



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ДВУМЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЕЙЛОРА И ИХ ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Н.В. Невмержицкий, Ю.В. Янилкин, Е.В. Бодров, Д.О. Кочетков, Е.В.
Левкина, В.П. Стаценко, Ю.В. Третьяченко, И.Р. Фарин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, 607188, Саров, Нижегородская область, Россия, E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

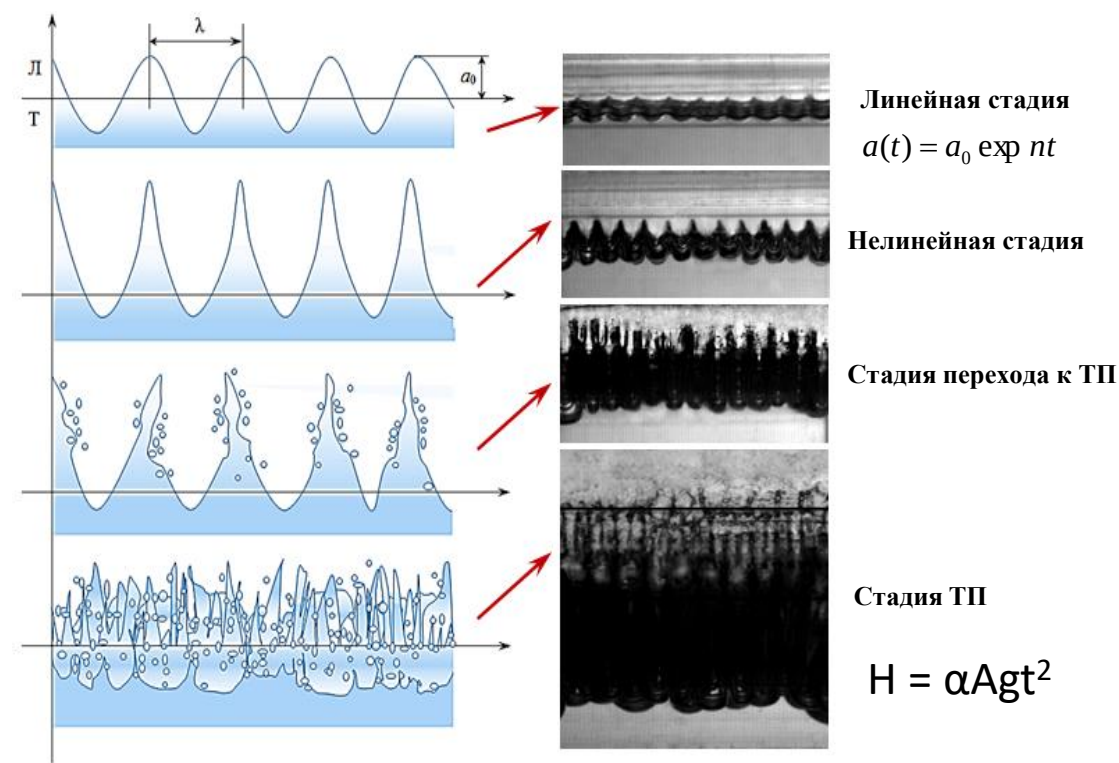
Работа выполнена в рамках НЦФМ по Государственному контракту № Н.4ц.241.4д.23.1085.

Актуальность и цель работы

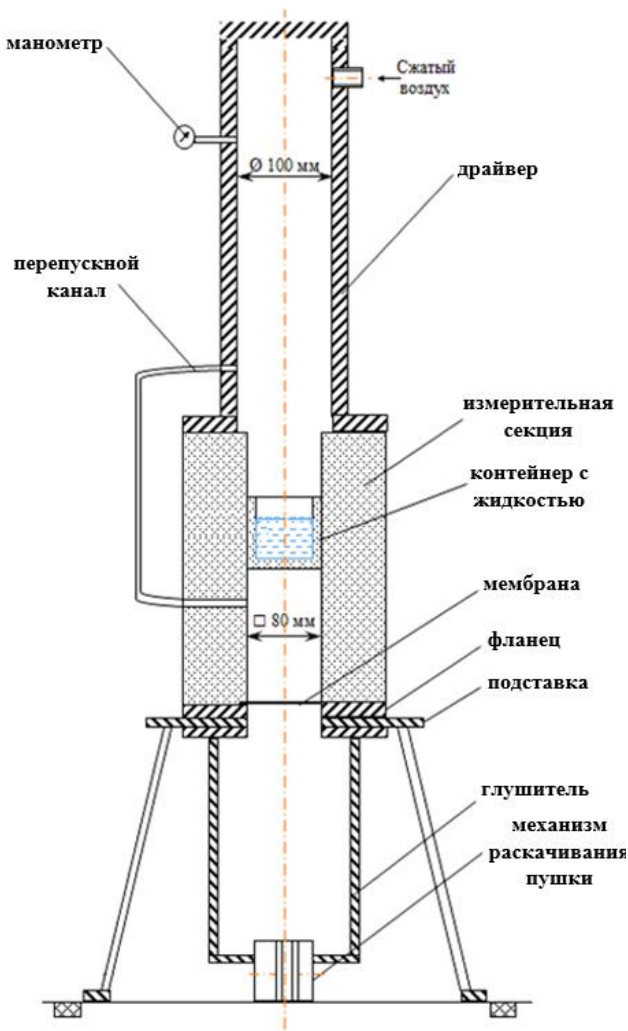


АКТУАЛЬНОСТЬ. В области исследований физики неустойчивостей в настоящее время до конца не решена одна из основных задач – не определено время перехода возмущений в турбулентную стадию. Это создает трудности при численном моделировании этих сложнейших течений, так как рост возмущений описывается одними уравнениями, а рост зоны перемешивания – другими.

