

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем химико-энергетических технологий  
Сибирского отделения Российской академии наук



**XV Конференция молодых ученых "Взаимодействие  
полей и излучения с веществом"**

**10 – 16 сентября**

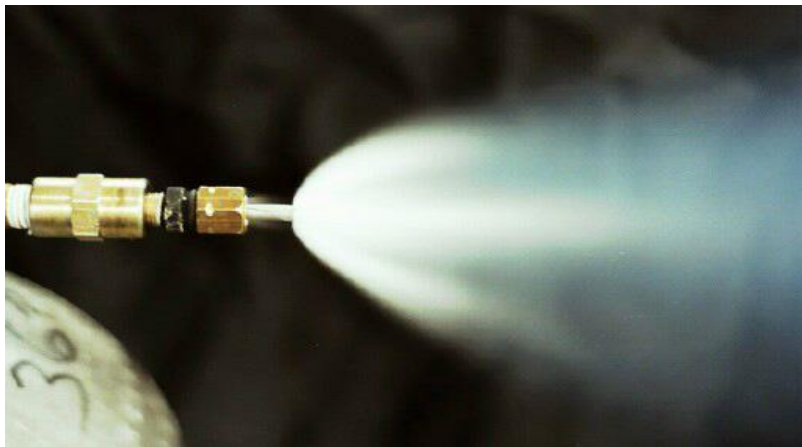
**Тема: «РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ТУРБИДИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА»**

Мецлер Э.А., Павленко А.А., Титов С.С.

Иркутск, 2017

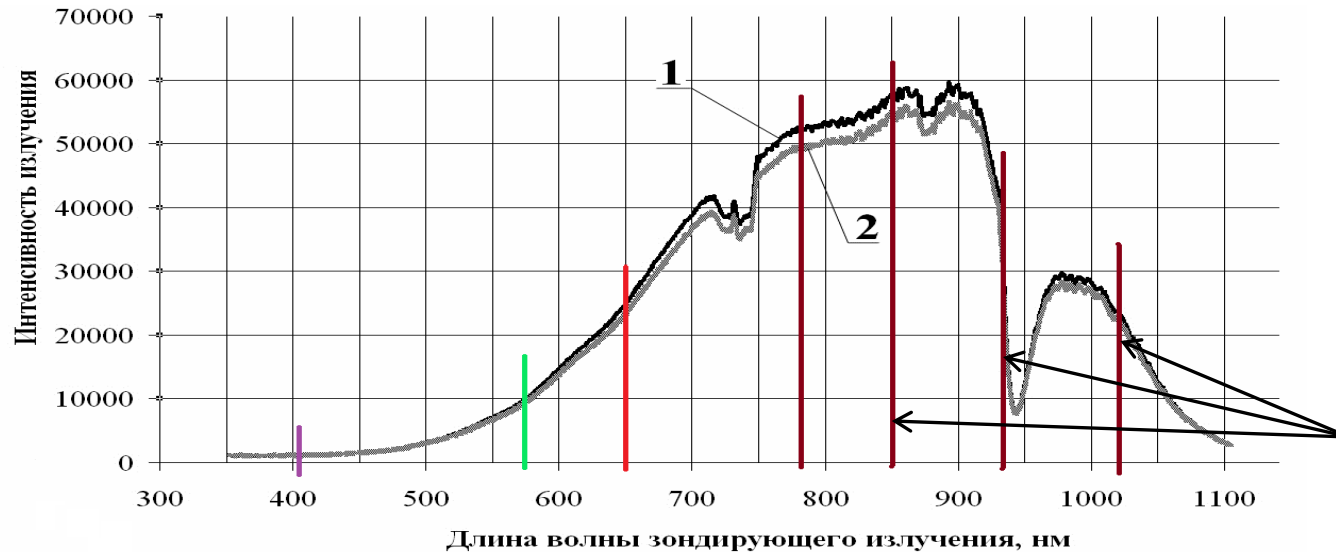
# Актуальность работы

---



# МСП и модификация МСП

Особенность модификации: **переход от сплошного спектра источника излучения к набору дискретных длин волн (набор лазеров)**



1 - падающее излучение на аэрозоль

2 - прошедшее излучение через аэрозоль

Дискретные длины волн

## Особенности связанные с реализацией МСП:

- диапазон размеров частиц от 0,02 до 6 мкм;
- возможность работы в условиях фонового излучения;
- значение оптической толщины до 3;
- временное разрешение до 80 Гц (особенность приемника).



Приемник оптического излучения:  
**спектрометр**

## Особенности связанные с реализацией модификации МСП:

- высокое временное разрешение (до 10 кГц);
- возможность работы в условиях фонового излучения;
- значение оптической толщины до 9;
- длина оптического пути до 3 метров;
- расширение диапазона размеров частиц 0,02 до 10 мкм.



