



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

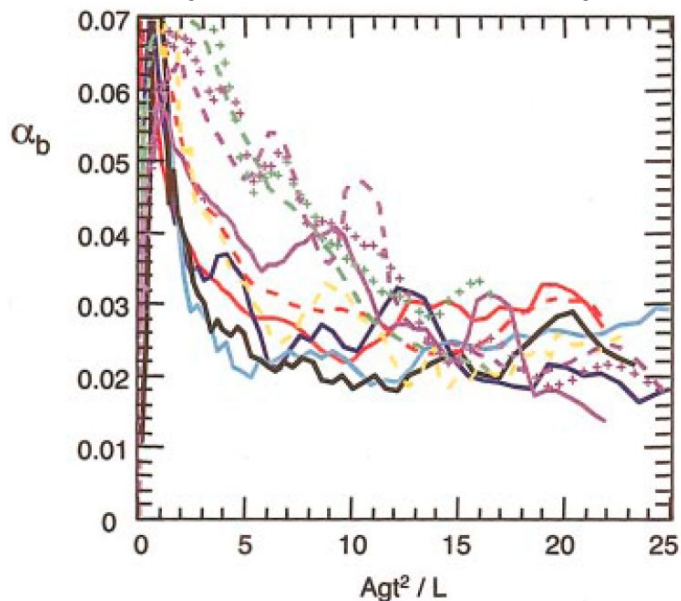
Использование динамической адаптации сетки для расчетов неустойчивости Рэля-Тейлора

Забабахинские Научные Чтения 2023

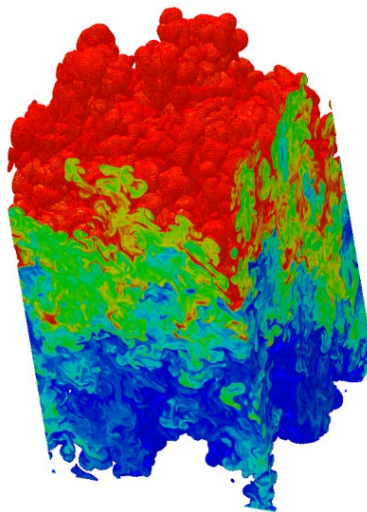
**Михайлов Никита Анатольевич, Глазырин И.В.,
Глазырина Н.В., Писклова М.А.**

Автомодельная стадия НРТ

Результаты альфа-группы^[1]



$$h_b = \alpha_b Agt^2$$



$\alpha_b = f(\text{начальное возмущение})^{[2]}$:

- ❑ Случайные малые коротковолновые

$$\alpha_b \sim 0.025$$

- ❑ Случайные длинноволновые с $a \sim \lambda$ и спектром k^{-3}

$$\alpha_b \sim 0.025 - 0.1$$

- ❑ «Экспериментальные»

$$\alpha_b \sim 0.04 - 0.08$$

- ❑ С крупномасштабным локальным возмущением^[3]

$$\alpha_b > 0.1$$

1. G. Dimonte, D.L. Youngs et al. A comparative study of the Rayleigh-Taylor instability using high-resolution three-dimensional numerical simulations: the alpha-group collaboration. *Physics of Fluids* 16, 1668–1693 (2004).

2. D.L. Youngs. Rayleigh-Taylor mixing: direct numerical simulation and implicit large eddy simulation. *Phys. Scr.* 92 (2017), 074006.

3. Ю.В. Янилкин. Численное исследование взаимодействия зоны турбулентного перемешивания и локальных возмущений в задаче гравитационного турбулентного перемешивания. *Доклад на ЗНЧ-2019.*

