

# МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА, МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ TEST TECHNIQUES, SIMULATIONS OF DYNAMICAL PROCESSES

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТАНОВКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ОПЫТОВ ПО ПЫЛЕНИЮ

*В.Н. Смирнов, М.Ю. Столбиков, А.Н. Власов, Д.А. Железкин,  
В.А. Пашенцев, К.В. Халдин, В.В. Зырянов*

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия

### Введение

Импульсная радиография – одна из методик исследования пыления. Ей свойственна наглядность получаемого результата и возможность регистрировать структуру и среднюю плотность облака в направлении луча и положение свободной поверхности исследуемого образца. Рентгенодиагностика пыления осуществляется в условиях взаимодействия излучения с веществом при энергии фотонов до 500 кэВ (область фотоэффекта), что обусловлено малой плотностью пылевого облака ( $\leq 0,1$  г/см<sup>3</sup>). Для жестких  $\gamma$ -квантов ( $> 0,1$  МэВ) облако представляется прозрачным (белым). Для мягких квантов ( $< 0,1$  МэВ) облако становится полупрозрачным (серым) и пригодным для диагностики.

Необходимо подобрать источник излучения, материал и толщину экранов таким образом, чтобы ослабление излучения в экранах было минимальным и максимальное затухание происходило в малоплотном пылевом облаке.

В докладе приведены результаты рентгенодиагностики модельного облака. Моделью является клиновидный образец, выполненный из металла  $\rho=7,8...16,6$  г/см<sup>3</sup>,  $Z=26...82$ ,  $h<1,5$  мм. Толщина ступенек клина 20...280 мкм. Режим диагностики  $E_\gamma<0,5$  МэВ (в основном), а также в ряде случаев 3 МэВ и 3,8 МэВ. Импульсный генератор рентгеновского излучения ИГУР-3,5 обеспечивает граничную энергию излучения  $E_\gamma=0,5...3,8$  МэВ. Спектр-сплошной в интервале 0...  $E_\gamma$ . Наличие мягкой части спектра позволяет регистрировать малоплотные пылевые сгустки.

Материал листового взрывозащитного экрана – алюминий. Толщина экрана со стороны источника и со стороны регистратора одинаковая по 2 мм.

Диагностика осуществлялась экспериментально и расчетно методом Монте Карло (программа «Призма»).

Результаты затухания излучения представлены в зависимости от обобщенного параметра  $Z^k \rho h$ ,  $k$ -подгоночный параметр. Зависимость  $k(E)$  такая же, что и сечение взаимодействия фотонов с атомом  $\sigma(E)$ . Данное новшество обусловлено проявлением действия фотоэффекта.

Содержание доклада представляет научную новизну в следующих аспектах:

- представление затухания излучения в металлах в зависимости от комплексного параметра  $Z^k \rho h$ , что явилось откликом на режим фотоэффекта;
- демонстрация картины затухания в диапазоне толщин металлов, имитирующих пылевое облако (десятки и сотни мкм, что в 1000 раз меньше традиционной толщины).

### Расчетное исследование ослабления излучения в металлах

Спектр падающих на мишень электронов определялся из осциллограмм высоковольтных импульсов напряжения и тока через диод ускорительной трубки. Материал анодной иглы в диоде ускорительной трубке - тантал. Затем расчетным методом определялся спектр  $\gamma$ -излучения для энергии  $E_{\gamma} < 0,5$  МэВ (рисунок 1).