Приемник оптического излучения:  
**набор фотодиодов**

# Подход к решению обратной задачи оптики аэрозолей

$f(D)$  - искомая функция распределения частиц по размерам

$\tau(\lambda)$  - экспериментальные данные об ослаблении оптического излучения

$D_{32}$  - средний объемно-поверхностный диаметр частиц

Уравнение Фредгольма первого рода:

$$\int_a^b K(D, \lambda) f(D) dD = \tau(\lambda)$$

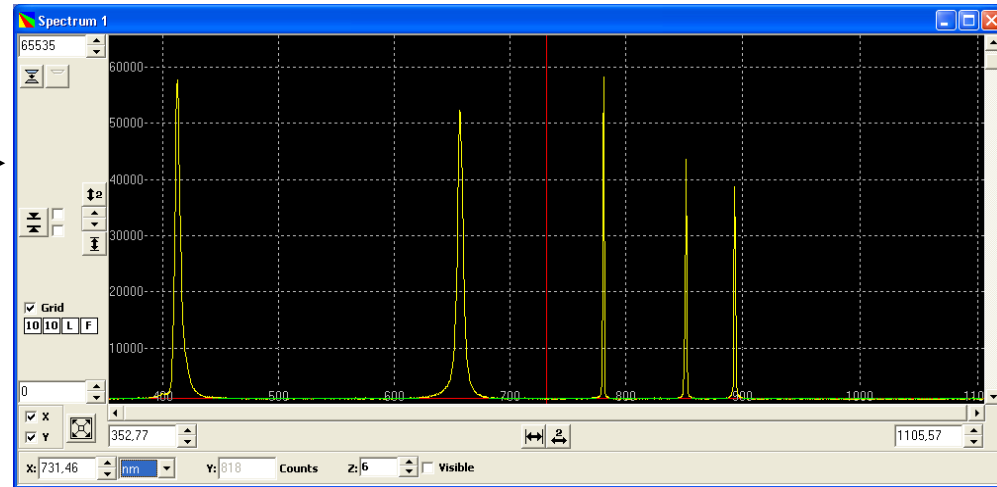
↑  
Характеризует

↑  
Определение  $D_{32}$

↑  
Методическая погрешность  
определения

↑  
↑  
↑  
Разработана методика  
определения  $D_{32}$

Спектр источника излучения



↑  
Погрешность измерения интенсивности  
излучения

↑  
Применимость закона  
Бугера-Ламберта-Бера

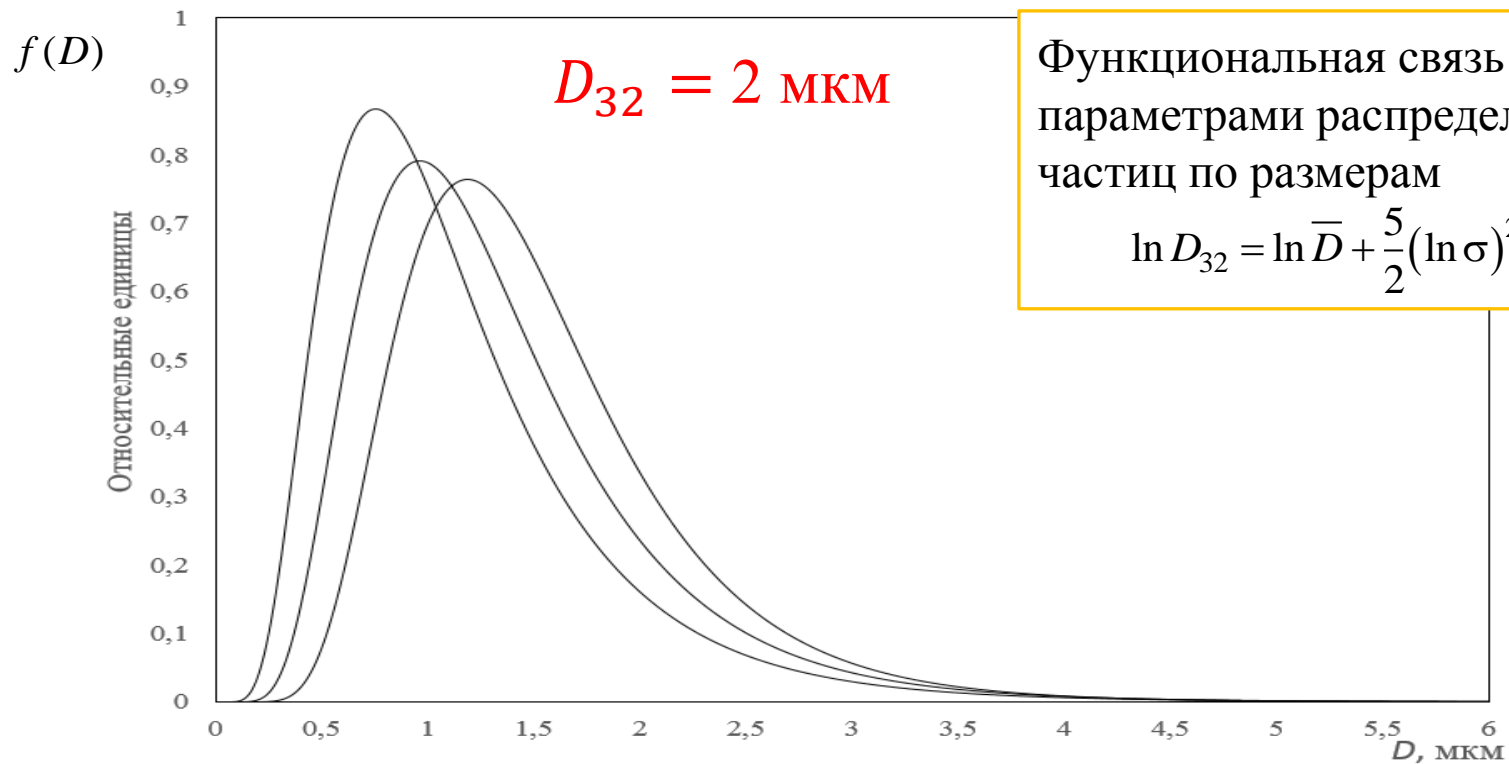
# Логарифмически нормальное распределение