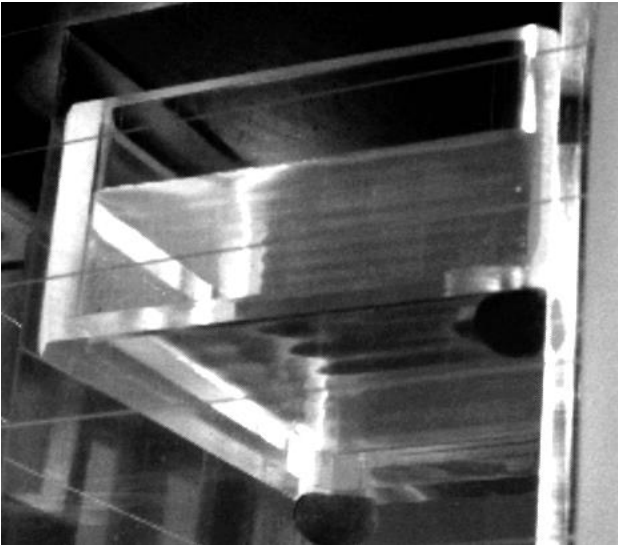
Цель работы - получение экспериментальных данных по развитию двумерных периодических возмущений в условиях неустойчивости Рэлея-Тейлора и их перехода в турбулентную стадию на границе газ-жидкость.



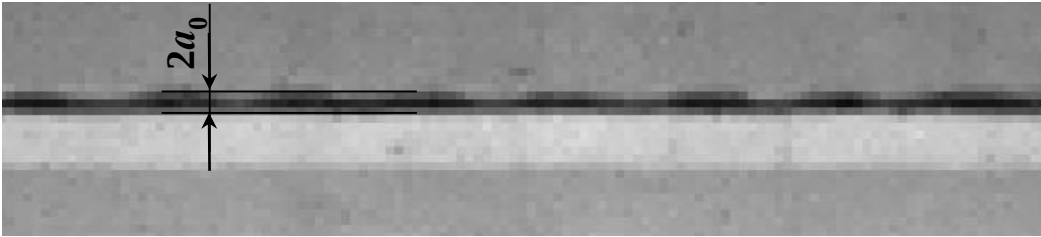
Стадии развития неустойчивости



Параметры	
Давление	До 20 атм
Ускорение	До $10^4 g_0$
Длина волны λ	5,4 – 8,8 мм
Амплитуда начальных возмущений a_0	0,3 – 0,5 мм



Вид возмущений под углом



Условия и результаты экспериментов



№ Опыта	Возмущения	P, атм	m, г	g, мм/мс ²	T _{пер} , мс	T _{тп} , мс	Re _{пер} , 10 ⁶	Re _{тп} , 10 ⁶	$\alpha_{\text{пуз}}$
9	$\alpha_0 = 0.4$ мм $\lambda = 6,4$ мм	2,15	239	5.2	4.8	6	1	2	0.06
22	$\alpha_0 = 0.4$ мм $\lambda = 6,4$ мм	6	200	17.9	2	2.9	1	3	0.07
8	$\alpha_0 = 0.4$ мм $\lambda = 6,4$ мм	2,45	239	5.7	2.8	-	2.4	-	-
32	$\alpha_0 = 0.4$ мм $\lambda = 6,4$ мм	2,2	245	5.3	4.9	-	0.5	-	-
33	$\alpha_0 = 0.4$ мм $\lambda = 6,4$ мм	5	245	10.8	2.25	2.85	2.2	4.7	0.05
36	$\alpha_0 = 0.5$ мм $\lambda = 8,8$ мм	2,2	197.9	7	3.7	4.4	0.58	-	-
37	$\alpha_0 = 0.4$ мм $\lambda = 5,4$ мм	5	219	12.4	2.3	3.1	0.63	1.8	0.05
39	$\alpha_0 = 0.3$ мм $\lambda = 5,4$ мм	4,8	215	12.4	2	2.3	2	2.8	0.07
40	$\alpha_0 = 0.4$ мм $\lambda = 6,4$ мм	6,8	219.2	16.8	1.5	1.7	1.8	2.4	0.07

- P – избыточное давление в драйвере;
- $t_{\text{пер}}$ – время начала переходной стадии развития перемешивания;
- $t_{\text{тп}}$ – время начала стадии турбулентного перемешивания;
- $Re_{\text{пер}}$ – число Рейнольдса начала перехода неустойчивости в стадию ТП;
- $Re_{\text{тп}}$ – число Рейнольдса начала стадии турбулентного перемешивания;
- m – масса слоя с контейнером;
- $\alpha_{\text{пуз}}$ – коэффициент скорости проникновения легкого вещества в тяжелое;
- g – величина ускорения контейнера со слоем жидкости.

