

Применение пакета SINARA для  
моделирования турбулентного  
перемешивания на границе раздела  
газов

Гаджиева В.В., Кузьмин С.Ю.,  
Лебедев С.Н., Сизова И.Е.,  
Стряхнина О.В.

РФЯЦ-ВНИИТФ

Снежинск

2005

# Моделируемые процессы

- Движение вязкой многокомпонентной односкоростной среды
- Упругопластические и прочностные свойства материалов
- Турбулентность
- Линейная теплопроводность
- Излучение
- Перенос нейтронов
- Учет запаздывающих нейтронов, резонансной самоэкранировки сечений и доплер-эффекта
- Учет выгорания изотопов

# Модели среды

- идеальная жидкость с учетом многокомпонентности среды
- упругое тело, пластичность, сжимаемость, разрушение, плавление, испарение
- вязкая жидкость с учетом многокомпонентности среды
- турбулентность
- геометрическая модель излучения

# Модули

- нестационарная гидродинамика
- турбулентное перемешивание
- нестационарная гидродинамика с учетом упруго-пластических и прочностных свойств среды
- теплопроводность
- излучение
- перенос нейтронов
- нейтронно-ядерная кинетика

# Метод решения уравнений газовой динамики

- ALE-метод
- Явно-неявная схема с разнесенным шаблоном
- TVD для эйлерового этапа

## Неявная схема

- Система уравнений для вязкого давления

$$\begin{cases} P^{n+1} + \psi \cdot \operatorname{div} \vec{U}^{n+\frac{1}{2}} = \varphi. \\ \vec{U}^{n+1} + \frac{\tau}{\rho^{n+1}} \cdot \operatorname{grad} P^{n+1} = \vec{U}^n \end{cases}$$

- Схема 1. Интерполяция скорости
- Схема 2. Введение ускорения

$$\vec{W}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\tau} (\vec{U}^{n+1} - \vec{U}^n)$$

## Схема «Ромб»

- Шаблон

$$W_{\xi} = \vec{W} \cdot \vec{n}_{\xi},$$

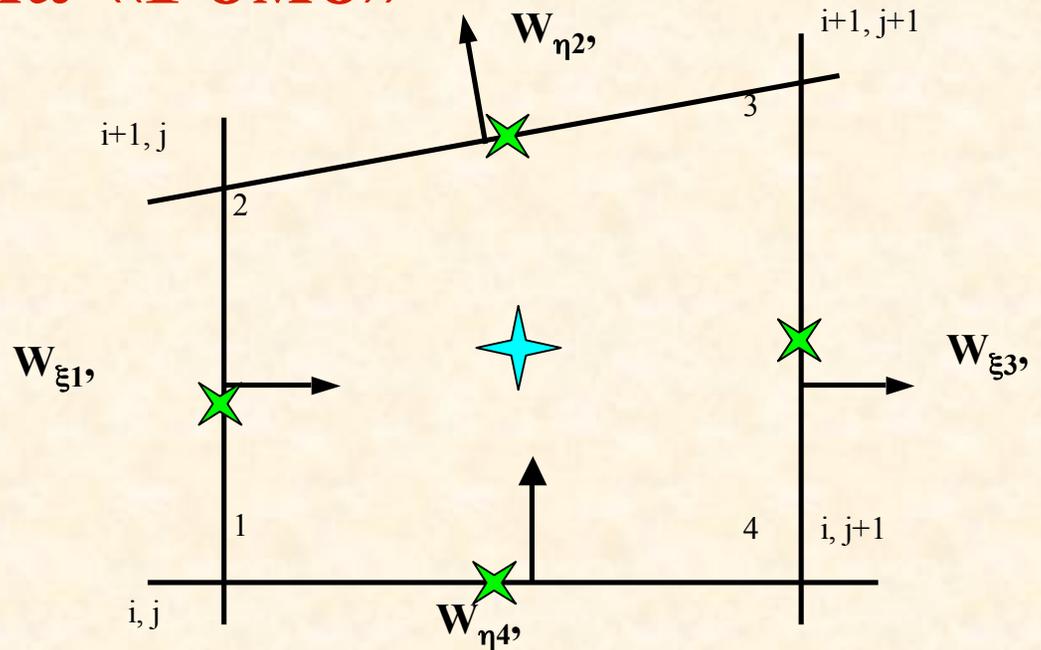
$$W_{\eta} = \vec{W} \cdot \vec{n}_{\eta}$$

- Метод СП  $\rightarrow$  1D

- Дополнительные условия

$$U_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(U_{i+1} + U_i) + \theta_{i+\frac{1}{2}}(P_{i+1} - P_i),$$

$$P_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(P_{i+1} + P_i) + \delta_{i+\frac{1}{2}}(U_{i+1} - U_i)$$



## Схема «Ромб» без расщепления

- Переход к вязким величинам

$$\vec{u} = \vec{U} + \theta \cdot \text{grad } P, \quad p = P + \delta \cdot \text{div} \vec{U}$$

- Аппроксимация
- Дополнительные соотношения

$$p_{i+1/2, j+1/2} = \frac{p_{i+1} + p_i}{2} = \frac{p_{j+1} + p_j}{2}$$

$$(W_\xi)_{j+1/2} = \frac{(W_\xi)_{i+1} + (W_\xi)_i}{2}, \quad (W_\eta)_{j+1/2} = \frac{(W_\eta)_{j+1} + (W_\eta)_j}{2}$$