$$f(D) = \frac{1}{D\sqrt{2\pi\ln\sigma}} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln \bar{D})^2}{2(\ln\sigma)^2}\right]$$

$D$  - диаметр частиц;

$\ln\sigma$  - логарифм среднеквадратического отклонение диаметров;

$\ln\bar{D}$  - логарифм математического ожидания диаметров частиц.



Функциональная связь  $D_{32}$  с параметрами распределения частиц по размерам

$$\ln D_{32} = \ln \bar{D} + \frac{5}{2}(\ln\sigma)^2.$$

# Регуляризация Тихонова

**Функционал Тихонова:**

теоретический расчет

экспериментальные данные

$$M^\xi [f] = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left( \frac{\pi}{4} C_n l \int_0^\infty Q(\rho, m(\lambda)) f(D) D^2 dD - \tau^\delta(\lambda) \right)^2 d\lambda + \xi \int_0^\infty \left[ f^2(D) + (f'(D))^2 \right] dD$$

НЕВЯЗКА СТАБИЛИЗИРУЮЩИЙ МНОЖИТЕЛЬ

$C_n$  - счетная концентрация;

$l$  - длина оптического пути;

$Q(\rho, m(\lambda))$  - фактор эффективности ослабления;

$m(\lambda)$  - комплексный показатель преломления материала частиц;

$\rho = \frac{\pi D}{\lambda}$  - безразмерный параметр дифракции;

$\xi$  - параметр регуляризации.

Выбор параметра регуляризации осуществляется по «обобщенной невязке» методом L-кривой

$$\xi_k = \xi_0 q^k, \quad q > 0 \quad k \in [0..K]$$

**Условия корректно поставленной задачи по Адамару:**

- 1) Решение существует
- 2) Решение единственно
- 3) Малое изменение  $\tau^\delta(\lambda)$  соответствует малому изменению  $f(D)$

# Методика определения D32

Спектральная оптическая плотность слоя равномерно распределенных полидисперсных частиц

