



Развитие подходов предсказательного моделирования задач водородной безопасности

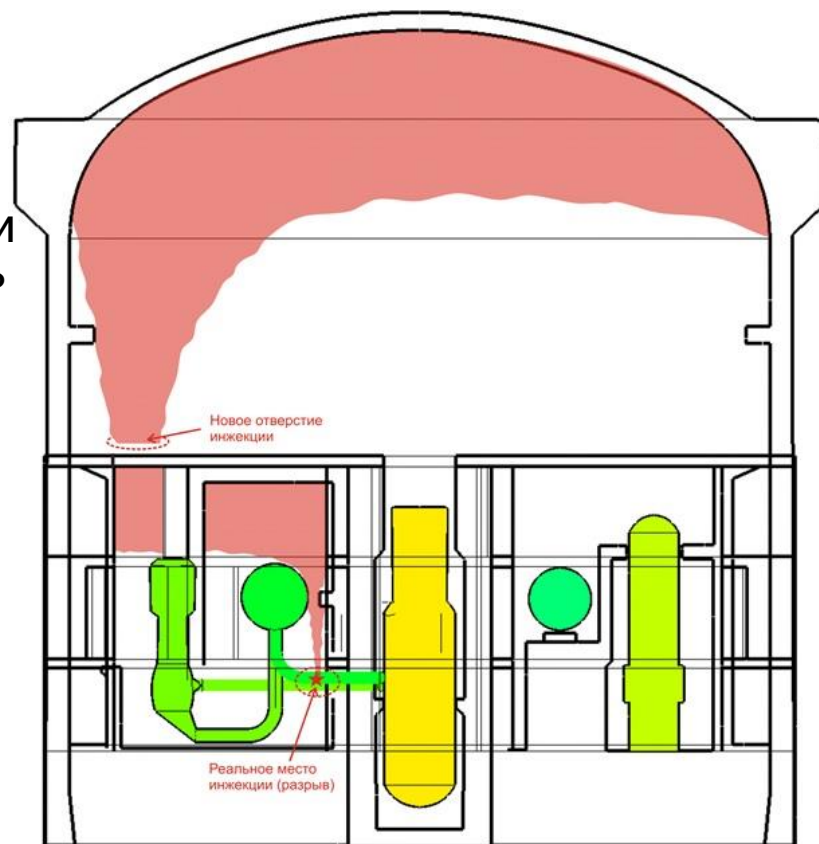
В.Ю. Глотов¹, А.А. Канаев¹, А.В. Соловьев¹, В.М. Головизнин¹

¹ИБРАЭ РАН Институт проблем безопасного развития
атомной энергетики РАН, Москва

glotov-v@yandex.ru

1-2 декабря, CFD-Weekend 2018, г. Москва

- Многомасштабность и мультифизичность процессов
 - Перемешивание многокомпонентных и многофазных смесей / турбулентность
 - Конвекция
 - Конденсация пара
 - Радиационная газодинамика
- Несколько источников неопределенностей:
 - Модели турбулентности
 - Начальные и граничные условия
 - Сетка
 - Упрощения в геометрической модели
 - Модель конденсации
 - Модель теплообмена излучением



Упрощенная схема контейнента с выделенной зоной инъекции и схема аппроксимации новой зоны инъекции

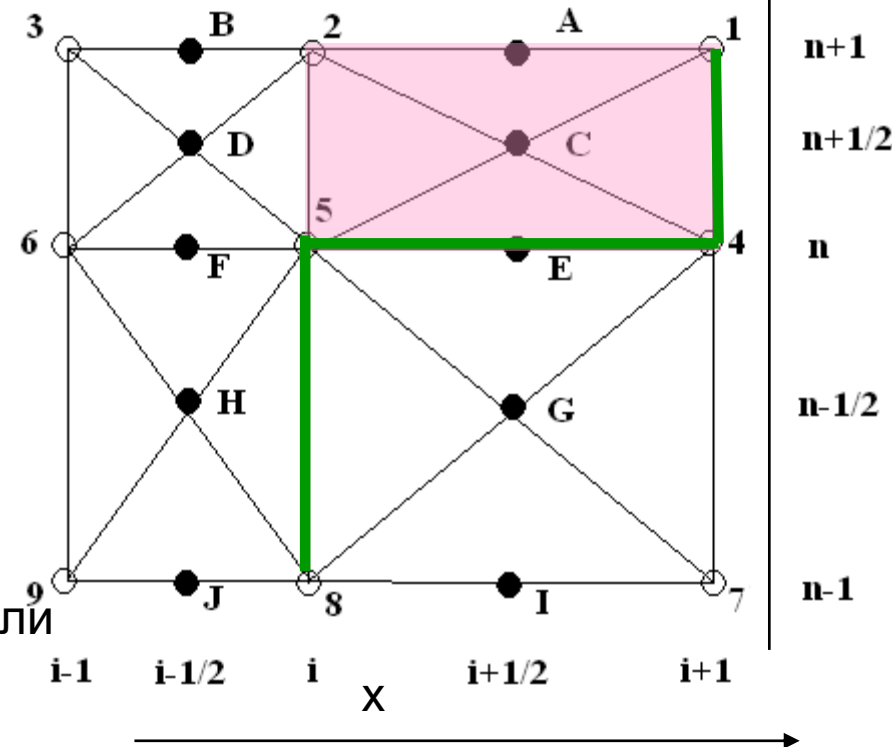
- Многомасштабность и мультифизичность процессов
 - Перемешивание многокомпонентных и многофазных смесей / турбулентность
 - Конвекция
 - Конденсация пара
 - Радиационная газодинамика

- Несколько источников неопределенностей:

- ~~Модели турбулентности (DNS/КАБАРЕ)~~
- Начальные и граничные условия
- ~~Сетка (выбор сетки из анализа сходимости решения)~~
- Упрощения в геометрической модели
- ~~Модель конденсации~~
- ~~Модель теплообмена излучением~~

КАБАРЕ
(Головизнин, Самарский, 1998)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + c \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0$$



Модель многокомпонентной смеси газов для гипозвуковых течений ($M \ll 1$)

4

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

$$P = P_0 + P^*$$

$$P_0(t) = \frac{\int_V \rho \varepsilon dV}{\int_V \frac{1}{\gamma - 1} dV}, \quad \nabla P_0 = 0$$

- «термодинамическое» давление

$$P^* = c^2(\rho - \rho_0^*),$$

- «динамическое» давление
(приближение слабой сжимаемости,
вводится искусственная сжимаемость)

$$\rho_0^*(t, \vec{r}) = \rho(t, \vec{r}) \left(P_0(t) / P(t, \vec{r}) \right)^{\frac{1}{\gamma(t, \vec{r})}}$$

Вынужденная конвекция, обусловленная инжекцией газовых струй различной плотности в спутный поток воздуха (ERCOFTAC)

5

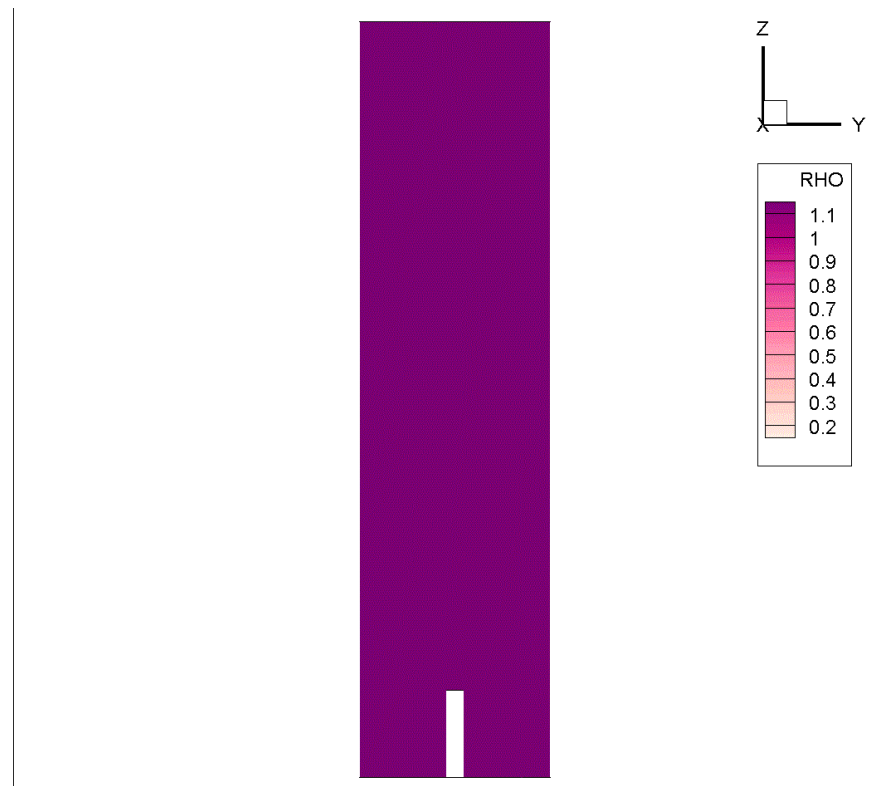
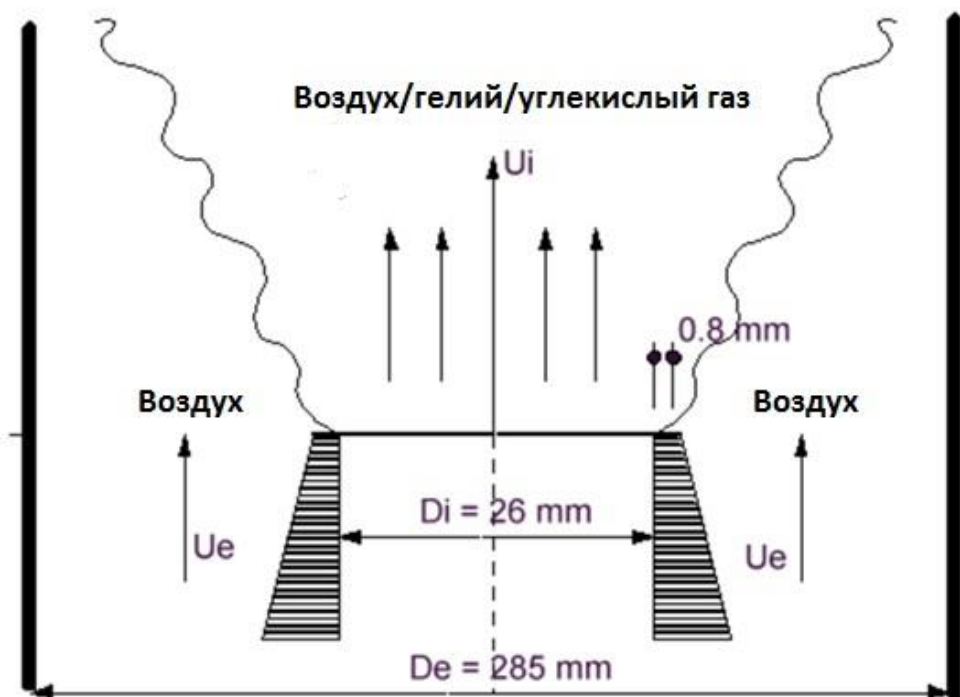
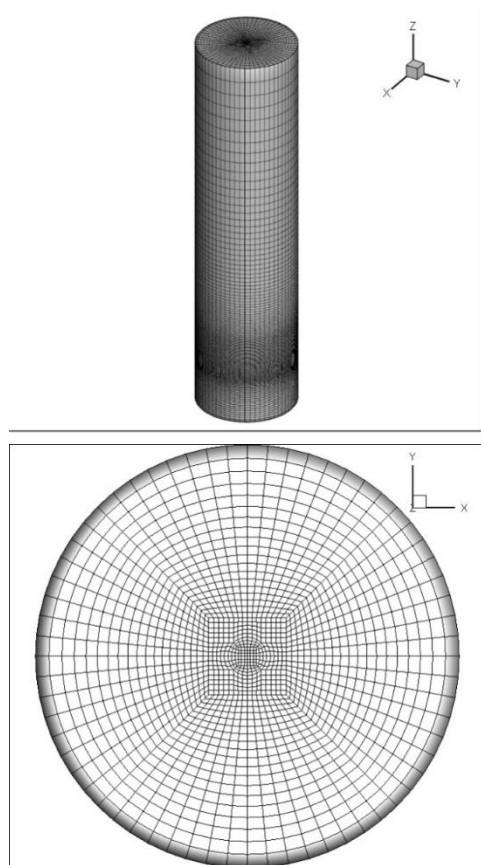


