



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

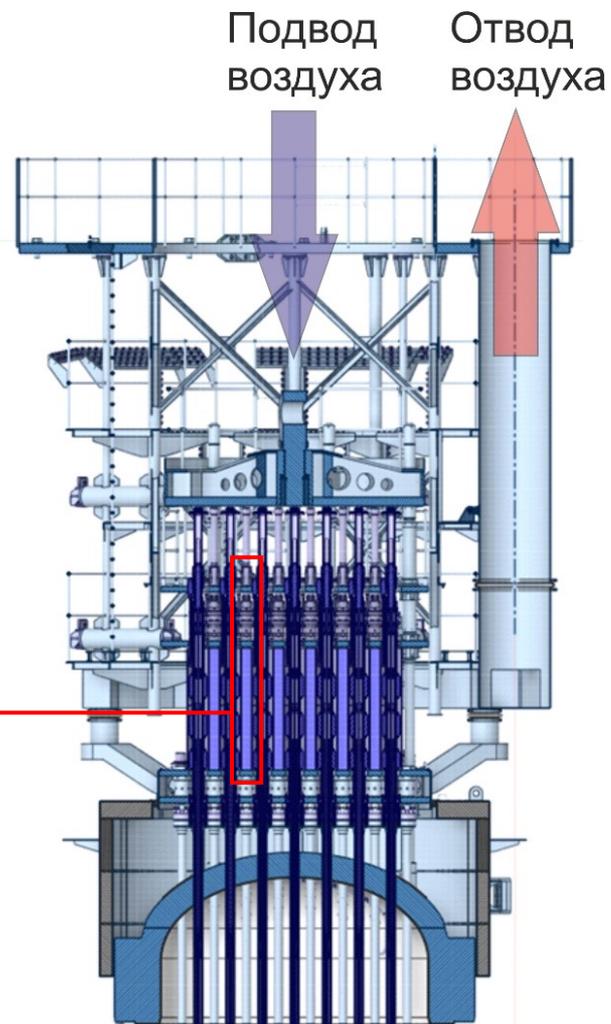
Объект исследования – проточный тракт системы охлаждения верхнего блока реактора ВВЭР.

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

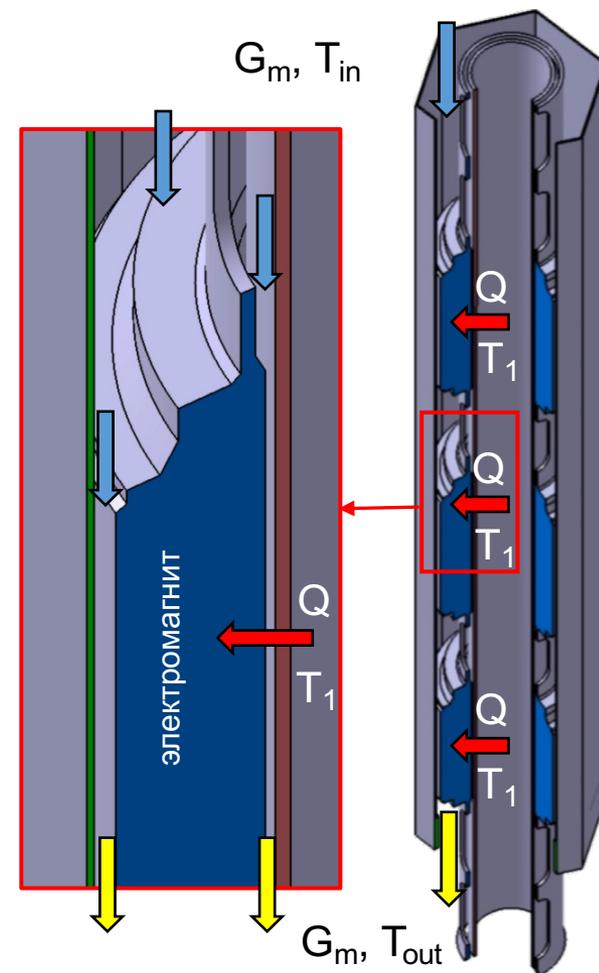
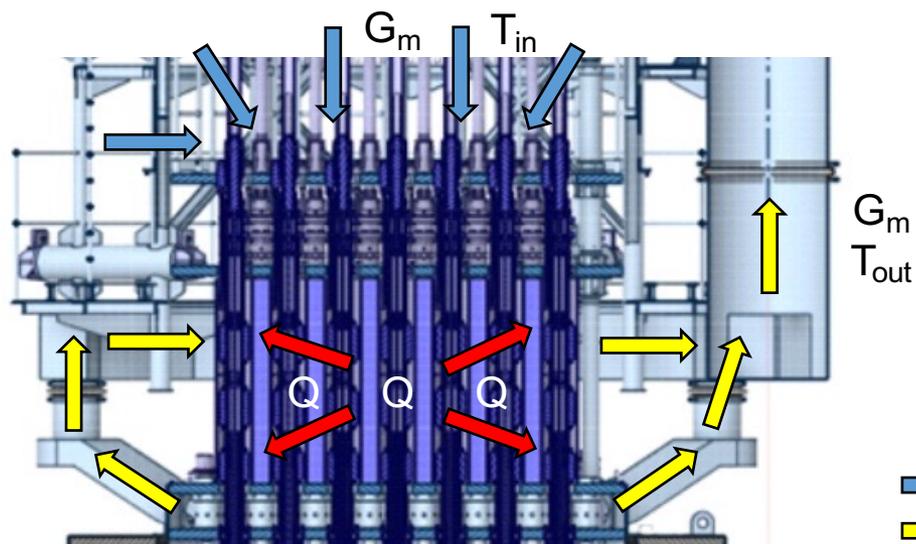


Блок верхний

Постановка задачи

Допущения

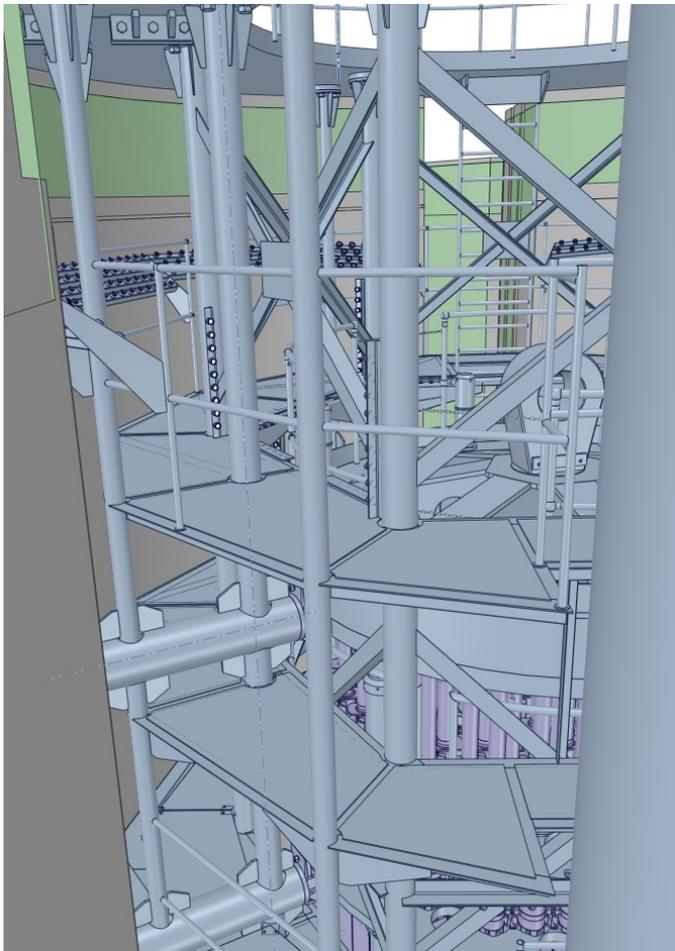
- перетечки тепла по металлу не учитываются;
- малые геометрические элементы, не оказывающие значительного влияния на процессы теплообмена (крепежные элементы, пружины и т.д.), не учитываются;
- загромождающие проходное сечение провода (например, блока электроразводок) не учитываются;
- в воздушный коллектор 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