Динамическая адаптация сетки

DNS, (I)LES – требуется подробная сетка

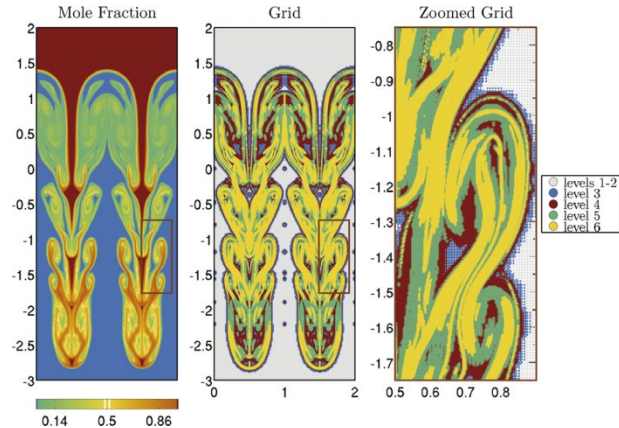
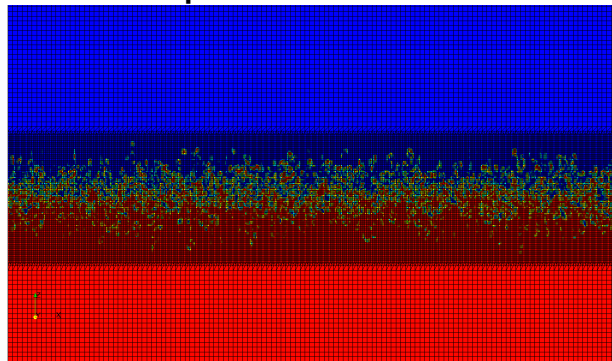
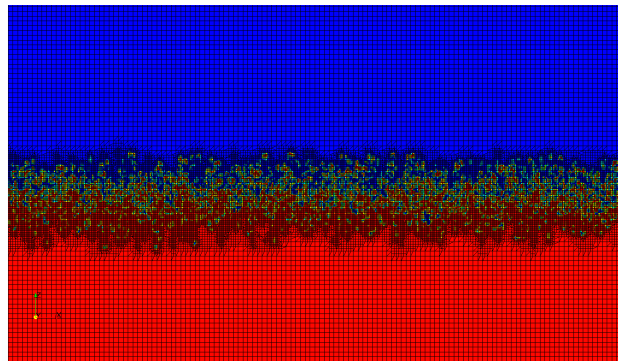
Пространственная локализация зон перемешивания

Динамическая адаптация сетки

Локальная

Плоским слоем
перемешивания

Adaptive wavelet collocation
method[4]



Особенности расчетной ГД методики



Численная схема^[5]

- Эйлеровы переменные
(произвольные вихревые течения)
- Подход Годунова
(без искусственной вязкости)
- Кусочно-линейная TVD-реконструкция величин на гранях ячеек
(монотонность)
- Геометрический VOF
(отсутствие численной диффузии)
- Низкомаховая коррекция^[6]

Расчетная сетка

- Трехмерная нерегулярная из произвольных многогранников
- Динамическая адаптация сетки в целевых областях

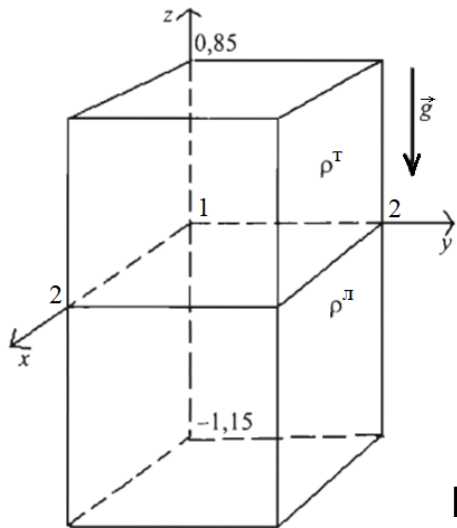
Верификация

- Различные режимы НРТ, НРМ, НКГ
- Эксперименты на ударных трубах, лазерных установках
- Сравнение с кодами NUT (Россия), RAGE (США), TURMOIL (Великобритания) и др.

5. Глазырин И.В., Михайлов Н.А. Конечно-объемная эйлерова схема для многокомпонентных сжимаемых течений на неструктурированной сетке в трехмерной программе Фокус // ЖФММФ, 2021, т. 61, №6, с. 1019-1033.

6. S. Shanmuganathan et. al. Accuracy of high-order density-based compressible methods in low Mach vertical flows. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 2014; 74:335-358.

