



# ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЕТРАНИТРАТА ПЕНТАЭРИТРИТА, СОДЕРЖАЩЕГО НЕПРОЗРАЧНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ, ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ МОЩНОСТИ

А.С. Зверев, А.Ю. Митрофанов, Н.Н. Ильякова,  
А.В. Ханефт, А.Г. Кречетов, А.В. Тупицын

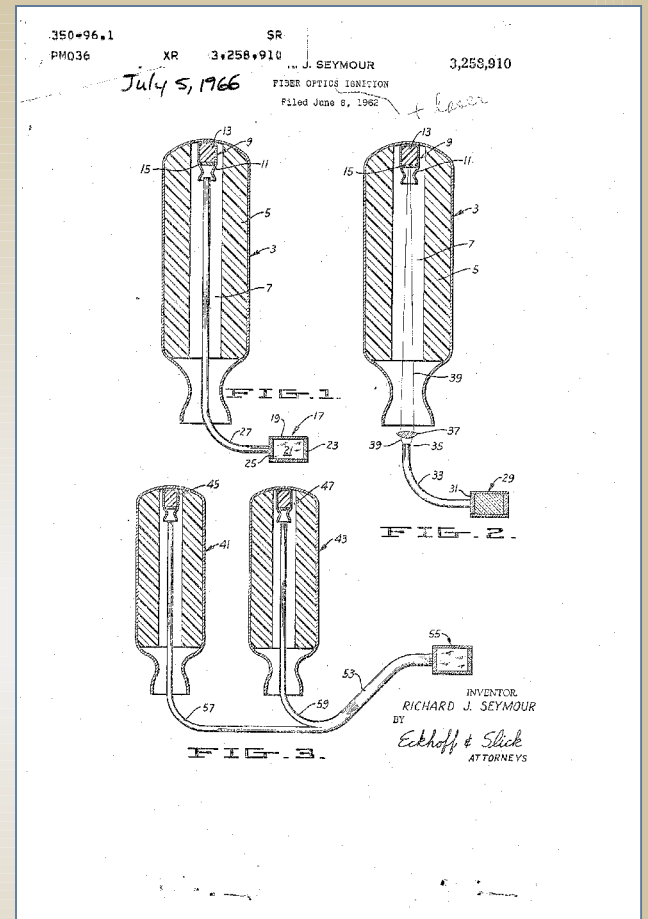
Кемеровский государственный университет, Кемерово, РФ

Лазерное инициирование энергетических материалов имеет ряд преимуществ:

- Высокая степень защищенности от ложного импульса
- Нечувствительность к электромагнитным наводка
- Потенциальная возможность исключения инициирующих энергетических материалов

Практическое применение лазерного инициирование энергетических материалов сопряжено с рядом трудностей:

- Основные положительные результаты показаны лишь при инициировании источников с большой мощностью излучения
- Такие источники сложны в эксплуатации
- Применение интенсивных потоков излучение ограничено оптической прочностью световодов.



US Patent **3,258,910**, Fiber optics ignition, 1966

**Экзотермическая самоподдерживающаяся реакция взрывного разложения**

**Преодоление потенциальных барьеров за счет нагрева**

**Фото диссоциация молекул энергетического материала**

**Лазерное Излучение**

**Введение светопоглощающих добавок**

**Углеродные добавки**

**Наночастицы металлов**

**Эффективны**

**Не эффективны**

**Александров, Е. И.// ФГВ. 1989.**

**Goveas, S.G.. Diss. University of Cambridge, 1997.**

**Илюшин М.А., Химическая физика. 2005.**

**Paisley, D.L. No. LA-UR-89-601, 1989.**

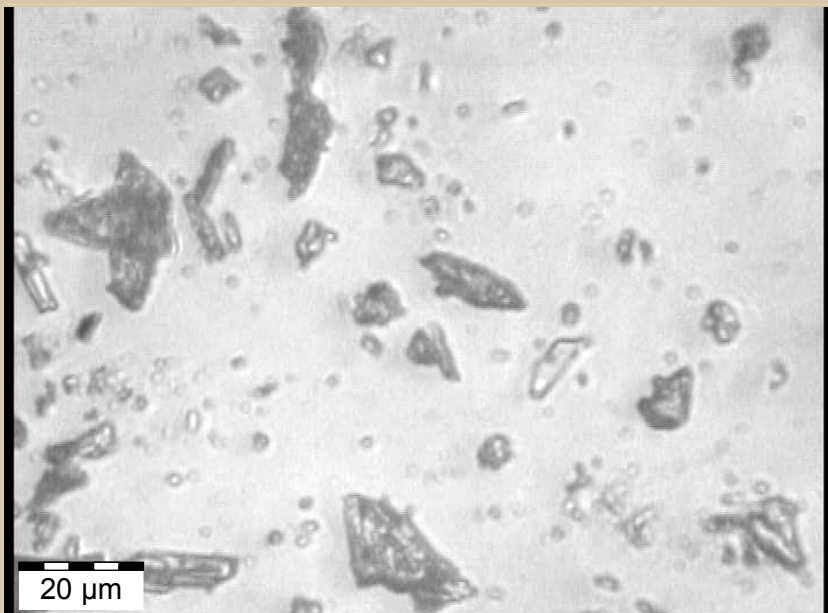


Рис 1 Микрофотография порошка ТЭНа.

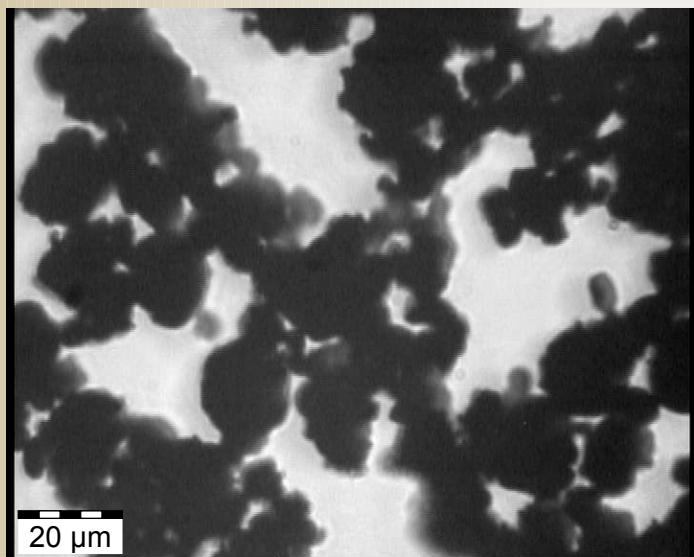
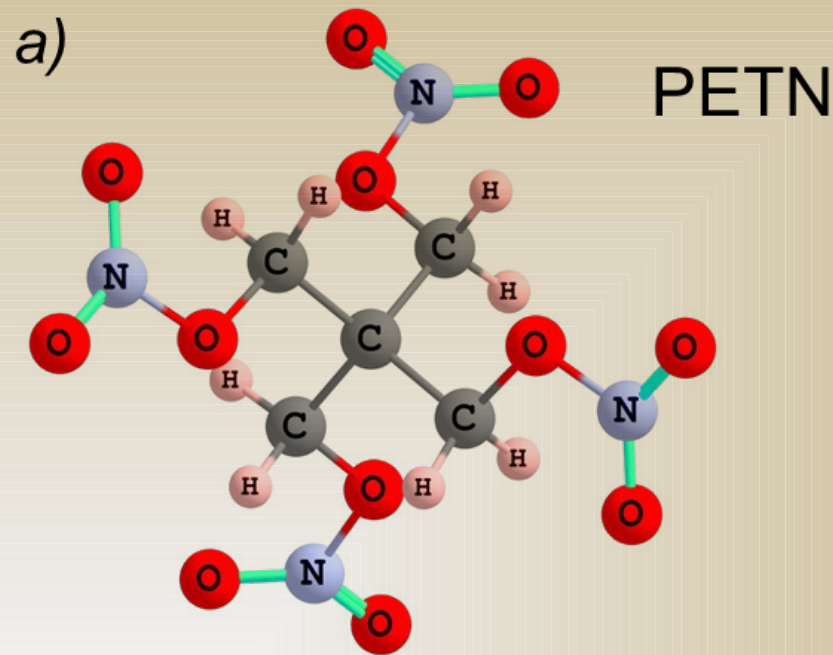


Рис. 2. Микрофотография сажи П324.

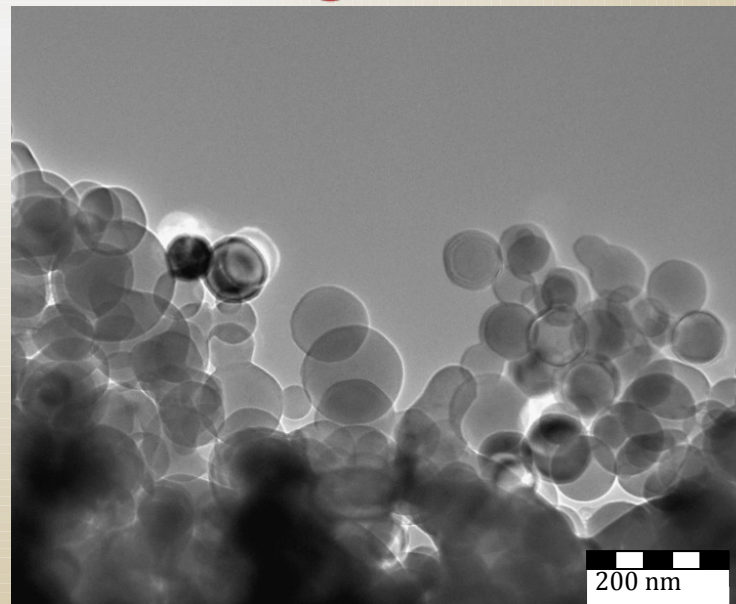
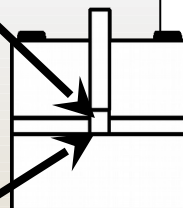


