



# Развитие программного комплекса САВАРЕТ-SC1 для задач водородной безопасности

Готов В.Ю., ИБРАЭ РАН

# Программный комплекс CABARET-SC1

Разработка CFD-кода **CABARET-STAGES** (А.В. Соловьев, А.А. Канаев, В.Ю. Готов, А.В. Данилин, 2015-2017 гг.) для широкого спектра задач вычислительной гидродинамики

- ✓ В основе балансно-характеристическая методика **КАБАРЕ** (В.М. Головизнин)
- ✓ Несколько «сцен» в рамках единой программной платформы
  - SC1** – Многокомпонентная газовая смесь (Low-Mach)
  - SC2** – Слабосжимаемая жидкость
  - SC3** – Сжимаемый газ
  - SC4** – Горение и детонация газовой смеси
- ✓ Нерегулярные гексаэдральные сетки, адаптированные к границам (использование библиотеки **MOAB**)
- ✓ Параллельная реализация для многопроцессорных систем, **MPI**, асинхронные обмены

Программный комплекс **CABARET-SC1** (В.Ю. Готов, А.В. Данилин, А.А. Канаев, 2018-н.в.) ориентирован на задачи водородной взрывобезопасности ОИАЭ (АЭС, объекты гражданской ВЭ, термоядерные установки)

- Архитектура кода унаследована от **CABARET-STAGES (SC1+SC4)**
- Разработаны некоторые новые способы оптимизации базовой гидродинамической модели
- Разработаны модели специфических физико-химических процессов и технических устройств



# Программный комплекс САВАРЕТ-SC1

## Базовая гидродинамическая модель:

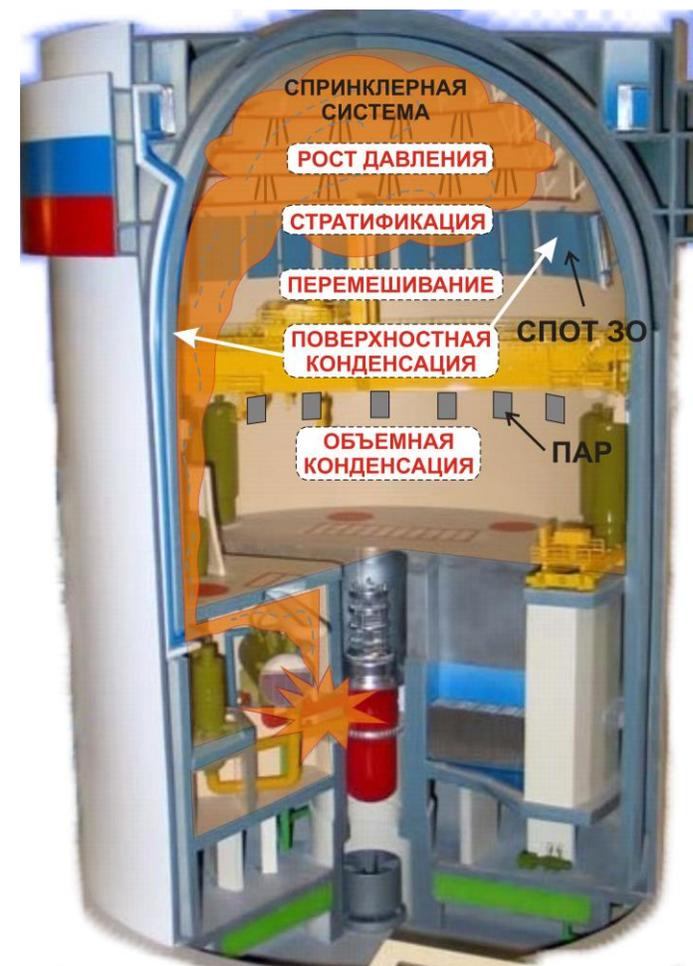
- ✓ Многокомпонентная смесь вязких сжимаемых газов
  - сверхзвуковые недорасширенные струи
  - быстрое горение/детонация
- ✓ Модель с искусственной сжимаемостью (Low-Mach)
  - распространение водорода, образование/разрушение стратификации
  - медленное горение
- ✓ Гибридная модель
  - многомасштабные процесс (истечение+распространение)

## Физико-химические процессы:

- ✓ Сопряженный теплообмен газ-стенки
- ✓ Конденсация пара (пристенная, объемная)
- ✓ Перенос тепла излучением (модель Росселанда, FVM)
- ✓ Горение и детонация ВГС (детальная хим. кин., TFC, EDM)
- ✓ Турбулентность (ILES, URANS)
- ✓ Перенос, горение и детонация пыли (гибридное горение газ+пыль)
- ✓ Поверхностные реакции (пар + Be, пар + W)

## Технические устройства:

- ✓ Диффузионная модель ПКРВ (РВК-500)



# Многокомпонентная смесь вязких сжимаемых газов

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_k \vec{u}) = -\operatorname{div}(\vec{j}_k), & k = 1, \dots, N \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u_i \vec{u}) + \nabla_i P = \nabla_i \tau_{ij} + \rho g_i, & i, j = 1, \dots, 3 \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}((\rho E + P)\vec{u}) = \nabla_i (\tau_{ij} u_j) + \rho(\vec{g}, \vec{u}) - \operatorname{div}\left(\vec{q} + \left(\sum_{k=1, N} c_{p,k} \vec{j}_k\right) T\right), & i, j = 1, \dots, 3 \end{cases}$$

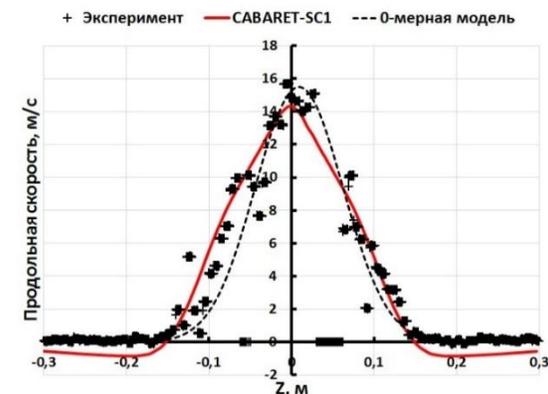
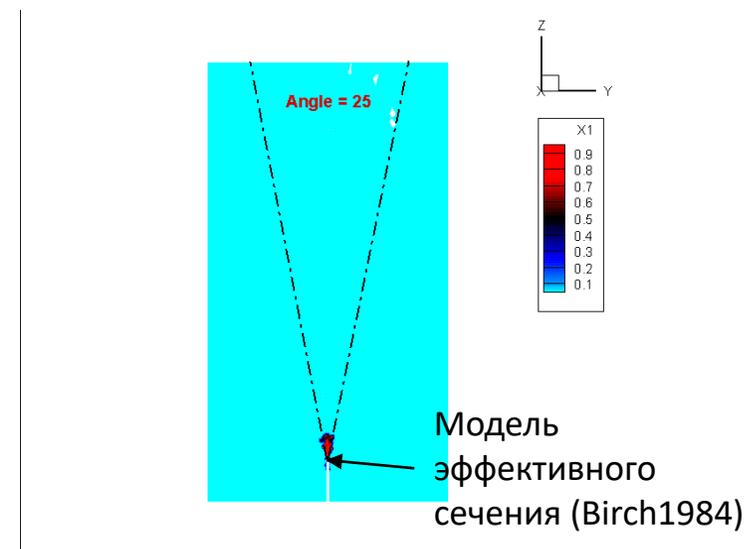
$$\tau = CFL \cdot \left( \frac{h}{|u| + c} \right)_{\min}$$

$$E = k + e; \quad k = \frac{1}{2}(\vec{u}, \vec{u}); \quad e = C_V T; \quad P = (\gamma - 1)\rho e$$

Аппроксимация уравнений по схеме **КАБАРЕ** с обработкой звуковых точек на основе точного решения задачи Римана о распаде разрыва ([Данилин, Соловьев 2019](#))

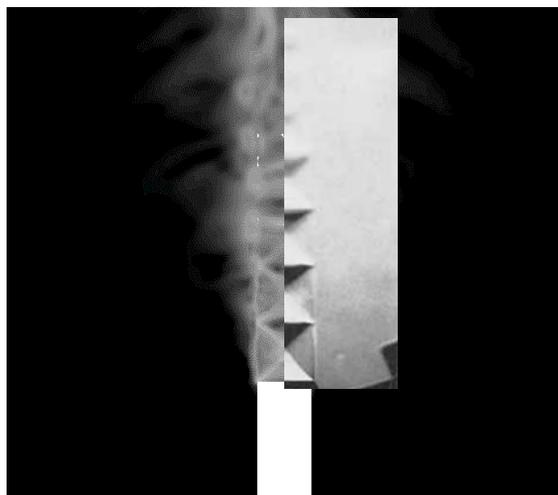
Диффузионный перенос представлен в системе тензором вязких напряжений и векторами плотности потоков тепла и массы, для которых используется градиентное приближение в виде законов Ньютона, Фурье и Фика соответственно. Для их аппроксимации используется метод с выделением потоковых переменных на неструктурированных криволинейных сетках ([Головизнин, Котеров, Кривцов, 2011](#))

KIT, HD35-37 (d=1mm, P=53bar)

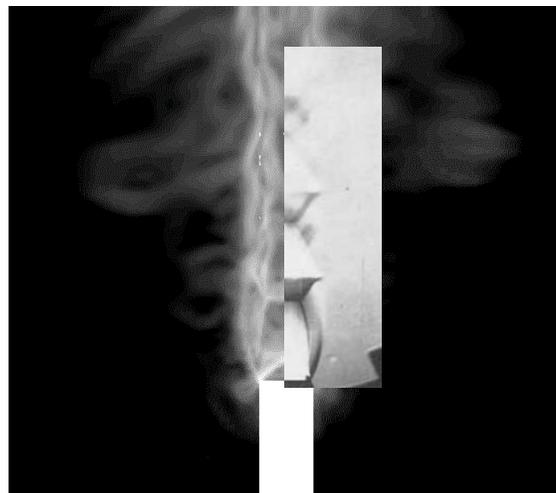


## C. D. Donaldson and R.S. Snedeker. A study of free jet impingement. Part 1. Mean properties of free and impinging jets.

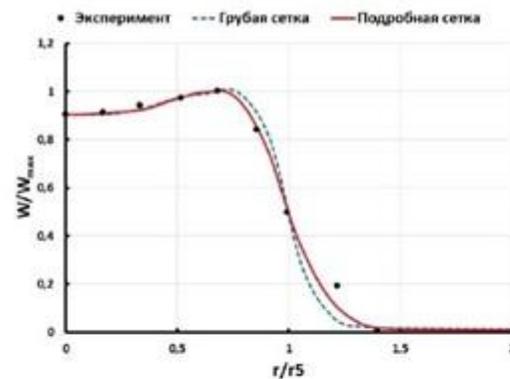
$$\log_{10} (|\nabla \rho|)$$



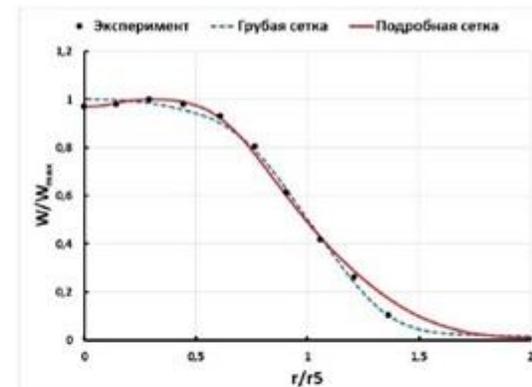
N=1.42



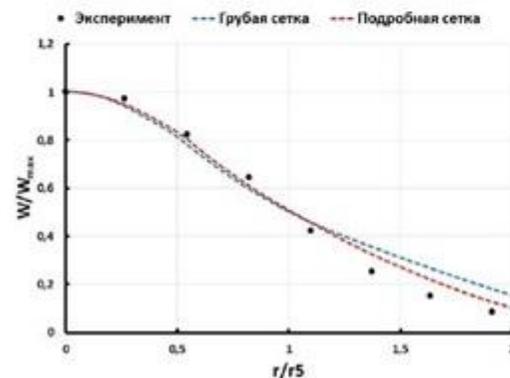
N=3.57



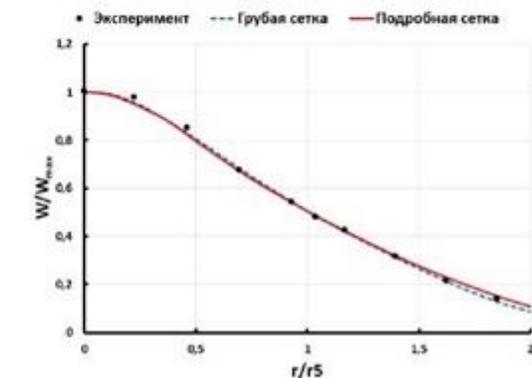
a)  $z/d=1,96$



б)  $z/d=3,92$



в)  $z/d=7,32$



г)  $z/d=11,7$

# Модель с искусственной сжимаемостью (Low-Mach)

$$Mach = \frac{u}{c} = \varepsilon \ll 1$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial_t \rho + \nabla_j (\rho u_j) = 0 \\ \partial_t \rho u_i + \nabla_j (\rho u_i u_j) + \nabla_i P = 0 \\ \partial_t \rho E + \nabla_j ((\rho E + P) u_j) = 0 \\ P = (\gamma - 1) \rho e, \quad E = k + e \end{array} \right. \quad \varphi = \varphi^{(0)} + \varepsilon \varphi^{(1)} + \varepsilon^2 \varphi^{(2)} + \dots \quad \rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} \partial_t \tilde{\rho}^{(0)} + \tilde{\nabla}_j (\tilde{\rho}^{(0)} \tilde{u}_j^{(0)}) + O(\varepsilon) = 0 \\ \partial_t \tilde{\rho}^{(0)} \tilde{u}_i^{(0)} + \tilde{\nabla}_j (\tilde{\rho}^{(0)} \tilde{u}_i^{(0)} \tilde{u}_j^{(0)}) + \tilde{\nabla}_i \tilde{P}^{(2)} + \frac{1}{\varepsilon} \tilde{\nabla}_i \left( \frac{1}{\varepsilon} \tilde{P}^{(0)} + \tilde{P}^{(1)} \right) + O(\varepsilon) = 0 \\ \partial_t \tilde{\rho}^{(0)} \tilde{e}^{(0)} + \tilde{\nabla}_j \left( (\tilde{\rho}^{(0)} \tilde{e}^{(0)} + \tilde{P}^{(0)}) \tilde{u}_j^{(0)} \right) + O(\varepsilon) = 0 \\ \tilde{P}^{(0)} - (\gamma - 1) \tilde{\rho}^{(0)} \tilde{e}^{(0)} + O(\varepsilon) = 0 \end{array} \right.$$

$$P(r, t) = P_0(t) + p(r, t) + \dots \quad \rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} \partial_t \rho + \nabla_j (\rho u_j) = 0 \\ \partial_t \rho u_i + \nabla_j (\rho u_i u_j) + \nabla_i p = 0 \\ \partial_t \rho e + \nabla_j ((\rho e + P) u_j) = 0 \\ P = (\gamma - 1) \rho e \\ p = P - P_0 \\ P_0(t) = \int \rho e dV / \int (\gamma - 1)^{-1} dV \end{array} \right. \quad \rightarrow$$