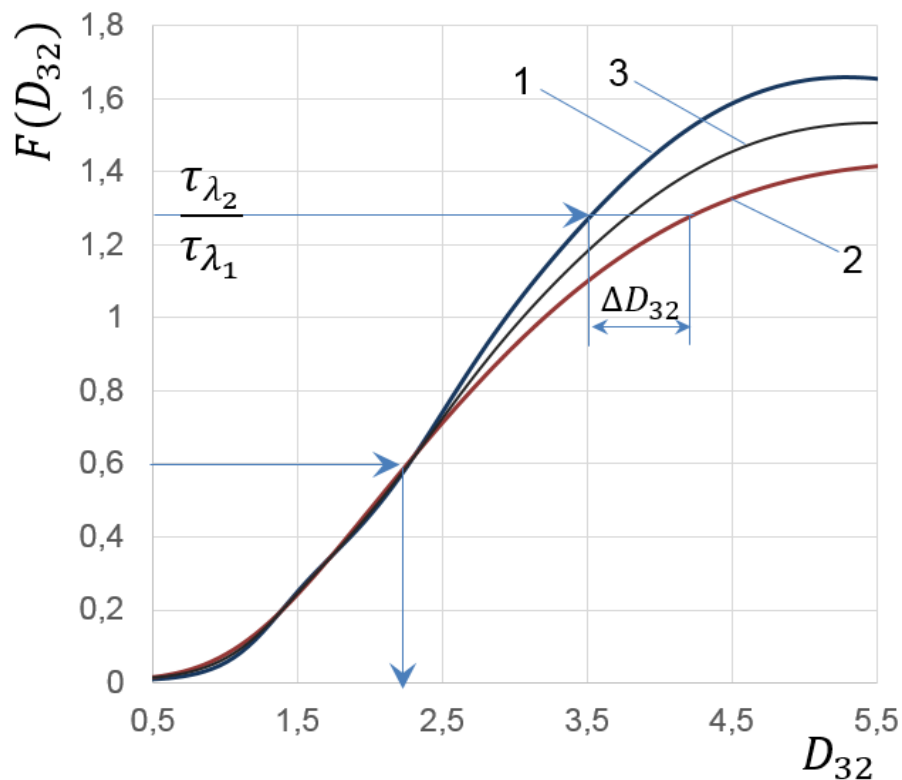
$$\tau_\lambda = \frac{3C_m l \bar{Q}(\lambda, D_{32})}{2\rho_p D_{32}} \quad C_m - \text{массовая концентрация;}$$

$$\bar{Q}(\lambda, D_{32}) = \frac{\int_0^\infty Q(\pi D / \lambda, m(\lambda)) f(D) D^2 dD}{\int_0^\infty f(D) D^2 dD} - \text{усредненный фактор эффективности ослабления.}$$

теоретический расчет

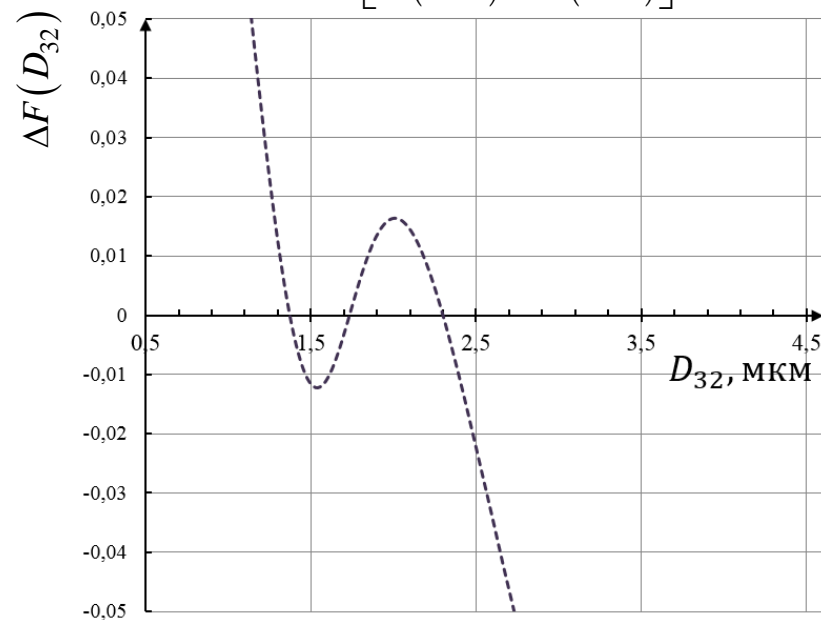
$$\frac{\tau_{\lambda_2}}{\tau_{\lambda_1}} = \frac{\bar{Q}(\lambda_2, D_{32})}{\bar{Q}(\lambda_1, D_{32})} = F(D_{32}).$$