Рис. 3. Изображение ЭП микроскопии  
алюминиевого нанопорошка ALEX

Перемешивание  
ультразвуком в гексане  
SONOPULS HD 3200

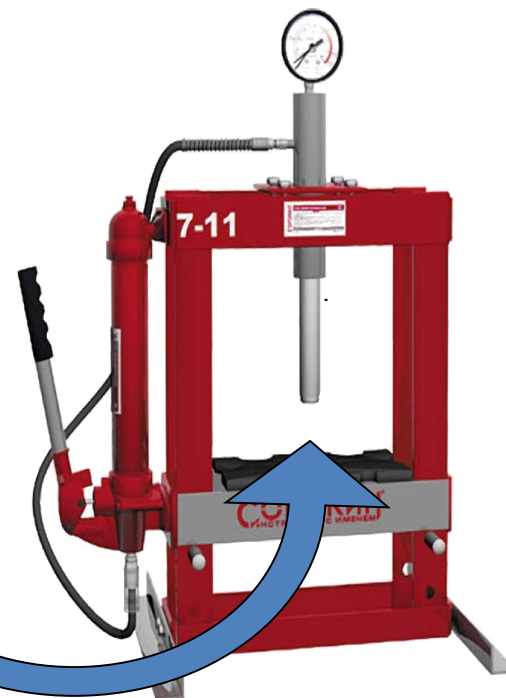


Сушка



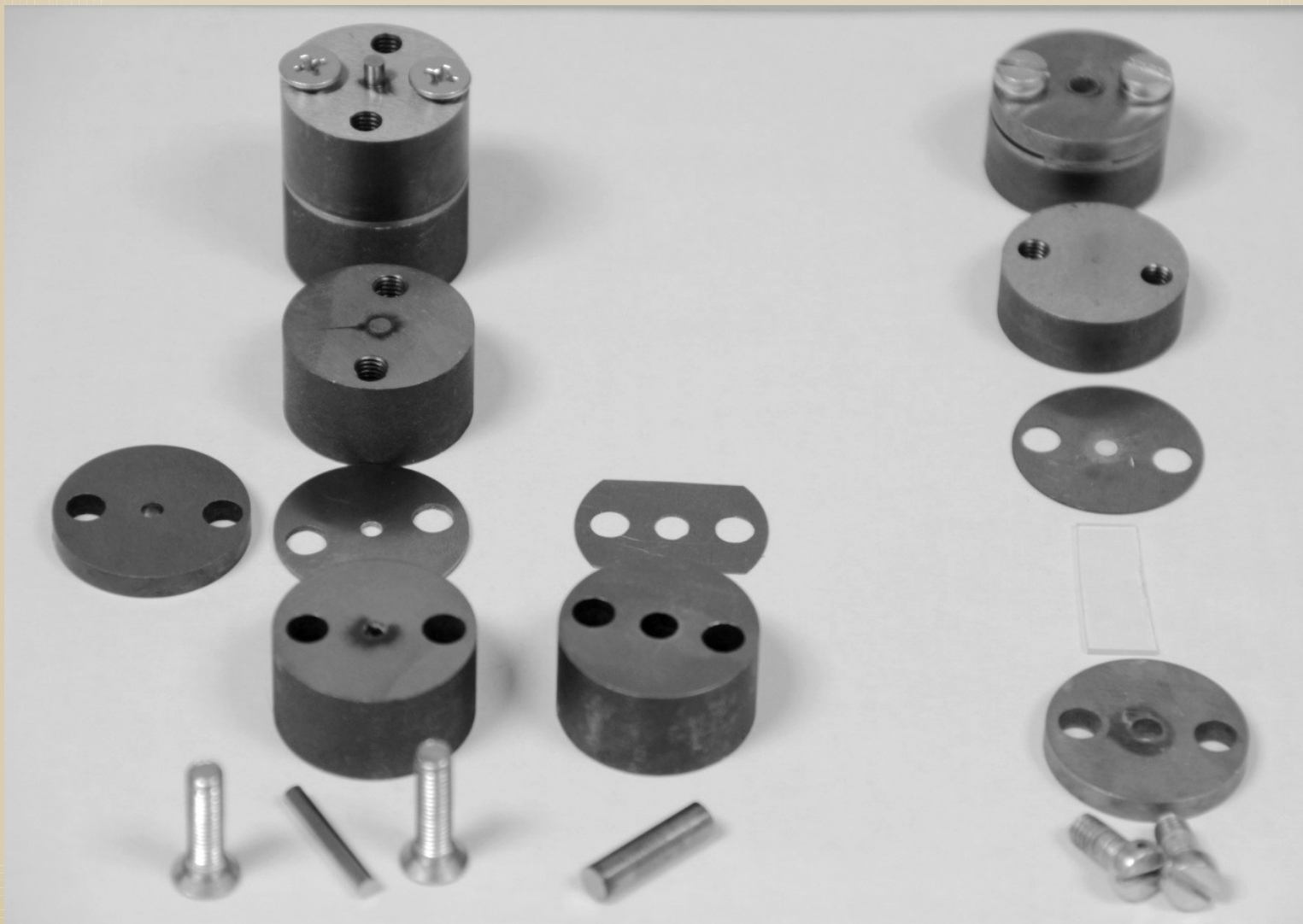
Механическое  
перемешивание в гексане

Прессование образцов



$P = 200$  МПа;  
 $d = 3$  мм.

# Оснастка для формования и иницирования прессованных образцов



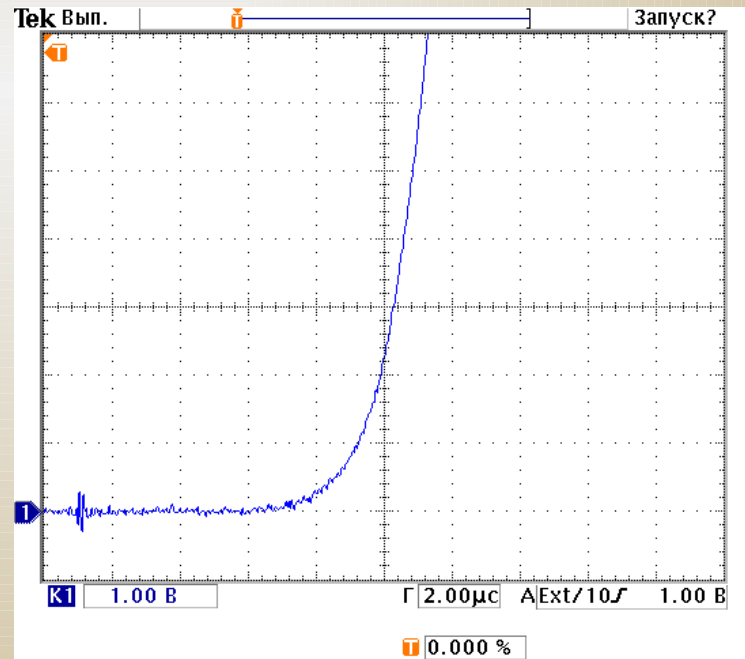
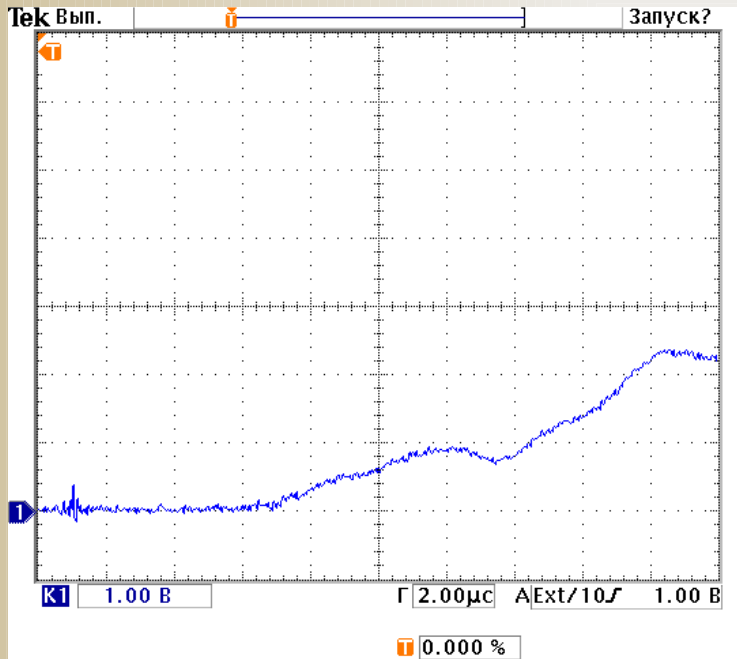
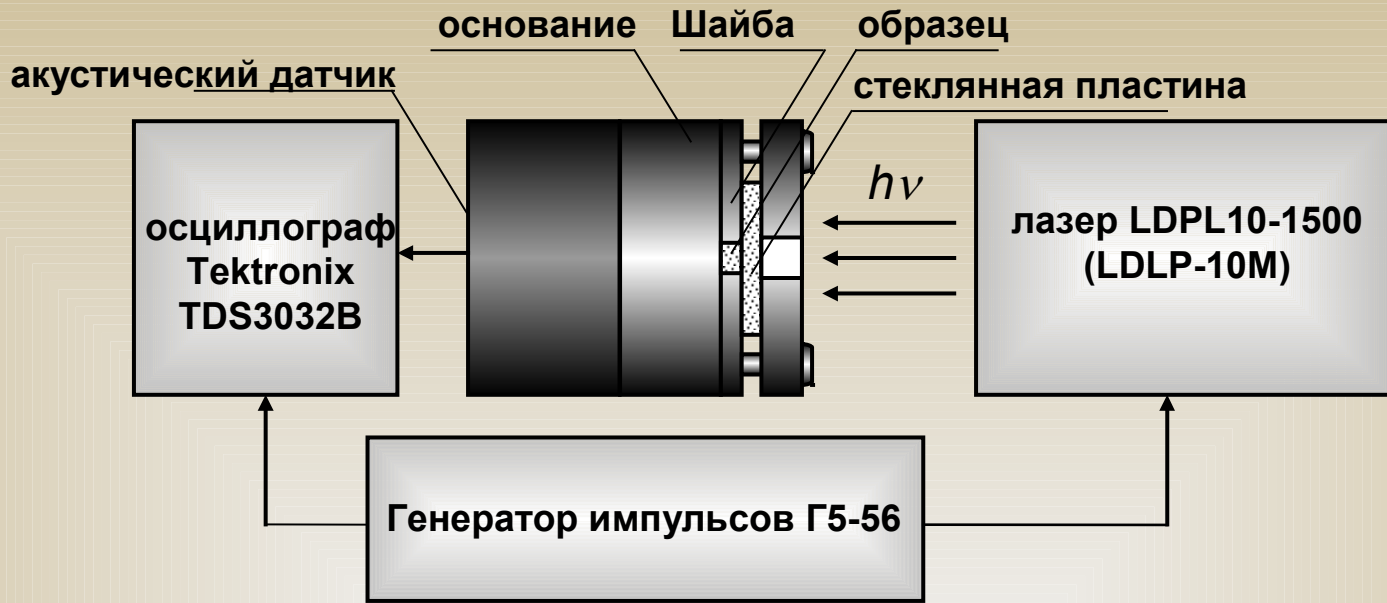
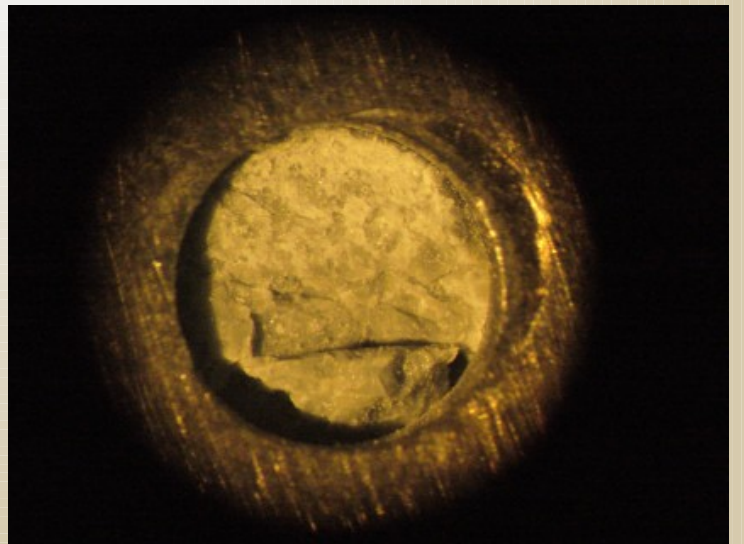
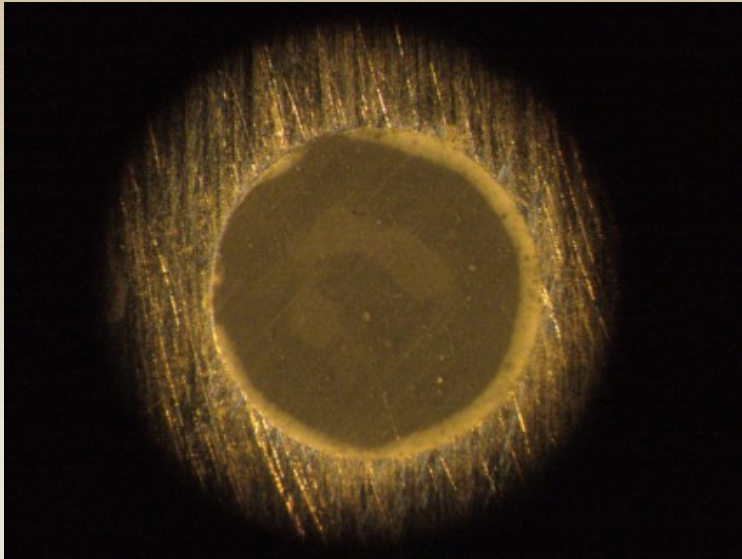


