



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Численное моделирование развития возмущений при неустойчивости Рэля-Тейлора и перехода к турбулентности

ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ»

Третьяченко Ю.В., Синькова О.Г., Стаценко В.П., Янилкин Ю.В.

В области исследования физики неустойчивостей представляет интерес вопрос о переходе развития начальных возмущений в турбулентную стадию.

В работе представлены результаты численного моделирования по методике ЭГАК экспериментов по развитию возмущений под действием неустойчивости Рэля-Тейлора на границе раздела воздух-вода, проведенных под руководством Н.В. Невмержицкого¹:

- ✓ эксперименты с кольцевыми начальными возмущениями²;
- ✓ эксперименты с протяженными периодическими двумерными возмущениями³.

1. Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики по Государственному контракту № Н.4ц.241.4Д.23.1085.

2. М.Д. Брагин, С.Ю. Гуськов, Н.В. Змитренко, П.А. Кучугов и др.// Математическое моделирование. 2023. Т. 35. № 1. С.59-82.

3. E.V. Bodrov, D.O. Kochetkov, E.V. Levkina, N.V. Nevmerzhitskii et al. Numerical and Experimental Investigation of the Development of Two-Dimensional Disturbances in the Case of Rayleigh-Taylor Instability and Transition to Turbulence // Fluid Dynamics. 2024.

Динамика роста начальных возмущений под действием неустойчивости Рэля-Тейлора

Начальная
(линейная) стадия
 $a \ll \lambda$ ($a < 0,4\lambda$)

Амплитуда растет по закону

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = gkAa,$$

где число Атвуда

$$A = \frac{\rho_T - \rho_L}{\rho_T + \rho_L},$$

k - волновое число,

g – ускорение во внешнем силовом поле, инкремент

$$\gamma^2 = gkA$$

Нелинейная
стадия

Симметрия роста возмущений нарушается: выступы тяжелой жидкости формируются в виде струй, а легкой - расширяются в виде пузырей.

Спектр начальных возмущений существенно влияет на взаимодействие различных структур друг с другом.

Стадия развитой
турбулентности

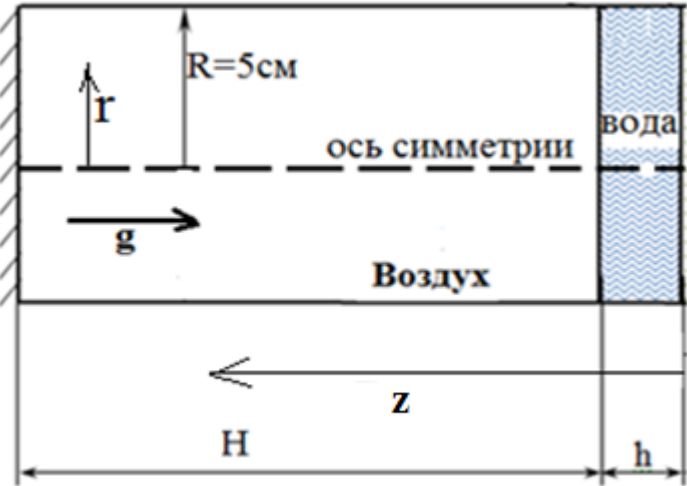
Начальное состояние течения полностью забыто, а зона перемешивания развивается по автомодельному закону

$$L \propto Agt^2$$

Влияние начальных возмущений на момент перехода к развитому ТП и на временную динамику ширины ЗТП

Эксперимент с кольцевыми возмущениями

Фотографии
начальных
возмущений
(вид снизу):



Счетная область

Вещество	ρ , г/см ³	УРС
воздух	$1,29 \cdot 10^{-3}$	идеальный газ
вода	1	Типа Ми-Грюнайзена ($n=7$)

Контактная граница возмущена набором

осесимметричных возмущений:

$$z = a_0 \sin \frac{2\pi r}{\lambda}$$

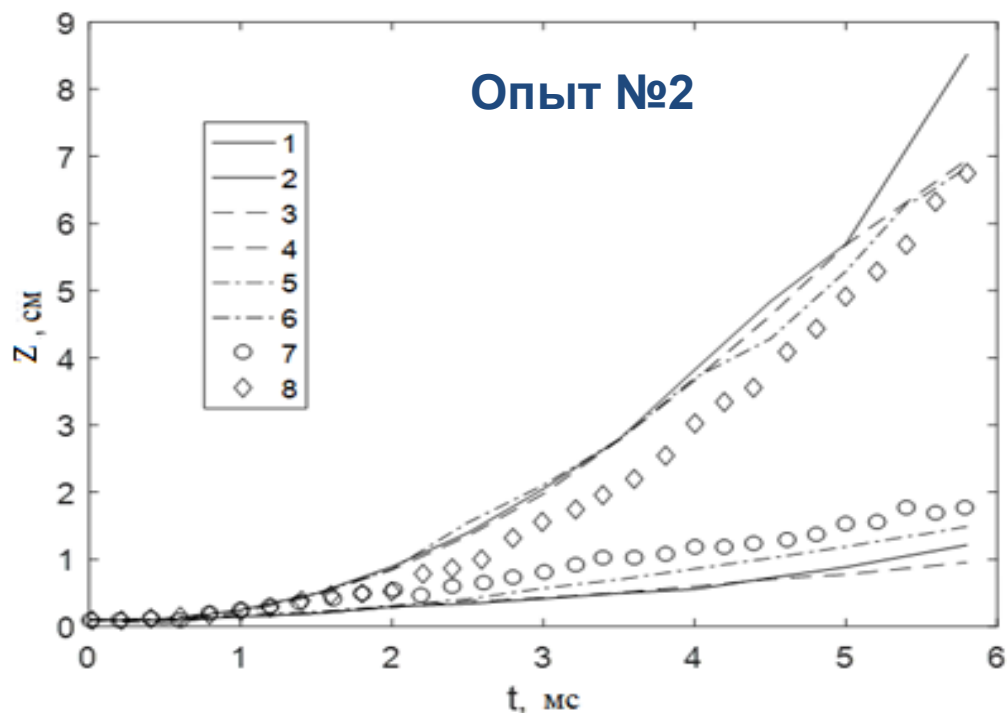
g – ускорение контактной границы,
во всей области температура $T=300^\circ\text{K}$,
давление соответствует заданному ускорению

№ опыта	$m_{\text{воды}}$, г	P , атм	g , мм/мс ²	λ , мм	a_0 , мм	h , мм
2	330	5,6	5,6	8,7	0,95	42
6	314	4	4,9	4	0,65	40

Расчеты по методике ЭГАК проводились как в полной геометрии задачи с $H=108\text{см}$, совпадающей с опытом, так и в урезанной геометрии с $H=7\text{см}$ на квадратной счётной сетке $N=200$ и $2N$ ячеек поперёк счётной области.