Постановка задачи на турбулентную стадию НРТ^[7]



$$L = 1, |\vec{g}| = 1$$

$$0 < t < 4$$

$$p(z) = p_0 - \int_{0.85}^z \rho(z') g dz'$$

$$p_0 = 100$$

Начальное возмущение

$$z_0(x, y) = \sum_{k_x, k_y} [a_k \cos(k_x x) \cos(k_y y) + b_k \cos(k_x x) \sin(k_y y) + c_k \sin(k_x x) \cos(k_y y) + d_k \sin(k_x x) \sin(k_y y)].$$

Критерии адаптации:

Послойная (Layer): $0.001 < \bar{\alpha}_1 \bar{\alpha}_2 < 0.999$

Локальная (Local): $0.001 < \alpha_1 < 0.999$

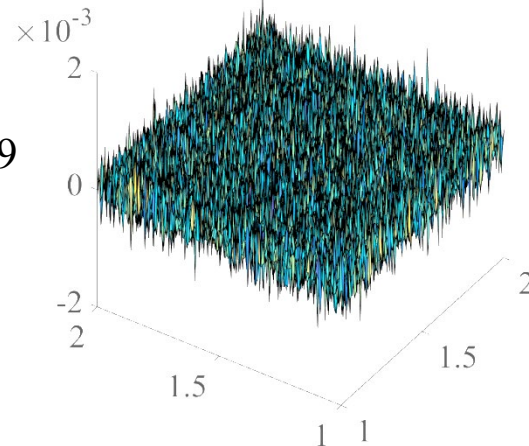
Сетки:

128, 256, 512,

128-2_Layer (с запасом),

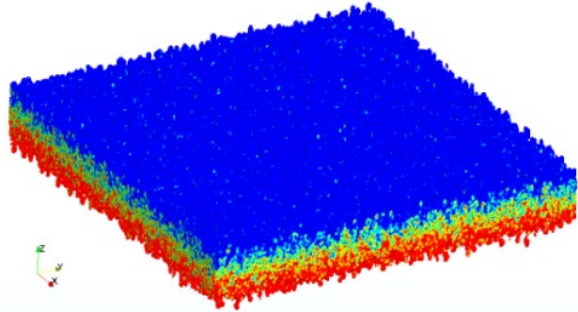
128-2_Local (1 буферный слой).