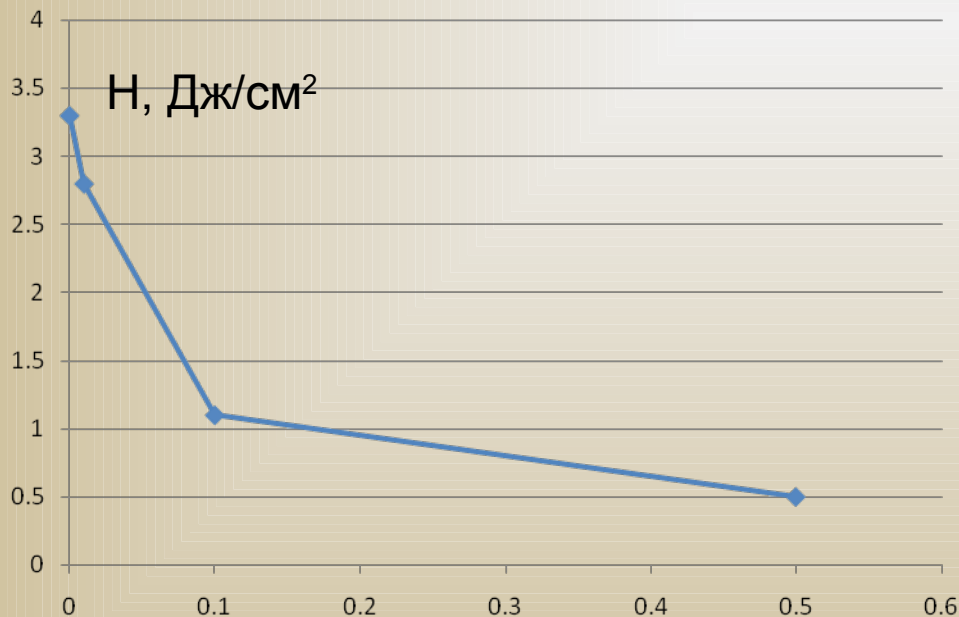
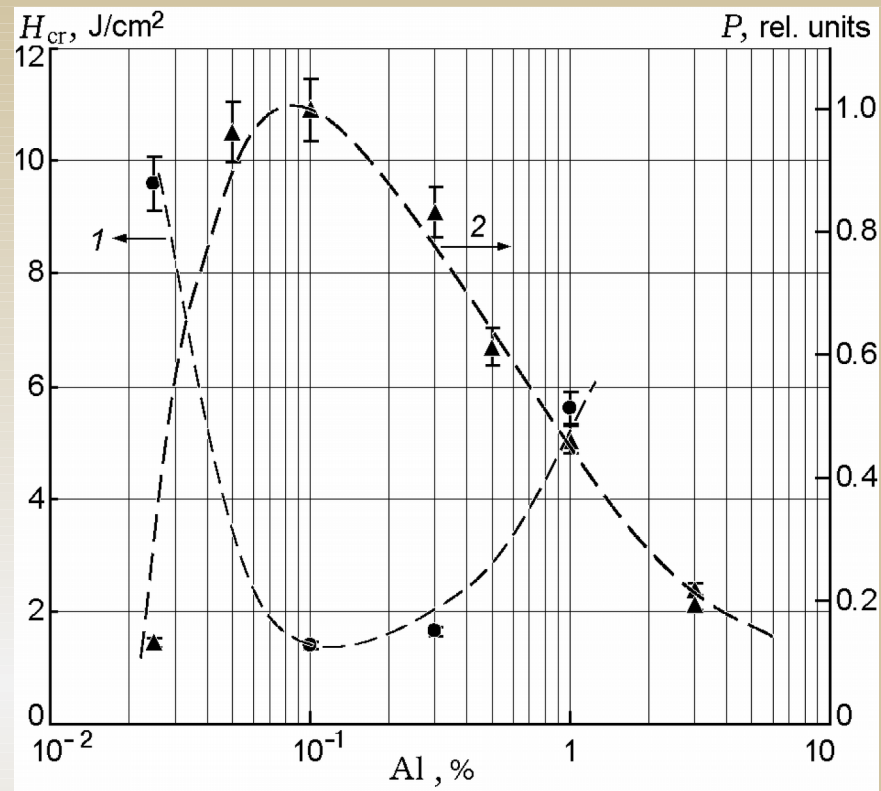
Рис. 8 Типичная осциллограмма акустического отклика при отказе

Рис.9 Типичная осциллограмма акустического отклика при подрыве образца





Добавка	$W_{1064}$	$W_{1070}$
Чистый ТЭН	3.3	>90
Alex 0.5%	0.5	—
Alex 0.1%	1.1	14.5
Alex 0.01%	2.8	67



Aduev B. P. et al. Photosensitive material based on PETN mixtures with aluminum nanoparticles //Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2012. – V. 48. – №. 3. – С. 361-366.