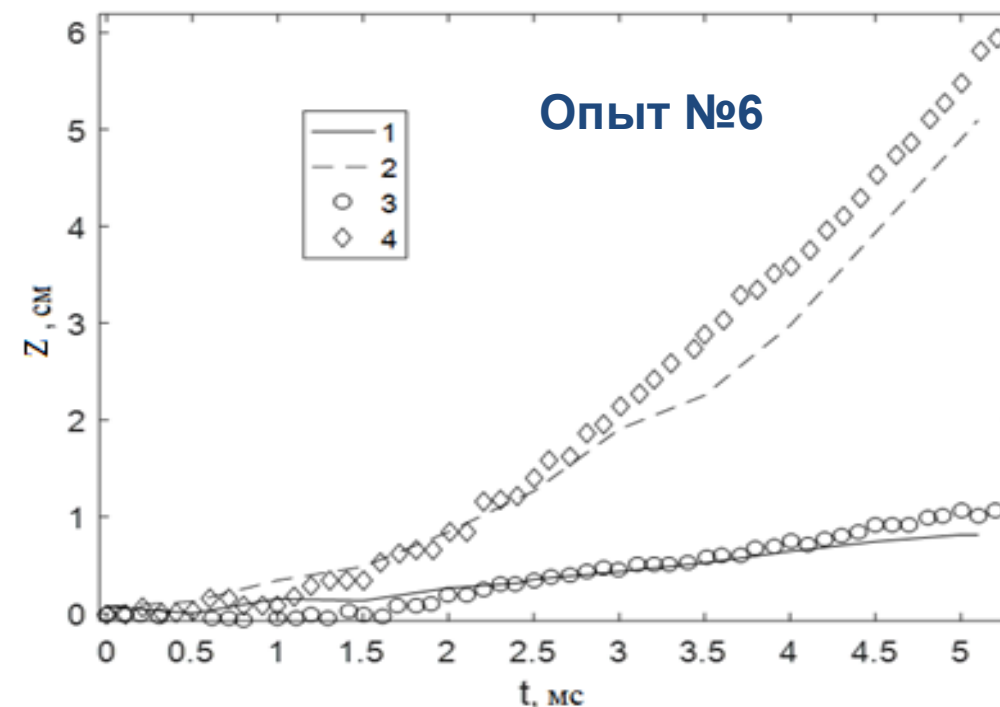


Результаты расчетов в виде z-t диаграмм границ пузырей и струй



Зависимости глубины проникновения легкого вещества в тяжелое (1, 3, 5, 7 – пузыри), тяжелого в легкое (2, 4, 6, 8 – струи)

1, 2 – расчёт полной области ($h=0.25$ мм);
3, 4 – расчёт укороченной области ($h=0.25$ мм);
5, 6 – расчёт укороченной области ($h=0.125$ мм);
7, 8 – эксперимент



Зависимости глубины проникновения легкого вещества в тяжелое (1, 3 – пузыри), тяжелого в легкое (2, 4 – струи)

1, 2 – расчёт укороченной области ($h=0.125$ мм);
3, 4 – эксперимент

Критерий турбулизации течения

Степень гомогенности

$$\theta(z) = \frac{\langle \beta_1 \cdot \beta_2 \rangle}{\langle \beta_1 \rangle \cdot \langle \beta_2 \rangle},$$

где среднее значение концентрации

$$\langle \beta_1 \rangle(z) = \frac{2\pi \cdot \int_0^R \beta_1(r, z) \cdot r \cdot dr}{\pi R^2}.$$