$RMS = 3 \cdot 10^{-4}$

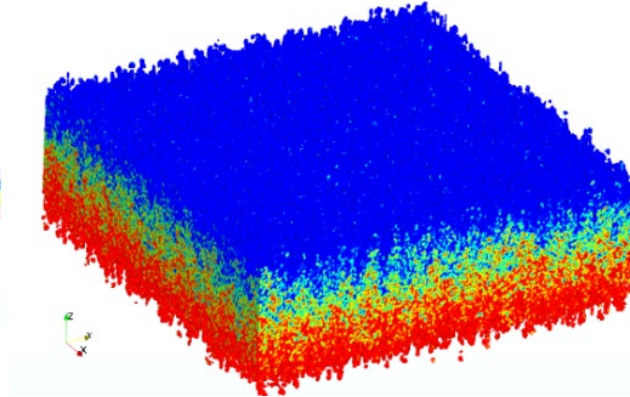


Зона перемешивания

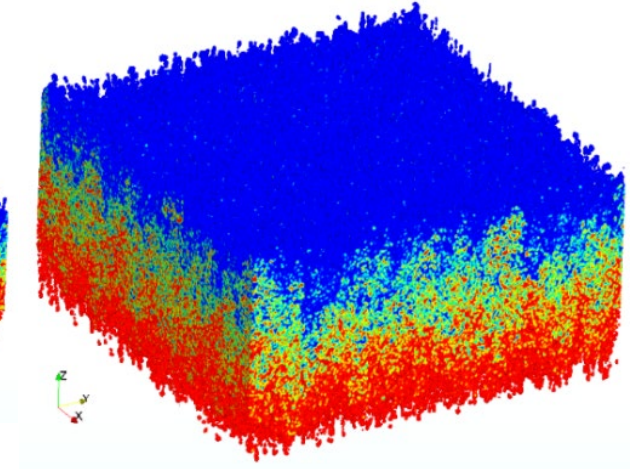
$t = 1$



$t = 2$

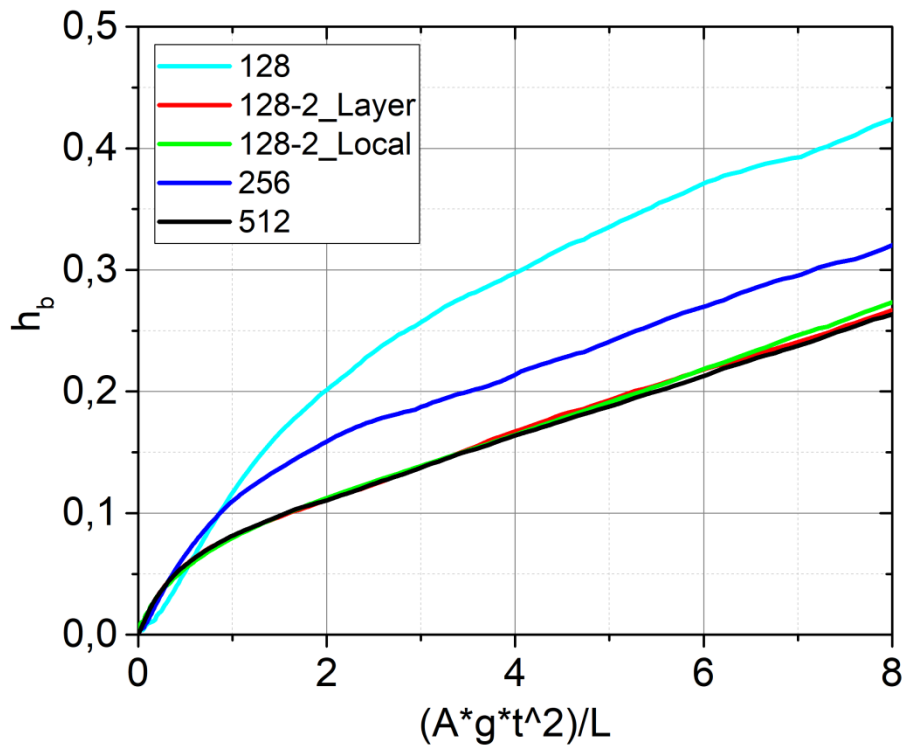
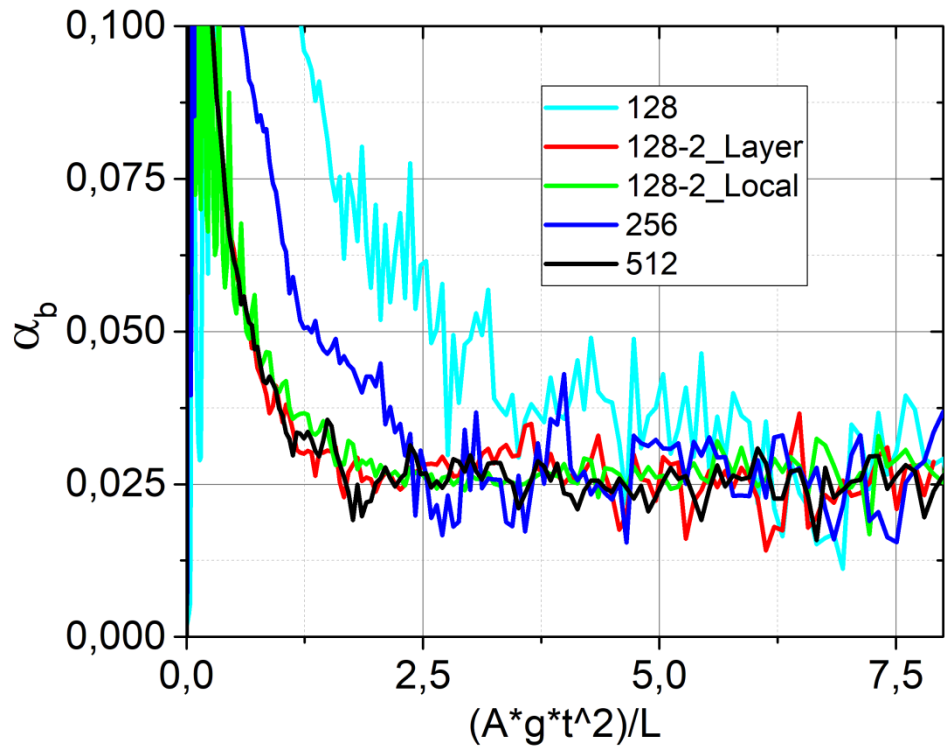