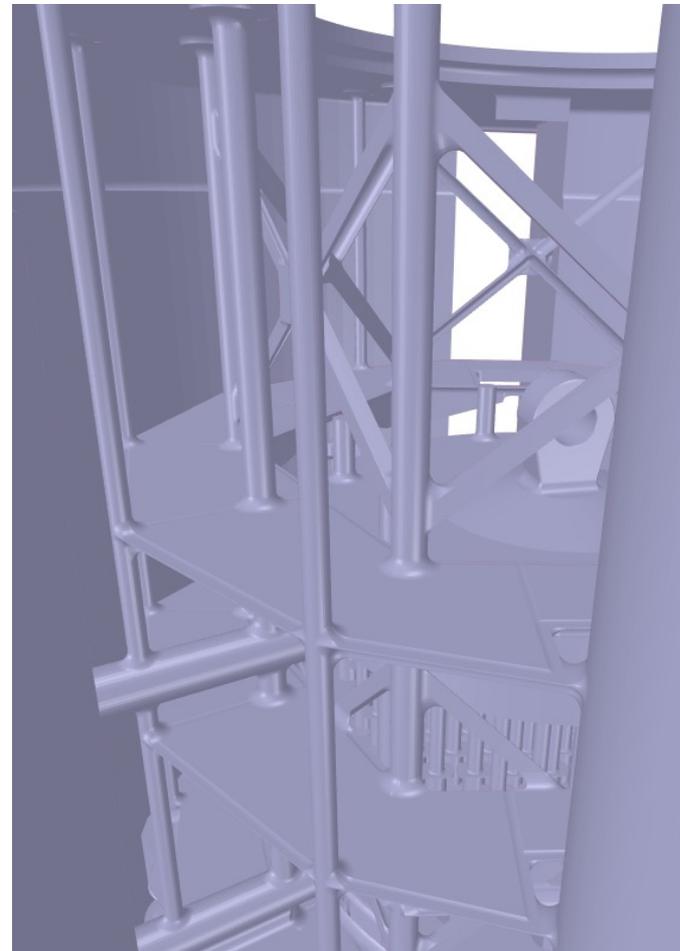
Исходная твердотельная
модель (конструкторская)



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

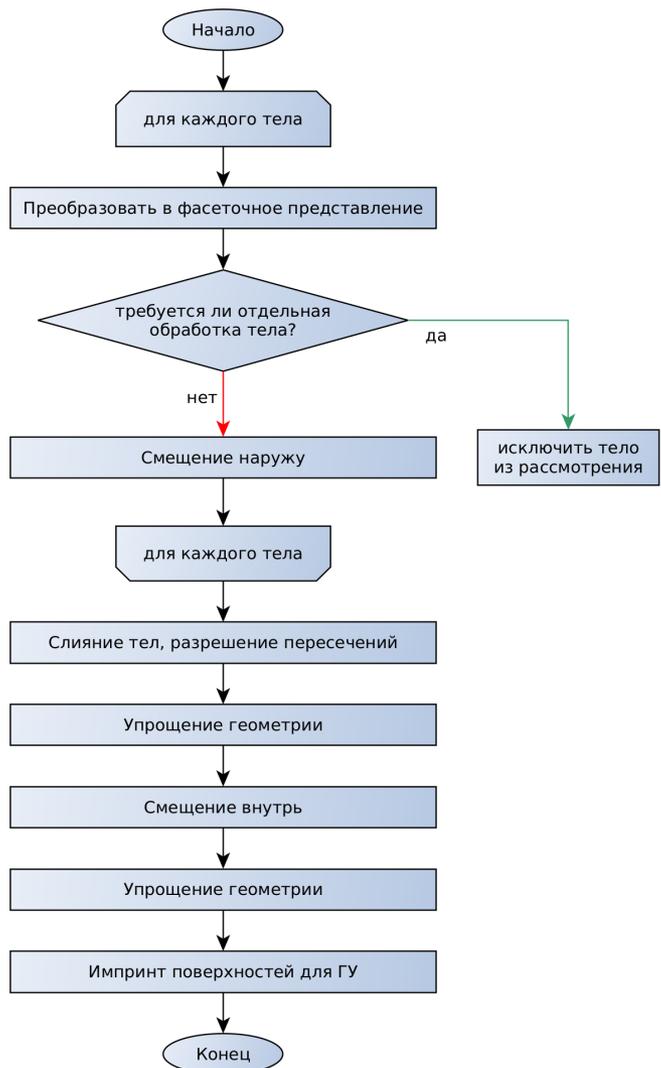


Отредактированная фасеточная
модель (расчетная)