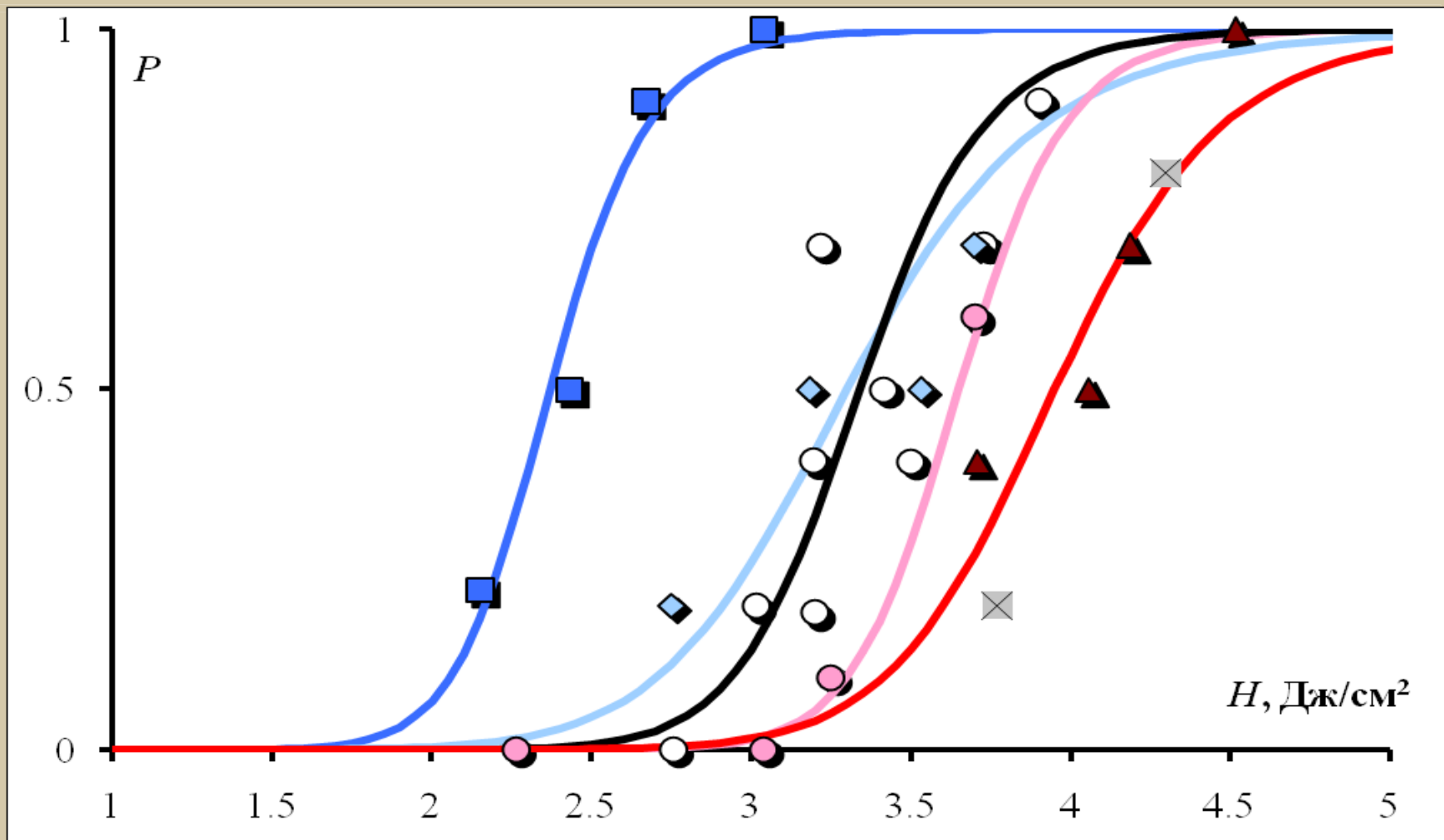
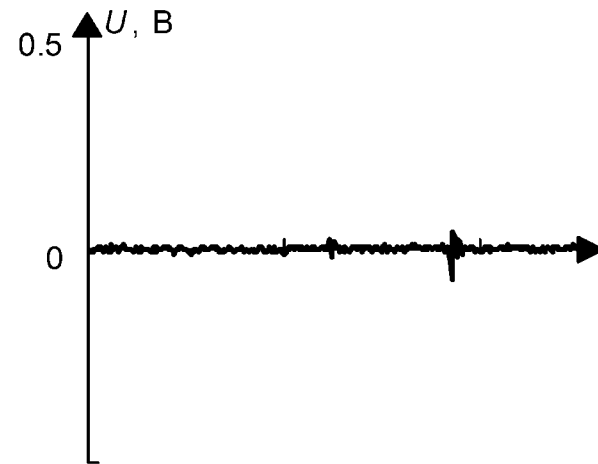
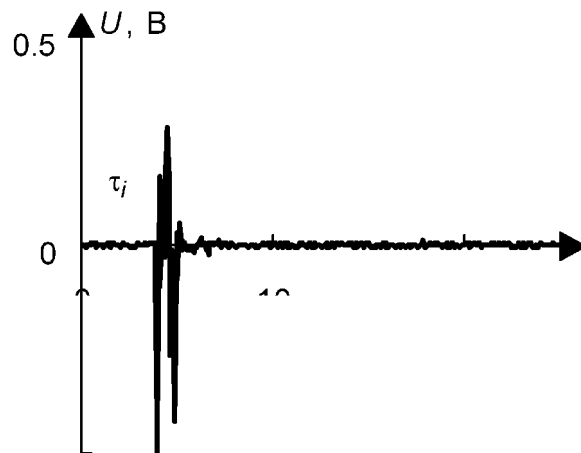
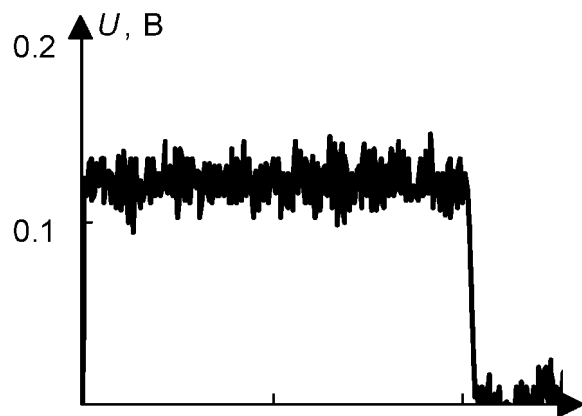
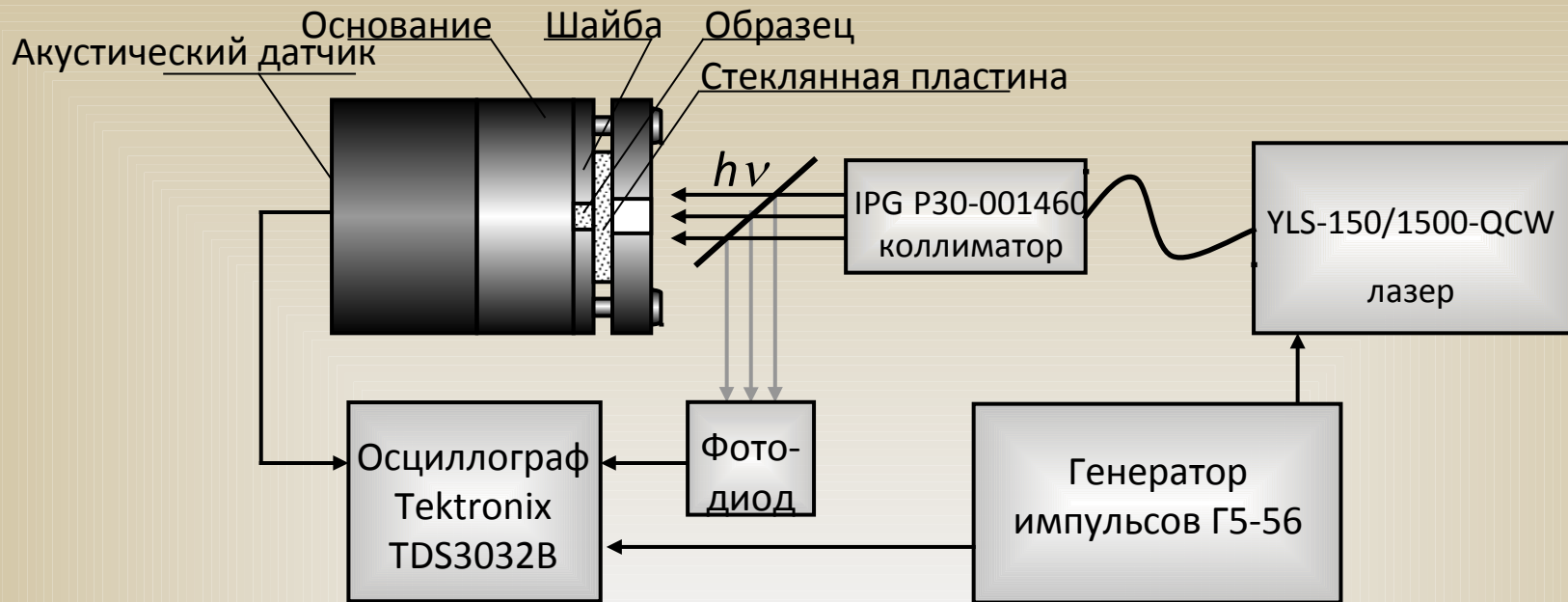


Рис 10. Зависимости вероятности взрыва от плотности энергии инициирующего лазерного импульса для прессованных образцов чистого ТЭНа (○), композитов ТЭНа с добавкой газовой сажи гомогенизированных ультразвуком с концентрацией сажи 0,005масс. % (●), 0,01 масс. % (▲), 0,1 масс. % (x), гомогенизированных механическим перемешиванием 0,01 масс. % сажи (◇), 0,1 масс. % сажи (■).

# Сводная таблица значений пороговых экспозиций для всех испытанных материалов

Добавка (способ гомогенизации)	$W_{1064}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$W_{1070}$ , Дж/см <sup>2</sup>
Чистый ТЭН	3.3	n/a
Сажа 0.1% (ультразвук)	4	n/a
Сажа 0.1% (механически)	2.4	14
Сажа 0.01% (ультразвук)	4	85
Сажа 0.01% (механически)	3.1	6
Сажа 0.005% (ультразвук)	3.7	62