- Решение СЛАУ итерационным методом

# Моделирование почти несжимаемой жидкости

- $M \ll 1$
- Модификация уравнений -  
масштабирование градиента давления

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\frac{1}{\alpha^2} \vec{\nabla} P$$

- Выбор параметра  $\alpha$

$$\delta P_\alpha / \bar{P} < \varepsilon, \quad \varepsilon \ll 1, \quad \alpha \geq 1$$

# Модели турбулентного течения

- Lv модель

- ✓ Уравнения Навье-Стокса

- ✓ Коэффициент турбулентной вязкости

$$\mu = \rho L^2 \left( \vec{G} : \vec{\nabla} \vec{u} \right)^{1/2}$$

- Kε модель

- ✓ расчет уравнений газодинамики и генерации турбулентности

- ✓ учет турбулентной диффузии, турбулентного давления и решение уравнения энергии

- ✓ учет теплового потока тепла и турбулентного теплопереноса

# Тестирование кода SINARA

- Тесты для уравнений газовой динамики и теплопроводности
  - ✓ Набор тестов - ВАНТ
- Вязкие несжимаемые течения
  - ✓ Расчет конвекции воздуха в поле сил тяжести
  - ✓ Течение Пуайзеля несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе

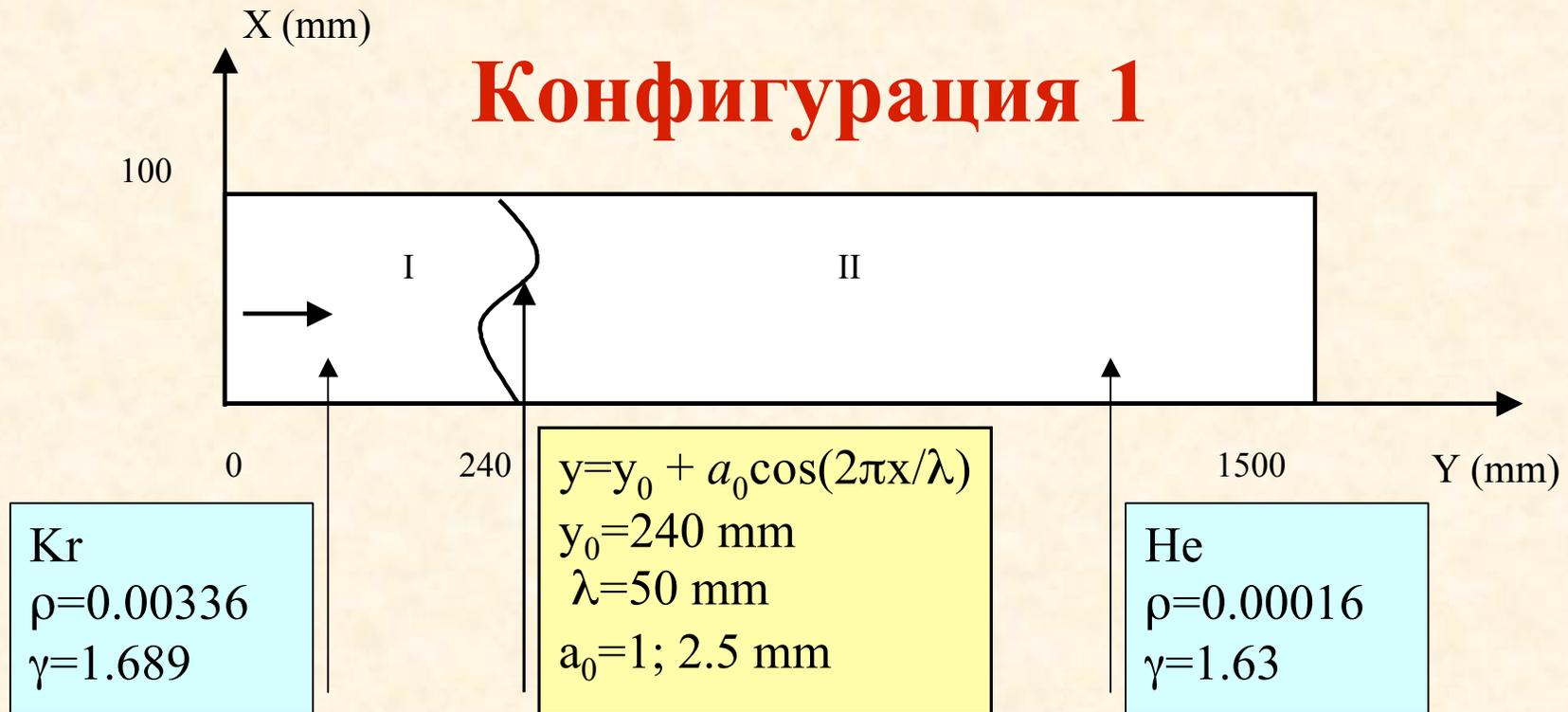
# Тестирование кода SINARA

- Тесты по турбулентности
  - ✓ течение в шероховатой трубе
  - ✓ плоский двумерный стационарный слой смешения
  - ✓ гравитационная неустойчивость
  - ✓ тепловая конвекция
- Схема расчета адвекции
  - ✓ Распад разрыва
  - ✓ Разлёт треугольной призмы в вакуум

# Прямое моделирование неустойчивости Рихтмайера-Мешкова

- Эксперимент на электромагнитной ударной трубе
- Переход УВ из легкого газа в тяжелый
  - ✓ УВ - неустойчивость Рихтмайера-Мешкова
  - ✓ Волна разрежения - гравитационно-устойчивое состояние
- Переход УВ из из тяжелого вещества в легкое
  - ✓ наложение неустойчивостей Рихтмайера-Мешкова и Релея-Тейлора

