчика, создает в нем давление, величина которого зависит

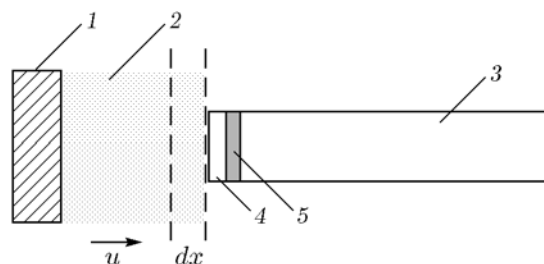


Рис. 1. Пьезодатчик и пылевой поток:

1 — образец, 2 — пылевой поток, 3 — опорное тело, 4 — экран, 5 — пьезоэлемент

от скорости и плотности потока.

При анализе нагружения исследуемого образца плоской ударной волной при вакуумировании пространства между образцом и датчиком можно сделать следующие допущения:

- 1) частицы пылевого потока выбрасываются со свободной поверхности образца одновременно;
- 2) скорости частиц в потоке постоянны;
- 3) движение частиц в потоке одномерно;
- 4) частицы взаимодействуют с экраном датчика неупруго;
- 5) пыль в потоке беспредельно сжимаема.

При неупругом соударении со скоростью  $u(t)$  слоя пылевого потока плотностью  $\rho(t)$ , толщиной  $dx = u(t)dt$  с экраном датчика площадью  $S$  (см. рис. 1) он сообщает торцу датчика импульс

$$dJ = u(t)dm, \quad (1)$$

где  $dm$  — масса рассматриваемого слоя пылевого потока  $dm = \rho(t)Sdx = \rho(t)Su(t)dt$ . За время  $t$  датчику передается импульс

$$J(t) = \int_{t_0}^t \rho(t)u^2(t)Sdt, \quad (2)$$

где  $t_0$  — время удара по датчику фронта пылевого потока. При взаимодействии экрана датчика с пылевым потоком пьезоэлемент датчика удерживается в сжатом состоянии силой

$$F(t) = \frac{dJ(t)}{dt} = p(t)S. \quad (3)$$

Из (2) и (3) получаем связь между давлением потока на датчик, скоростью и плотностью потока:

$$p(t) = u^2(t)\rho(t) \text{ или } \rho(t) = p(t)/u^2(t). \quad (4)$$

Из допущений 1 и 2 следует, что скорость ударяющихся о торец датчика фрагментов пылевого потока может быть определена по времени их движения от момента выхода ударной волны из образца до удара по экрану датчика:

$$u(t) = \frac{h}{t - t_0} = \frac{h}{t}, \quad (5)$$

где  $t_0$  — момент выхода ударной волны на свободную поверхность (в дальнейшем полагаем

$t_0 = 0$ ),  $h$  — расстояние между свободной поверхностью и торцом датчика.

Под действием давления  $p(t)$  на электродах пьезоэлемента генерируется электрический заряд:

$$Q(t) = d_{ij}F(t) = d_{ij}Sp(t), \quad (6)$$

где  $d_{ij}$  — пьезомодуль, соответствующий одноосному, аксиальному сжатию пьезоэлемента, для пьезокерамики  $d_{ij} = d_{33}$ , а для кварца среза  $X$   $d_{ij} = d_{11}$ . Для дифференциального режима работы пьезодатчика величина заряда  $Q(t)$  может быть также выражена в виде

$$Q(t) = \int_{t_0}^t I(t)dt, \quad (7)$$

где  $I(t)$  — ток пьезодатчика.

По измеренной в опыте зависимости генерируемого датчиком тока от времени  $I(t)$  можно вычислить зависимость плотности пылевого потока от времени в месте расположения датчика:

$$\rho(t) = \frac{p(t)}{u^2(t)} = \frac{t^2}{d_{ij}Sh^2} \int_{t_0}^t I(t)dt. \quad (8)$$