Время перехода к турбулентности определяется характерной величиной

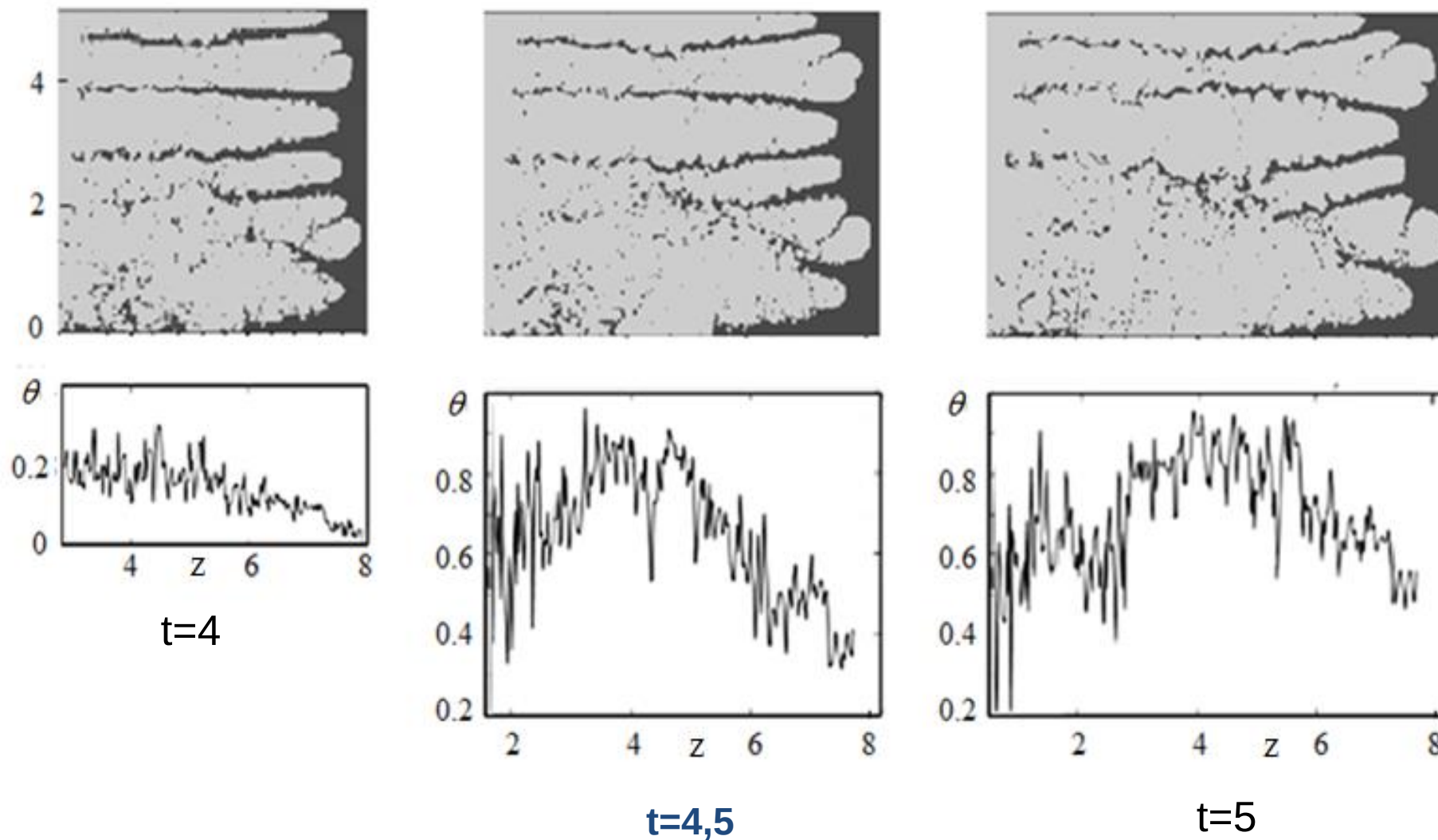
$$t_0 = \sqrt{\lambda/g}.$$

Эта величина в опыте 6 меньше по сравнению с опытом 2, поэтому переход к турбулентности здесь должен происходить быстрее, что и имеет место в расчетах.

Растровая картина концентраций (сверху) и профиль степени гомогенности (снизу) в опыте №2



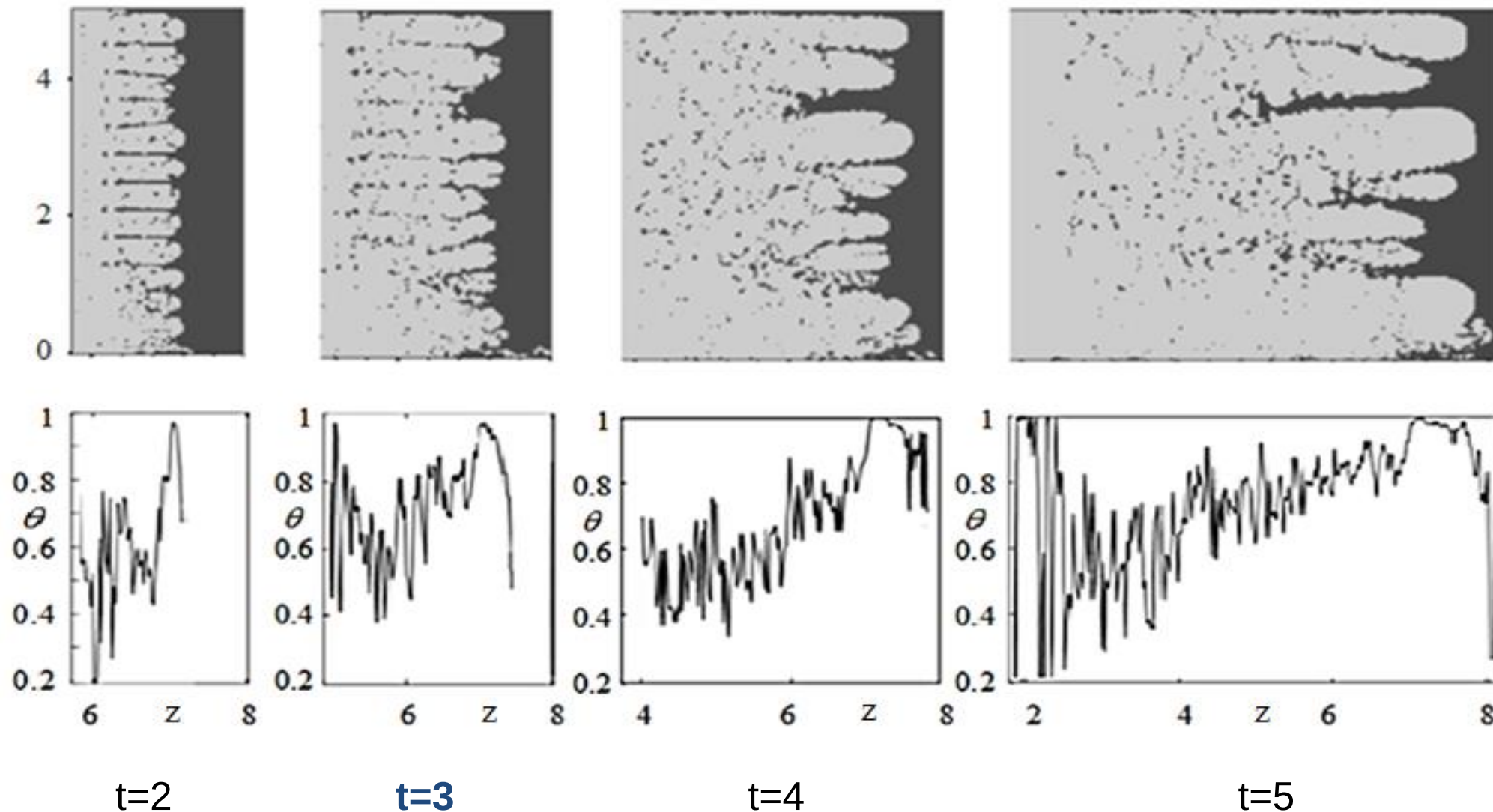
РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ



Растровая картина концентраций (сверху) и профиль степени гомогенности (снизу) в опыте №6



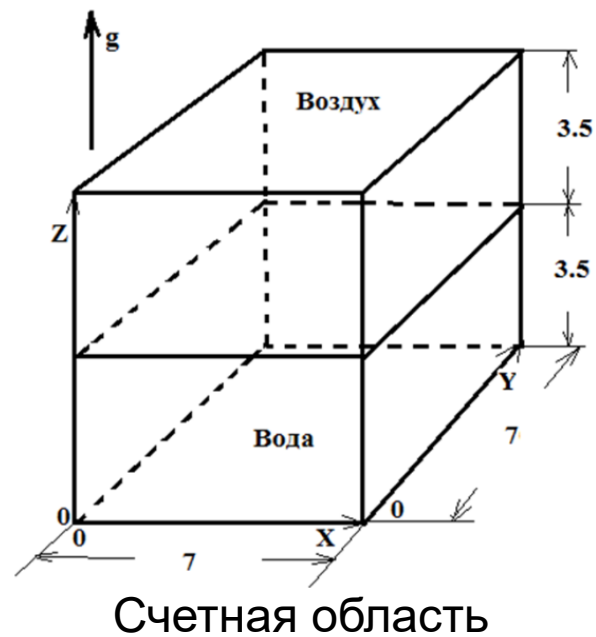
РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ



Эксперимент с протяженными периодическими возмущениями



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

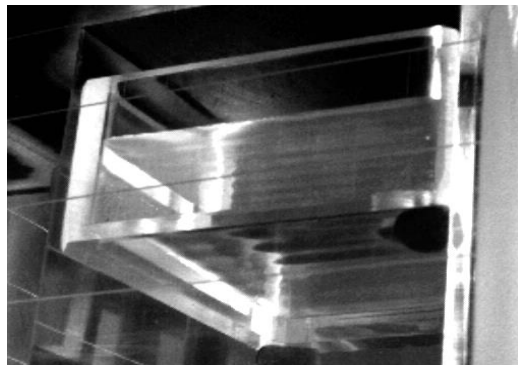


Вещество	$\rho, \text{ г/см}^3$	Коэффициент вязкости	УРС
воздух	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	идеальный газ
вода	1	10^{-5}	Типа Ми-Грюнайзена ($n=7$)

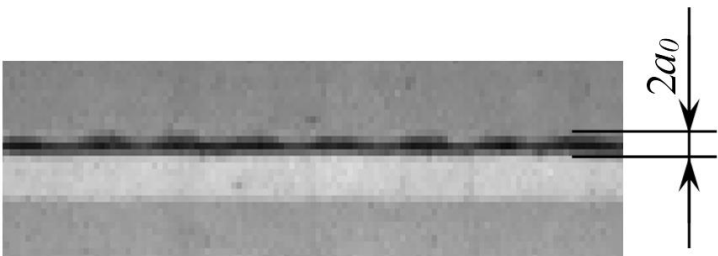
$g = 0.52 \text{ см/мс}^2,$
 $T=300^0\text{K},$
 $P_0=2.15 \text{ атм}$

На поверхности воды заданы гармонические возмущения:

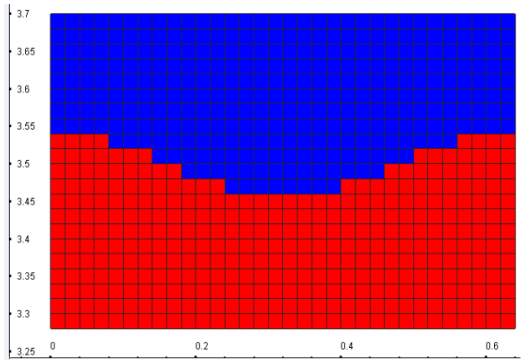
$$z = a_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda}, \quad a_0 = 0.04 \text{ см}, \quad \lambda = 0.64 \text{ см}$$



Фотография контейнера с возмущениями



Вид возмущений в эксперименте (фронтальная проекция)