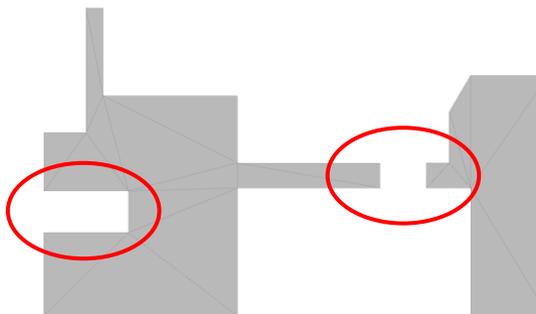


Упрощение фасеточной геометрии

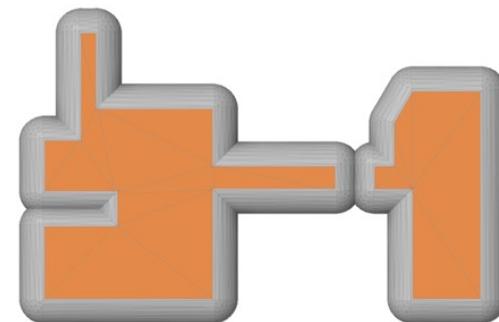
Алгоритм работы с геометрией



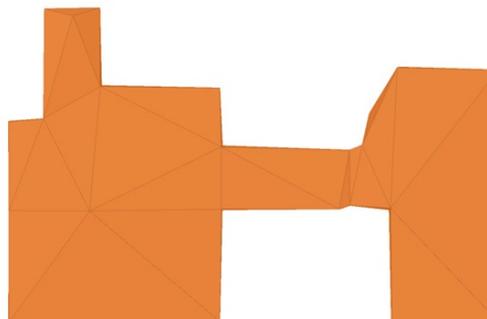
1. Исходная геометрия



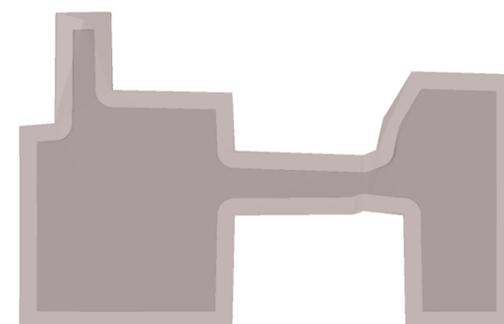
2. Смещение наружу



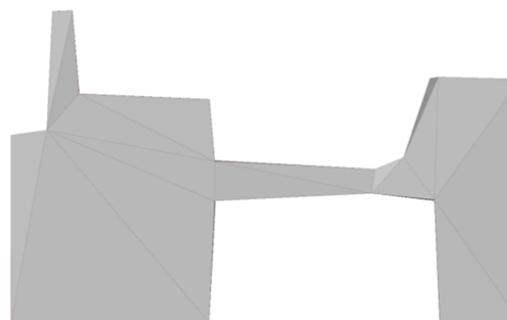
3. Первое упрощение



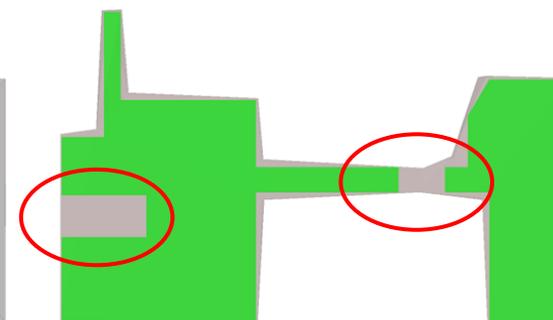
4. Смещение внутрь



5. Второе упрощение

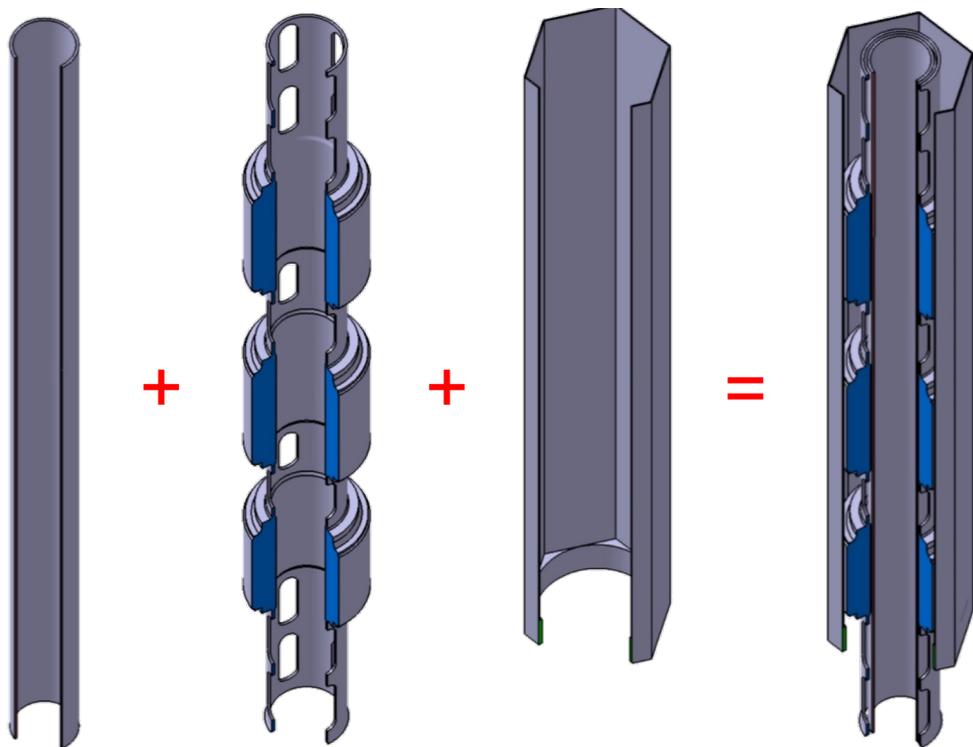


6. Измененная геометрия



Геометрическая модель блока верхнего

Модель привода СУЗ



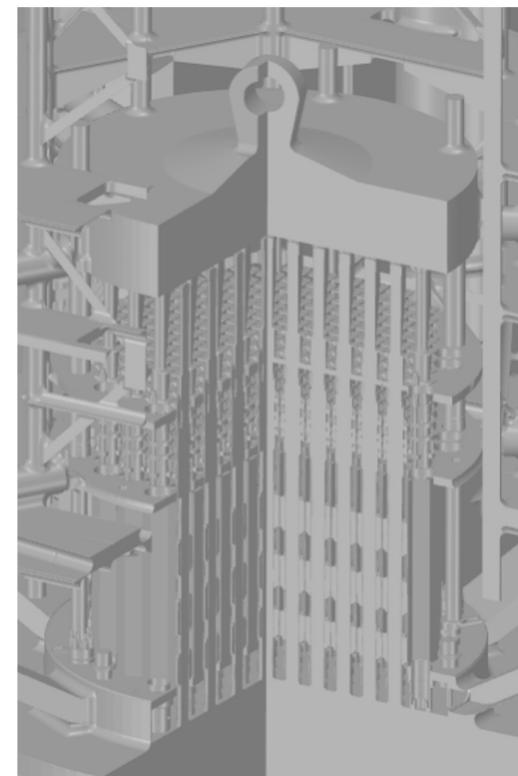
чехол
привода
СУЗ

блок
электромагнитов

патрубок
привода
СУЗ

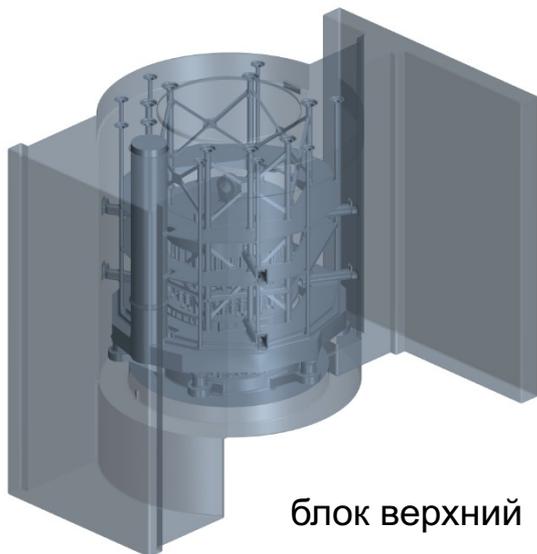
фрагмент
привода
СУЗ

Модель блока верхнего

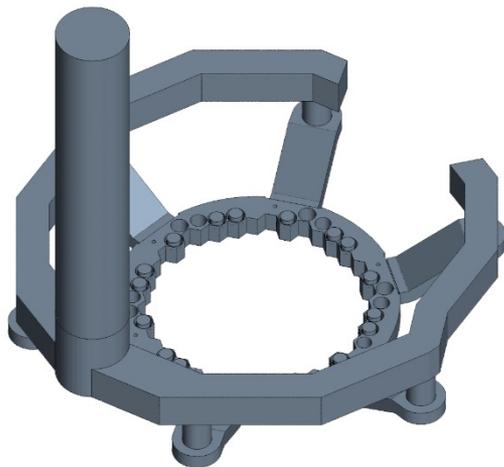


Геометрическая модель проточного тракта