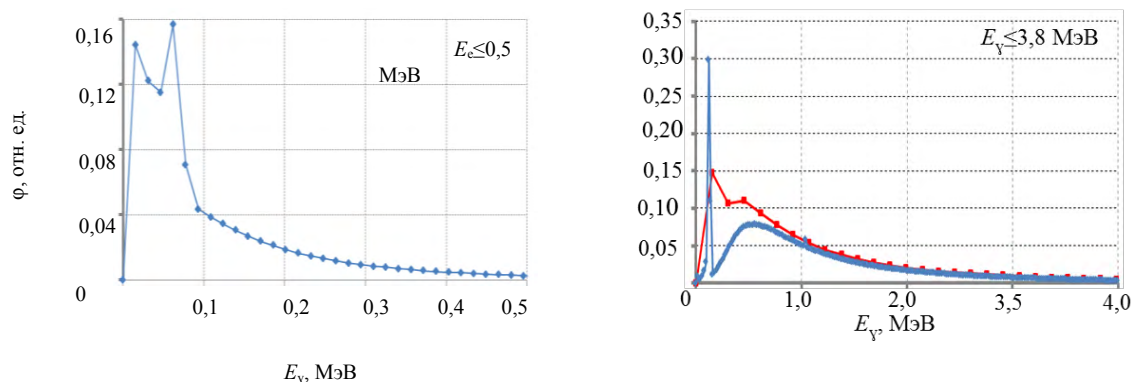


Рисунок 1. Спектр  $\gamma$ -излучения

Результаты расчетов ослабления излучения по спектру, полученному в предположении моноэнергетичных электронов с  $E_c = 0,5$  МэВ, практически не отличаются от результатов расчетов по спектру, приведенному на рисунке 1.

В расчете ослабления излучения использовалась схема, приведенная на рисунке 2. Взаимодействие фотонов с материалом регистратора в расчете не учитывалось.

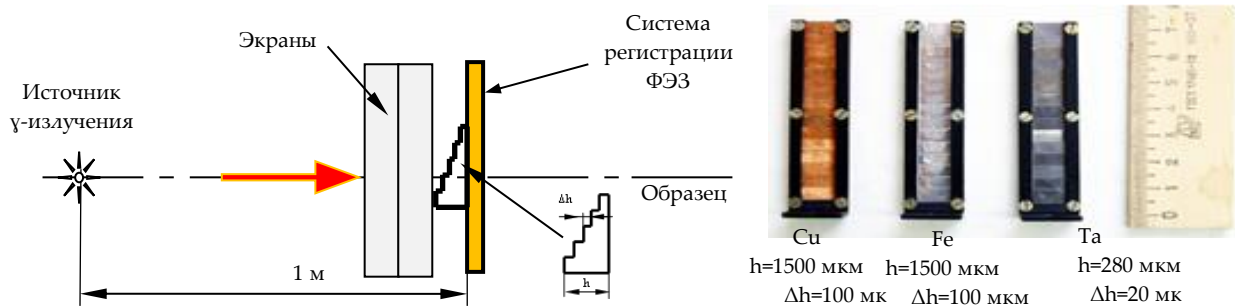


Рисунок 2. Расчетная схема

Процесс затухания излучения с  $E_{\gamma} < 0,5$  МэВ в металлических пленках следует из графиков рисунка 3.

Новым фактом является представление экспериментальных данных в форме зависимости  $N/N_0(Z^{3/2}\rho h)$  (рисунки 3в и 3г) вместо традиционной зависимости  $N/N_0(\rho h)$  (рисунки 3а и 3б), что обусловлено влиянием фотоэффекта.

Параметром чувствительности рентгеновского метода является модуль производной уменьшения интенсивности излучения  $N$  в веществе  $|dN/dx|$ . Принятые обозначения:  $h$  - толщина вещества,  $\rho$  - плотность вещества,  $Z$  - число электронов в атоме вещества,  $\chi = Z^{3/2}\rho h$ . Чем больше величина модуля, тем чувствительнее метод регистрации. Величины модулей определялись с помощью интерполяции кривых поглощения  $N/N_0 = f(\chi)$  полиномом второй степени.

Влияние материала защитных экранов на чувствительность рентгеновского метода диагностики для энергии фотонов  $E_{\gamma} < 0,5$  МэВ показано на рисунке 4а.