$t = 3$

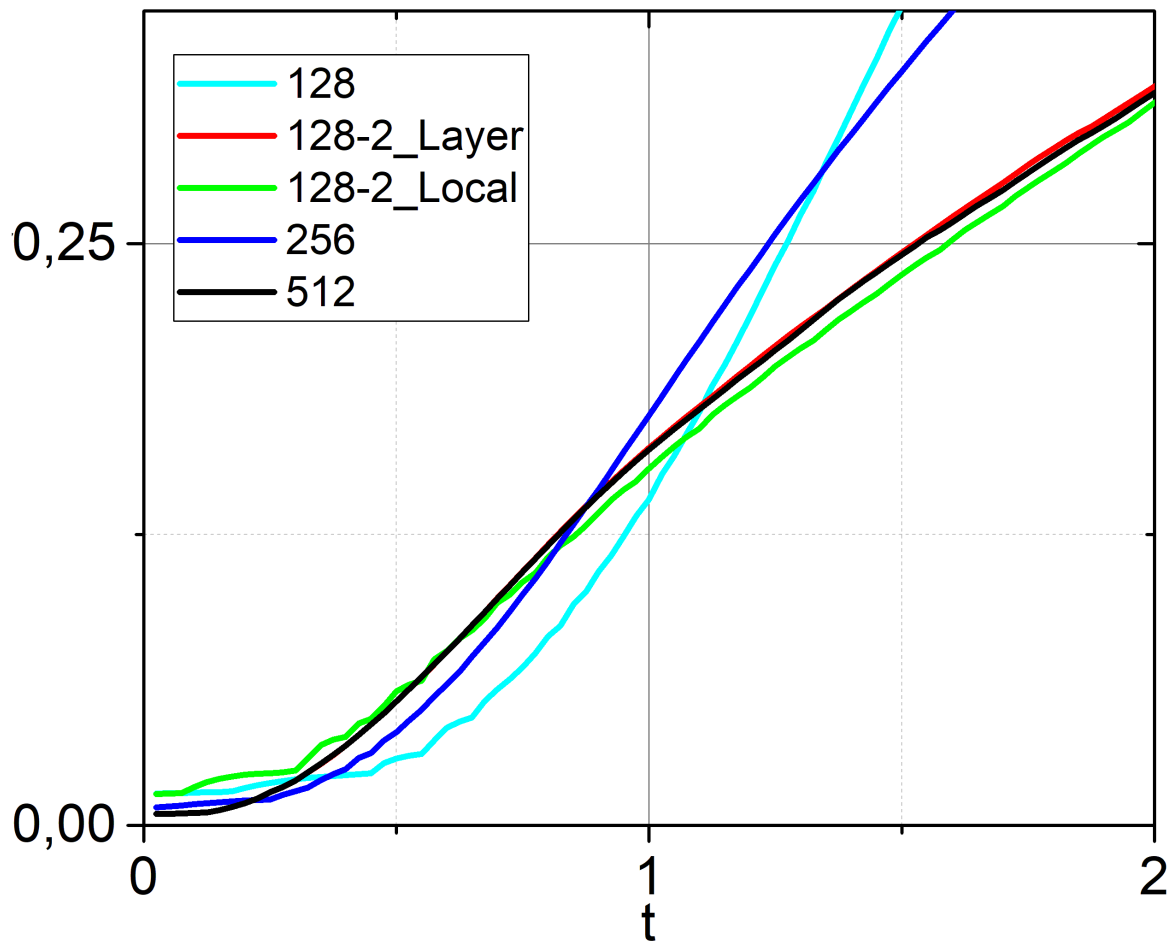


Сетка 512

Динамика роста пузырей



Ширина зоны перемешивания 1-99 %



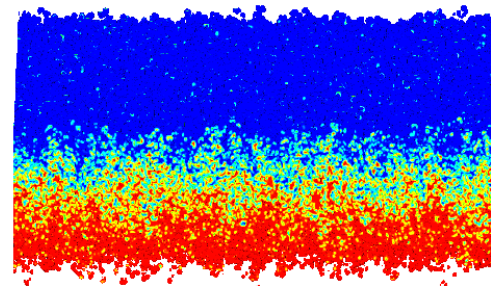
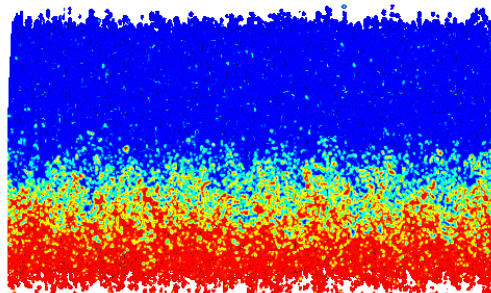