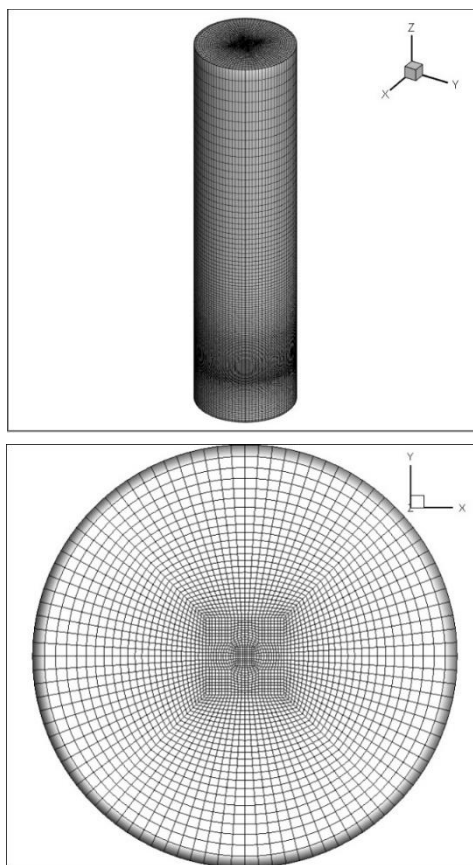
Таблица 5.1 - Параметры струй

Струя	ρ_j / ρ_e	$U_j (м / с)$	$U_e (м / с)$	Re_j	Fr_j
Гелий	0,14	32	0,9	7000	643
Воздух	1	12	0,9	21000	-
Углекислый газ	1,52	10	0,9	32000	1363

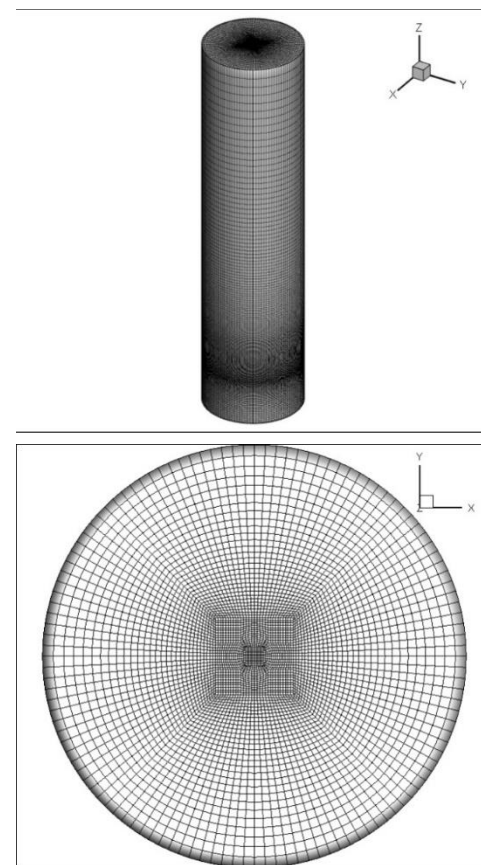
Инжекция струи гелия
в спутный поток
воздуха



«Грубая сетка»,
211 376 ячеек,
108 грани на входе



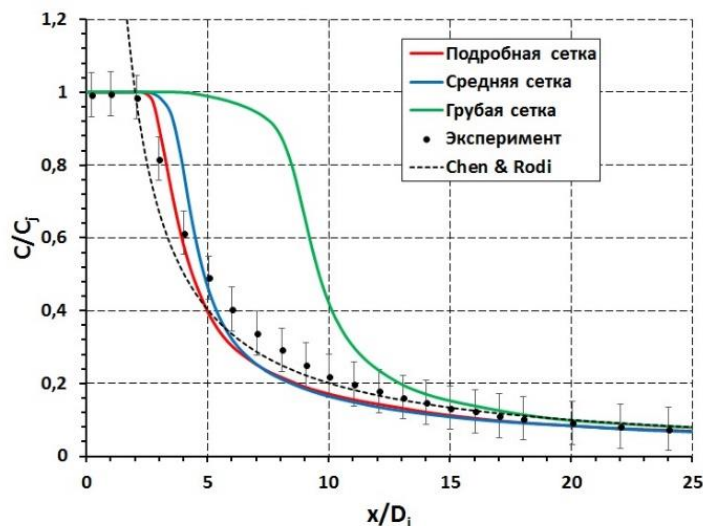
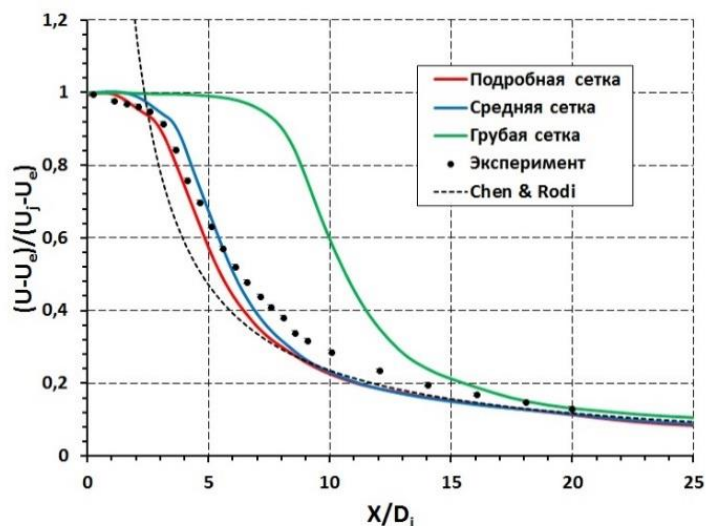
«Средняя сетка»,
483 520 ячеек,
192 грани на входе



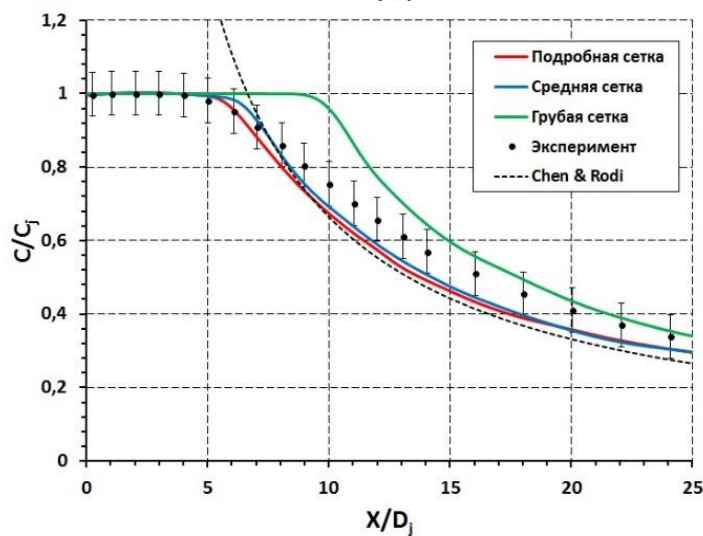
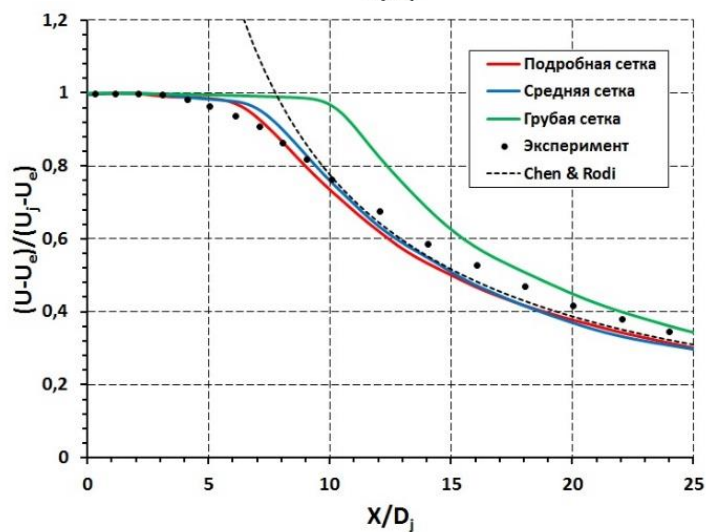
«Подробная сетка»,
834 400 ячеек,
300 граней на входе