Зная  $\rho(t)$  и  $u(t) = h/t$ , можно рассчитать удельную массу пыли, захваченную торцом датчика к моменту времени  $t$ :

$$m_{\text{уд}}(t) = h \int_{t_0}^t \rho(t)t^{-1}dt. \quad (9)$$

Из допущений 1–3 следует, что движение пылевого потока автомодельно, что позволяет рассчитать для произвольного момента времени  $t^*$  распределение плотности пыли в пространстве между образцом и датчиком, используя измеренную зависимость плотности пылевого потока  $\rho(t, x_{\text{д}})$ , налетающего на экран пьезодатчика (в сечении  $x_{\text{д}}$ ):

$$\begin{aligned} \rho(x, t^*) &= \frac{t}{t^*} \rho(x_{\text{д}}, t) = \left[ t = \frac{x_{\text{д}}}{x} t^* \right] = \\ &= \frac{x_{\text{д}}}{x} \rho \left( x_{\text{д}}, t = \frac{x_{\text{д}}}{x} t^* \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Соотношение (10) можно использовать для сопоставления данных пьезоэлектрического метода с данными рентгенографического метода в фиксированный момент времени или с данными метода индикаторных фольг с использованием датчиков PDV. Сопоставление показывает, что предположения о свойствах пылевых потоков, лежащие в основе пьезоэлектрического метода, хорошо выполняются при проведении опытов в разреженном ( $<0.2$  атм) воздухе. Хотя процесс вылета частиц в действительности не одномоментен, он длится много меньше времени движения самых быстрых частиц до датчиков и практически не влияет на определение скорости налетающих фрагментов потока по формуле (5). Взаимодействие частиц с экраном датчика в основном неупругое. Так, чисто упругое взаимодействие должно приводить к завышению измеряемой плотности и массы в два раза. Однако сравнение данных, полученных с помощью пьезодатчиков, с данными рентгенографии, часть из которых представлена ниже, показывает, что они согласуются в пределах погрешностей методик ( $\approx 10\%$ ) и поперечных флуктуаций параметров пылевых потоков. Наличие газа, приводящего к торможению частиц и воздействию давления на датчики газа, заметно влияет на измерения в случае, когда удельная масса частиц меньше или близка к удельной массе газа, находящегося перед датчиками ( $m_{\text{уд.газ}} = \rho_{\text{газ}}h$ ). Наличие газа приводит к завышению измеряемой массы частиц приблизительно на величину  $m_{\text{уд.газ}}$ . В некоторых случаях влияние газа на измерения пьезоэлектрическим методом плотности и массы потоков частиц можно учесть. Типичная конструкция используемых нами пьезодатчиков показана на рис. 2.

Основным элементом пьезодатчика является пьезоэлемент. Перед ним для защиты от разрушения локальными ударами быстро летящих частиц устанавливают металличе-

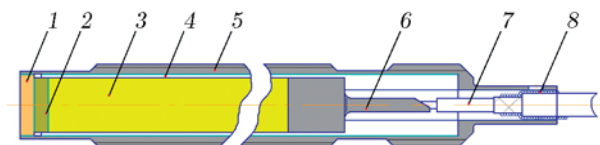


Рис. 2. Конструкция пьезодатчиков:

1 — экран, 2 — пьезоэлемент, 3 — опорное тело, 4 — изолятор, 5 — корпус, 6 — контакт, 7 — жила кабеля, 8 — оплетка кабеля

ский экран, толщина которого обычно равна  $0.5 \div 2$  мм. При проведении измерений следует учитывать задержку, связанную с прохождением звуковой волны через экран. За пьезоэлементом находится опорное тело в виде стержня из материала с акустическим импедансом, равным или близким к импедансу пьезоэлемента. Опорное тело препятствует разгрузке пьезоэлемента до момента удара образца о датчик и электрически связывает положительный электрод пьезоэлемента с жилой кабеля. Материал опорного тела должен сохранять упругость во всем диапазоне регистрируемых давлений. Лучше всего изготавливать опорное тело из того же материала, что и пьезоэлемент, т. е. из кварца или пьезокерамики со сплошным покрытием серебром. Корпус защищает элементы датчика от боковых ударов и от электромагнитных наводок, а также связывает передний электрод пьезоэлемента через экран с «землей» измерительной линии.

