



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

ПУЛЬСАЦИИ СКОРОСТИ ЖИДКОСТИ В ЗОНАХ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ НЕУСТОЙЧИВОСТЯХ РЭЛЕЯ – ТЕЙЛОРА И КЕЛЬВИНА – ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Авторы: Н.В. Невмержицкий, Е.Д. Сеньковский, Е.А. Сотсков, К.В. Анисифоров,
Е.В. Левкина, А.Е. Шкаева

Докладчик: Шкаева Алина Евгеньевна

Цель и актуальность

Актуальность работы :

Для тестирования современных численных методик по расчету турбулентного перемешивания в мишенях управляемого инерциального термоядерного синтеза необходимы экспериментальные данные о величинах пульсации скорости по всей ширине зоны перемешивания при гидродинамических неустойчивостях Рэля -Тейлора и Кельвина-Гельмгольца.

Цель работы :

Получение экспериментальных данных по величинам пульсации скорости в зоне турбулентного перемешивания, развивающегося при неустойчивостях Рэля – Тейлора и Кельвина – Гельмгольца на границе газ-жидкость с помощью аттестованной методики, основанной на принципе цифровой трассерной визуализации.

Неустойчивость Рэля-Тейлора, техника эксперимента



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

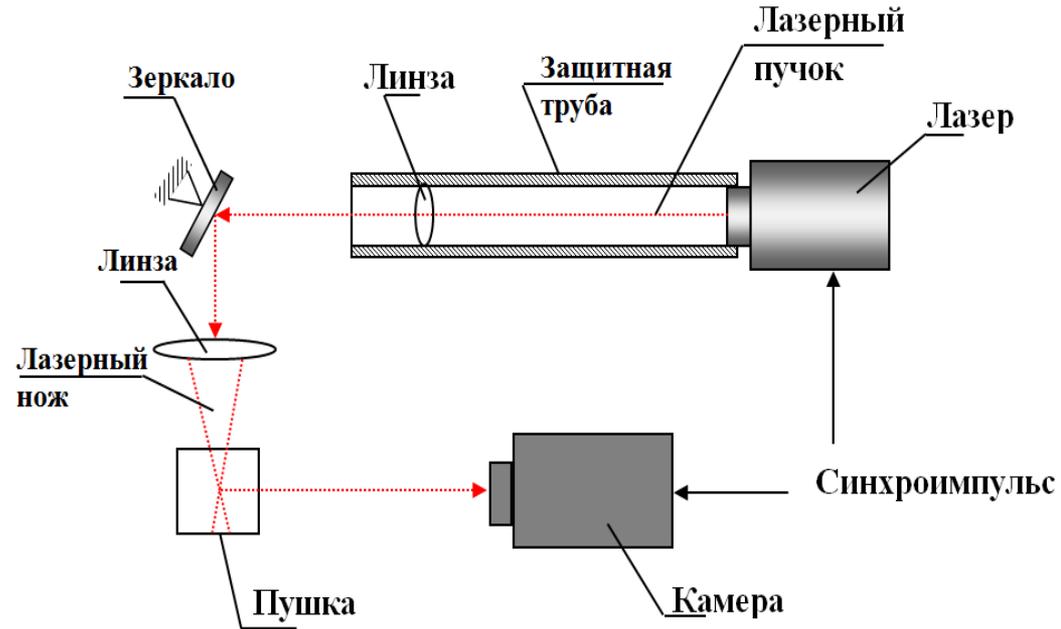
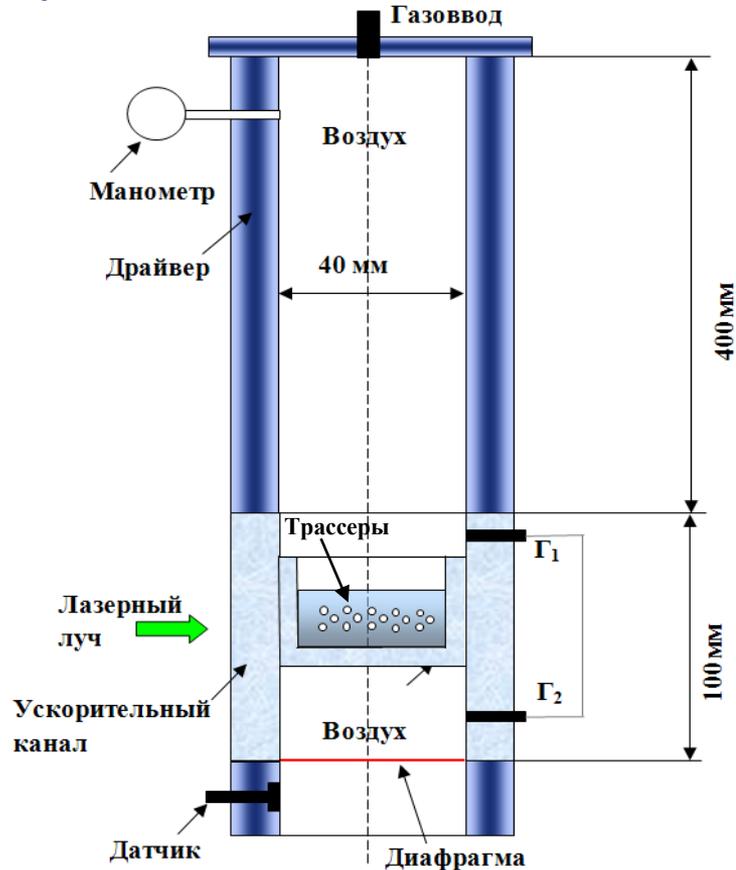