экспериментальные данные



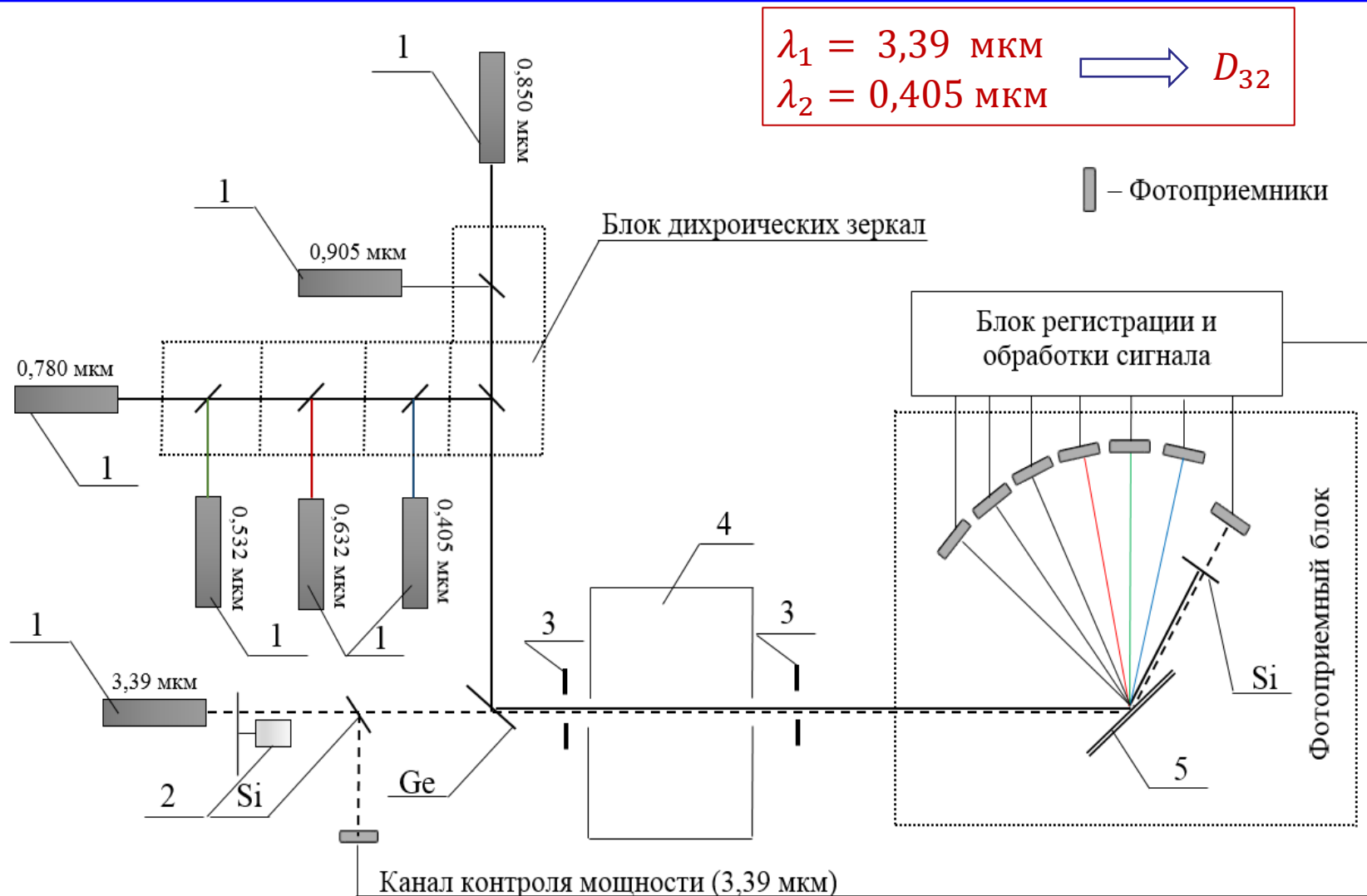
1 - ЛНР для  $\sigma = 1,2$ ; 2 - ЛНР для  $\sigma = 1,6$ ; 3 - среднее  
Зависимости для ЛНР с различной шириной распределения

$$\Delta F(D_{32}) = \frac{F(D_{32}^{1,2}) - F(D_{32}^{1,5})}{[F(D_{32}^{1,2}) + F(D_{32}^{1,5})] / 2}$$



Зависимости относительного отклонения  $\Delta F(D_{32})$   
для длин волн 3,39 мкм и 0,405 мкм

