Трехмерное моделирование рабочего процесса в авиационном роторно-поршневом двигателе

Зеленцов А.А., Минин В.П.

ЦИАМ им. П.И. Баранова
Отд. 306 «Авиационные поршневые двигатели»

2018

Цель работы

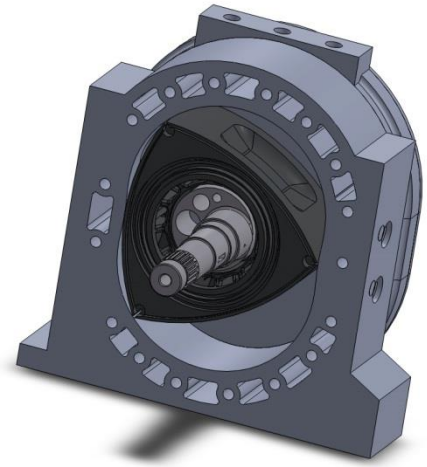
Роторно-поршневые двигатели (РПД), по сравнению с двигателями, использующими кривошипно-шатунный механизм, обладают меньшей массой и габаритами. В связи с этим они хорошо подходят для применения на летательных аппаратах.

Нульмерный подход не позволяет корректно учесть особенности геометрии рабочей камеры РПД. Также нет возможности оптимизировать положение и моменты зажигания для свечей зажигания, оценить эффективность наполнения. Эти особенности возможно учесть при использовании трехмерного подхода.

Цель работы: разработка трехмерной математической модели рабочего процесса РПД и уточнение геометрии ротора при ее использовании.

Объект исследований

Тип	Роторно-поршневой
Число секций	1
Рабочий объем, см^3	654
Степень сжатия	10,5
Мощность (6500 об/мин), кВт/л.с.	73,5 / 100
Топливо	Бензин с октановым числом не менее 95
Расход топлива (бензин), г/(кВт· ч)	310
Система питания	Распределенный впрыск
Вес двигателя, кг	60



Математическая модель

Обобщенное дифференциальное уравнение законов сохранения:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \mathrm{div}\left(\rho\vec{U}\Phi\right) = \mathrm{div}(\Gamma_\Phi \mathrm{grad}\Phi) + S_\Phi \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_j \Phi\right)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j}\right) + S_\Phi$$

Уравнение сохранения количества движения (Навье-Стокса) $\Phi = U_i, \Gamma_\Phi = \mu,$ $S_\Phi = G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + V_\mu$	Базовая форма	$\rho\frac{DU_i}{Dt} = G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial U_k}{\partial x_k}\right)\right]$
	Форма Рейнольдса Новые неизвестные	$\bar{\rho}\frac{D\overline{U_i}}{Dt} = \bar{G}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial \overline{U_k}}{\partial x_k}\right) - \bar{\rho}\cdot\overline{u_i u_j}\right]$ $\bar{\rho}\cdot\overline{u_i u_j}$ – тензор рейнольдсовых турбулентных напряжений, определенный по пульсационным составляющим скорости u_i; $\bar{\tau}_{ij} = \mu\left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial \overline{U_k}}{\partial x_k}\right)$ – тензор вязких(турбулентных) напряжений, определенный по усредненным значениям компонентов скорости $\overline{U}_i$

Математическая модель

Уравнение сохранения энергии $\Phi = H, \Gamma_\Phi = \frac{\lambda}{c_p},$ $S_\Phi = G_i U_i + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} U_j) + w_r Q_r + \frac{\partial q_{R_j}}{\partial x_j}$	Базовая форма	$\rho \frac{DH}{Dt} = G_i U_i + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} U_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) + w_r Q_r + \frac{\partial q_{R_j}}{\partial x_j}$
	Форма Рейнольдса Новая неизвестная	$\bar{\rho} \frac{D\bar{H}}{Dt} = \bar{G}_i \bar{U}_i + \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\tau}_{ij} \bar{U}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - c_p \bar{\rho} \cdot \overline{\Theta u_j}\right) + \bar{w}_r \bar{Q}_r + \frac{\partial \bar{q}_{R_j}}{\partial x_j}$ $c_p \bar{\rho} \cdot \overline{\Theta u_j}$ – турбулентный перенос энтальпии $h = c_p \Theta$ посредством флуктуации скорости u_j
Уравнение сохранения массы (неразрывности) $\Phi = 1, \Gamma_\Phi = 0,$ $S_\Phi = 0$	Базовая форма	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0$
	Форма Рейнольдса	$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \cdot \bar{U}_j) = 0$