Модель проточного тракта блока верхнего

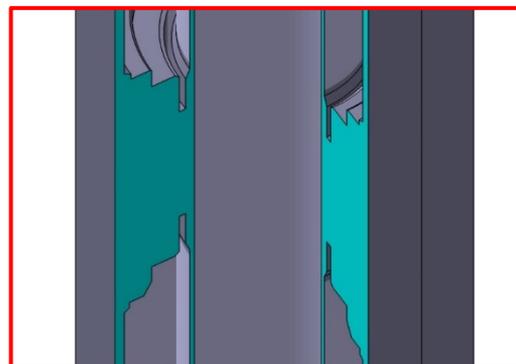


блок верхний

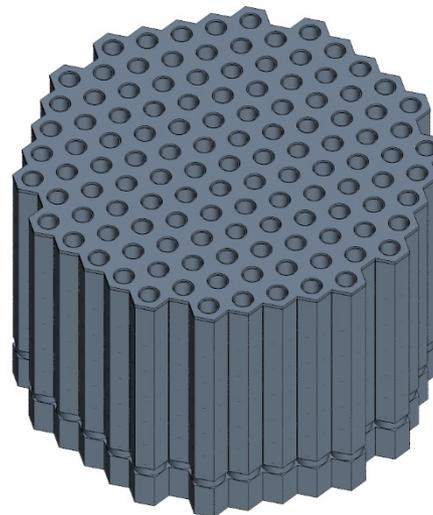


вентиляционный коллектор

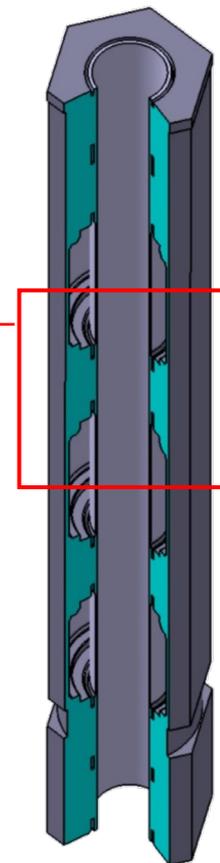
Модель проточного тракта приводов СУЗ



фрагмент привода СУЗ
в области электромагнитов



121 привод СУЗ



фрагмент
привода
СУЗ

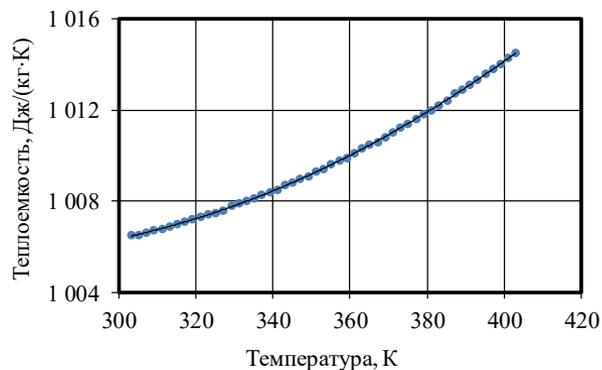
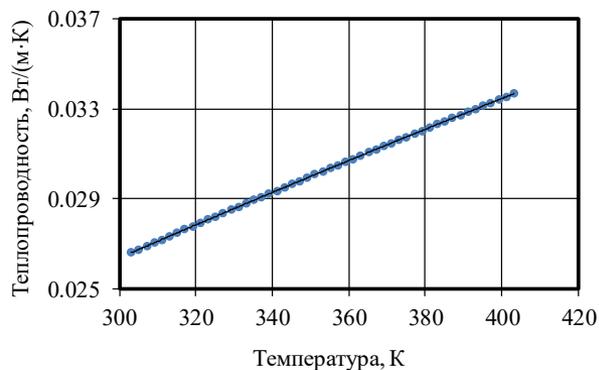
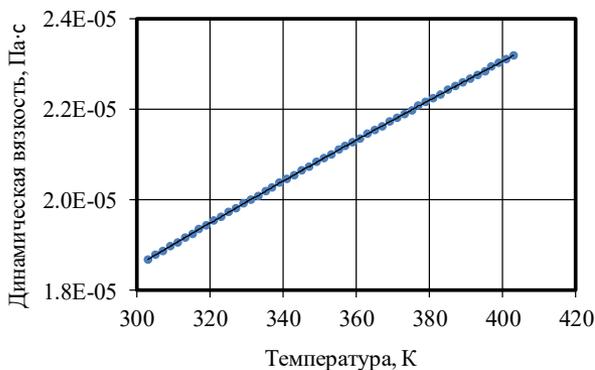
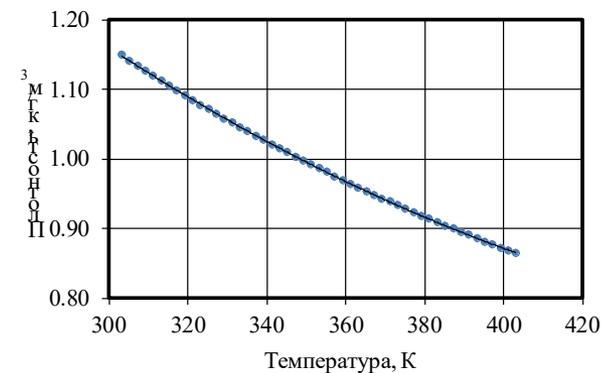
Математическая модель

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

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

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

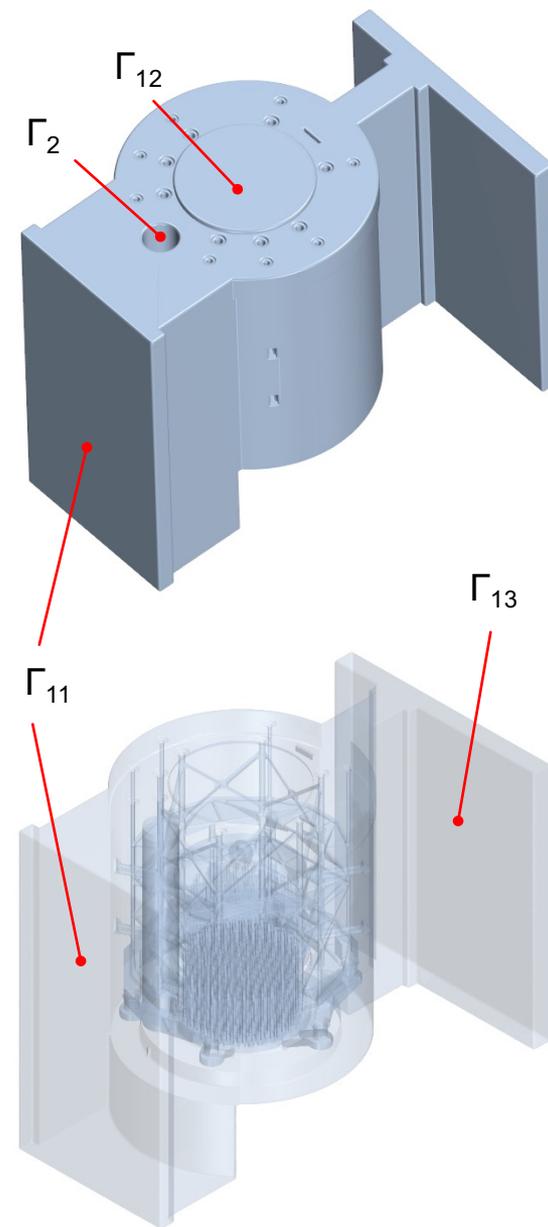
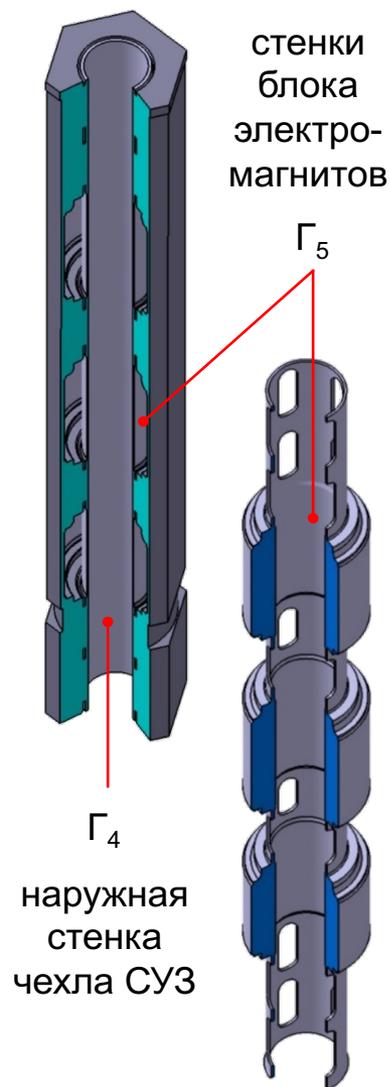
$$\Gamma_3 \quad u = 0, q = 0$$