Введение искусственной сжимаемости/скорости звука

$$dS = d(P/\rho^\gamma) = 0 \rightarrow dP = c^2 d\rho$$

$$p \equiv (P - P_0) = c^2 (\rho - \rho_0), \quad \rho_0 = \rho \cdot (P_0/P)^{1/\gamma}$$

$$p^* = s^2 (\rho - \rho_0), \quad p^* = \beta \cdot (P - P_0), \quad \beta = s^2/c^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} s \ll c \\ \frac{d\rho}{\rho} \ll \frac{dP}{P} \ll \frac{p^*}{\beta P} \ll \frac{u^2}{\beta c^2} = \frac{u^2}{s^2} \ll 1 \end{array} \right.$$

$$\tau = CFL \cdot \left( \frac{h}{|u| + s} \right)_{\min}$$

# Нагрев при адиабатическом сжатии

1D область  $L=100\text{м}$ ,  $S=1\text{х}1\text{м}^2$

Начальное состояние: воздух  $P=101325\text{Па}$ ,  $T=300\text{К}$

ГУ на стенках: проскальзывание,  $Q=0\text{Вт/м}^2$

ГУ на входе: пар с расходом  $q=0,5\text{кг/с}$  и  $T=300\text{К}$

Теплопроводность, вязкость и диффузия выключены

$$\tilde{T}(\tilde{x}, t) = \begin{cases} \tilde{T}_{in} \cdot (1 - \tilde{x}(t))^{-\gamma_a(\gamma_v - 1)/\gamma_v}, & \tilde{x} < \tilde{x}_i(t) \\ \tilde{T}_a(t), & \tilde{x} > \tilde{x}_i(t) \end{cases}$$

$\tilde{x}_i(t) = 1 - \tilde{P}(t)^{-1/\gamma_a}$  - положение контактного разрыва

$\tilde{P}(t) = T_a(t)^{\gamma_a/(\gamma_a - 1)}$  - давление

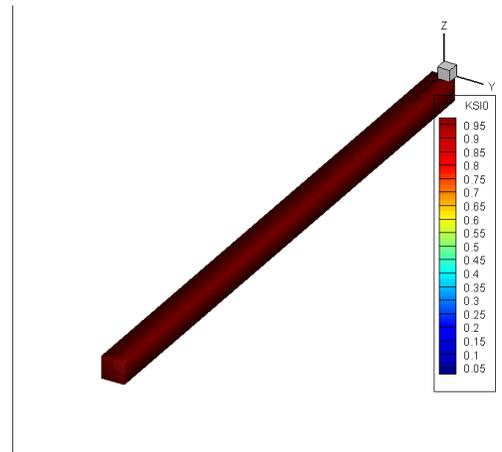
Уравнение для температуры воздуха

$$(\gamma_v - 1)(\tilde{T}_a - 1) + (\gamma_a - 1)\left(\tilde{T}_a^{\gamma_a/(\gamma_a - 1)} - \tilde{T}_a\right) = \beta\gamma_v(\gamma_a - 1)\tilde{T}_{in}$$

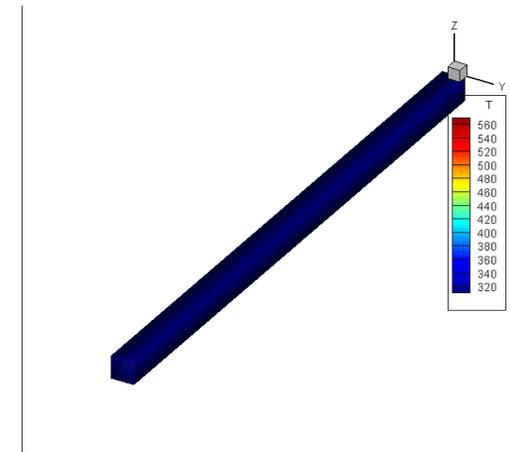
На контактном разрыве температура будет испытывать разрыв первого рода

$$\tilde{T}_i^{(-)} = \tilde{T}_{in} \cdot \tilde{P}^{(\gamma_v - 1)/\gamma_v} \quad \tilde{T}_i^{(+)} = \tilde{P}^{(\gamma_a - 1)/\gamma_a}$$

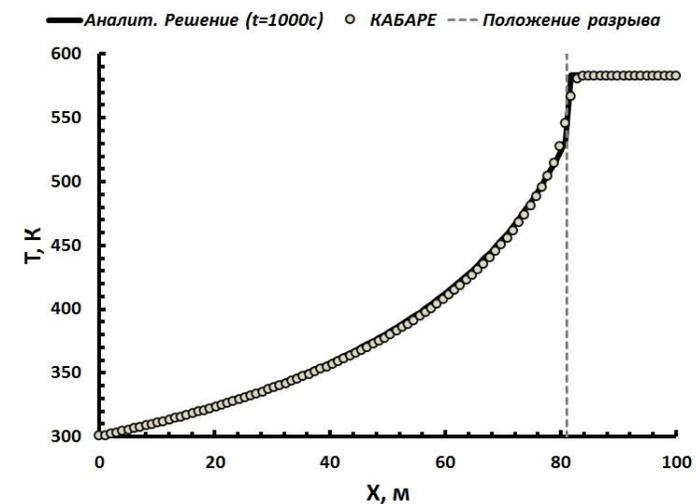
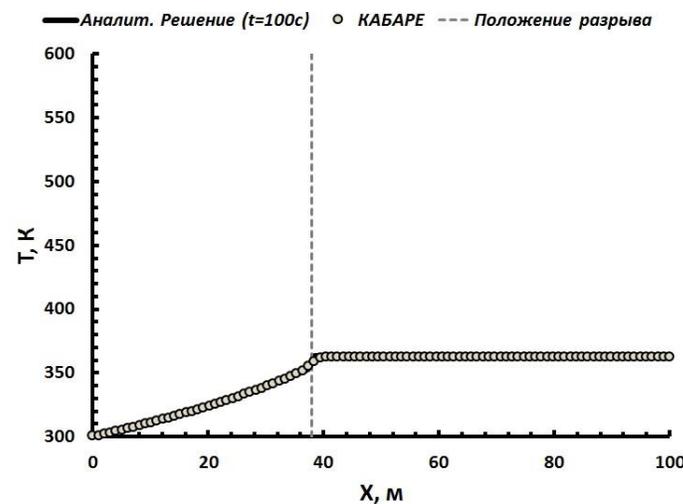
Массовая доля воздуха



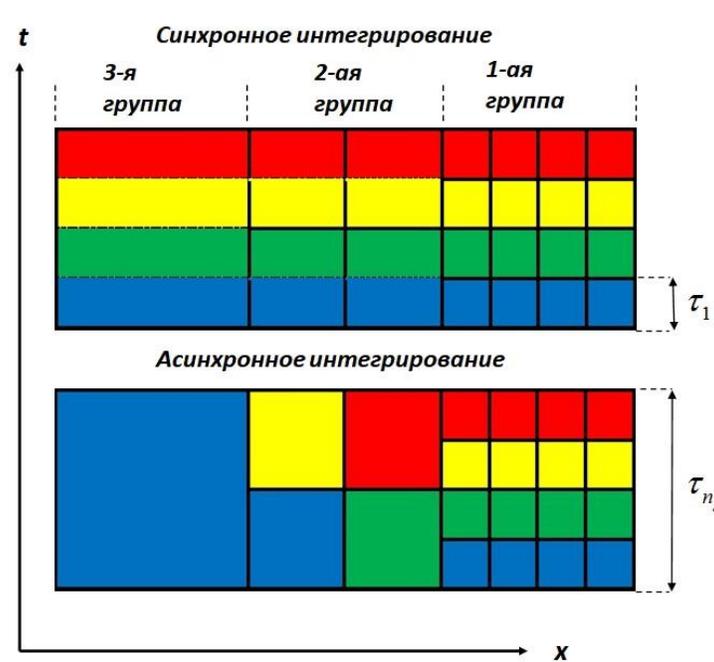
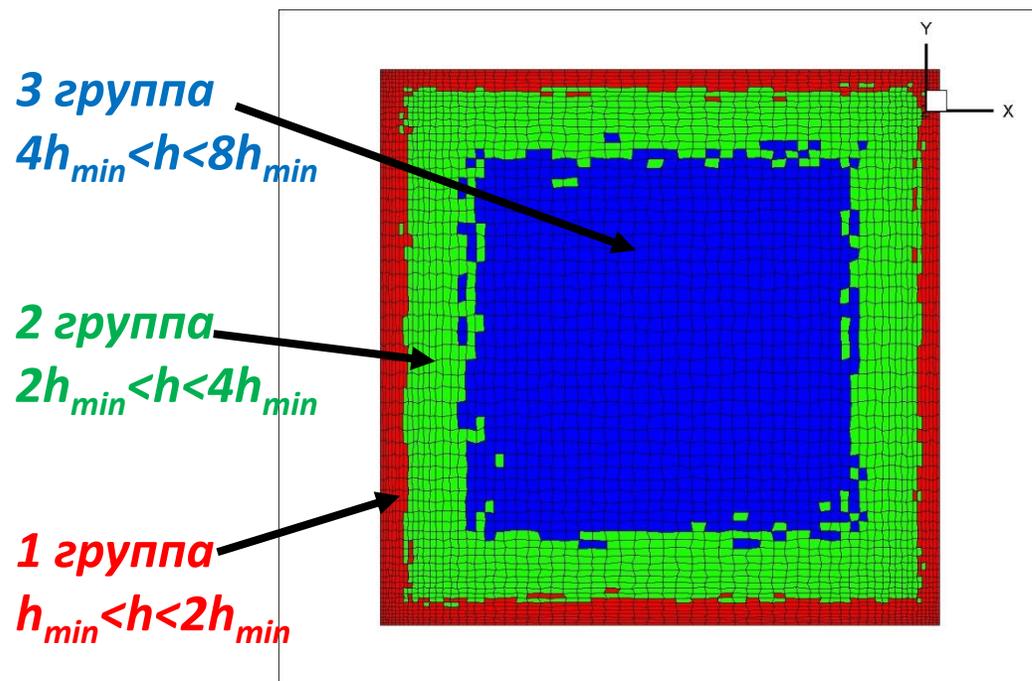
Температура



Профиль температуры в моменты времени  $t=100\text{с}$  и  $1000\text{с}$



# Асинхронное интегрирование уравнений по времени



$$N_{Sync} \propto 2^{n_g - 1} n_c$$

$$N_{Async} \propto \sum_{i=1}^{n_g} 2^{n_g - i} n_{ci}$$

Ускорение:

$$A = \frac{N_{Sync}}{N_{Async}} = \left[ \sum_{i=1}^{n_g} \left( \frac{1}{2^{i-1}} \cdot \frac{n_{ci}}{n_c} \right) \right]^{-1}$$

Разбиение на группы:

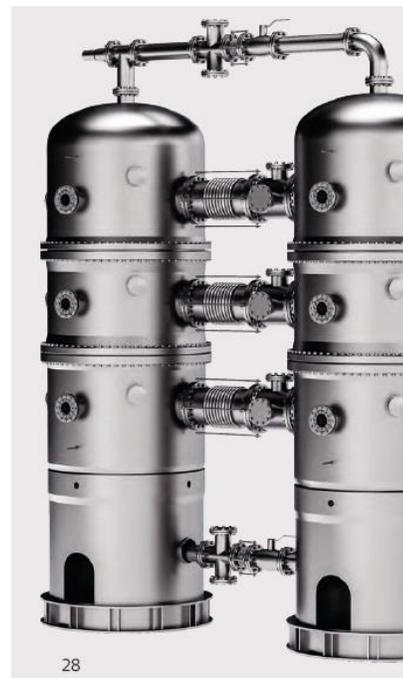
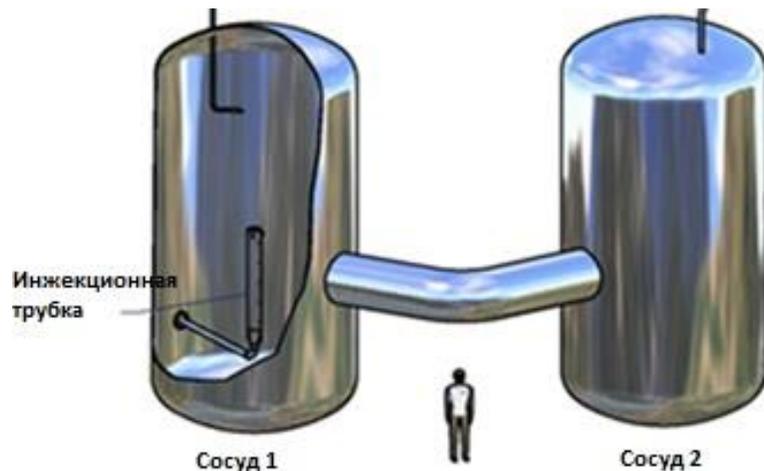
$$n_g = \left\lceil \log_2 \left( \frac{h}{h_{min}} \right) \right\rceil + 1$$

# Крупномасштабные экспериментальные установки

Медленное перемешивание газовой смеси, образование и разрушение стратификации  
Объем  $<1000\text{ м}^3$ , длительность эксперимента  $<10000\text{ с}$



Экспериментальная установка PANDA  
(PSI, Швейцария)  
Объем 2-х сосудов  $183,3\text{ м}^3$



## БОЛЬШОЙ МАКЕТ ПРОЧНЫЙ

Установка БМ-П, состоящая из двух камер высотой 5 м, диаметром 2 м, соединенными между собой переходными трубами и сильфонами. В установке исследуется распространение и горение водородосодержащих парогазовых смесей, которые могут образовываться при тяжелых авариях на атомных станциях с водо-водяными энергетическими реакторами.