Используются два типа пьезоэлементов: из кварца (срез  $X$ ) и из сегнетожесткой пьезокерамики (ЦТС-21). Кварцевые датчики позволяют измерять давление до 4 ГПа [10], однако имеют небольшую чувствительность ( $d_{11} = 2.3$  пКл/Н), что затрудняет их использование для регистрации слабых потоков, особенно при наличии электромагнитных шумов. Большой рабочий диапазон давлений кварцевых датчиков позволяет регистрировать как плотные части пылевых потоков, так и раздробленную (диспергированную) часть образца. Пьезокерамические датчики на основе пьезоэлементов из ЦТС-21 имеют рабочий диапазон давления до нескольких сотен мегапаскалей. При этом их чувствительность ( $d_{33} = 96$  пКл/Н) существенно больше, чем у кварцевых датчиков. Такие датчики используют для надежной регистрации малоплотных потоков и для измерений в условиях сильных шумов. Обычно в опытах применяли оба типа пьезодатчиков.

Для проверки качества изготовления датчиков и определения их фактической чувствительности использовали метод копра, подобный описанному в [11]. В этом методе стальной ударник, падая с высоты до 300 мм, ударяется о стальной стержень, конец которого соединен с экраном проверяемого датчика. Таким образом, датчики можно нагружать импульсами давления до  $\approx 50$  МПа, которые подобны давлению, оказываемому пылевыми потоками, и не разрушают датчики.

Размер чувствительной зоны используемых нами датчиков от  $\varnothing 2$  до  $\varnothing 20$  мм. Датчики больших размеров имеют большую чувствительность и позволяют получать осредненную информацию о параметрах пылевых потоков. Датчики с малыми размерами чувствительной зоны соответственно менее чувствительны, а получаемые с их помощью данные характеризуют параметры потока в локальной области, которые могут существенно отличаться от параметров потока в целом. Поэтому в опытах по исследованию пыления в одномерной постановке предпочтительнее большие датчики, а миниатюрные датчики — в опытах с ограниченными размерами пылящей поверхности или для исследования локальных особенностей пыления. В некоторых случаях применяли датчики с матричными пьезоэлементами [2], позволяющие оптимально использовать объем экспериментальной сборки, отведенный для выполнения измерений, при обеспечении максимально возможной чувствительности каждой пьезочувствительной зоны.

Сигналы от пьезодатчиков передаются к цифровым осциллографам по радиочастотным кабельным линиям, которые согласуются со стороны осциллографа. Обычно это кабель типа РК-75. Уровень сигналов может изменяться от десятков милливольт до сотен вольт, что связано с соответствующими изменениями плотности пылевых потоков. Для регистрации таких сигналов их подают одновременно на несколько, обычно четыре, измерительных канала с разной чувствительностью, изменяющейся от канала к каналу в 10 раз, а все полученные данные «сшивают» и затем обрабатывают при помощи приведенных выше формул.

Для обработки сигналов начало шкалы времени должно приводиться к моменту выхода ударной волны на свободную поверхность образца. Этот момент определяется либо непосредственным измерением с использованием датчиков, устанавливаемых на образце, или бесконтактных датчиков PDV, либо косвенно — по регистрации сигнала, вырабатываемого при срабатывании подрывной установки, с учетом времени пробега сигналов по кабельным линиям и времени работы взрывной сборки. Пример сигнала, генерируемого пьезодатчиком, показан на рис. 3.

Следует отметить, что формы сигналов, генерируемых пьезодатчиками, соответствуют форме производной от давления, действующе-