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

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

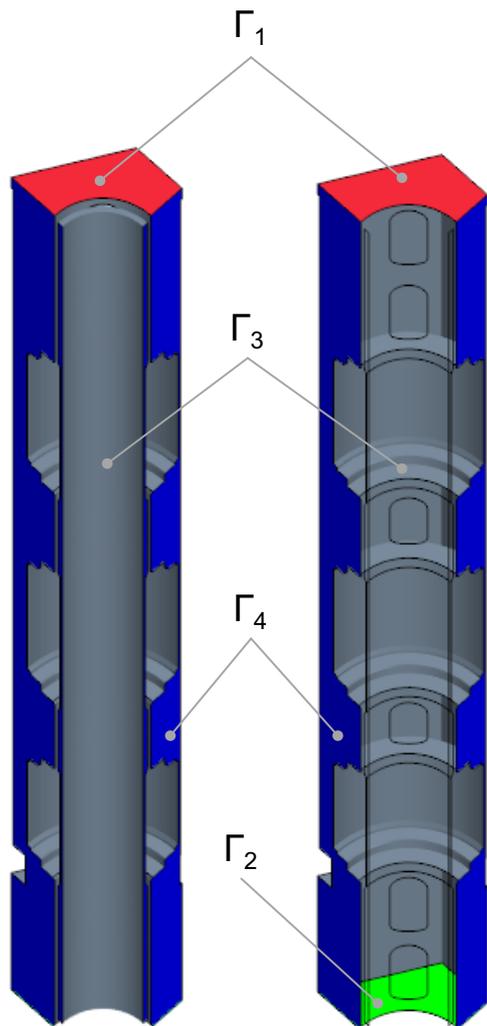
Исходные данные

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	$Q \approx 0,5 \text{ МВт}$

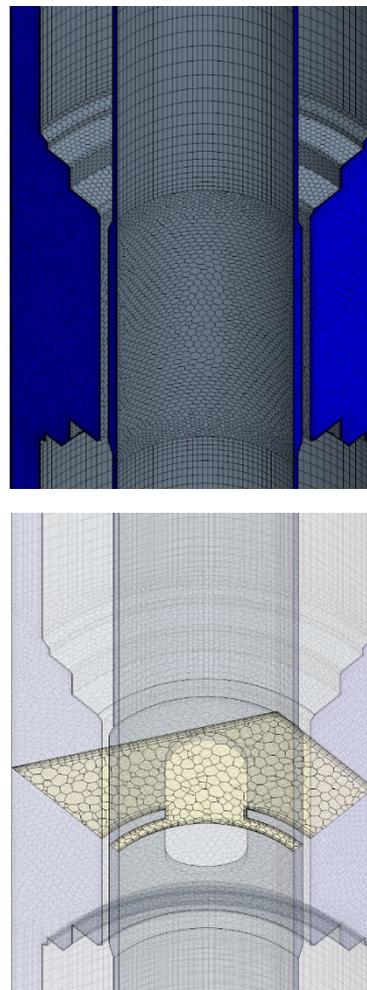


Верификация и валидация

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

Граничные условия

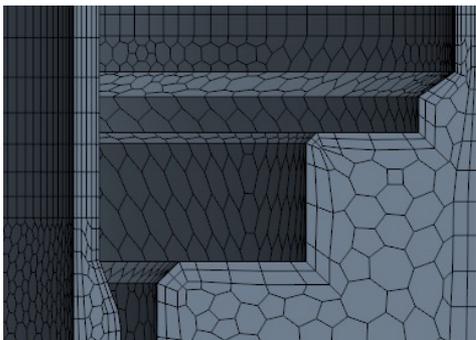
Γ_1 вход	$u = G_v/S$
Γ_2 выход	$p = p_{out}$
Γ_3 стенки	$u = 0$
Γ_4 симметрия	$\tau = 0$

Исходные данные

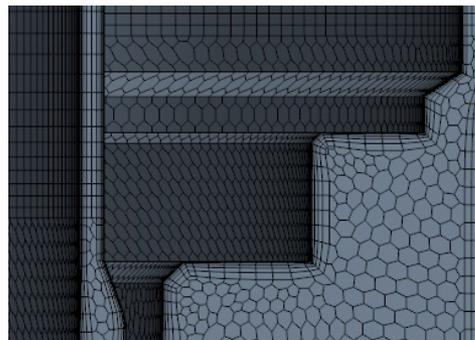
Температура	$T_{in} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
Давление	$p_{out} = 1 \text{ атм}$
Расход	$G_v = (G_{nom}/121/4) \text{ м}^3/\text{ч} \pm 50\%$