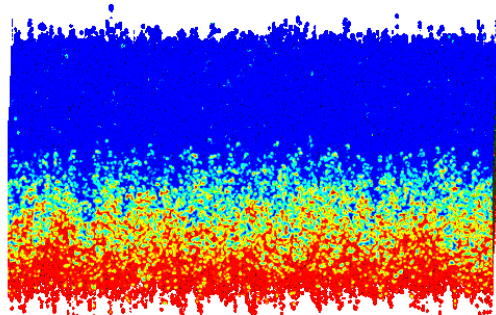
Зона перемешивания



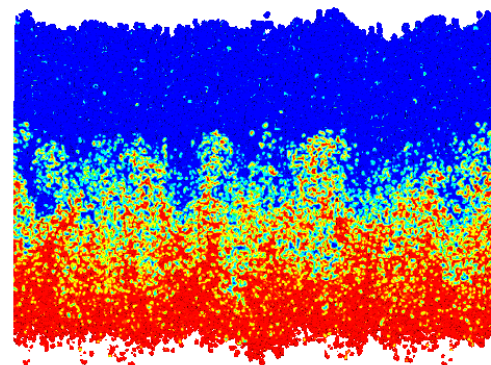
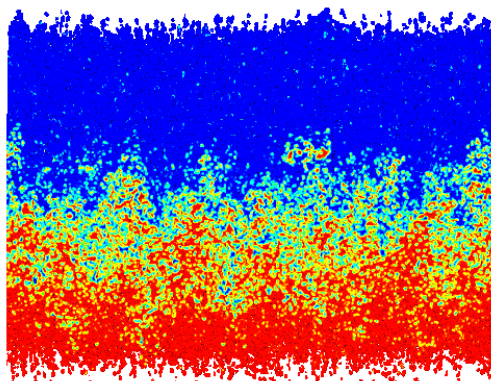
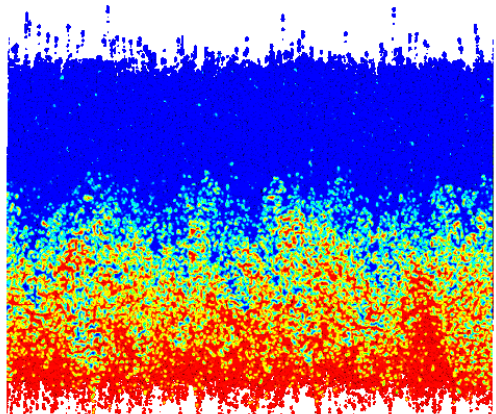
512