Профили скорости и концентрации в струе

7



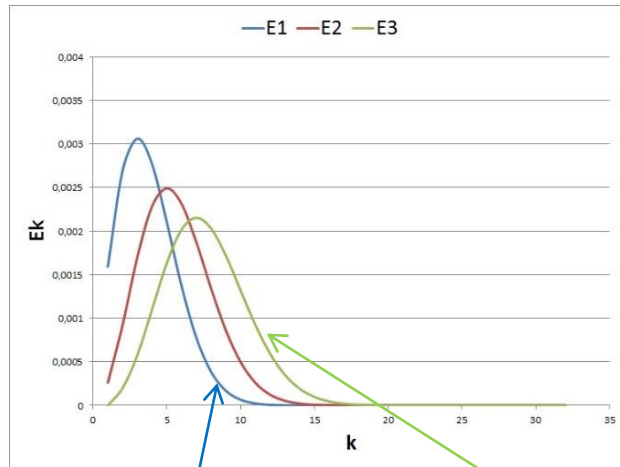
Струя гелия



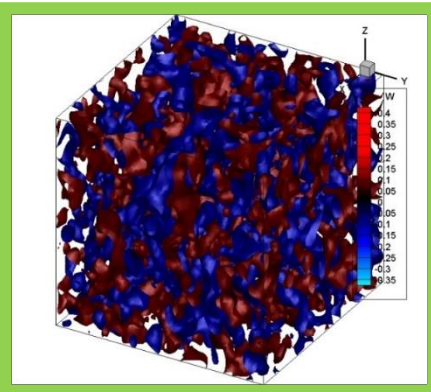
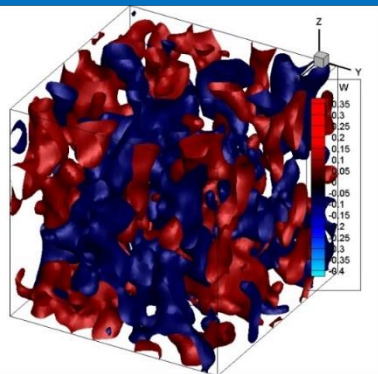
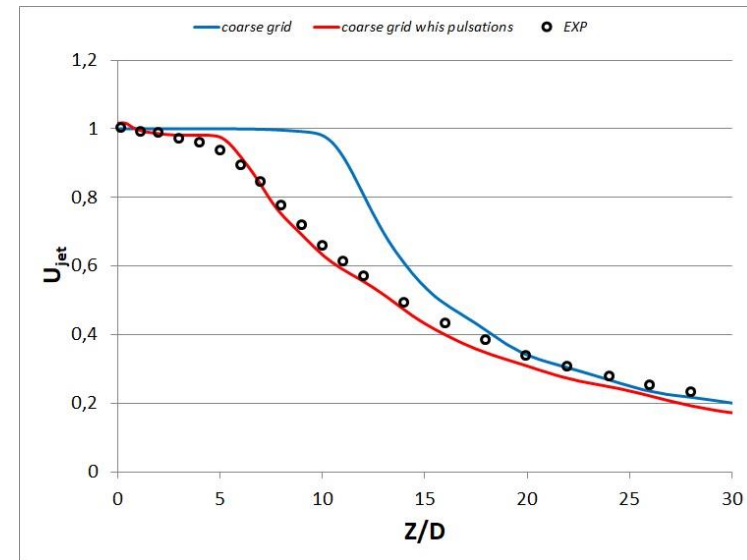
Струя
углекислого газа

Генерация синтетической «турбулентности» на входе

8



$$E_k = Ak^\alpha \exp\left(-\frac{\alpha}{2}\left(\frac{k}{k_0}\right)^2\right)$$

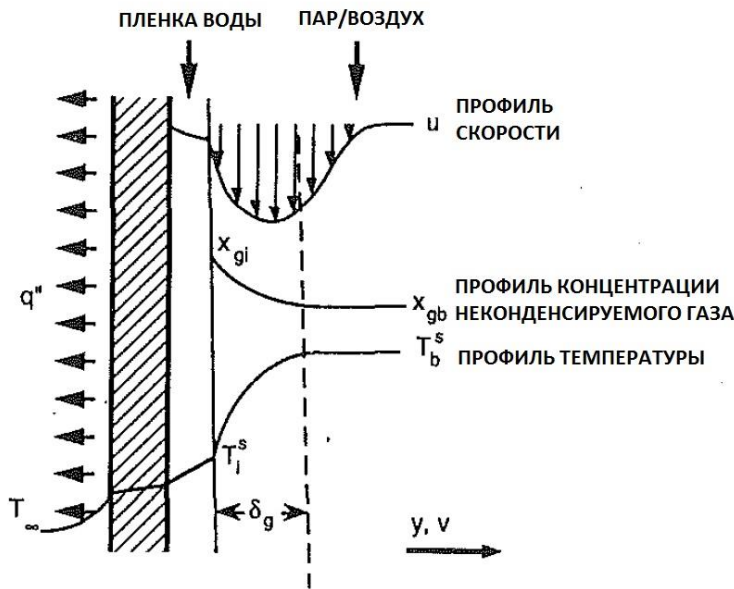


- Преимущества: вычислительная стоимость
- Недостатки: есть настроечные параметры!

Решение – использовать оба подхода:

- Расчет на подробной сетки используется для настройки параметров генератора турбулентности
- Генератор турбулентности используется для длительных расчетов

Модель диффузионного слоя для пристеночной конденсации пара в присутствии неконденсируемых газов (в приближении тонкой пленки) 9



$$J_v = n_v u_v \quad J_g = n_g u_g$$

$$J \equiv nu = J_v + J_g$$

$$n_g (u_g - u) = -D \frac{\partial n_g}{\partial y} \quad \text{- 1-ый закон Фика}$$

$$u_{i,g} = 0$$

$$n_{i,g} u_i = D \frac{\partial n_{i,g}}{\partial y}$$

$$u_i = D \frac{\partial \ln(x_{i,g})}{\partial y} \quad \text{- скорость конденсации}$$

$$J = nu_i \equiv n_{i,v} u_{i,v} = nD \frac{\partial \ln(x_{i,g})}{\partial y}$$

$$j_{i,v} = m_{0,v} J_{i,v} = m_{0,v} J_i = m_{0,v} nD \frac{\partial \ln(x_{i,g})}{\partial y} = \frac{M_v}{M} \rho D \frac{\partial \ln(x_{i,g})}{\partial y}$$

- диффузионный поток пара

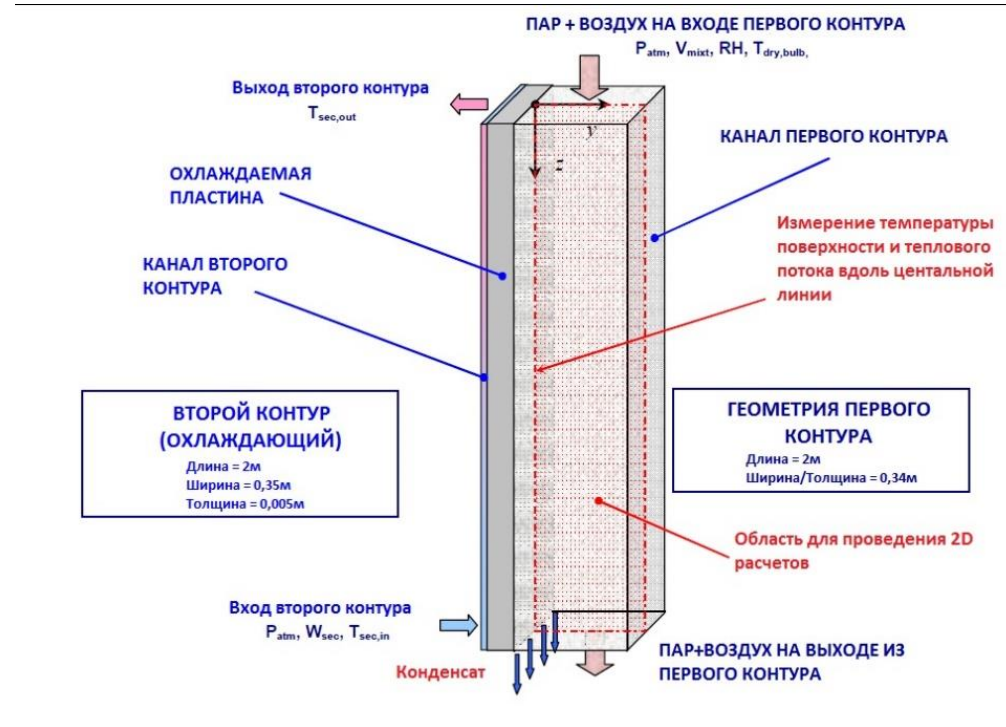
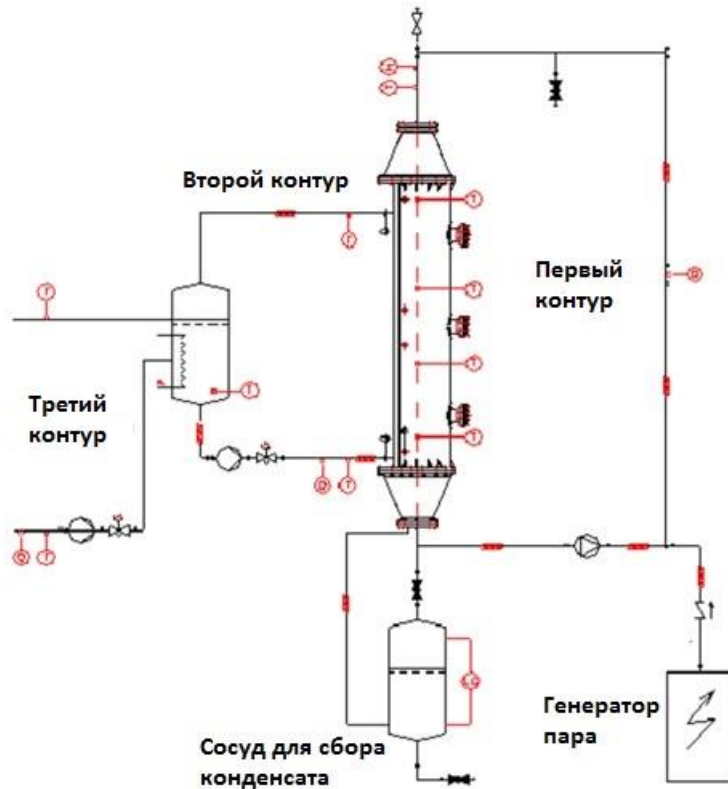
$$q_c'' = h_{fg} j_{i,v} \quad \text{- конденсационный поток тепла на стенку}$$

$$u_i = -\frac{2D}{\Delta_{cell}} \ln\left(\frac{x_{b,g}}{x_{i,g}}\right) = \frac{2D}{\Delta_{cell}} \ln\left(\frac{x_{i,g}}{x_{b,g}}\right) = \frac{2D}{\Delta_{cell}} \ln\left(\frac{1-x_{i,v}}{1-x_{b,v}}\right) = \frac{2D}{\Delta_{cell}} \ln\left(\frac{P_{cell,t} - P_{wall,v}}{P_{cell,t} - P_{cell,v}}\right)$$