Схема видеорегистрации течения PIV-методом

Однокаскадная легкогазовая пушка

УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

№ Опыта	P, атм	m, г	S, мм	g, м/с ²	U _{ср} , м/с	ΔU _i , м/с	
						max.	ср.
1	3,8	22,4	20	1,4·10 ³ g ₀	11,7	19,79	8,6
2	3,8	24,8	20	1,4·10 ³ g ₀	9,6	17,8	6,8
3	3,8	24,8	20	1,4·10 ³ g ₀	9,6	14,35	7,3
4	3,8	24,8	20	1,4·10 ³ g ₀	5,01	11,55	3,7
Среднее значение					9	15,9	6,6
9	20	29	10	1,1·10 ⁴ g ₀	10,1	31,25	7,9
10	20	36	10	1,1·10 ⁴ g ₀	46	24,8	11,5
11	20	36	10	1,1·10 ⁴ g ₀	40	19,08	9,5
Среднее значение					32	25	9,6

$$U_i = \frac{\Delta Y}{\Delta t} = \frac{Y_{i-1} - Y_i}{t_{i-1} - t_i}$$

$$U_{ср.i} = \frac{\sum U_i}{n}$$

$$U_{ср} = \frac{\sum U_{ср.i}}{n}$$

$$|\Delta U_i| = U_{ср} - U_i$$

Примечание –

P – давление ускоряющего газа;

m – масса контейнера с жидкостью;

S – смещение контейнера на момент регистрации;

g – ускорение слоя жидкости;

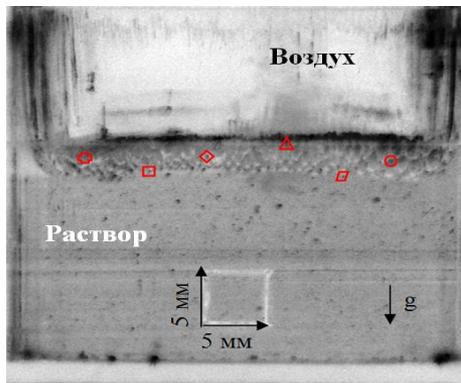
g₀ – 9,8 м/с²;

U_{ср} – средняя скорость движения трассеров;

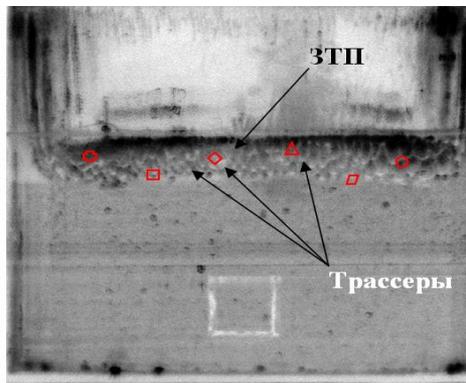
ΔU_i – пульсации скорости;

$$|\Delta U_{ср}| = \frac{\sum |\Delta U_i|}{n}$$

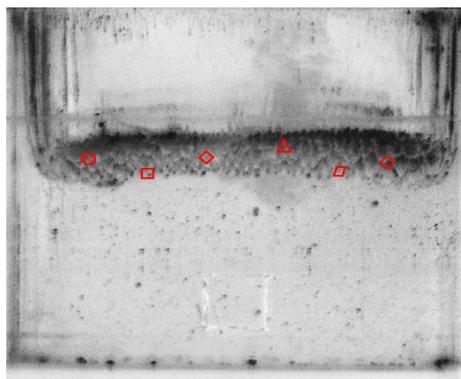
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ



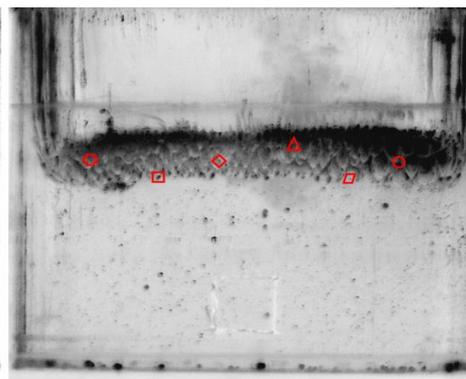
1800 мкс



1850 мкс

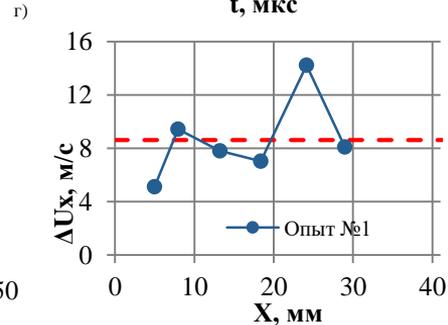
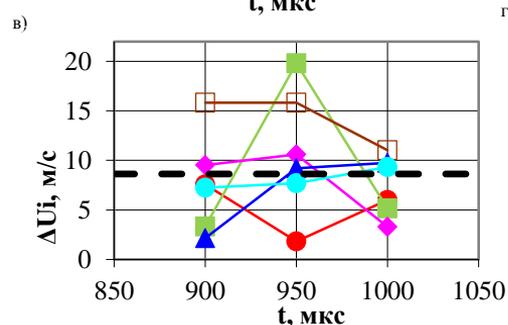
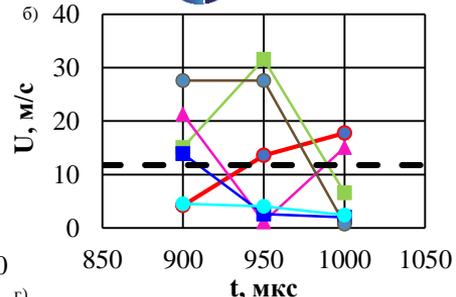
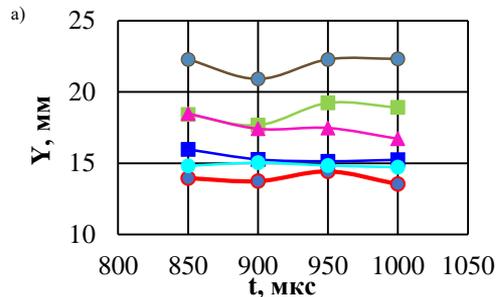


