



ОКБ  
ГИДРОПРЕСС  
РОСАТОМ

# Моделирование течения воздуха в системе охлаждения блока верхнего РУ ВВЭР с применением CFD

Международная научная конференция  
«Суперкомпьютерные дни в России»  
26-27 сентября 2022 года

**Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А., Кудрявцев О.В.**

# Введение

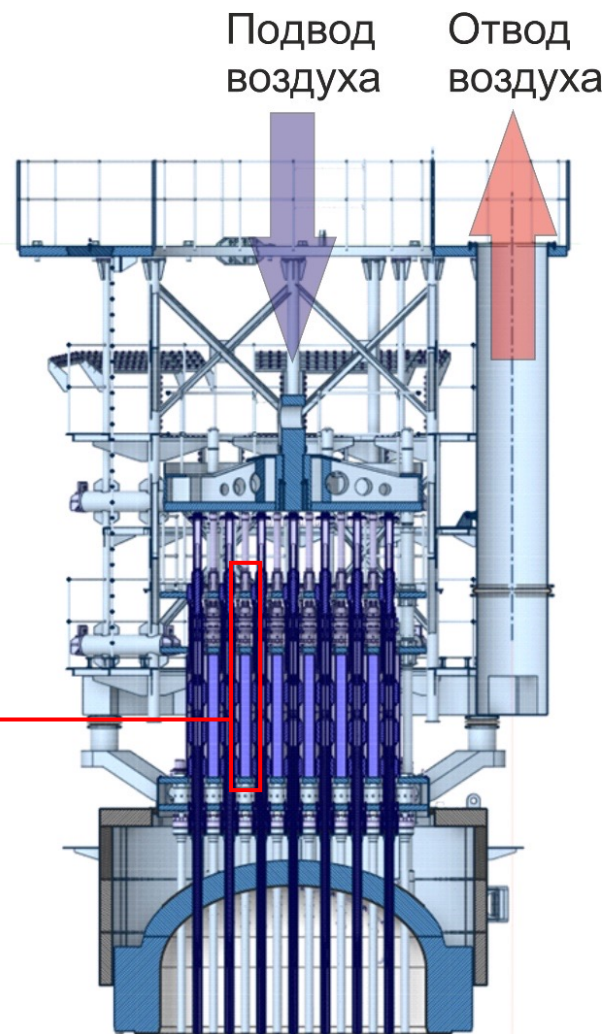
Объект исследования – проточный тракт системы охлаждения верхнего блока реактора ВВЭР.

Предмет исследования – процессы гидродинамики и теплообмена, определяющие расходы и температуры охлаждающего воздуха в проточном тракте блока верхнего.

Цель работы – разработка CFD модели проточного тракта системы охлаждения блока верхнего и определение с помощью разработанной CFD модели расходов и температур охлаждающего воздуха в патрубках СУЗ и СВРК.



Привод СУЗ ШЭМ-3

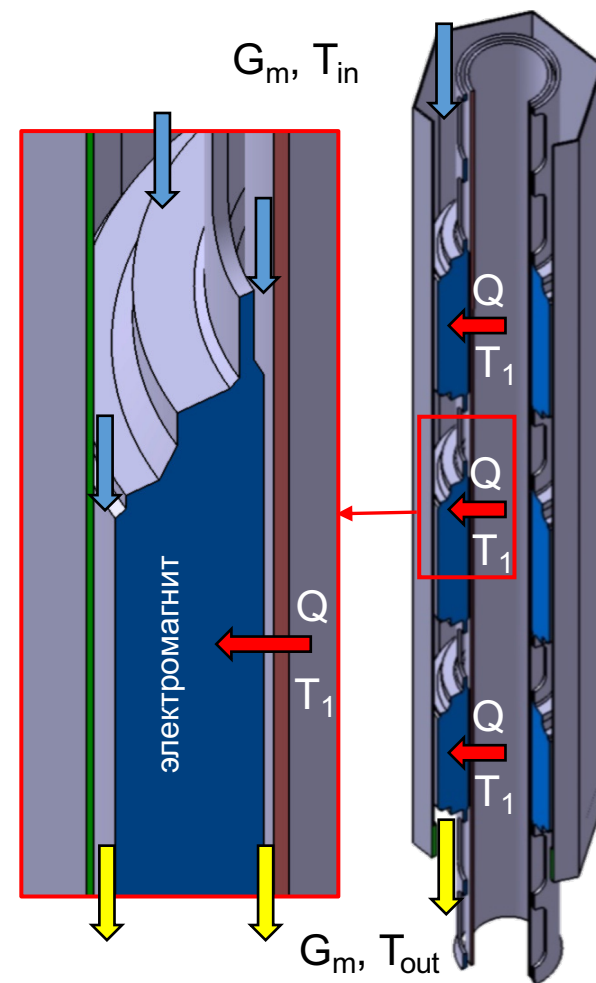
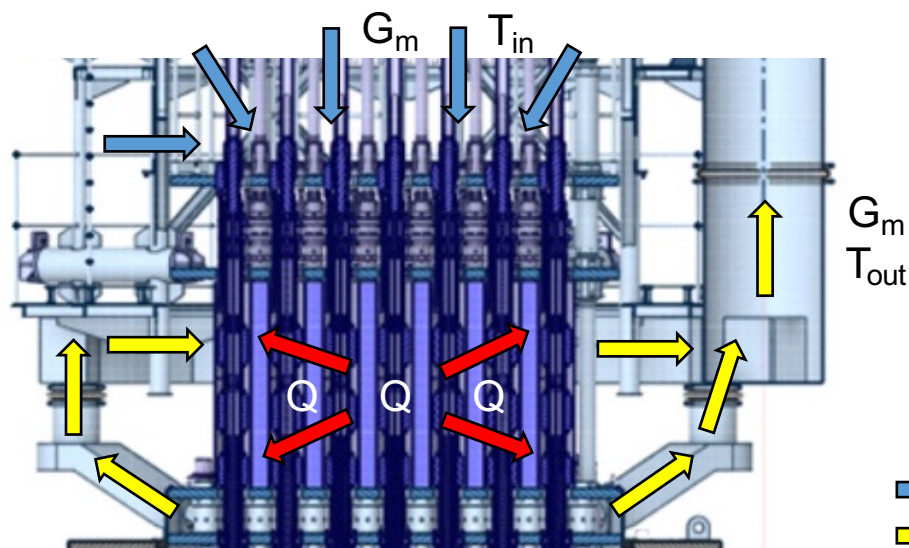


Блок верхний

# Постановка задачи

## Допущения

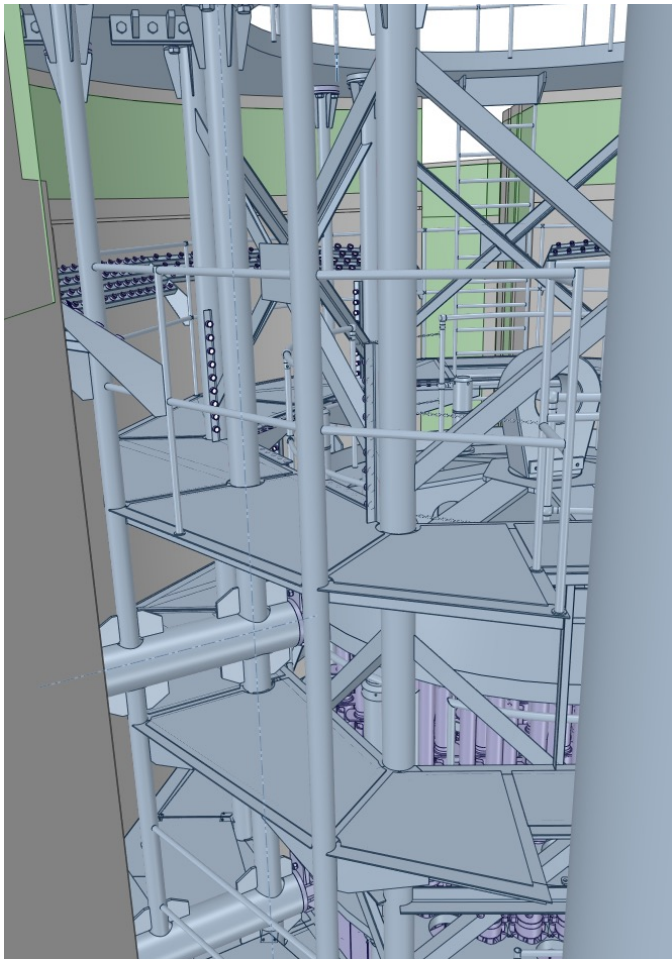
- перетечки тепла по металлу не учитываются;
- малые геометрические элементы, не оказывающие значительного влияния на процессы теплообмена (крепежные элементы, пружины и т.д.), не учитываются;
- загромождающие проходное сечение провода (например, блока электроразводок) не учитываются;
- в воздушный коллектор воздушная среда попадает только через патрубки СУЗ и СВРК, протечки через щели в конструкции и другие патрубки не учитываются;
- объект считается неподвижным: механическое (вибрационное) влияние на него потока воздушной среды не учитывается.