128-2_Layer

128-2_Local



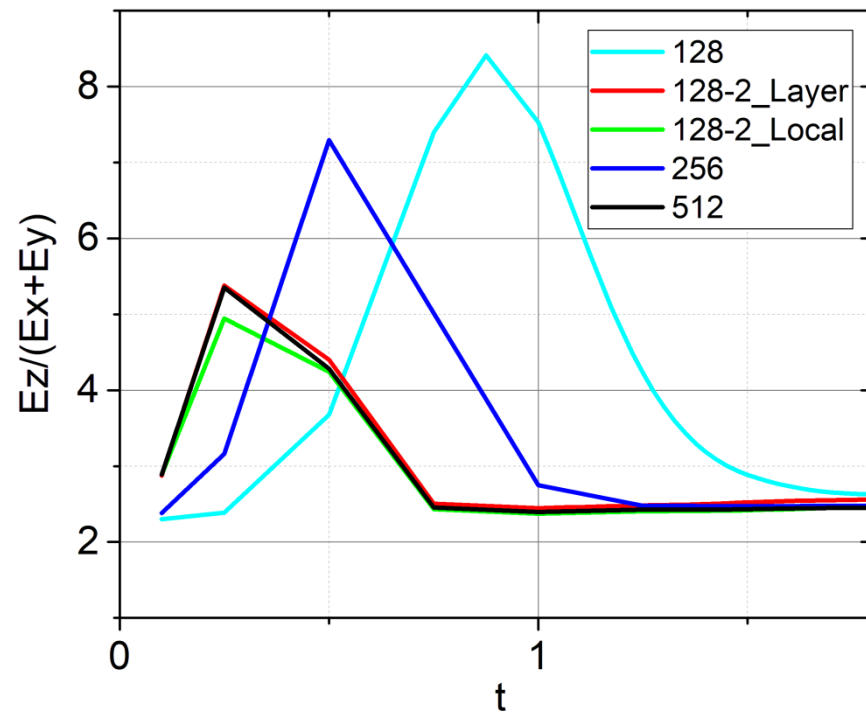
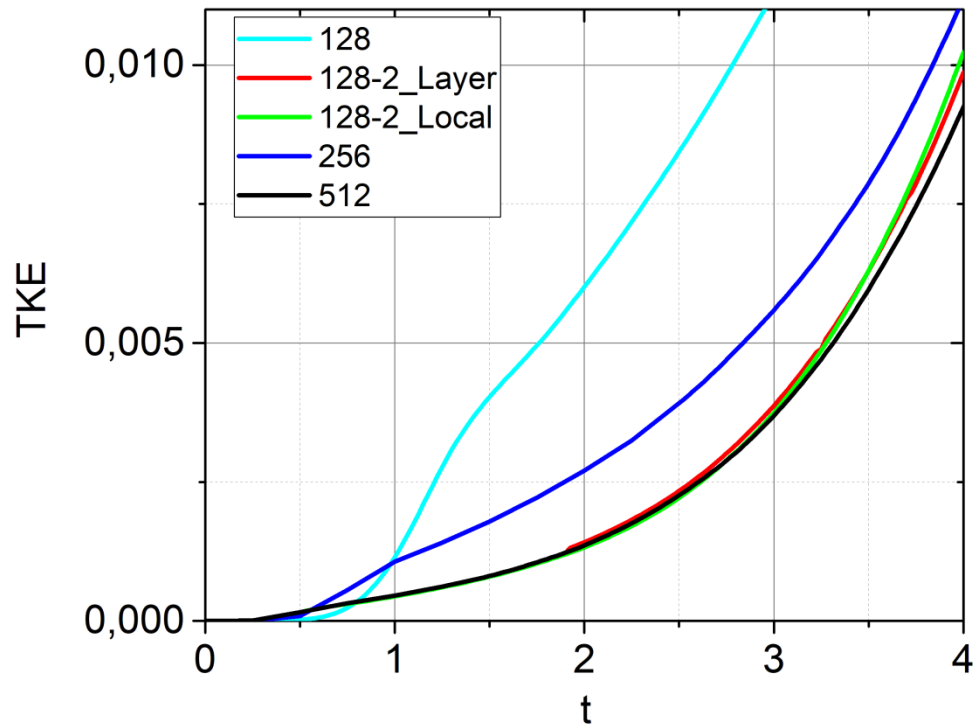
$t = 2$



$t = 3$



Кинетическая энергия пульсаций



Эффективность использования динамической адаптации сетки

	512	128-2_Layer	128-2_Local
Время счета / Время счета 512	1	0.24	0.47
Доля времени на адаптацию (%)	-	1.8	46
Доля времени на балансировку (%)	-	2.3	0.9
Количество адаптаций	-	347	135570
Количество балансировок	-	235	72