1900 мкс



1950 мкс

Развитие зоны ТП на границе воздух–раствор спирта в воде, опыт № 2, негатив



- а) график зависимости $Y(t)$; б) график зависимости $U(t)$;
- в) график зависимости $\Delta U_i(t)$;
- г) график зависимости $\Delta U_x(x)$;

Каждый трассер представлен одинаковым цветом и

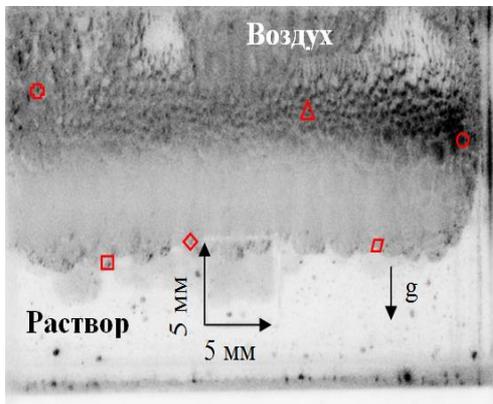
обозначается одинаковыми символами

Результаты обработки опыта № 2

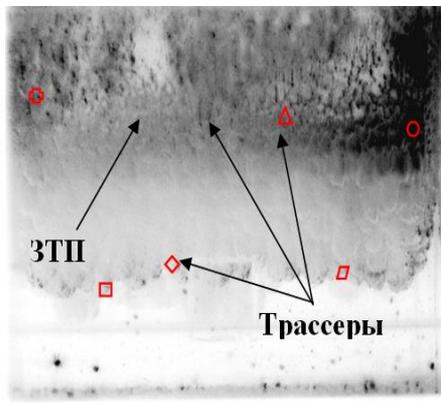
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ



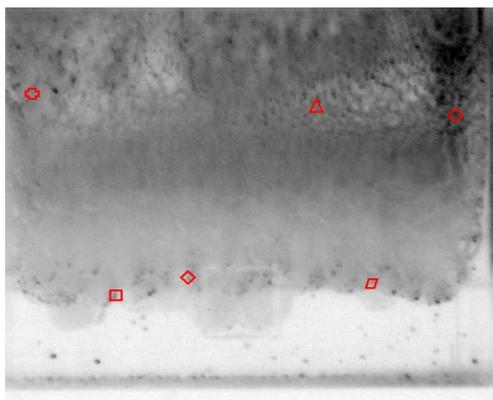
РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ



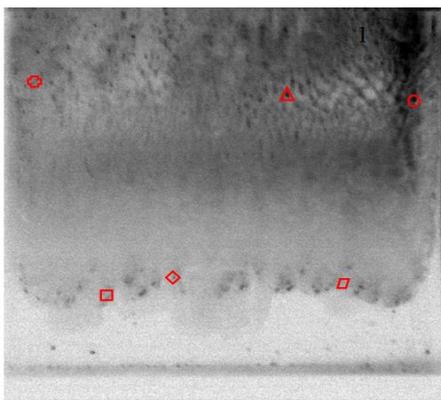
850 мкс



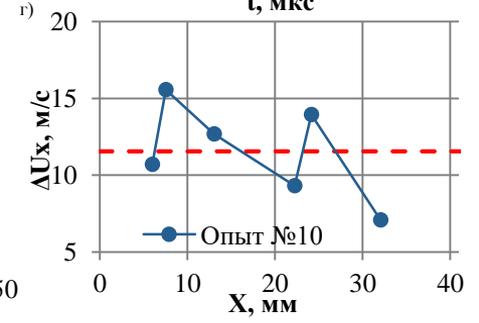
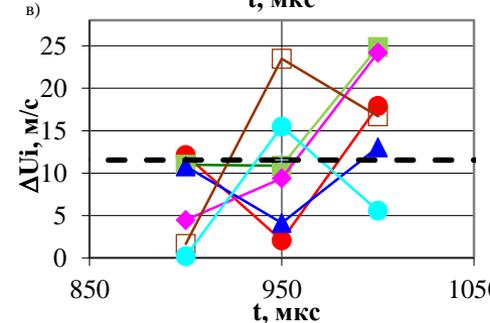
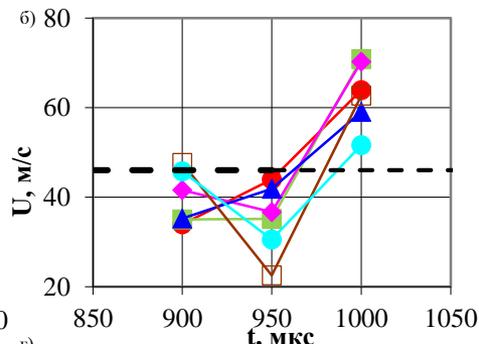
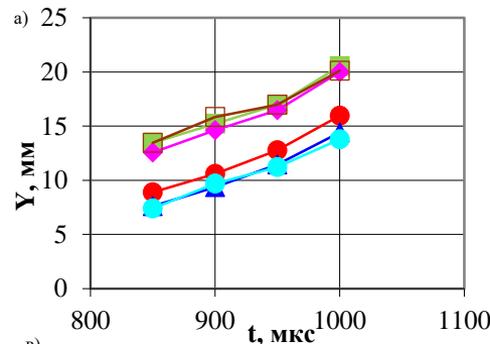
900 мкс



950 мкс



1000 мкс



а) график зависимости $Y(t)$; б) график зависимости $U(t)$;
в) график зависимости $\Delta U_i(t)$;
г) график зависимости $\Delta U_x(x)$;

Каждый трассер представлен одинаковым цветом и обозначается одинаковыми символами