Переход возмущений в стадию ТП, эксперимент



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

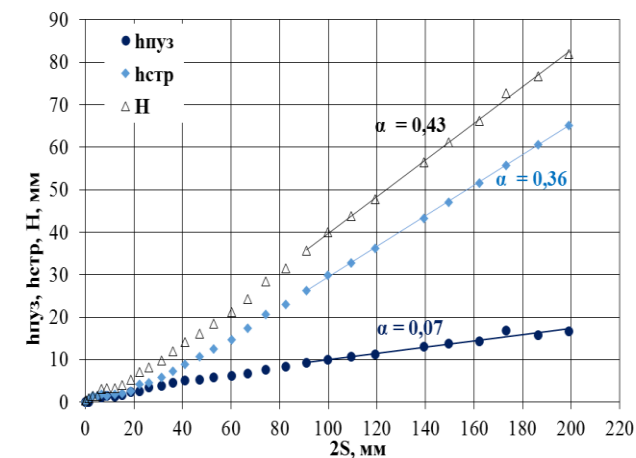
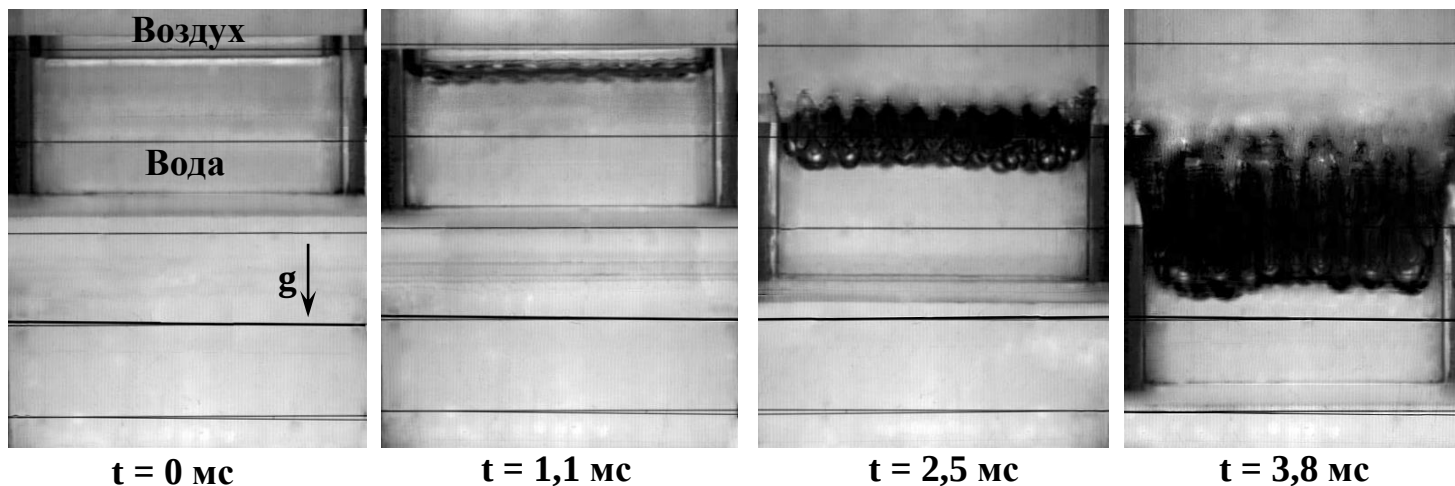


График зависимости $h_{нuz}(2S)$, $h_{спр}(2S)$, $H(2S)$

Опыт №8. Профильная проекция ($a_0 = 0,4$ мм; $\lambda = 6,4$ мм; $g = 5,7$ мм/мс²)

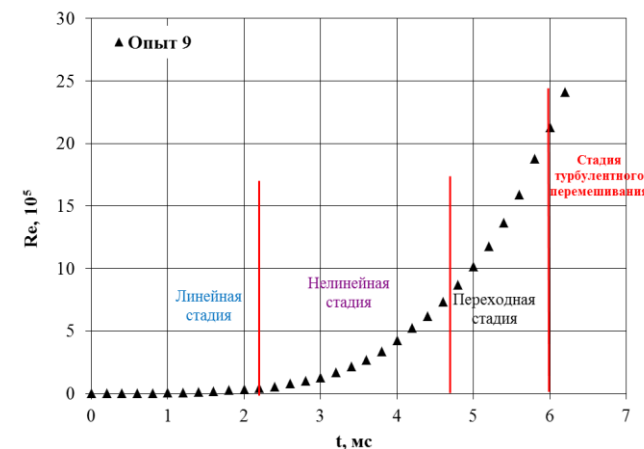
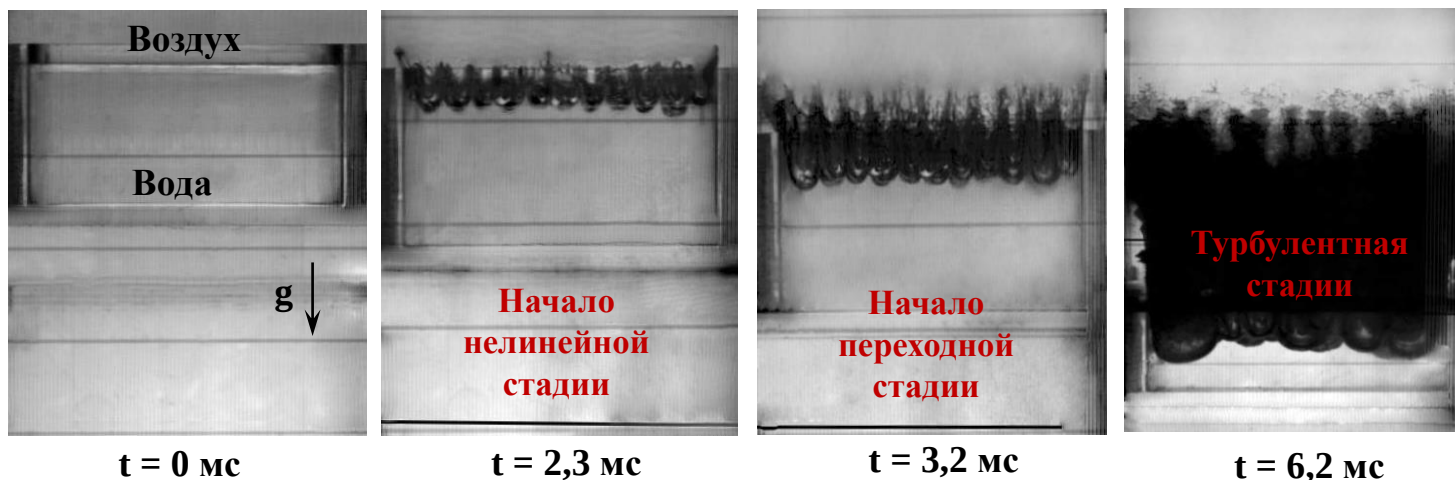