Условие
балансировки:

$$\frac{N_{MPI}^{\max}}{N_{MPI}^{\text{сред}}} > 1.5$$

Адаптация зоны перемешивания с запасом

$$T(N_{\text{cycle}}) = \sum_{i=1}^{N_{\text{time}}/N_{\text{cycle}}} c_1 (N_{\text{cells}}^0 + i c_2 N_{\text{cycle}}) N_{\text{cycle}} + c_3 (N_{\text{cells}}^0 + i c_2 N_{\text{cycle}})$$

T – Время расчета

N_{time} – Количество временных шагов

N_{cycle} – Количество временных шагов в цикле

N_{cells}^0 – Стартовое количество ячеек

c_1 – Время счета одной ячейки

c_2 – Количество ячеек, добавляемое при прогнозе на один временной шаг

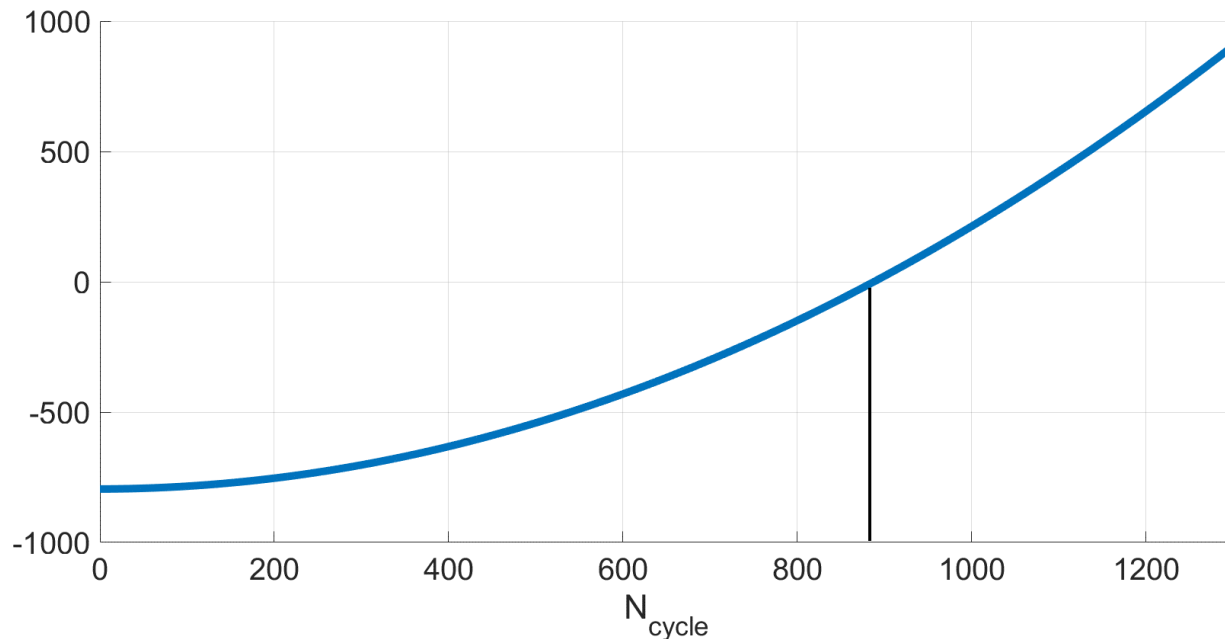
c_3 – Накладные расходы на одну ячейку



Адаптация зоны перемешивания с запасом

$$\frac{dT}{dN_{\text{cycle}}} = 0 \quad \text{– условие экстремума}$$

$$c_1 c_2 (N_{\text{cycle}})^2 + \frac{c_2 c_3}{2} N_{\text{cycle}} - \left(\frac{c_2 c_3}{2} N_{\text{time}} + c_3 N_{\text{cells}}^0 \right) = 0$$



Выводы

- ✓ Динамическая адаптация сетки в расчетах неустойчивых и турбулентных течений является эффективным инструментом.
- ✓ Адаптация по зоне перемешивания с запасом позволяет контролировать и оптимизировать накладные расходы на адаптацию.

**Спасибо
за внимание!**