# Конфигурация 1

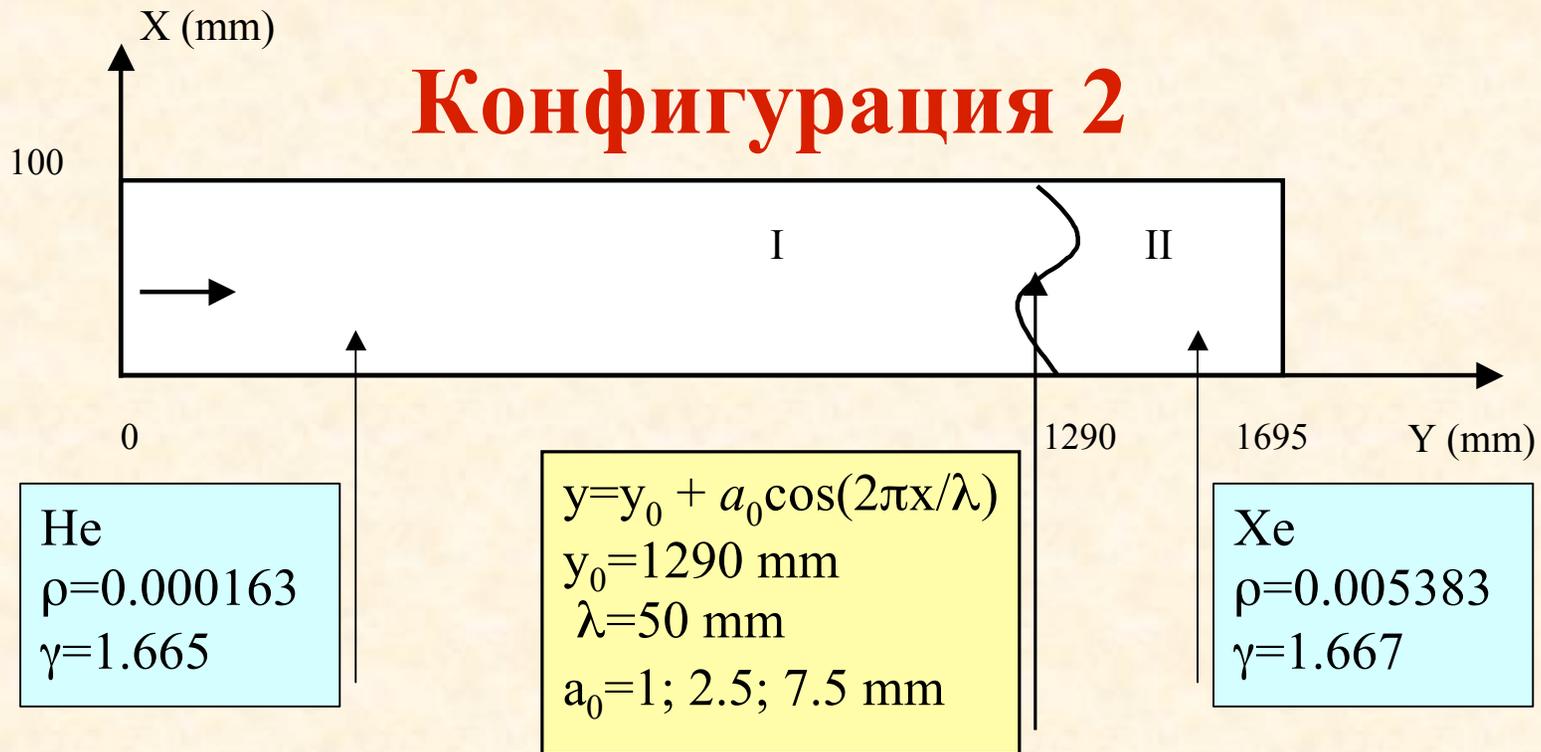


Граничное условие ( $y=0$ ):  $u = U_0 \exp(-t/\tau)$ ,

$$U_0 = 0.948 \text{ mm}/\mu\text{s}, \tau = 153.56 \mu\text{s}$$

Начальное давление:  $p_0 = 0.984$  bar

## Конфигурация 2



Граничное условие ( $y=0$ ):

$$P(t) = \begin{cases} P_n, & 0 \leq t \leq t^* \\ P^* \exp(-2t/\tau) \sin^2(2\pi t/T), & t^* \leq t \leq T/2 \\ 0, & t \geq T/2 \end{cases}$$

$P_n = 1.217 \text{ bars}$ ,  $t^* = 1.2 \mu\text{s}$ ,  $P^* = 123.3 \text{ bar}$ ,  $T = 75 \mu\text{s}$ ,  $\tau = 97.4 \mu\text{s}$