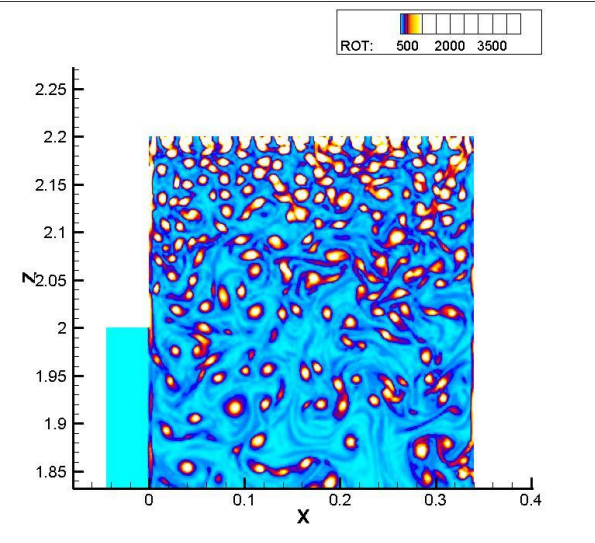
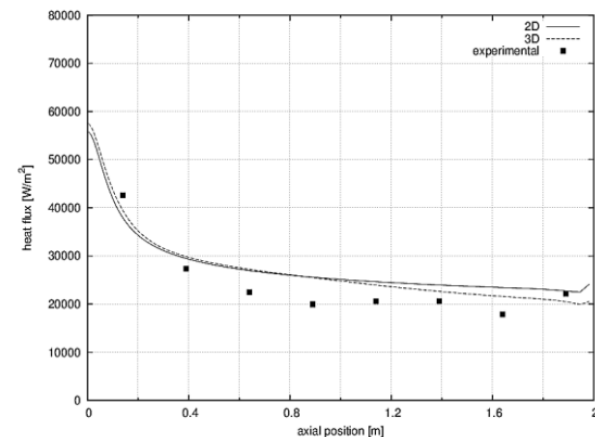
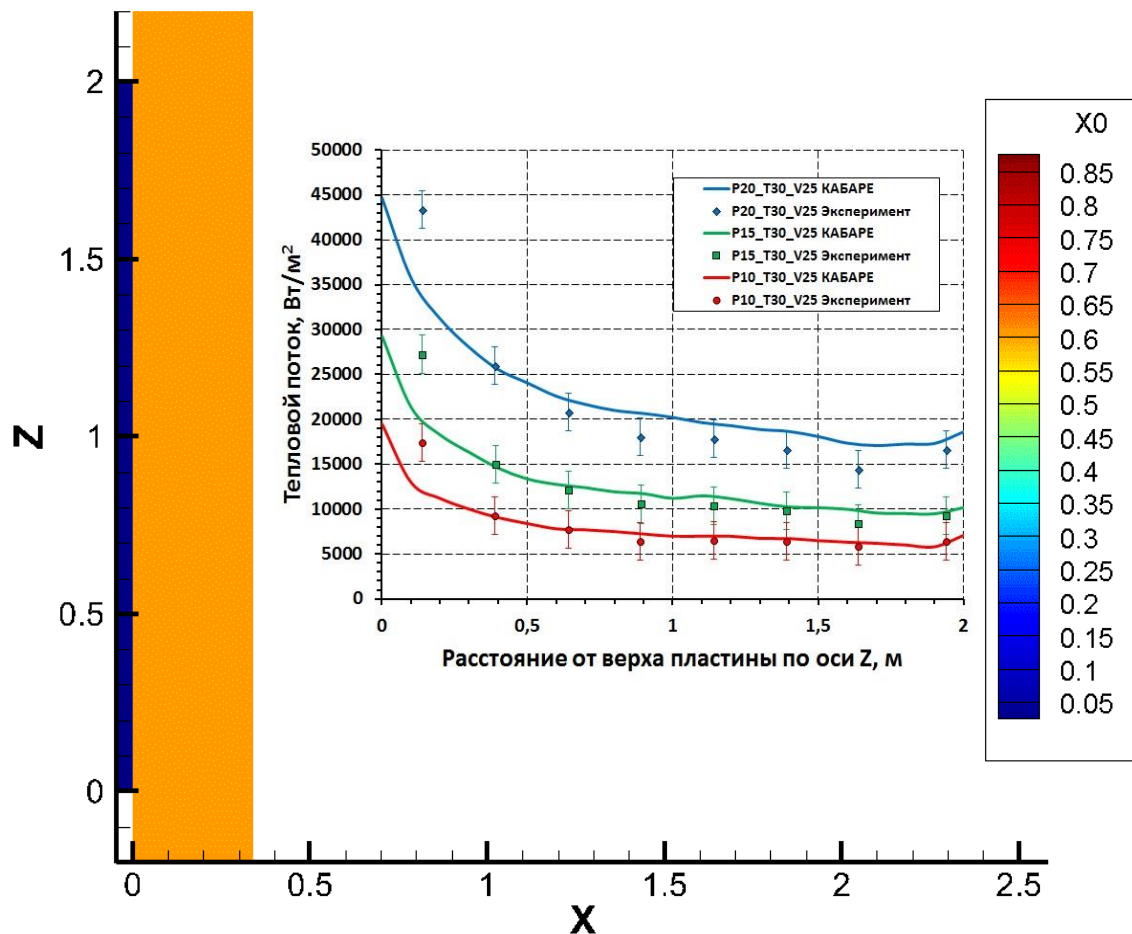
$$P_{wall,v} \approx P_{sat}(T_{wall})$$

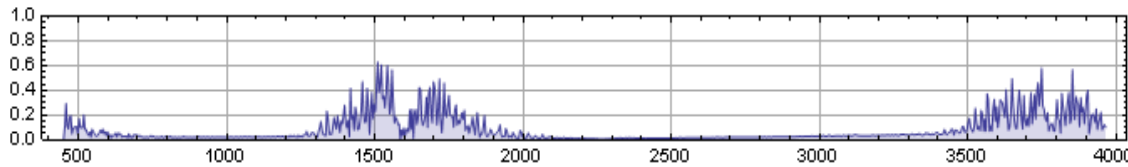
Конденсация пара на вертикальной стенке (экспериментальная установка CONAN)

10



Мольная доля воздуха





Wave number
[cm^{-1}]

Therefore, the partial pressure of steam was everywhere between 0.8 and 1.3 bar. The “optical thickness” can be calculated

$$\tau = \kappa P L;$$

κ = “mean” vapour absorption coefficient
($\text{atm}^{-1} \text{m}^{-1}$)

Planck approximation (thin medium, $\tau \ll 1$):

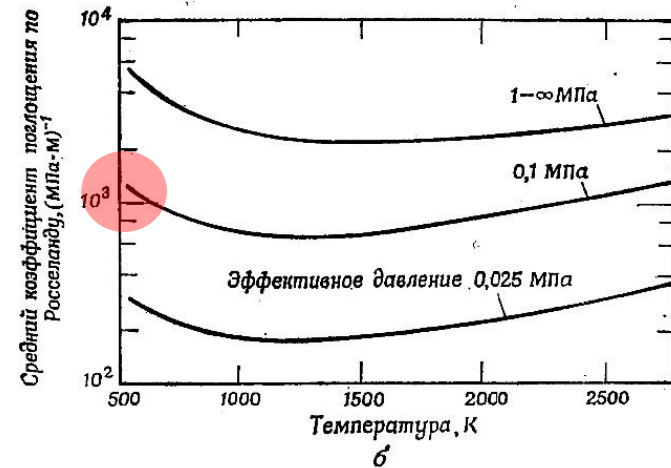
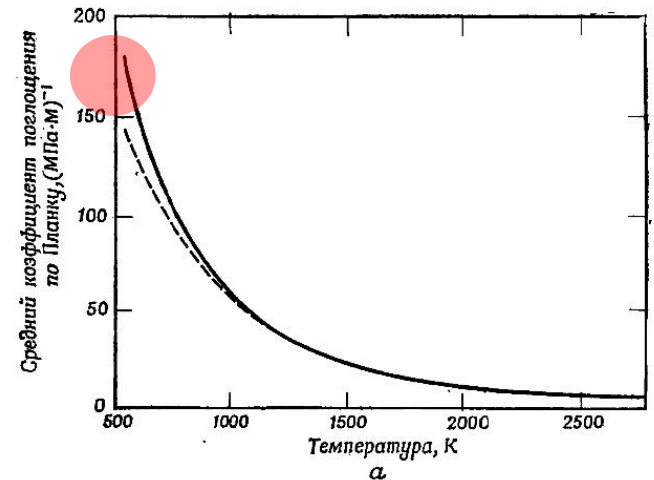
$$\kappa_P = 18.4 (555.56/T) [1 - 0.054(555.56/T)^2] = 18.4 \text{ atm}^{-1} \text{m}^{-1} \text{ at } 555.56 \text{ K (288 } ^\circ\text{C)}$$

Rosseland approximation (thick medium, $\tau \gg 1$):

$$\kappa_R \sim 120 \text{ atm}^{-1} \text{m}^{-1} \text{ at } 555.56 \text{ K and } 1 \text{ bar.}$$

Since $L=0(1)$;

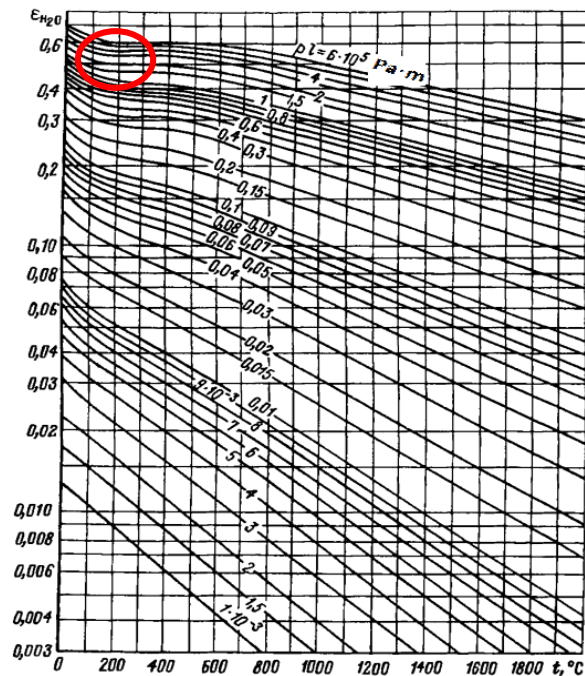
$$\tau = 15-160 \text{ (depending on definitions)} \gg 1$$