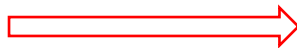
- охлаждающий воздух на входе в патрубок СУЗ
- охлаждающий воздух на выходе из патрубка СУЗ
- тепловой поток от теплоносителя 1-го контура

# Геометрическая модель блока верхнего

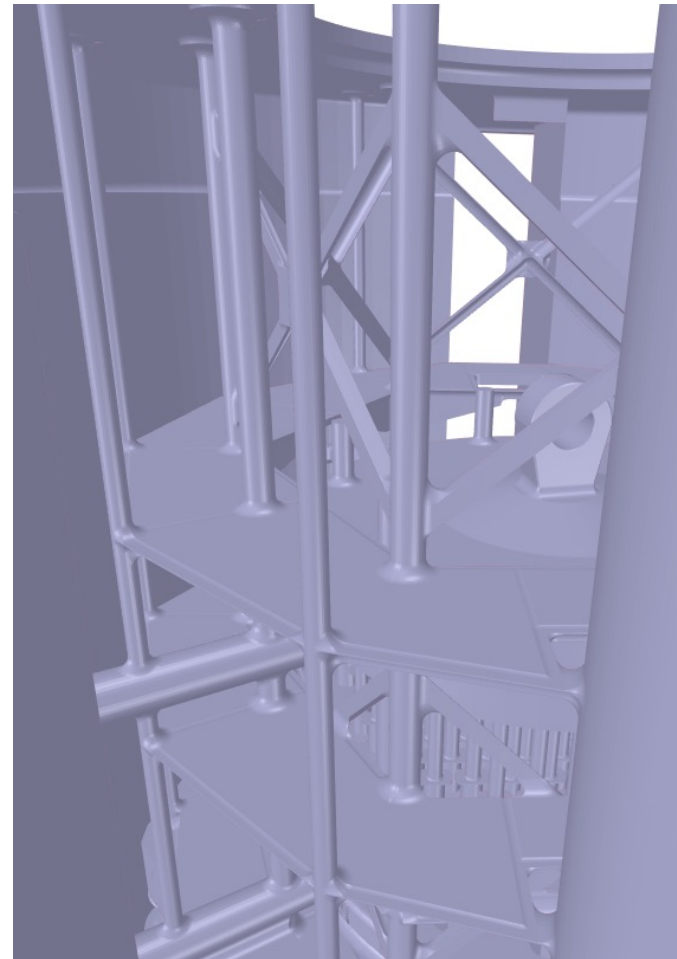
Исходная твердотельная  
модель (конструкторская)



Редактирование  
геометрии в  
фасеточном  
представлении с  
использованием  
операций  
морфологической  
фильтрации в  
программном  
комплексе  
ANSYS  
SpaceClaim

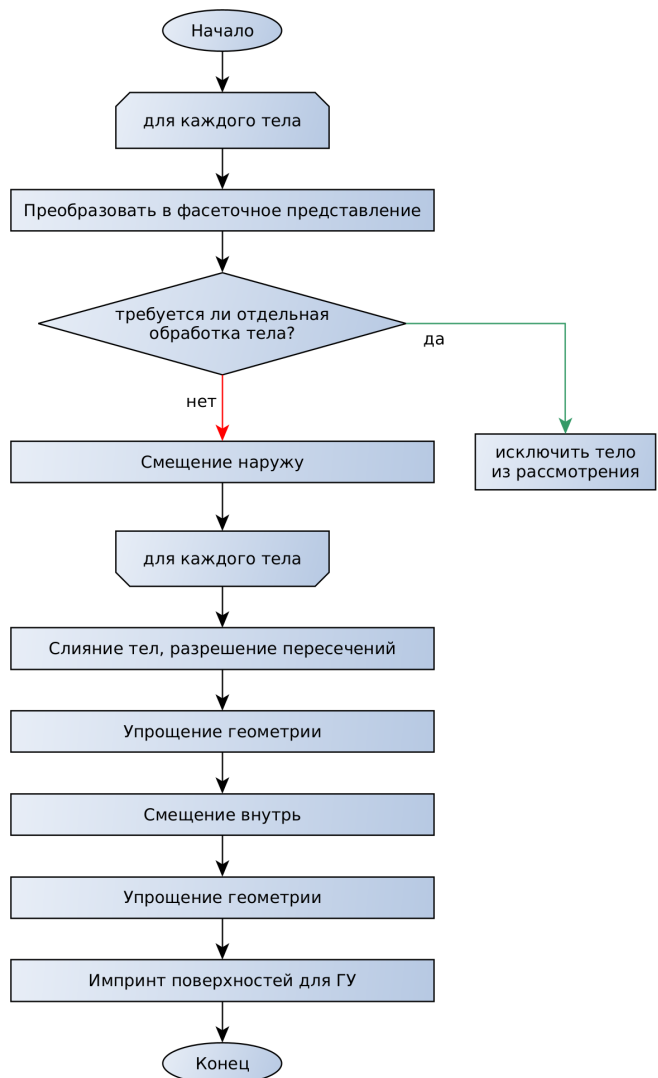


Отредактированная фасеточная  
модель (расчетная)