*В настоящее время установка задействована для испытаний рекомбинаторов – устройств для снижения концентрации водорода в смеси под защитной оболочкой реактора.*

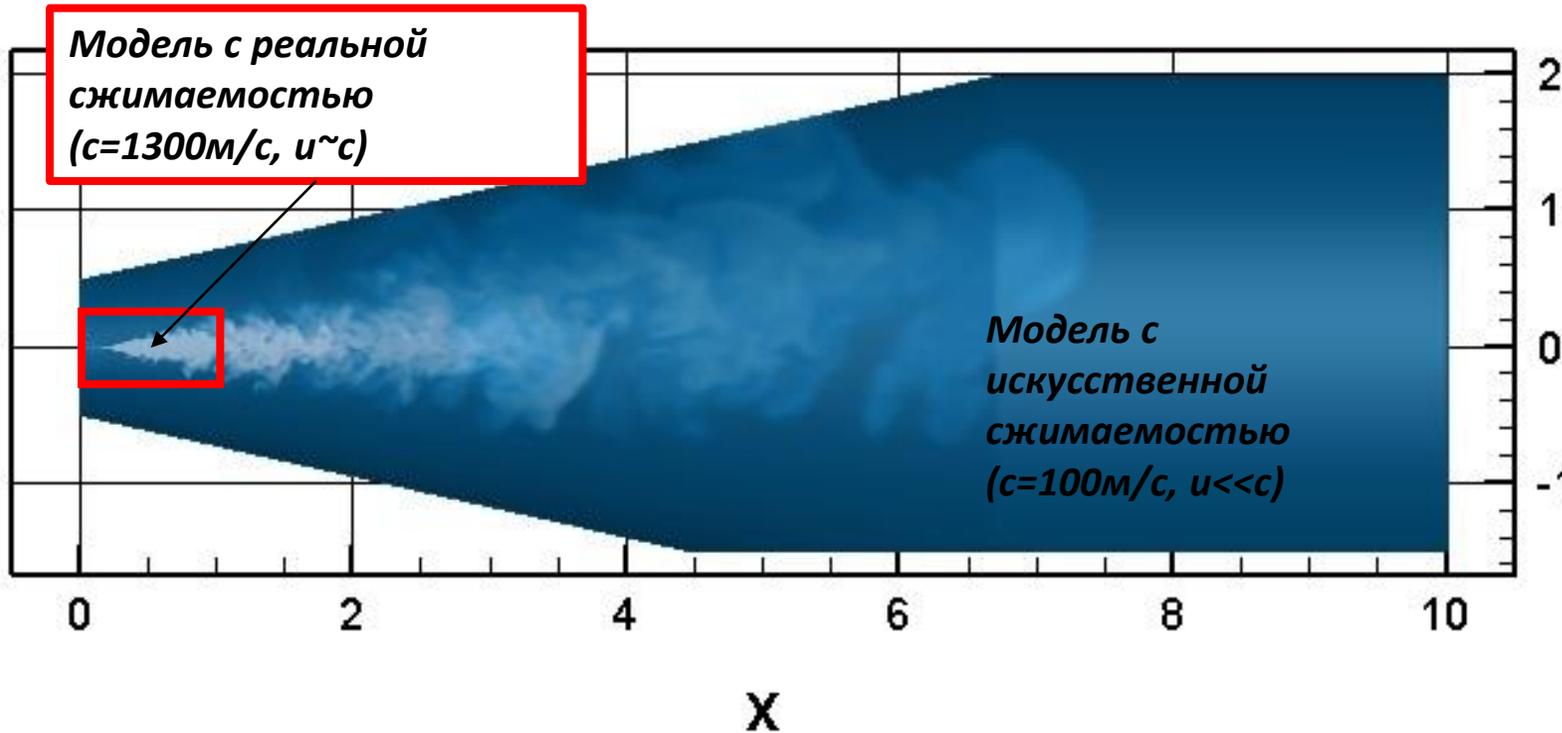
Экспериментальная установка БМ-П  
(РФЯЦ ВНИИТФ, Снежинск)  
Внутренний объем  $29,6\text{ м}^3$

# Гибридная модель

Истечение водорода из сосуда высокого давления

Диаметр отверстия –  $d=1\text{мм}$

Размер расчетной области –  $L=10\text{м}$



Пространственная и временная  
многомасштабность:

$$L/d=10^4$$

$$T/\tau = L/d \cdot c/u = 10^7$$

Шаг интегрирования в области с  
искусственной сжимаемостью:

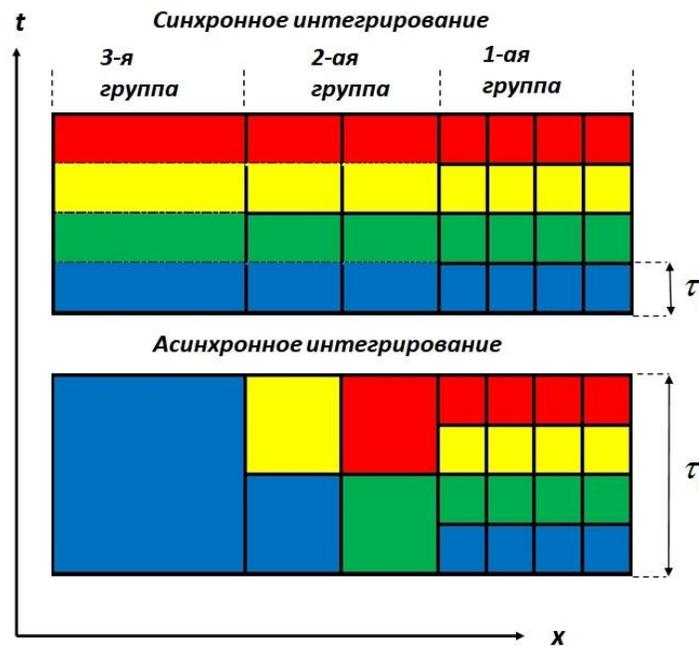
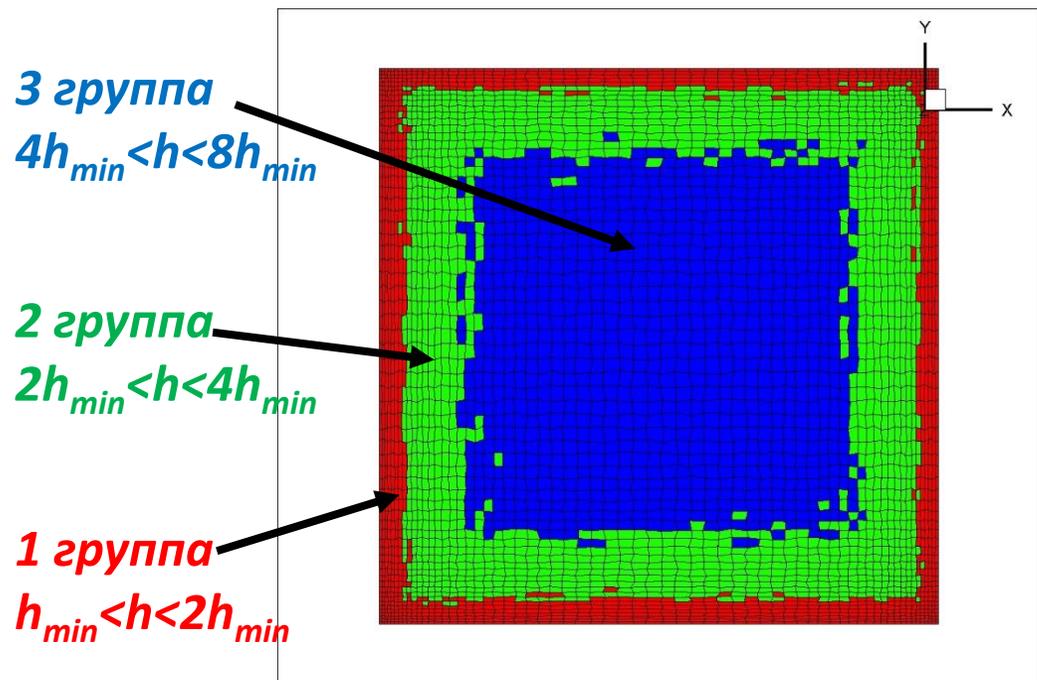
$$\frac{\tau_{ac}}{\tau_c} = \frac{h_{\min,ac}}{h_{\min,c}} \cdot \frac{2 \cdot c}{s} \approx 50 - 100$$

Ускорение:

$$A = \left( \zeta + (1 - \zeta) \tau_c / \tau_{ac} \right)^{-1} \rightarrow \tau_{ac} / \tau_c$$

$$\zeta = N_c / N_{ac}$$

# Асинхронное интегрирование уравнений по времени



$$N_{Sync} \propto 2^{n_g-1} n_c$$

$$N_{Async} \propto \sum_{i=1}^{n_g} 2^{n_g-i} n_{ci}$$

Ускорение:

$$A = \frac{N_{Sync}}{N_{Async}} = \left[ \sum_{i=1}^{n_g} \left( \frac{1}{2^{i-1}} \cdot \frac{n_{ci}}{n_c} \right) \right]^{-1}$$

Разбиение на группы в многомасштабном алгоритме:

$$n_g = \left\lceil \log_2 \left( \frac{h}{h_{min}} \cdot f \right) \right\rceil + 1$$

$$f = \begin{cases} 1, & cell \in G_c \\ (|u|_{max} + c)/s, & cell \in G_{ac} \end{cases}$$

# Гибридная модель

## Соотношения на интерфейсе

Локальные инварианты Римана:

$$\begin{cases} I_1 = u_1 + G_1 P_1, & G_1 = (\rho c)_{c1}^{-1} \\ I_2 = u_2 - G_2 p_2^*, & G_2 = (\rho s)_{c2}^{-1} \\ I_3 = T_{1,2} \text{ или } S_{1,2} \end{cases}$$

Законы сохранения:

$$\begin{aligned} (1) \quad & \rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 \\ (2) \quad & \rho_1 u_1^2 + (P_1 - P_0) = \rho_2 u_2^2 + p_2^* \\ (3) \quad & (\rho_1 e_1 + P_1) u_1 = (\rho_2 e_2 + P_2) u_2 \end{aligned}$$

Приближенное решение:

$$(3) \longrightarrow T_1 = T_2$$

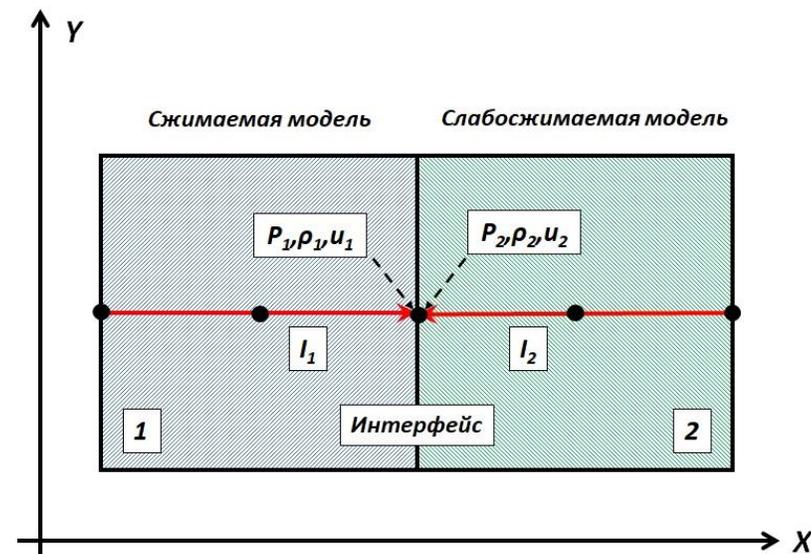
$$(1) + (2) \rightarrow p_2^* / p_1^* = (1 - \gamma u_1 u_2 / c^2) / (1 - \gamma u_1 u_2 / s^2) = 1 + \gamma u_1 u_2 / s^2 + \dots = 1 + O(\varepsilon_s^2) \longrightarrow p_1^* = p_2^*$$

$$u_2^* / u_1^* = (1 + p^* / (\gamma P_0)) / (1 + c^2 / s^2 \cdot p^* / (\gamma P_0)) = 1 - c^2 / s^2 \cdot p^* / (\gamma P_0) + \dots = 1 + O(\varepsilon_s^2) \longrightarrow u_1 = u_2$$

Реализация в коде:

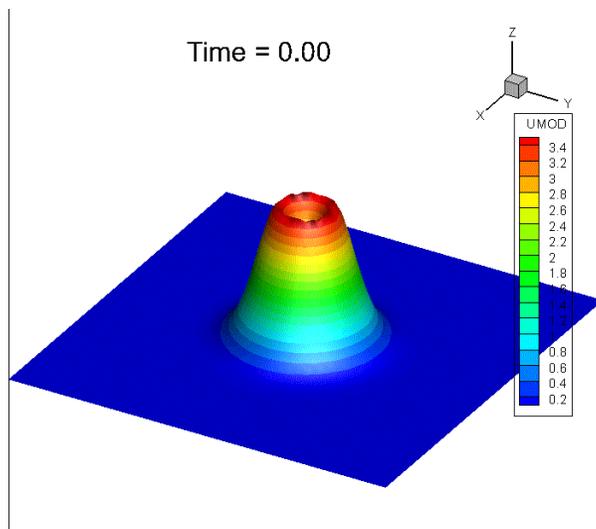
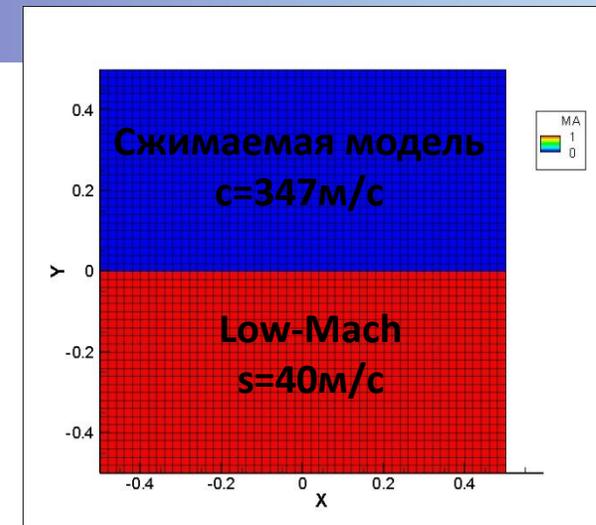
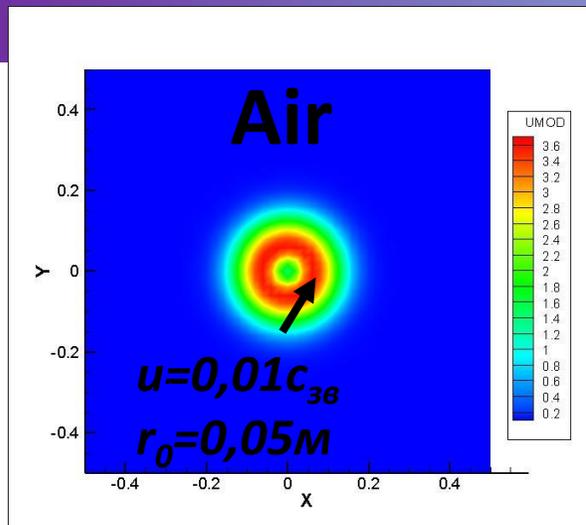
Приближенное решение + непрерывность потоков массы и энергии

Нарушается закон сохранения импульса, что может приводить к частичному отражению звуковых волн на интерфейсе (!)

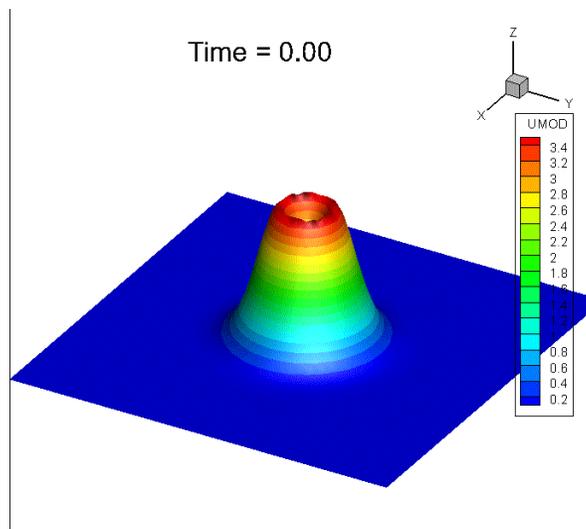


# Двумерный изоэнтропический вихрь

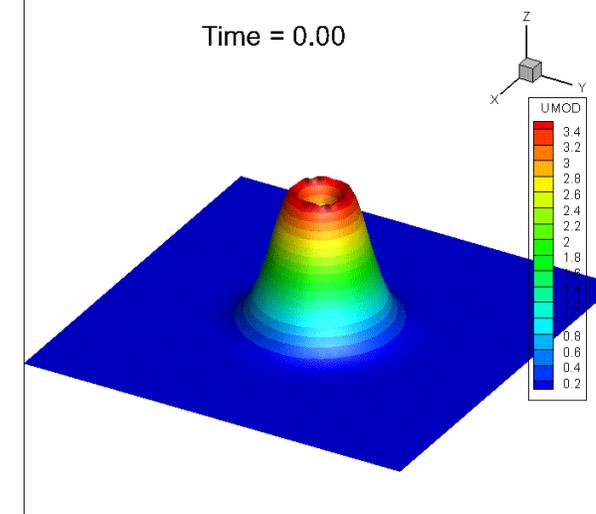
10 оборотов вихря



Сжимаемая модель ( $c = 347\text{м/с}$ )

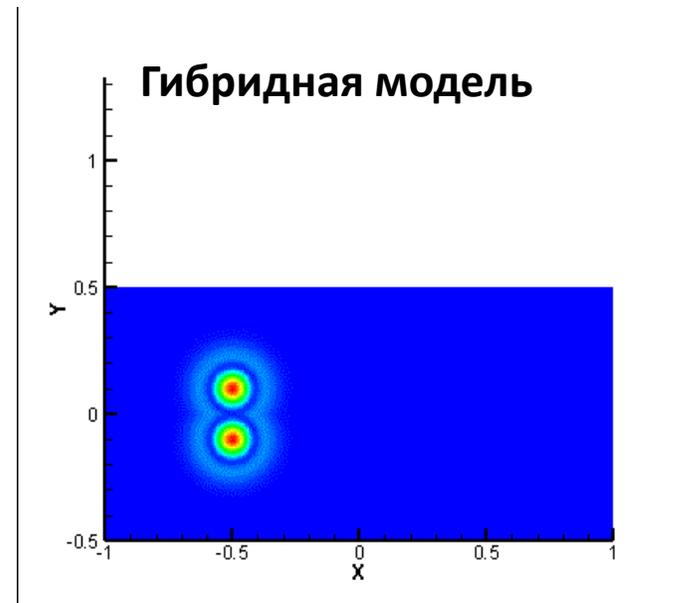
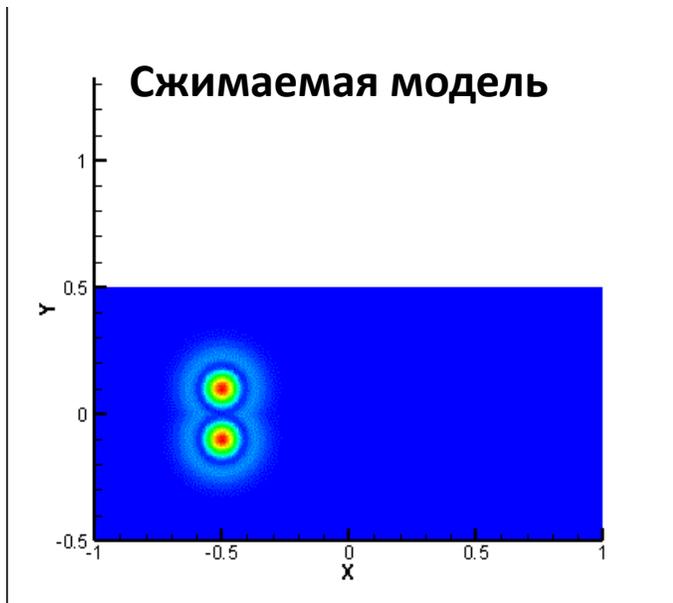
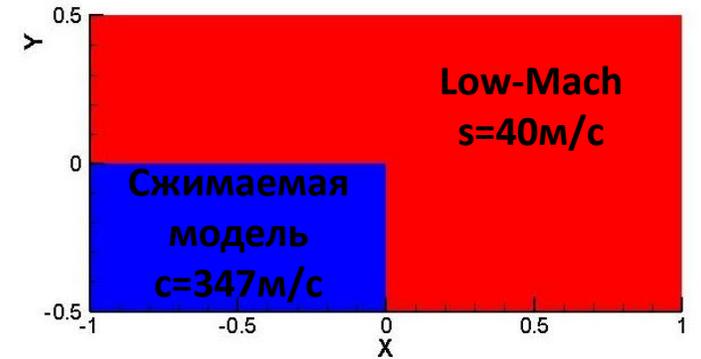
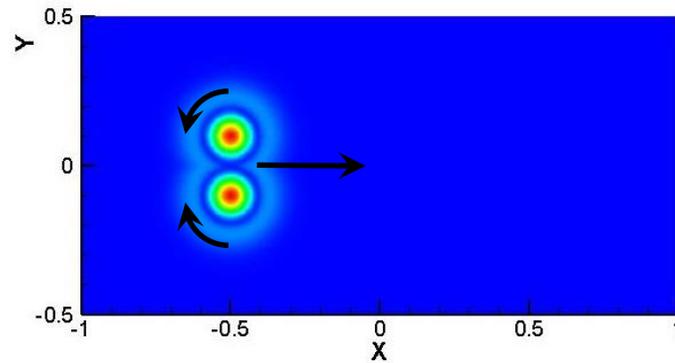
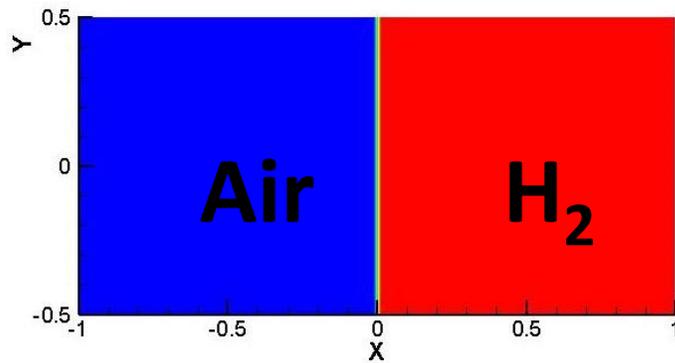


Low-Mach ( $s = 40\text{м/с}$ )

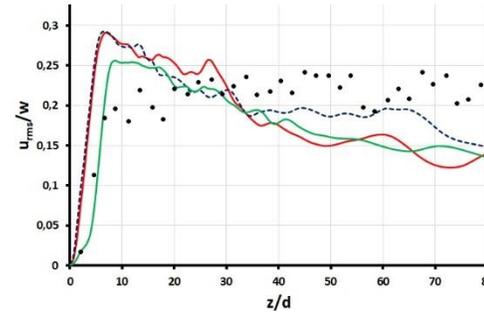
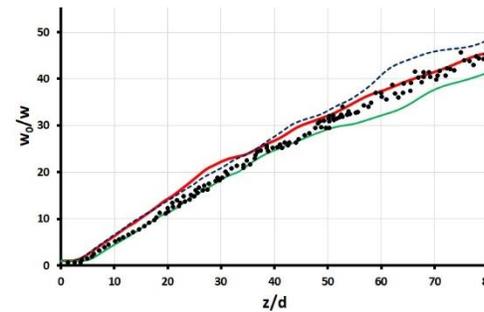
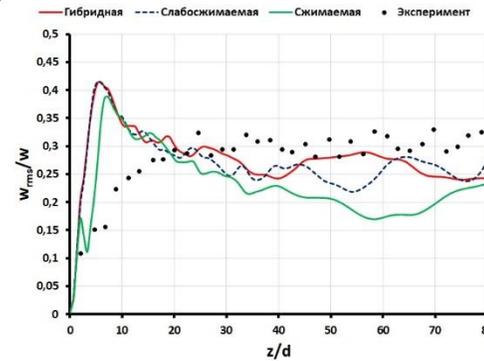
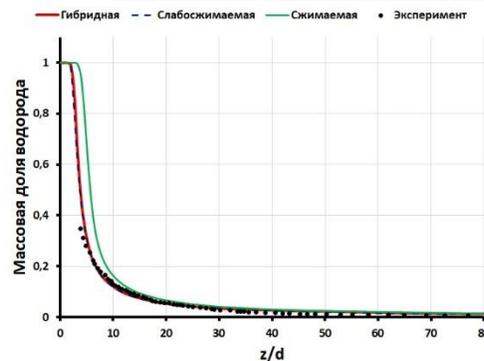
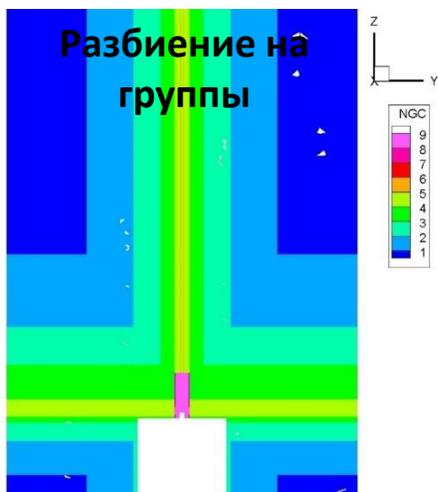
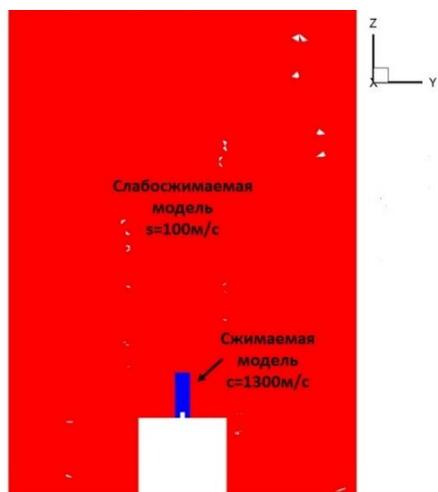
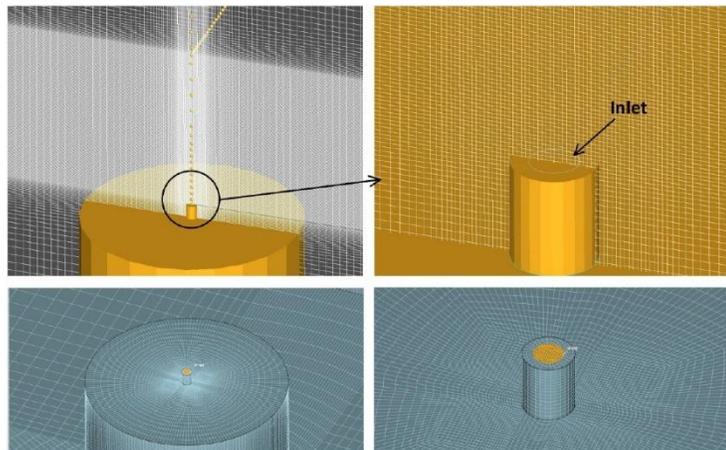
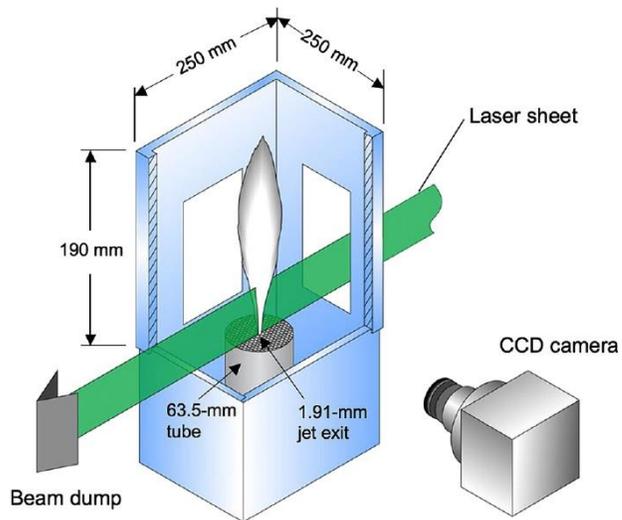


