



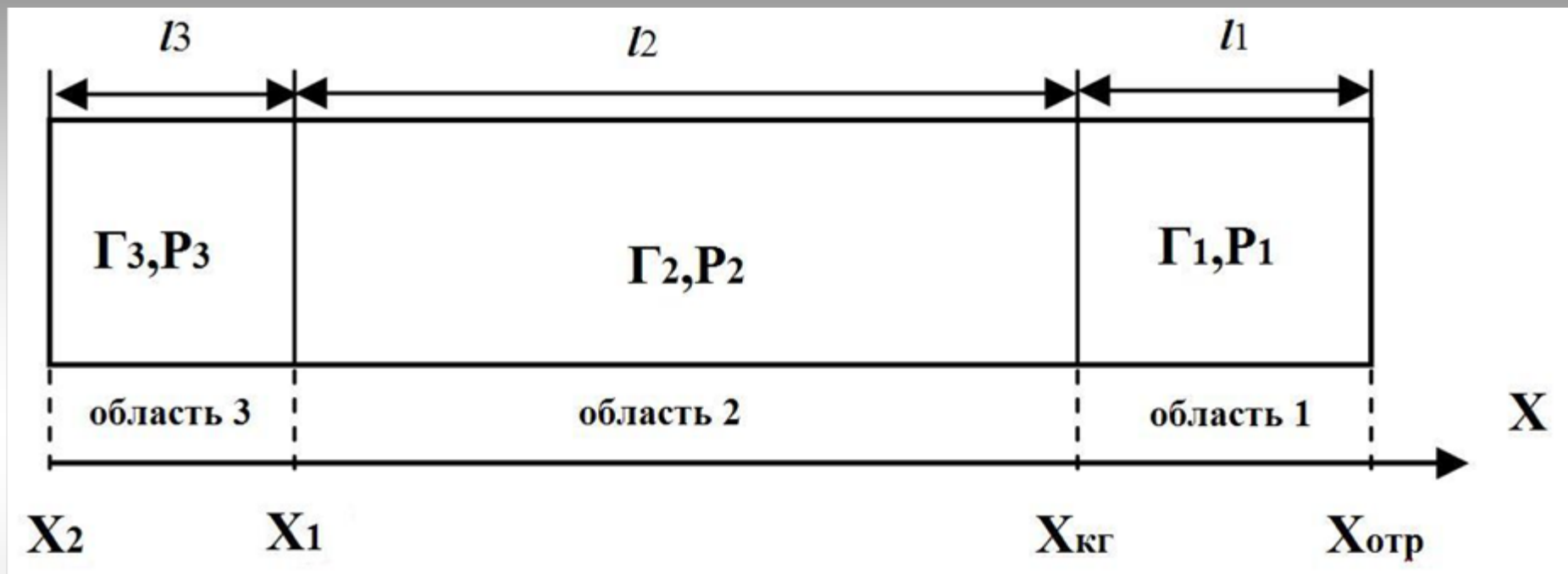
ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ “РОСАТОМ”

Исследование гетерогенности в зоне турбулентного перемешивания с высокими числами Рейнольдса в отраженной ударной волне

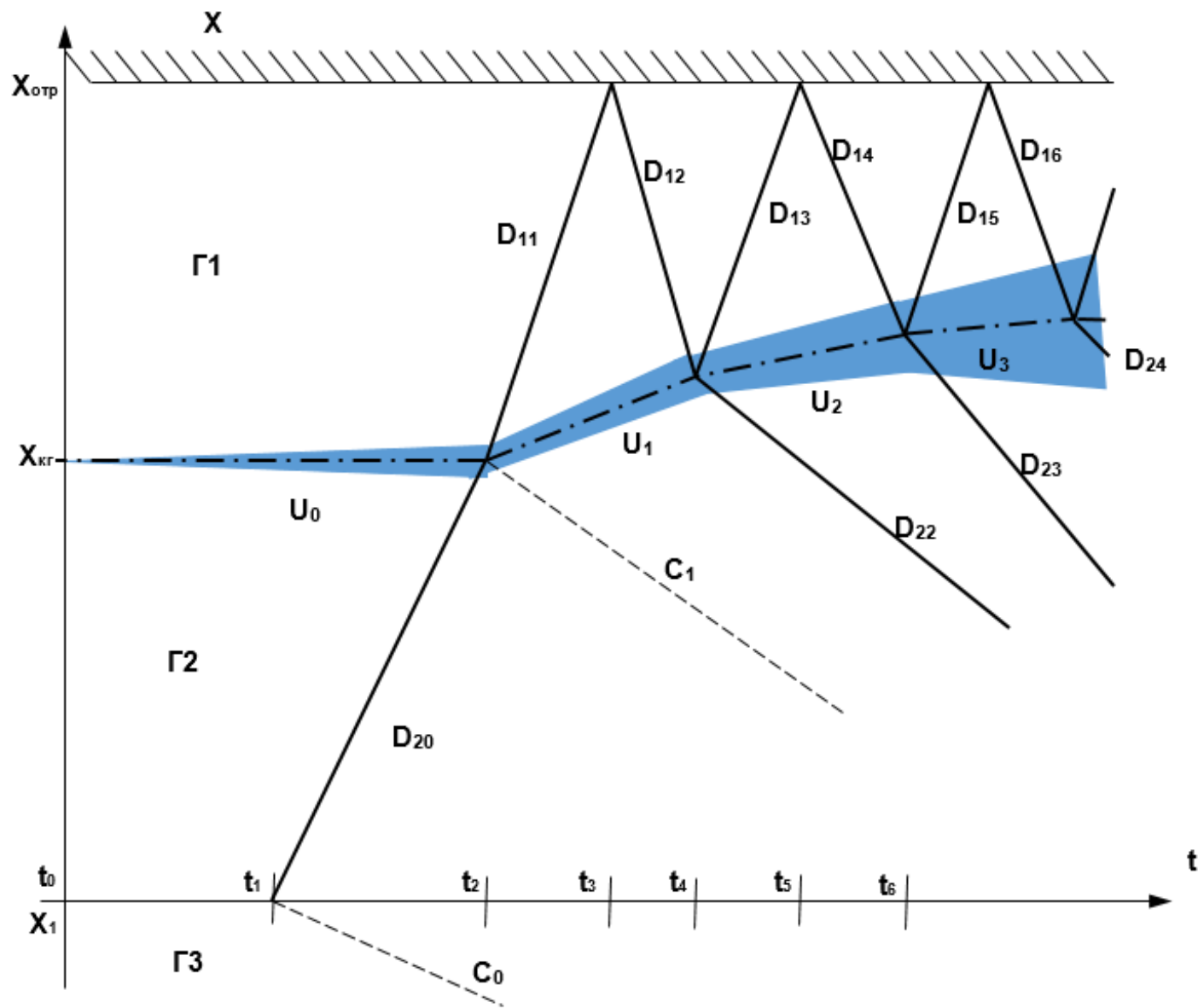
О.Е. Шестаченко, А.В. Павленко, А.М. Андреев, Е.В. Свиридов

*Международная конференция «XIII Забабахинские Научные Чтения»
20 - 24 марта 2017*