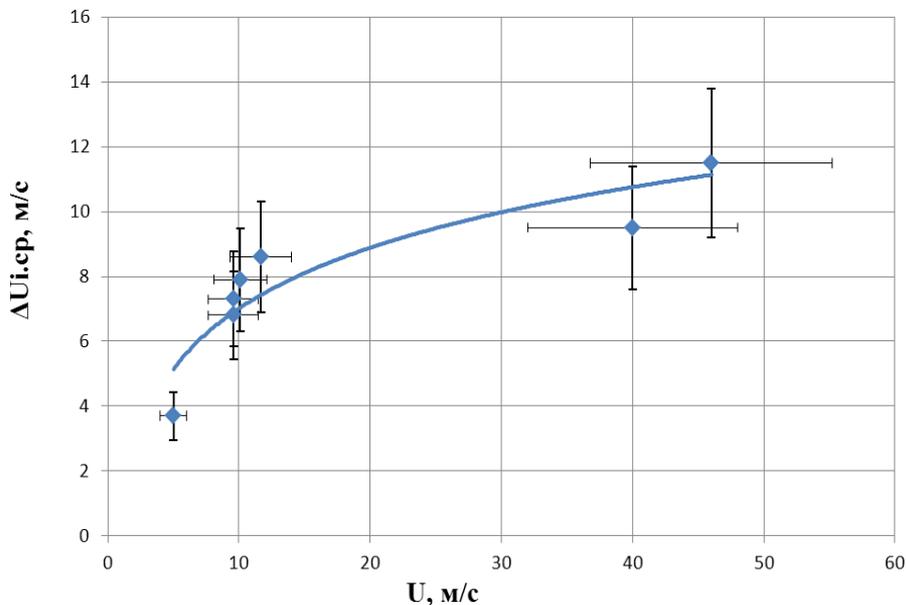
Результаты обработки опыта № 10

Развитие зоны ТП на границе воздух–раствор спирта в воде, опыт № 10, негатив

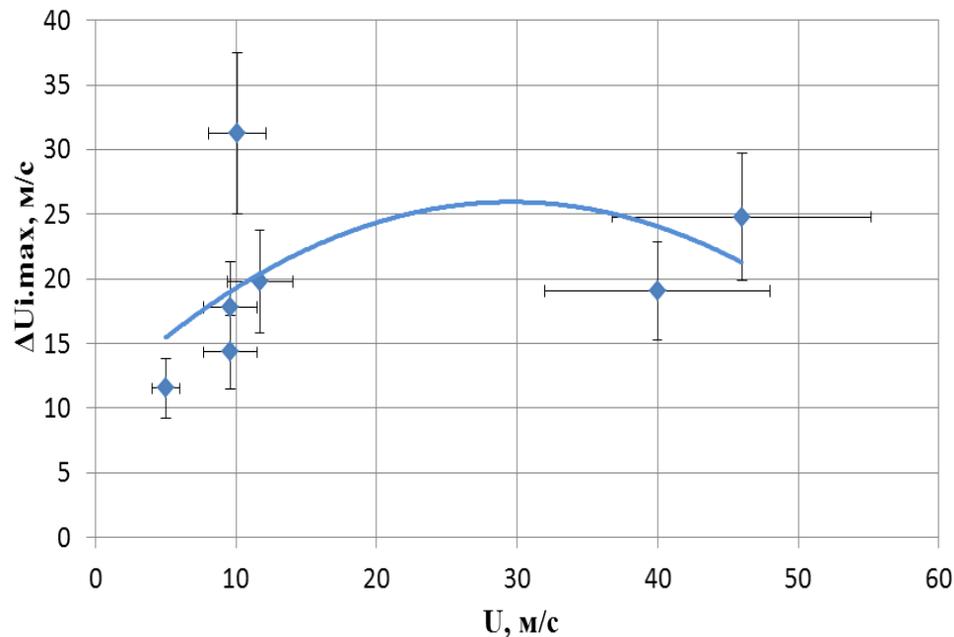
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