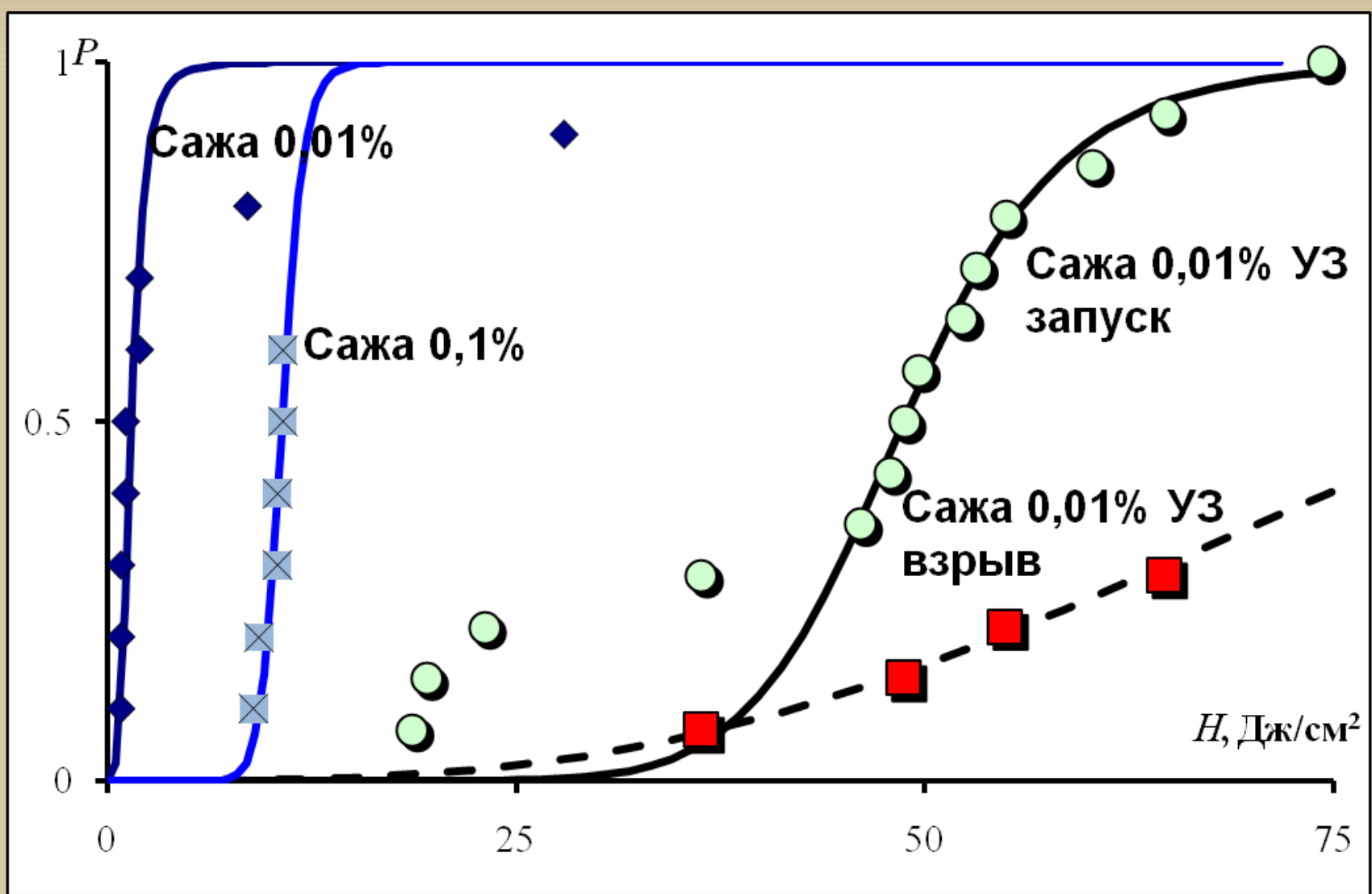


Рис 5. Зависимость вероятности инициирования прессованных образцов композитов ТЭНа с добавкой сажи от экспозиции инициирующего импульса.  $\diamond$  - 0,01 % сажи (механическое перемешивание),  $\times$  - 0,1 % сажи (механическое перемешивание),  $\bullet$  – запуск реакции взрывного разложения без полного взрыва образца для,  $\blacksquare$  – взрыв образца для композитов с концентрацией сажи 0,01% вес. (ультразвуковая гомогенизация)

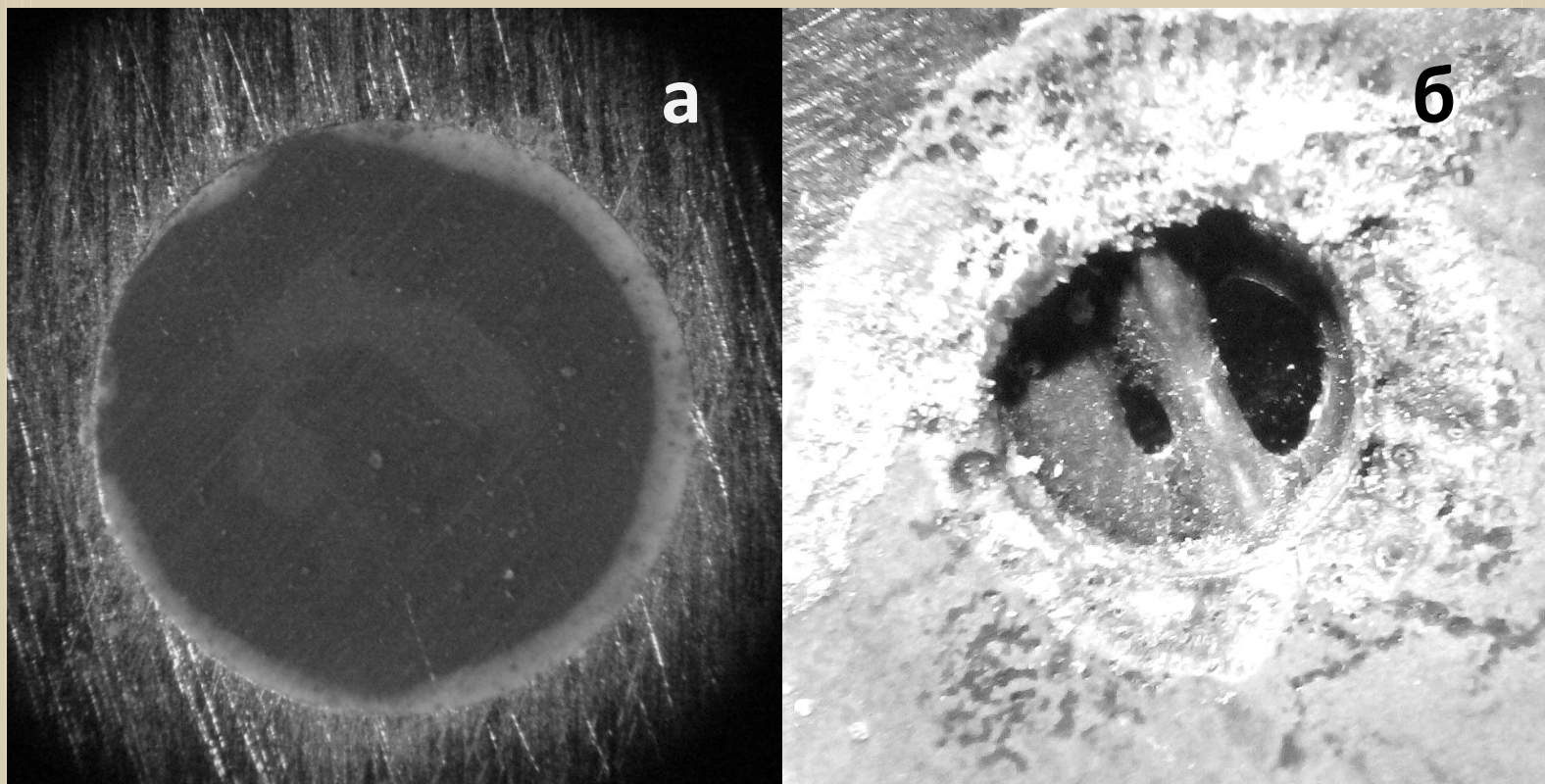


Рис. 6 Фотография прессованной таблетки (диаметр 3 мм) (а), типичный результат инициирования иттербиевым лазером YSL-150/1500-QCW (б).