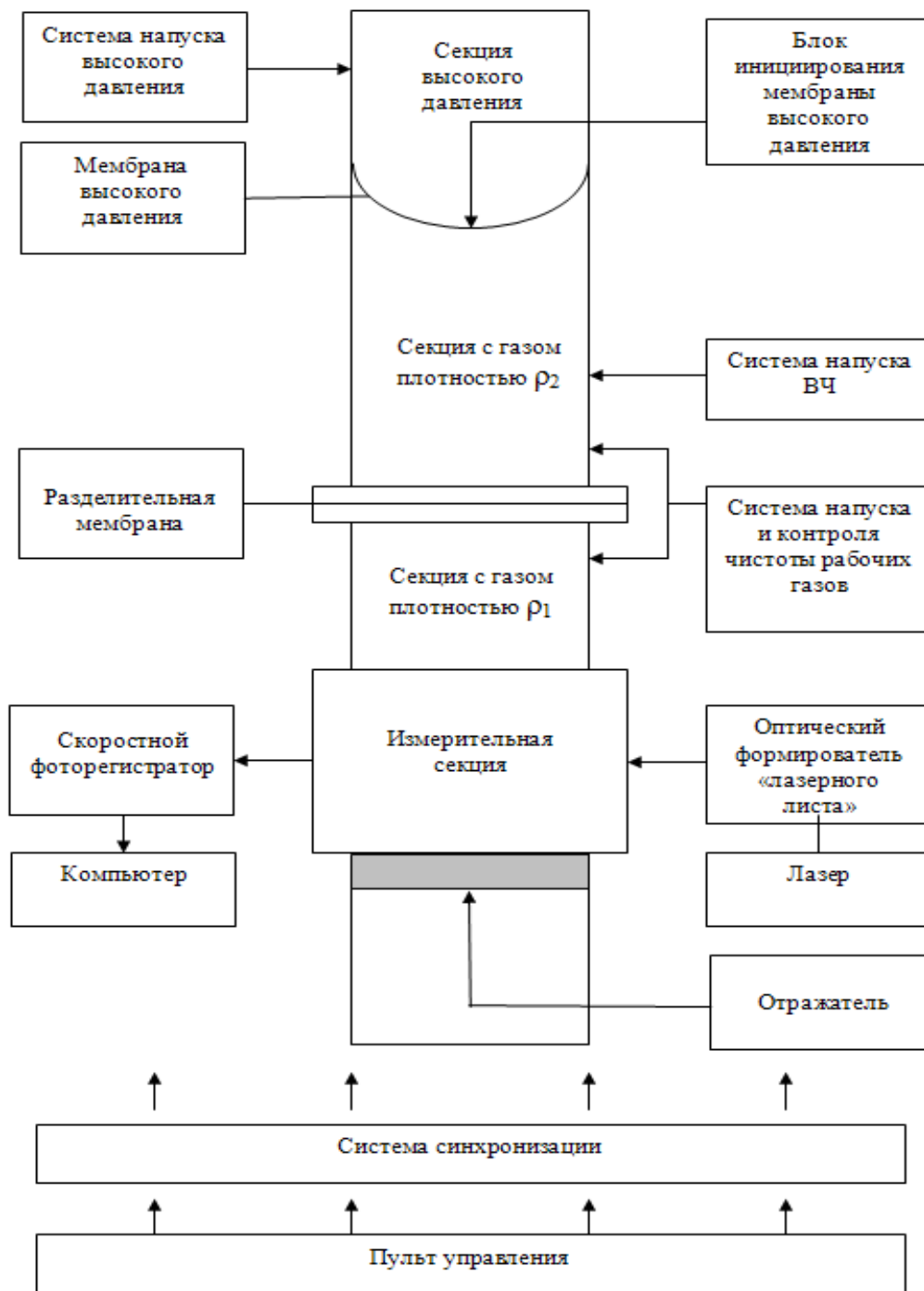
г.Снежинск



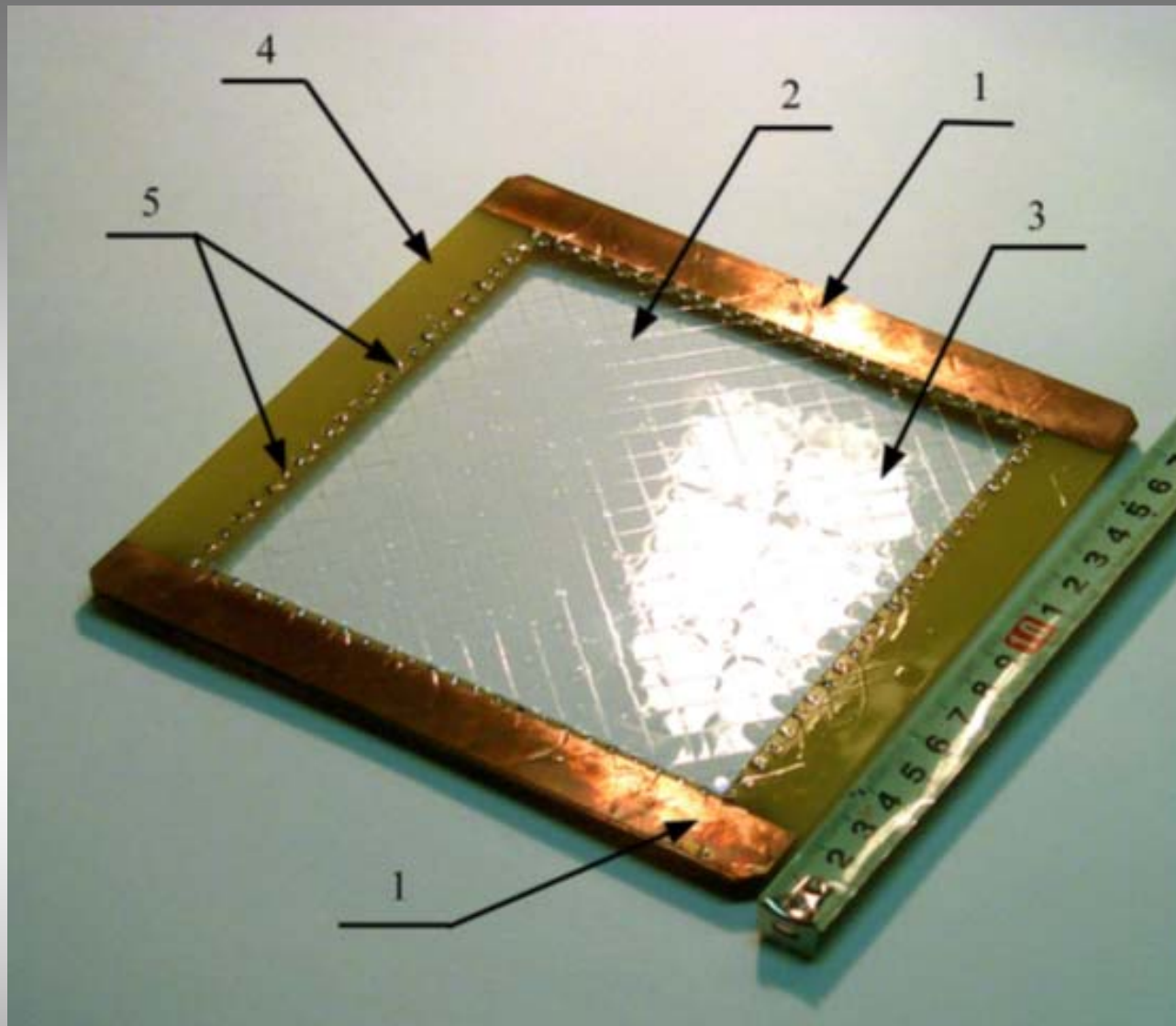
Физическая схема проведения экспериментов