Начальное давление:  $p_0 = 0.976 \text{ bar}$

## О моделях смесей

- Гомогенная модель  $(\bar{T}, \bar{\rho}, m_1, \dots, m_k, n_1, \dots, n_k)$

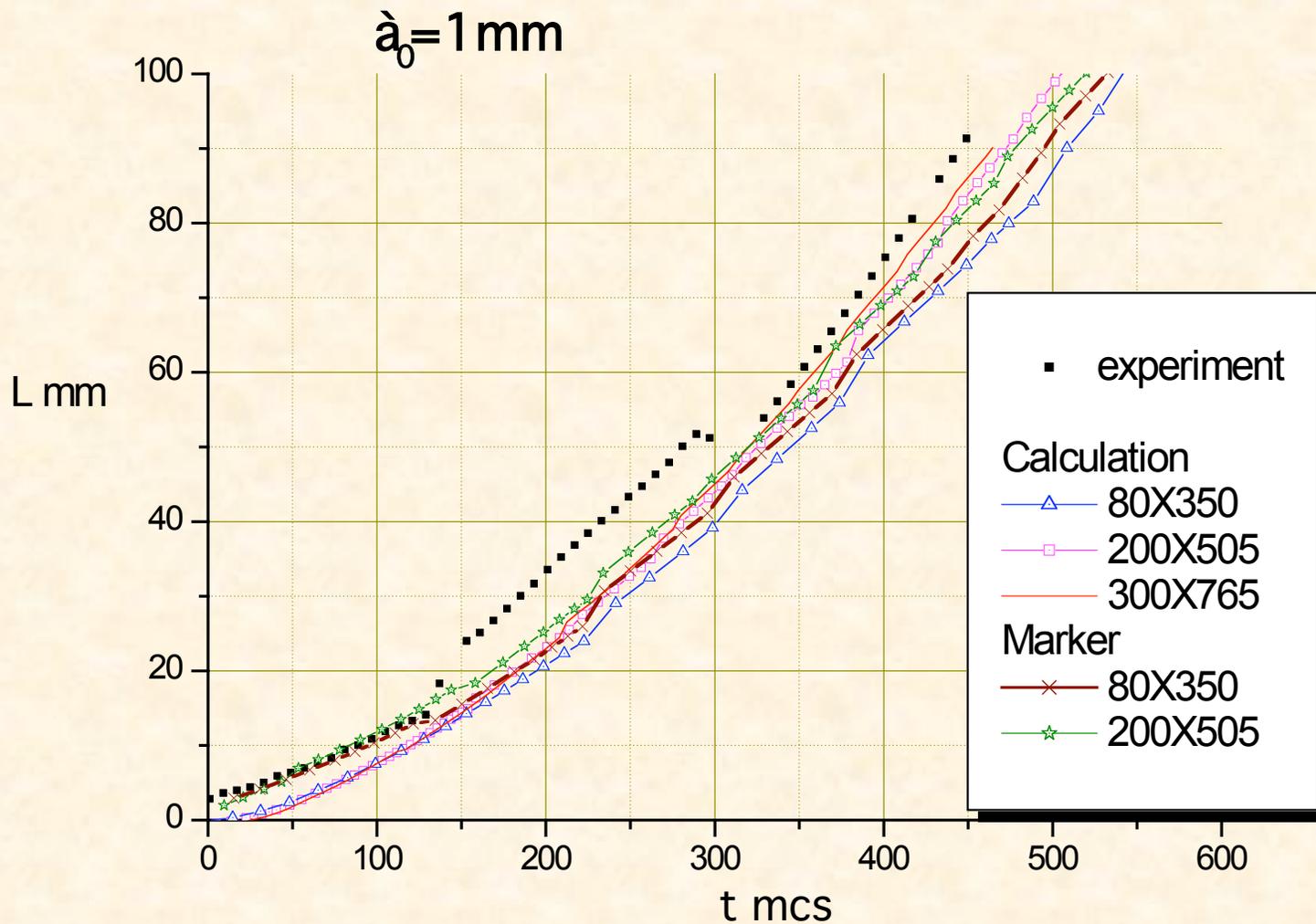
- Гетерогенная модель

$$(T_1, \dots, T_k, \rho_1, \dots, \rho_k, m_1, \dots, m_k, V_1, \dots, V_k, n_1, \dots, n_k)$$