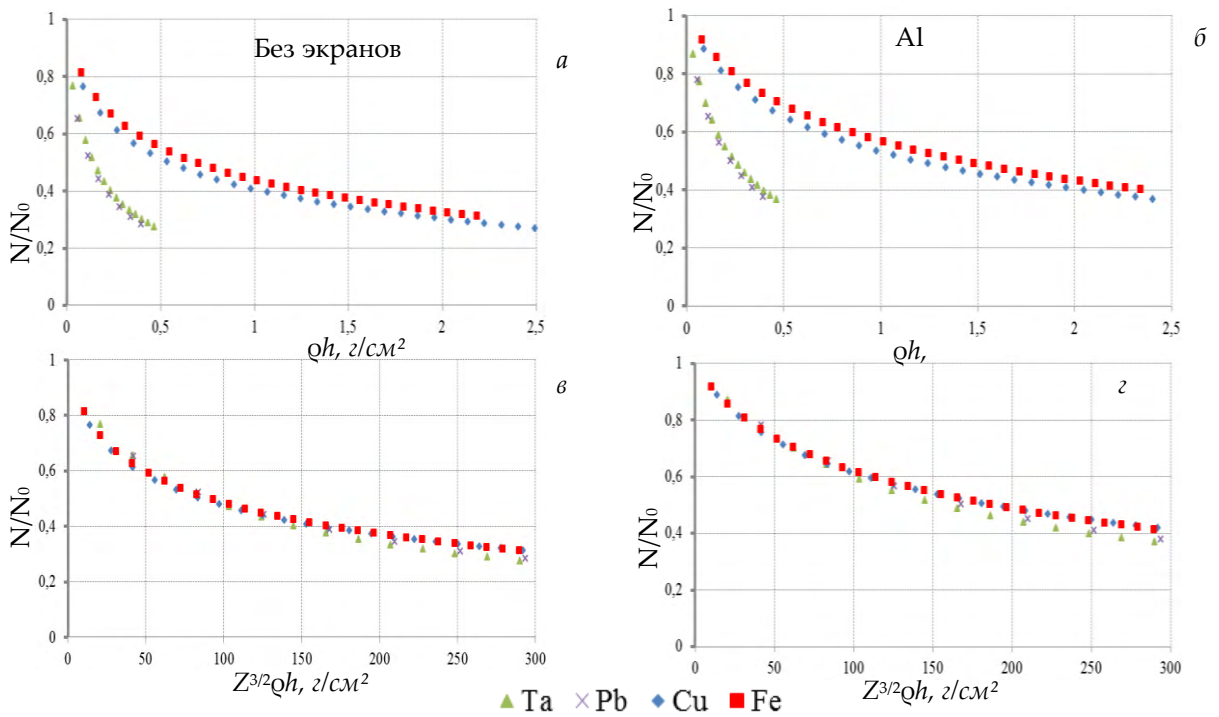


Рисунок 3. Расчетные кривые поглощения излучения  $E_\gamma < 0,5$  МэВ в металлах

