

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 -ВНИИЭФ, Саров, Россия

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 $\sim 0,1-100$ мг/см³ и малыми размерами $\sim 10^{-5} - 10^{-7}$ 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.

II. Основы пьезоэлектрического метода и конструкции пьезодатчиков

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

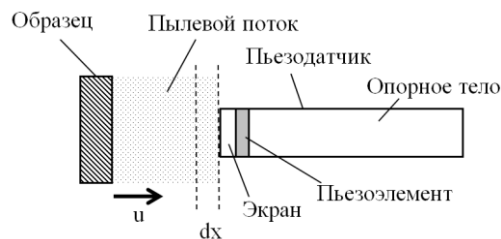


Рисунок 1. Пьезодатчик и пылевой поток

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

1. Частицы пылевого потока выбрасываются с СП 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 с экраном датчика слоя пылевого потока, имеющего плотность $\rho(t)$, толщину $dx = u(t)dt$, площадь S и скорость $u(t)$, (см.рисунок 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:

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

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:

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

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 :

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

Из допущений 1, 2 и 3 следует, что движение пылевого потока автотельно, что позволяет, рассчитать для произвольного момента времени t^* распределение плотности пыли в пространстве

перед образцом, используя измеренную зависимость плотности пылевого потока $\rho(t, x_0)$ налетающего на экран пьезодатчика (в сечении x_0):

$$\rho(x, t^*) = \frac{t}{t^*} \rho(x_0, t) = \left[t = \frac{x_0}{x} \cdot t^* \right] = \frac{x_0}{x} \cdot \rho(x_0, t = \frac{x_0}{x} \cdot t^*) \quad (10)$$

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 рисунке 2.

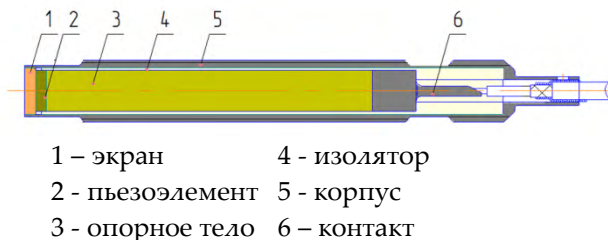


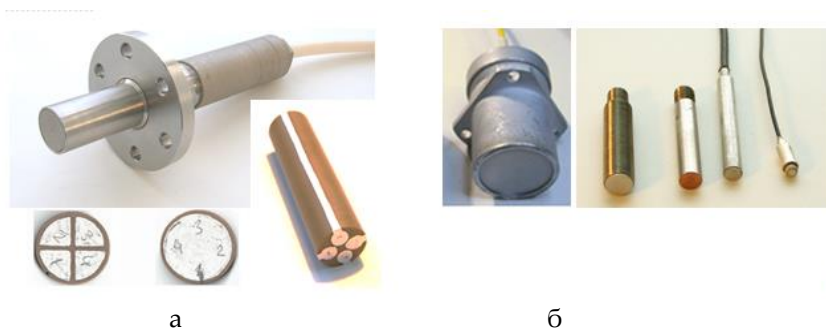
Рисунок 2. Конструкция пьезодатчиков

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.

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 рисунке 3 показаны пьезодатчики, используемые для измерения параметров пыления. Используемые нами датчики имеют размер чувствительной зоны от $\varnothing 2$ до $\varnothing 20$ 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.



а – матричный пьезодатчик, его пьезоэлемент ($\varnothing 15$ мм) и опорное тело;
б – одноэлементные пьезодатчики с диаметром пьезоэлементов 20, 5, 4 и 2 мм.

Рисунок 3. Пьезодатчики для измерения параметров пылевых потоков

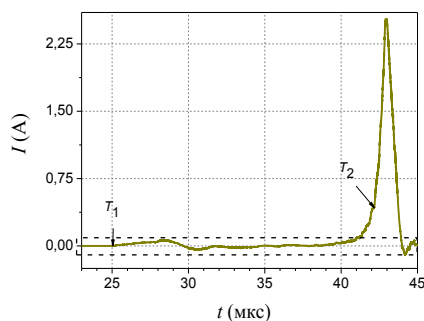
Поэтому в опытах по исследованию пыления в одномерной постановке предпочтительно использовать большие датчики, а миниатюрные датчики – в опытах с ограниченными размерами пылящей поверхности или для исследования локальных особенностей пыления.