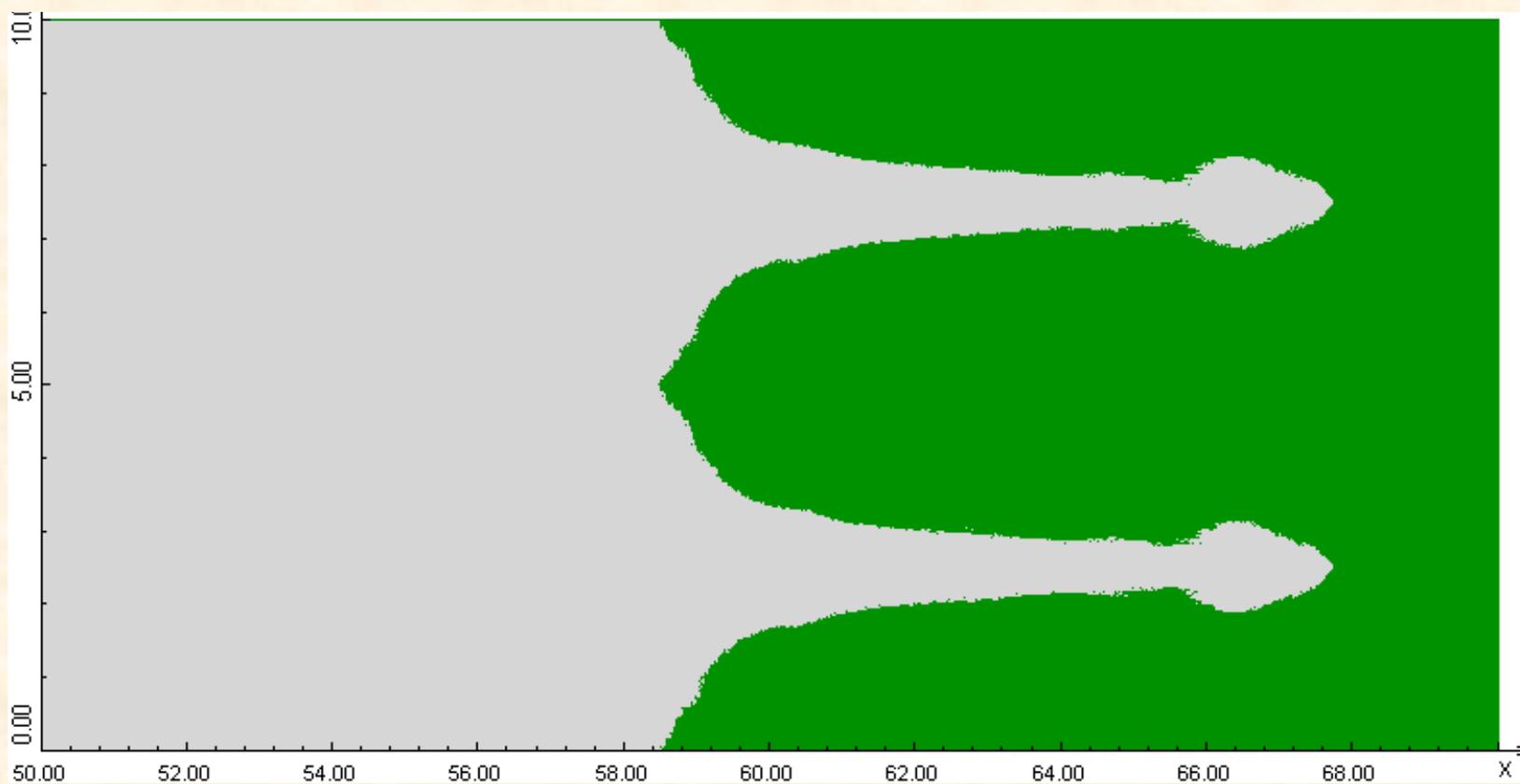
$$\bar{P} = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \xi_i \cdot P_i(\rho_i, T_i), \quad \bar{\varepsilon} = \sum_{i=1}^k c_i \cdot \bar{\varepsilon}_i(\rho_i, T_i)$$

- ✓ Равная сжимаемость веществ смеси
- ✓ Динамическое равновесие веществ в смеси
- ✓ Равенство приращений давлений