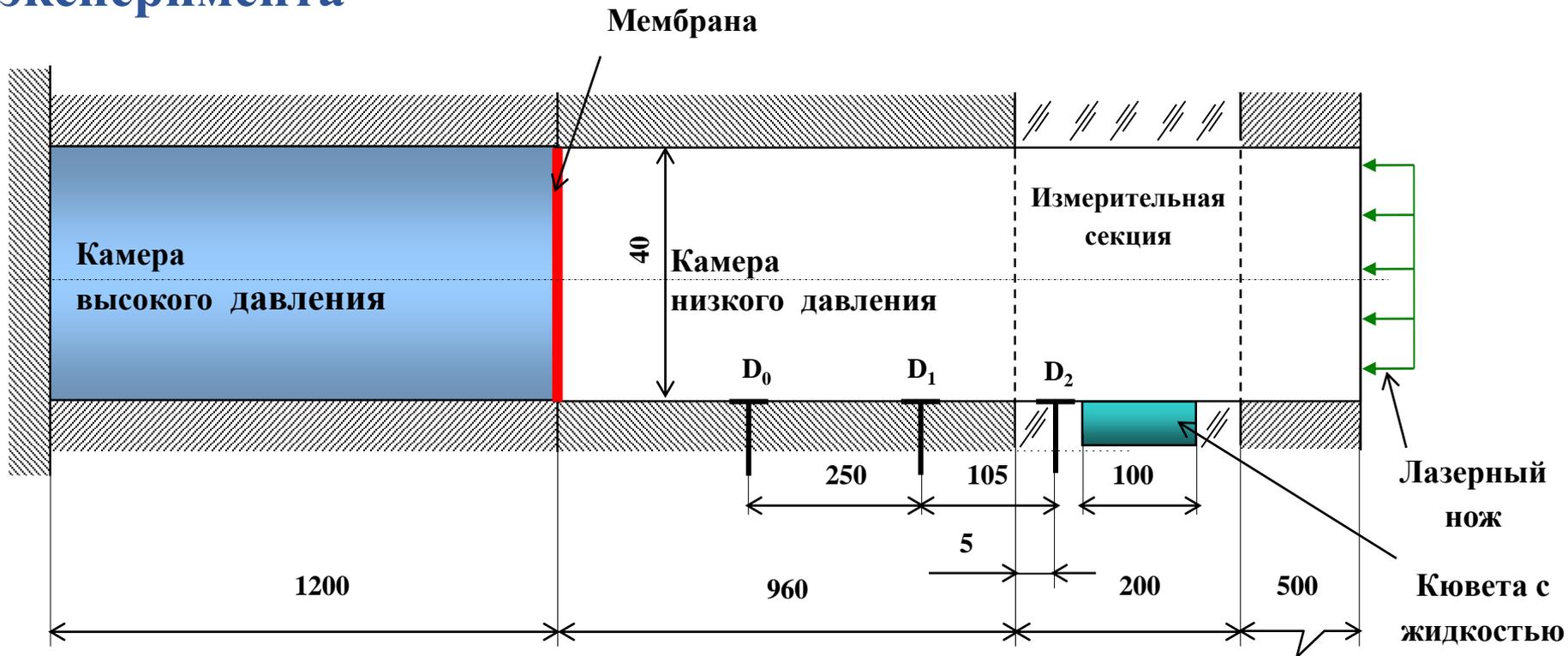


Зависимость среднего значения пульсации скорости по времени от средней скорости течения в зоне ТП (по всем проведенным опытам)



Зависимость максимального значения пульсации скорости по времени от средней скорости течения в зоне ТП (по всем проведенным опытам)

Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, техника эксперимента



Воздушная ударная труба

УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

№ опыта	P , атм	M	U_{cp} , м/с	ΔU_{cp} , м/с	ΔU_{max} , м/с
1	He, 1,5	1,23	146,5	78,9	171,7
3	He, 1,5	1,23	63,4	42,1	113,6
4	He, 1,5	1,23	50,6	46,7	153,4
5	He, 3,2	1,37	79,6	55,2	214,5
6	He, 3,2	1,37	121,3	87,9	343,9
7	Воздух, 3,2	1,31	115,4	49,6	141,8
8	Воздух, 3,2	1,31	79,9	48,0	127,2
11	Воздух, 3,2	1,31	96,5	48,3	156,6
12	Воздух, 3,2	1,27	115,6	78,1	325,7
13	Воздух, 9,2	1,51	203,4	135,5	480,3
14	Воздух, 9,2	1,47	132,9	94,9	376,3
15	Воздух, 16,2	1,63	194,6	86,7	307,6

Примечание –

P – давление в драйвере ударной трубы;

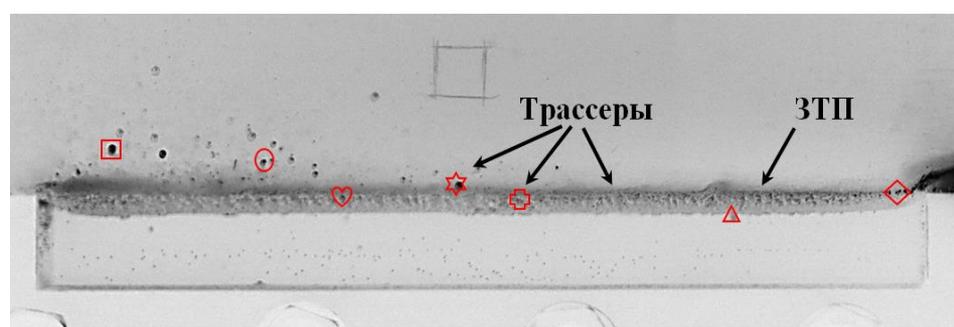
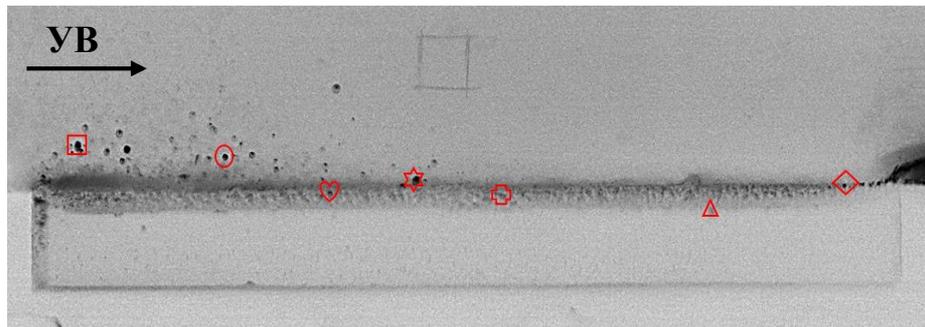
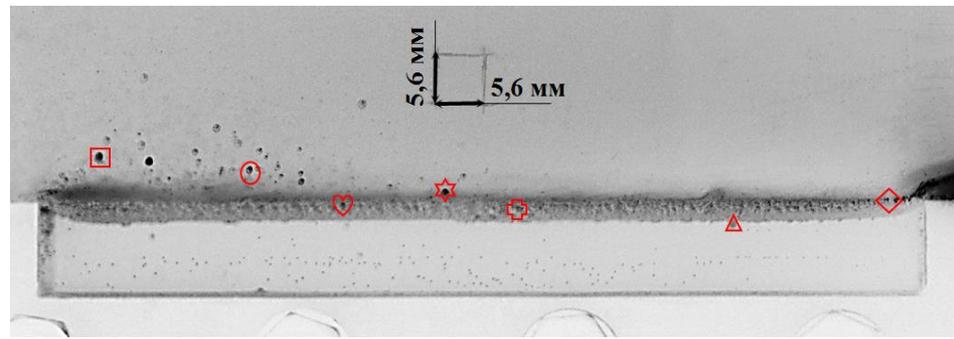
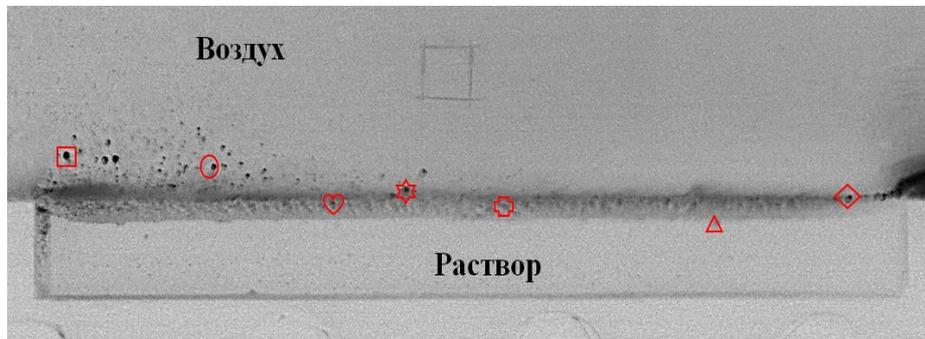
M – число Маха ударной волны в воздухе;