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.

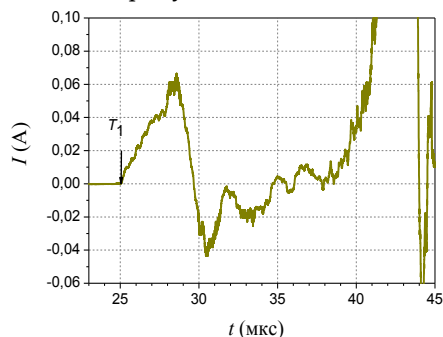
Сигналы от пьезодатчиков передаются к цифровым осциллографам по радиочастотным кабельным линиям, которые согласуются со стороны осциллографа. Обычно используется кабель типа РК-75. Уровень сигналов может изменяться от десятков милливольт до сотен вольт, что связано с соответствующими изменениями плотности 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 рисунке 4.



а



б

Рисунок 4. Вид сигнала, генерируемого пьезодатчиком под действием пылевого потока (а) и увеличенная низкоамплитудная часть сигнала (б)

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.

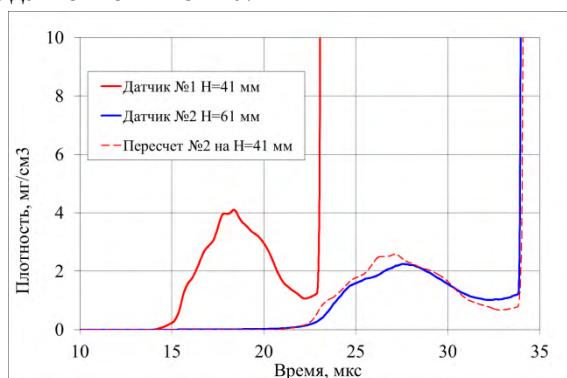
III. Некоторые применения пьезодатчиков для исследования пыления

3.1 Пьезодатчики на разных расстояниях от образца

На рисунке 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.



а



б

Рисунок 5. Способ установки пьезодатчиков (а), результаты измерений плотности потока частиц, а также результаты пересчета распределения плотности (б)

На рисунке 5 красная и синяя сплошные линии показывают распределение плотности потока от времени, зарегистрированное датчиками в сечениях потока 41 и 61 мм. Красная прерывистая линия, являющаяся результатом расчета плотности потока $\rho(x_{d2}, t)_{\text{расч}}$ по данным первого 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.

3.2 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 (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 рисунке 6 приведены рентенограмма, спектрограмма датчиков PDV и профили давления, зарегистрированные пьезодатчиками.

На рисунке 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 рисунке 7б показаны результаты измерений удельной массы в зависимости от скорости потока, полученные с использованием пьезодатчиков, рентгенографии и датчиков PDV.