X – T диаграмма волновых процессов

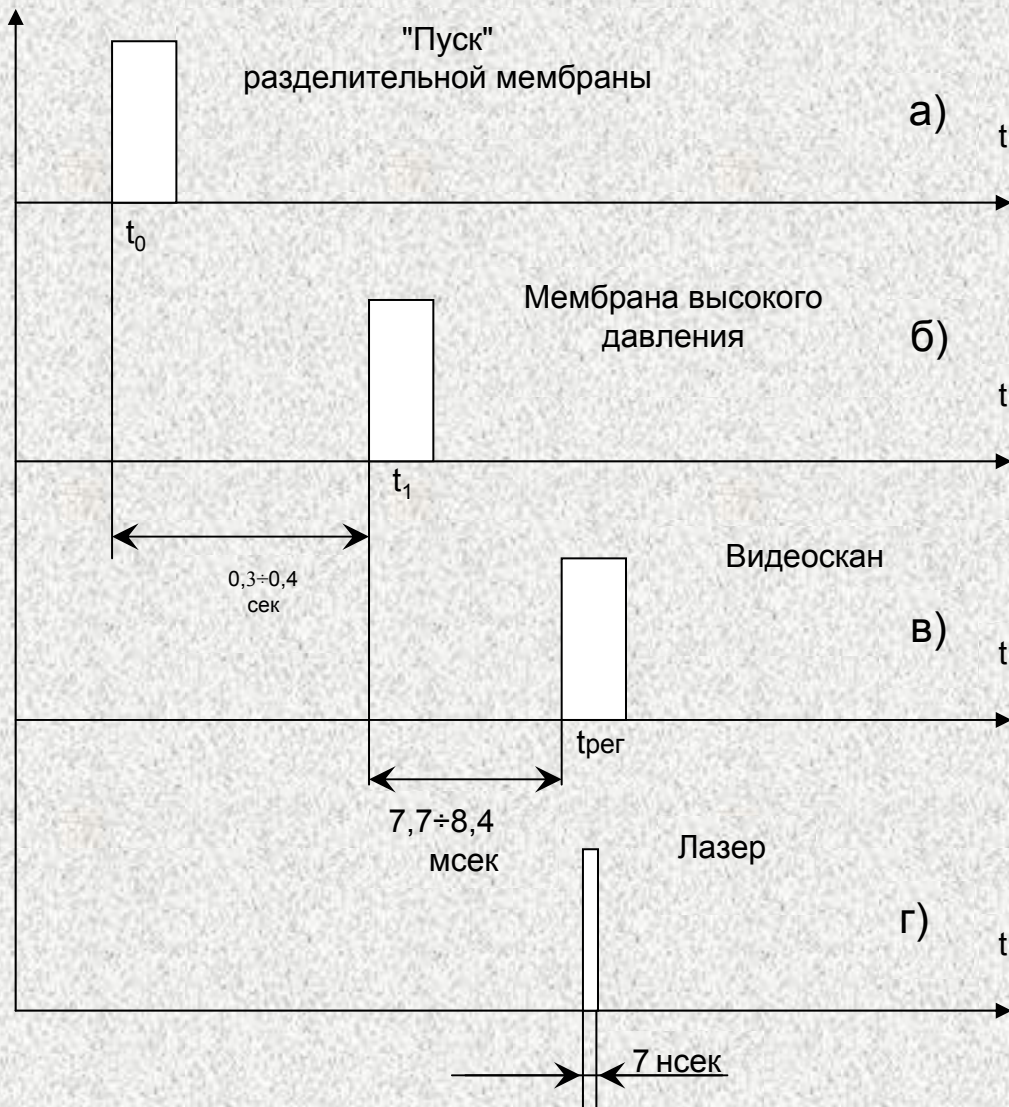


Функциональная схема проведения экспериментов



- 1) Токопроводящие электроды
- 2) Медные микропроводники
- 3) Жидкая пленка
- 4) Стеклотекстолит
- 5) Точки крепления

Внешний вид разделительной мембраны



Временная диаграмма
системы синхронизации

Экспериментальные результаты

В данной работе использовались две пары разноплотных газов:

углекислый газ **CO₂** – воздух **Air** (отношение плотностей $n = \rho_2 / \rho_1 = 1,5$,

число Атвуда $A = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1) = 0,2$)

(серия из 21 эксперимента)

и

аргон **Ar** - гелий **He** (отношение плотностей $n = 10$,

число Атвуда $A = 0,8$)

(серия из 20 экспериментов).

Первая ударная волна перед моментом взаимодействия с контактной границей ($t = t_2$) для числа Атвуда $A = 0,2$ имела следующие расчетные характеристики:

число Маха $M = 1,7$;

скорость фронта ударной волны $D = 467$ м/с;

массовая скорость за фронтом ударной волны $U = 269$ м/с;

плотность газа за ударной волной $\rho = 4,3$ кг/м³;

давление газа за ударной волной $P = 0,33$ МПа;

температура газа за ударной волной $T = 402$ К;

скорость звука за ударной волной $c = 315$ м/с.

Отраженная ударная волна перед моментом взаимодействия с контактной границей ($t = t_4$) для числа Атвуда $A = 0,2$ имела следующие расчетные характеристики:

число Маха $M = 1,5$;

скорость фронта ударной волны $D = 327$ м/с;

массовая скорость за фронтом ударной волны $U = 0$ м/с;

плотность газа за ударной волной $\rho = 4,7$ кг/м³;

давление газа за ударной волной $P = 0,75$ МПа;

температура газа за ударной волной $T = 553$ К;

скорость звука за ударной волной $c = 471$ м/с.

Первая ударная волна перед моментом взаимодействия с контактной границей ($t = t_2$) для числа Атвуда $A = 0,8$ имела следующие расчетные характеристики:

число Маха $M = 1,7$;

скорость фронта ударной волны $D = 518$ м/с;

массовая скорость за фронтом ударной волны $U = 240$ м/с;

плотность газа за ударной волной $\rho = 3,1$ кг/м³;

давление газа за ударной волной $P = 0,31$ МПа;

температура газа за ударной волной $T = 477$ К;

скорость звука за ударной волной $c = 406$ м/с.

Отраженная ударная волна перед моментом взаимодействия с контактной границей ($t = t_4$) для числа Атвуда $A = 0,8$ имела следующие расчетные характеристики:

число Маха $M = 1,24$;

скорость фронта ударной волны $D = 1033$ м/с;

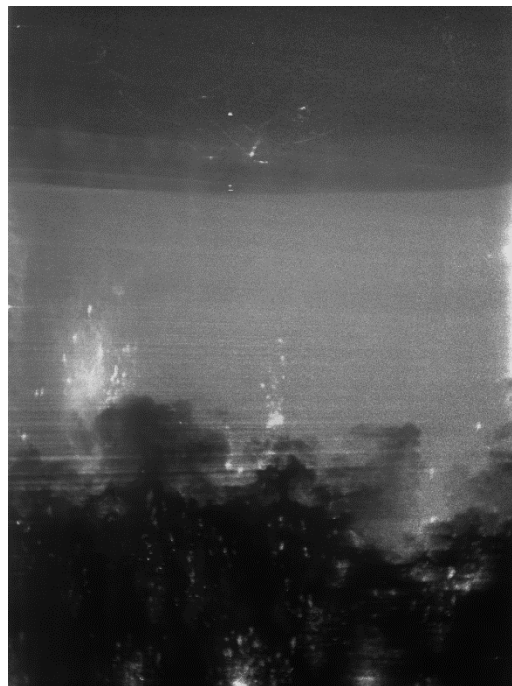
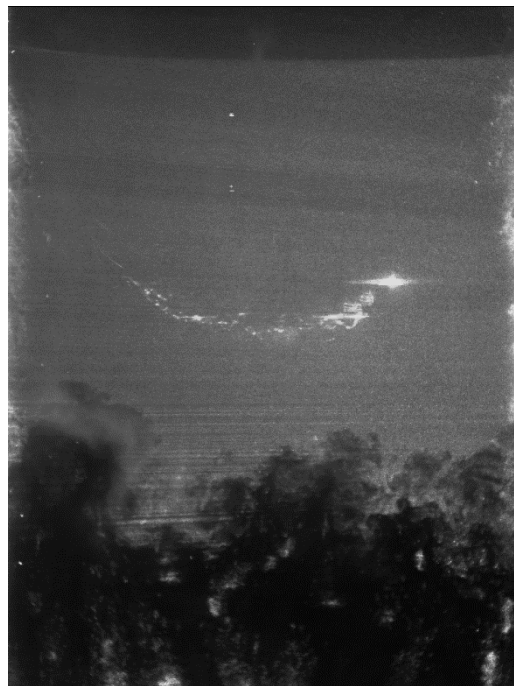
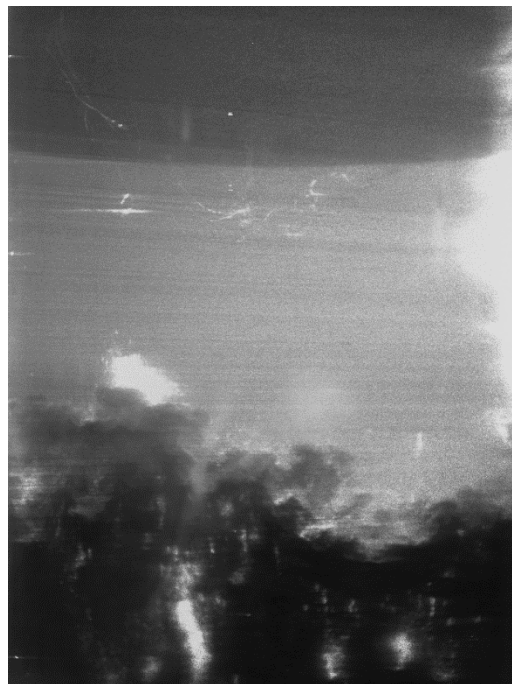
массовая скорость за фронтом ударной волны $U = 0$ м/с;

плотность газа за ударной волной $\rho = 0,31$ кг/м³;