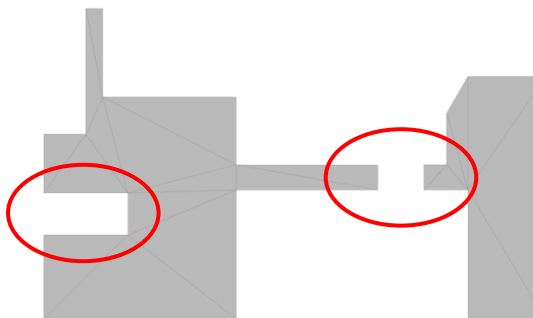


# Упрощение фасеточной геометрии

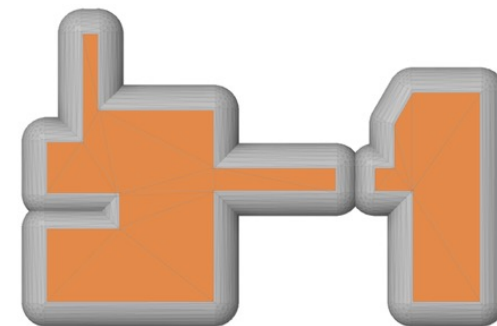
## Алгоритм работы с геометрией



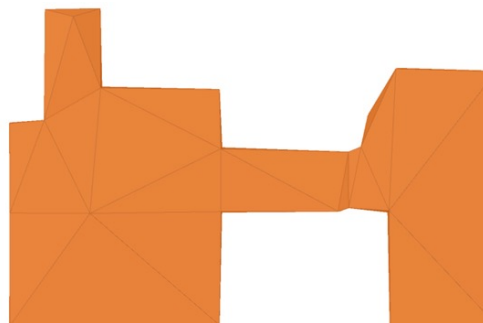
1. Исходная геометрия



2. Смещение наружу



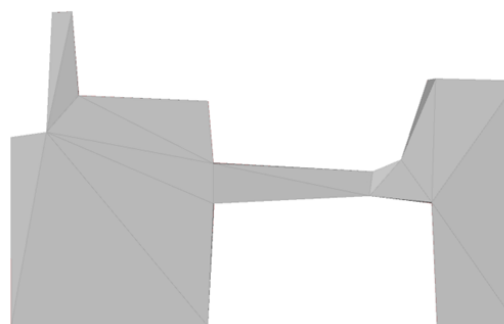
3. Первое упрощение



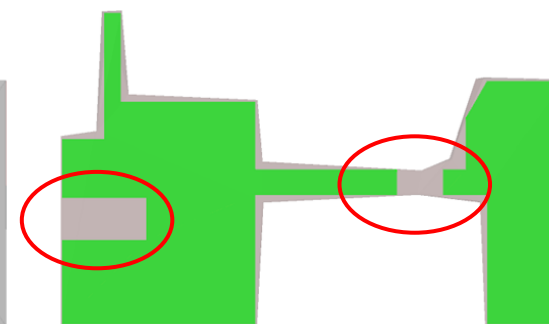
4. Смещение внутрь



5. Второе упрощение



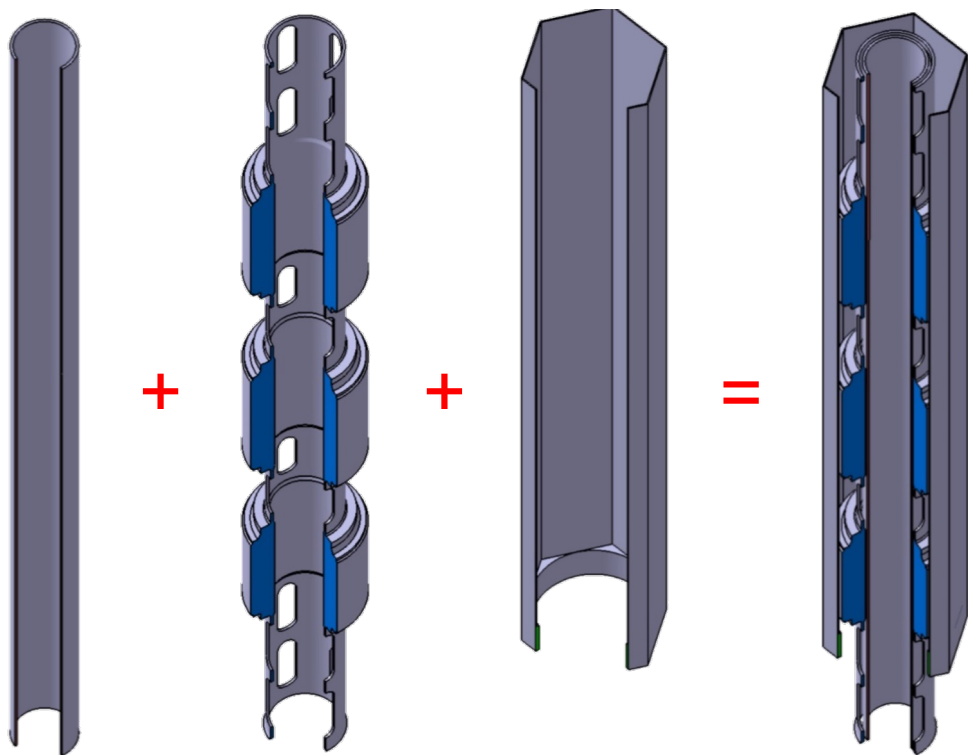
6. Измененная геометрия





# Геометрическая модель блока верхнего

Модель привода СУЗ



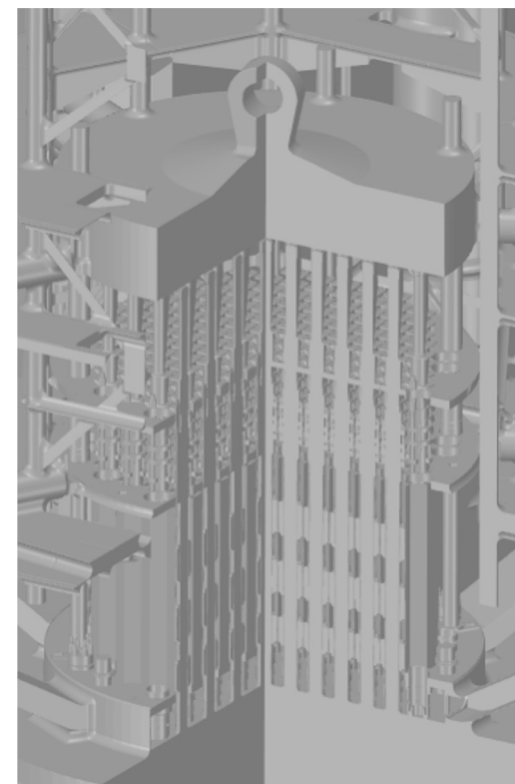
чехол  
привода  
СУЗ

блок  
электромагнитов

патрубок  
привода  
СУЗ

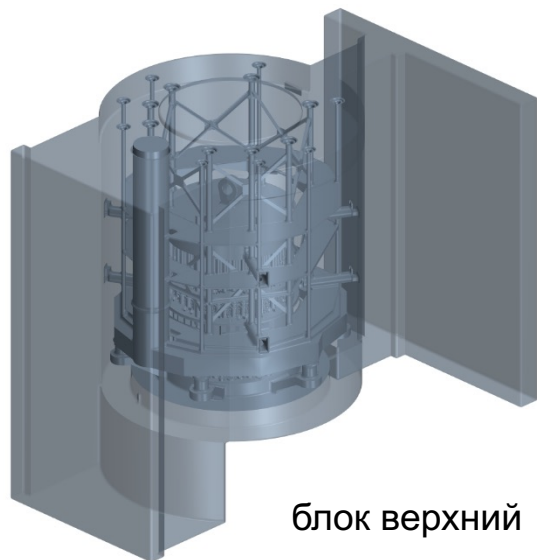
фрагмент  
привода  
СУЗ

Модель блока верхнего

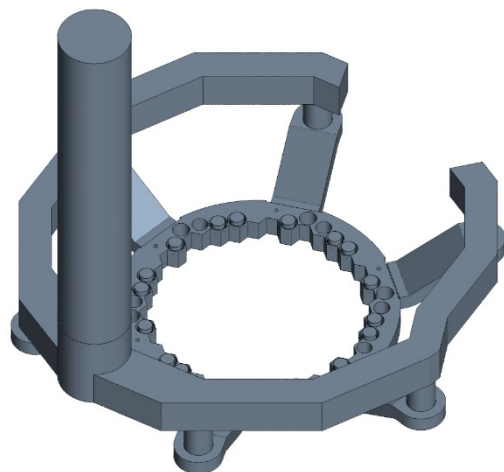


# Геометрическая модель проточного тракта

Модель проточного тракта блока верхнего



блок верхний

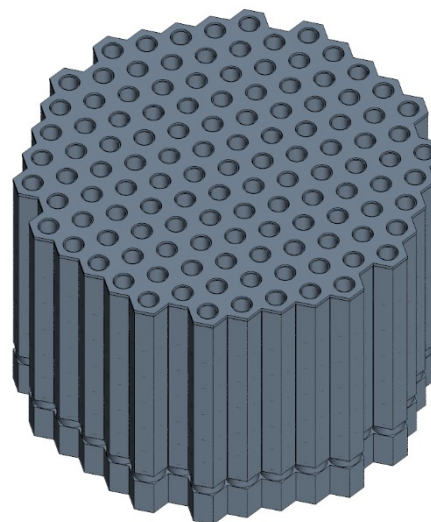


вентиляционный коллектор

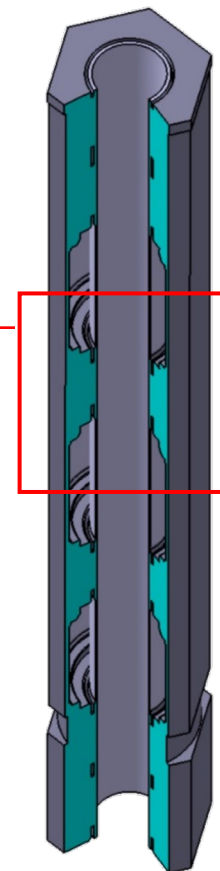
Модель проточного тракта приводов СУЗ



фрагмент привода СУЗ  
в области электромагнитов



121 привод СУЗ



фрагмент  
привода  
СУЗ

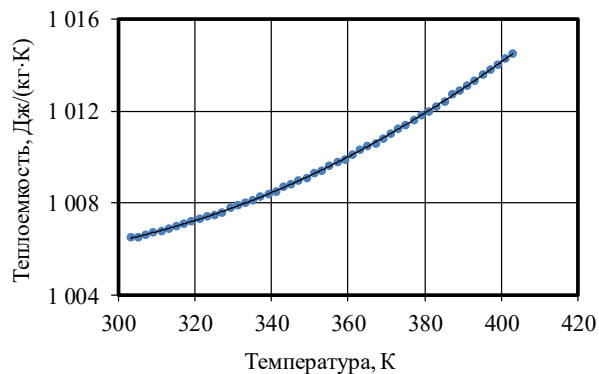
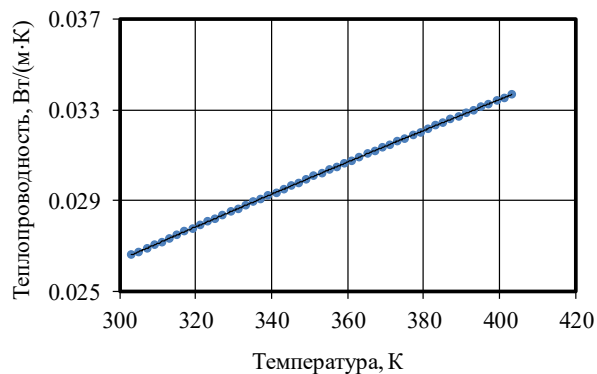
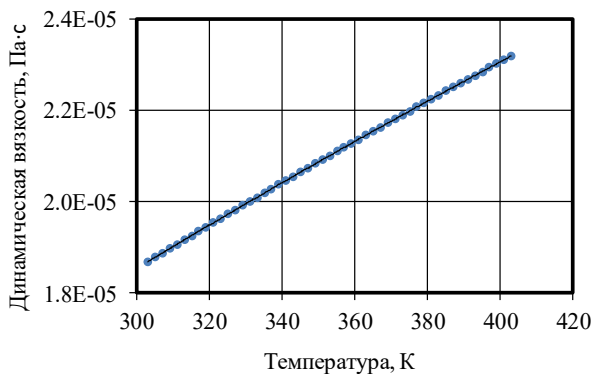
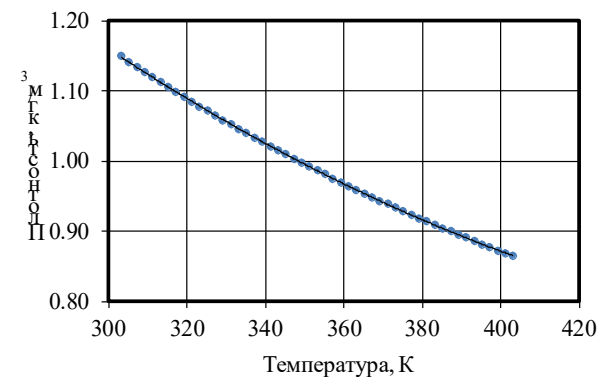
# Математическая модель

## Допущения

- процесс стационарный;
- режим течения – турбулентный;
- теплофизические свойства воздушной среды являются функцией температуры\*;
- течение описывается неизотермическими уравнениями Рейнольдса, замыкание осуществляется с использованием двухпараметрических моделей турбулентности;
- нагрев воздушной среды осуществляется только в патрубках СУЗ;