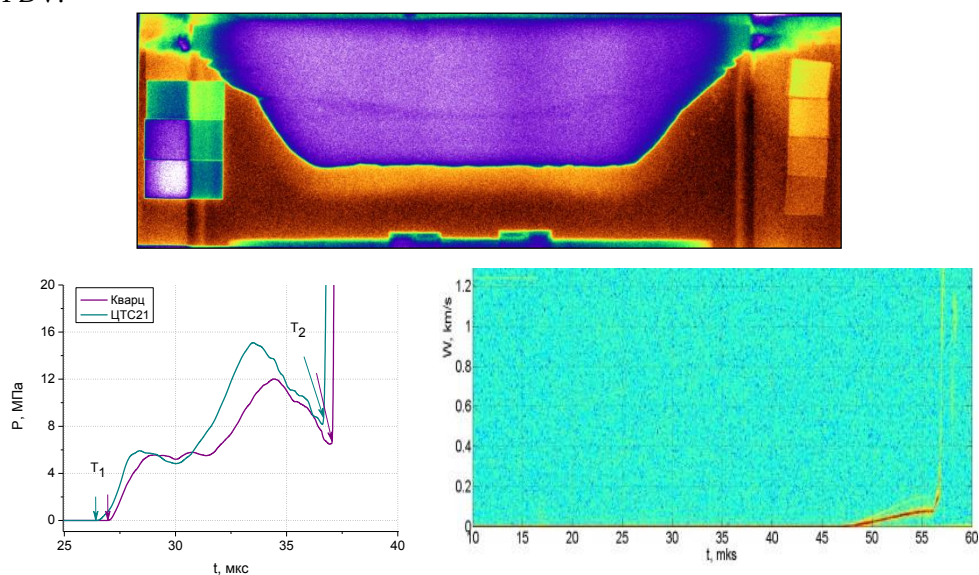


Рисунок 6. Рентгенограмма в псевдо цветах, профили давления, зарегистрированные пьезодатчиками, и спектрограмма датчика PDV, прикрытого алюминиевой индикаторной фольгой толщиной 290 мкм

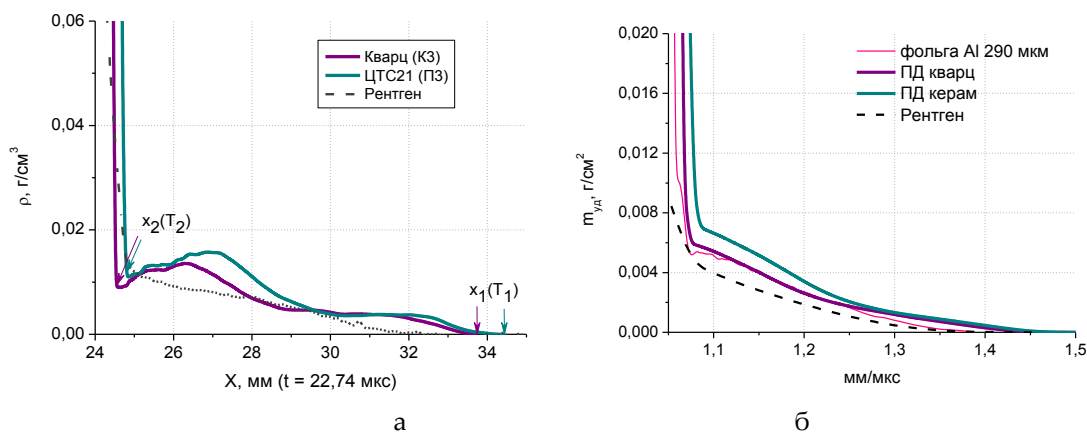


Рисунок 7. Результаты измерений распределения плотности от координаты (а) и удельной массы в зависимости от скорости потока, полученные с использованием пьезодатчиков, рентгенографии и индикаторной фольги с датчиком PDV

Приведённые на рисунке 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.

3.3 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 ~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 рисунке 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 съемки с использованием формулы (10) и зарегистрированных пьезодатчиками зависимостей плотности налетающей на них пыли от времени.

На рисунке 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.