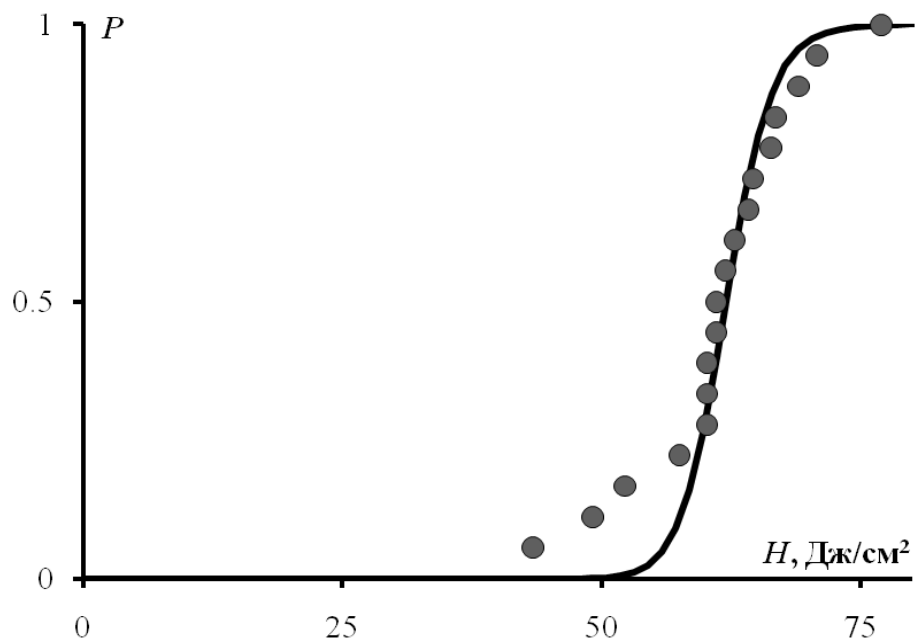
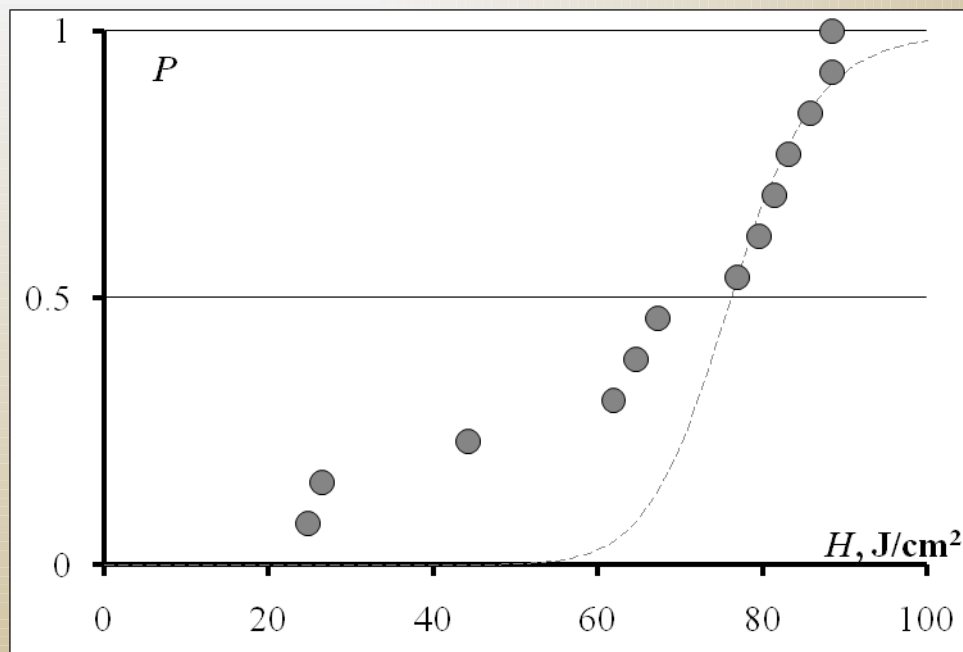
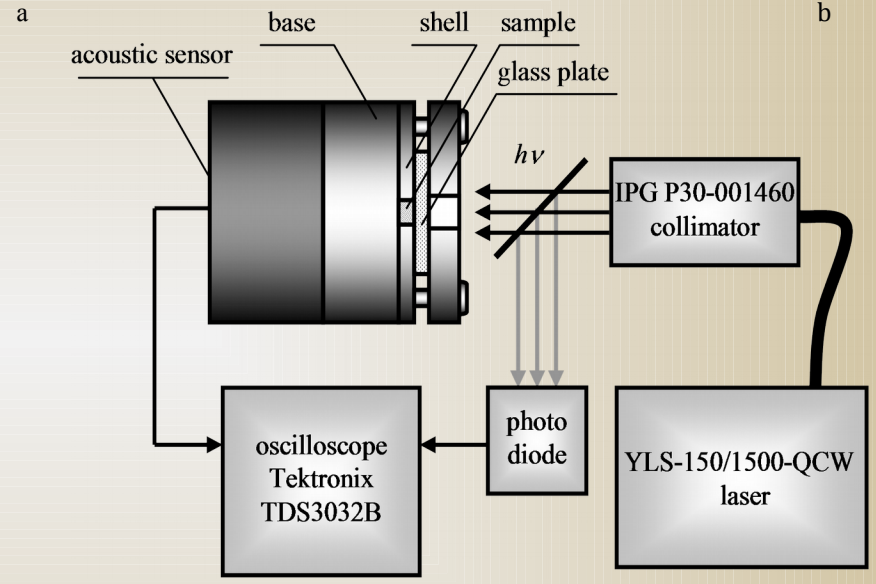
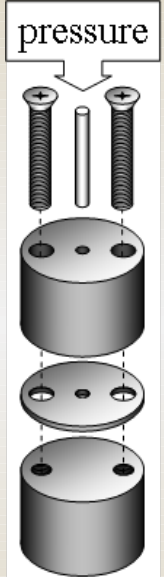
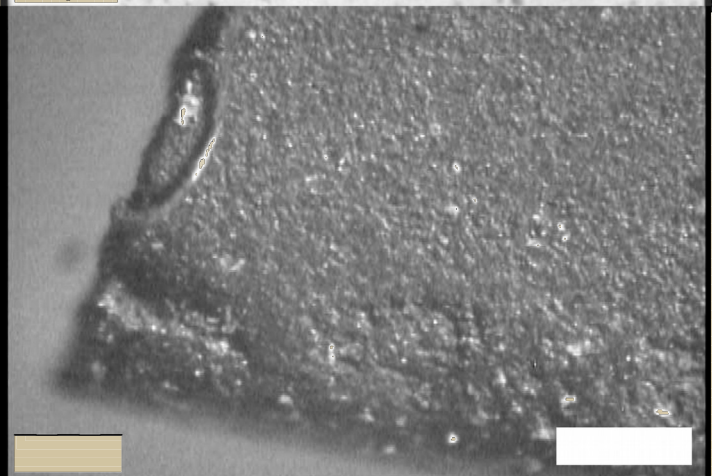
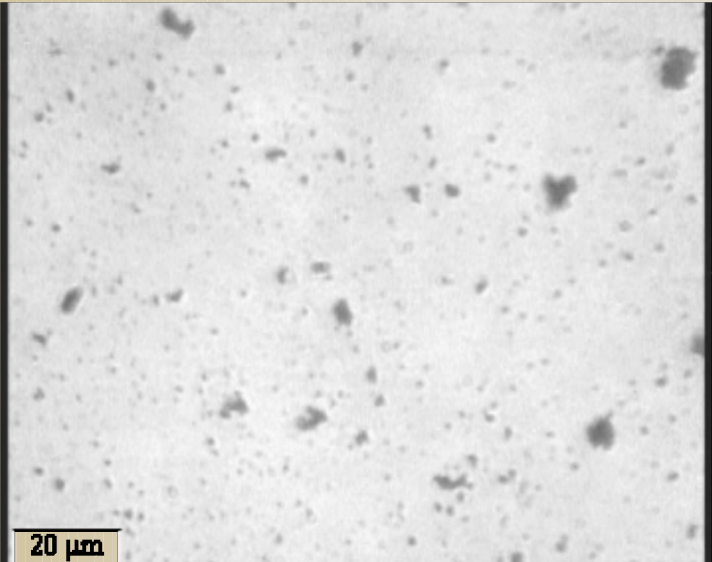


Рис 7 Зависимость вероятности взрыва прессованных образцов композита ТЭНа с содержанием сажи 0,005 масс.% гомогенизированного ультразвуком от экспозиции иницирующего излучения лазера YSL-150/1500-QCW.

Рис 7 Зависимость вероятности взрыва прессованных образцов композита ТЭНа с содержанием ALEX 0,01 масс.%, от экспозиции иницирующего излучения лазера YSL-150/1500-QCW.







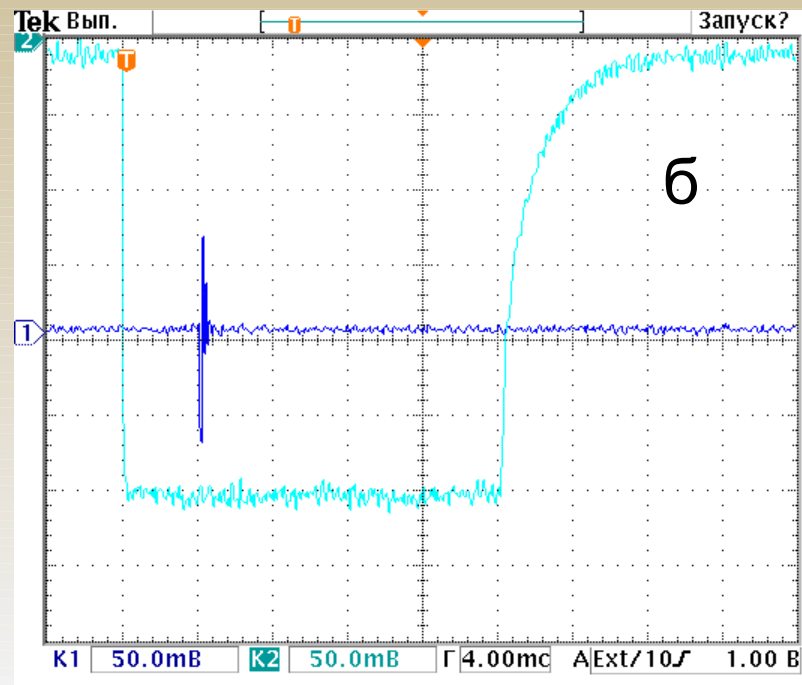
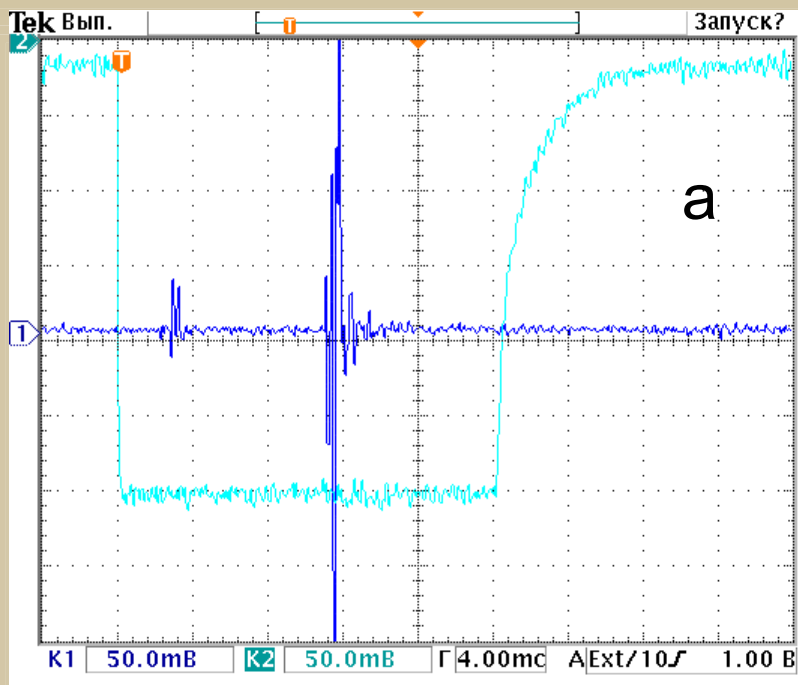
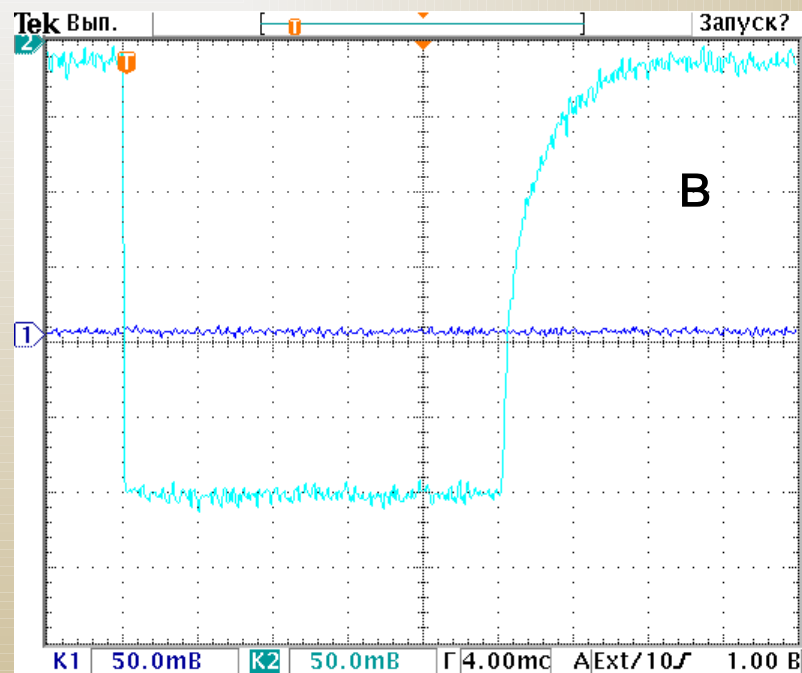