Математическая модель

Уравнение диффузии (концентрации) $\Phi = \frac{C_j}{\rho}, \Gamma_\Phi = D\rho,$ $S_\Phi = \dot{m}$	Базовая форма	$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(D\frac{\partial C}{\partial x_j}\right) + \dot{m}$
	Форма Рейнольдса Новая неизвестная	$\frac{D\bar{C}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(D\frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} - \bar{\rho}\cdot\overline{cu_j}\right) + \overline{\dot{m}}$ $\bar{\rho}\cdot\overline{cu_j}$ – турбулентный диффузионный перенос массы компонента, концентрация которого $c\cdot\rho$, посредством флуктуации скорости u_j

Примечание: в уравнениях применяется правило суммирования по индексу повторяющемуся дважды, а усреднения осуществляются по Фавру, т. е. с использованием плотности в качестве весовой функции.

В уравнениях в форме Рейнольдса $\bar{\Phi}$ – осредненное значение мгновенной величины Φ, ϕ – пульсационное значение.

Математическая модель

k-ζ-f модель турбулентности

$$\rho\frac{Dk}{D\tau}=\rho\left(P_k-\varepsilon\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right],$$

$$\rho\frac{D\varepsilon}{D\tau}=\rho\frac{c_{\varepsilon1}^{*}P_k-c_{\varepsilon2}\varepsilon}{T}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right],$$

$$\rho\frac{D\zeta}{D\tau}=\rho f-\rho\frac{\zeta}{k}P_k+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\zeta}\right)\frac{\partial \zeta}{\partial x_j}\right],$$

$$f-l^2\frac{\partial^2 f}{\partial x_j\partial x_j}=\left(c_1+c_2\frac{P_k}{\zeta}\right)\frac{2/3-\zeta}{T},$$

Здесь f – эллиптическая функция релаксации, *T* – временной масштаб турбулентности; *l* – масштаб длины

Турбулентная вязкость: $\nu_t=c_\mu\zeta\frac{k^2}{\varepsilon}$

Константа модели: $c_{\varepsilon1}^{*}=c_{\varepsilon1}\left(1+0,045\sqrt{1/\zeta}\right)$

Модель когерентного пламени (CFM)

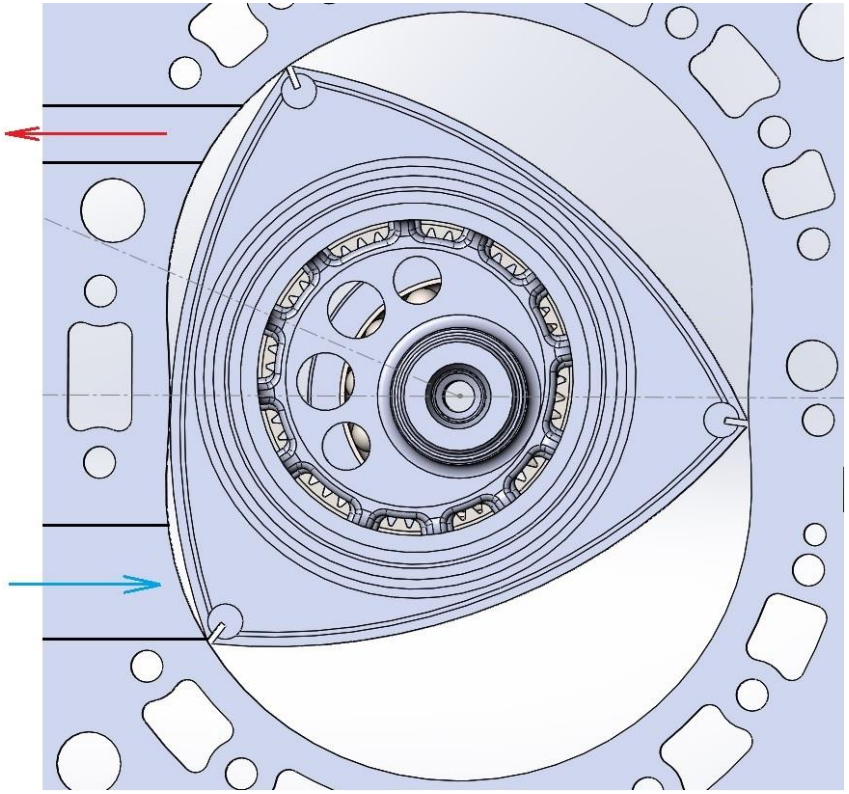
$$\frac{\partial\Sigma}{\partial\tau}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{W}_j\Sigma\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\nu_t}{Pr_{tD}}\frac{\partial\Sigma}{\partial x_j}\right)+S_\Sigma$$

здесь Σ – площадь фронта пламени на единицу объема;
Pr_{tD} – турбулентное число Прандтля;
S_Σ – источниковый член.