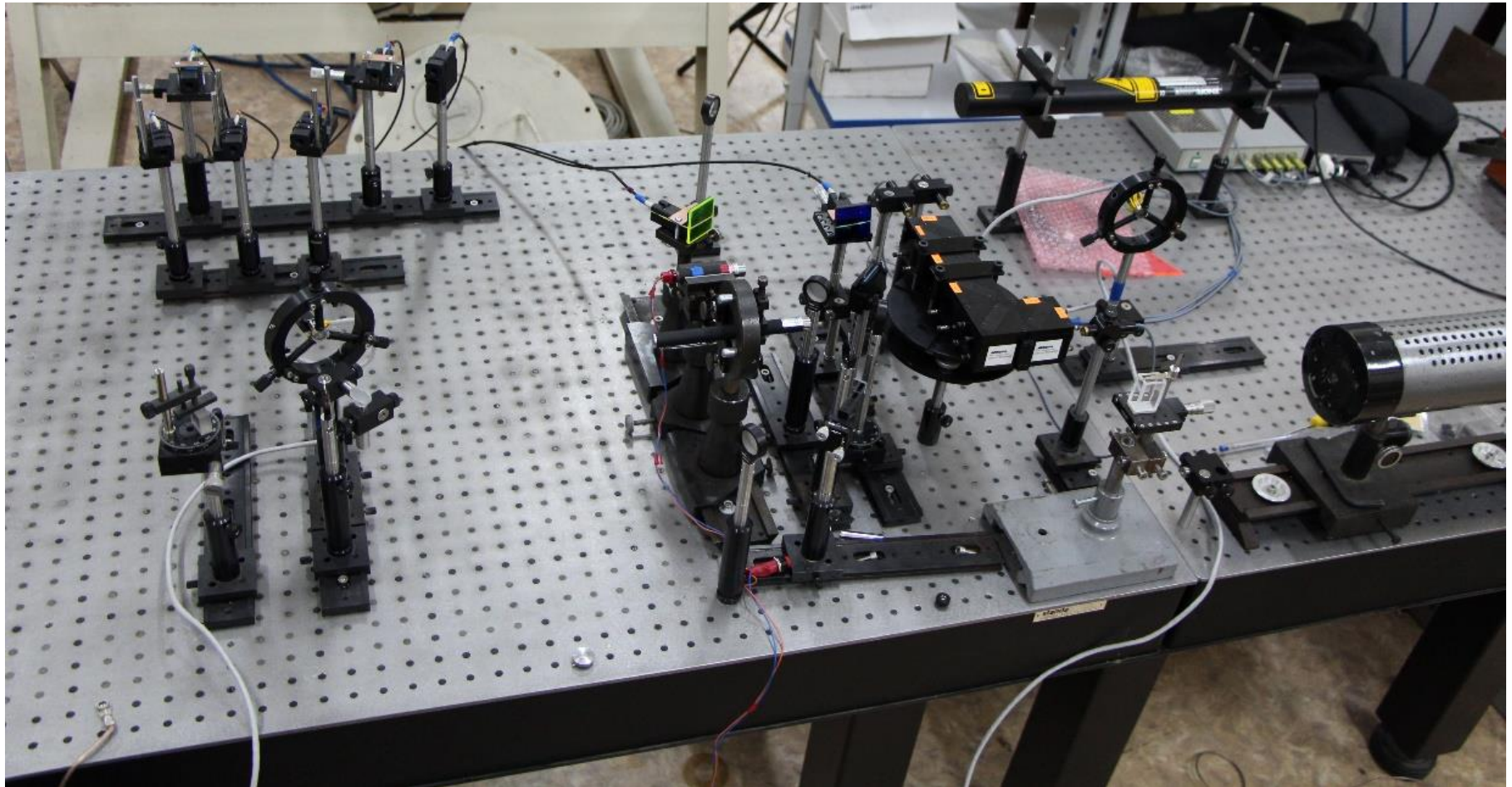
# Структурная схема экспериментальной установки



- 1 – источники лазерного излучения; 2 – механический модулятор;  
3 – диафрагмы; 4 – измерительный объем; 5 – дифракционная решетка;