Рис. 12. Типичные осциллограммы акустического отклика при образовании очага реакции с последующим подрывом образца (а), очага без полного подрыва (б), отказа (в)



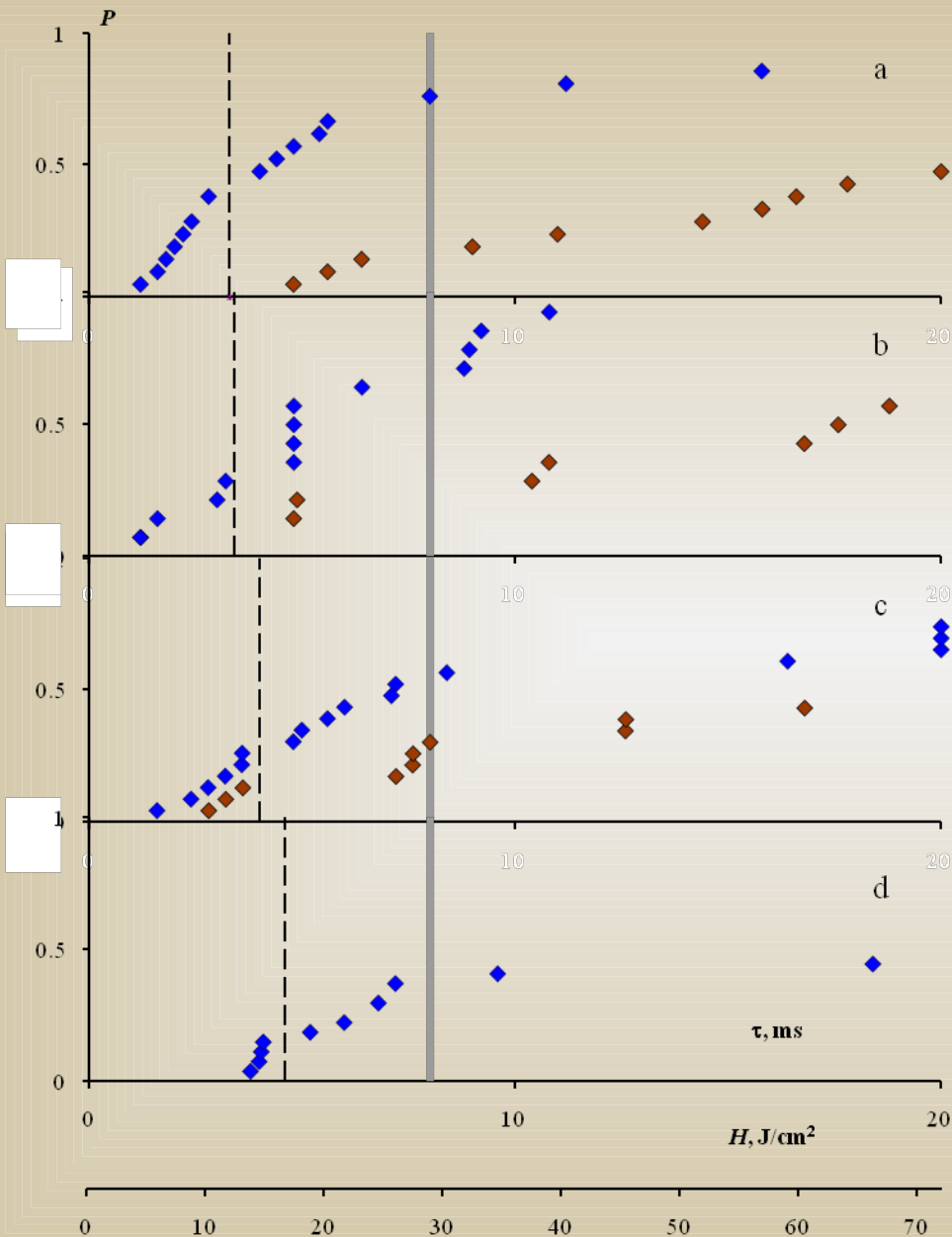


Рис. 13. Вероятность развития процесса запуска реакции (черные) и вероятность инициирования взрыва (белые) к моменту времени воздействия лазерного излучения (полная длительность импульса составляет 20 мс). Толщина слоя CuO на поверхности образца составляет 9 мкм (а), 13.5 мкм (b), 15.7 мкм (с), 18 мкм (d). Вертикальная черная пунктирная линия демонстрирует расчетное время запуска реакции. Сплошная серая вертикальная линия показывает примерное время начала разрушения пленки оксида меди.

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + \alpha(1 - R_{12}) I_0(t) \exp[-\alpha(z - h_1)] \times$$
$$\times \frac{[1 + R_{23} \exp(2\alpha(z - h_1 - h_2))]}{[1 - R_{12} R_{23} \exp(-2\alpha h_2)]}$$

$$\rho_3 [c_3 + H_f \delta(T_3 - T_f)] \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} + \rho_3 Q Z \exp\left(-\frac{E}{RT_3}\right)$$

с начальными и граничными условиями:

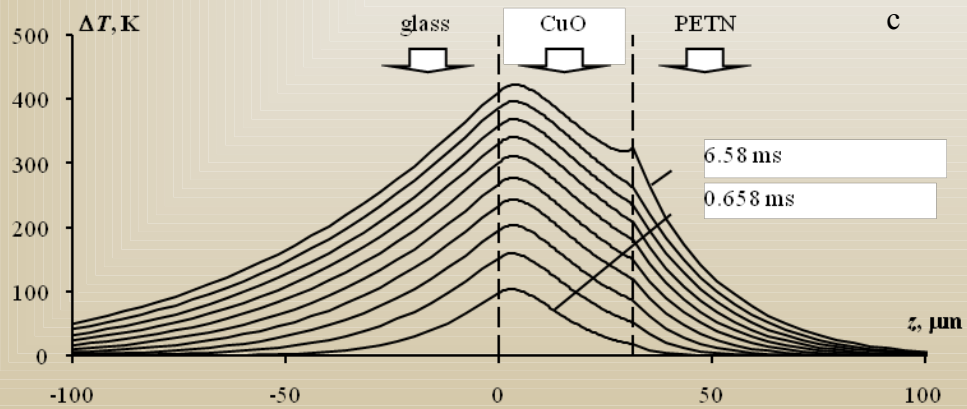
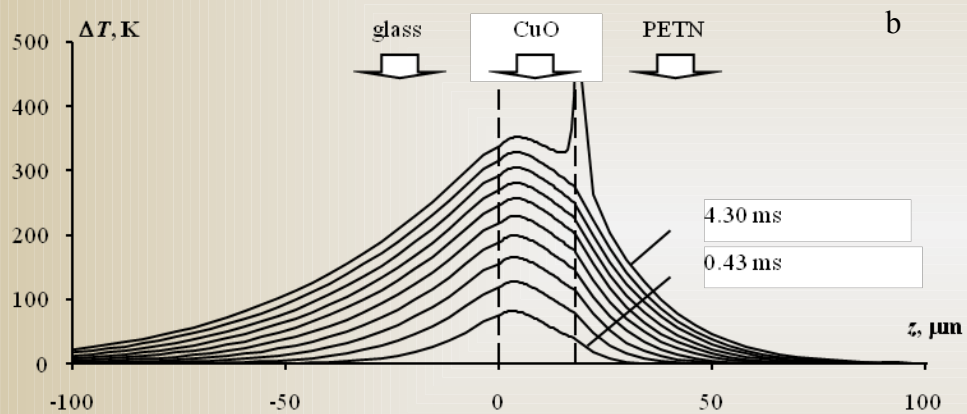
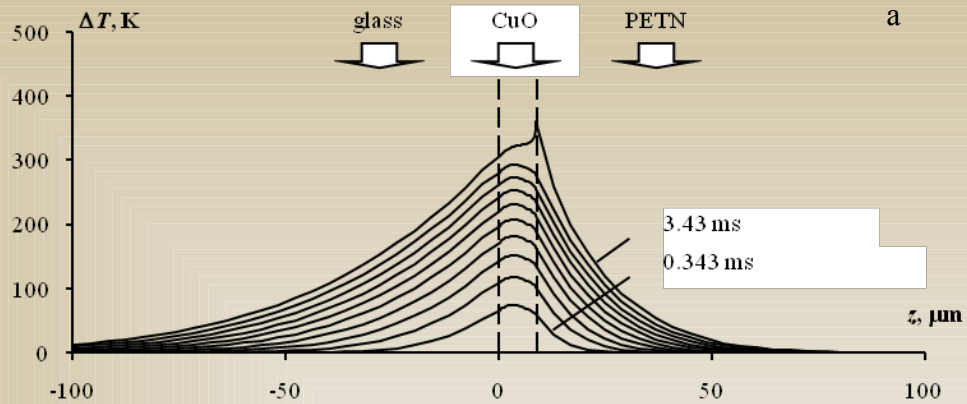
$$T_1(z, 0) = T_2(z, 0) = T_3(z, 0) = T_0$$