Модель Росселанда лучистой теплопроводности

$$k_{sum} = k + k_R$$

$$k_R = \frac{16}{3} \sigma l_R T^3$$



Теплообмен со стенкой

$$W_g = -\varepsilon_{wg} \sigma (T_{wall}^4 - T_g^4)$$

$$\varepsilon_{wg} = \frac{\varepsilon_g \varepsilon_{wall}}{\varepsilon_{wall} + \varepsilon_g (1 - \varepsilon_{wall})}$$

$\varepsilon_g \sim 0.4 - 0.6$ Степень черноты пара

$\varepsilon_{wall} \sim 0.8$ Степень черноты стенок (Juelich)

$$\varepsilon_{wg} = 0.36 - 0.52$$

Основы теплопередачи, Михеев М.А., Михеева И.М., «Энергия» 1977

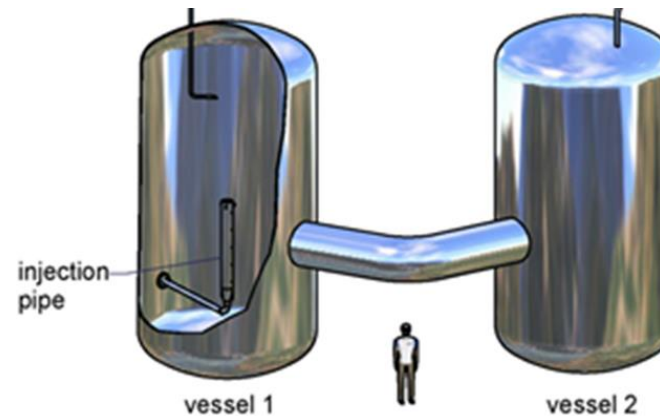
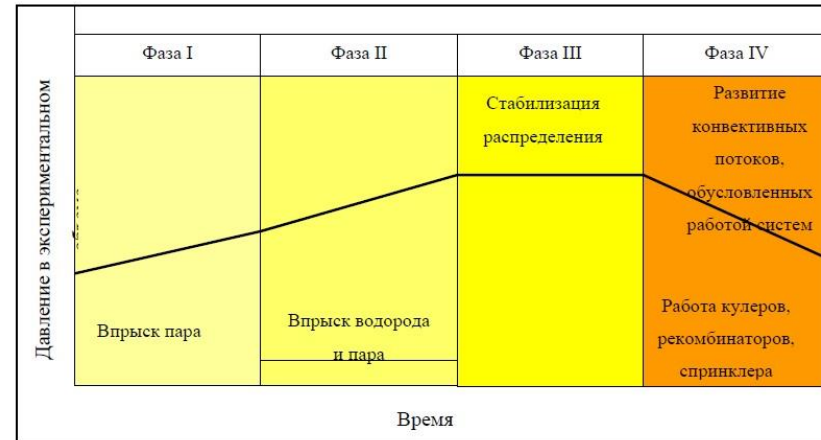
Эксперименты по изучению процессов формирования и разрушения стратификации легкого газа

14

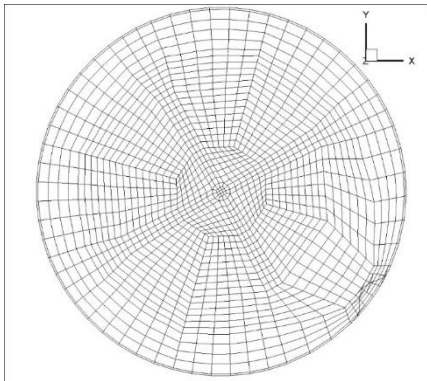
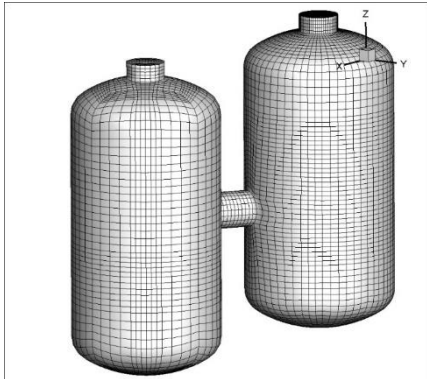


Установка PANDA

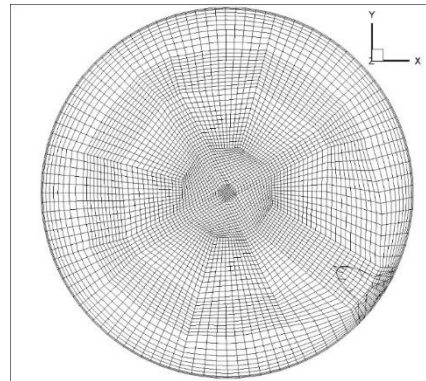
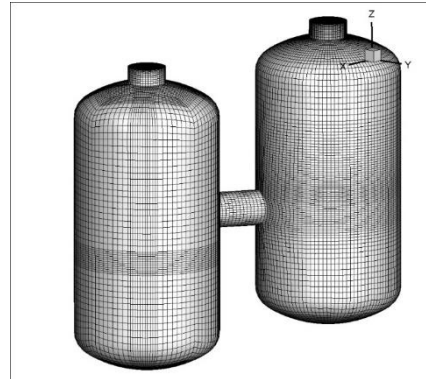
Сценарий экспериментов проекта ERCOSAM-SAMARA



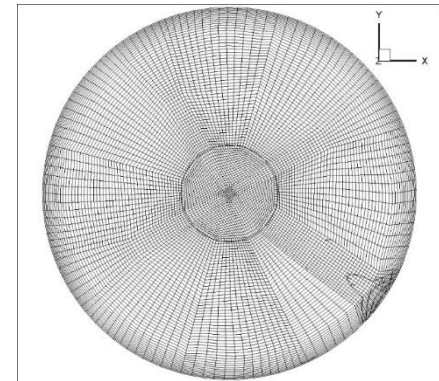
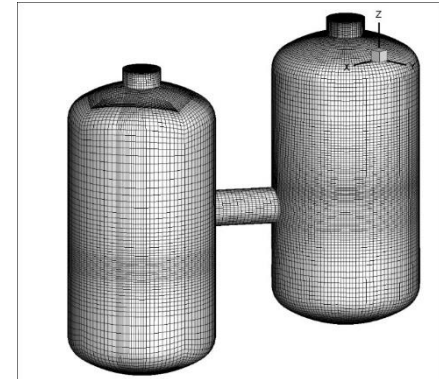
1-2 декабря, CFD-Weekend 2018, г. Москва



«Грубая сетка»,
130 000 ячеек,
21 грань на входе,
Размер ячеек на стенке **5 см** сгущение на стенках до **2 см**



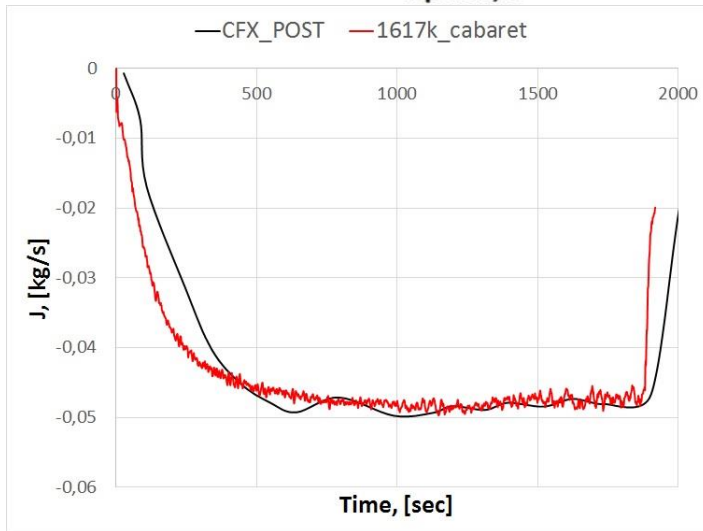
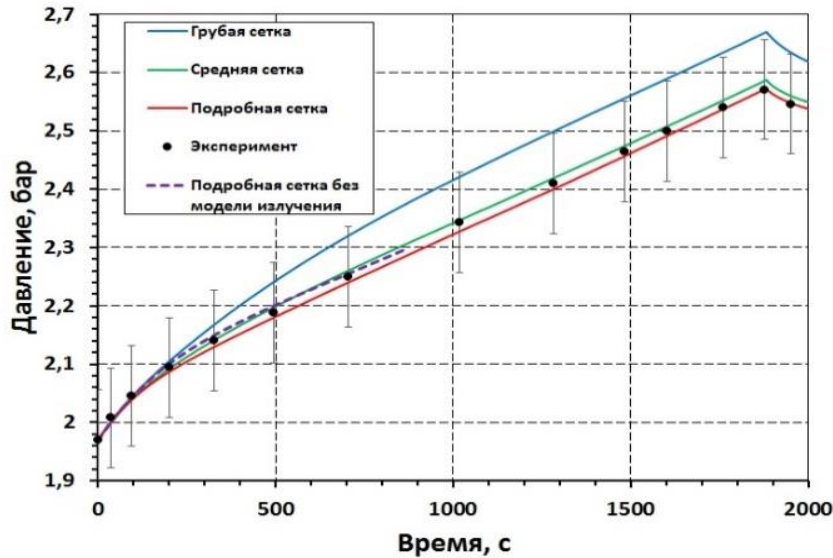
«Средняя сетка»,
736 722 ячеек,
85 грани на входе,



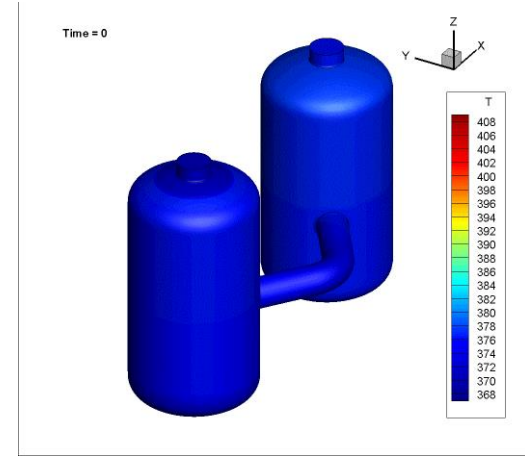
«Подробная сетка»,
1 617 048 ячеек,
108 граней на входе,
сгущение на стенках до **1 см**
($\langle y^+ \rangle = 16$)

Давление и скорость конденсации пара. Фаза накачки пара, эксперимент ERCOSAM-SAMARA PE4