График зависимости $Re(t)$

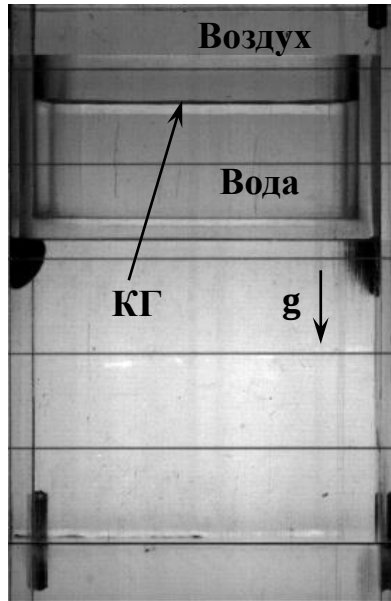
Опыт №9. Фронтальная проекция ($a_0 = 0,4$ мм; $\lambda = 6,4$ мм; $g = 5,2$ мм/мс²)

$$Re = H \cdot \frac{dH}{dt} / v_c$$

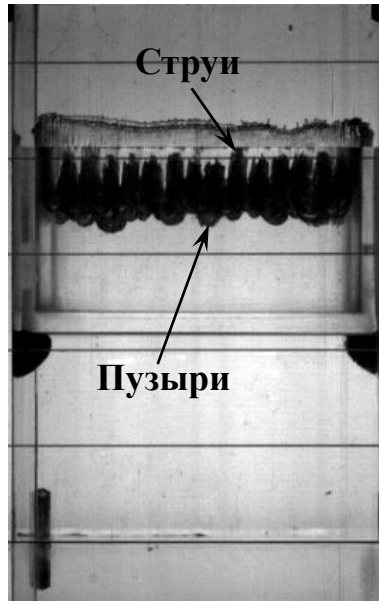
Переход возмущений в стадию ТП, эксперимент



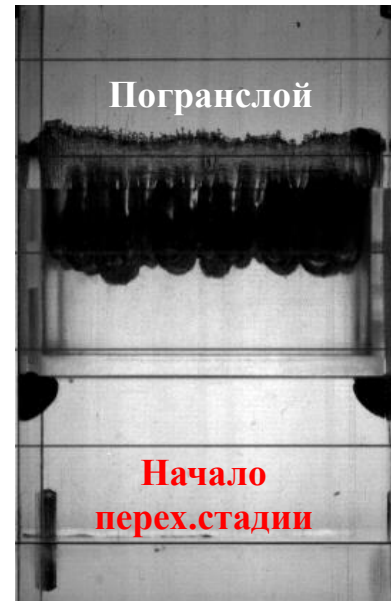
РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ



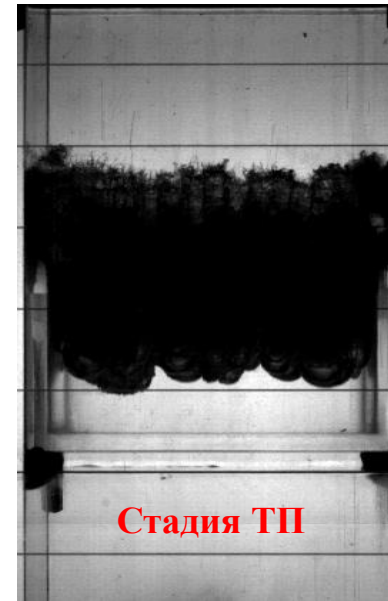
$t = 0 \text{ мс}$



$t = 1,85 \text{ мс}$

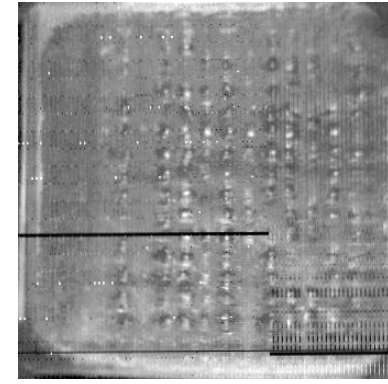
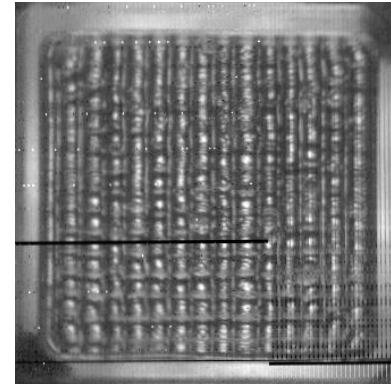
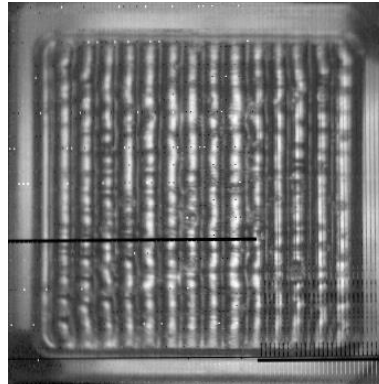
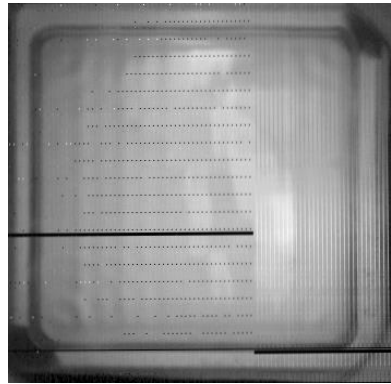