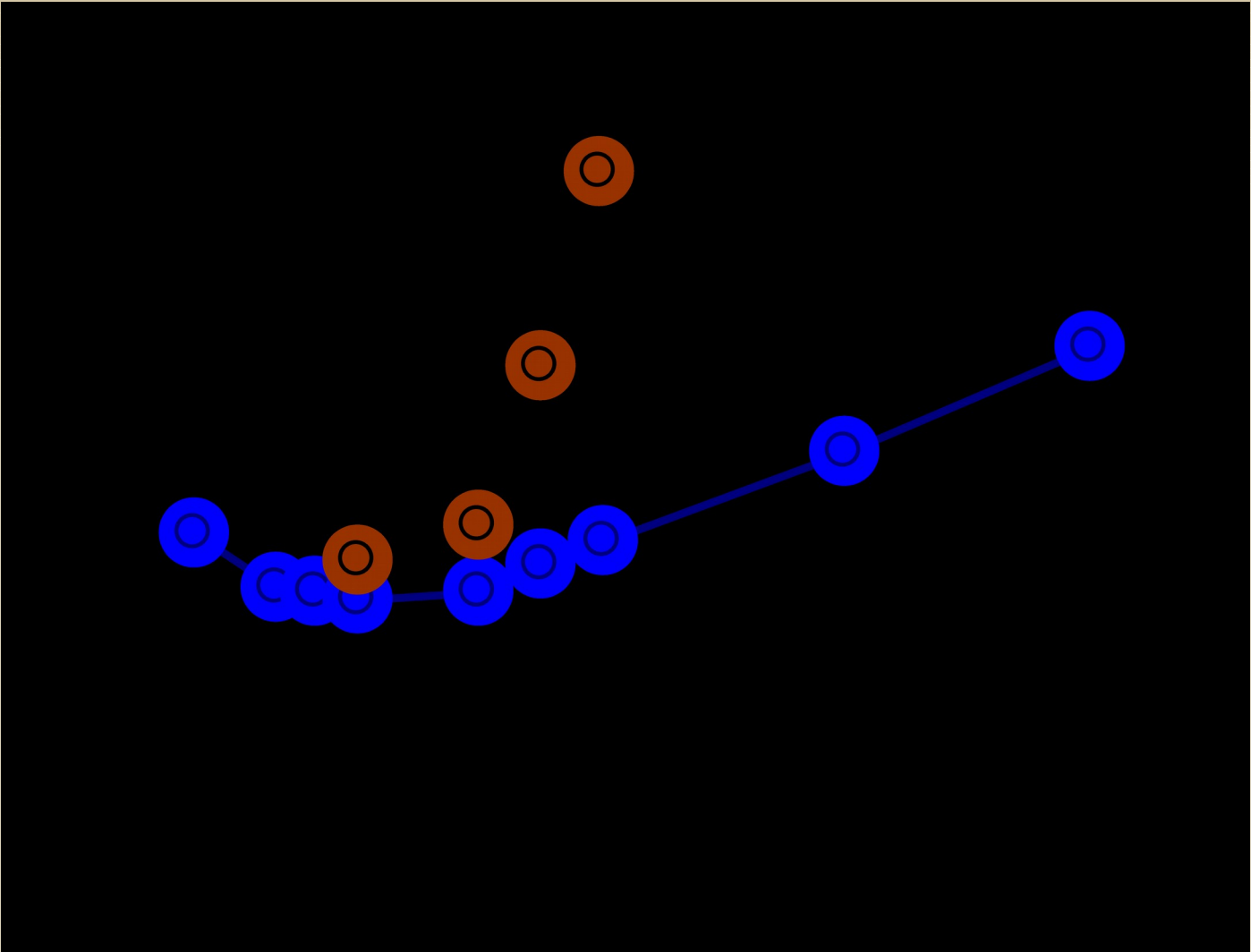
$$\frac{\partial T_1(0, t)}{\partial z} = \frac{\partial T_3(h_1 + h_2 + h_3, t)}{\partial z} = 0$$

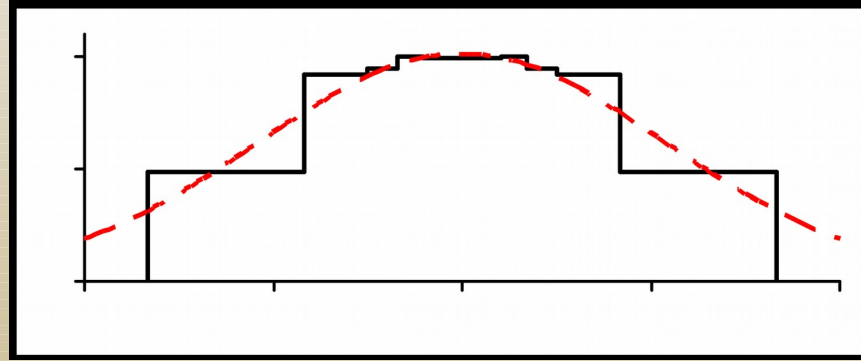
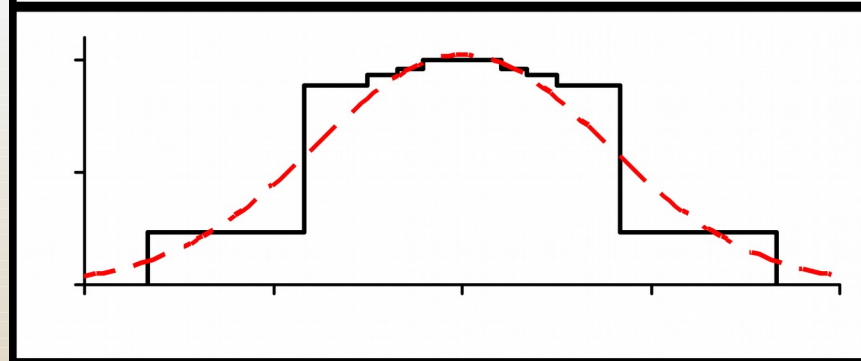
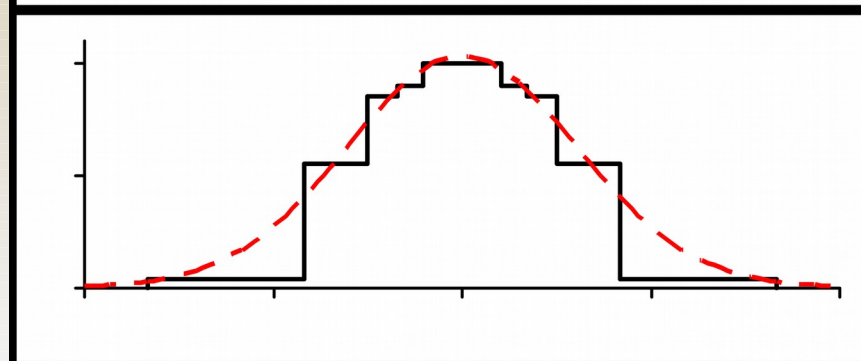
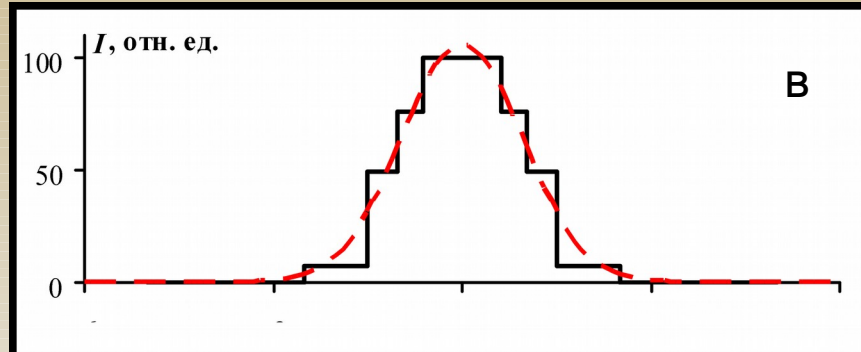
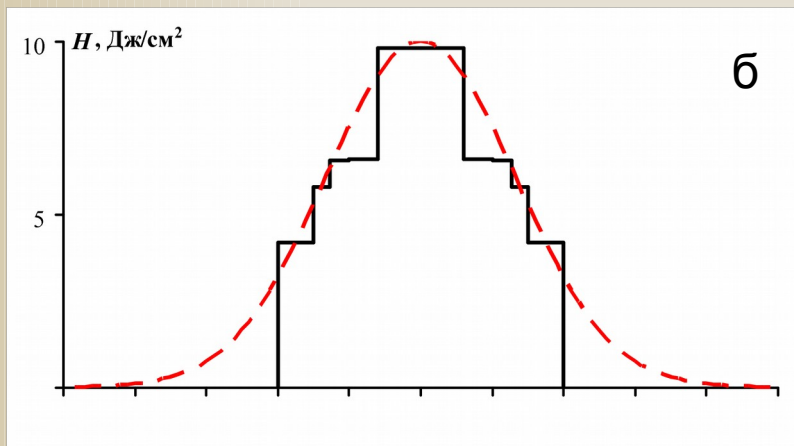
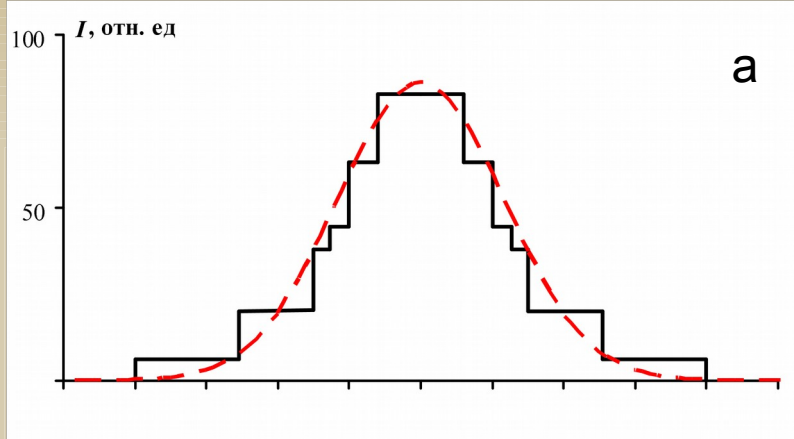
$$T_1(h_1, t) = T_2(h_1, t) \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1(h_1, t)}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(h_1, t)}{\partial z}$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(h_1 + h_2, t)}{\partial z} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(h_1 + h_2, t)}{\partial z}$$

$$T_2(h_1 + h_2, t) = T_3(h_1 + h_2, t)$$







а

б

в

Распределение интенсивности излучения на образце. Сплошная линия – экспериментальные значения, пунктирная – приближенное описание гауссовой зависимостью  
 а) лазер YSL-150/1500-QCW.  
 б) лазер LDPL10M при фокусировке линзой 1,5D  
 в) лазер LDPL10-1500 при фокусировках 1,5D; 1D; 0,5D и 0D соответственно