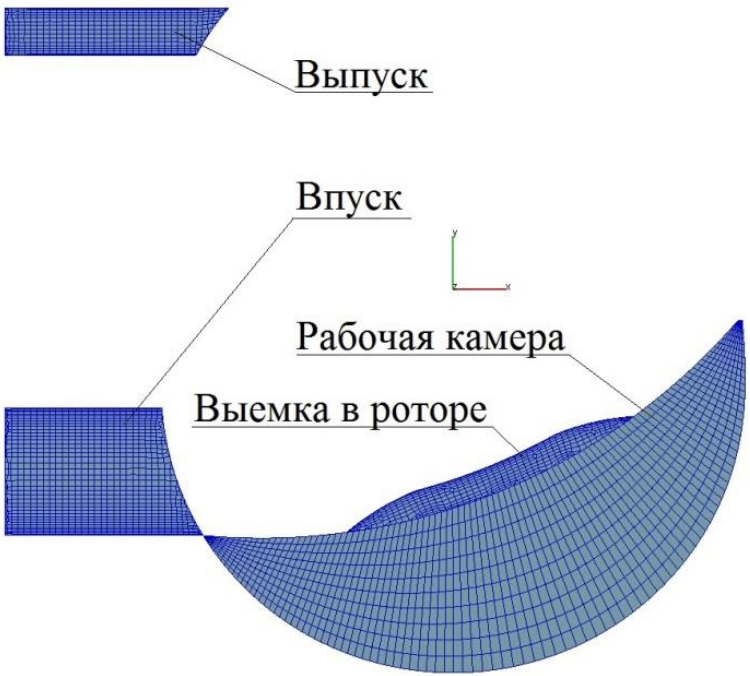
Тогда средняя скорость реакции горения топлива: $\bar{w}_r=-\rho_{Tp}w_l\Sigma$,

где ρ_{Tp} – парциальная плотность топлива; w_l – скорость ламинарного пламени

Построение сетки контрольных объемов



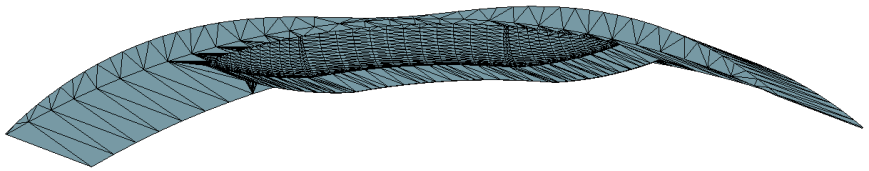
Трехмерная твердотельная модель РПД при положении ротора в момент закрытия впускного окна



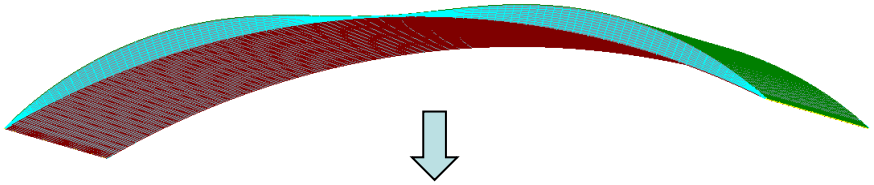
Разбиение расчетной области на КО (количество элементов 77487 КО)