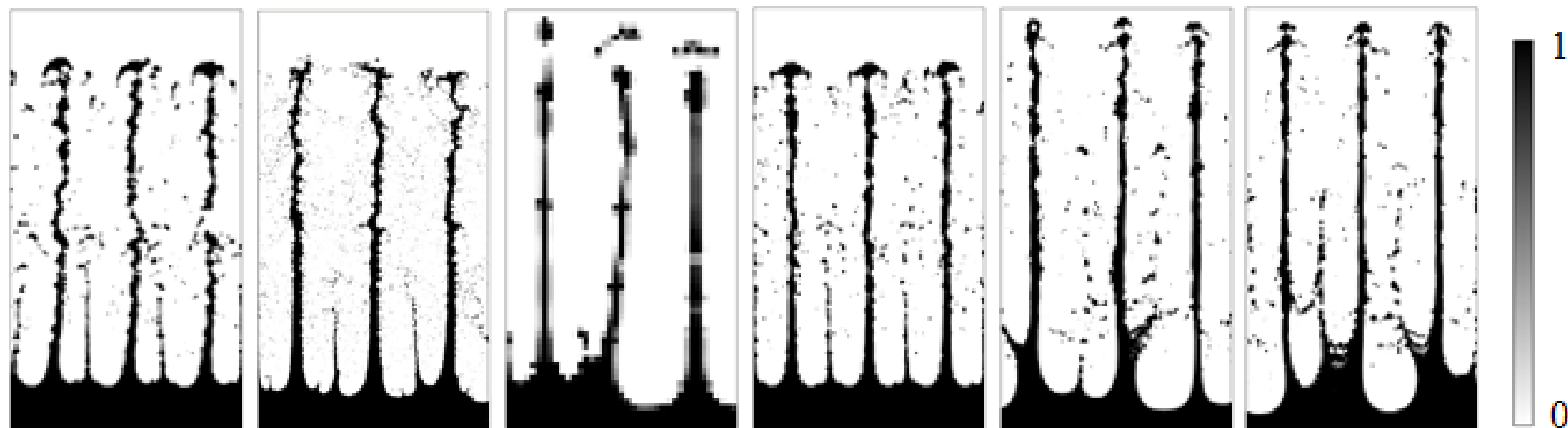
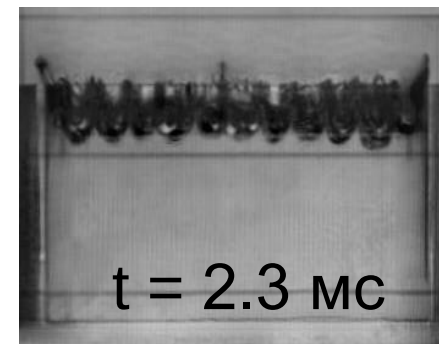
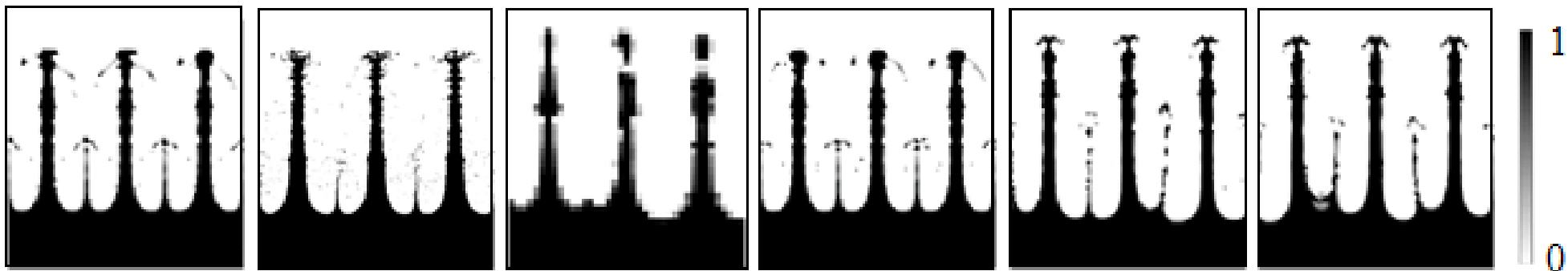
Фрагмент заданных возмущений на сетке N

Постановка расчетов с протяженными периодическими возмущениями

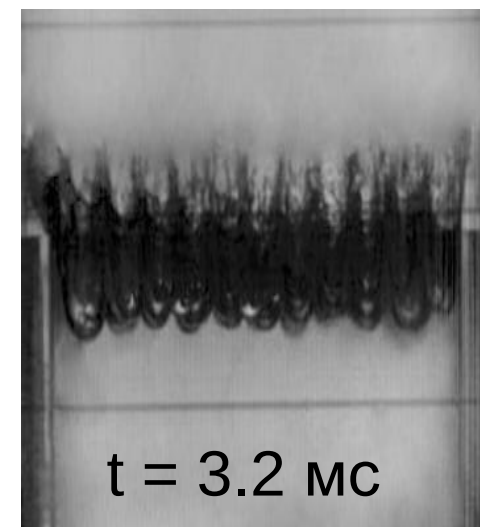
№ расчета	1	2	3	4	5	6
Размерность геометрии	2D	2D	2D	3D	3D	3D
Сетка (N=350)	N	4N	0.4N	N	N	N
Размер ячейки (см)	0.02	0.005	0.05	0.02	0.02	0.02
Учёт вязкости	-	-	-	-	-	+
Возмущения на КГ по у ($\pm 5\%$)	-	-	-	-	+	+