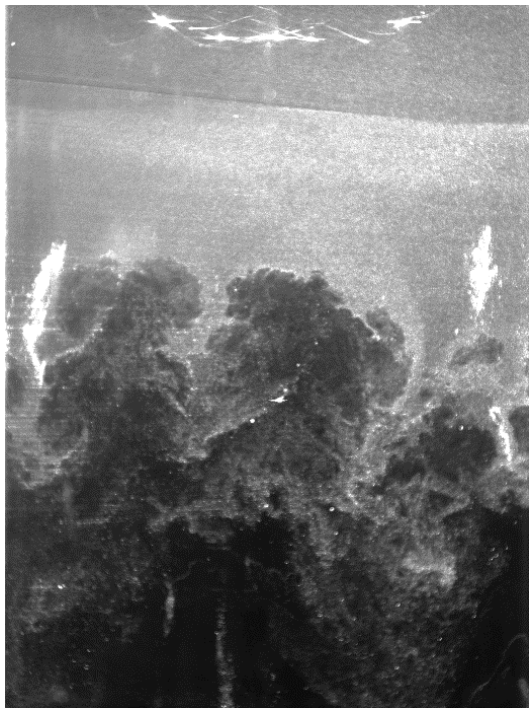
давление газа за ударной волной $P = 0,30$ МПа;

температура газа за ударной волной $T = 456$ К;

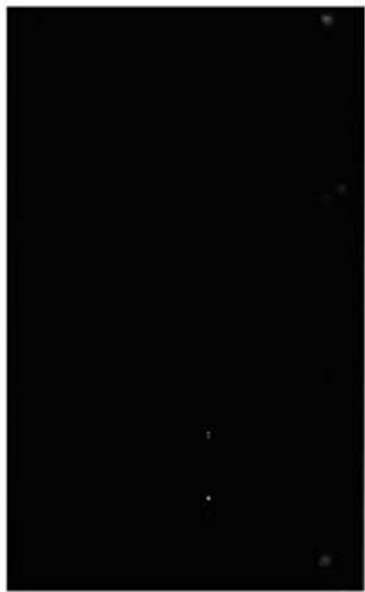
скорость звука за ударной волной $c = 1254$ м/с.



Характерные
фотоизображения
зоны турбулентного
перемешивания
в серии экспериментов
с числом Атвуда $A = 0,2$



Характерные
фотоизображения
зоны турбулентного
перемешивания
в серии экспериментов
с числом Атвуда $A = 0,8$



