

ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ

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

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

При выходе ударной волны на свободную поверхность образца конденсированного материала происходит выброс (эжекция) высокоскоростных микроструй и частиц. Данное явление часто называют ударноволновым «пылением» [1, 2]. Образующиеся при этом пылевые потоки характеризуются большими скоростями – до нескольких км/с, малыми плотностями $\sim 0,1\text{--}100\text{ мг/см}^3$ и малыми размерами $\sim 10^{-5}\text{--}10^{-7}$ м выбрасываемых частиц.

Для изучения ударно-волнового «пыления» используются такие методы как: фотографический, рентгенографический, пьезоэлектрический, метод индикаторных фольг и лазерный-гетеродин-интерферометрический метод (PDV), голографический, метод рассеяния Ми. При изучении «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 измерять плотность, массу и скорость пылевых потоков и отличается относительной простотой и удобством применения. Первая публикация о применении пьезоэлектрического метода для исследования пыления была сделана в 1989 году [3], и затем этот метод активно использовался разными исследователями [4–9].

В настоящем докладе 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.

Основы пьезоэлектрического метода и конструкции пьезодатчиков

При установке пьезодатчика напротив пылящей поверхности, как показано на рис. 1, пылевой поток, ударяясь об экран датчика, возбуждает в нем давление, величина которого зависит от скорости и плотности потока.

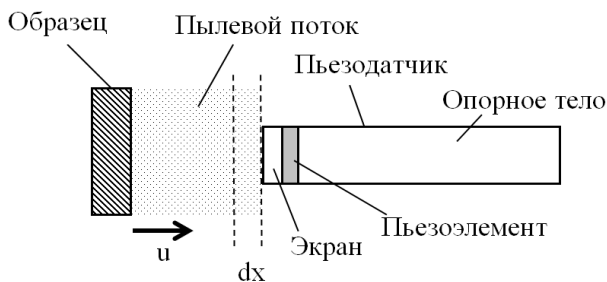


Рис. 1. Пьезодатчик и пылевой поток

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

- Частицы пылевого потока выбрасываются с СП одновременно;
- Скорости частиц в потоке постоянны;
- Движение частиц в потоке одномерно;
- Частицы взаимодействуют с экраном датчика неупруго;
- Пыль в потоке беспрельдно сжимаема.

При неупругом соударении с экраном датчика слоя пылевого потока, имеющего плотность $\rho(t)$, толщину $dx = u(t)dt$, площадь S и скорость $u(t)$, (см. рис. 1), он сообщает торцу датчика импульс dJ :

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

где dm – масса рассматриваемого слоя пылевого потока, равная $dm = \rho(t) \cdot S \cdot dx = \rho(t) \cdot S \cdot u(t) \cdot dt$.

За время t датчику передается импульс:

$$J(t) = \int_{T_1}^t \rho(t) u^2(t) S dt \quad (2)$$

где T_1 – время удара по датчику фронта пылевого потока.

При взаимодействии экрана датчика с пылевым потоком пьезоэлемент датчика удерживается в сжатом состоянии силой

$$F(t) = \frac{dJ(t)}{dt} = P(t) \cdot S \quad (3)$$

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

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

Из допущений 1 и 2 следует, что скорость удаляющихся от торца 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:

$$Q(t) = d_{ij} \cdot F(t) = d_{ij} \cdot S \cdot P(t) \quad (6)$$

где d_{ij} - пьезомодуль, соответствующий одноосному, аксиальному сжатию пьезоэлемента, для пьезокерамики $d_{ij} = d_{33}$ а для кварца X-среза $d_{ij} = d_{11}$.

Для дифференциального режима работы пьезодатчика величина заряда $Q(t)$ может быть также выражена в виде:

$$Q(t) = \int_{T_1}^t I(t) dt \quad (7)$$

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:

$$\rho(t) = \frac{P(t)}{u^2(t)} = \frac{t^2}{d_{ij} \cdot S \cdot h^2} \int_{T_1}^t I(t) dt \quad (8)$$

где S - активная поверхность пьезоэлемента, d_{ij} - пьезомодуль.