Построение сетки контрольных объемов

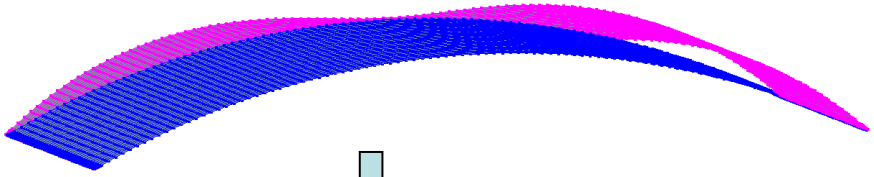
1. Исходная поверхностная сетка



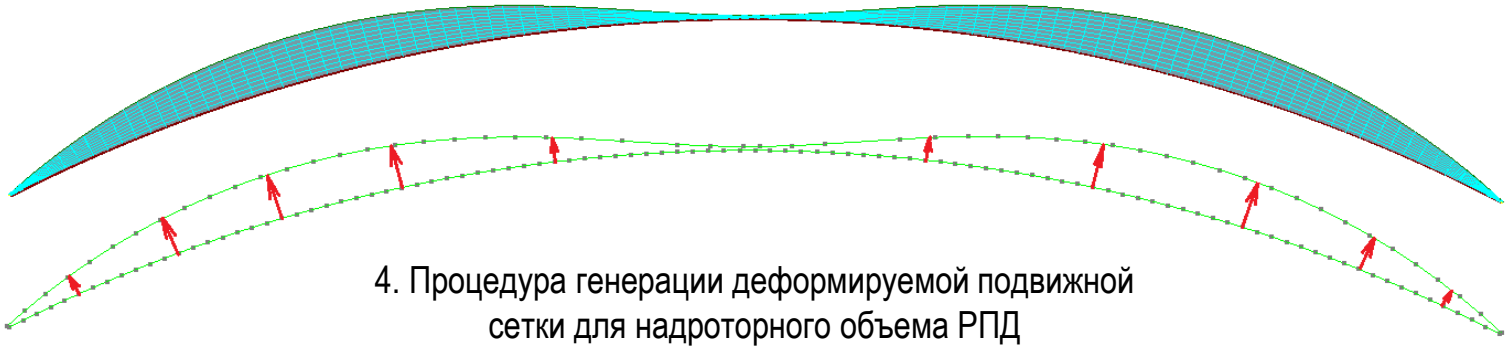
2. Разбиение надроторного пространства на КО (исходная стационарная сетка КО)



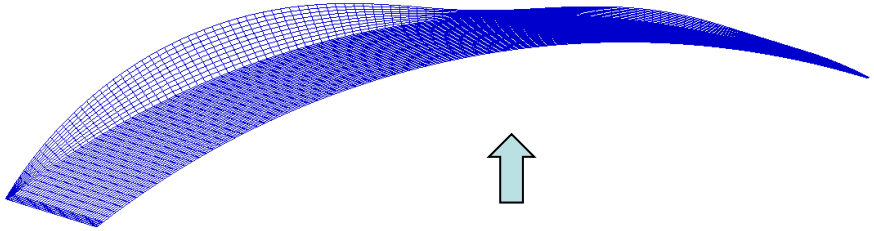
3. Выделение границ деформации подвижной сетки (поверхностей статора и ротора)



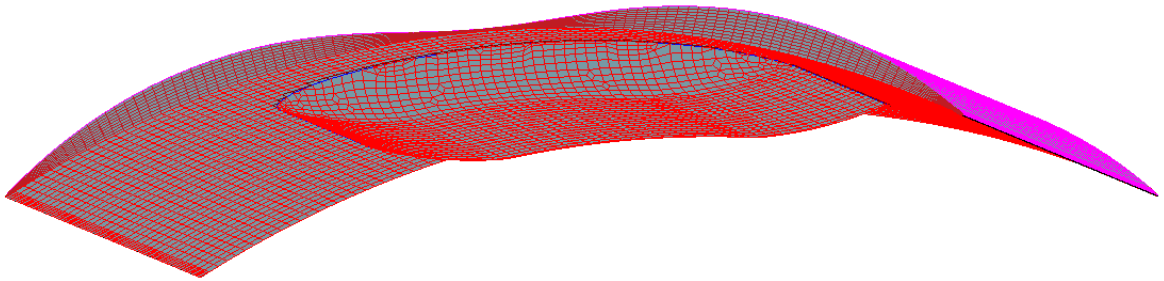
4. Процедура генерации деформируемой подвижной сетки для надроторного объема РПД



5. Итоговая подвижная деформируемая сетка (промежуточное положение ротора)