$t = 2,2 \text{ мс}$

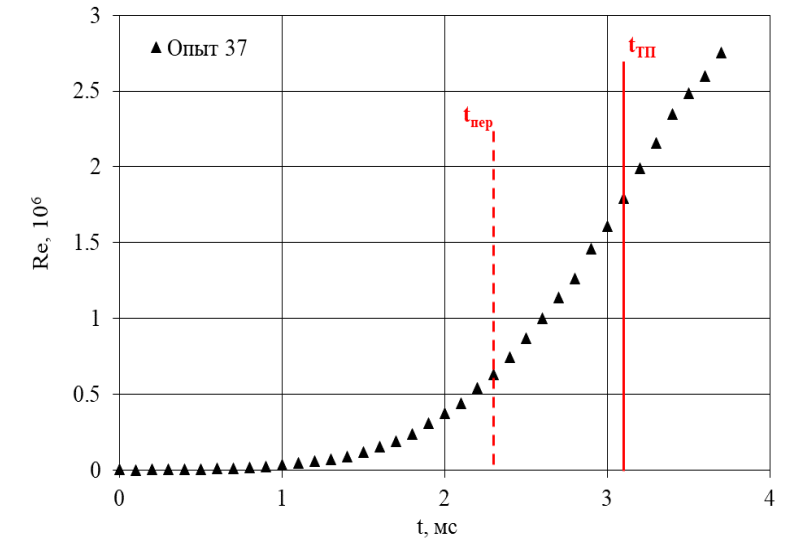
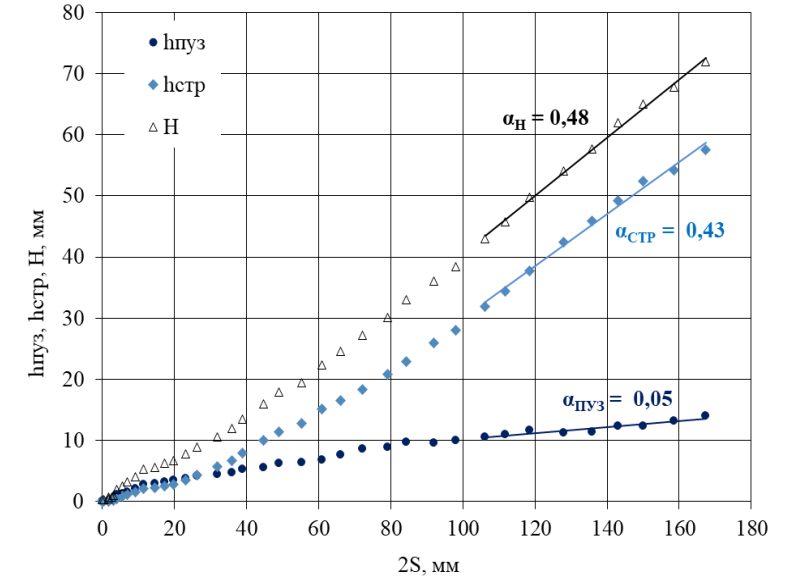


$t = 3,1 \text{ мс}$

Вид сбоку (фронтальная проекция)



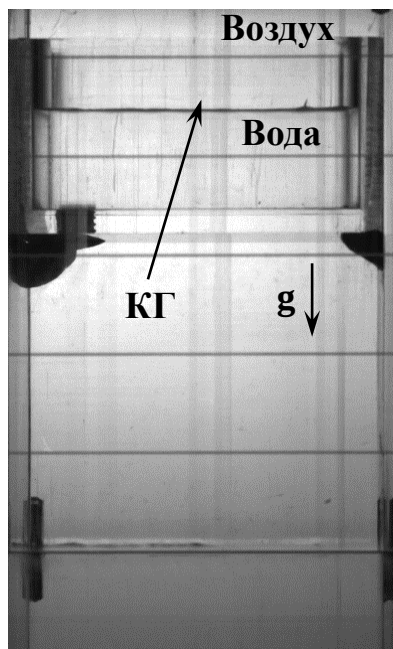
Опыт №37. Вид сверху (горизонтальная проекция) ($a_0 = 0,4 \text{ мм}$; $\lambda = 5,4 \text{ мм}$; $g = 12,4 \text{ мм/мс}^2$)



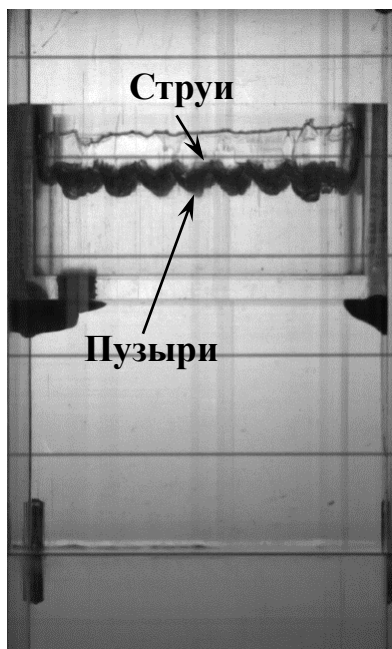
Переход возмущений в стадию ТП, эксперимент



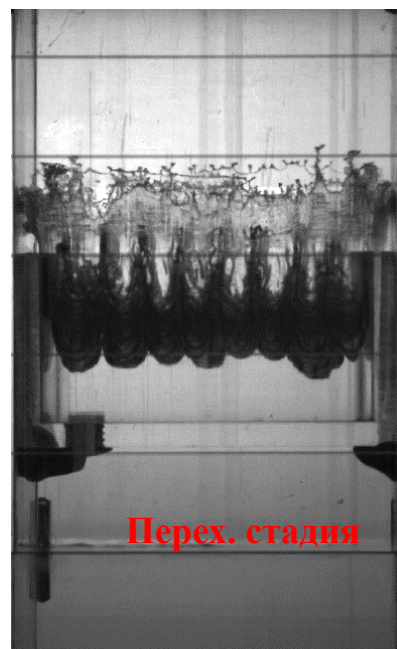
РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ



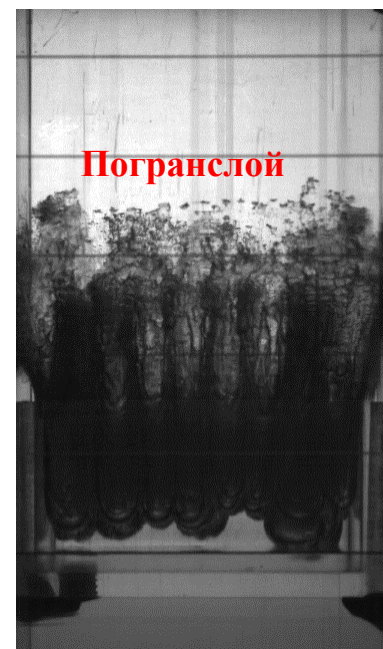
$t = 0 \text{ мс}$



$t = 1,8 \text{ мс}$



$t = 3,5 \text{ мс}$



$t = 4,6 \text{ мс}$

Вид сбоку (фронтальная проекция)