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

$$m_{y\partial}(t) = h \int_{T_1}^t \rho(t) \cdot t^{-1} dt \quad (9)$$

Из допущений 1, 2 и 3 следует, что движение пылевого потока автомодельно, что позволяет, рассчитать для произвольного момента времени t^* распределение плотности пыли в пространстве перед образцом, используя измеренную зависимость плот-

ности пылевого потока $\rho(t, x_\partial)$ налетающего на экран пьезодатчика (в сечении x_∂):

$$\rho(x, t^*) = \frac{t}{t^*} \rho(x_\partial, t) = \left[t = \frac{x_\partial}{x} \cdot t^* \right] = \frac{x_\partial}{x} \cdot \rho \left(x_\partial, t = \frac{x_\partial}{x} \cdot t^* \right) \quad (10)$$

Это соотношение можно использовать для сопоставления данных, получаемых методом пьезодатчиков с данными, получаемыми по рентгенографическому методу на фиксированный момент времени или по методу индикаторных фольг с использованием датчиков PDV.

Типичная конструкция используемых нами пьезодатчиков показана на рис. 2.



Рис. 2. Конструкция пьезодатчиков: 1 – экран, 2 – пьезоэлемент, 3 – опорное тело, 4 – изолятор, 5 – корпус, 6 – контакт

Основным элементом пьезодатчика является пьезоэлемент. Для защиты от разрушения из-за удара быстро летящих частиц перед пьезоэлементом устанавливают металлический 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. Корпус защищает элементы датчика от боковых ударов и от электромагнитных наводок, а также связывает передний электрод пьезоэлемента через экран с «землей» измерительной линии.

Нами используются два типа пьезоэлементов: из кварца (X-срез) и из сегнетожесткой пьезокерамики (ЦТС-21). Кварцевые датчики позволяют измерять давления до 4 ГПа [11], однако они имеют небольшую чувствительность ($d_{11} = 2,31$ 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 давлений до нескольких сотен МПа, что обычно достаточно для регистрации малоплотных пылевых потоков. При этом их чувствительность ($d_{33} = 96$ пКл/н) существенно больше кварцевых датчиков. Такие датчики использовали для надежной регистрации малоплотных потоков и для измерений в условиях сильных шумов. Обычно в опытах использовали оба типа пьезодатчиков.

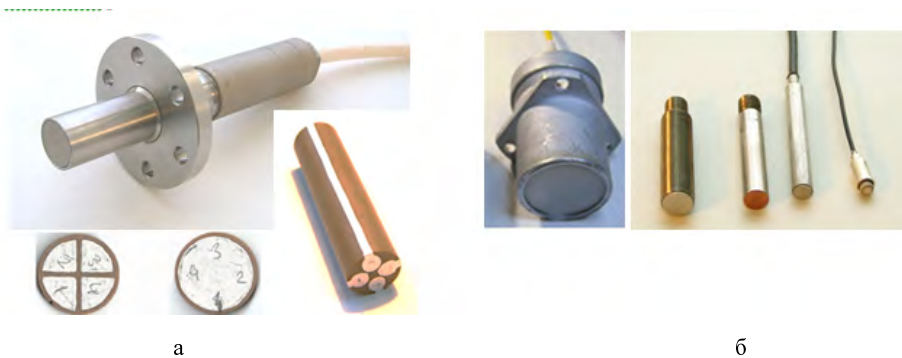


Рис. 3. Пьезодатчики для измерения параметров пылевых потоков: а – матричный пьезодатчик, его пьезоэлемент (Ø15 мм) и опорное тело; б – одноэлементные пьезодатчики с диаметром пьезоэлементов 20, 5, 4 и 2 мм