Верификация и валидация

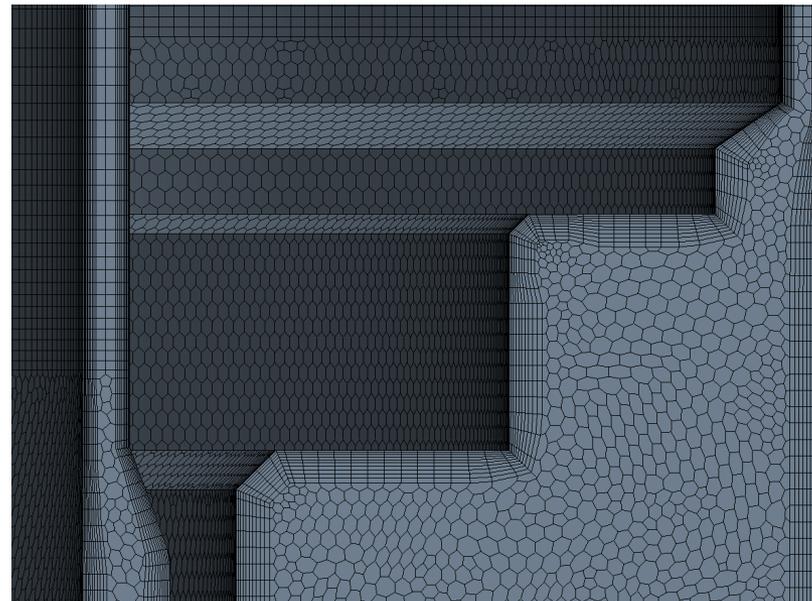
сетка №1



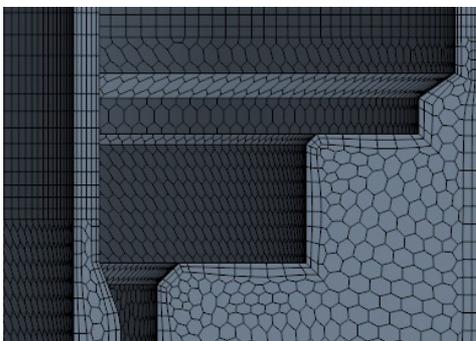
сетка №3



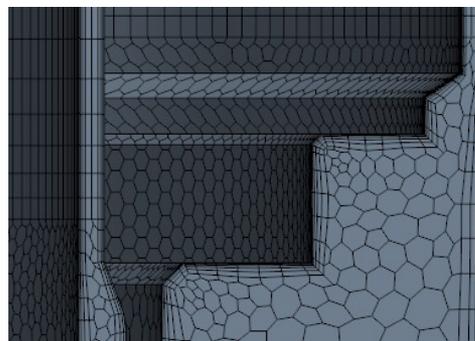
сетка №4



сетка №2



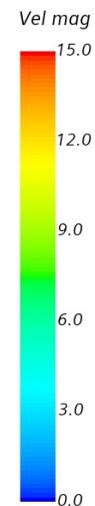
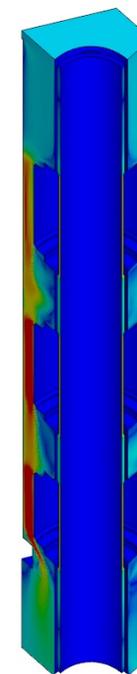
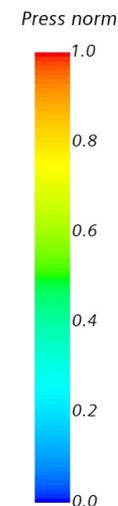
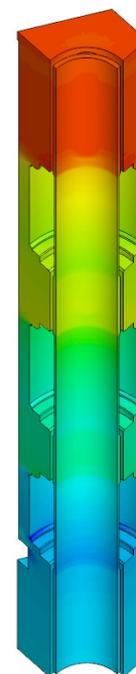
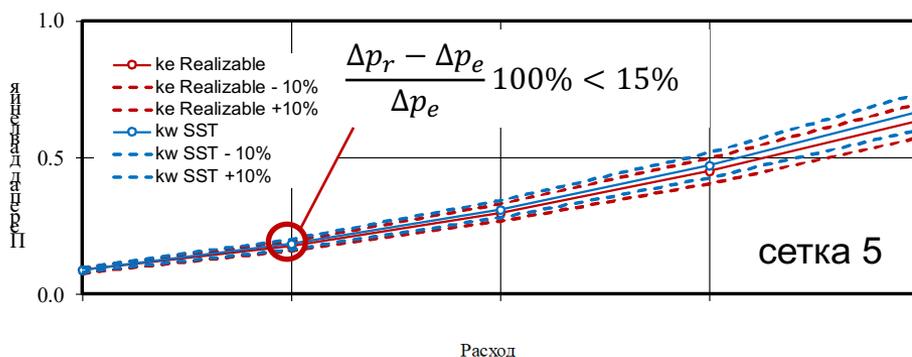
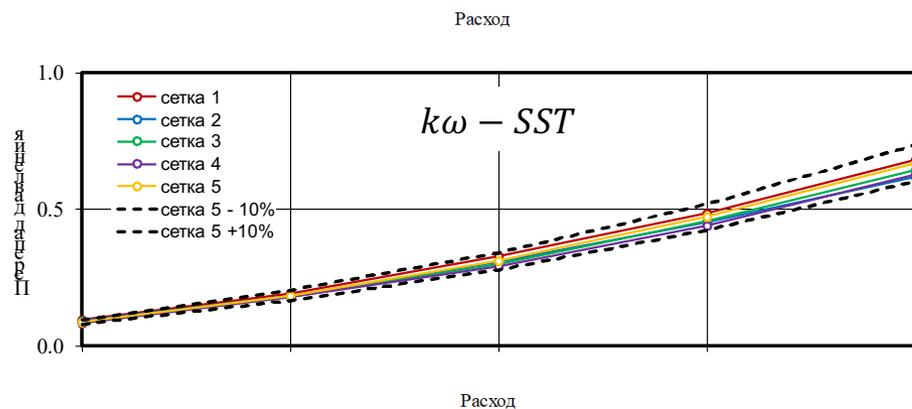
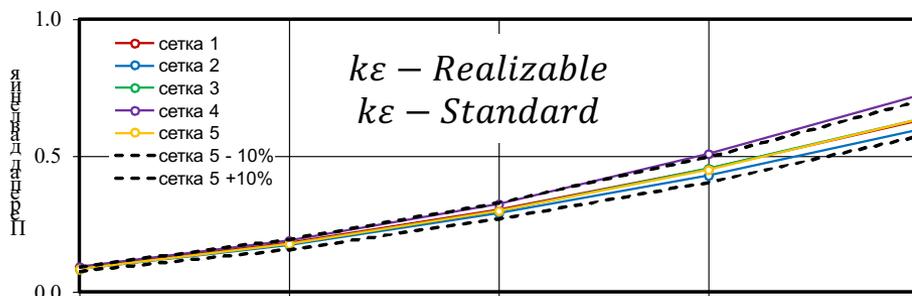
сетка №5



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+

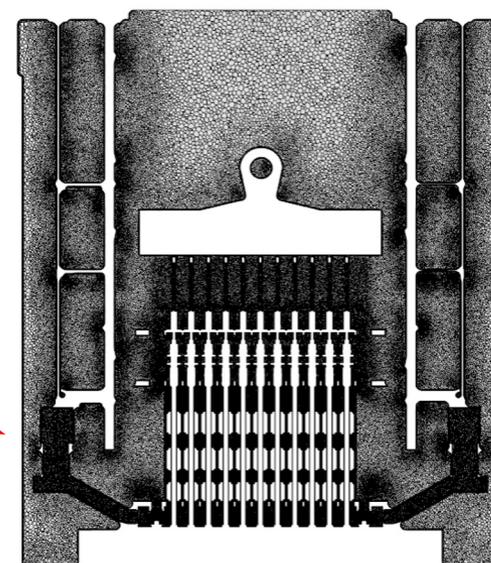
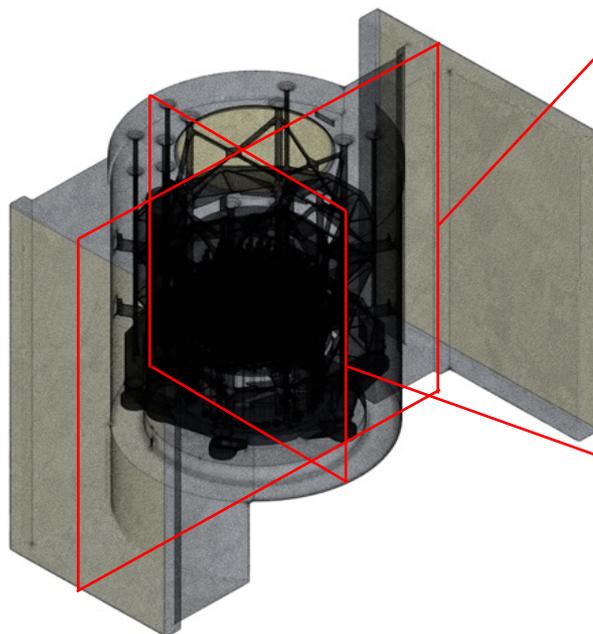
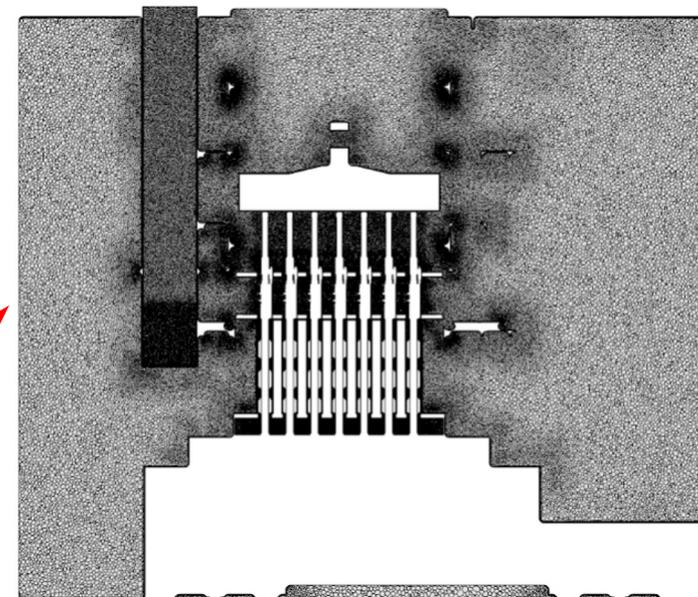
Верификация и валидация



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

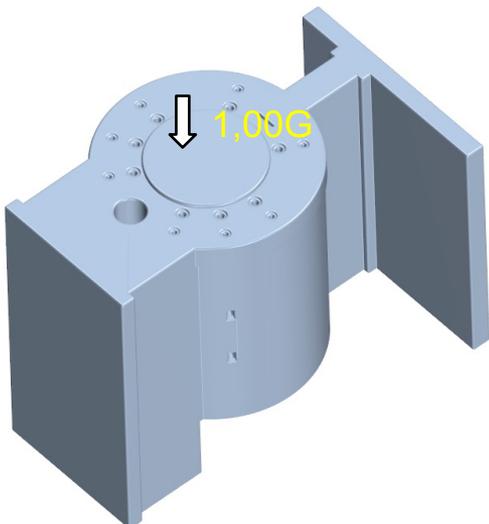
Размерность сеточной
модели составляет - 300
млн. ячеек