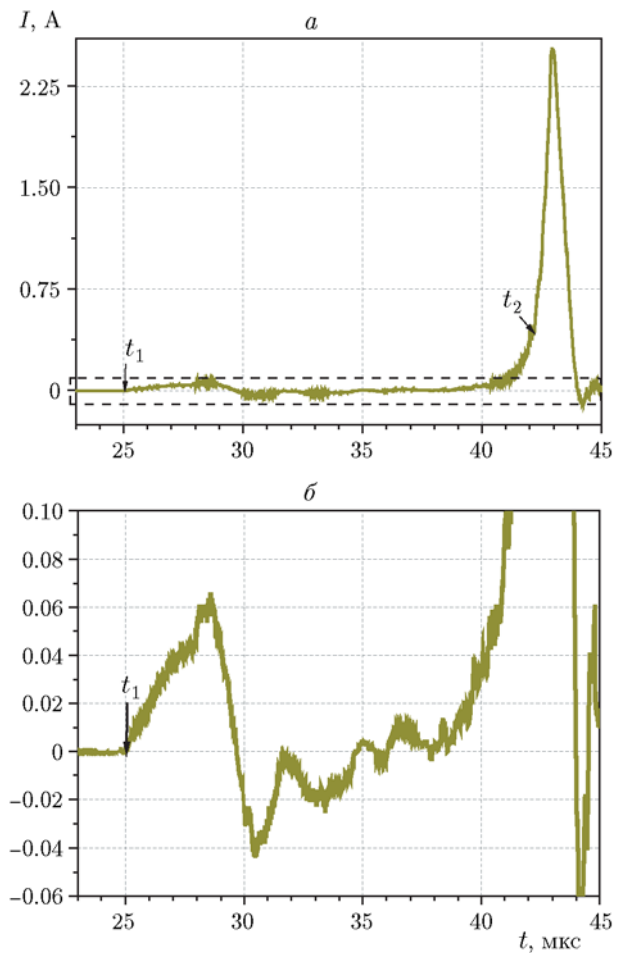


Рис. 3. Вид сигнала, генерируемого пьезодатчиком под действием пылевого потока (а), и увеличенная низкоамплитудная часть сигнала (б)

го на датчики  $\frac{dp}{dt}$ . Поэтому моменты прихода фронта ( $t_1$ ) или удара свободной поверхности образца о датчики ( $t_2$ ) более четко определяются по сигналам, в то время как при рассмотрении только зависимостей давления, плотности или удельной массы от времени, полученных после обработки сигналов, выбор времен  $t_1$  или  $t_2$  не всегда очевиден.

## 2. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПЬЕЗОДАТЧИКОВ

### 2.1. Пьезодатчики на разных расстояниях от образца

В опыте два кварцевых пьезодатчика устанавливали на расстояниях 41 и 61 мм от

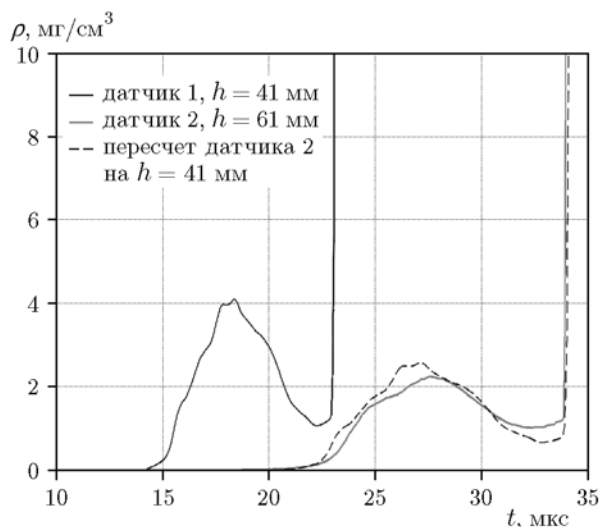


Рис. 4. Результаты измерения плотности потока частиц на разных базах и результаты пересчета распределения плотности

свободной поверхности ударно-нагруженного образца. Опыт проводили в вакууме (0.02 атм), образец представлял собой алюминиевую пластину (АМг6) с шероховатостью поверхности  $Rz = 150$  мкм, на которую выходила плоская ударная волна с давлением на фронте  $\approx 15$  ГПа.

На рис. 4 показаны распределения плотности потока от времени, вычисленные по зарегистрированным датчиками профилям давления в сечениях потока на расстоянии  $h = 41$  и  $61$  мм от свободной поверхности образца. Результаты расчета плотности потока  $\rho(x_{д2}, t)_{расч}$  по данным первого датчика для базы  $61$  мм, соответствующей месту установки второго датчика, практически совпадают с результатами измерений, выполненных с его помощью. Данный опыт демонстрирует справедливость предположения об автомодельности пылевых потоков в вакууме.