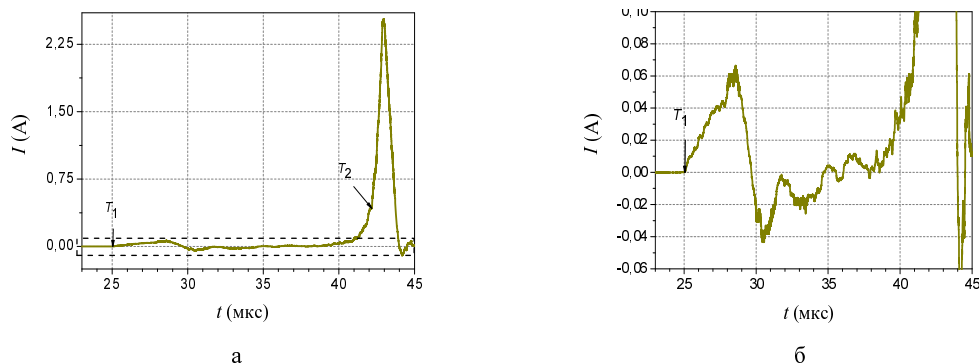


Рис. 4. Вид сигнала, генерируемого пьезодатчиком: а – под действием пылевого потока, б – увеличенная низкоамплитудная часть сигнала

Для проверки качества изготовления датчиков и определения их фактической чувствительности использовали метод копра. 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 давлений до ~50 МПа, которые подобны давлениям, оказываемым пылевыми потоками, и не разрушают датчики.

На рис. 3 показаны пьезодатчики, используемые для измерения параметров пыления. Используемые нами датчики имеют размер чувствительной зоны от Ø2 до Ø20 мм. Датчики с большими размерами имеют большую чувствительность и позволяют получать усредненную информацию о параметрах пылевых потоков. Датчики с малыми размерами чувствительной зоны соответственно имеют меньшую чувствительность, 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 предпочтительно использовать большие датчики, а миниатюрные датчики – в опытах с ограниченными размерами пылящей поверхности или для исследования локальных особенностей пыления.

В некоторых случаях использовали 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 используется 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 они подаются одновременно на несколько, обычно четыре, измерительных канала с разной чувствительностью, которая изменяется от канала к каналу в 10 раз. Данные, полученные на каналах с разной чувствительностью, «сшиваются» и затем обрабатываются при помощи приведенных выше формул.

Для проведения обработки сигналов начало временной шкалы должно приводиться к моменту выхода ударной волны на свободную поверхность образца. Этот момент определяется либо непосредственным измерением с использованием датчиков, устанавливаемых на образце, или бесконтактными датчиками PDV, либо косвенно: по регистрации сигнала, вырабатываемого при срабатывании подрывной установки, с учетом времен пробега сигналов по кабельным линиям и времени работы взрывной сборки.

Пример сигнала, генерируемого пьезодатчиком, показан на рис. 4.

Следует отметить, что формы сигналов, генерируемых пьезодатчиками, соответствуют форме производной от давления, действующего на датчики dP/dt . Поэтому моменты прихода фронта (T_1) или удара образца о датчики (T_2) более четко определяются по сигналам, в то время как при рассмотрении только полученных после обработки сигналов зависимостей давления, плотности или удельной массы от времени, выбор времен T_1 или T_2 не всегда очевиден.

Некоторые применения пьезодатчиков для исследования пыления

Пьезодатчики на разных расстояниях от образца

На рис. 5 представлены результаты опыта, в котором два кварцевых пьезодатчика $\varnothing 20$ мм устанавливали на разных (41 мм и 61 мм) расстояниях от образца. Опыт проводили в вакууме (0,02 атм.), образец представлял собой алюминиевую пластину (АМг6) с шероховатостью поверхности $Rz\ 150$, нагружавшуюся плоской ударной волной с давлением ~ 15 ГПа.

На рис. 5 графики 1 и 2 показывают распределение плотности потока от времени, зарегистрированное датчиками в сечениях потока 41 и 61 мм, соответственно. График 3, являющийся результатом расчета плотности потока $\rho(x_{д2}, t)_{расч}$ по данным пер-

вого датчика для базы 61 мм, соответствующей месту установки второго датчика, практически совпадает с результатами выполненных с его помощью измерений. Данный опыт демонстрирует справедливость предположения об автомодельности пылевых потоков в вакууме.

Опыт с использованием пьезодатчиков, рентгена и датчиков PDV

В опыте проводили нагружение плоской ударной волной образца из свинца марки С1, свободная поверхность которого имела шероховатость $2a_0/\lambda = 10/60$ мкм, где $2a_0$ и λ – амплитуда и длина неровностей. Давление выходящей из образца ударной волны было равно 17,5 ГПа. В пространстве между образцом и датчиками имелось остаточное давление воздуха 0,1 атм.