0 мг/л



0,22 мг/л



0,43 мг/л



0,87 мг/л

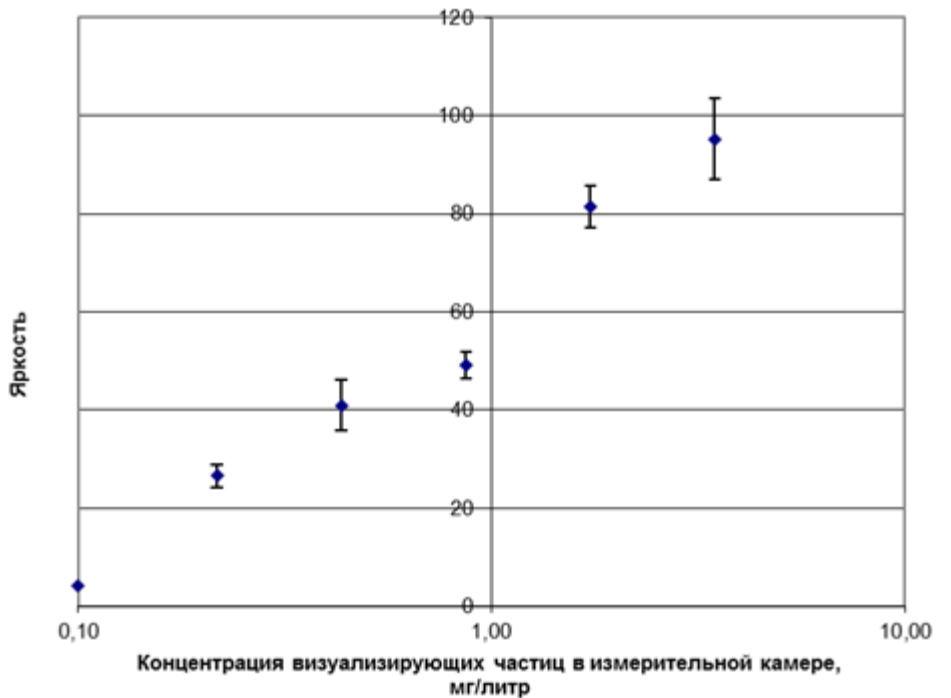


1,73 мг/л



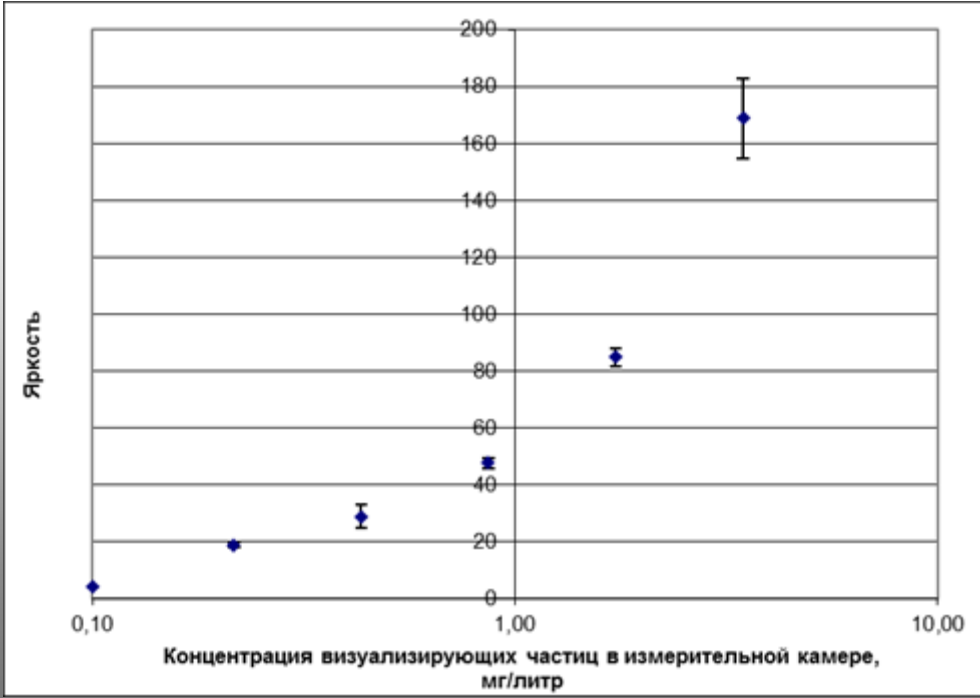
3,46 мг/л

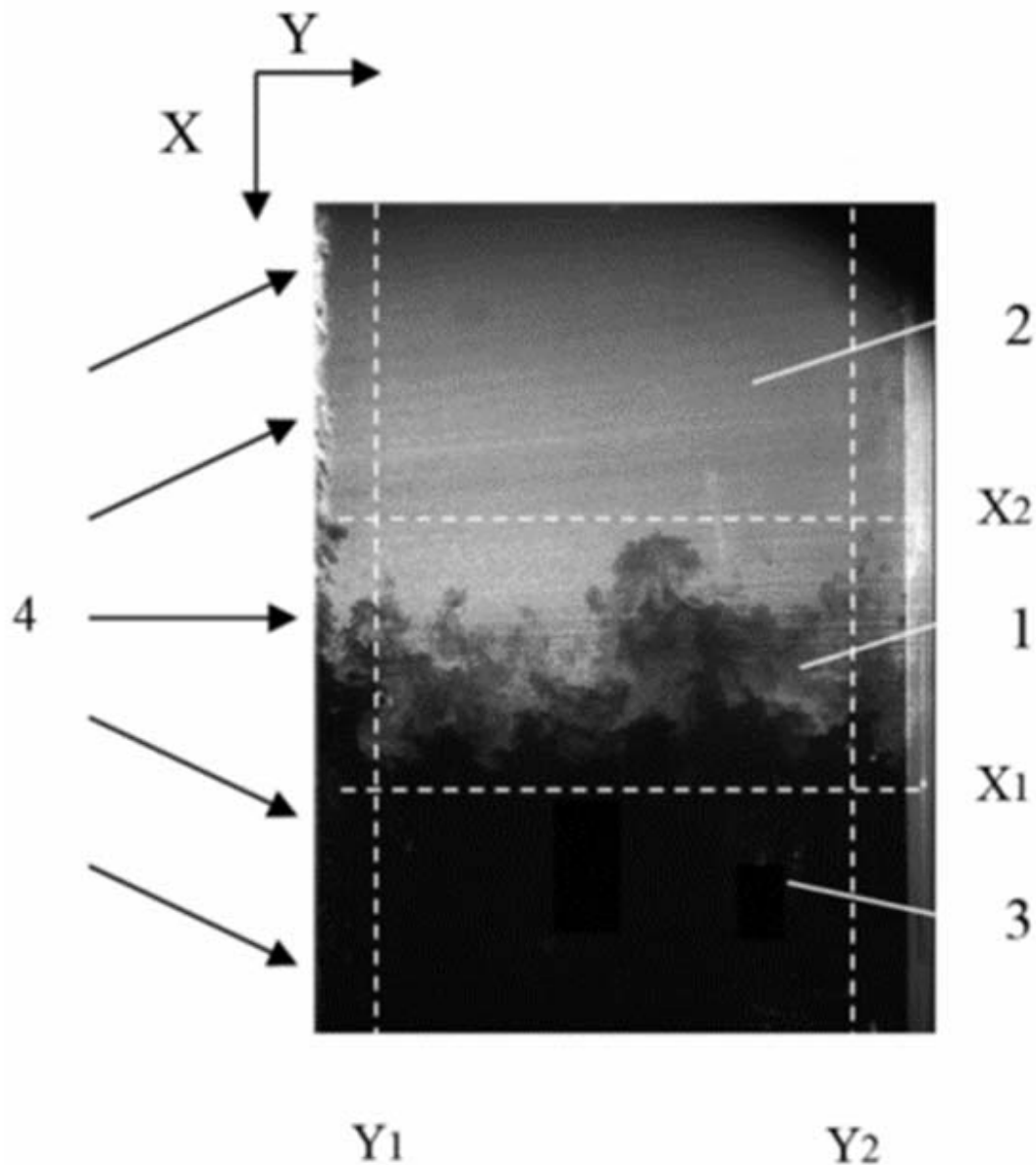
Калибровочные
фотоизображения
при различных концентрациях
визуализирующих частиц



Зависимость яркости
пикселей от
концентрации
визуализирующих частиц
в аргоне

Зависимость яркости
пикселей от
концентрации
визуализирующих частиц
в углекислом газе





1. Зона обработки.
2. Газ с визуализирующими частицами.
3. Газ без визуализирующих частиц.
4. Лазерное излучение.

Зона обработки фотоизображения

Алгоритм машинной программы обработки

- по калибровочным зависимостям яркость каждого пикселя $I(x,y)$ преобразуется в концентрацию визуализирующих частиц $n(x,y)$;

- была введена безразмерная координата ξ :

$$\xi = \frac{X1 - X}{X1 - X2}, \text{ где}$$

X-текущая координата, а X1 и X2- границы зоны обработки изображения;

- все значения концентрации визуализирующих частиц обезразмериваются по формуле $N(x,y) = (n_{MAX} - n(x,y))/(n_{MAX} - n_{MIN})$, где n_{MAX} – усредненная по зоне калибровки концентрация визуализирующих частиц, которая является максимально возможной концентрацией в текущем эксперименте;

- таким образом матрица $N(x,y)$ – это безразмерная плотность газовой смеси;

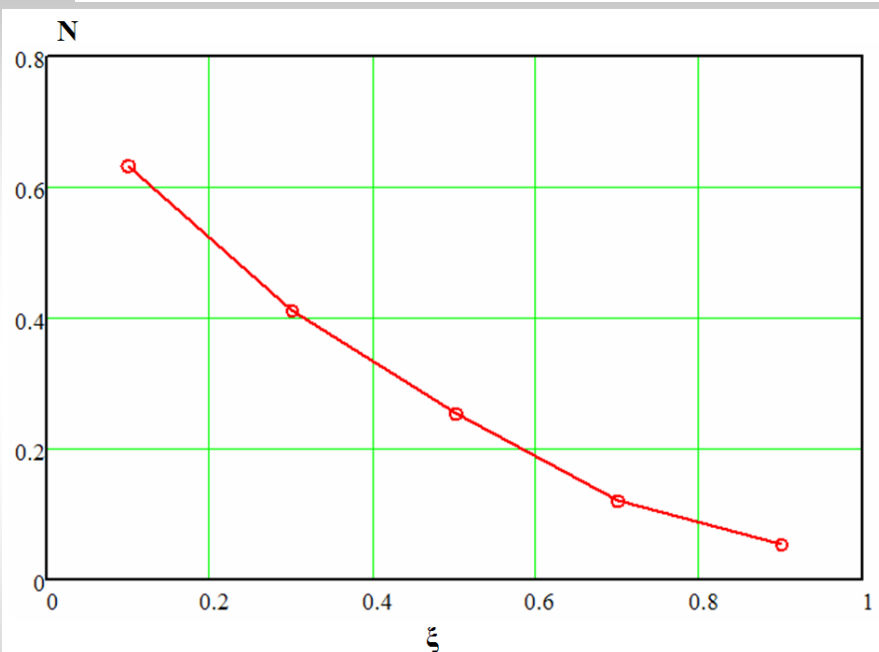
- вычисляется $\langle N \rangle$ - средняя плотность газовой смеси для текущего значения координаты Z;

- вычисляется матрица флуктуаций плотности смеси
 $N'(x,y) = N(x,y) - \langle N \rangle$;

- коэффициент гетерогенности Γ определялся согласно выражению:

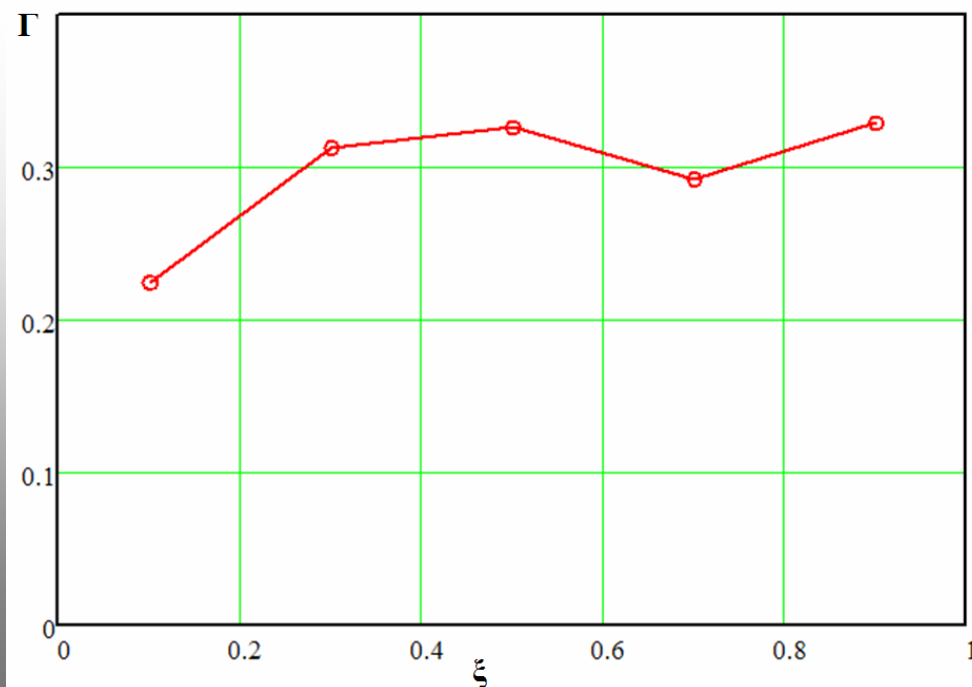
$$\Gamma = \langle N' N' \rangle / (\langle N \rangle (1 - \langle N \rangle)).$$

| | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|
| Безразмерная координата ξ | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,9 |
| Безразмерная плотность N | 0,63 | 0,41 | 0,26 | 0,12 | 0,06 |
| Коэффициент гетерогенности Γ | 0,22 | 0,31 | 0,33 | 0,29 | 0,33 |