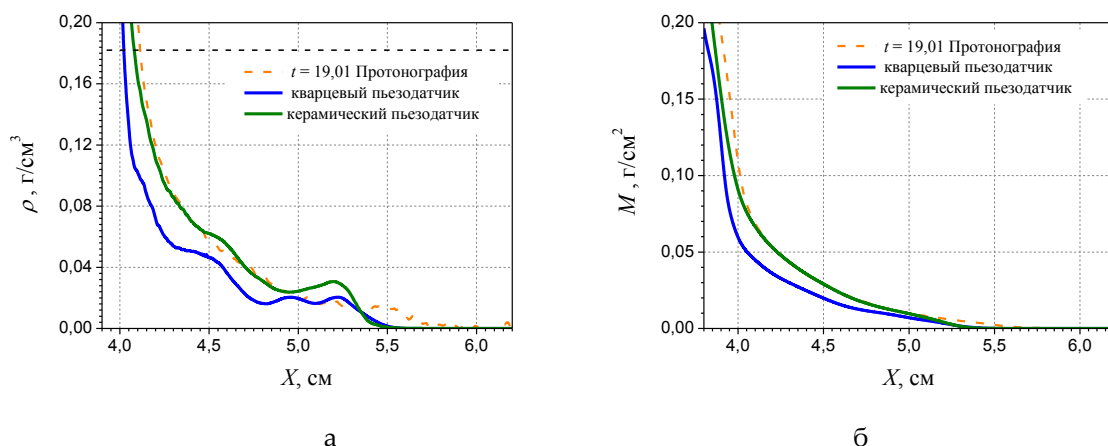


Рисунок 8. Распределение плотности от координаты (а) и удельной массы в зависимости от скорости потока (б), полученные с использованием пьезодатчиков и протонографии

IV. Заключение

Метод пьезоэлектрических датчиков позволяет измерять скорость, плотность и удельную массу высокоскоростных 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.

Список литературы

1. J.M.Walsh, R.G.Shreffler and F.J.Willing , J.Appl. Phys. 24, 349 (1953).
2. В.А.Огородников., А.Г.Иванов, А.Л.Михайлов, Н.И.Крюков, А.П.Толочко, В.А.Голубев. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц. ФГВ. Т.34, №6, с.103-107. 1998.
3. C.S.Speight, L.Harper,V.S.Smeeton. Piezoelectric probe for the detection of shock-induced spray and spall. Rev. Sci. Instr. 60 (12), 3802-3808, 1989.
4. W.S.Vogan, W.W.Anderson et al. Piezoelectric characterization of ejecta from shocked tin surface. J Appl. Phys., 98, 113508, 2005.
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. А.Л. Михайлов, В.А. Огородников, В.С. Сасик и др. ЖЭТФ, 145, 5 (2014).
7. В.А. Огородников, А.Л. Михайлов, В.С. Сасик и др. ЖЭТФ, 149, 6 (2016).
8. М.В. Антипов, А.Б. Георгиевская, В.В. Игонин и др. Труды XV международной конференции Харитоновские научно-тематические чтения, 666, Саров (2013).
9. J.A.Close and Professor R Stevens, Nonlinear piezoelectric metrology: coefficients and fatigue under impact// Ferroelectrics. vol. 187. pp.39-48. (1996).
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. R.A.Graham Solids under high-pressure shock compression: mechanics, physics and chemistry//Springer-Verlag, Nev York, 1992.
12. М.В.Антипов, В.А.Аринин, А.Б.Георгиевская, И.С.Гнутов, Д.Н.Замыслов, Д.А.Калашников, М.О.Лебедева, А.И.Лебедев, В.А.Огородников, К.Н.Панов, А.С.Пупков, В.А.Раевский, А.С.Соколова, М.А.Сырунин, Б.И.Ткаченко, А.А.Утенков, А.В.Федоров, С.А.Финюшин, Е.А.Чудаков, И.В.Юртов Результаты экспериментально-расчетных исследований ударно-волнового “пыления” и фрагментации свинца, нагруженного нестационарными ударными волнами амплитудами $p \sim 32 \div 43$ ГПа. Доклад на XVII Харитоновских чтениях, Саров, 2017 г.

ПРОТОННАЯ МАГНИТОГРАФИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ – ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

В. А. Аринин, Ю. М. Куропаткин, О. В. Орешков, С. В. Потапов, Б. И. Ткаченко

РФЯЦ – ВНИИФ, Саров, Россия

Введение

Наличие заряда и высокая проникающая способность протонов высоких энергий делают возможным не только исследовать динамические объекты как таковые, но и одновременно наблюдать векторную картину их магнитного поля. Магнитная оптика, компенсирующая множественное кулоновское рассеяние протонов и обеспечивающая высокое пространственное