Анализ чувствительности к ГУ

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

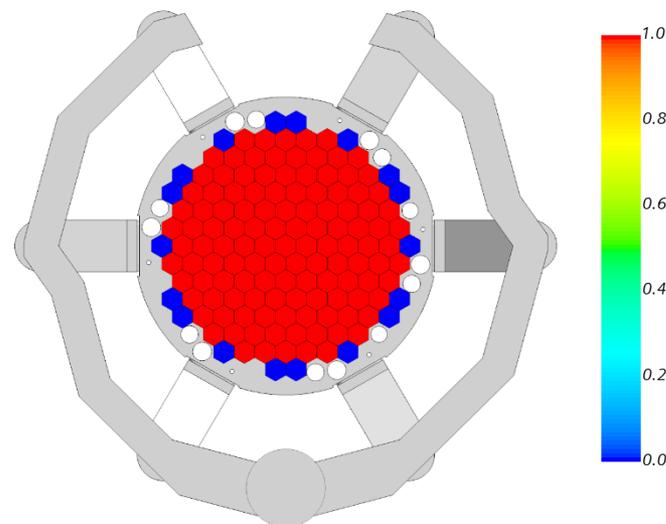
Расход воздуха поступающего в БВ



ГУ1

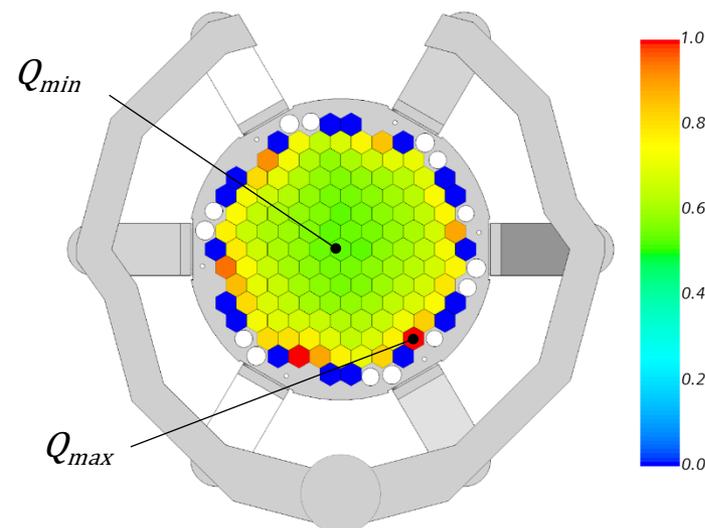
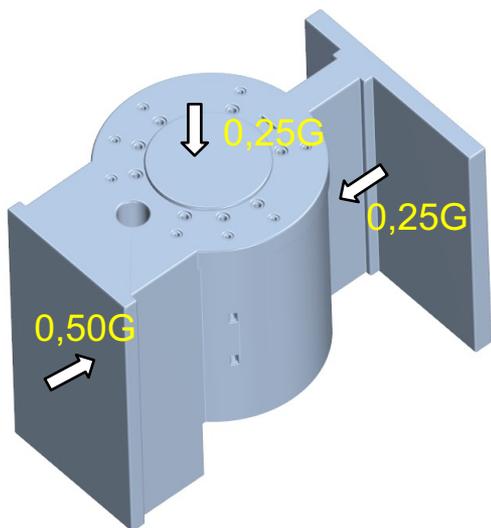
$$Q_{min} = Q_{max} = \frac{Q}{121} = const$$
$$\frac{Q_{max}}{Q_{min}} = 1$$

Тепловые потери в чехлах СУЗ и СВРК



ГУ2

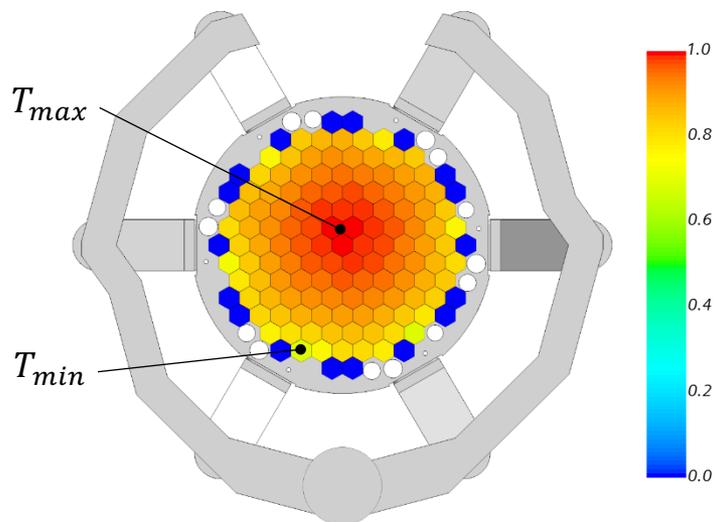
$$\sum_{i=1}^{121} Q_i = Q$$
$$\frac{Q_{max}}{Q_{min}} = 1,8$$



Анализ чувствительности к ГУ

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

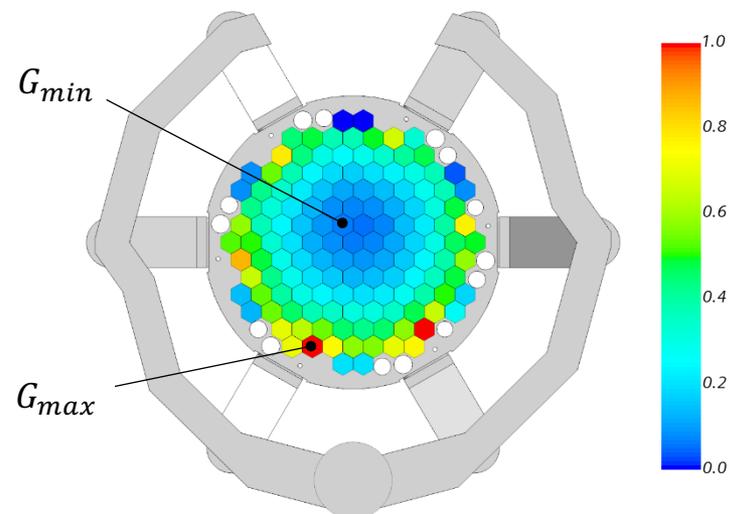
Температура



ГУ1

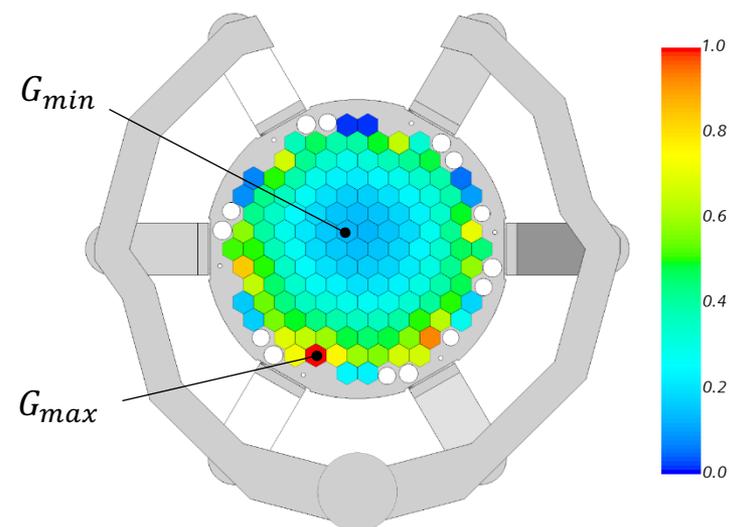
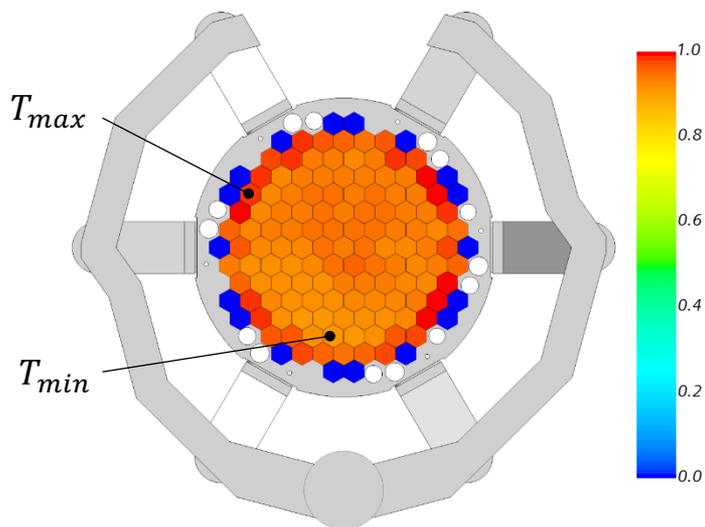
$$G_{min} > 250 \frac{\text{M}^3}{\text{ч}}$$