В опыте проводили измерения 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 (из кварцевых и пьезокерамических). Пьезодатчики устанавливали на расстоянии 40 мм от образца, а датчики PDV на расстоянии 42 мм. Момент выхода ударной волны на поверхность образца определяли с помощью открытых датчиков PDV.

На рис. 6 приведены рентгенограмма, спектро-

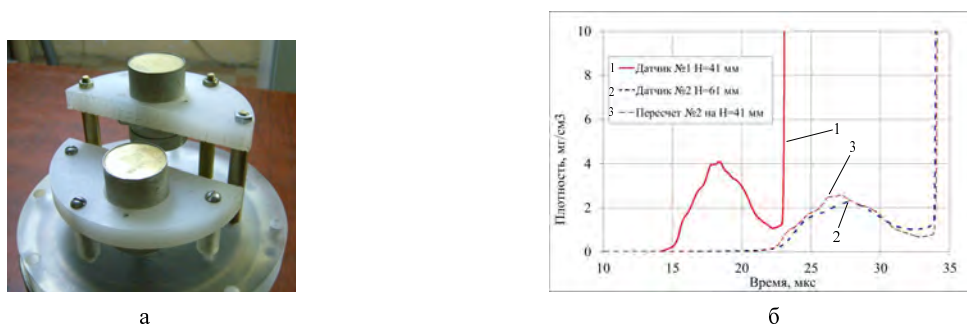


Рис. 5. Установка пьезодатчиков на различных базах: а – способ установки, б – результаты измерений плотности потока частиц, а также результаты пересчета распределения плотности

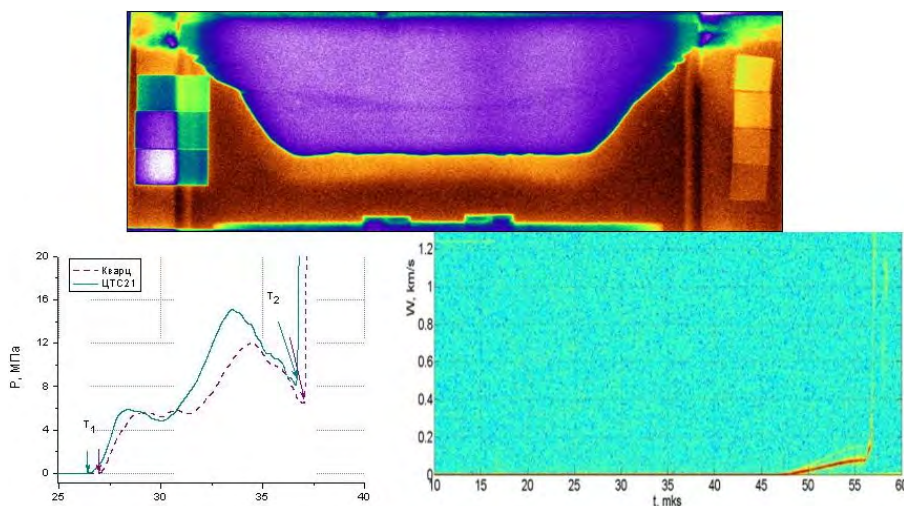


Рис. 6. Рентгенограмма в псевдо цветах, профили давления, зарегистрированные пьезодатчиками, и спектрограмма датчика PDV, прикрытого алюминиевой индикаторной фольгой толщиной 290 мкм

грамма датчиков PDV и профили давления, зарегистрированные пьезодатчиками.

На рис. 7а показаны распределения плотности вдоль оси, в направлении движения образца, измеренные с помощью рентгенографической методики на момент времени $t = 22,74$ мкс относительно выхода ударной волны на поверхность образца. Здесь же приведены распределения плотности от координаты, полученные для момента рентгенографирования с использованием формулы (10) и зарегистрированных пьезодатчиками зависимостей плотности налетающей на них пыли от времени. На рис. 7б показаны результаты измерений удельной массы в зависимости от скорости потока, полученные с использованием пьезодатчиков, рентгенографии и датчиков PDV.