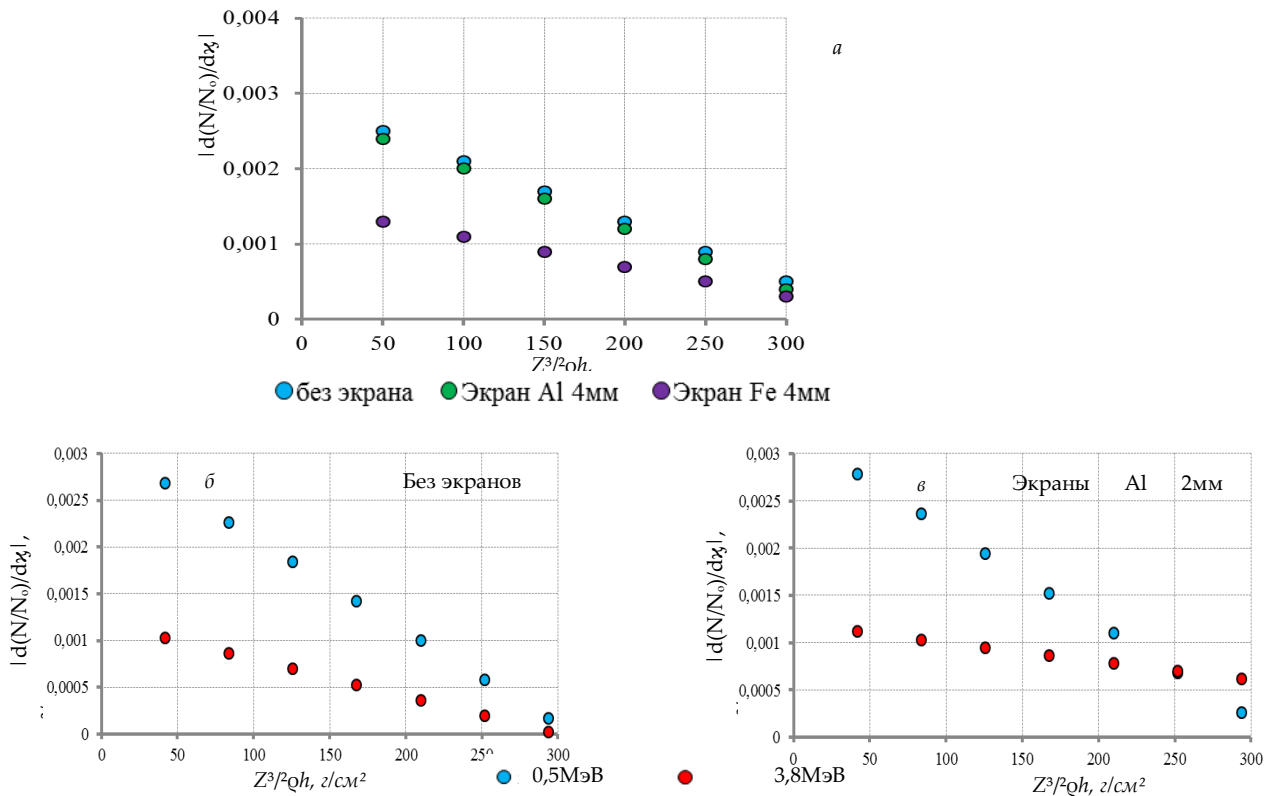


Рисунок 4. Расчетная зависимость модуля производной  $|d(N/N_0)/dx|$  от  $Z^{3/2}\rho h$

Защитный экран из алюминия толщиной 2 мм+2 мм не влияет на чувствительность рентгеновского метода. Расчет показал, что экран из бериллия той же толщины на эффективность регистрации пыления также не влияет. Данный эффект объясняется малым  $Z$  ( $Z_{Be}=4$ ,  $Z_{Al}=13$ ).

На рисунках 4б, 4в представлены расчетные величины модулей  $|d(N/N_0)/d\chi|$  без экранов и с экранами. В обоих вариантах чувствительность рентгеновского метода при энергии 0,5 МэВ выше, чем при энергии 3,8 МэВ. С увеличением толщины исследуемого образца различие в чувствительности сокращается. При  $Z^{3/2}\rho h \geq 250-300$  г/см<sup>2</sup> энергия излучения не влияет на чувствительность метода.

### Экспериментальное исследование ослабления излучения в металлах

Эксперименты проводились на рентгенографической установке ИГУР-3,5 [2].

Схема экспериментов по определению ослабления излучения в металлах при энергиях  $E_\gamma < 0,5$  МэВ и  $E_\gamma < 3,8$  МэВ приведена на рисунке 5.

На рисунке 6 приведены результаты ослабления излучения в металлах Cu, Fe, Ta, Pb  $E_\gamma < 0,5$  МэВ и  $E_\gamma < 3,8$  МэВ в зависимости от толщины  $h$  (мкм), лучевой массы  $\rho h$  (г/см<sup>2</sup>) и комплексной величины  $Z^{3/2}\rho h$  (г/см<sup>2</sup>) ( $Z$ ,  $\rho$ ,  $h$  – атомный номер, плотность и толщина клина) [1].

Исследуемые материалы составили две группы: 1) с малым  $Z=26$  и 29 (Fe, Cu) и 2) большим  $Z=73$  и 82 (Ta, Pb). Образовались две разновидности графиков как в зависимости от линейной толщины мишени  $h$  (рисунки 6а, б), так и от ее оптической толщины  $\rho h$  (рисунки 6в, г). Те же экспериментальные данные представлены в виде зависимости  $N/N_0(Z^{3/2}\rho h)$  (рисунки 6д, е) [1].