## 2.2. Опыт с использованием пьезодатчиков, рентгена и датчиков PDV

В опыте проводили нагружение плоской ударной волной образца из свинца марки С1, шероховатость свободной поверхности которого составляла  $2a_0/\lambda = 10/60$  мкм, где  $2a_0$ ,  $\lambda$  — соответственно амплитуда и длина волны микронеровностей. Давление выходящей на свободную поверхность образца ударной волны было равно  $18$  ГПа. В пространстве между образцом и датчиками имелось остаточное давление воз-

духа  $0.1$  атм.

Измерения проводили с помощью импульсной рентгенографии с использованием установки ГРИ-1000, лазерного гетеродин-интерферометра (датчики PDV, открытые и с фольгами из тантала, алюминия и кварца) и пьезодатчиков (кварцевых и пьезокерамических). Пьезодатчики устанавливали на расстоянии  $40$  мм от свободной поверхности образца, а датчики PDV — на расстоянии  $42$  мм. Момент выхода ударной волны на поверхность образца определяли с помощью открытых датчиков PDV.

На рис. 5,а показаны распределения плот-

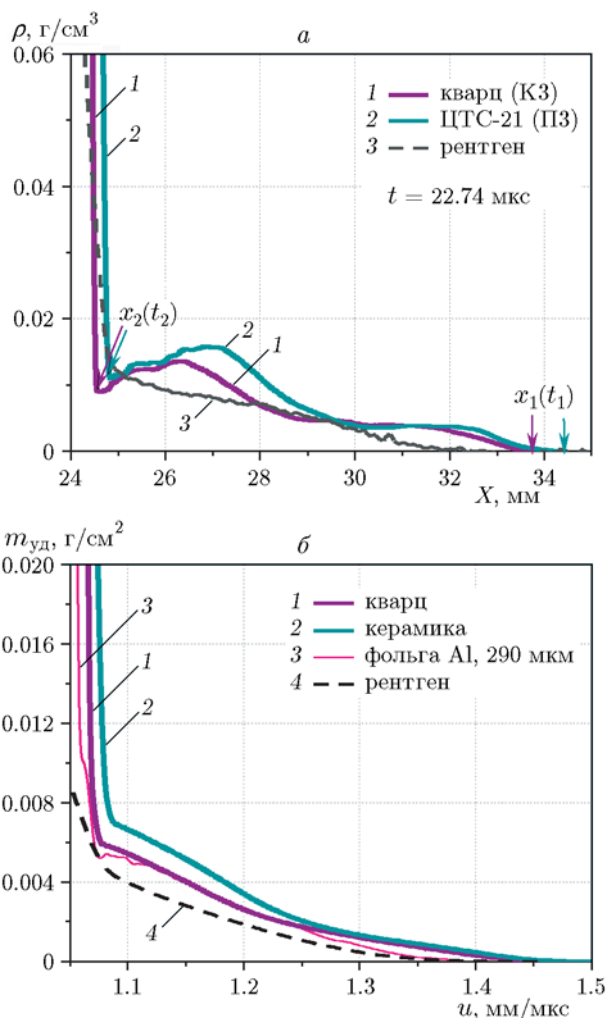


Рис. 5. Распределение плотности в зависимости от координаты (а) и распределение удельной массы в зависимости от скорости потока (б), полученные с использованием пьезодатчиков, рентгенографии и индикаторной фольги с датчиком PDV

ности потока вещества перед свободной поверхностью вдоль оси, в направлении движения образца, измеренные с помощью рентгенографической методики в момент времени  $t = 22.74$  мкс относительно выхода ударной волны на поверхность образца. Здесь же приведены распределения плотности в зависимости от координаты, полученные для момента рентгенографирования с использованием формулы (10) и зарегистрированных пьезодатчиками профилей давления  $p(t)$ . На рис. 5,б показаны результаты определения удельной массы в зависимости от скорости потока, вычисленные с использованием данных пьезодатчиков, рентгенографии и датчиков PDV.

Зависимости на рис. 5 демонстрируют согласие результатов измерений плотности и удельной массы пылевых потоков, выполненных по пьезоэлектрической и рентгенографической методикам, а также при помощи датчиков PDV, прикрытых индикаторными фольгами, в пределах точности указанных методик.