Приведённые на рис. 7 зависимости демонстрируют согласие результатов измерений плотности и удельной массы пылевых потоков, получаемых пьезоэлектрической и рентгенографической методиками, а также при помощи PDV датчиков, прикрытых индикаторными фольгами в пределах точности указанных методик.

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 ~ 40 ГПа [12]. Свободная поверхность образца имела шероховатость $A_{0,\lambda} = 45/300$ мкм. В пространстве между образцом и датчиками имелось остаточное давление воздуха 0,14 атм. Опыт проводили на протонном ускорителе У-70 (г. Протвино). Пьезодатчики устанавливали на расстоянии 75 мм от образца.

На рис. 8а показаны распределения плотности вдоль оси, направленной в направлении движения образца, измеренные с помощью протонографической методики через 19,01 мкс после выхода ударной волны из образца. Здесь же приведены распределения плотности от координаты, полученные для момента съёмки с использованием формулы (10) и зарегистрированных пьезодатчиками зависимостей плотности налетающей на них пыли от времени.

На рис. 8б показаны результаты измерений удельной массы в зависимости от координаты, полученные с использованием пьезодатчиков и протонографии, которые также согласуются, что подтверждает правильность измерений плотности и массы потоков по обоим методам.

Заключение

Метод пьезоэлектрических датчиков позволяет измерять скорость, плотность и удельную массу вы-

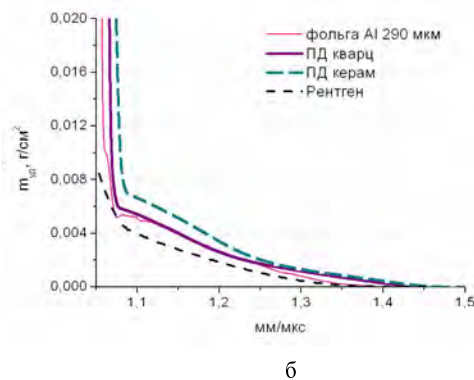
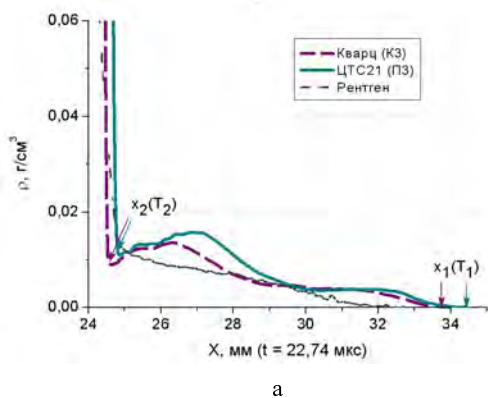


Рис. 7. Результаты измерений, полученные с использованием пьезодатчиков, рентгенографии и индикаторной фольги с датчиком PDV: а – распределение плотности от координаты, б – а – распределение удельной массы в зависимости от скорости потока

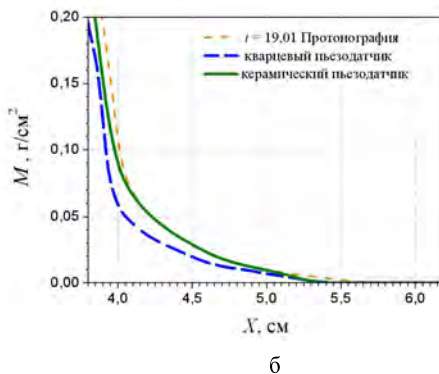
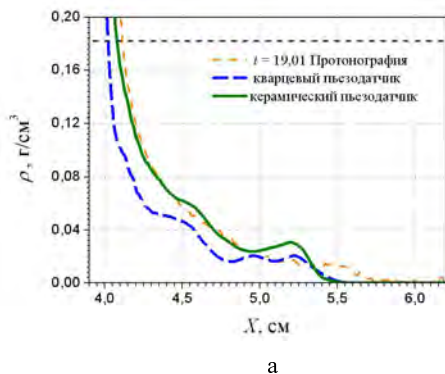


Рис. 8. Результаты измерений, полученные с использованием пьезодатчиков и протонографии: а – распределение плотности потока пыли от координаты, б – распределение удельной массы в зависимости от скорости потока

сокоскоростных пылевых потоков, выбрасываемых из свободных поверхностей, а получаемые результаты хорошо согласуются с измерениями, сделанными с использованием рентгена и протонографии, а также при помощи индикаторных фольг, движение которых измеряется датчиками PDV. Относительная погрешность измерения плотности и удельной массы потоков частиц при использовании пьезодатчиков не превышает $\pm 11\%$.