U_{cp} – средняя скорость всех частиц в опыте;

ΔU_{cp} – средняя пульсация в опыте;

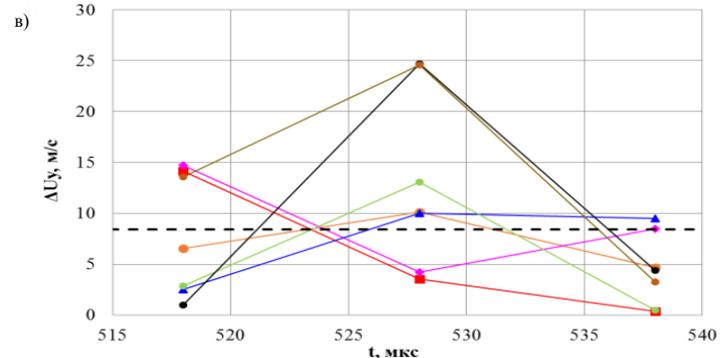
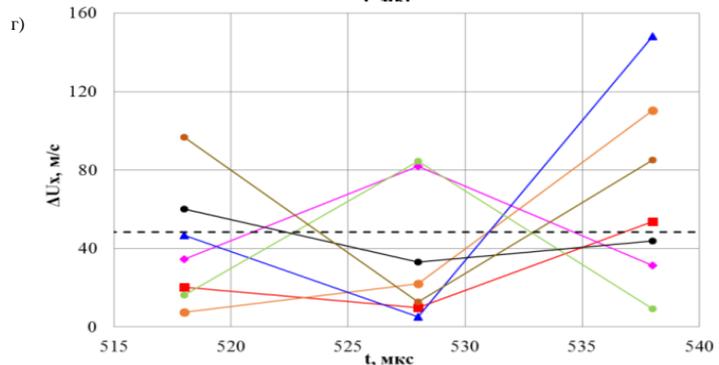
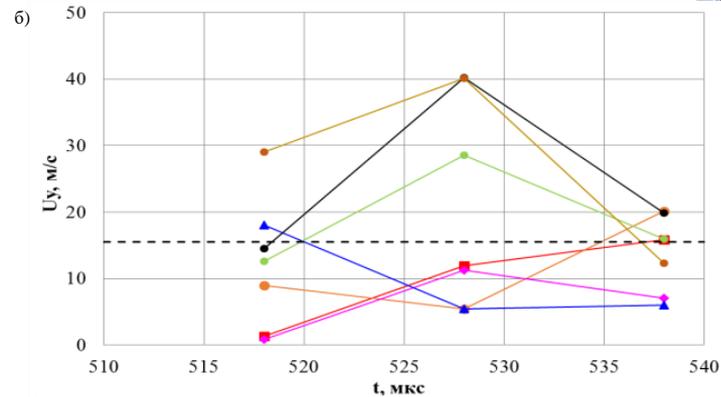
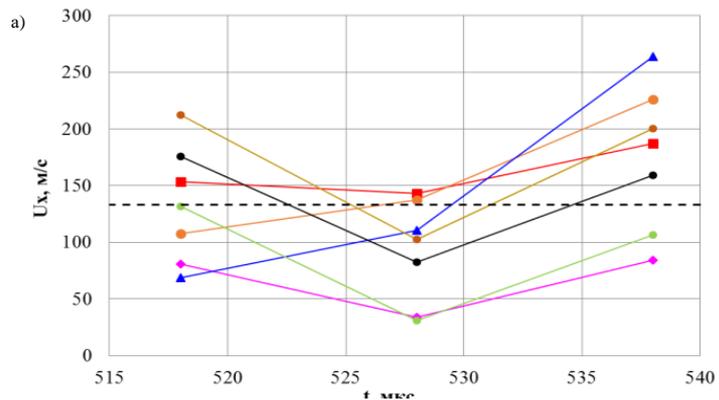
ΔU_{max} – максимальная пульсация в опыте.

КИНОГРАММЫ ТЕЧЕНИЯ



Развитие зоны ТП на границе воздух–раствор спирта в воде, опыт № 7,
 $M = 1.31$, негатив

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ



а) график зависимости $U_x(t)$; б) график зависимости $U_y(t)$;

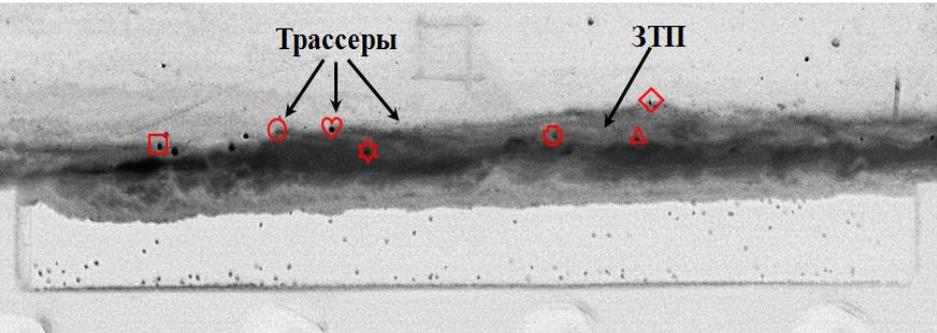
в) график зависимости $\Delta U_x(t)$; г) график зависимости $\Delta U_y(t)$;