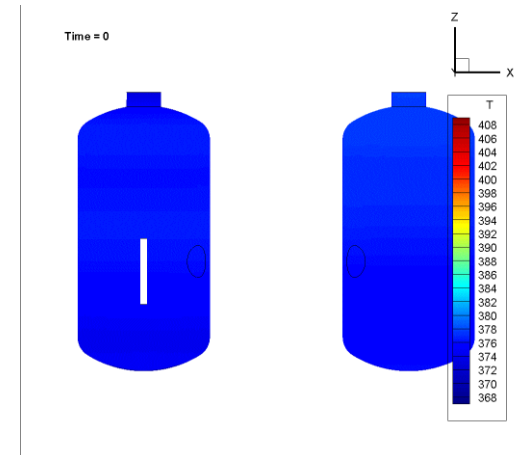
16



Скорость
конденсации
пара, сравнение
с CFX PostTest
($k-\omega$ based SST)



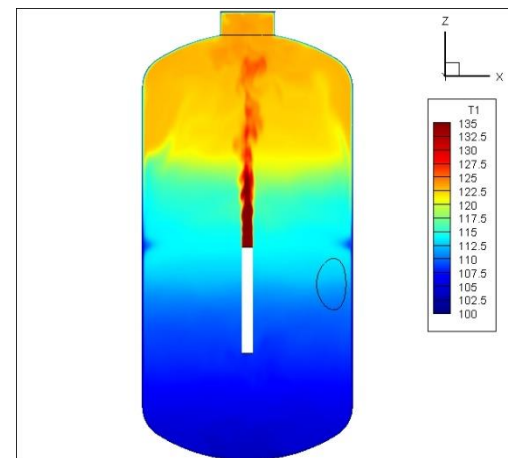
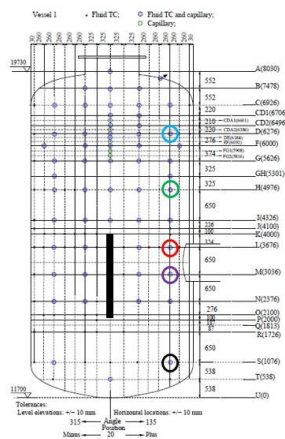
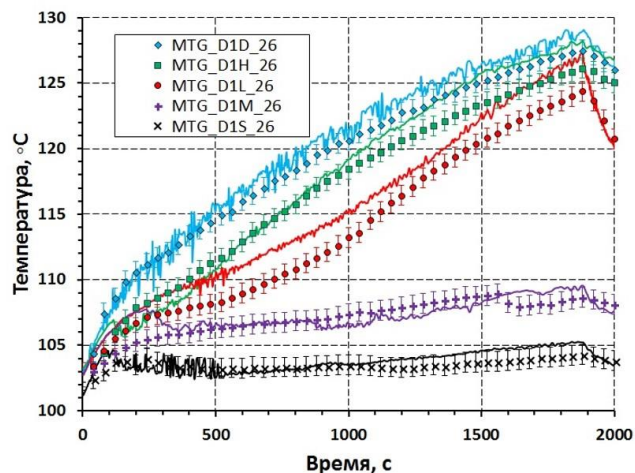
Температура стенок



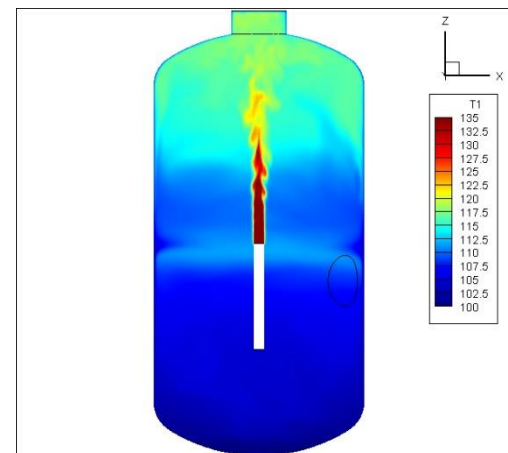
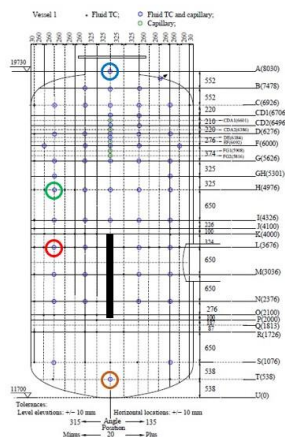
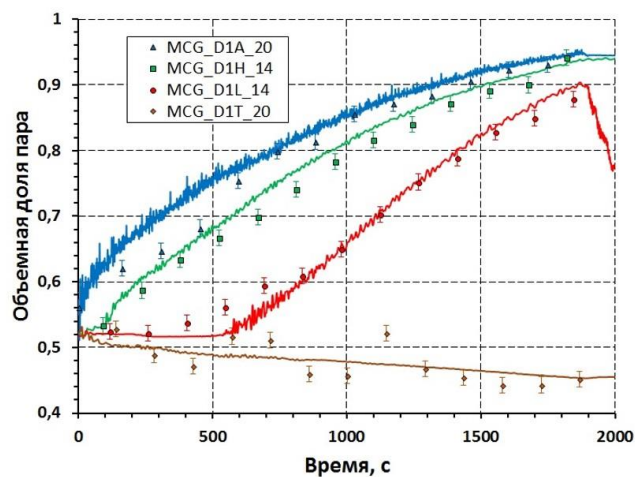
Температура газа

Локальные характеристики (температура, концентрация). Влияние радиационного теплообмена

17



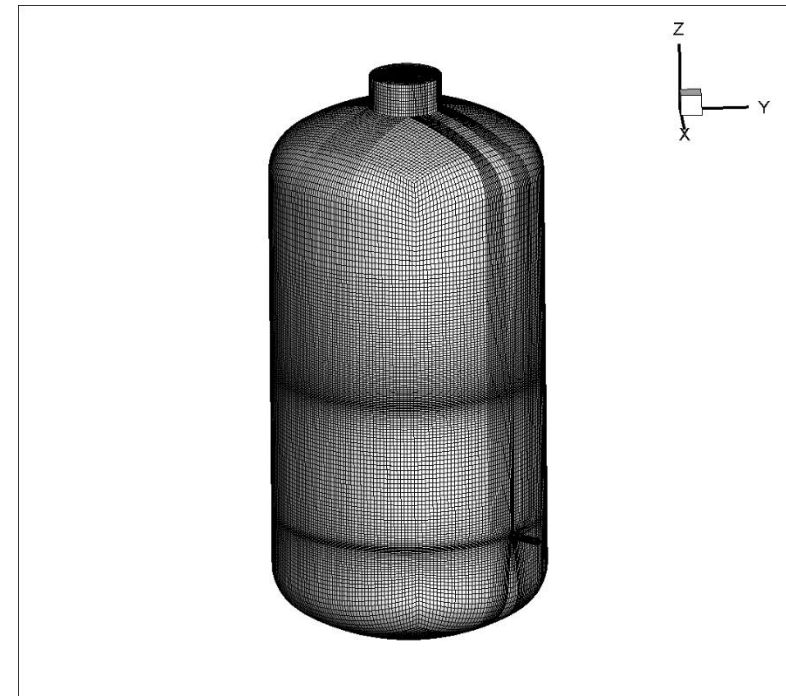
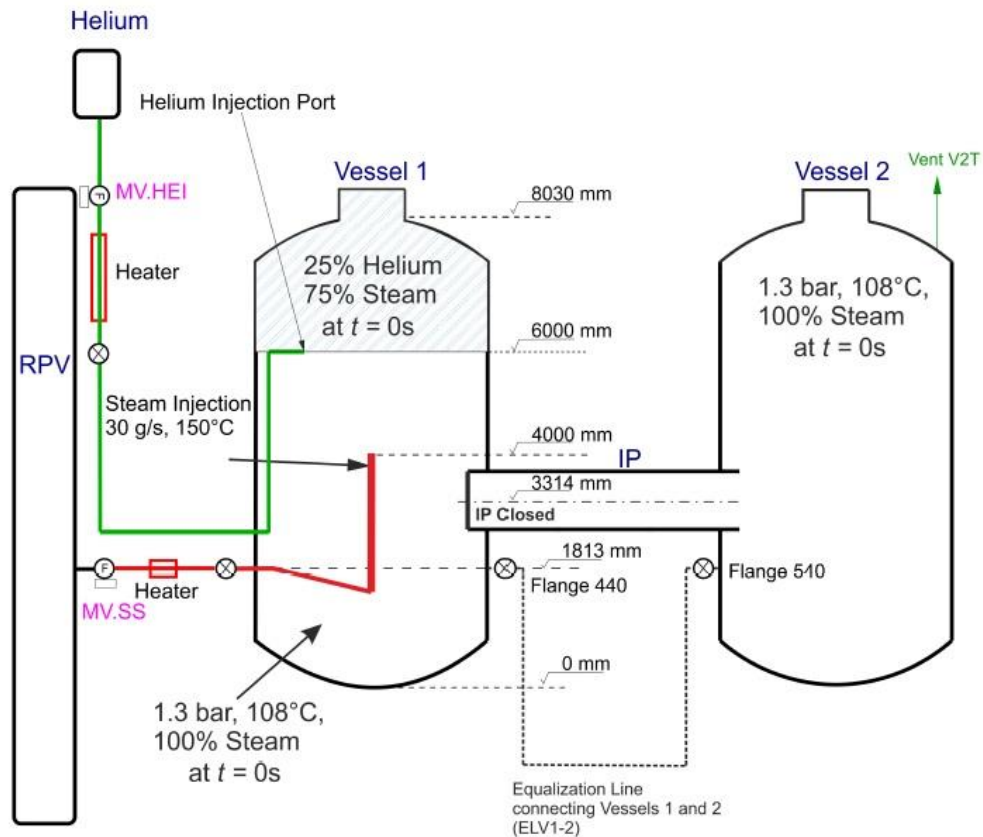
Поле температур без учета излучения