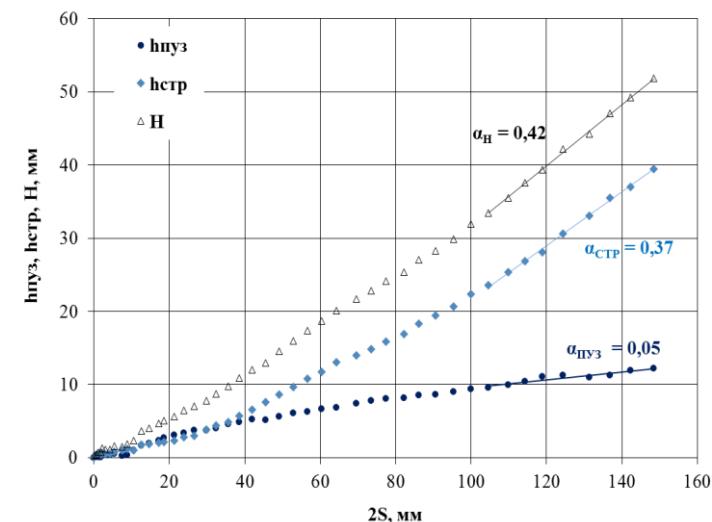


График зависимости $h_{пуз}(2S)$, $h_{стр}(2S)$, $H(2S)$

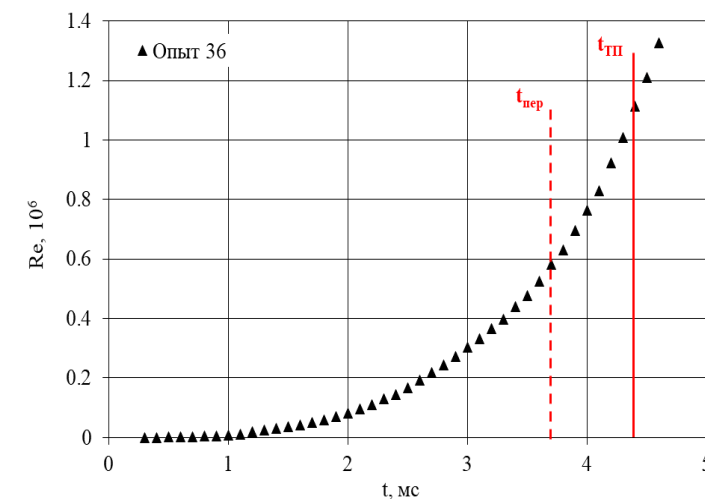
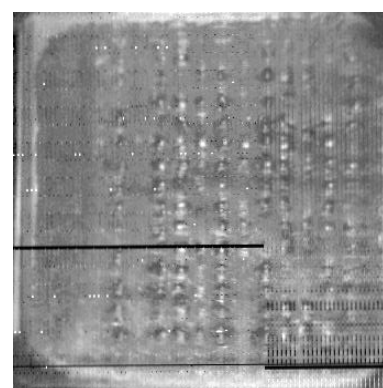
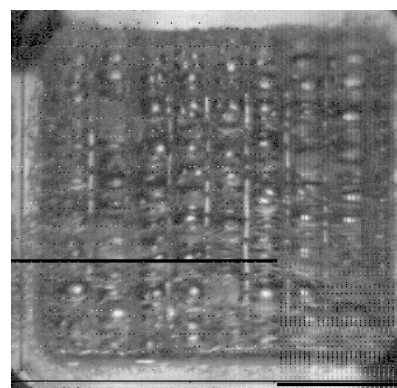
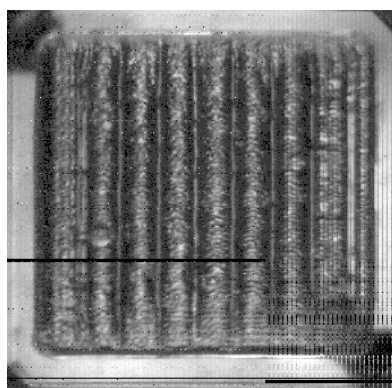
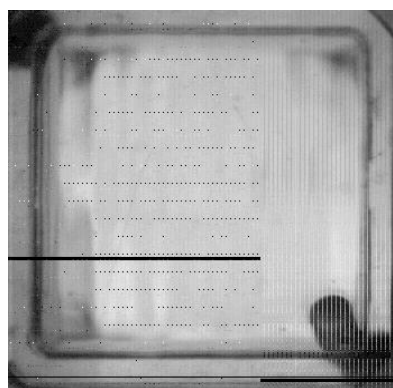
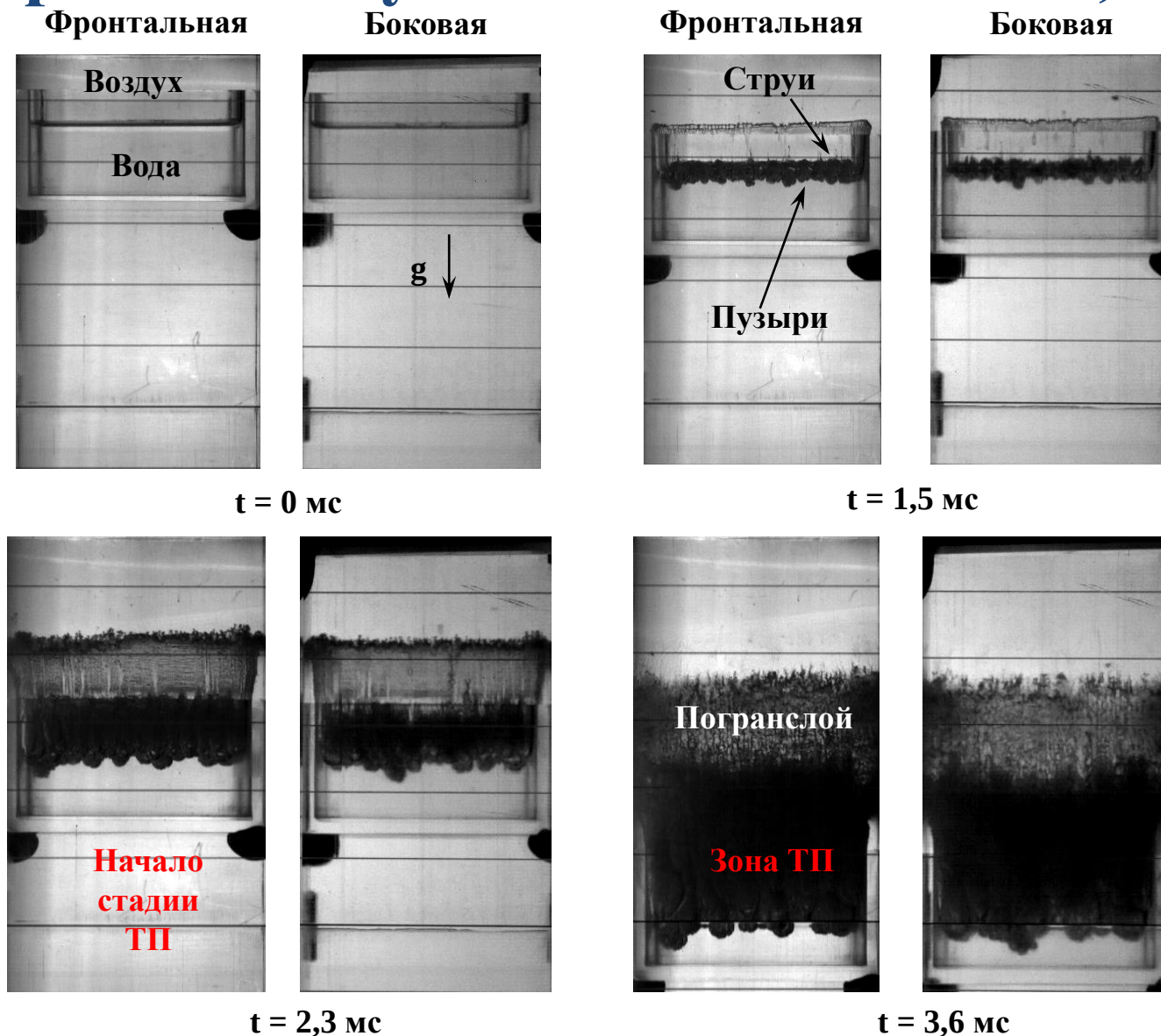