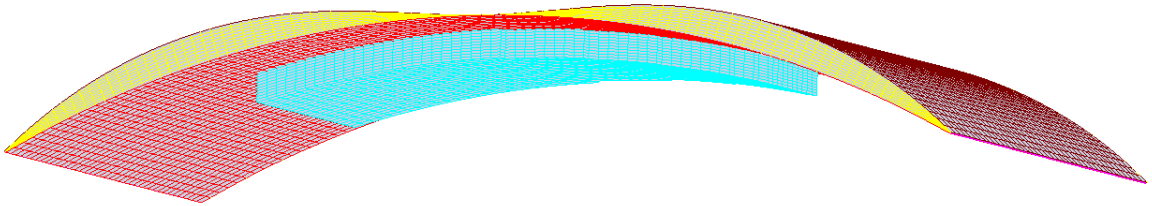


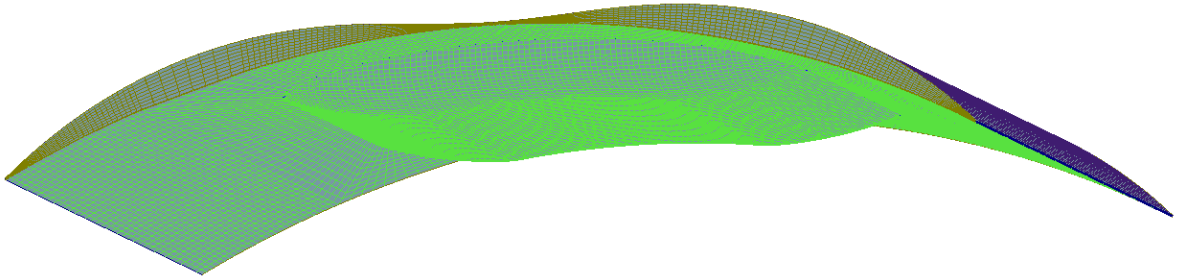
Построение сетки контрольных объемов



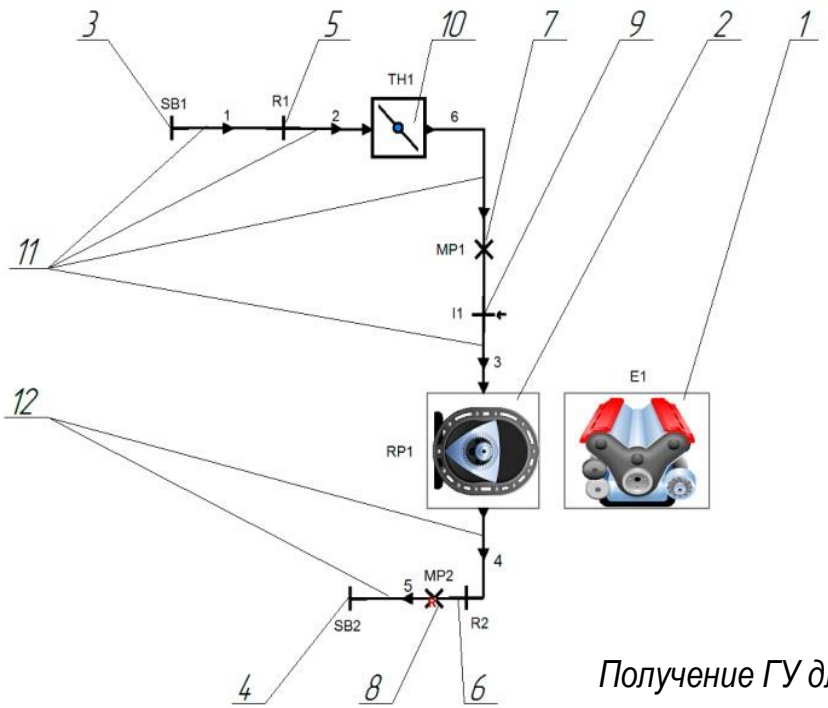
1. Раздельное построение сеток для надроторного пространства и выемки в роторе, с последующим их объединением

2. «Выращивание» сетки для выемки (камеры) в роторе на основе сетки для надроторного пространства





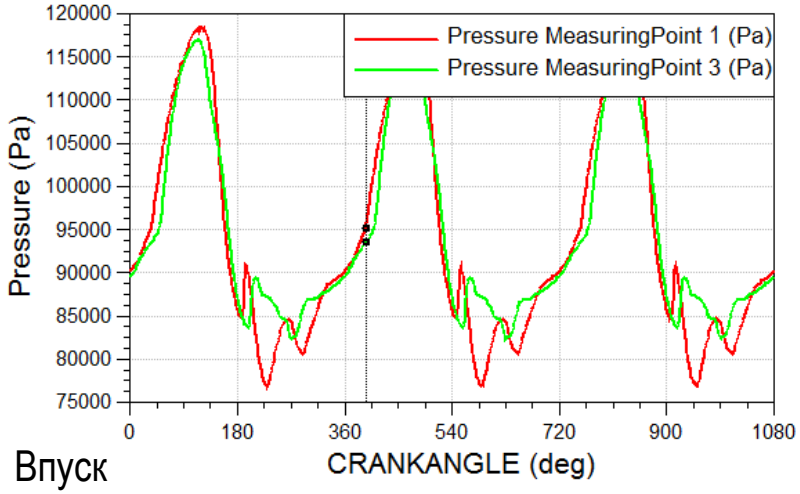
3. Построение сетки для надроторного пространства на основе сетки для выемки в роторе