- стенки проточного тракта адиабатические (за исключением стенок чехлов СУЗ и электромагнитов) и гидравлически гладкие.

## Основные уравнения

Неразрывности	$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0$
Движения	$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_j}$
Энергии	$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j h - \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = -u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$



\*Lemmon, E.W., Jacobsen, R.T, Penoncello, S.G., and Friend, D.G., "Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon, and Oxygen from 60 to 2000 K at Pressures to 2000 MPa," J. Phys. Chem. Ref. Data, 29(3):331-385, 2000



# Математическая модель

## Граничные условия 1

$$\Gamma_{12} \quad u = (G_{out}^v / S_{in})(\rho_{out} / \rho_{in}), T = T_{in}$$

$$\Gamma_2 \quad p = p_{out}, \partial T / \partial \vec{n} = 0$$

$$\Gamma_3 \quad u = 0, q = 0$$

$$\Gamma_4 \text{ и } \Gamma_5 \quad u_j(\vec{r}) = 0, q(\vec{r}) = Q / (S_{\Gamma_4} + S_{\Gamma_5})$$

## Граничные условия 2

$$\Gamma_{1i} \quad u_i = (k_i G_{out}^v / S_{in})(\rho_{out} / \rho_{in}), T = T_{in}$$

$$\Gamma_2 \quad p = p_{out}, \partial T / \partial \vec{n} = 0$$

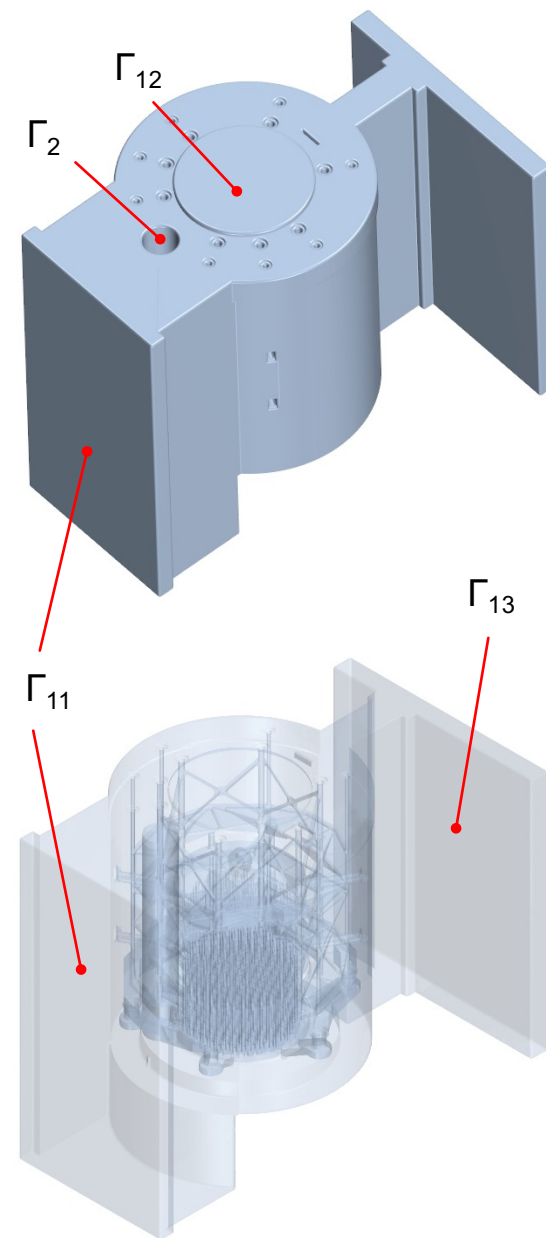
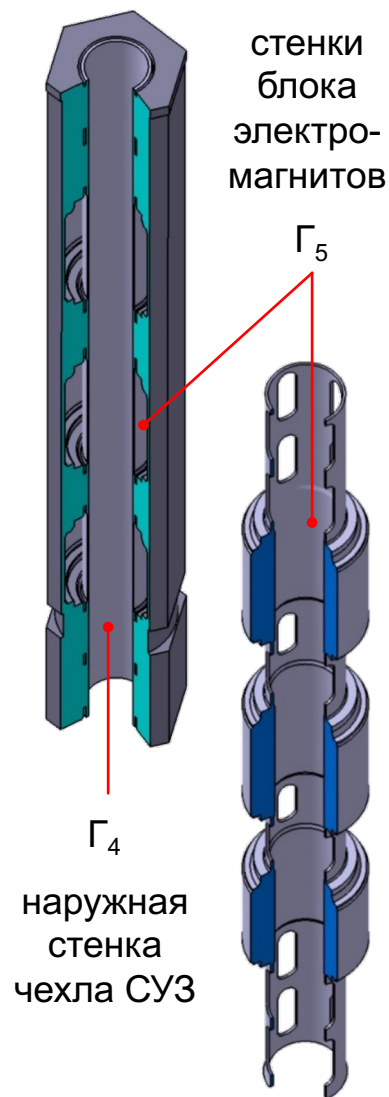
$$\Gamma_3 \quad u = 0, q = 0$$

$$\Gamma_4 \quad u = 0, T = T_w$$

$$\Gamma_5 \quad u = 0, q = (Q - Q_{\Gamma_4}) / S_{\Gamma_5}$$

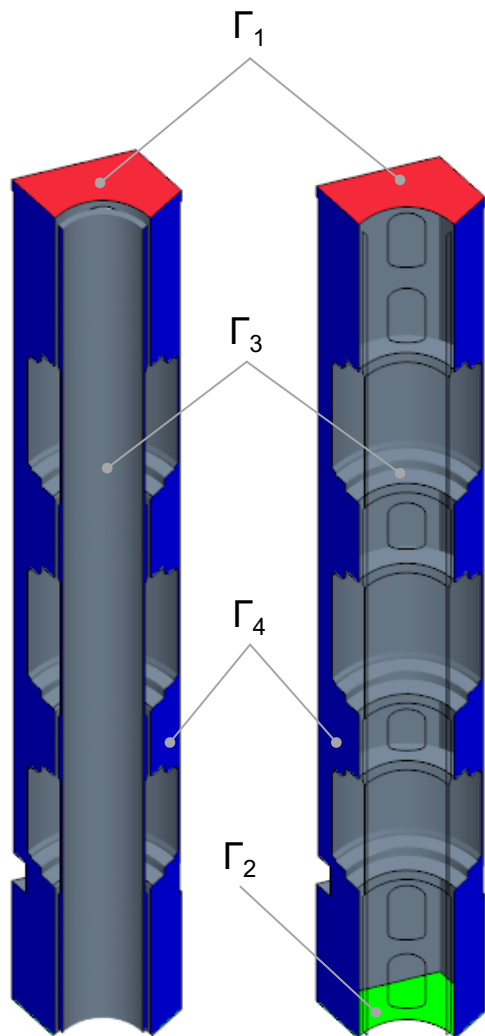
## Исходные данные

Температура	$T_{in} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
Давление	$p_{out} = 1 \text{ атм}$
Расход	$G_{out}^v \approx G_{nom} \pm 10 \%$
Деление $G^v$	$k_1 = 50\%, k_2 = k_3 = 25\%$
Температура	$T_w \approx 290 \text{ }^\circ\text{C}$
Тепловой поток	$Q \approx 0,5 \text{ МВт}$