Поле температур с моделью излучения
Росселанда

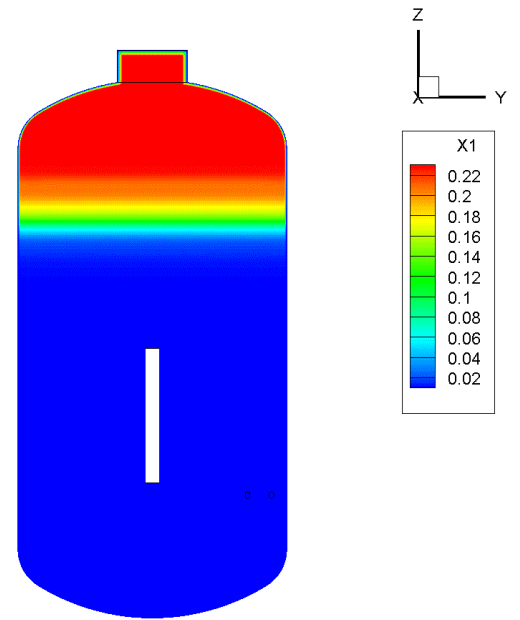
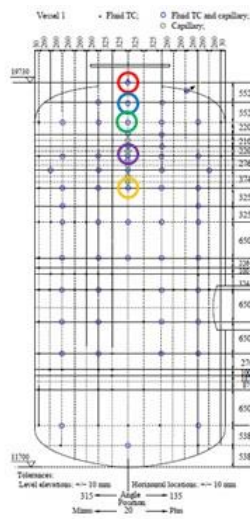
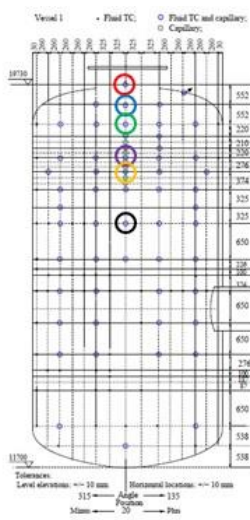
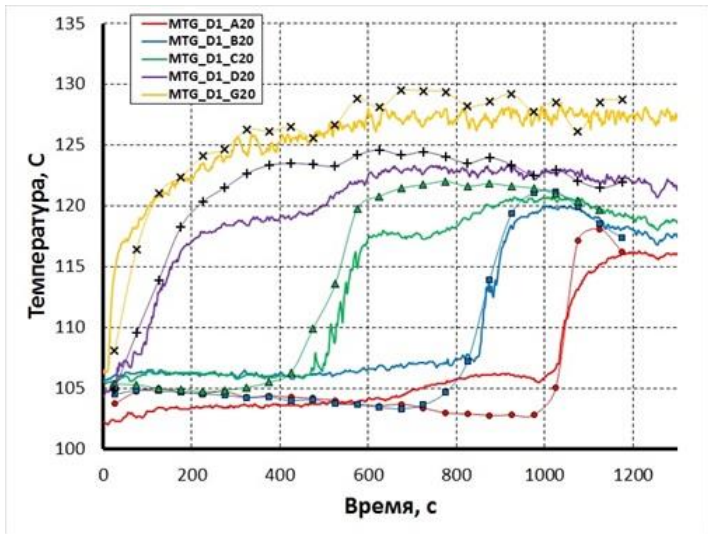
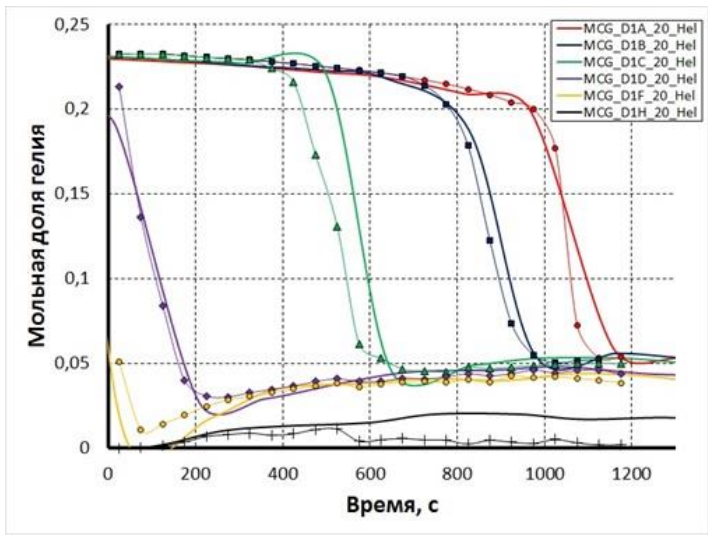
Размытие слоя гелия стужей пара. (Эксперимент HYMERES-2 P1_0)

18



Сеточная модель

Размытие слоя гелия ступей пара. (Эксперимент HYMERES-2 P1_0)



Мольная доля гелия

Асинхронное интегрирование по времени

$$T=10^3-10^4 c$$

$$\tau < CFL \cdot \frac{h_{\min}}{(c + |u|)_{\max}}$$

$$\tau=10^{-5} c$$

$$N=T/\tau=10^8-10^9$$

1 группа

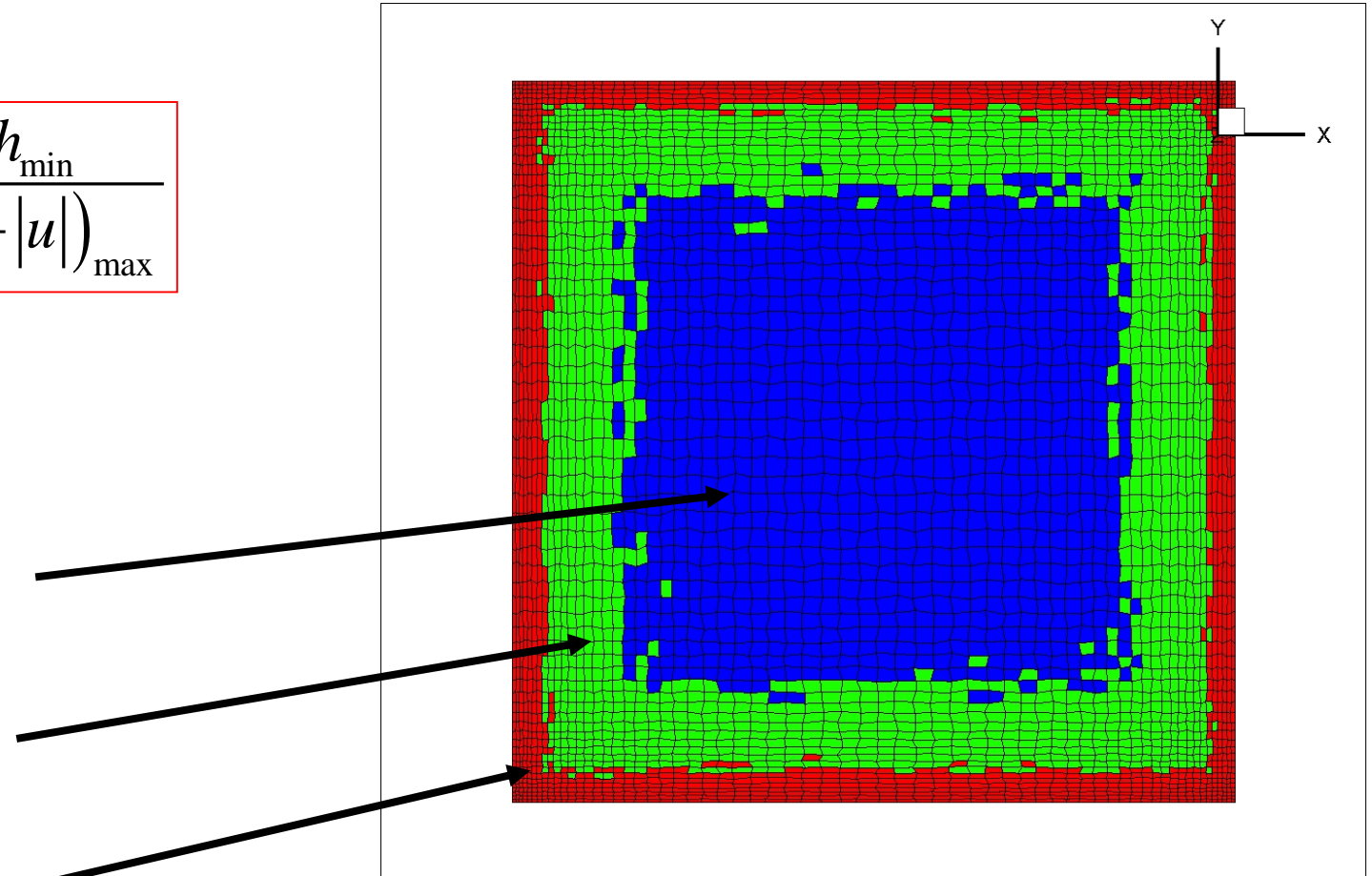
$$4h_{\min} < h < 8h_{\min}$$

2 группа

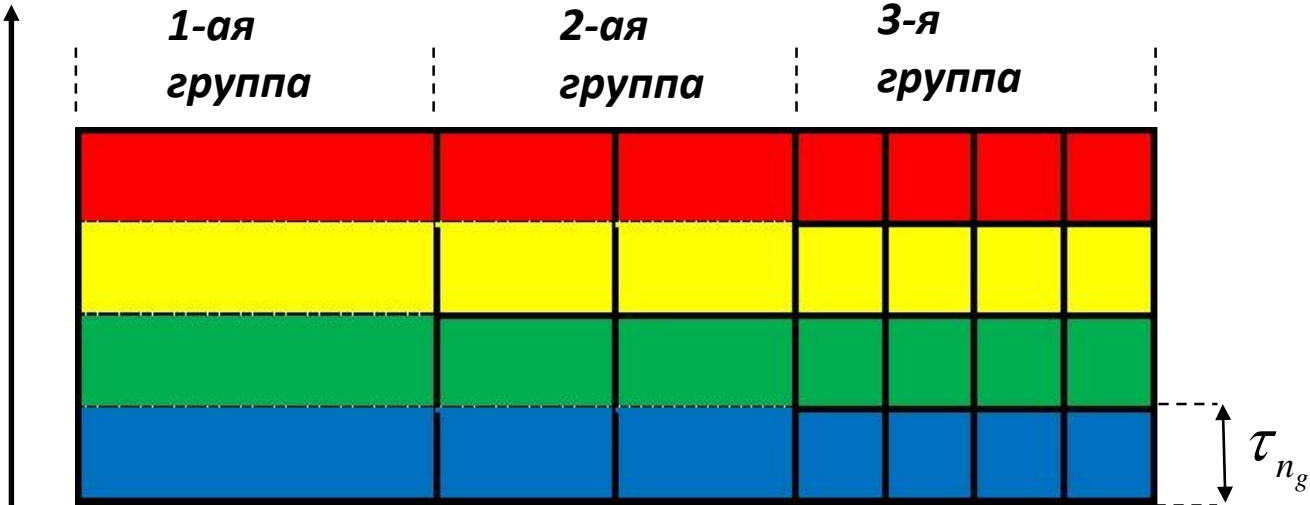
$$2h_{\min} < h < 4h_{\min}$$

3 группа

$$h_{\min} < h < 2h_{\min}$$

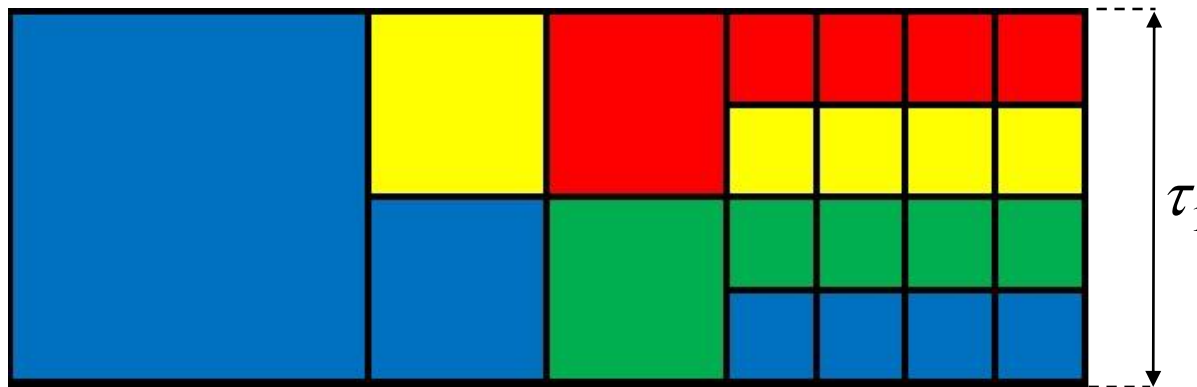


Синхронное интегрирование



$$N_{Sync} = 2^{n_g-1} n_c$$

Асинхронное интегрирование



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

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

PANDA (H2P1_0)