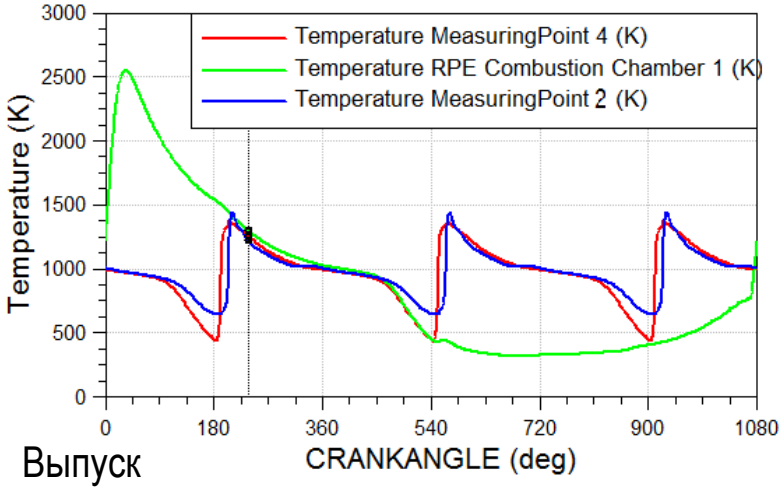
Расчётная схема односекционного роторно-поршневого двигателя:

1 – блок, задающий параметры работы двигателя;
2 – блок, имитирующий секцию РПД,
3 и 4 – граничные элементы, обеспечивающие данные для расчётной модели, соответственно, на входе и выходе;
5 и 6 – элементы, задающие потери давления на впуске и выпуске,
7 и 8 – точки измерения параметров в трубопроводах,
9 – форсунка,
10 – дроссель,
11 – впускные трубопроводы,
12 – выпускные трубопроводы