Объемный расход, приведенный к T_{in}

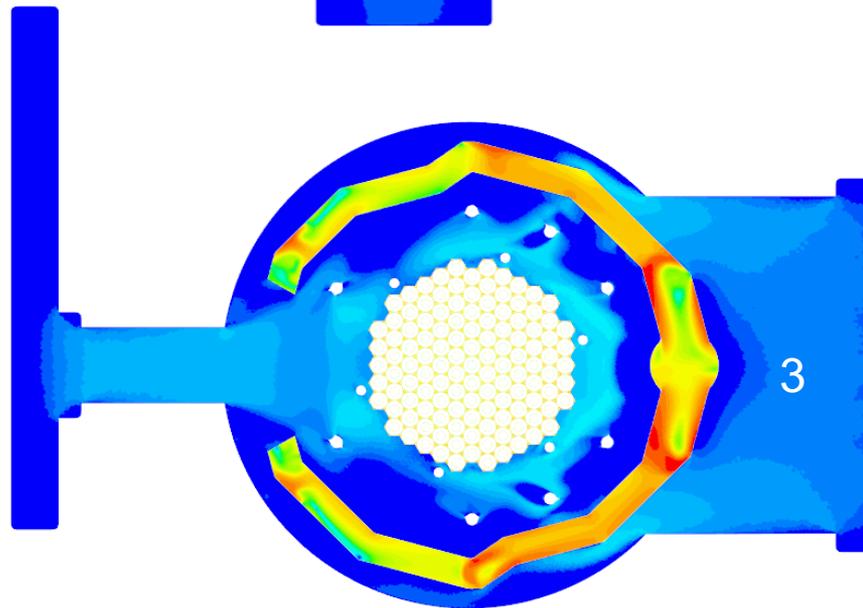
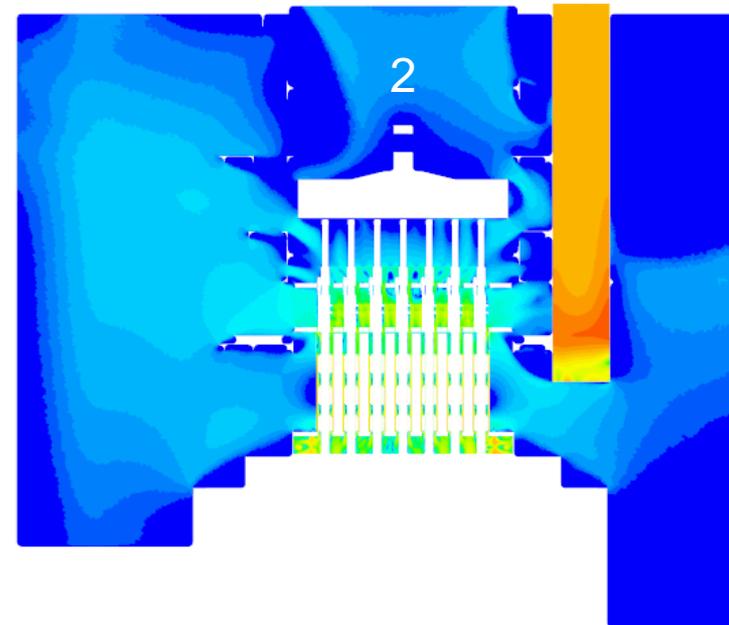
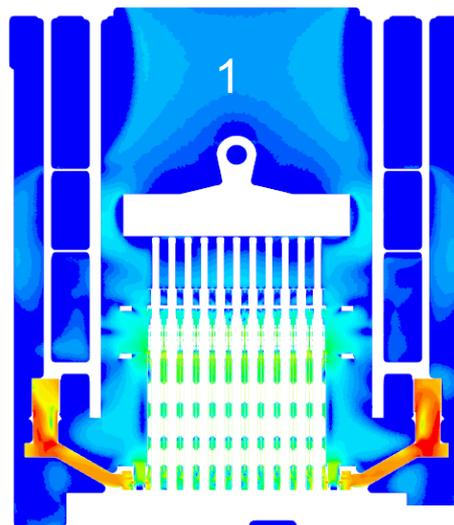
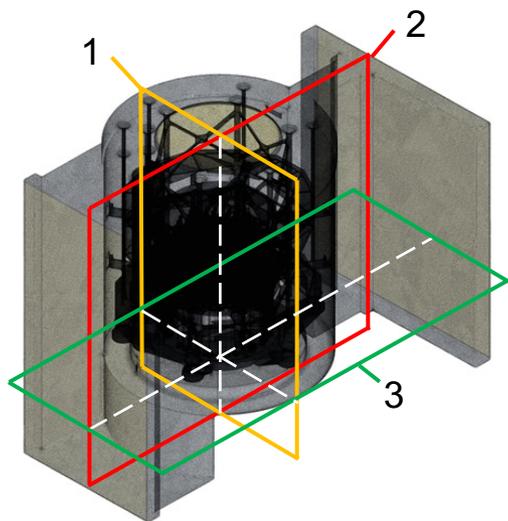


ГУ2

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



Результаты расчета. Скорость воздуха.



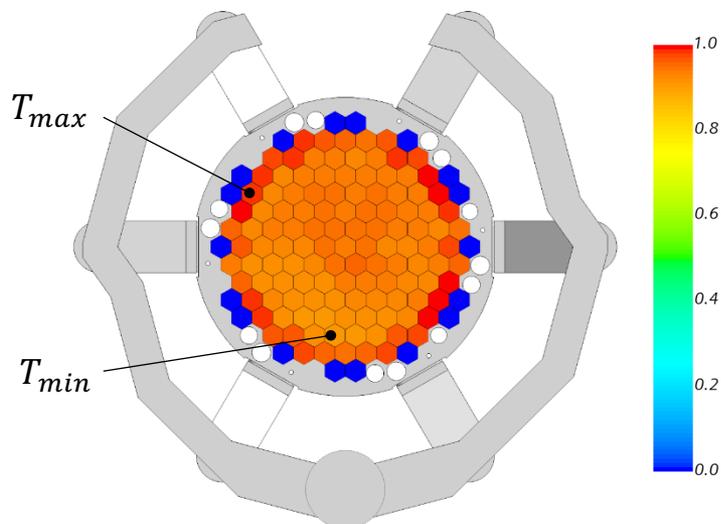
ГУ2

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

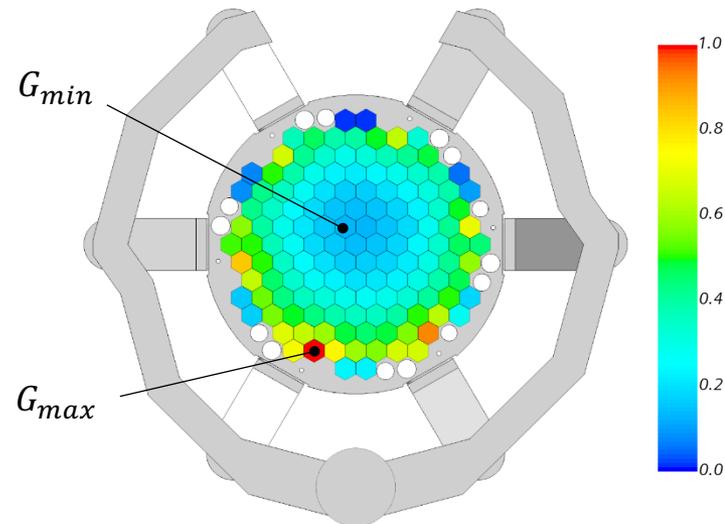
Результаты расчета

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 $250 \text{ м}^3/\text{ч}$ 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
www.gidropress.podolsk.ru

26.09.2022