# Результаты для конфигурации 1

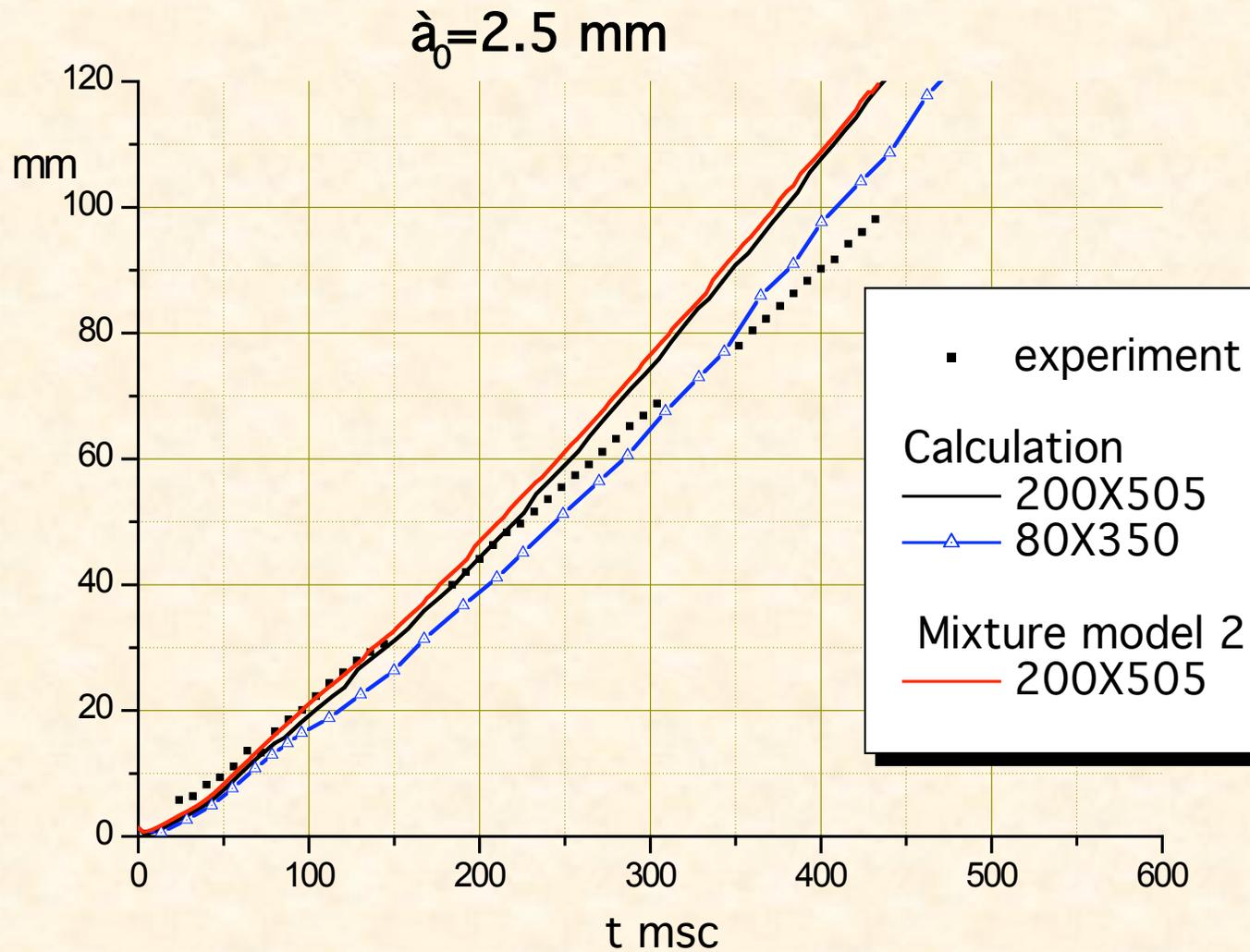


# Результаты для конфигурации 1

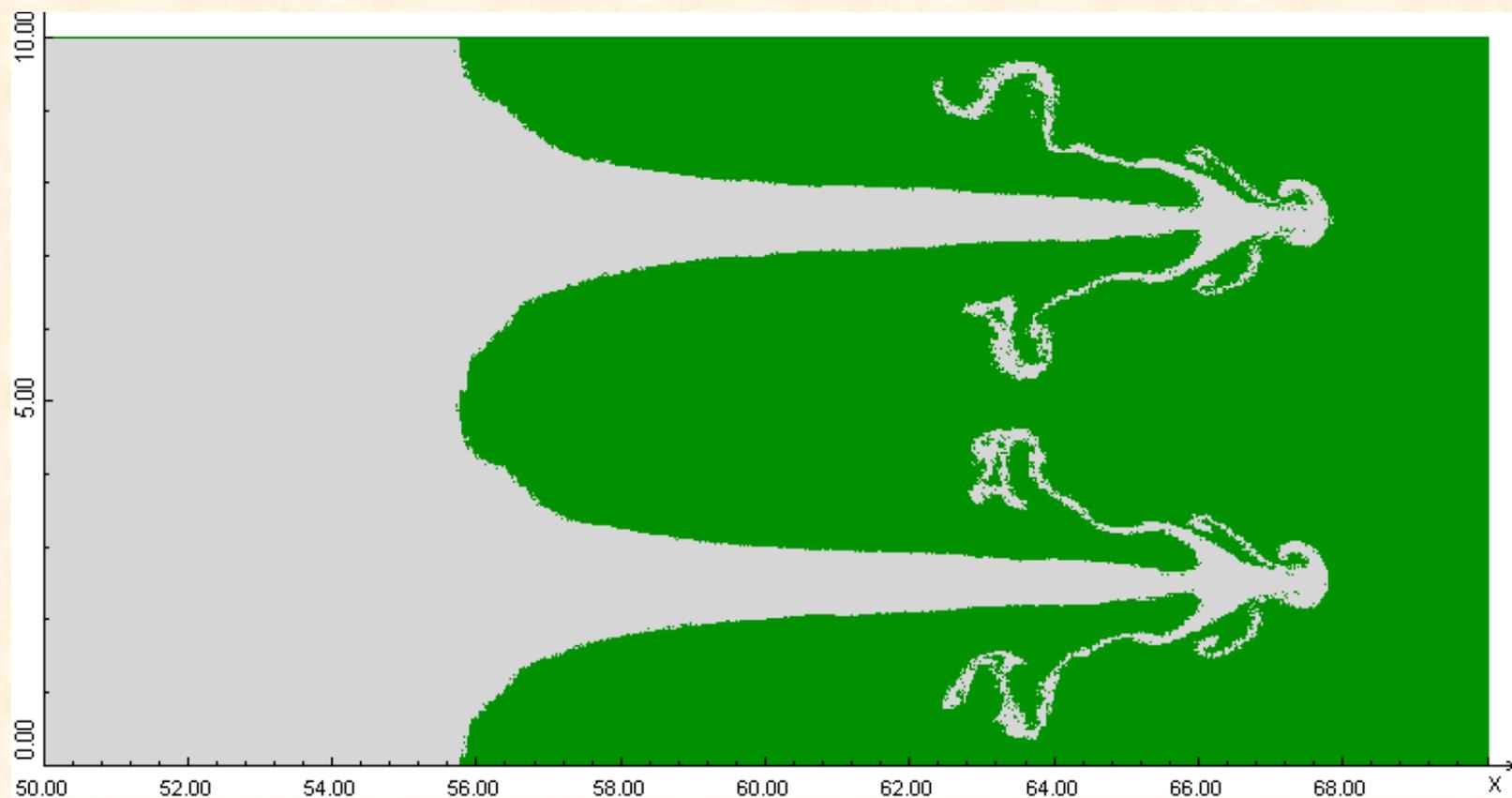


$a_0 = 1 \text{ mm}$

# Результаты для конфигурации 1

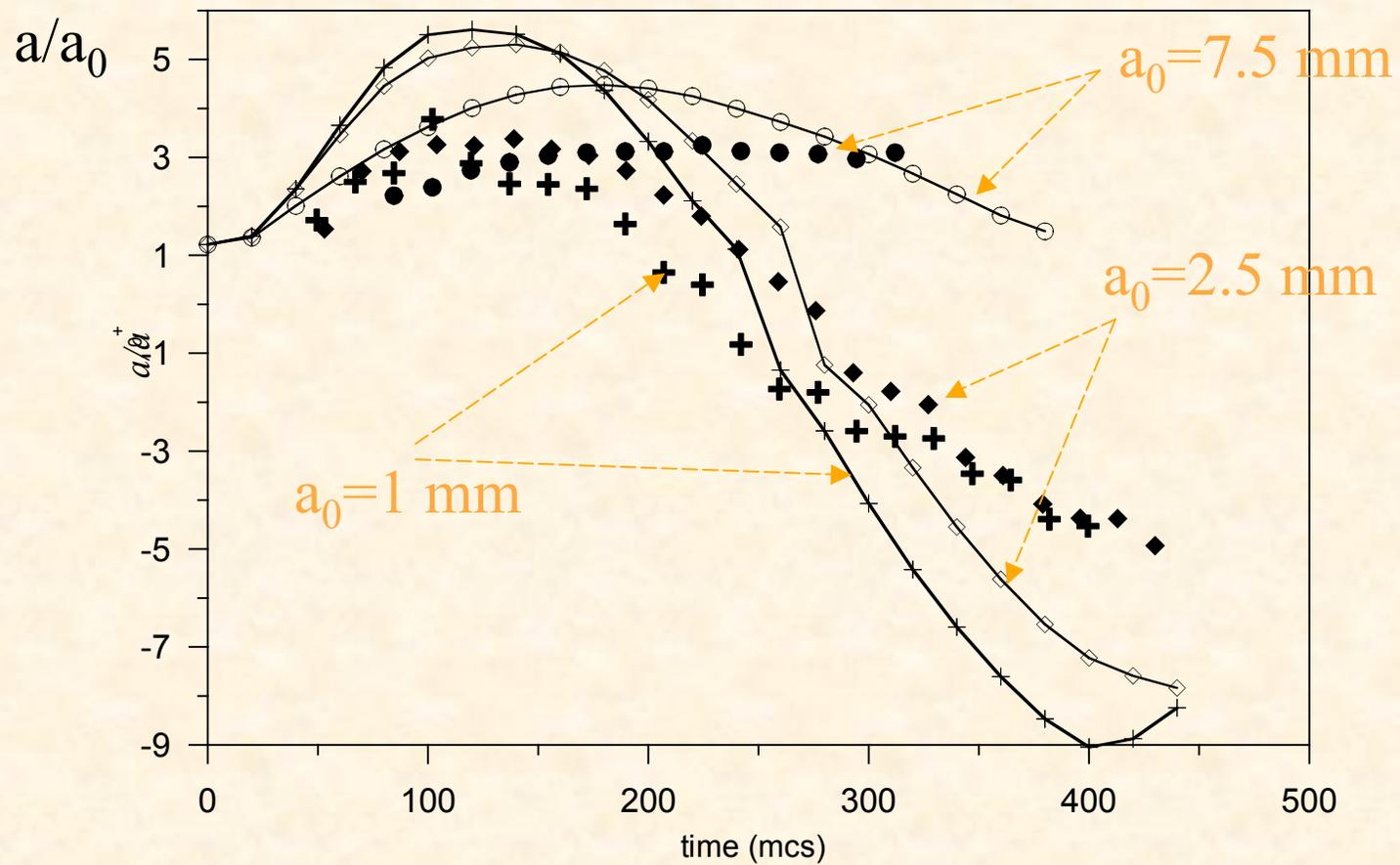


# Результаты для конфигурации 1



$a_0 = 2.5 \text{ mm}$

## Результаты для конфигурации 2



# Результаты для конфигурации 2

$a_0 = 1 \text{ mm}$