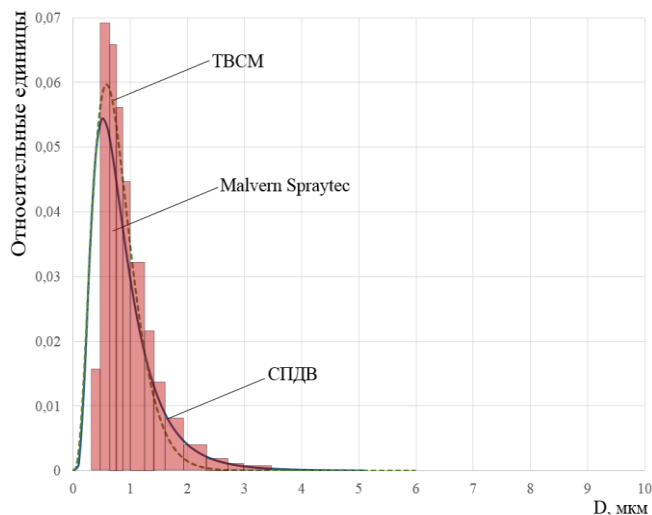


# Внешний вид экспериментальной установки

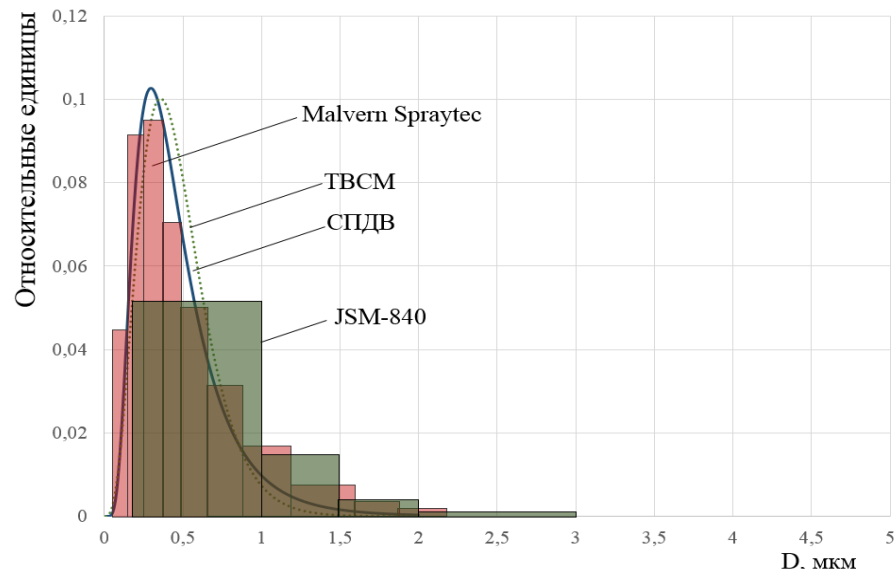


Внешний вид разработанной экспериментальной установки определения дисперсных характеристик

# Верификация разработанного метода



Функции распределения частиц по размерам водных суспензии из частиц оксида титана



Функции распределения частиц по размерам водных суспензии из частиц оксида алюминия

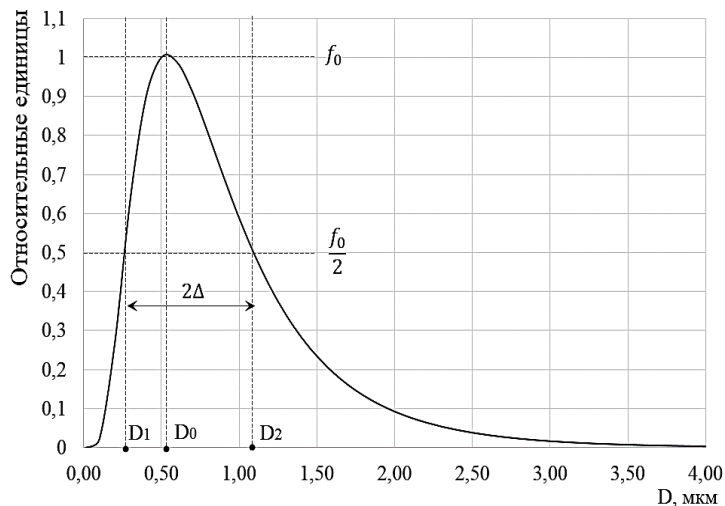


Рисунок 7 – Геометрические характеристики функции распределения частиц по размерам

Геометрические характеристики унимодального распределения частиц по размерам:

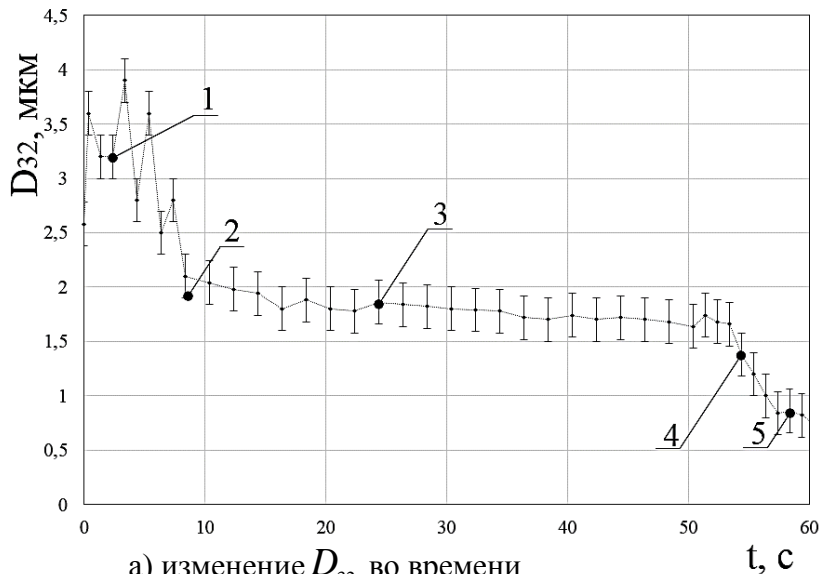
- модальный диаметр  $D_0$  ;
- полуширина распределения  $\Delta$ ;

- асимметрия  $\varepsilon = \frac{D_0 - D_1}{2\Delta}$ .