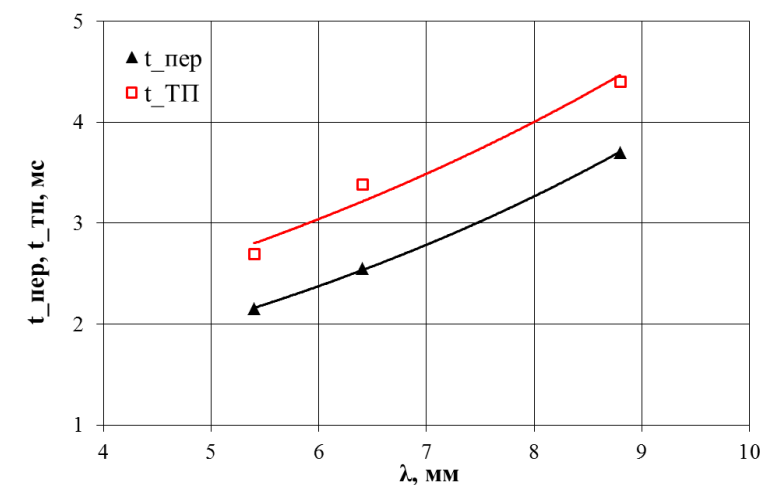
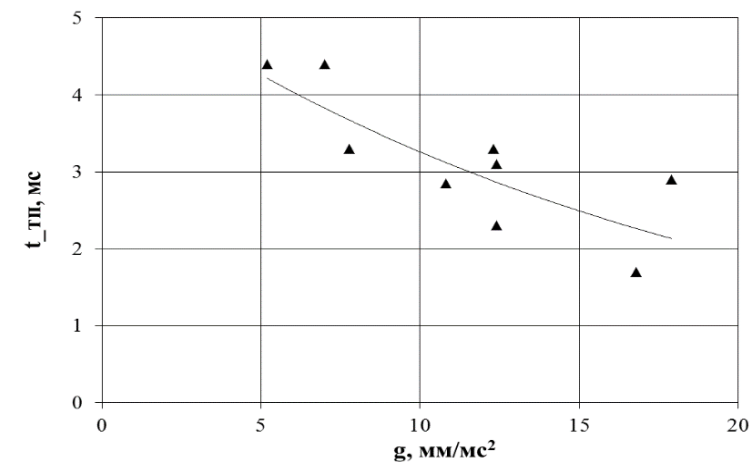
График зависимость $Re(t)$

Опыт №36. Вид сверху (горизонтальная проекция) ($a_0 = 0,5 \text{ мм}$; $\lambda = 8,8 \text{ мм}$; $g = 7 \text{ мм/мс}^2$)