Гибридная модель ( $c = 347\text{м/с}$ ,  $s=40\text{м/с}$ )

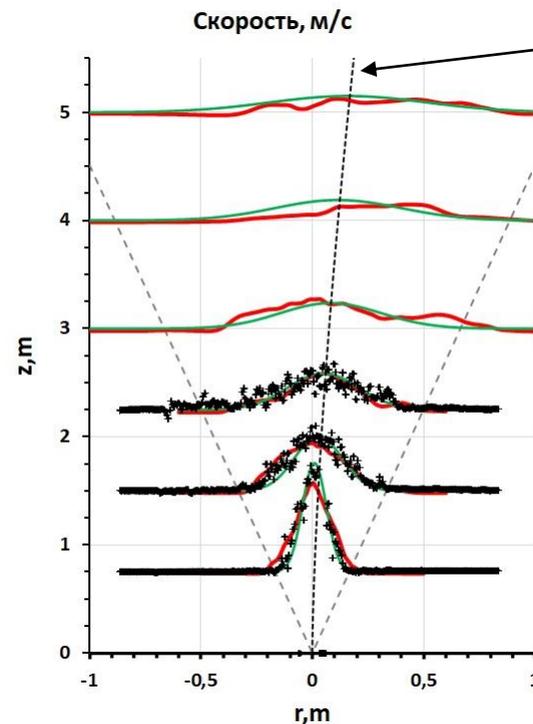
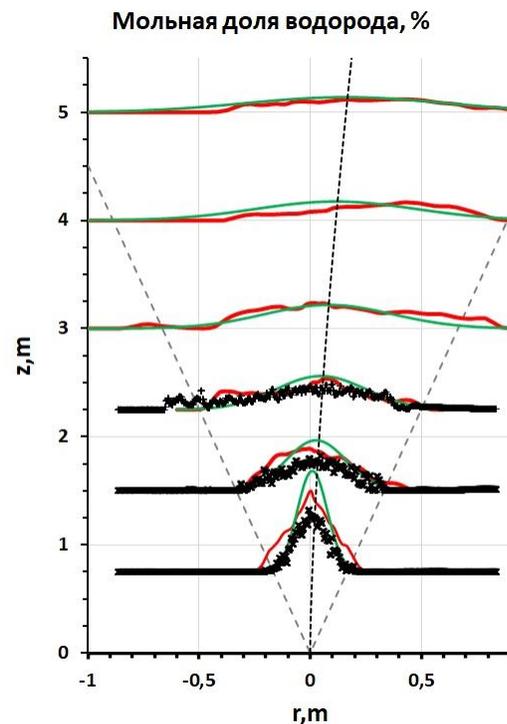
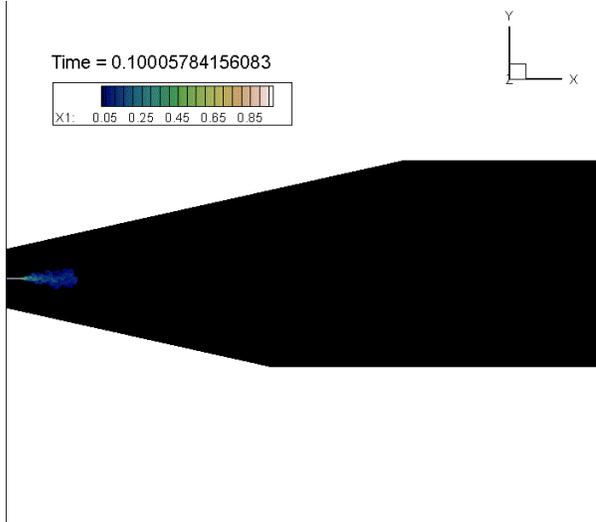
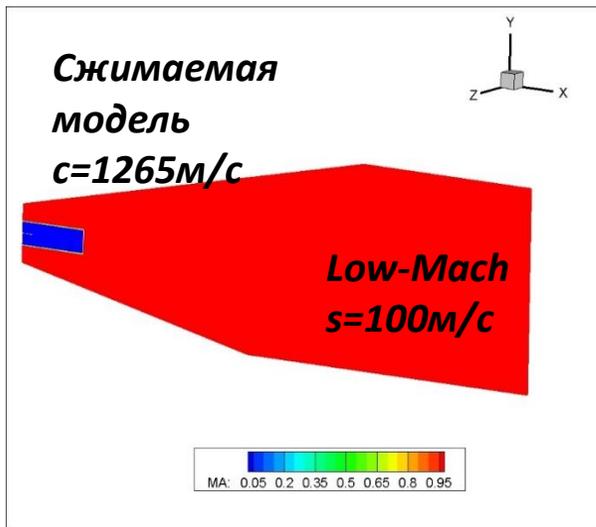
# Вихревой диполь



# Эксперимент Шеффера (2008)



# Эксперименты КИТ, HD35-37



Траектория струи:

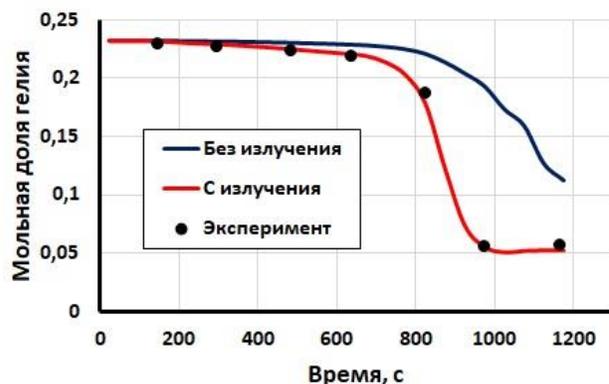
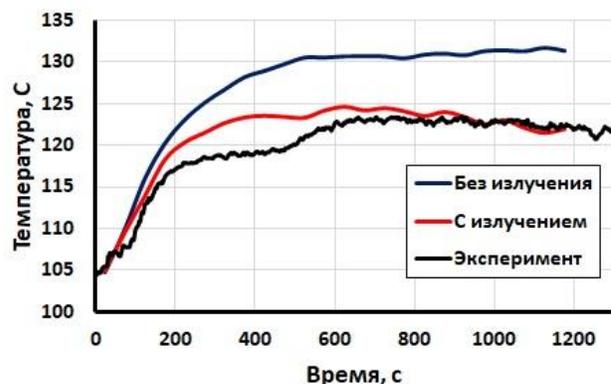
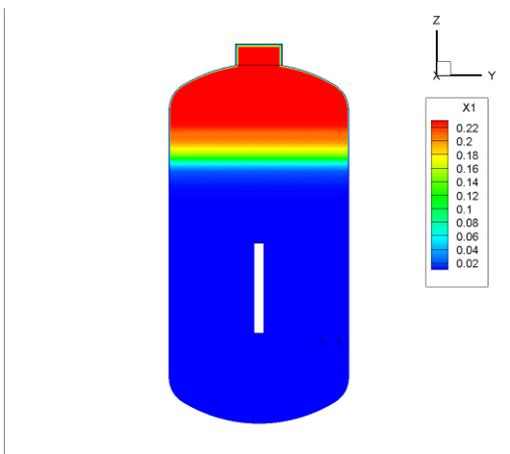
$$Z(X) = 0.08 \cdot L \cdot (X/L)^{3/2}$$

$$L = \frac{0,96 \cdot U_0}{\sqrt{\frac{g}{D} \cdot \frac{(\rho_{Air} - \rho_{H_2})}{\rho_{Air}}}}$$

- Расчет
- Эмпирические корреляции
- Эксперименты HD35-37 (КИТ)

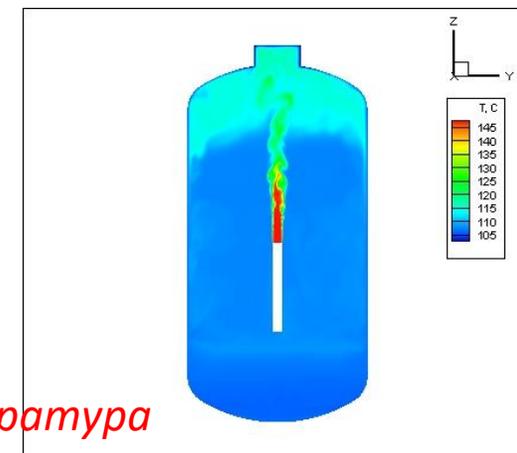
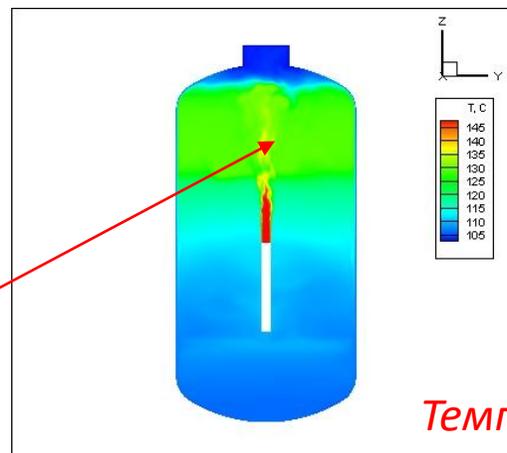
# Влияние теплообмена излучением на динамику размытия стратификации

- ✓ Завышение средней температуры газа
- ✓ Снижение скорости размытия стратификации, возникновение «застойных» зон

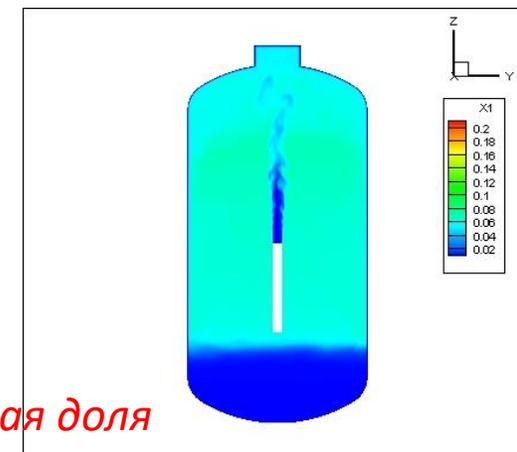
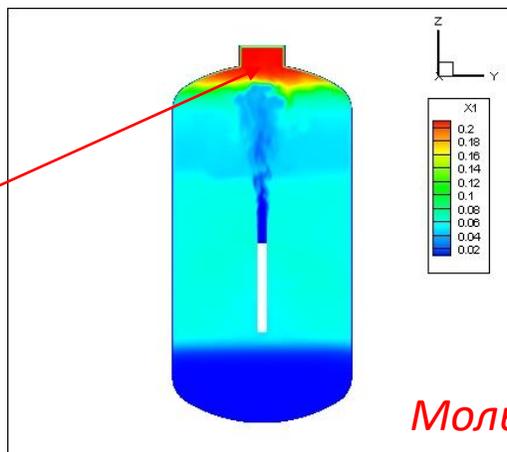


Без излучения

С излучением



Температура



Мольная доля гелия

# Модель переноса тепла излучением

При низких температурах ( $T \ll 0,5 \text{кэВ}$ ) влияет только на перераспределение энергии в веществе (Четверушкин Б.Н.)