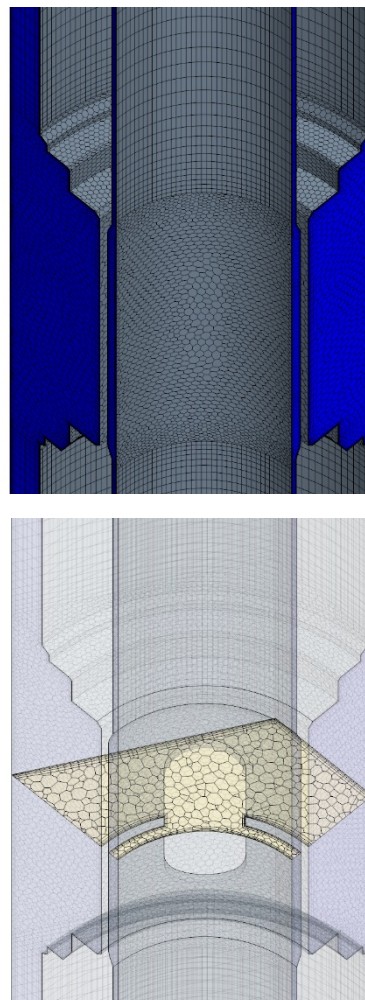


# Верификация и валидация

Границы



Сетка



## Основные уравнения

Неразрывности	$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0$
Движения	$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_j}$

## Модель турбулентности

Модель	$k\omega - SST$ , $k\varepsilon - Realizable$ $k\varepsilon - Standard$
Функция стенки	$All Y +$ и $Low Y +$

## Граничные условия

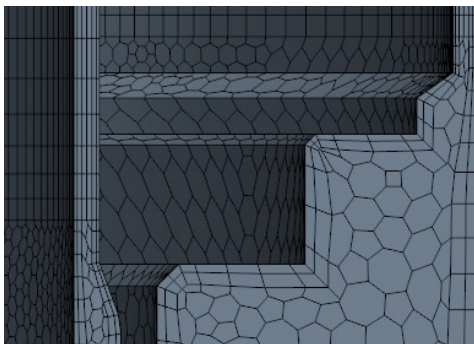
$\Gamma_1$ вход	$u = G_v/S$
$\Gamma_2$ выход	$p = p_{out}$
$\Gamma_3$ стенки	$u = 0$
$\Gamma_4$ симметрия	$\tau = 0$

## Исходные данные

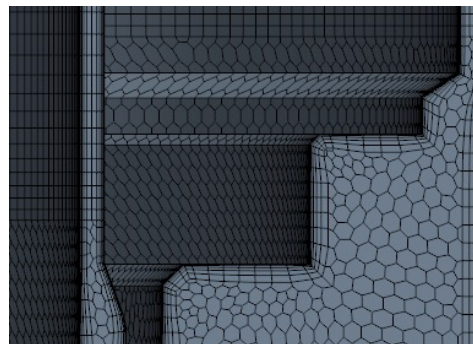
Температура	$T_{in} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
Давление	$p_{out} = 1 \text{ атм}$
Расход	$G_v = (G_{nom}/121/4) \text{ м}^3/\text{ч} \pm 50\%$

# Верификация и валидация

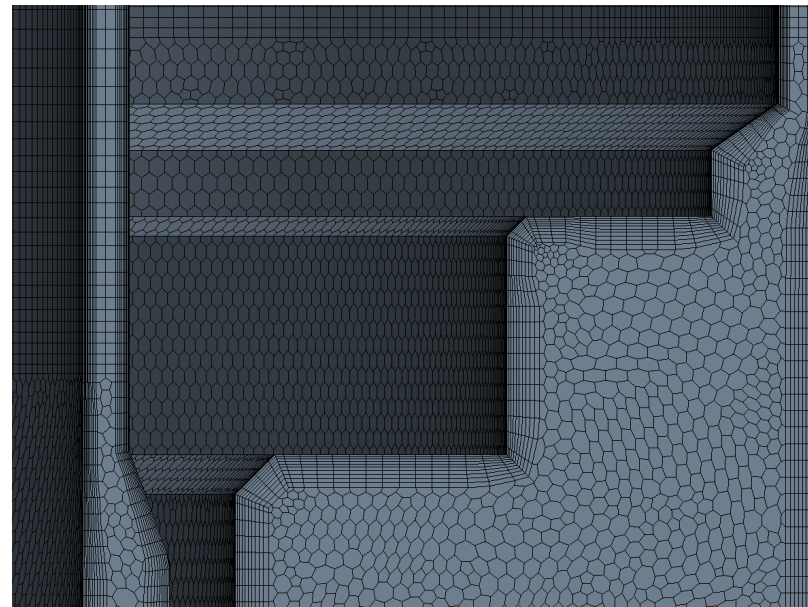
сетка №1



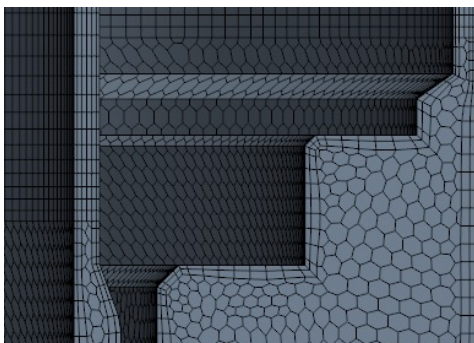
сетка №3



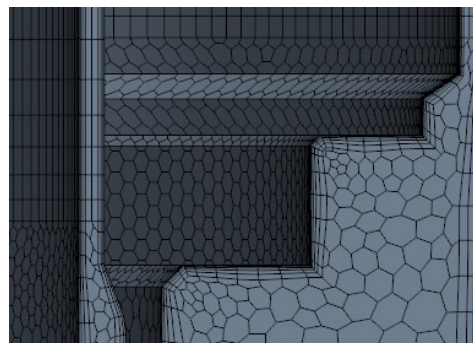
сетка №4



сетка №2



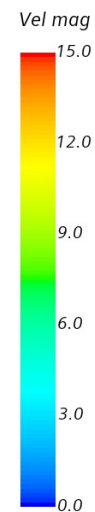
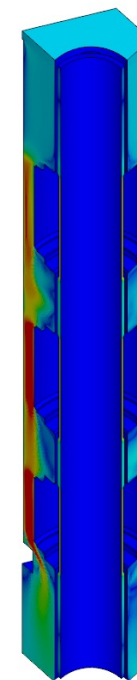
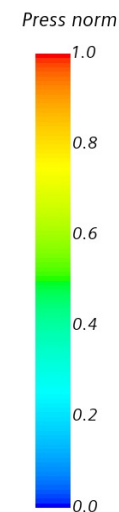
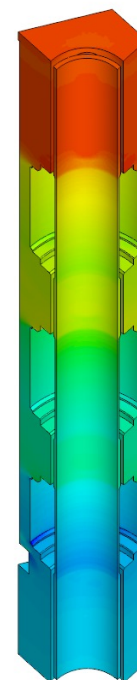
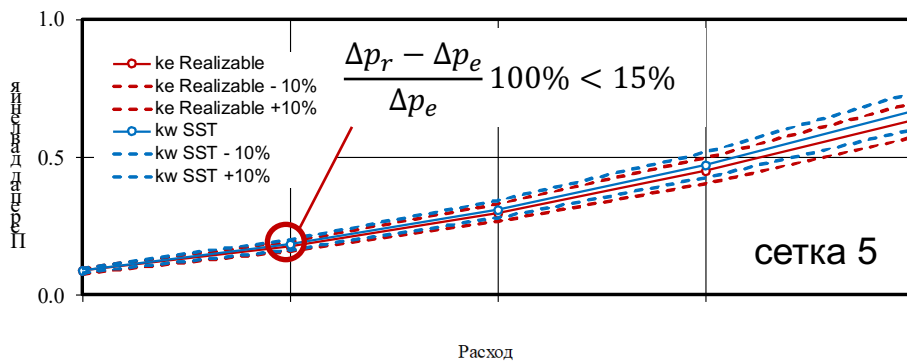
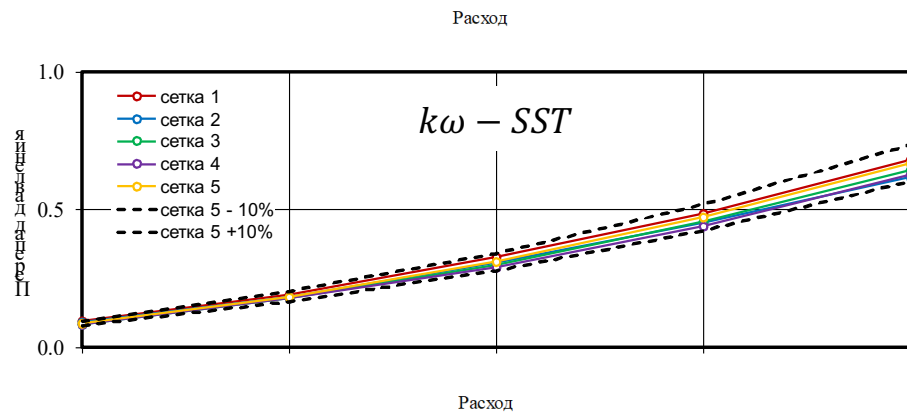
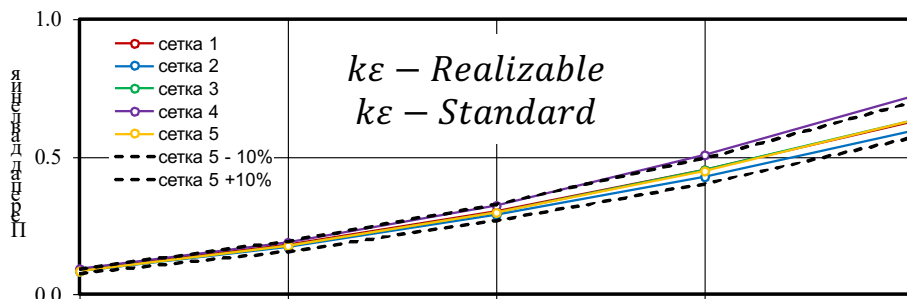
сетка №5