Переход возмущений в стадию ТП, эксперимент

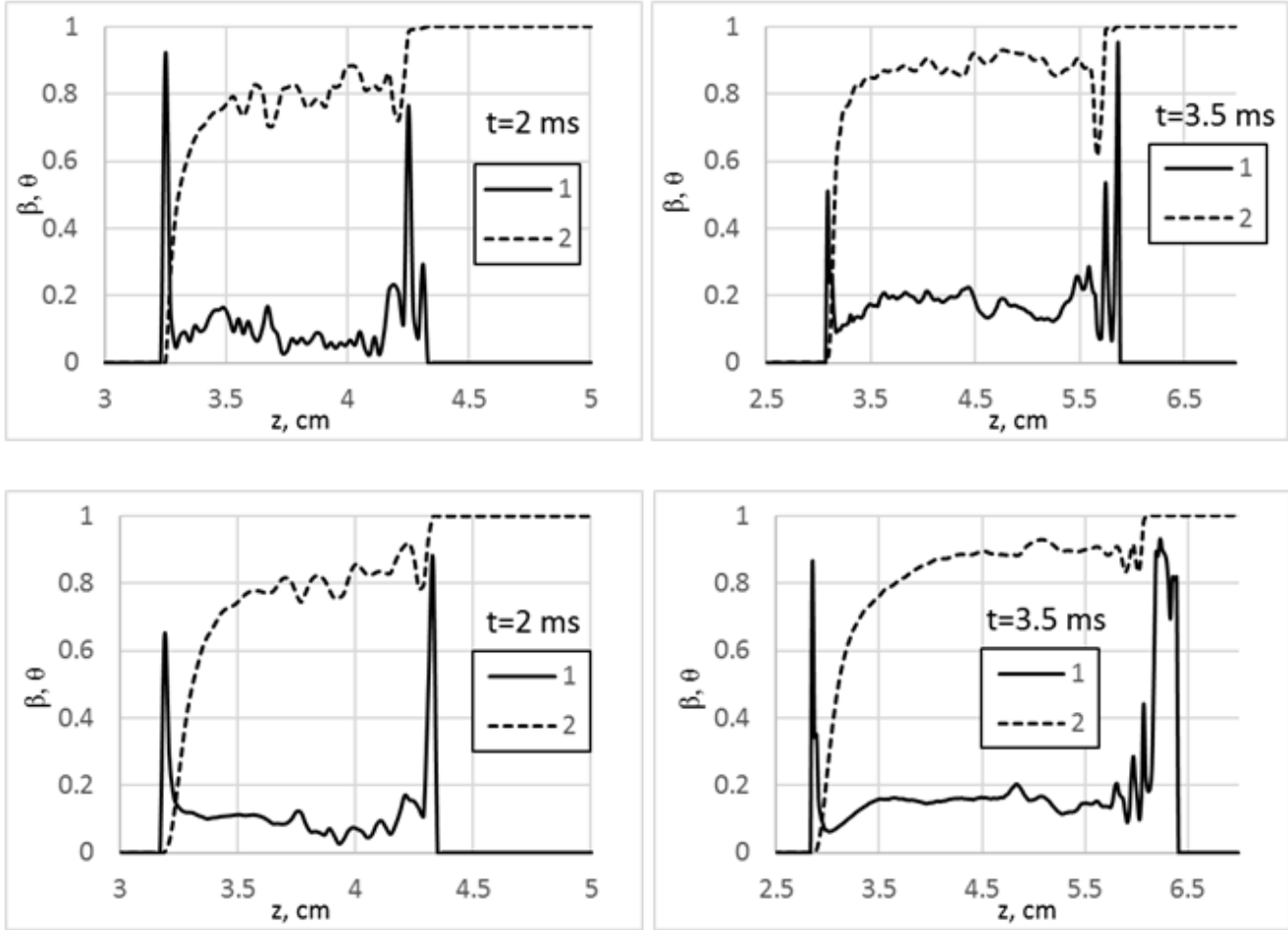


Опыт №39, $a_0 = 0,3 \text{ мм}$; $\lambda = 5,4 \text{ мм}$; $g = 12,4 \text{ мм/мс}^2$



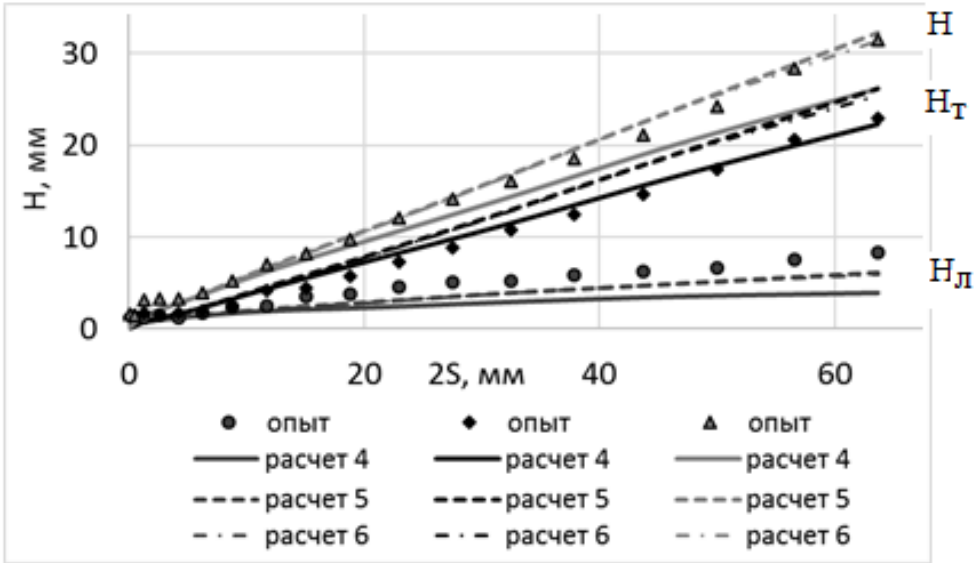
С уменьшением длины волны начального возмущения и/или увеличением ускорения контактной границы время перехода неустойчивости в стадию ТП уменьшается

Переход возмущений в стадию ТП, расчет по ЭГАК



1 – степень гомогенности; 2 – объемная концентрация

Вертикальные профили коэффициента гомогенности θ и объемных концентраций воздуха



Зависимости от пройденного пути ширины ЗТП и зон проникания легкого вещества в тяжелое (пузырей) и тяжелого в легкое (струй).

$$\Theta = \frac{\int \left(\langle \beta_i \rangle - \langle \beta_i^2 \rangle \right) \cdot dz}{\int \left(\langle \beta_i \rangle \cdot (1 - \langle \beta_i \rangle) \right) \cdot dz} = 0,2$$

где β_i , объемная концентрация одного из смешивающихся веществ

Расчетный критерий перехода в турбулентный режим по степени гомогенности θ

1. Разработана экспериментальная установка для создания «чистых» периодических 2D возмущений на поверхности жидкого слоя, ускоряемого сжатым газом.

2. Проведен ряд экспериментов по исследованию перехода возмущений в стадию ТП и получено, что:

- симметричные 2D возмущений распадаются на 3D с длиной волны, равной начальной длине волны 2D возмущений;
- время перехода возмущений в турбулентную стадию происходит при достижении интегрального числа Рейнольдса значения $Re = 1.3 \cdot 10^6$, что согласуется с временем, полученным в расчетах по критерию достижения степени гомогенности значения 0.2.

3. Результаты численного моделирования ширины зоны турбулентного перемешивания удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.



**Спасибо
за внимание**