### 2.3. Опыт с использованием пьезодатчиков и протонографии

В опыте образец из свинца марки С1 нагружали ударной волной, давление в которой при выходе на свободную поверхность образца равнялось  $\approx 40$  ГПа. Свободная поверхность образца имела шероховатость  $2a_0/\lambda = 45/300$  мкм. В пространстве между образцом и датчиками остаточное давление воздуха составляло 0.14 атм. Опыт проводили на протонном ускорителе У-70 (ИФВЭ, г. Протвино). Пьезодатчики устанавливали на расстоянии 75 мм от образца.

На рис. 6,а представлены распределения плотности вдоль оси в направлении движения образца, измеренные с помощью протонографической методики через 19.01 мкс после выхода ударной волны из образца. Здесь же приведены распределения плотности по координате, полученные для момента съемки по формуле (10) и с использованием зарегистрированных пьезодатчиками зависимостей плотности налетающей на них пыли от времени.

На рис. 6,б показаны результаты измерения удельной массы методами пьезодатчиков и протонографии в зависимости от координаты, которые также согласуются между собой, что подтверждает правильность измерения плотности и массы потоков обоими методами.

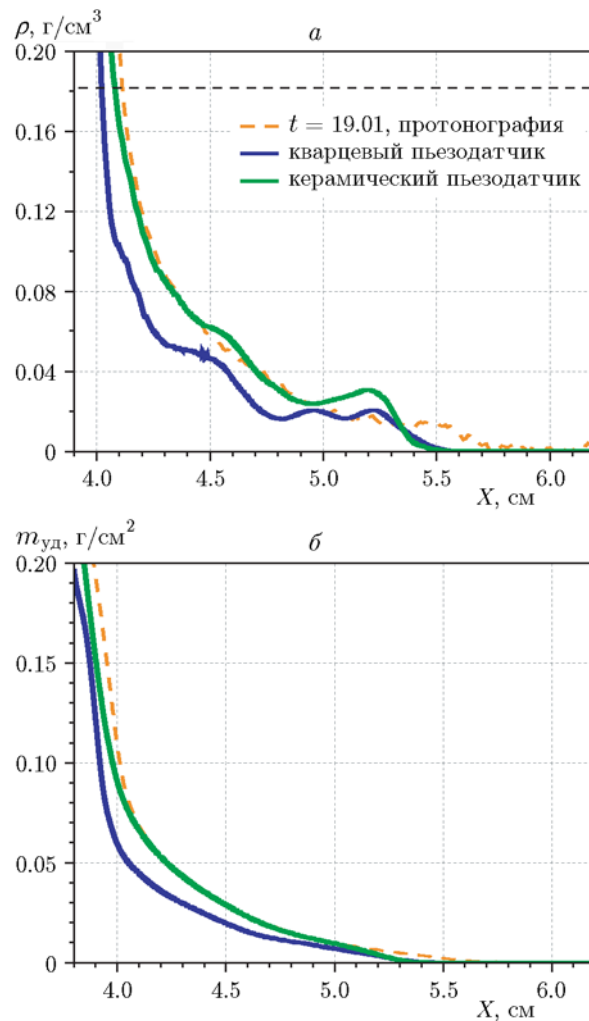


Рис. 6. Распределение плотности в зависимости от координаты (а) и распределение удельной массы в зависимости от скорости потока (б), полученные с использованием пьезодатчиков и протонографии

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод пьезоэлектрических датчиков позволяет измерять скорость, плотность и удельную массу высокоскоростных пылевых потоков, выбрасываемых со свободной поверхности образца при выходе на нее ударной волны, а получаемые результаты хорошо согласуются с измерениями, сделанными методами импульсной рентгенографии и протонографии, а также при помощи индикаторных фольг, движение которых измеряется датчиками PDV. Относительная погрешность измерения пьезодатчиками плотности и удельной массы потоков частиц не превышает  $\pm 11$  %.