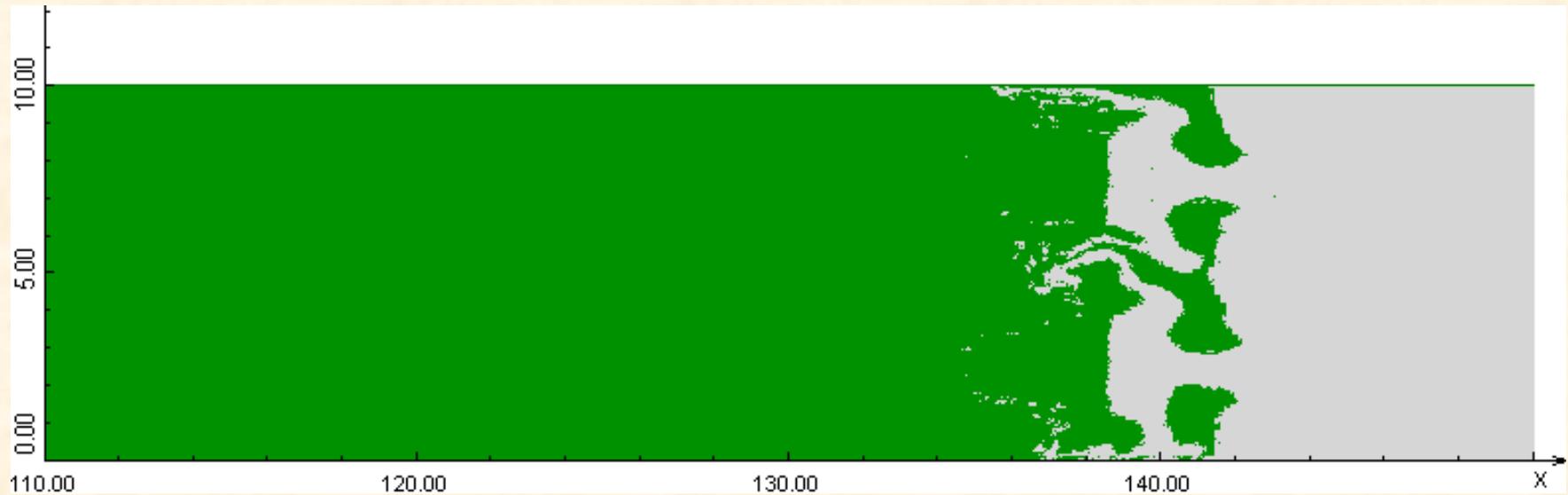
## Результаты для конфигурации 2

$a_0 = 2.5 \text{ mm}$



# Результаты для конфигурации 2

$a_0 = 7.5 \text{ mm}$



# Обсуждение результатов для конфигурации 1

- Зависимость для описания реального размера зоны перемешивания

$$\sqrt{\hat{L}} = \sqrt{L_0} + \sqrt{L}$$

- Автомодельная ширина зоны  $L = \alpha A^2 S$