Пунктиром обозначено среднее значение; каждый трассер представлен одинаковым

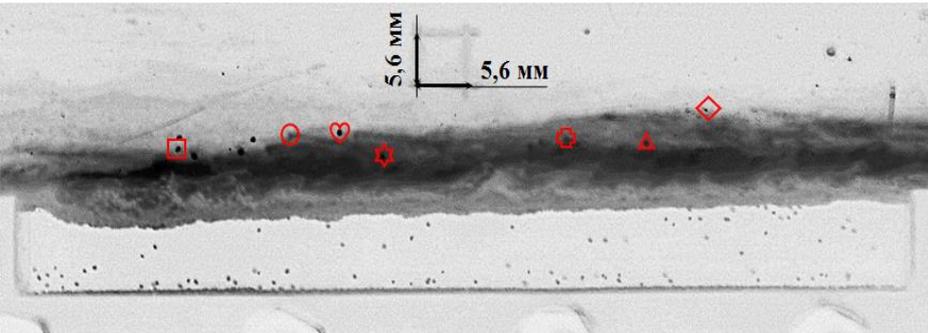
цветом и обозначается одним из символов ●●▲◆■●●

Результаты обработки опыта №7

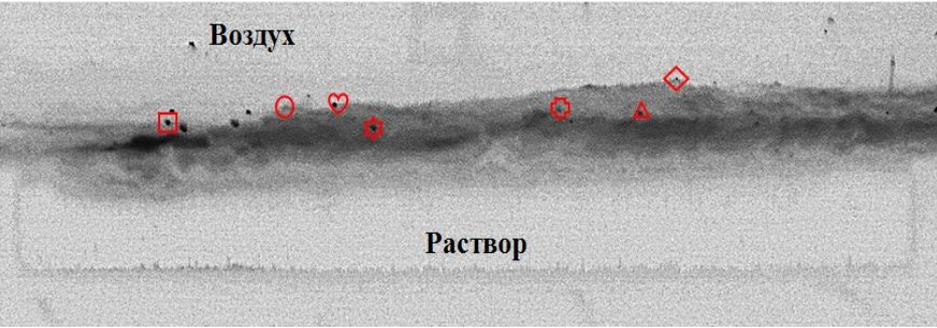
КИНОГРАММЫ ТЕЧЕНИЯ



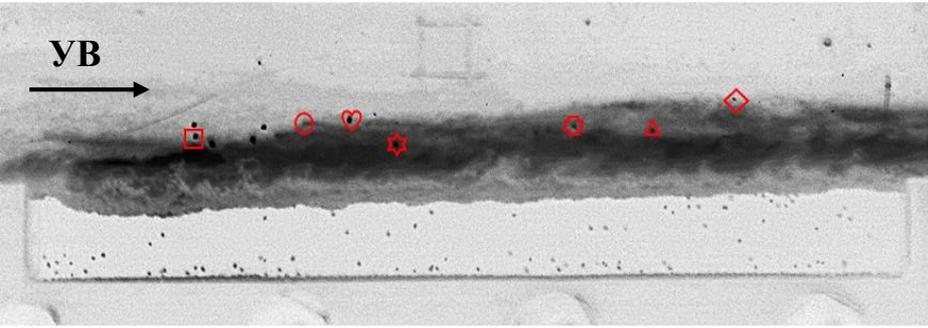
492 мкс



512 мкс



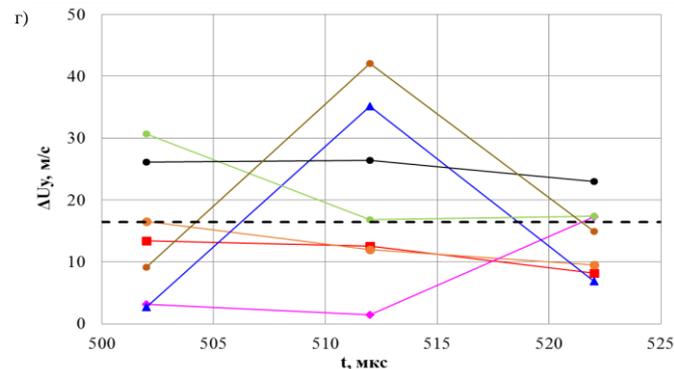
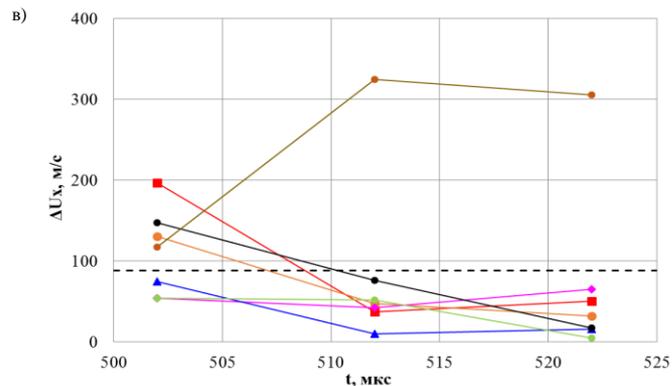
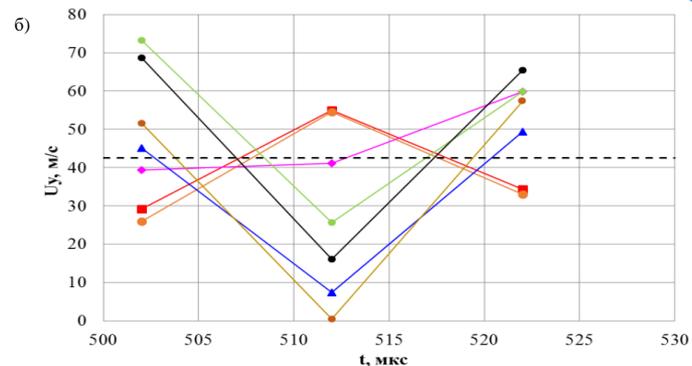
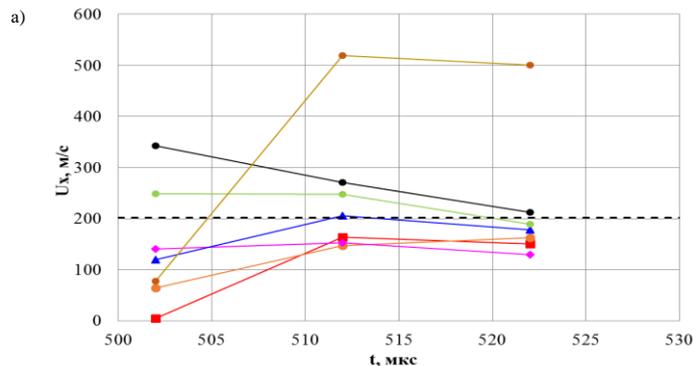
502 мкс