Представим результаты рисунка 6(д, е) в виде убывающих экспонент для  $E_\gamma < 0,5$  МэВ и  $E_\gamma < 3,8$  МэВ  $N=N_0(e)^{-\mu x}$ , где  $N_0=1$ ,  $N<1$ ,  $\chi=Z^{3/2}\rho h$  (г/см<sup>2</sup>),  $\mu=1/\chi_0$  (см<sup>2</sup>/г). Приращение аргумента  $\chi+d\chi$  дает изменение функции  $N-dN$ . Соответственно,  $dN=|N/N_0'| d\chi$ , где  $|N/N_0'|=N_0\mu(e)^{-\mu\chi}$  (см<sup>2</sup>/г) – модуль градиента, являющийся ключевым параметром данной задачи.

*Оценка минимальной диагностируемой толщины.* Проведем оценку минимальной толщины объекта для  $\chi=50$  и 200 г/см<sup>2</sup>, чувствительной для рентгенографии. Используем данные режима  $E_\gamma < 0,5$  МэВ (рисунок 6) как наиболее информативного. Из предшествующих рассуждений следует  $d\chi=dN/N/N_0'|$ , отсюда  $d(\rho h)=dN/(N/N_0')| Z^{3/2}$  и  $dh=dN/(|N/N_0'| Z^{3/2}\rho)$ . Примем величину  $dN=0,02$ , соответствующую относительной погрешности неравномерности поля излучения.

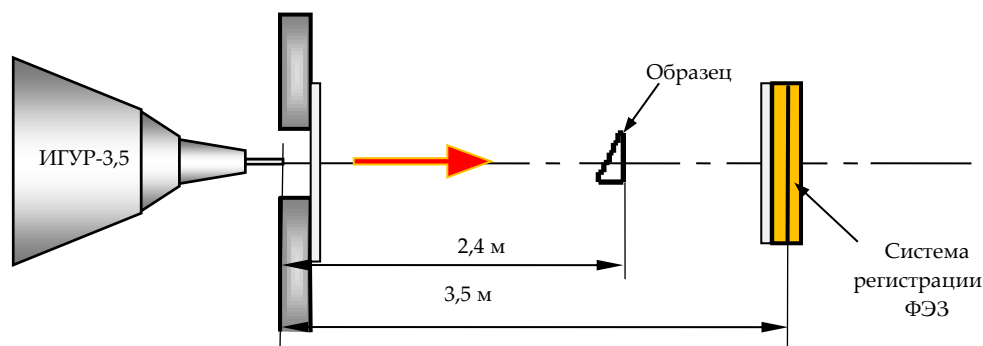
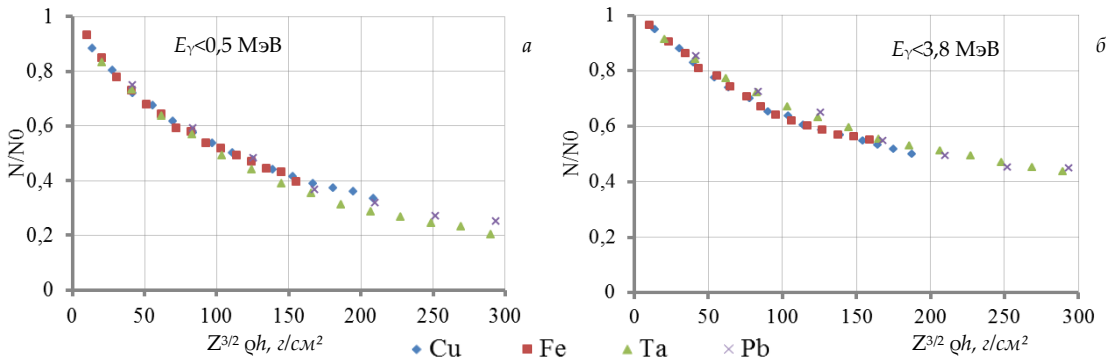


Рисунок 5. Схема экспериментов и фотография клиньев

Таблица 1. Значение минимальной диагностируемой толщины металла

$\chi$ (г/см <sup>2</sup> )	50	200
$d(\rho h)_{Cu}$ (мг/см <sup>2</sup> )	26	65
$d(\rho h)_{Pb}$ (мг/см <sup>2</sup> )	6	15
$d(h)_{Cu}$ (мкм)	29	73
$d(h)_{Pb}$ (мкм)	5	13