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i \vec{u}) + \nabla_i P = 0 \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \text{div}((\rho E + P) \vec{u}) = -\text{div}(\vec{q}_{\text{cond}} + \vec{q}_{\text{rad}}) \end{cases}$$

## ✓ Метод дискретных ординат

$$\vec{q}_{\text{rad}} = \int_{\nu=0}^{\infty} d\nu \int_{\Omega} \vec{\Omega} I_{\nu} d\Omega$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_{\nu}}{\partial t} + (\vec{\Omega}, \vec{\nabla} I_{\nu}) = -(\chi_{\nu} + \sigma_s) \cdot I_{\nu} + \chi_{\nu} \cdot I_{\nu p} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\nu}(\vec{r}, \vec{s}') \Phi_{\nu}(\vec{s}', \vec{s}) d\Omega'$$

- универсальная

- ресурсоемкая, негативный «эффект луча»

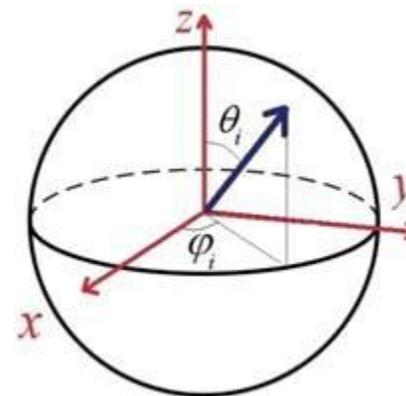
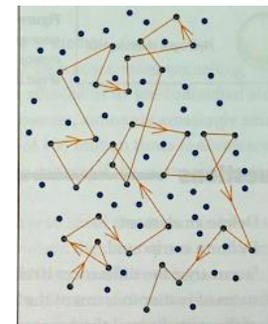
$$I_{\nu p} = \frac{2h\nu^3}{c^2 \left( \exp\left\{ \frac{h\nu}{kT} \right\} - 1 \right)}$$

## ✓ Диффузионная модель (модель Росселанда)

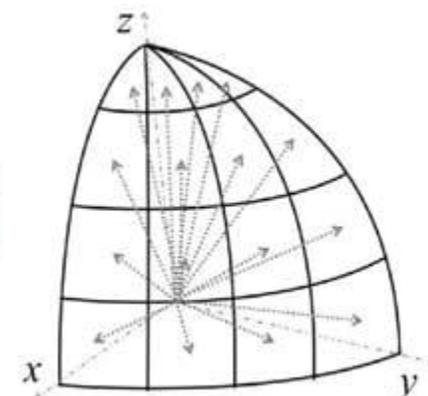
$$\vec{q}_{\text{rad}} = -\kappa_R \cdot \nabla T, \quad \kappa_R = \frac{16}{3} \sigma l_R T^3$$

$\tau = L/l_R \ll 1$  - не универсальная

$l_R = ?$  - недостаток данных



(a)



(b)

# Эксперименты HUMERES-2 (H2P2)

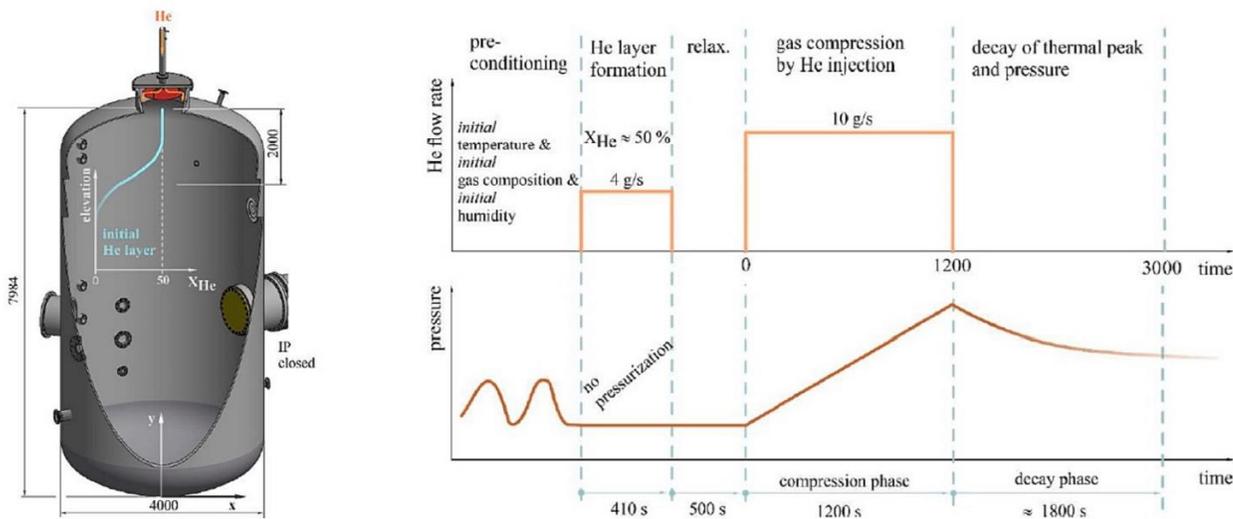


Fig. 1. PANDA facility for H2P2 test series (left) and generic test procedure for the H2P2 test series (right).

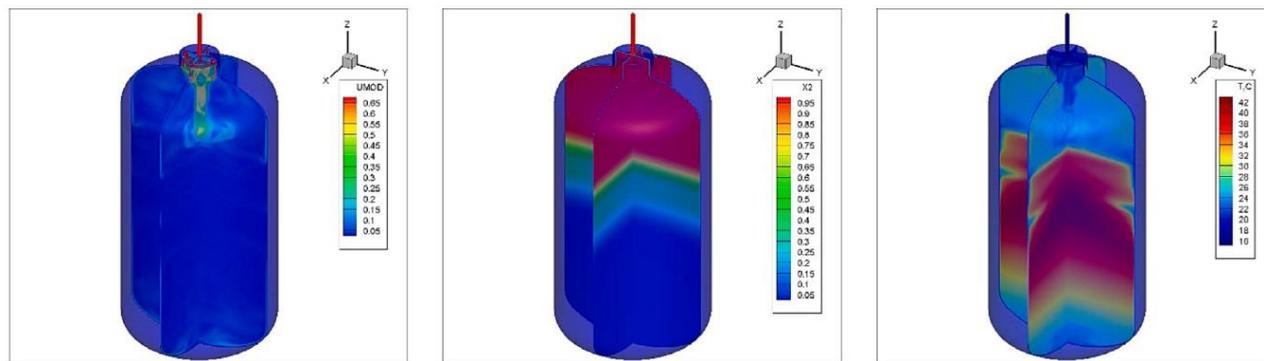


Fig. 6. Magnitude of velocity (left), helium molar fraction (center), temperature (right).

Table 1

Test matrix for series H2P2. Depicted are the nominal conditions.

Experiments	Units	H2P2_1_2	H2P2_2	H2P2_3	H2P2_4	H2P2_5
Initial temperature	°C	20	20	110	110	110
Initial pressure	bar	1	1	1	3	1
Initial steam molar fraction	%	0,1	2	2	2	60
Helium mass flow rate	g/s	10	10	10	10	10
Compression phase	s	1200	1200	1200	1200	1200
Decay phase	s	>3000	>3000	>3000	>3000	>3000

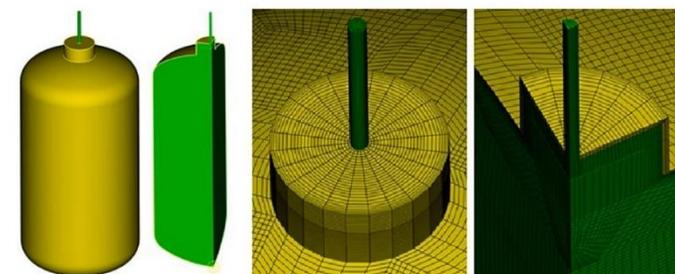


Fig. 4. Geometrical (left) and grid (right) model of PANDA facility.

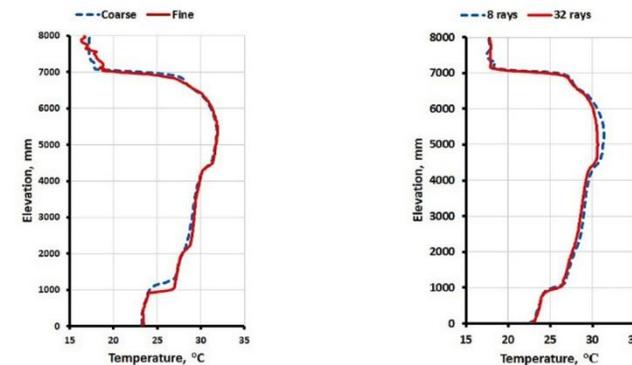


Fig. 5. Effect of grid (left) and angular discretization (right) on temperature profile.

# Результаты

## H2P2\_1\_2 (1bar, 0,1% H2O)

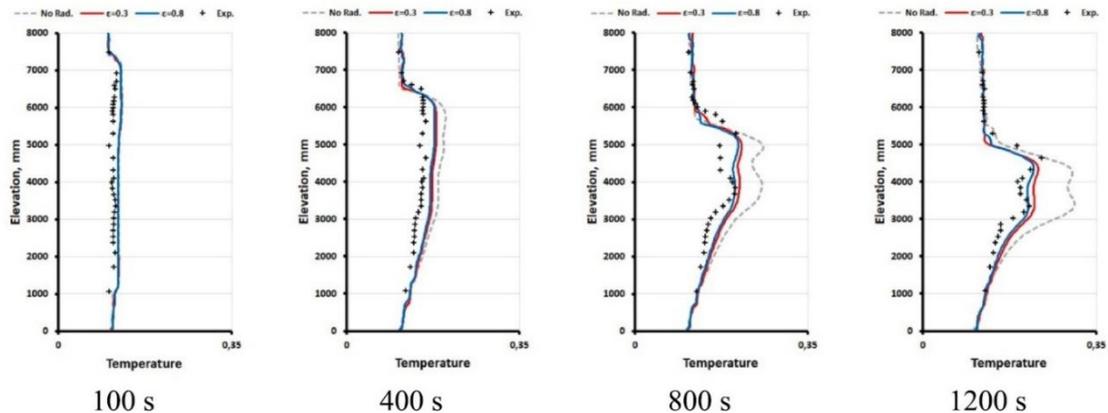


Fig. 7. Temperature profile (H2P2\_1\_2).

## H2P2\_3 (3bar, 2% H2O)

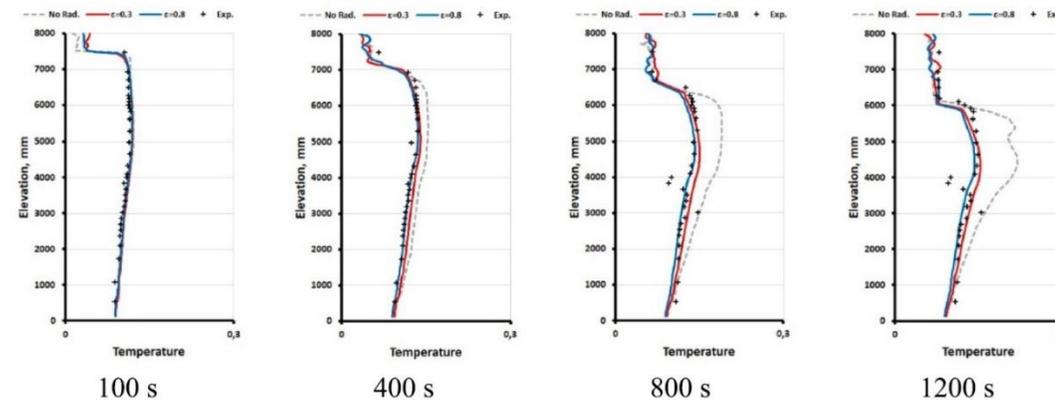


Fig. 11. Temperature profile (H2P2\_4).

## H2P2\_2 (1bar, 2% H2O)

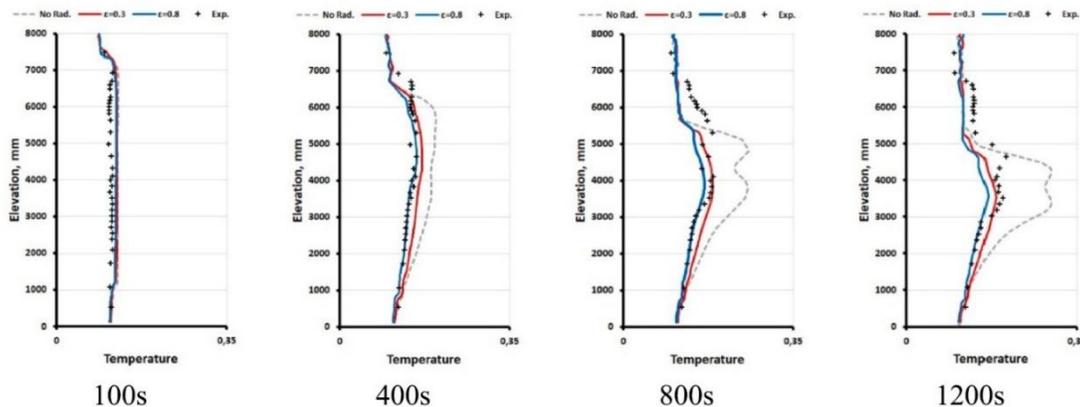


Fig. 10. Temperature profile (H2P2\_2).

## H2P2\_4 (1bar, 60% H2O)

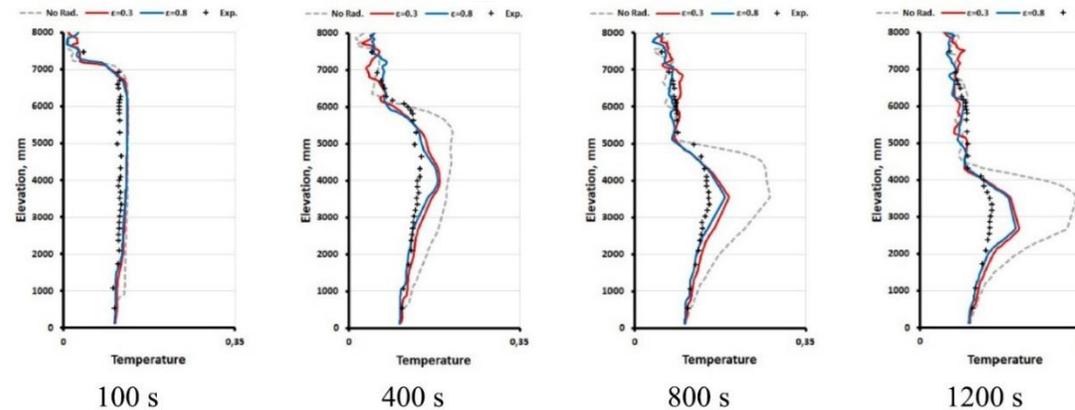


Fig. 12. Temperature profile (H2P2\_5).