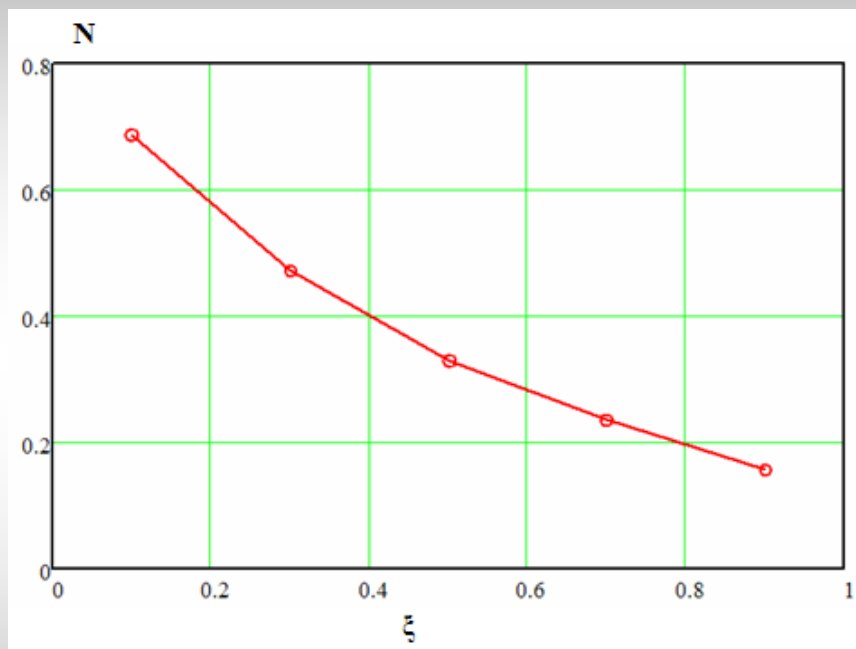


Зависимость коэффициента
гетерогенности от безразмерной
координаты ($A = 0,2$)

Зависимость безразмерной
плотности газовой смеси
от безразмерной координаты ($A = 0,2$)

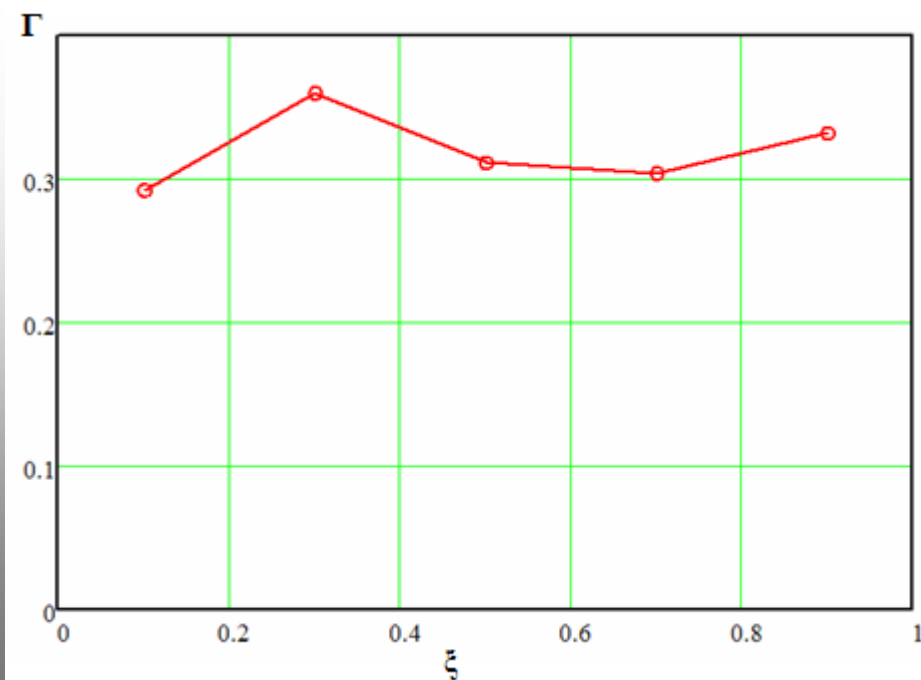


| | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|
| Безразмерная координата ξ | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,9 |
| Безразмерная плотность N | 0,69 | 0,47 | 0,33 | 0,24 | 0,16 |
| Коэффициент гетерогенности Γ | 0,29 | 0,36 | 0,31 | 0,30 | 0,33 |



Зависимость коэффициента
гетерогенности от безразмерной
координаты ($A = 0,8$)

Зависимость безразмерной
плотности газовой смеси
от безразмерной координаты ($A = 0,8$)



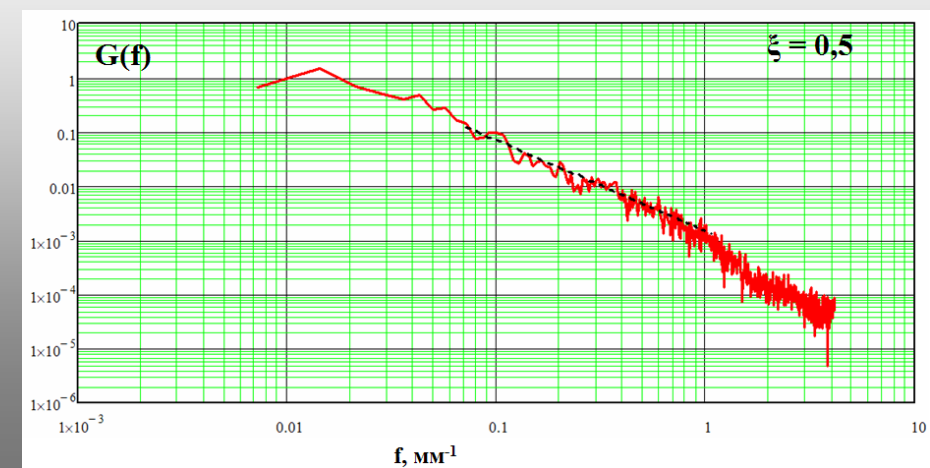
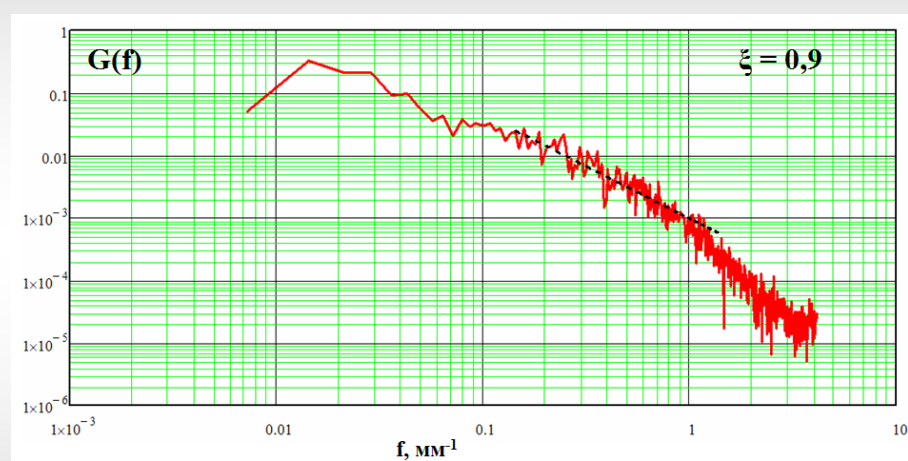
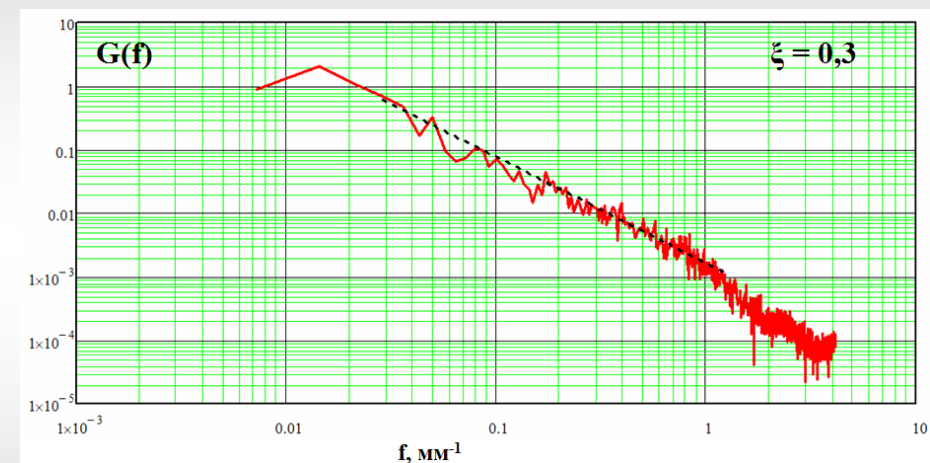
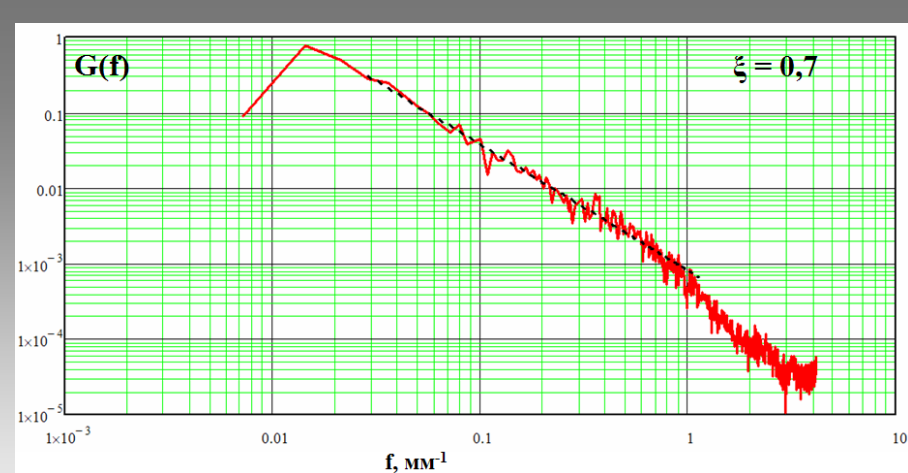
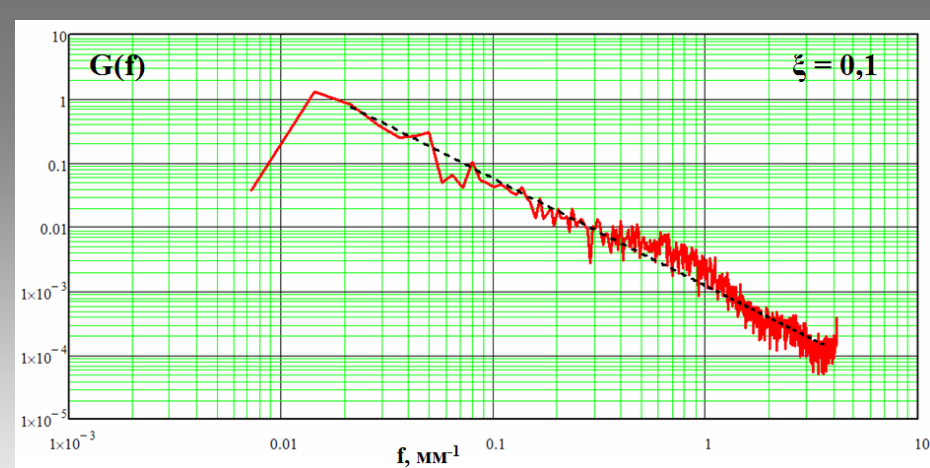
На заключительном этапе математической обработки вычисляется автокорреляционная функция $R(\xi, z^*)$:

$$R(\xi, z^*) = \frac{1}{Z_{\max} - z^*} \int_0^{Z_{\max} - z^*} N'(\xi, z) N'(\xi, z + z^*) dz$$

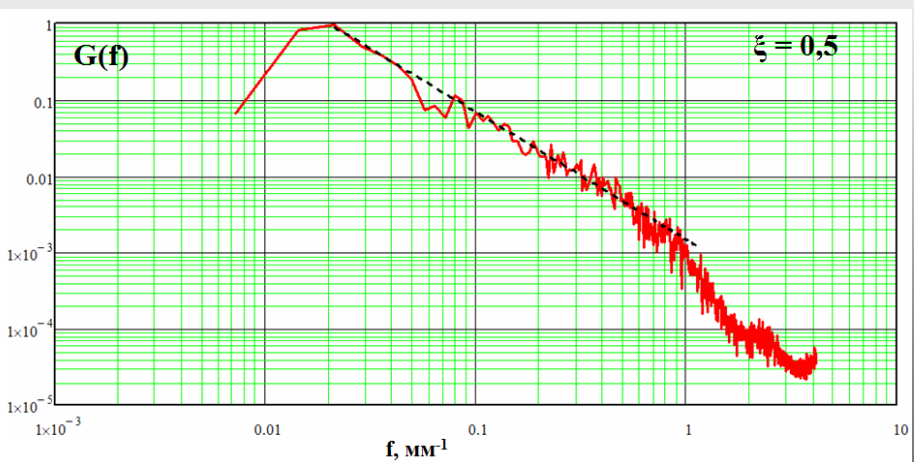
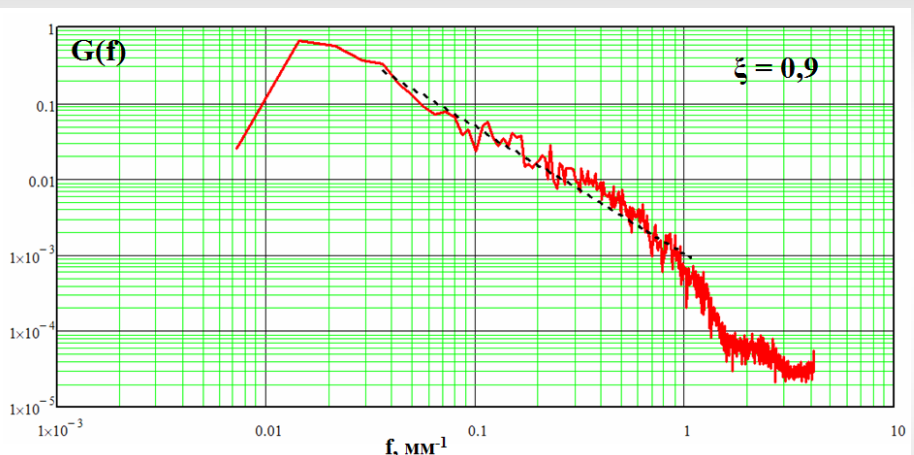
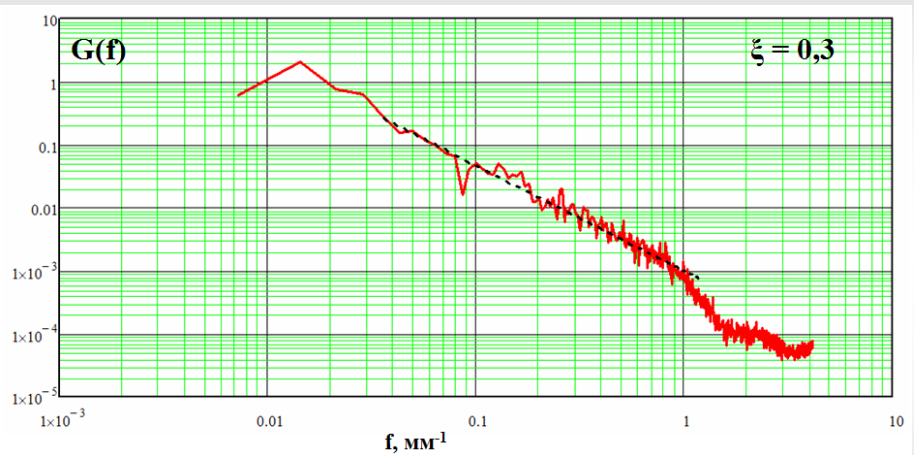
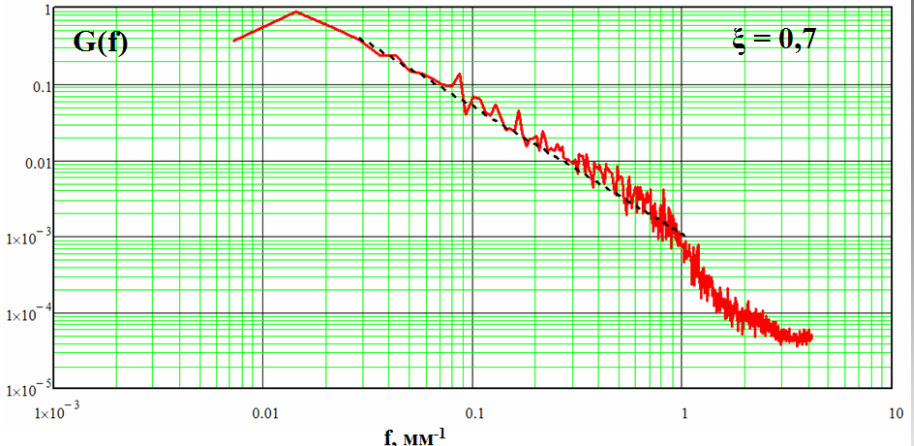
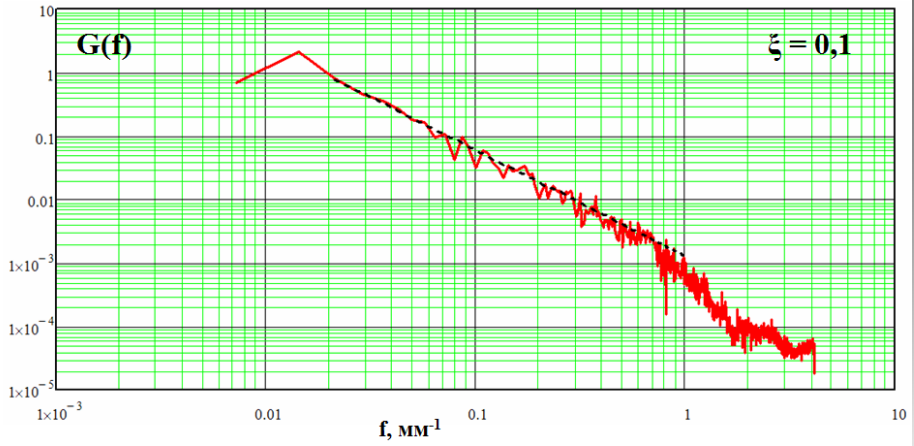
где z^* - интервал корреляции, а Z_{\max} - максимальная длина вектора Z для серии экспериментов. Интервал корреляции z^* был приравнен к половине ширины измерительной камеры ($z^* = 70$ мм), чтобы исключить из спектра длинноволновые составляющие, которые могли образоваться при объединении строк матрицы $N(x, y)$.