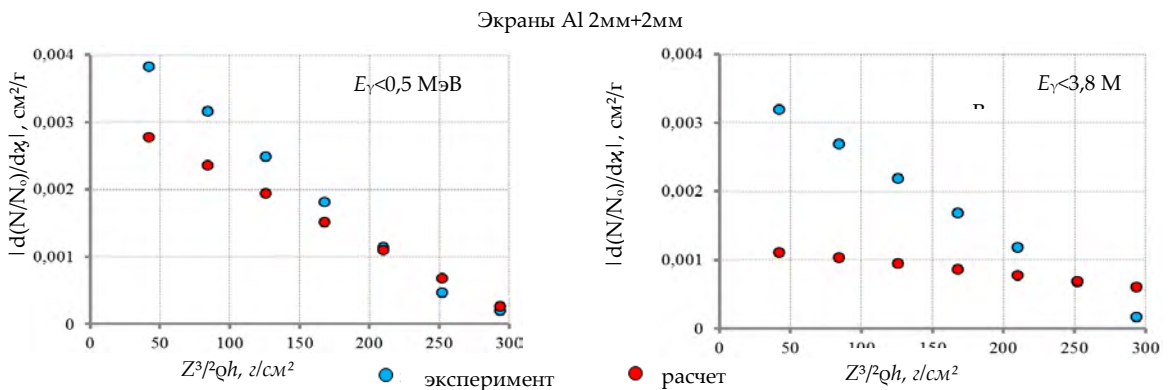


**Рисунок 6.** Экспериментальные результаты затухания излучения

На рисунке 7 приведены сравнительные величины модулей в эксперименте и расчете. В эксперименте величина модуля больше, чем в расчете. Для энергии фотонов  $E_\gamma < 0,5$  МэВ расхождение невелико. Заметно больше расхождение при энергии  $E_\gamma < 3,8$  МэВ.

При  $Z^{3/2}Qh \geq 250-300$  г/см<sup>2</sup> расчетная и экспериментальная чувствительности метода совпадают при энергиях  $E_\gamma < 0,5$  МэВ и  $E_\gamma < 3,8$  МэВ.

Расхождение результатов расчетов и эксперимента для энергии фотонов объясняется, тем, что в расчете не учитывалось влияние системы регистрации на ослабление. Также причиной несогласованности результатов могло быть влияние «мягкой» части расчетного спектра излучения, которая меньше, чем в реальном спектре.



**Рисунок 7.** Экспериментальные и расчетные модули  $|d(N/N_0)/dx|$

Для исследования эффективности режима рентгенографирования с  $E_\gamma < 0,5$  МэВ и  $E_\gamma < 3$  МэВ проведены взрывные эксперименты. Схема постановки экспериментов приведена на рисунке 5. Защита источника излучения и системы регистрации осуществлялась экранами из алюминия марки Д16 плотностью 2,7 г/см<sup>3</sup> толщиной 2мм+2 мм.

В качестве материала исследуемых образцов выбран свинец. На рисунке 8 представлена схема экспериментальной сборки. Сборка состояла из образца в виде пластины, заряда взрывчатого состава на основе ТЭНа (длина×ширина×высота=40 мм×40 мм×12 мм) и электродетонатора Д-22.

Рентгенограммы экспериментов по регистрации пыления свинцовых образцов приведены на рисунке 9. Поверхность образцов имела две различные чистоты обработки Rz 40 и Rz 200. Выброс свинцовой пыли с поверхности Rz 40 составил 3 мг/см<sup>2</sup>, с поверхности Rz 200 – 25,5 мг/см<sup>2</sup>.