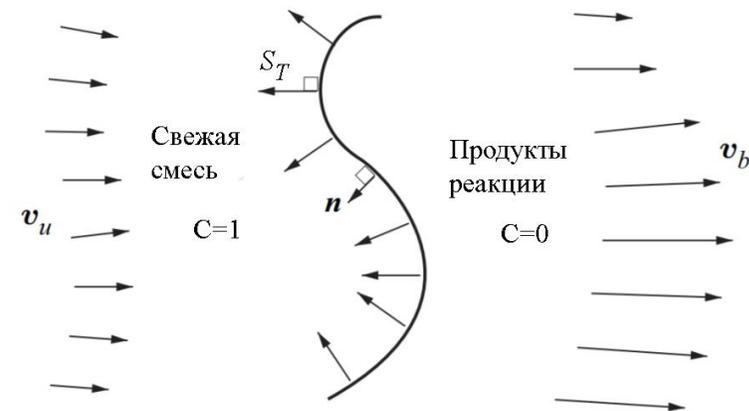
# Горение и детонация ВГС

Для расчета задач горения и детонации водородсодержащих газовых смесей на базе вычислительной платформы программного комплекса «CABARET-SC1» разрабатывается специальный модуль «CABARET-COMBUSTION», в котором реализованы современные математические модели горения и детонации:

- ✓ модель на основе **детальной химической кинетики**,
- ✓ модель крупномасштабного горения в однородных и стратифицированных газовых смесях **TFC (Turbulent Flame speed Closure)**,
- ✓ модель диффузионного горения пожар-струй **EDM (Eddy Dissipation Model)**,
- ✓ **модель детонации** на основе одностадийной необратимой химической кинетики.

В текущей версии

- реализована модель крупномасштабного горения неоднородных смесей **водород-метан-монооксид углерода** в паровоздушной атмосфере
- реализована реальная термодинамика газов (NASA-7)



$$\begin{cases} \frac{\partial \rho C}{\partial t} + \text{div}(\rho C \vec{u}) = -\rho_u S_T |\nabla C| \\ \frac{\partial \rho \xi_U}{\partial t} + \text{div}(\rho \xi_U \vec{u}) = 0 \\ \frac{\partial \rho \xi_B}{\partial t} + \text{div}(\rho \xi_B \vec{u}) = 0 \end{cases}$$

$C = (\xi_{H_2} - \xi_B) / (\xi_U - \xi_B)$  – степень сгорания смеси

$\xi_U$  – изначальная массовая доля топлива

$\xi_B$  – массовая доля топлива после исчерпания окислителя

$\rho_u$  – плотность свежей смеси

$S_T = S_T(S_L, u', \dots)$  – скорость турбулентного горения

# Валидация кода на задаче о горении водорода в установке ENACCEF-2 в рамках международного бенчмарка ETSON-SAMHYCO-NET

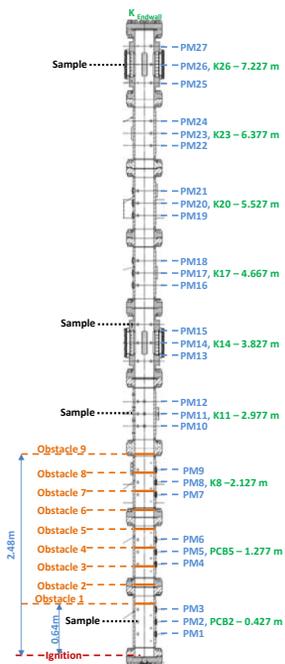
Объем – 0.317 м.куб., высота – 7.65 м, диаметр трубы – 0.23 м

Расчетная сетка – 2,5 млн. яч., размер ячеек – 5 мм.

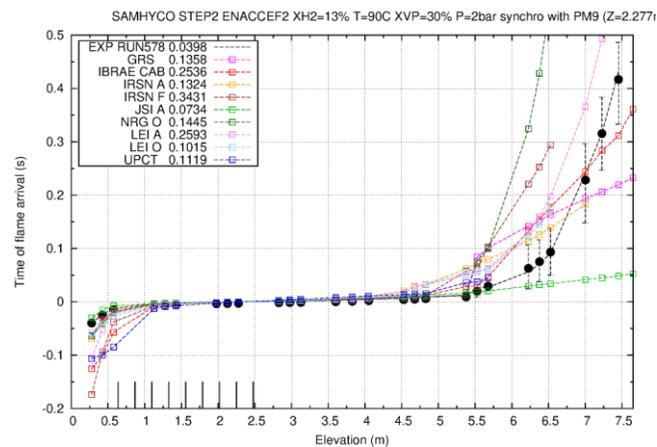
Концентрация водорода - 13%

Масса водорода – 2.8 г

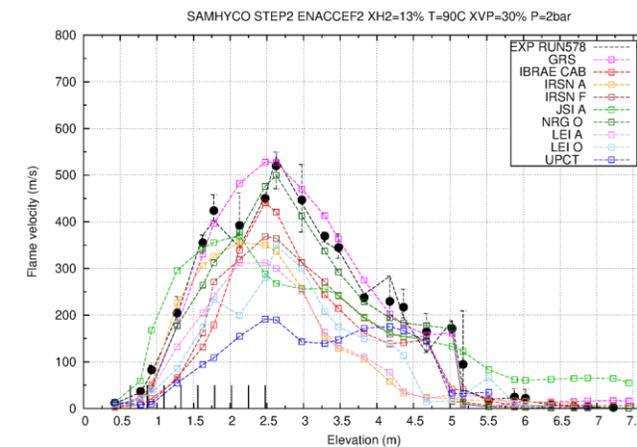
T = 363K, P = 1атм



Participants	Country	Code	Code Type	Label for graph
CNRS-ICARE	France	Experiments		EXP
JSI	Slovenia	ASTEC V2.1.1.3	LP	JSI_ASTEC
JAEA	Japan	OPENFOAM 3.0	CFD	JAEA_OPENFOAM
UPCT	Spain	OPENFOAM	CFD	UPCT_OPENFOAM
CEA	France	Europlexus	CFD	CEA_EPX
NRG	Netherlands	Fluent	CFD	NRG_FLUENT
NRG	Netherlands	OPENFOAM	CFD	NRG_OPENFOAM
IBRAE	Russia	CREBCOM (b0b)	CFD	IBRAE_CREBCOM
IBRAE	Russia	CABARET	CFD	IBRAE CABARET
GRS	Germany	CFX 17.0	CFD	GRS_CFX
IRSN	France	Fluent 19.2	CFD	IRSN_FLUENT
IRSN	France	P <sup>2</sup> REMICS V1.0	CFD	IRSN_PREMICS
IRSN	France	ASTEC V2.1.1.7	LP	IRSN_ASTEC
LEI	Lithuania	ASTEC V2.1.1.6	LP	LEI_ASTEC
LEI	Lithuania	OPENFOAM	CFD	LEI_OPENFOAM

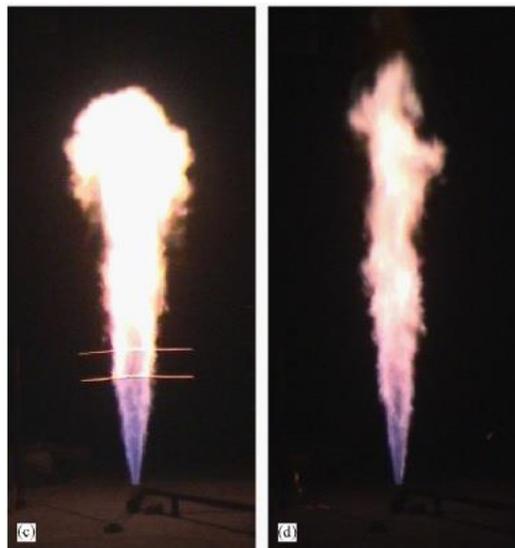


Положение фронта горения

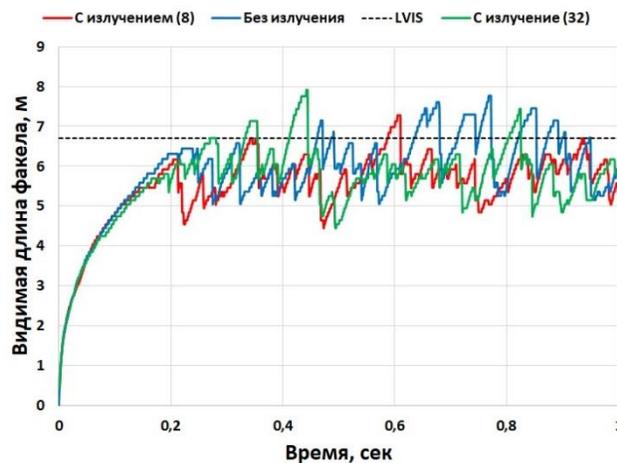
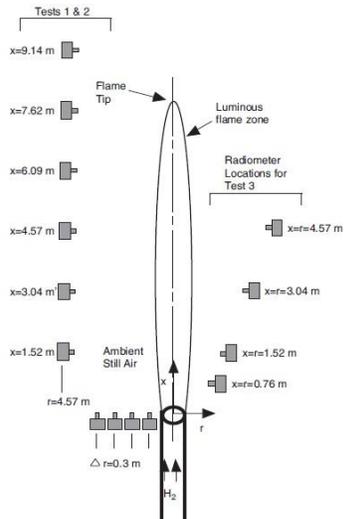


Скорость фронта горения

# Водородная пожар-струя (Шеффер, 2007)



$P_0=431\text{бар}$ ,  $d=5,08\text{мм}$   
 $P_a=1\text{бар}$ ,  $T_a=293\text{К}$   
time=92сек  
 $P=104,8\text{бар}$ ,  $T=231,4\text{К}$



Видимая длина факела

## Эффект луча

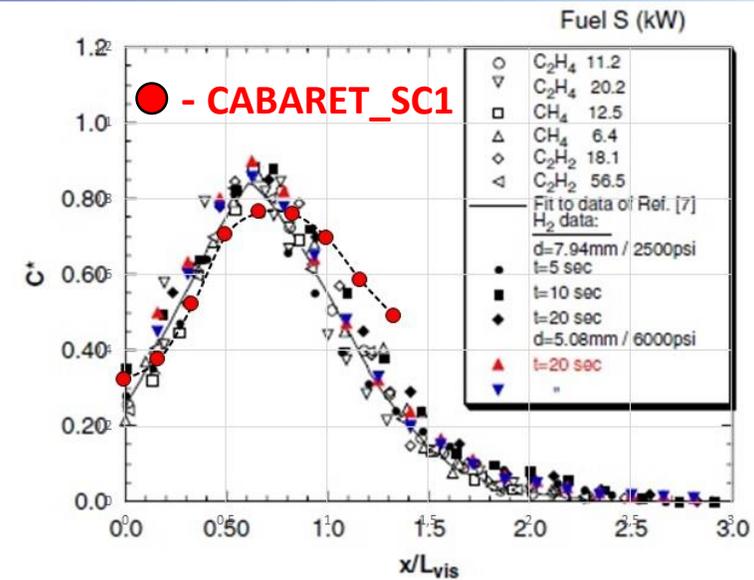
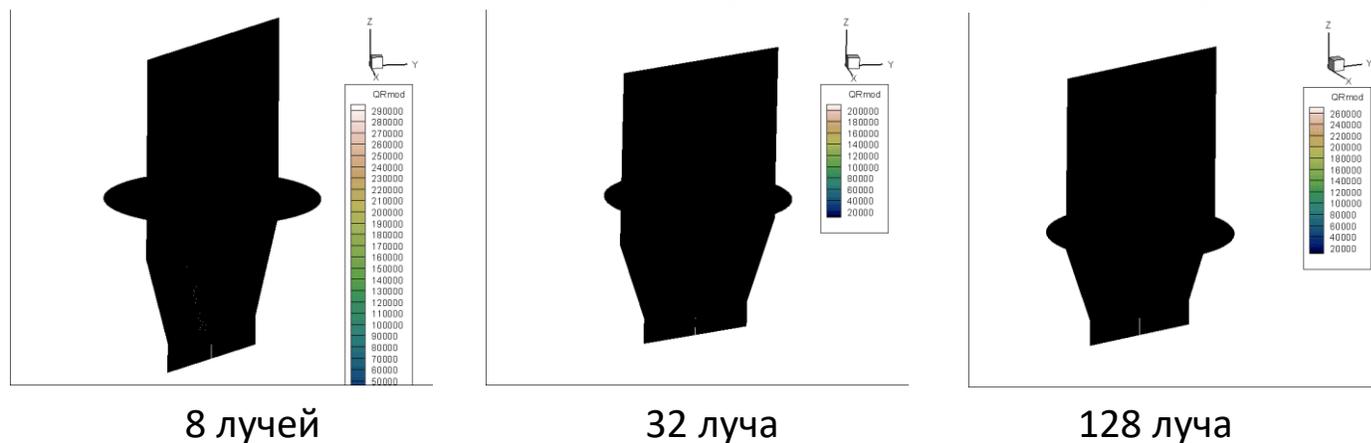
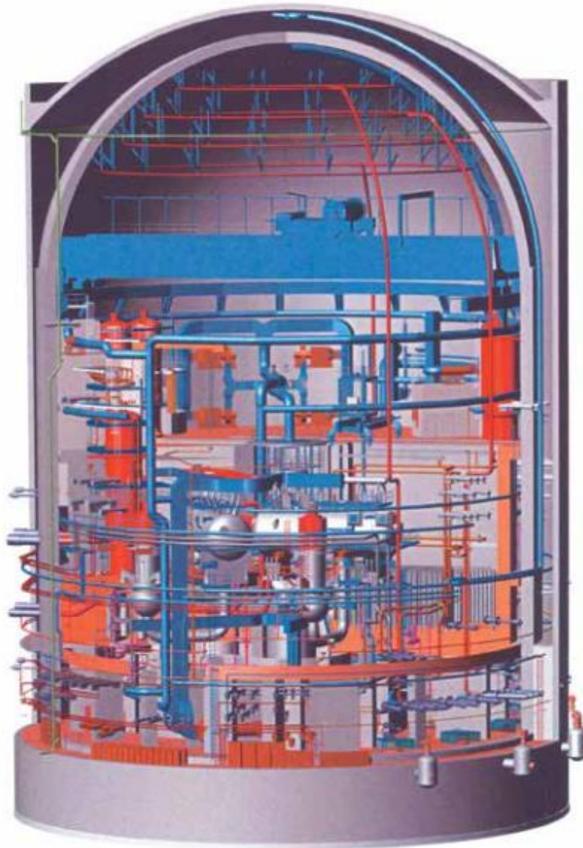
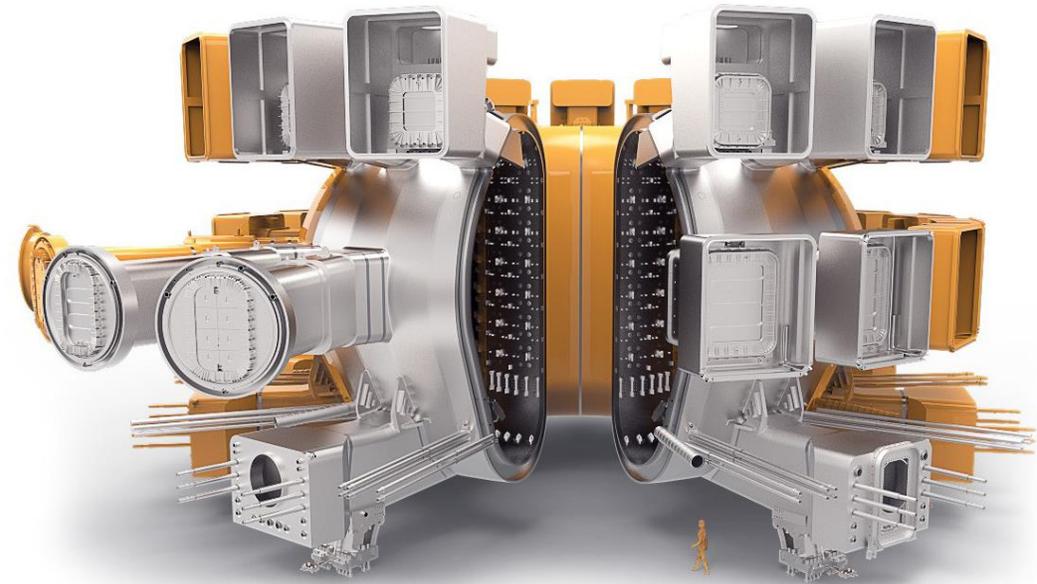