Использование сегнетожестких пьезокерамических материалов, в частности ЦТС-21, позволяет в  $\approx 50$  раз увеличить чувствительность пьезодатчиков по сравнению с кварцевыми. Опыт совместного использования пьезокерамических и кварцевых датчиков, а также сопоставление данных с результатами рентгенографирования показывает, что пьезокерамические (ЦТС-21) датчики сохраняют линейность чувствительности до  $\approx 500$  МПа. Это позволяет уменьшить размеры датчиков и использовать их в условиях сильных электромагнитных наводок. Следует отметить, что многие пьезокерамики проявляют существенную нелинейность чувствительности уже при давлении в несколько мегапаскалей [9, 12], что затрудняет их использование для измерения параметров пыления. Возможно, наблюдаемая линейность чувствительности ЦТС-21 связана с ее особенностями и малой, до  $\approx 20$  мкс, длительностью регистрируемых импульсов давления. Кварцевые датчики, по нашим данным, работоспособны до  $\approx 4$  ГПа, что согласуется с известными данными [10].

#### ЛИТЕРАТУРА

- Walsh J. M., Shreffler R. G., Willig F. J. Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions // J. Appl. Phys. — 1953. — V. 24. — P. 349.
- 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.
- Speight C. S., Harper L., Smeeton V. S. Piezoelectric probe for the detection of shock-induced spray and spall // Rev. Sci. Instrum. — 1989. — V. 60, N 12. — P. 3802–3808.
- Vogan W. S., Anderson W. W., et al. Piezoelectric characterization of ejecta from shocked tin surface // J. Appl. Phys. — 2005. — V. 98. — 113508.
- Chen Y., Hu H., Li Q., Wang R., Tang T. Experimental study of ejecta on lead surface at different loading rates and amplitudes // Shock Compression of Condensed Matter — 2011. — 2012. — P. 1003–1006. — (AIP Conf. Proc.; V. 1426).
- Михайлов А. Л., Огородников В. А., Сасик В. С., Раевский В. А., Лебедев А. И., Зотов Д. Е., Ерунов С. В., Сырунин М. А., Садунов В. Д., Невмержицкий Н. В., Лобастов С. А., Бурцев В. В., Мишанов А. В., Кулаков Е. В., Сатарова А. В., Георгиевская А. Б., Князев В. Н., Клещевников О. А., Антипов М. В., Глушихин В. В., Юртов И. В., Утенков А. А., Сеньковский Е. Д., Абакумов С. А., Пресняков Д. В., Калашник И. А., Панов К. Н., Аринин В. А., Ткаченко Б. И., Филяев В. Н., Чапаев А. В., Андраманов А. В., Лебедева М. О., Игонин В. В. Экспериментально-расчетное моделирование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности // ЖЭТФ. — 2014. — Т. 145, вып. 5. — С. 892.
- Огородников В. А., Михайлов А. Л., Сасик В. С., Ерунов С. В., Сырунин М. А., Федоров А. В., Невмержицкий Н. В., Кулаков Е. В., Клещевников О. А., Антипов М. В., Юртов И. В., Руднев А. В., Чапаев А. В., Пупков А. С., Сеньковский Е. Д., Сотсков Е. А., Глушихин В. В., Калашник И. А., Финюшин С. А., Чудаков Е. А., Калашников Д. А. Влияние газа на процесс выброса частиц со свободной поверхности образца при выходе на нее ударной волны различной интенсивности // ЖЭТФ. — 2016. — Т. 150, вып. 2. — С. 411.
- Антипов М. В., Георгиевская А. Б., Игонин В. В., Князев В. Н., Лебедев А. И., Лебедева М. О., Панов К. Н., Раевский В. А., Садунов В. Д., Утенков А. А., Юртов И. В. Расчетное моделирование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности // XV Харитоновские научные тематические чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 666–673.
- Close J. A., Stevens R. Nonlinear piezoelectric metrology: coefficients and fatigue under impact // Ferroelectrics. — 1996. — V. 187. — P. 39–48.
- Graham R. A. Solids under High-Pressure Shock Compression: Mechanics, Physics and Chemistry. — New York: Springer-Verlag, 1992.
- Войтенко В. А., Кузнецов Л. И. Маятниковый метод тарирования пьезодатчиков // Приборы и техника эксперимента. — 1992. — № 4.
- Хохлов Н. П., Минеев В. Н., Иванов А. Г., Лучинин В. И. Динамический пьезомодуль керамики ЦТС-19 // Физика горения и взрыва. — 1978. — Т. 14, № 4. — С. 146–149.

Поступила в редакцию 30/1 2018 г.