Общее количество расчетов – 50  
(2 модели x 5 сеток x 5 расходов)

Параметр	Сетка №1	Сетка №2	Сетка №3	Сетка №4	Сетка №5
Минимальный размер ячейки, мм	2,5	1,25	1,25	0,625	2,5
Базовый размер ячейки, мм	5	2,5	2,5	0,125	5
Количество призм в пограничном слое, шт.	2	2	5	10	3-5
Количество ячеек, млн. ячеек	0,25	0,97	1,47	10,46	0,41
Пристеночные функции	All Y+	All Y+	All Y+	Low Y+	All Y+

# Верификация и валидация

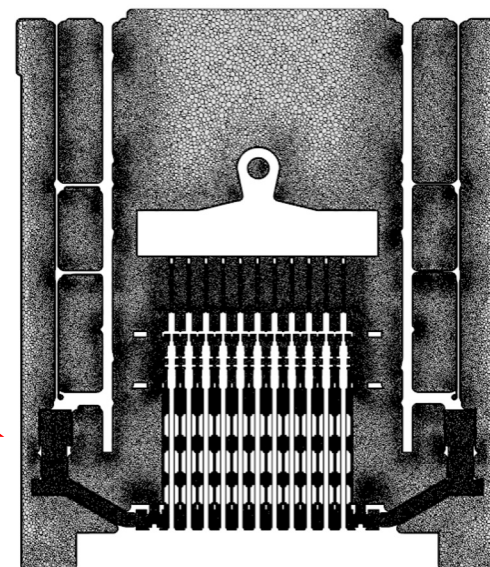
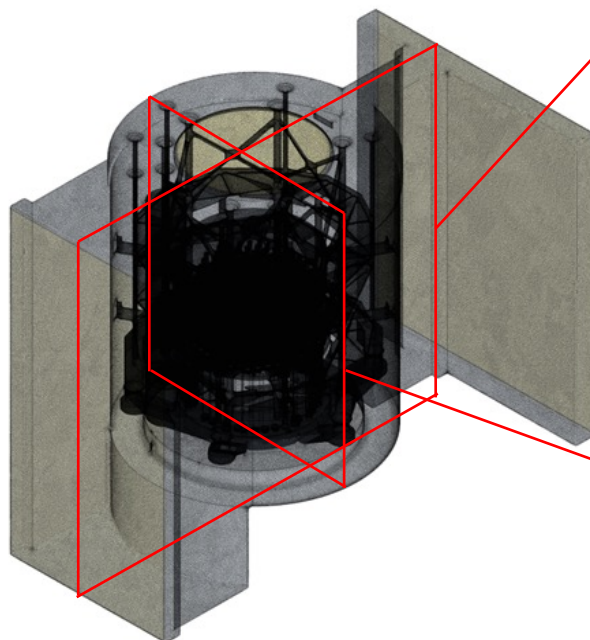
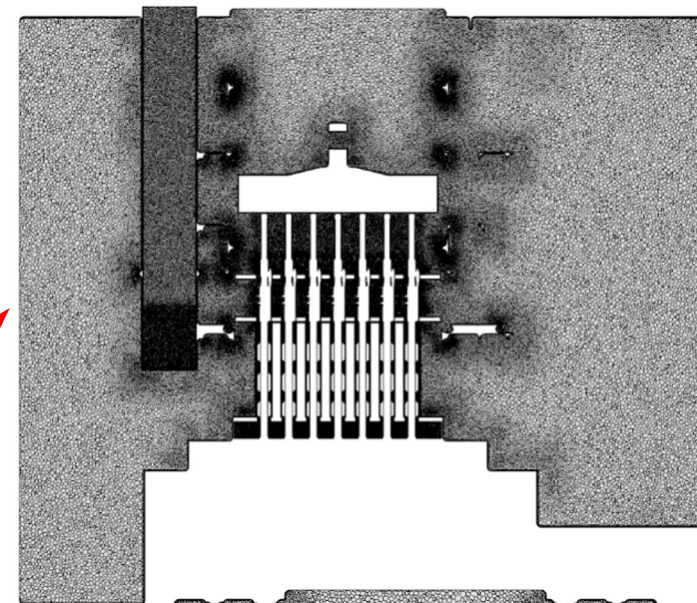


Результаты	
Модель турбулентности	$k\omega$ – SST
Функции стенки	All Y +
Сетка	№5
Количество ячеек	0,41 млн.
Общее количество ячеек	$0,41 \cdot 4 \cdot 121 = 198$ млн.



# Сеточная модель расчетной области

Размерность сеточной  
модели составляет - 300  
млн. ячеек

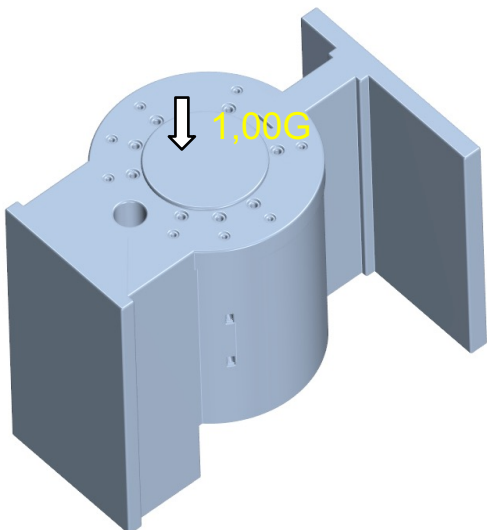




# Анализ чувствительности к ГУ

Распределение параметров воздуха ( $G_{out}^v = G_{nom}$ )