Fig. 11. Profiles of normalized radiative heat flux in a turbulent, hydrogen-jet flame. Jet diameter is 5.08 mm. Jet orientation is vertical.

# Разработка модели турбулентности для ОИАЭ



ВВЭР-1200  
Объем  $\sim 60\,000\text{ м}^3$



Вакуумная камера ИТЕР  
Объем  $\sim 1\,500\text{ м}^3$

Цель: перейти от сеток 0,5см-10см к сеткам 5см-50см  
нужна высокорейнольдсовская RANS-модель (!)

# Стандартная высокорейнольдсовая модель турбулентности standart k-e (Star-CCM+, User Guide)

Уравнения модели standart k-eps

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{u}) = \tilde{P}_k - \rho(\varepsilon - \varepsilon_0) - \text{div}(\mathbf{j}_k) \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{u}) = \frac{1}{T_e} C_{\varepsilon 1} \cdot \tilde{P}_\varepsilon - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \left( \frac{\varepsilon}{T_e} - \frac{\varepsilon_0}{T_0} \right) - \text{div}(\mathbf{j}_\varepsilon) \end{cases}$$

$$\mathbf{j}_k = -(\mu + \mu_T / \sigma_k) \nabla k; \quad \mathbf{j}_\varepsilon = -(\mu + \mu_T / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon$$

$$\tilde{P}_k = P_k + P_{kb} - \rho \varepsilon_d; \quad \tilde{P}_\varepsilon = P_k + C_{\varepsilon 3} P_{kb}$$

$$P_k = R_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}; \quad P_{kb} = -\frac{\mu_T}{\rho S c_t} (\nabla \rho, \mathbf{g}); \quad \varepsilon_d = \frac{2k}{c^2} \cdot \varepsilon$$

$$T_e = \frac{k}{\varepsilon}; \quad T_0 = \max \left( \frac{k_0}{\varepsilon_0}, \sqrt{\frac{\mu}{\rho \varepsilon_0}} \right)$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad \omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k}; \quad l = C_\mu \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44; \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92; \quad C_\mu = 0,09; \quad \sigma_k = 1; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3; \quad C_{\varepsilon 3} = \begin{cases} 1, & P_{kb} > 0 \\ 0, & P_{kb} \leq 0 \end{cases}$$

«Фоновая» турбулентность

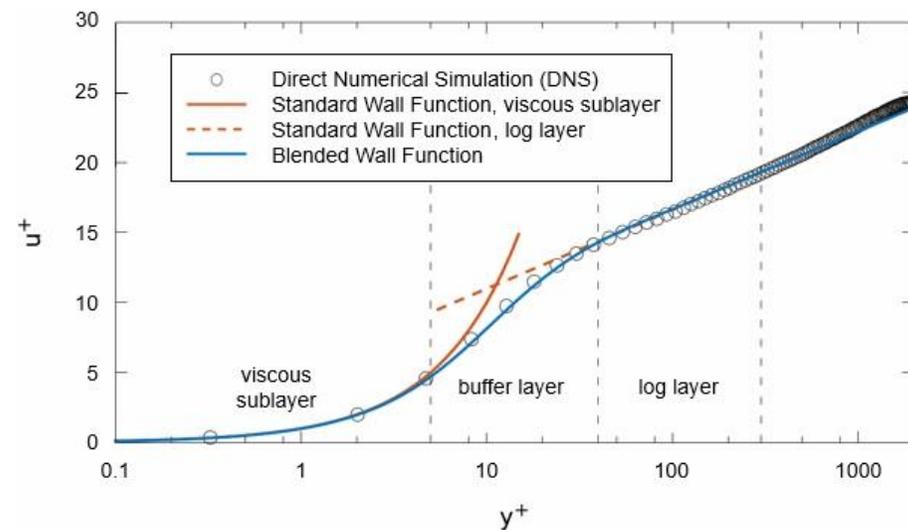
$$k_0 = \frac{3}{2} (I_0 U_0)^2$$

$$\varepsilon_0 = C_\mu k_0^{3/2} / l_0$$

$$U_0 = \text{Re}_0 \cdot \nu / L_0; \quad l = 0,07 L_0$$

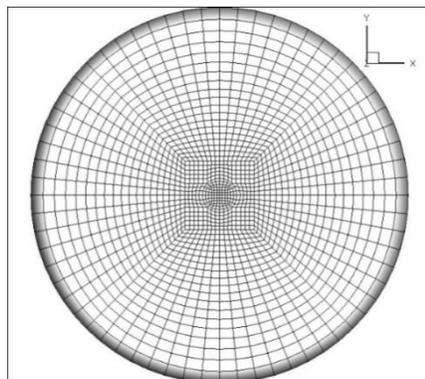
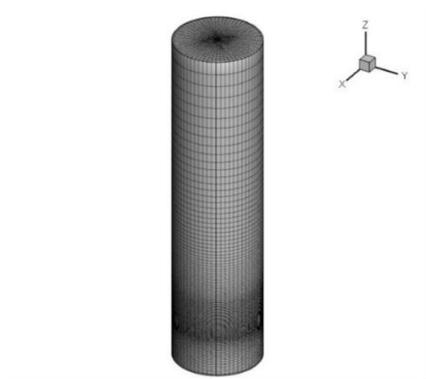
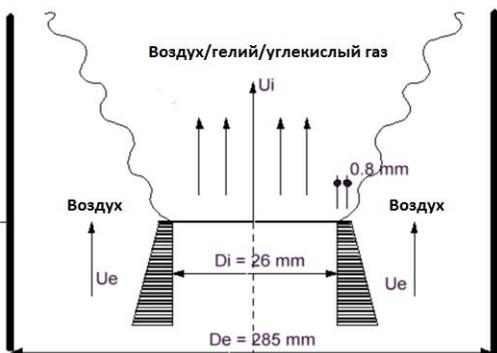
$$\nu_{t0} / \nu = 0,07 \cdot \sqrt{3/2} \cdot \text{Re}_0 \cdot I_0 < 1$$

Метод пристенных функций (wall-functions)

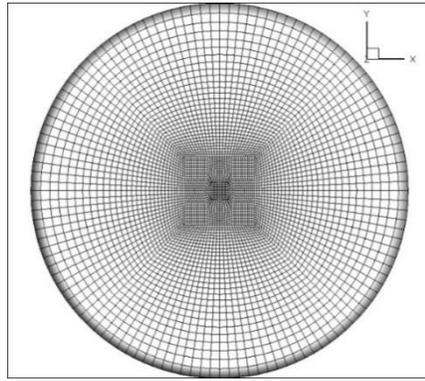
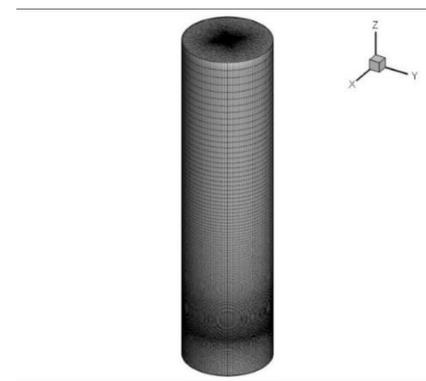
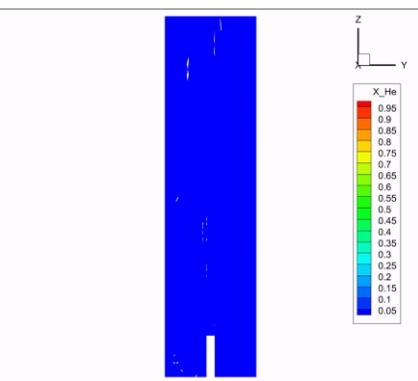


$$u^+ = \begin{cases} y^+, & y^+ < y_u^+ \\ \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+), & y^+ \geq y_u^+ \end{cases} \rightarrow \tilde{\mu}_t = \mu \cdot \begin{cases} 0, & y^+ < y_u^+ \\ \left( \frac{\kappa y^+}{\ln(Ey^+)} - 1 \right), & y^+ \geq y_u^+ \end{cases}$$

# Эксперимент ERCOFTAC (case-79)

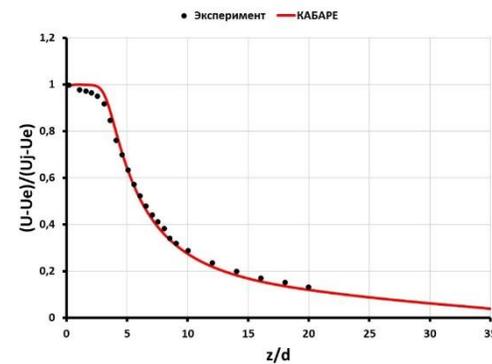


Грубая сетка 211k



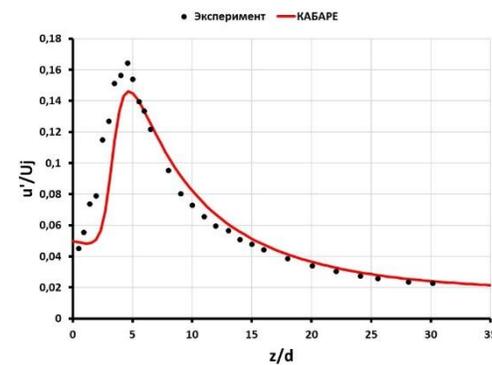
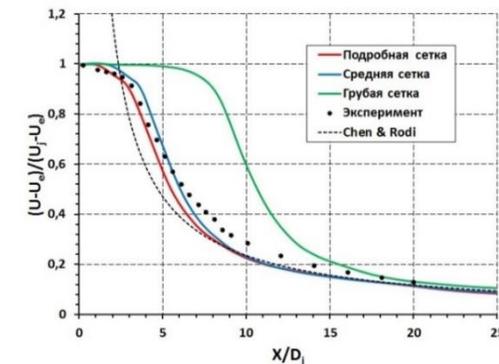
Подробная сетка 834k

с RANS

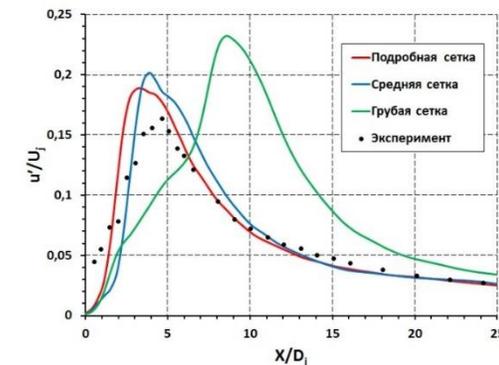


Профиль скорости

без RANS



Профиль пульсаций скорости





# Дальнейшие направления развития программного комплекса CABARET-SC1

- Переход от экспериментальных установок к реальным ОИАЭ. Развитие URANS подхода
- Совершенствование и валидация моделей физико-химических процессов
- Разработка новых моделей (спринклеры, многофазная модель)
- Разработка методики сопряженных расчетов аварий на ТЯУ типа ИТЭР (CABARET + ФАЭТОН)

Спасибо за внимание!