22

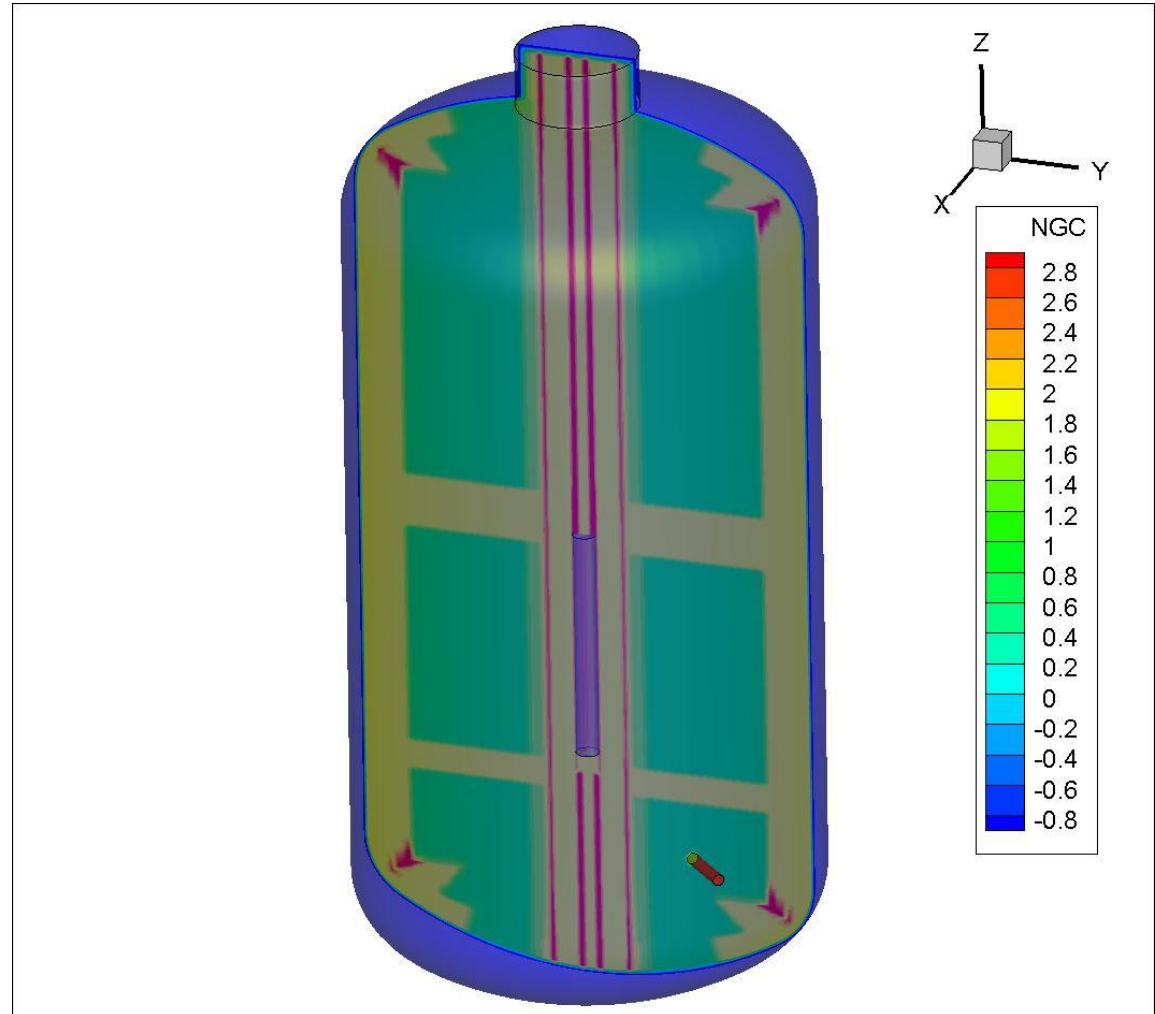
build cells groups

Elem[1] = 898057 / 2151630
(41.738449%)

Elem[2] = 1232828 /
2151630 (57.297398%)

Elem[3] = 20745 / 2151630
(0.964153%)

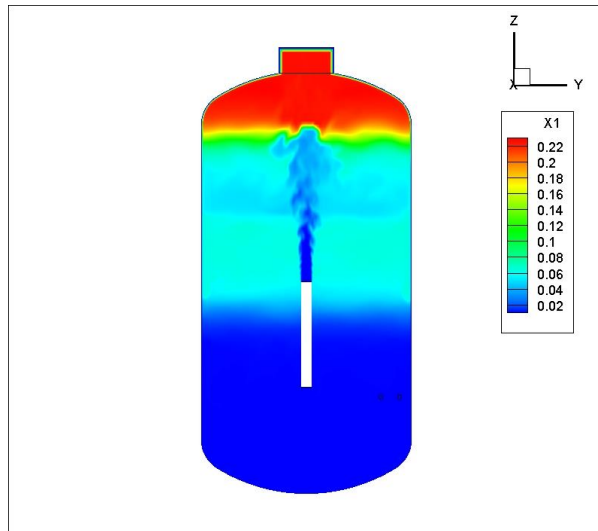
acceleration = **2.497037**



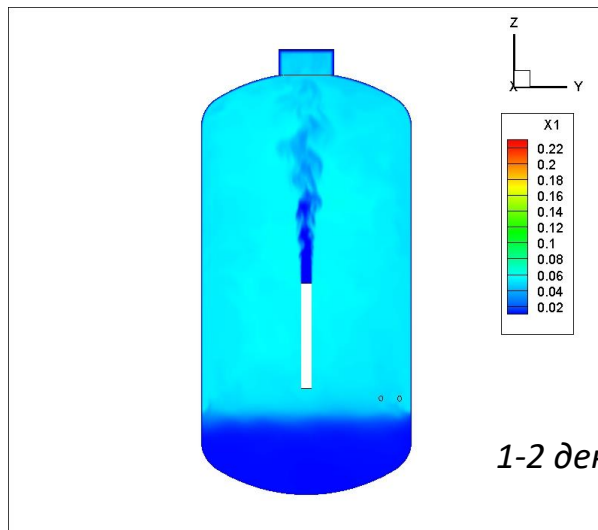
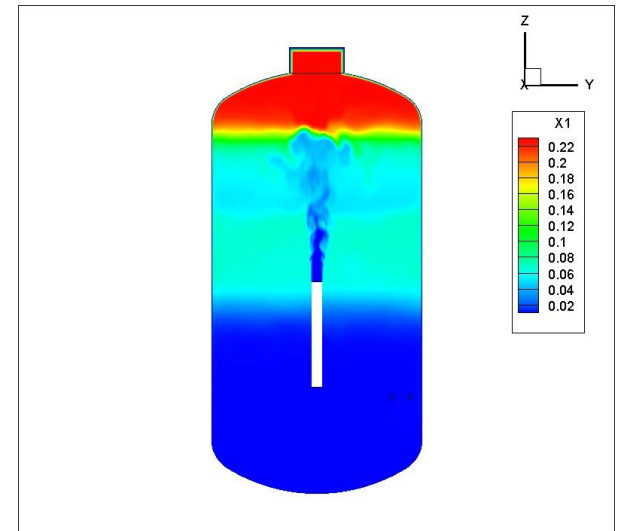
Сравнение результатов

Асинхронный расчет

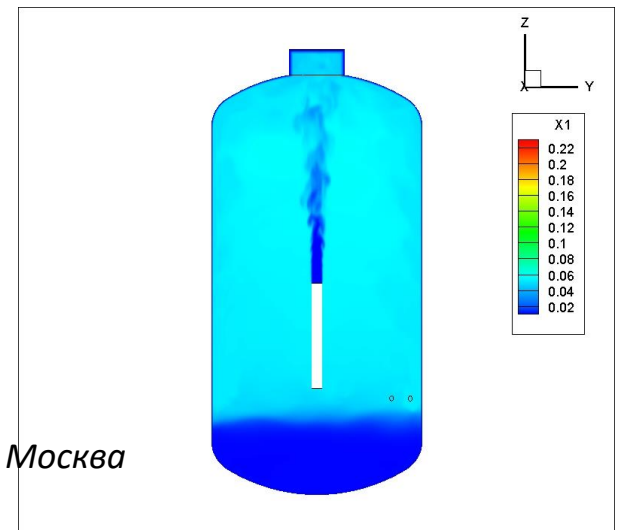
Синхронный расчет



Time = 500s



Time = 1420s



ЗАКЛЮЧЕНИЕ!

В результате проведённых исследований показано:

- Предложен подход для предсказательного моделирования задач ВБ на основе беспараметрической вихреразрешающей методики КАБАРЕ
- Показана высокая точность моделирования с помощью данного подхода экспериментальных стендовых задач как по отдельным физическим процессам, играющих важную роль в задачах ВБ, так и комплексных (PE4 ERCOSAM-SAMARA, P1_0 HYMERES2)
- Использование данного подхода позволяет получить однозначную интерпретацию результатов экспериментов и получить полный набор физических процессов существенных в эксперименте. Впервые с помощью беспараметрического метода показана важность учета радиационного теплообмена в задачах ВБ

Спасибо за внимание !