Картины течения

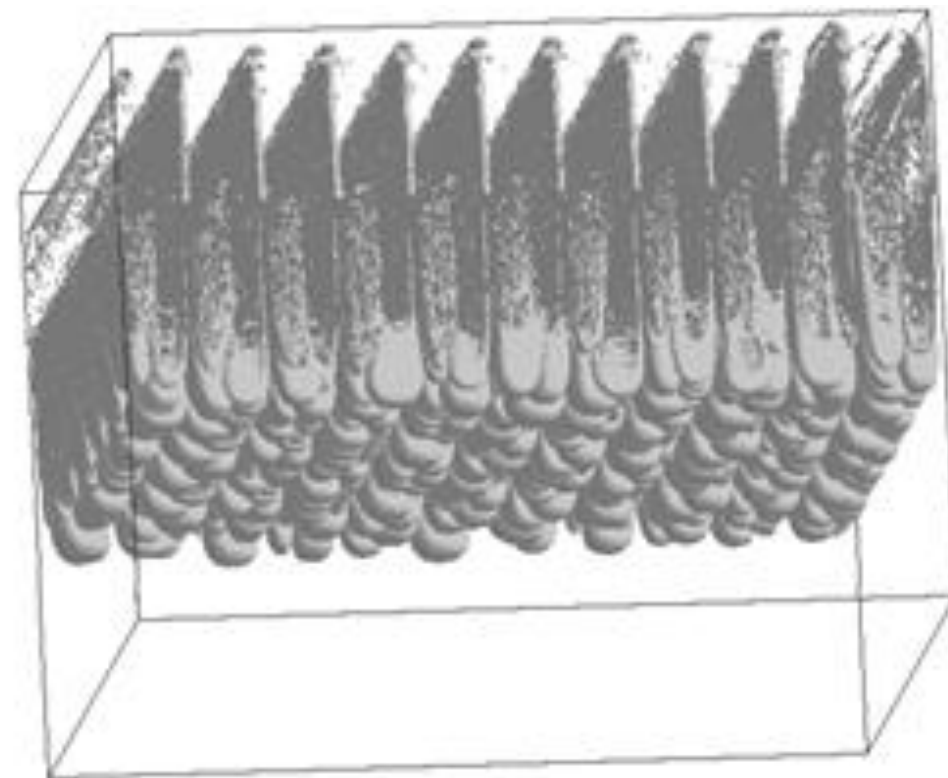
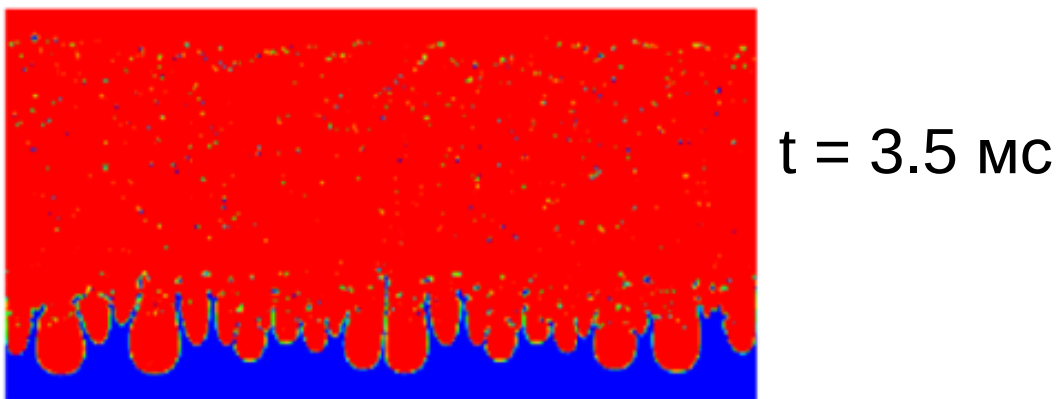
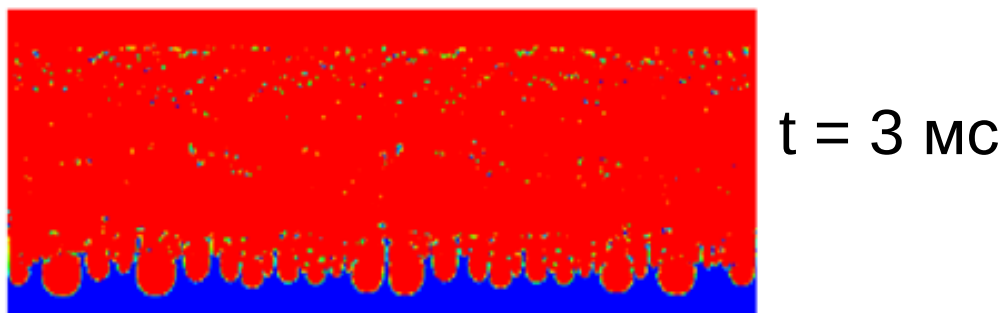
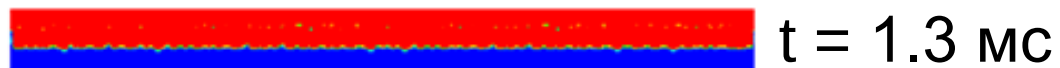
$t = 2.3 \text{ мс}$



$t = 3.5 \text{ мс}$



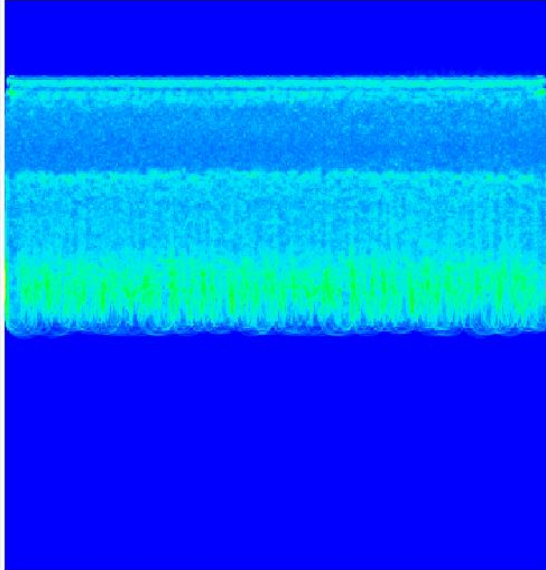
Результаты 3D расчетов с дополнительными возмущениями на КГ по направлению y



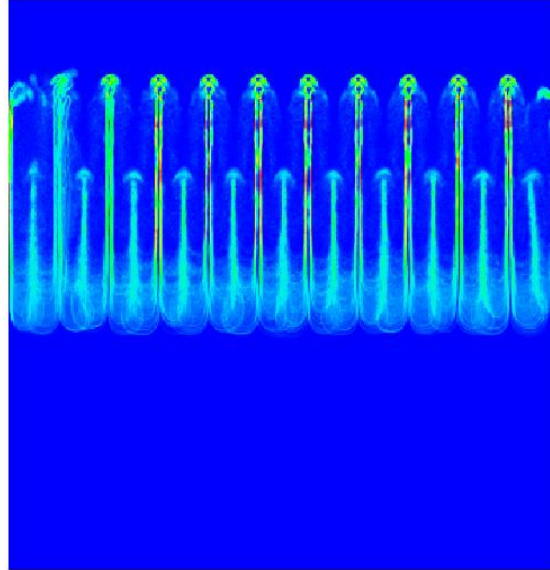
Изоповерхность концентрации
воды на $t = 3.5 \text{ мс}$