522 мкс

Развитие зоны ТП на границе воздух–раствор спирта в воде, опыт № 15, $M = 1.63$, негатив

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ



а) график зависимости $U_x(t)$; б) график зависимости $U_y(t)$;

в) график зависимости $\Delta U_x(t)$; г) график зависимости $\Delta U_y(t)$;

Пунктиром обозначено среднее значение; каждый трассер представлен одинаковым

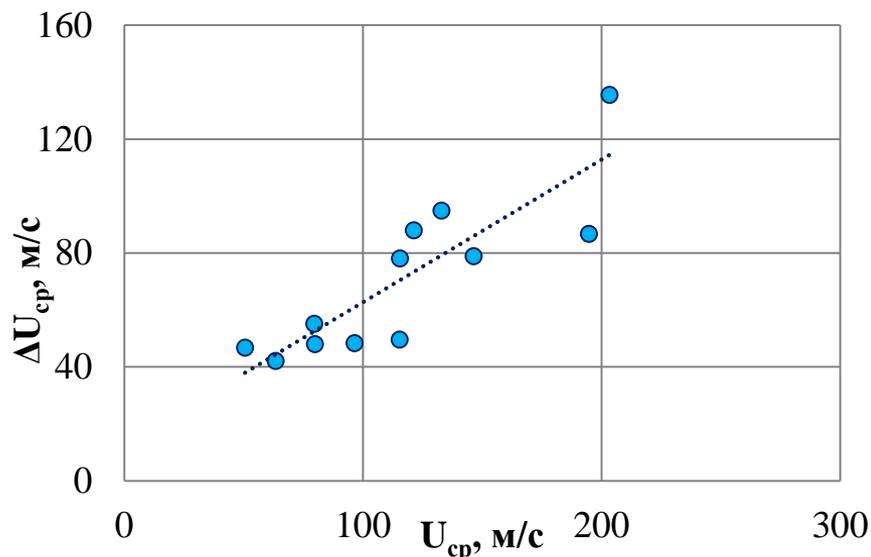
цветом и обозначается одним из символов ●●▲◆■●●

Результаты обработки опыта №15

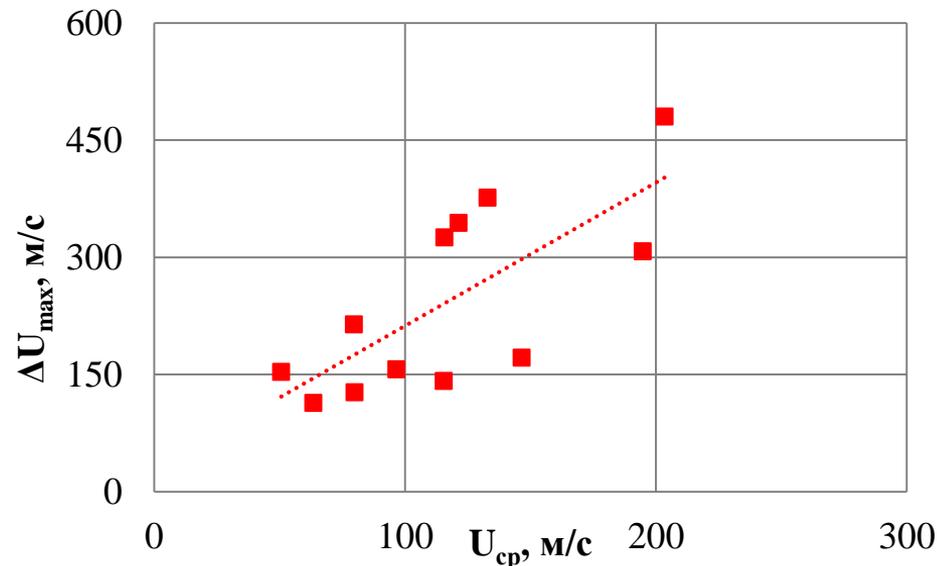
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ



Зависимость средних пульсаций в опытах от средней массовой скорости течения, полученные по суммарному смещению трассера ($B^2=X^2+Y^2$)



Зависимость максимальных пульсаций в опытах от средней массовой скорости течения, полученные по суммарному смещению трассера ($B^2=X^2+Y^2$)

ВЫВОДЫ

1. При неустойчивости Релея – Тейлора:

- при средней массовой скорости в зоне ТП 9 м/с средняя величина пульсация скорости составляет 6,6 м/с, т.е 73 %;
- при средней массовой скорости в зоне ТП 32 м/с средняя величина пульсация скорости по времени составляет 9,6 м/с, т.е 30 %.

При увеличении массовой скорости течения в зоне перемешивания абсолютная величина средней пульсации скорости по времени увеличивается, а относительная (по отношению к средней скорости) уменьшается.

2. При неустойчивости Кельвина – Гельмгольца:

- при увеличении средней массовой скорости течения в зоне ТП от ≈ 50 м/с до ≈ 200 м/с, величина средней пульсации скорости увеличивается от ≈ 40 м/с до ≈ 140 м/с (примерно в 3,5 раз), максимальной – от ≈ 100 м/с до ≈ 500 м/с (примерно в 5 раз).

3. По ширине зоны ТП пульсации скорости жидкости **неравномерны**, в каждой точке они свои.



**Спасибо
за внимание**