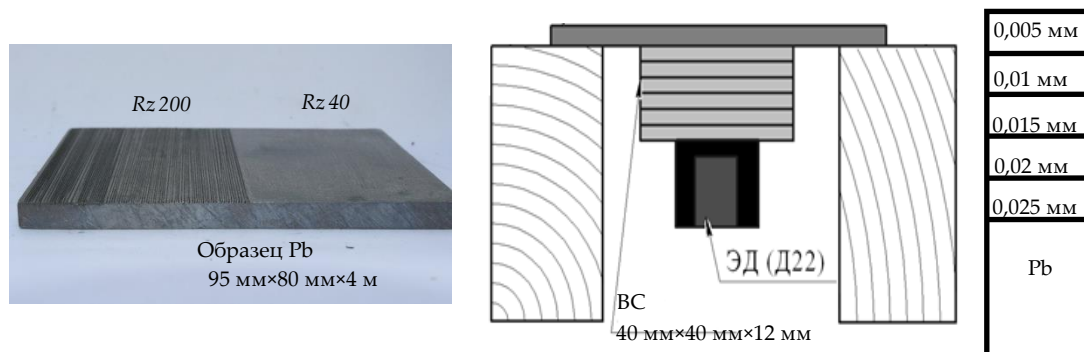
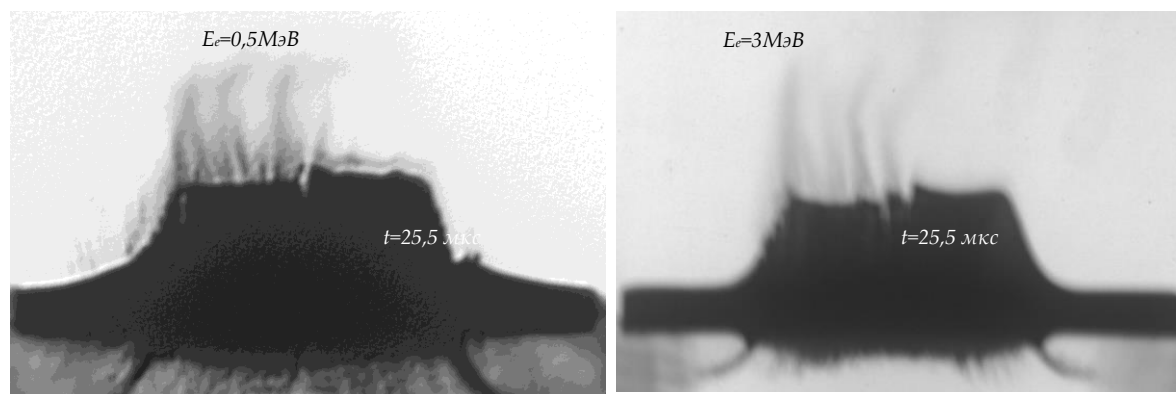


Рисунок 8. Схема экспериментальных сборок

Рисунок 9. Рентгенограммы опытов по пылению Pb,  $t$  – время от момента выхода УВ на СП

### Анализ результатов исследований ослабления излучения

Эксперименты и расчеты ослабления излучения с энергиями фотонов  $E_\gamma < 0,5$  МэВ показали существование зависимости  $N/N_0(Z^{3/2}qh)$  для металлов Fe, Cu, Ta, Pb (рисунки 3, 6) в диапазоне толщин до 1,5 мм ( $Z^{3/2}qh < 300$  г/см<sup>2</sup>).

Зависимость  $N/N_0(Z^{3/2}qh)$  позволяет оценить плотность пылевого облака даже в случае, когда клин и исследуемый образец состоят из разных материалов. Для значения  $N/N_0 = \text{const}$ , соответствующего калибровочному клину и облаку пыли, имеем  $Z^{3/2}qh = \text{const}$ . Отсюда для двух разных веществ: клин и облако ( $i$  и  $j$ ) следует  $q_i = q_j \cdot (h_i / h_j) \cdot (Z_i / Z_j)^{3/2}$ .

### Заключение

Представлены результаты экспериментально - расчетного исследования затухания излучения в металлических пленках толщиной десятки и сотни мкм и плотностью 8-20 г/см<sup>3</sup>, имитирующих массовую толщину (г/см<sup>2</sup>) пылевого облака. Источник излучения ИГУР-3,5,  $E_\gamma < 0,5$  МэВ: напряжение на ускорительной трубке – 0,5 МэВ; ток через ускорительную трубку – 8 кА; длительность импульса на полувысоте 160 нс.

Экспериментальные и расчетные результаты затухания излучения в металлах представляют собой зависимость  $N/N_0 = f(Z^{3/2}qh)$ , где  $Z$ ,  $q$ ,  $h$  – атомный номер, плотность и толщина металла. Данная зависимость может использоваться для оценки массы и плотности пылевого облака в опытах, в которых исследуемый образец и клин выполнены из разных металлов.