Интегральные коэффициенты преломления

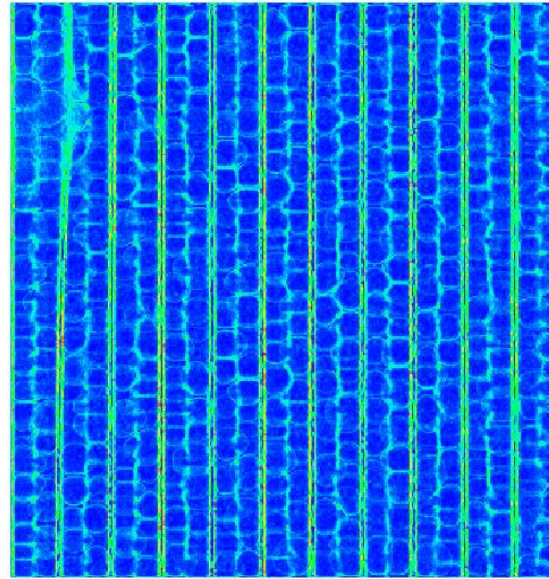
плоскость yz



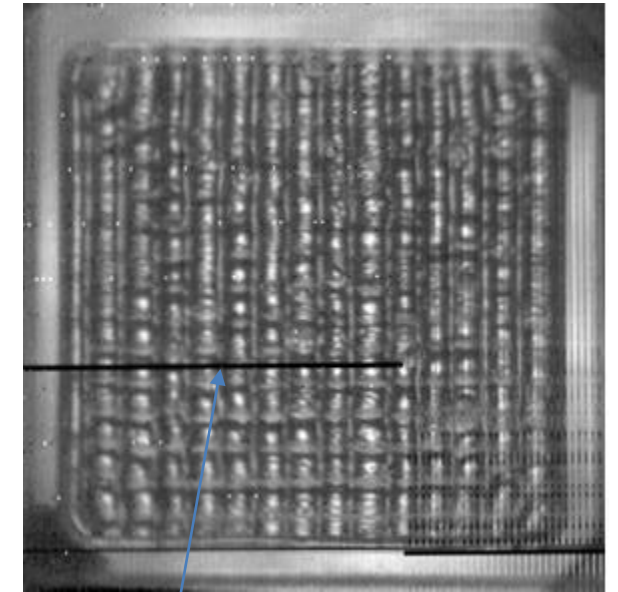
плоскость xz



плоскость xy



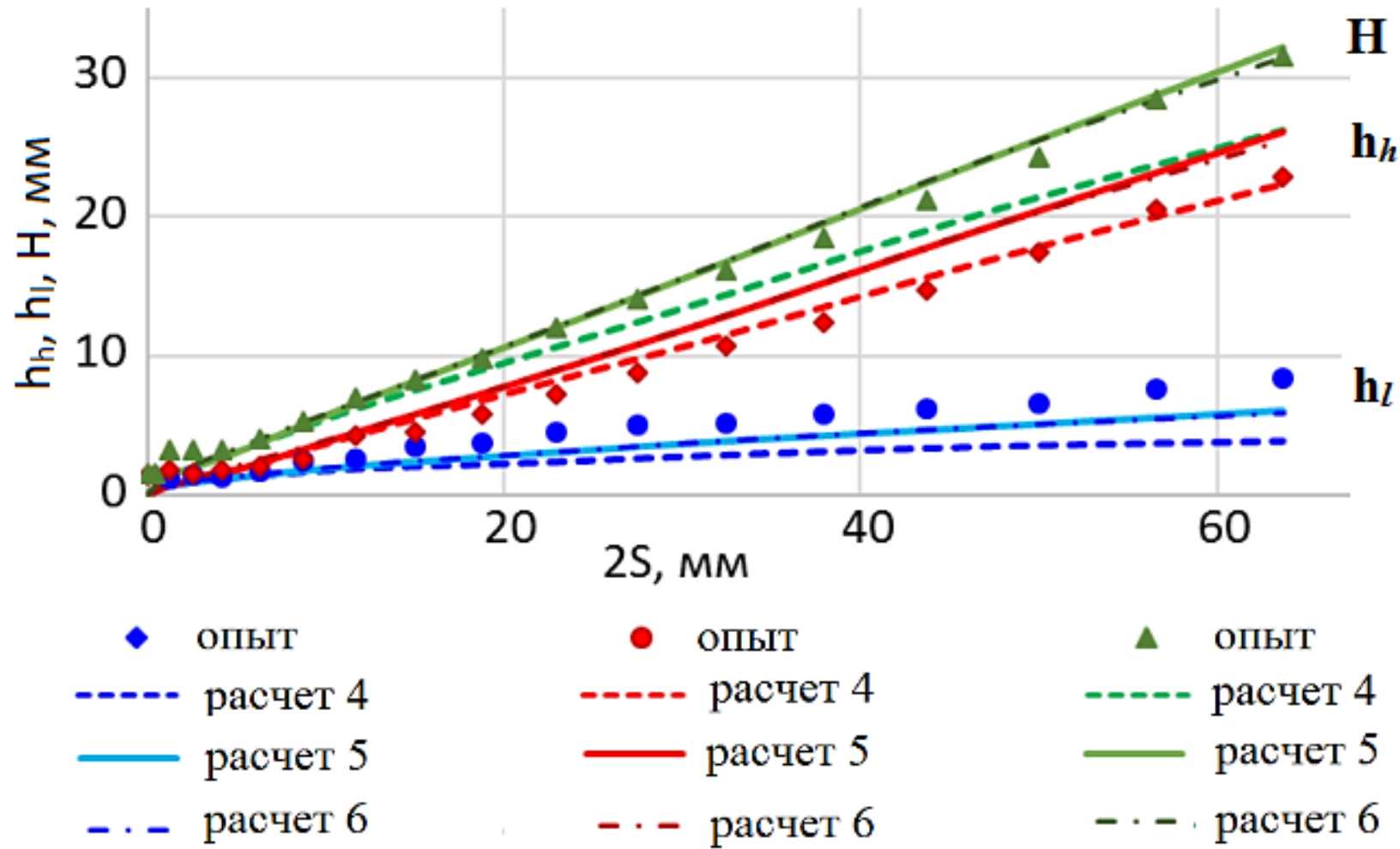
Интегральные коэффициенты преломления на $t=3,5$ мс в расчете 6
(3D со случайными возмущениями с учётом вязкости)



Дефект камеры

$$n(x, y) = \int (n_1 \beta_1 + n_2 \beta_2) dz, \quad n_{\text{air}} = 1, \quad n_{\text{water}} = 1.333$$