✓  $A$  – число Атвуда,  $A = (\rho_1 - \rho_2) / (\rho_1 + \rho_2)$

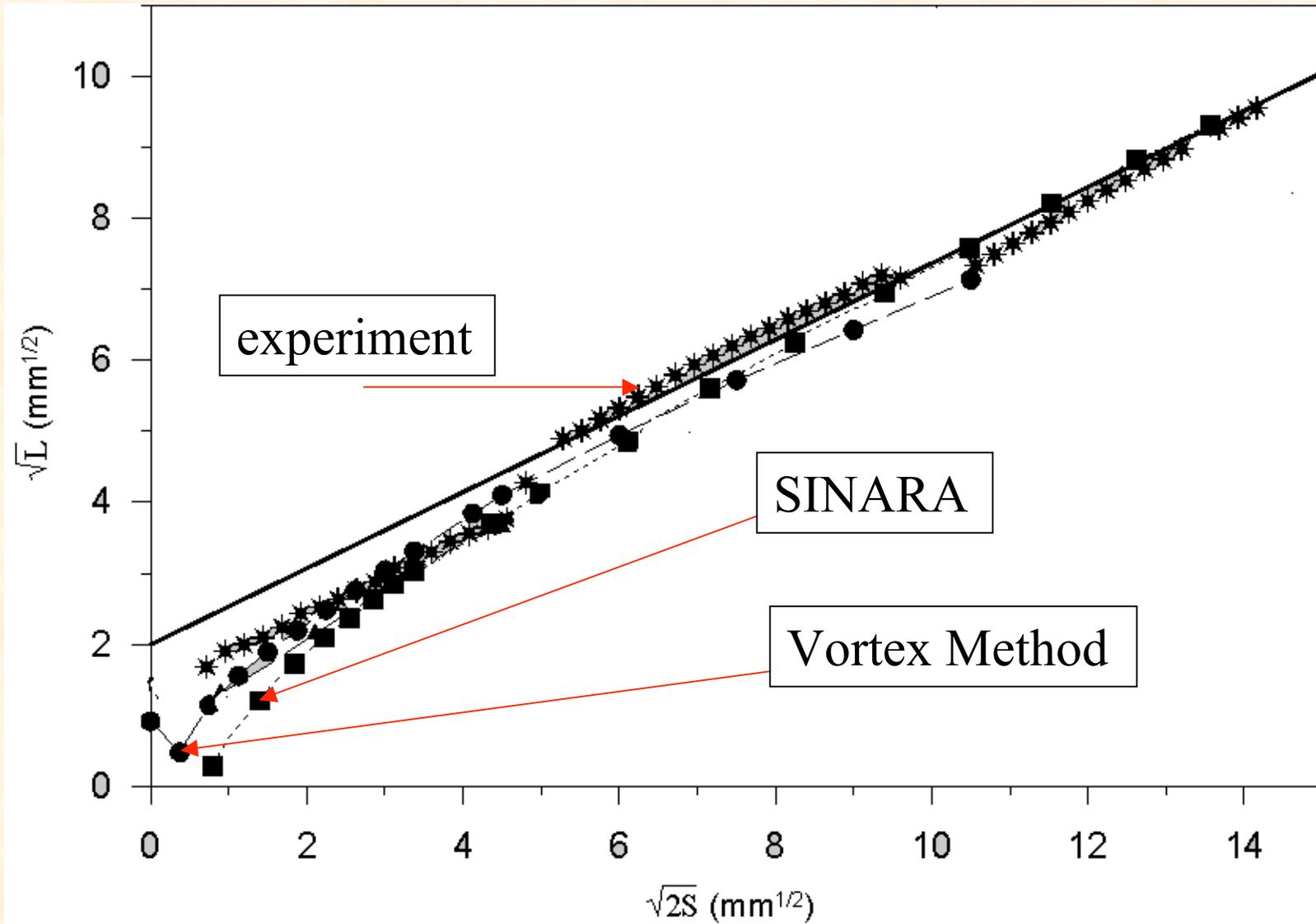
✓  $S$  – путь торможения,  $S = \Delta U t - \Delta \hat{x}$

- Значение  $\alpha$

$$\sqrt{\alpha A} = d \sqrt{\hat{L}} / d(\sqrt{2S})$$

$$\alpha_{\text{exper}} \approx 0.26$$

# Изменение $\alpha$ для конфигурации 1



**Thank you**