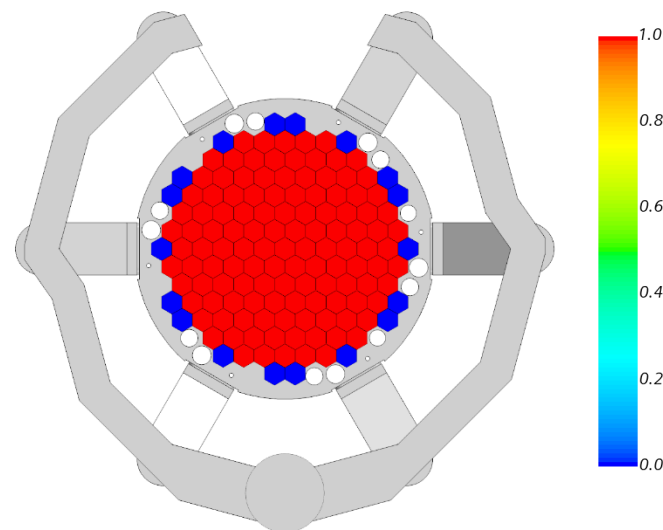
Расход воздуха поступающего в БВ



ГУ1

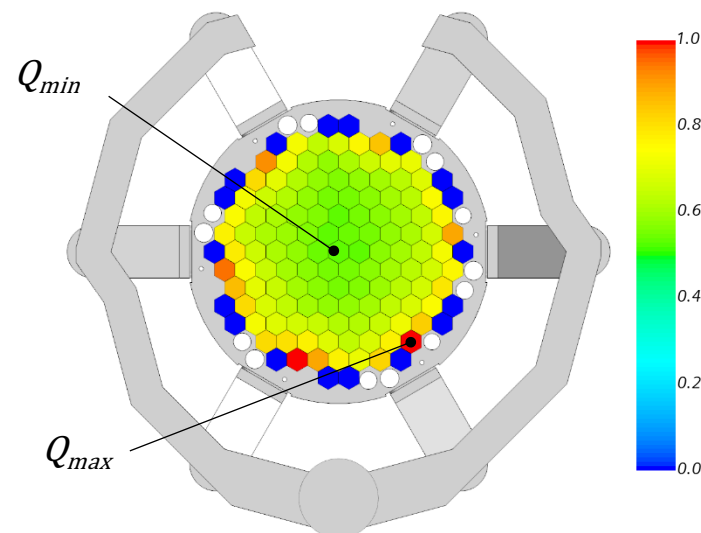
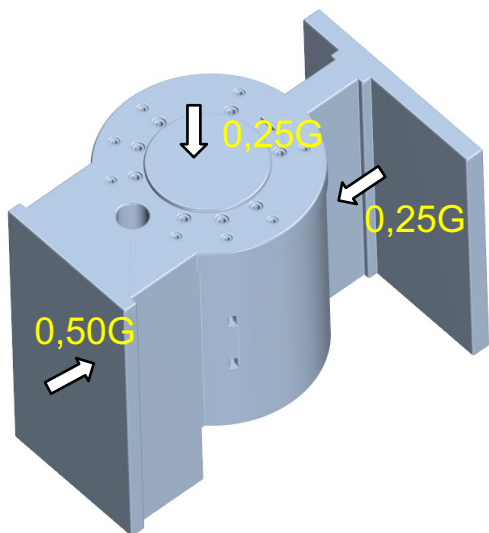
$$Q_{min} = Q_{max} = \frac{Q}{121} = const$$
$$\frac{Q_{max}}{Q_{min}} = 1$$

Тепловые потери в чехлах СУЗ и СВРК



ГУ2

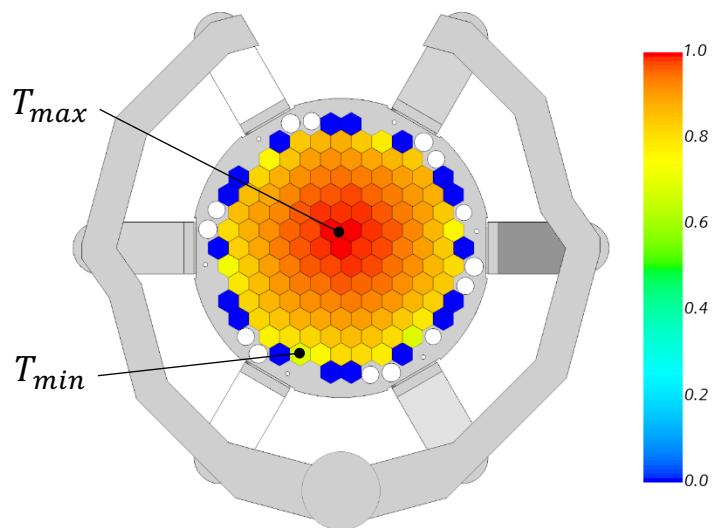
$$\sum_{i=1}^{121} Q_i = Q$$
$$\frac{Q_{max}}{Q_{min}} = 1,8$$



# Анализ чувствительности к ГУ

Распределение параметров воздуха на выходе из патрубков СУЗ и СВРК ( $G_{out}^v = G_{nom}$ )

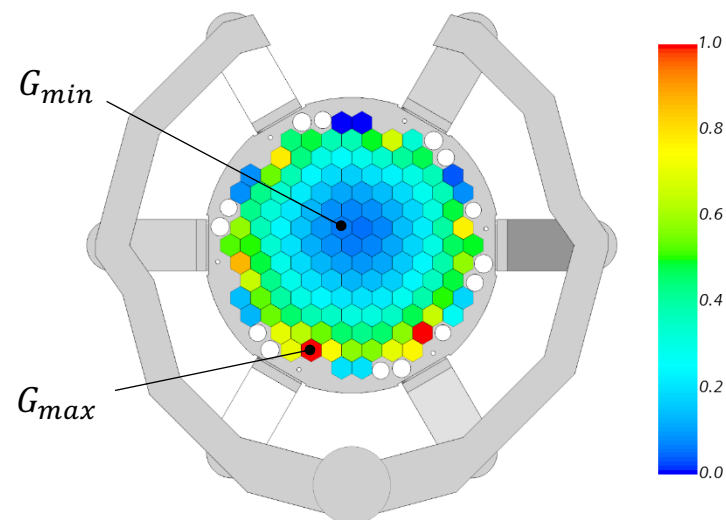
Температура



ГУ1

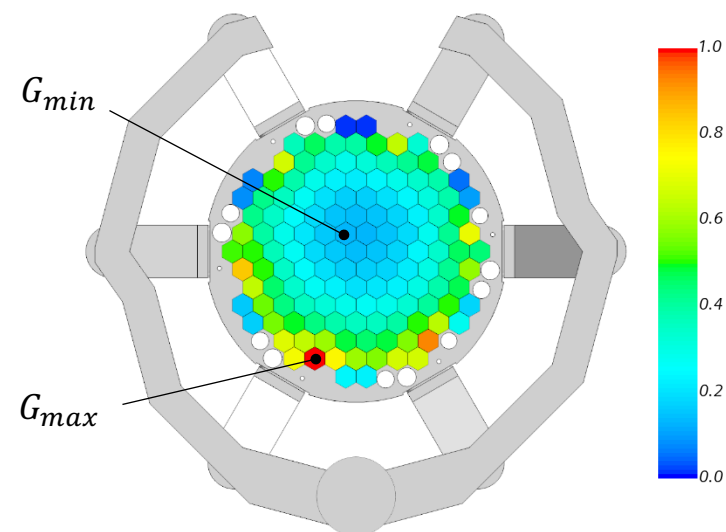
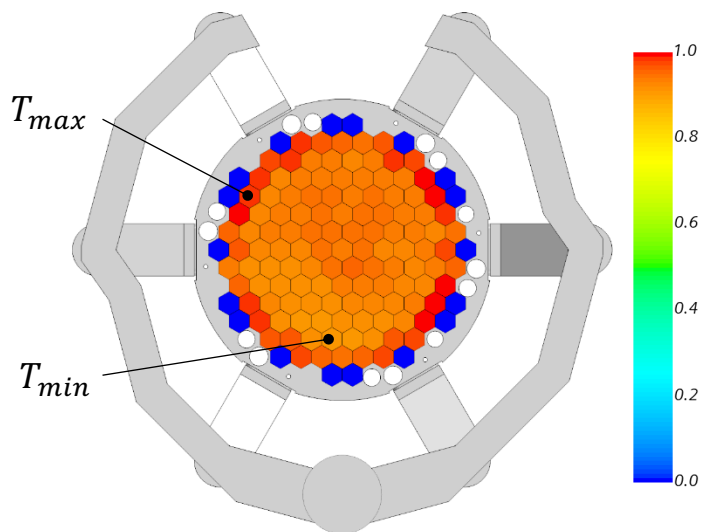
$$G_{min} > 250 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Объемный расход, приведенный к  $T_{in}$