Чувствительность регистрации пыления составила 8,9 мг/см<sup>2</sup> с экранами оптической плотности 1,08 г/см<sup>2</sup> (Al 2мм+2мм). В качестве экранов в опытах по регистрации пыления предпочтительнее использовать металлы и неметаллы с малыми  $q$  и  $Z$ : алюминий, бериллий, пластмасса, резина.

## Список литературы

1. М.Ю. Столбиков, В.Н. Смирнов, А.Н. Власов, Д.А. Железкин, В.А. Пашенцев «Взаимодействие излучения с энергией квантов до 3,8 МэВ с тонкими ( $\leq 1$ мм) металлическими пленками» // Доклад на Забабахинских научных чтениях 2017
2. В.Ю. Кононенко, А.И. Кормилицин и др. «ИГУР-3,5- мощный импульсный ускоритель электронов для регистрации быстропротекающих процессов»// Доклад на Забабахинские научные чтения, 2008.

## SPECIFIC FEATURES of X-RAY EXPERIMENTS to STUDY EJECTA

*V.N. Smirnov, M.Yu. Stolbikov, A.N. Vlasov, D.A. Zhelezkin, V.A. Pashentsev, K.V. Khaldin, V.V. Zyryanov*

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

The flash X-ray radiography is a method used to study ejection. This method is capable to give obvious results and to record the structure and average density of the cloud along the X-ray beam, as well as to record position of sample's free surface. X-ray diagnostics of ejection is performed in conditions of the radiation – matter interaction with the photon energy up to 500 keV (photo-effect region) due to low density of the ejecta cloud ( $\leq 0.1$  g/cm<sup>3</sup>). For the hard  $\gamma$ -quanta ( $> 0.1$  MeV), the cloud is transparent (white). For soft quanta ( $< 0.1$  MeV), the cloud turns to be semitransparent (gray) and appropriate for diagnostics.

A radiation source, material, and thickness of shielding plates must be taken such that radiation attenuation in shielding plates would be minimal and attenuation in the ejecta cloud would be maximum.

The paper presents results of X-ray diagnostics of the model cloud. The model looks like a wedge sample made from the metal with  $\rho = 7.8 \dots 16.6$  g/cm<sup>3</sup>,  $Z = 26 \dots 82$ ,  $h < 1.5$  mm. Thickness of wedge steps is 20...280  $\mu$ m. The diagnostic mode is  $E_\gamma < 0.5$  MeV (mainly) but in certain cases 3 MeV and 3.8 MeV. IGUR-3.5 pulsed X-ray generator provides threshold radiation energy of  $E_\gamma = 0.5 \dots 3.8$  MeV. Spectrum is continuous within 0...  $E_\gamma$ . The soft part of spectrum allows registration of low-density ejecta bunches.

The material of the explosion-proof shielding plate is aluminum. The shielding-plate thickness from the side of the source and from the side of the recorder is the same, i.e. 2 mm each.

Experiments and Monte Carlo simulations (PRIZMA code) were used for diagnostics purposes.

Radiation attenuation results are presented versus the generalized parameter  $Z^k \rho h$ , where  $k$  is a fitting parameter. The relationship  $k(E)$  is the same as the photons-atom interaction cross-section,  $\sigma(E)$ . This novelty is conditioned by the photo-effect.

Scientific novelty of the paper is the following:

- presentation of radiation attenuation in metals versus the complex parameter  $Z^k \rho h$  as a response to the photo-effect mode;
- demonstration of the attenuation pattern in the range of metal thicknesses simulating the ejecta cloud (tens and hundreds micrometers: this is 1000 times less compared to the traditional thickness).

## Calculation of radiation attenuation in metals

The spectrum of electrons striking upon the target was determined from the oscillogram of high-voltage pulses of voltage and current through the diode of the accelerating tube. The material of the anode pin in the diode of the accelerating tube is tantalum. Then, the  $\gamma$ -radiation spectrum was calculated for energies  $E_\gamma < 0.5$  MeV (figure 1).

Results of calculations of the radiation attenuation using the spectrum obtained in the assumption of mono energy electrons with  $E_e = 0.5$  MeV are practically no different from the results of calculations using the spectrum given in figure 1.