Получение ГУ для последующего трехмерного расчета рабочего процесса

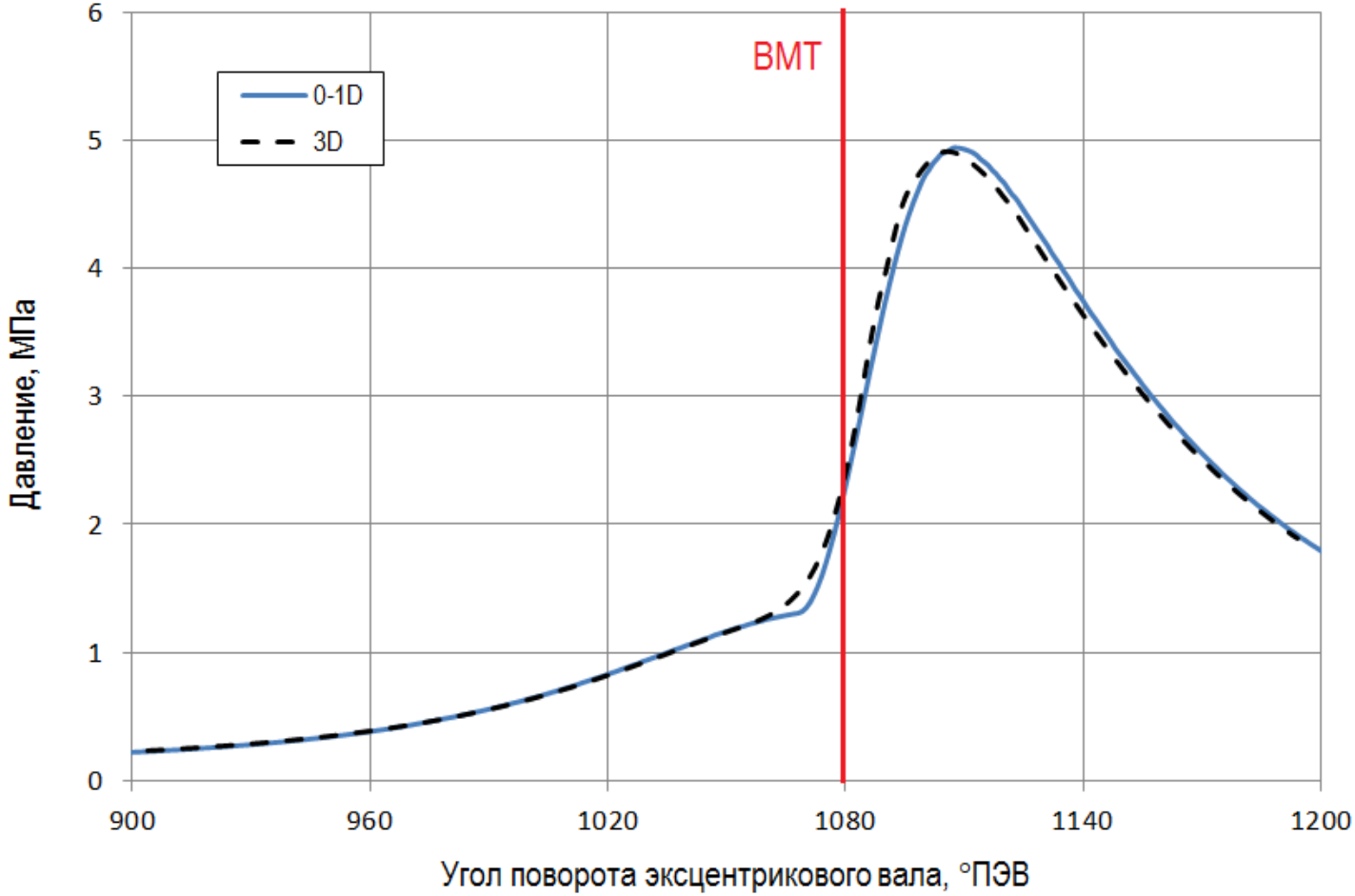


Впуск



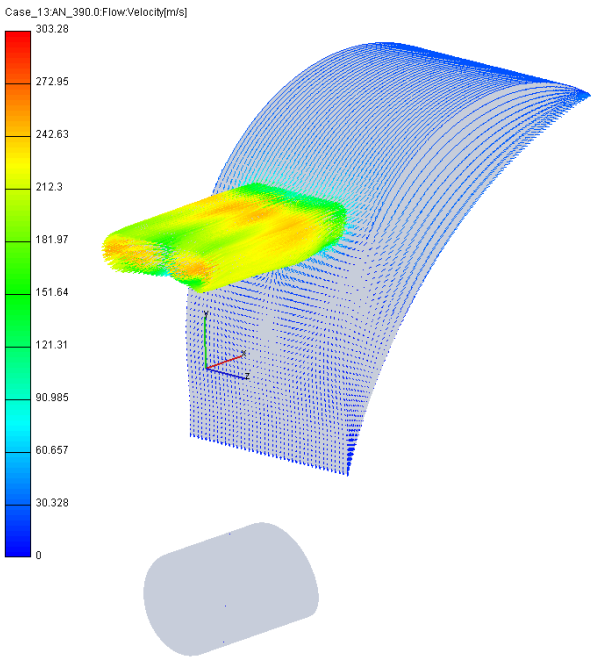
Выпуск

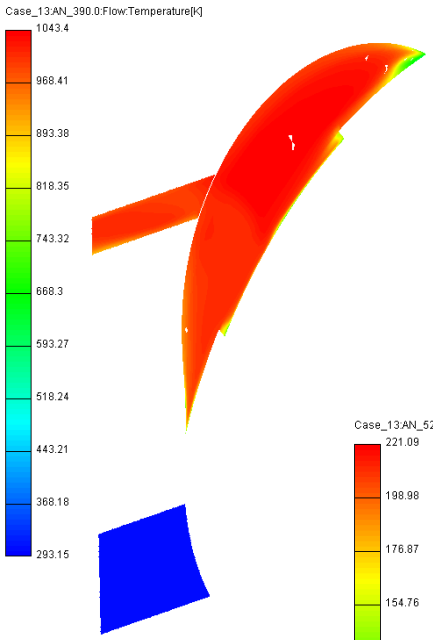
Верификация математической модели



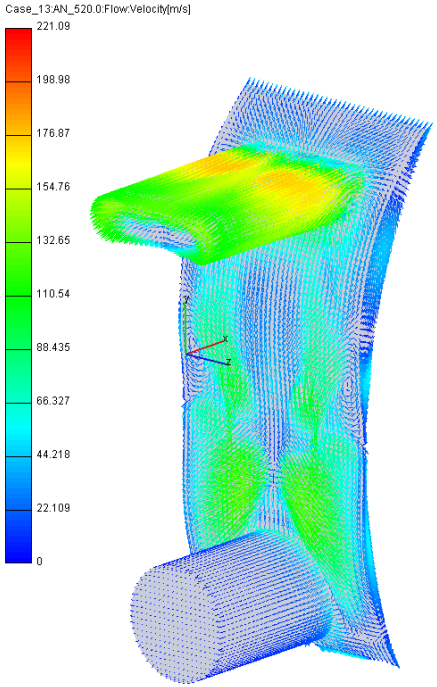