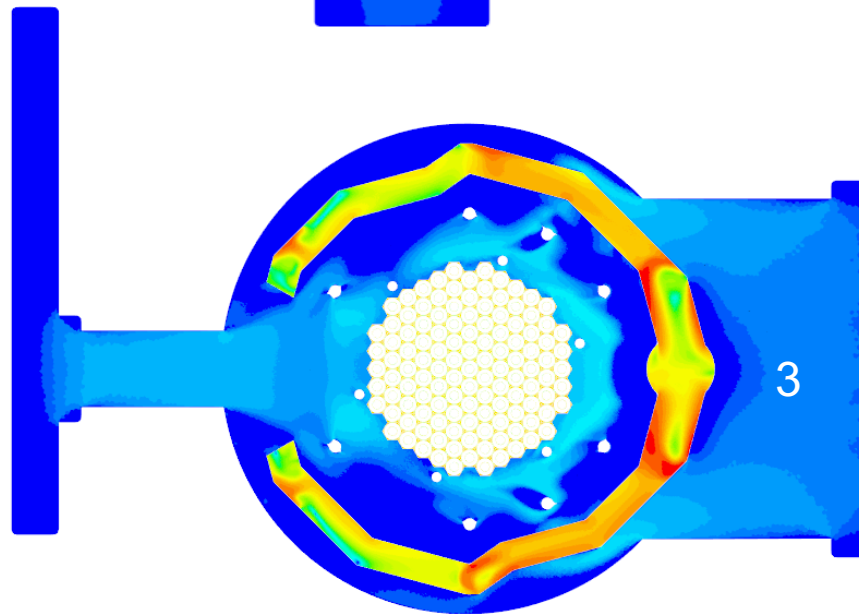
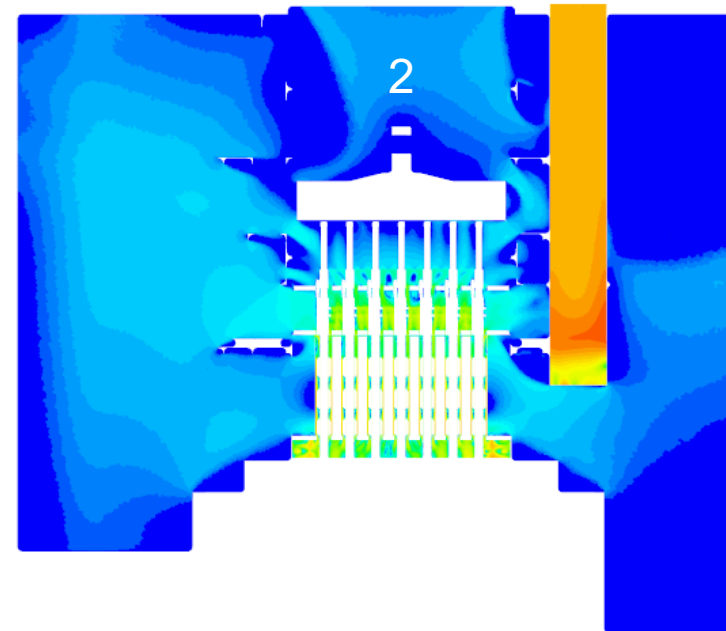
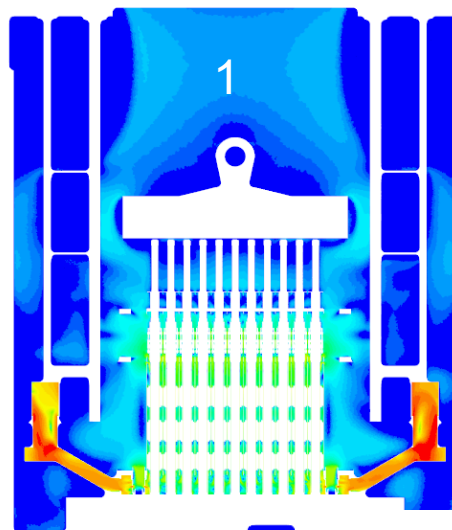
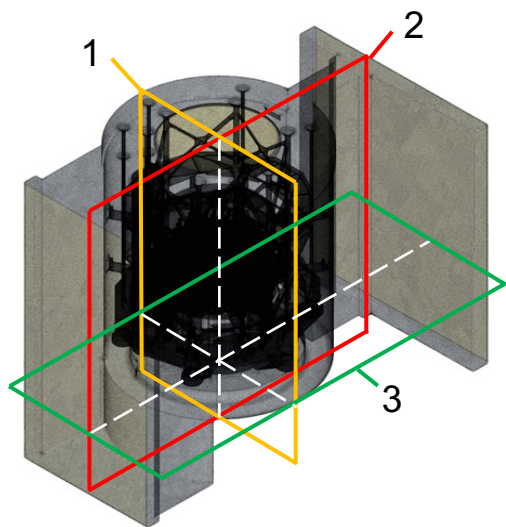


ГУ2

$$G_{min} > 250 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$



# Результаты расчета. Скорость воздуха.



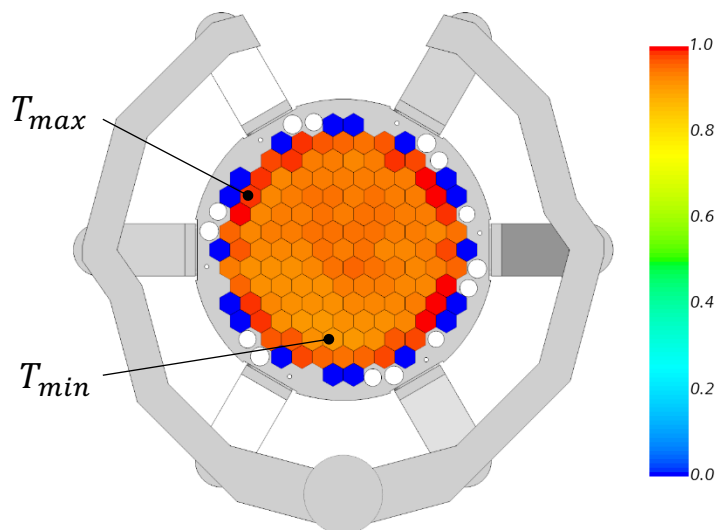
ГУ2

Расход воздуха в вентиляционном канале  
составляет  $G_{out}^v = G_{nom}$

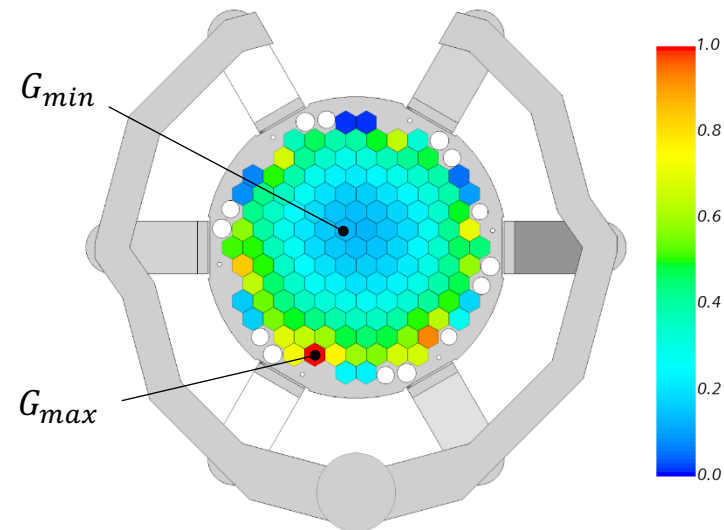
# Результаты расчета

Распределение параметров воздуха на выходе из патрубков СУЗ и СВРК ( $G_{out}^v = G_{nom}$ )

Температура



Объемный расход, приведенный к  $T_{in}$



Обобщение численных исследований для диапазона расходов

$$G_{out}^v = G_{nom} \pm 10\%$$

$$\bar{G} = G_{out}^v (\rho_{out} / \rho_{in}) / (121 + 18)$$

$$G_{min} \approx 0,8 \bar{G}$$

$$G_{max} \approx 1,15 \bar{G}$$

$$G_{min} > 250 \frac{\text{M}^3}{\text{ч}}$$

# Выводы

- разработана CFD модель проточной части блока верхнего в ПК StarCCM+;
- упрощение фасеточной геометрии блока верхнего осуществлялось с использованием операций морфологической фильтрации в ПК ANSYS SpaceClaim;
- выполнено решение тестовой задачи, по результатам которой выбрана подробность дискретизации расчетной области и применяемая модель турбулентности;
- сопоставление результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными подтвердило адекватность моделирования гидравлических потерь в патрубках СУЗ;
- анализ влияния способа снятия тепла с чехлов СУЗ и способа подвода воздуха к верхнему блоку показал слабое влияние на распределение расходов воздуха по чехлам СУЗ;
- минимальный объемный расход через патрубок СУЗ превышает 250 м<sup>3</sup>/ч для всех рассмотренных режимов;
- результаты CFD расчетов могут использоваться при проведении конструкторских теплогидравлических расчетов верхнего блока ВВЭР, оптимизации конструкции воздушного тракта верхнего блока, при анализе эксплуатационных данных и могут служить исходными данными для дальнейших расчетных исследований температурного состояния приводов СУЗ.



# Спасибо за внимание

**Крутиков Алексей Александрович**  
Ведущий инженер-конструктор

E-mail: [krutikov\\_aa@grpess.podolsk.ru](mailto:krutikov_aa@grpess.podolsk.ru)  
[www.gidropress.podolsk.ru](http://www.gidropress.podolsk.ru)

26.09.2022