Результаты 3D расчетов в сравнении с экспериментом

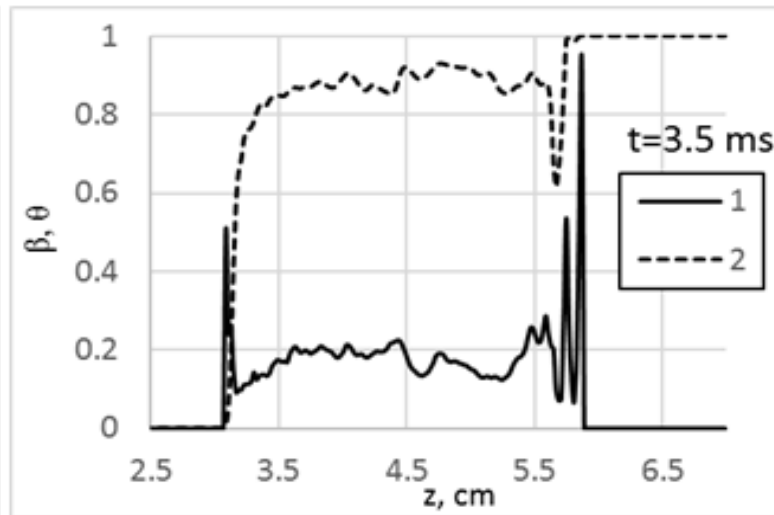
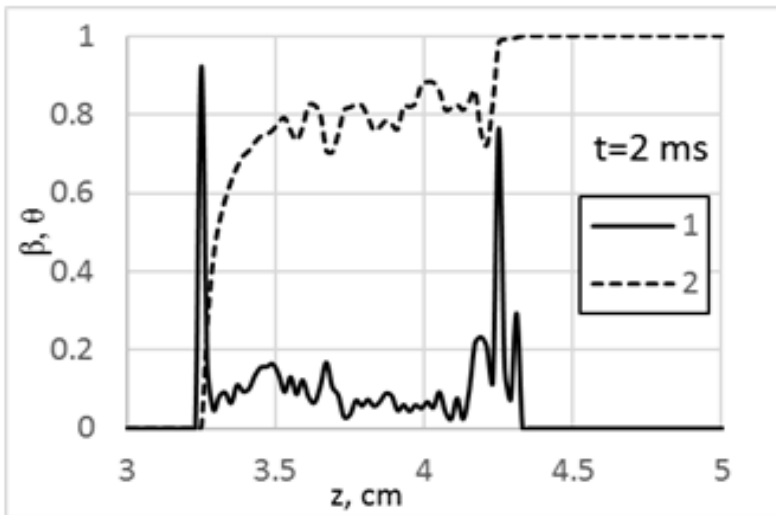


Зависимости ширины ЗТП, струй и пузырей от двойного пройденного пути

h_l – ширина зоны проникания легкого вещества в тяжелое;
 h_h – ширина зоны проникания тяжелого вещества в легкое;

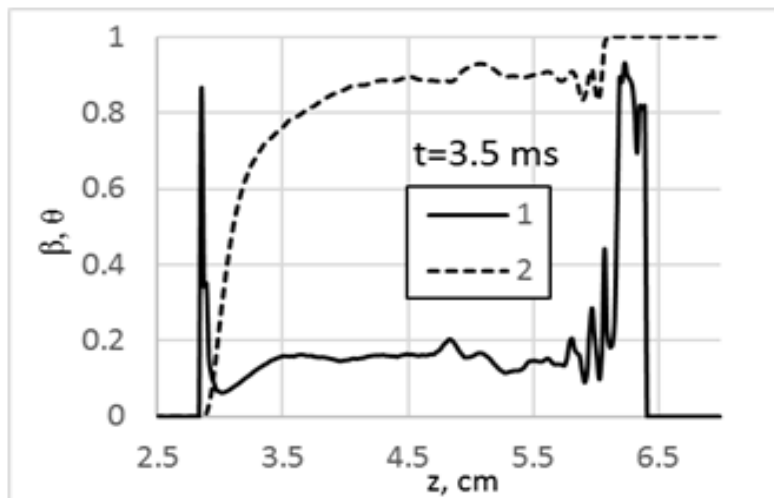
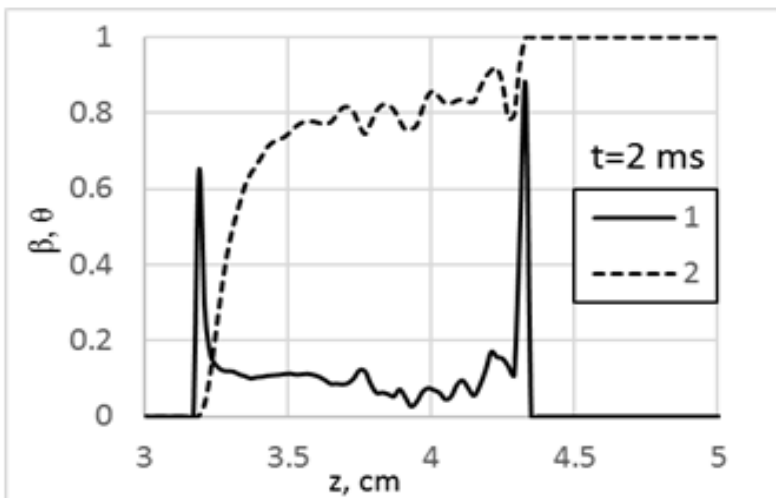
H – полная ширина ЗТП

Переход к турбулентности



Расчёт 4 (3D)

В 3D случае осреднение производим по горизонтальной плоскости площадью $S = \sum \Delta x \cdot \Delta y$



Расчёт 6 (3D с возмущениями КГ и вязкостью)

1 – степень гомогенности; 2 – объемная концентрация

- ✓ Проведено численное моделирование опытов по развитию неустойчивости Рэлея-Тейлора для детерминированных возмущений границы раздела жидкости и газа.
- ✓ Имеется хорошее согласие расчетных результатов с экспериментальными данными по развитию возмущений.
- ✓ Предложенный алгоритм оценки перехода течения к турбулентности на основе критерия по степени гомогенности согласуется с экспериментальными данными.

Спасибо за внимание