По полученным автокорреляционным функциям $R(\xi, z^*)$ вычислялась спектральная плотность флуктуаций безразмерной плотности $G(\xi, f)$:

$$G(\xi, f) = 4 \int R(\xi, z^*) \cos(2\pi f z^*) dz^*$$

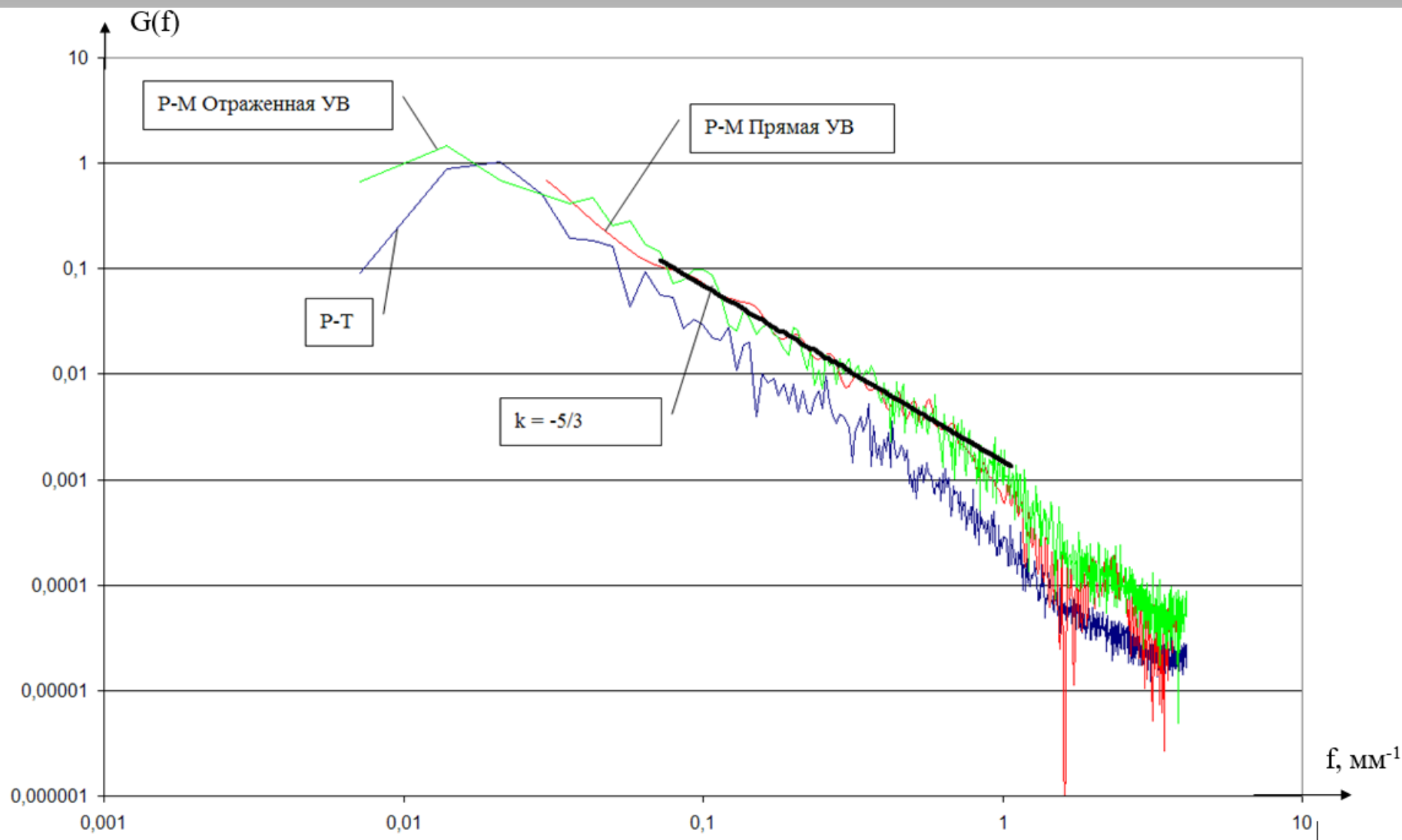


Спектры флуктуаций
безразмерной плотности
газовой смеси $G(f)$ для
безразмерной координаты ξ
для $A = 0,2$



Спектры флуктуаций
безразмерной плотности
газовой смеси $G(f)$ для
безразмерной координаты ξ
для $A = 0,8$

Сравнение спектров флуктуаций безразмерной плотности $G(f)$
для различных серий экспериментов
($A = 0,2$, $\xi = 0,5$)



Закключение

- Проведены эксперименты по исследованию гетерогенности в зоне турбулентного перемешивания, развивающегося вследствие действия неустойчивости Рихтмайера – Мешкова в отраженной ударной волне при высоких числах Рейнольдса ($Re \sim 10^5$). В качестве рабочих газов использовались воздух и углекислый газ (отношение плотностей $n = 1,5$, число Атвуда $A = 0,2$) и аргон – гелий (отношение плотностей $n = 10$, число Атвуда $A = 0,8$), разделенные тонкой жидкой мембраной. В заданный момент времени мембрана разрушается и на контактной границе разноплотных газов образуется первоначальный турбулизованный слой, который является зоной начальных возмущений для последующего взаимодействия с ударными волнами. При прохождении ударной волны через турбулизованный слой возникают условия для развития неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, и часть энергии ударной волны переходит в зону турбулентного перемешивания.
- Для визуализации зоны турбулентного перемешивания используется метод «лазерный лист», который позволяет исследовать внутреннюю структуру зоны перемешивания. Полученные фотоизображения с помощью калибровочных зависимостей преобразуются в матрицы концентраций визуализирующих частиц, а затем и в матрицы безразмерной плотности газовой смеси. Дальнейшая математическая обработка экспериментальных данных позволила получить профили безразмерной плотности и коэффициента гетерогенности зоны турбулентного перемешивания. Оказалось, что коэффициент гетерогенности остается примерно на одном уровне $\Gamma \approx 0,3$ для обеих серий экспериментов ($A = 0,2$ и $A = 0,8$) для всех сечений зоны перемешивания ($\xi = 0,1, \xi = 0,3, \xi = 0,5, \xi = 0,7, \xi = 0,9$).
- Кроме того, были вычислены спектры пульсаций безразмерной плотности газовой смеси для различных сечений зоны турбулентного перемешивания. Показано, что в каждом спектре имеется участок, который можно интерполировать степенной зависимостью с показателем степени $k = -5/3$. На таких участках происходит передача турбулентной энергии от крупномасштабных вихрей к мелкомасштабным вихрям и дальнейшая её диссипация.