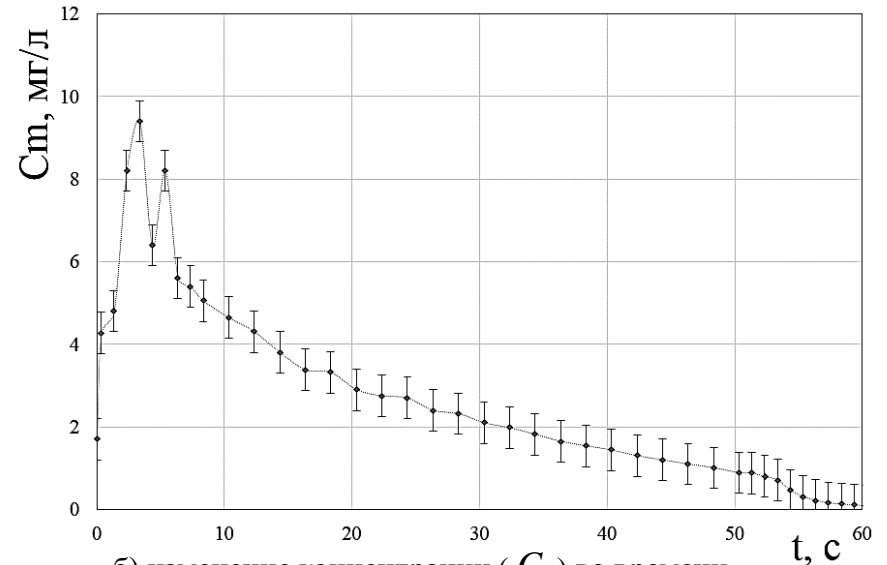
TiO <sub>2</sub>	$D_0$	$\Delta$	$\varepsilon$
Spraytec	0,640	0,350	0,286
СПДВ	0,505	0,420	0,292
Относительная погрешность	0,21	0,20	0,02

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$D_0$	$\Delta$	$\varepsilon$
Spraytec	0,281	0,205	0,353
СПДВ	0,302	0,215	0,295
Относительная погрешность	0,075	0,05	0,20

# Исследование динамики двухфазных сред

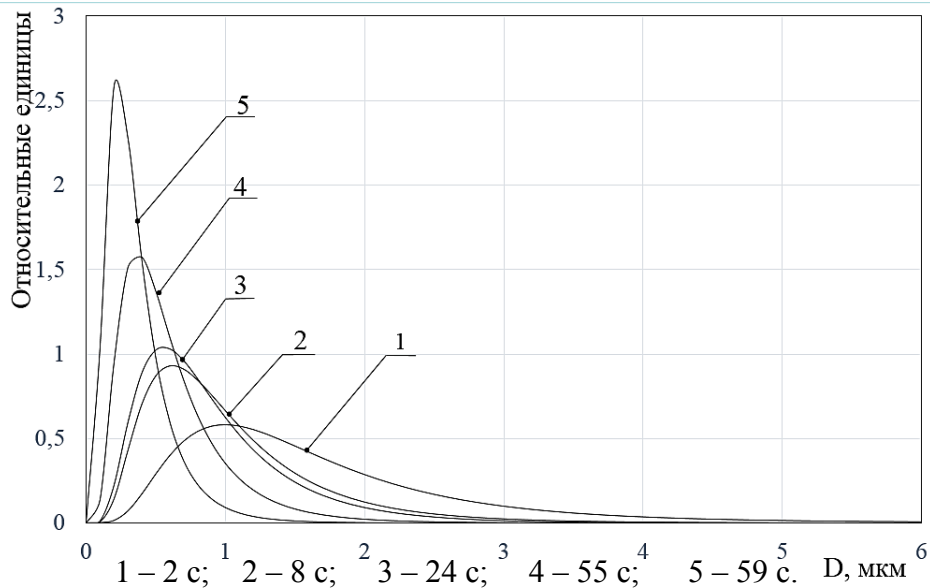


а) изменение  $D_{32}$  во времени



б) изменение концентрации ( $C_m$ ) во времени

Зависимость изменения параметров водного аэрозоля во времени в измерительном объеме



Функции распределения частиц по размерам водного аэрозоля

Массовая концентрация частиц:

$$C_m(t) = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{\tau_{\lambda}^{\text{эксн}} \rho_p D_{32}(t)}{1,5I\bar{Q}(\lambda, D_{32})}$$

$\rho_p$  - плотность материала частиц.