Использование сегнетожестких пьезокерамических материалов, в частности ЦТС 21, позволяет в ~ 50 раз увеличить чувствительность пьезодатчиков по сравнению с кварцевыми. Опыт совместного использования пьезокерамических и кварцевых датчиков, а также сопоставление данных с рентгеном показывает, что пьезокерамические (ЦТС-21) датчики сохраняют линейность чувствительностей до ~ 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 давлениях в несколько МПа [9, 10], что затрудняет их использование для измерения параметров пыления. Возможно, наблюдаемая линейность чувствительности ЦТС-21 связана с ее особенностями и короткими, до ~ 20 мкс, длительностями регистрируемых импульсов давления. Кварцевые датчики, по нашим данным, работоспособны до ~ 4 ГПа, что согласуется с известными данными [11].

Представленные в докладе данные получены в постановках опытов с плоским ударно-волновым нагружением при однородной шероховатости поверхности образцов. В более сложных постановках опытов данные, полученные разными пьезодатчиками, и, например, рентгенографией могут заметно различаться. Это связано с локальностью измерений, проводимых пьезодатчиками. Также измерения, проводимые при помощи пьезодатчиков, желательно совмещать с визуальными методиками, что позволяет правильно интерпретировать получаемые данные при сложном характере исследуемого процесса.

Литература

1. Walsh J. M., Shreffler R. G. and Willing F. J. *J. Appl. Phys.* 1953. 24, 349.

2 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 // *ФГВ*. Т. 34, 1998. № 6, с. 103–107.

3 Speight C. S., Harper L., Smeeton V. S. Piezoelectric probe for the detection of shock-induced spray and spall // *Rev. Sci. Instr.* 1989. 60 (12), 3802–3808.

4 Vogan W. S., Anderson W. W. et al. Piezoelectric characterization of ejecta from shocked tin surface // *J. Appl. Phys.* 2005. 98, 113508.

5 Yongtao Chen, Haibo Hu, Qingzhong Li, Rongbo Wang, Tiegang Tang Experimental study of ejecta on lead surface at different loading rates and amplitudes. *Shock Compression of Condensed Matter – 2011*, AIP Conf. Proc. 1426, 1003–1006 (2012).

6 Михайлов А. Л., Огородников В. А., Сасик В. С. и др. // *ЖЭТФ*, 2014. 145, 5.

7 Огородников В. А., Михайлов А. Л., Сасик В. С. и др. // *ЖЭТФ*, 2016. 149, 6.

8 Антипов М. В., Георгиевская А. Б., Игонин В. В. и др. Труды XV международной конференции Харитоновские научно-тематические чтения, 666, Саров, 2013 г.

9 Close J. A. and professor R Stevens. Nonlinear piezoelectric metrology: coefficients and fatigue under impact // *Ferroelectrics*. 1996. Vol. 187. P.39–48.

10 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.

11 Graham R. A. *Solids under high-pressure shock compression: mechanics, physics and chemistry* // Springer-Verlag, New York, 1992.

12 Антипов М. В., Аринин В. А., Георгиевская А. Б., Гнутов И. С., Замыслов Д. Н., Калашников Д. А., Лебедева М. О., Лебедев А. И., Огородников В. А., Панов К. Н., Пупков А. С., Раевский В. А., Соколова А. С., Сырунин М. А., Ткаченко Б. И., Утенков А. А., Федоров А. В., Финюшин С. А., Чудаков Е. А., Юртов И. В. Результаты экспериментально-расчетных исследований ударно-волнового «пыления» и фрагментации свинца, нагруженного нестационарными ударными волнами амплитудами $p \sim 32\text{--}43$ ГПа. Доклад на XVII Харитоновских чтениях, Саров, 2017 г.