Погрешность по величине максимального давления p_z не превышает 0,5%, а по углу его достижения – менее 1%

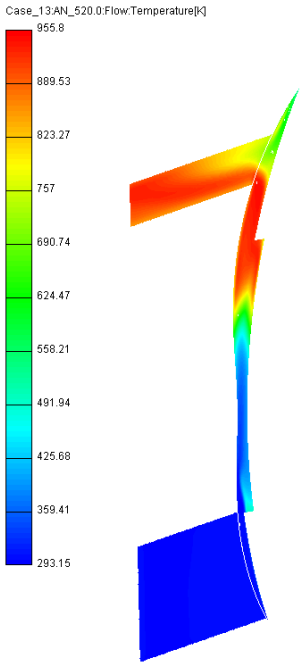
Результаты численного моделирования





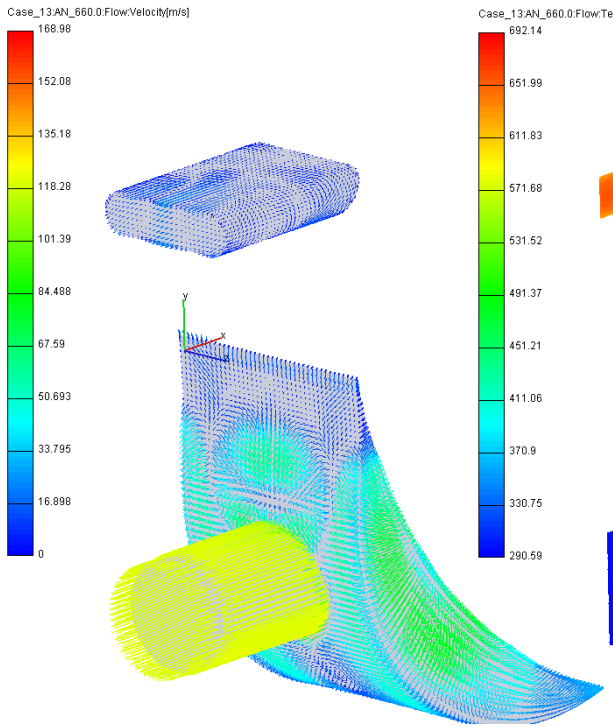
1. Процесс выпуска ОГ в РПД с радиальным выпускным каналом (упрощенная КС в роторе)

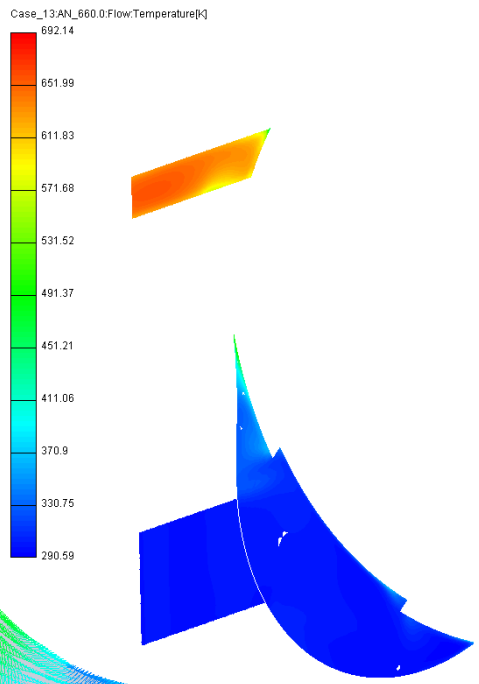




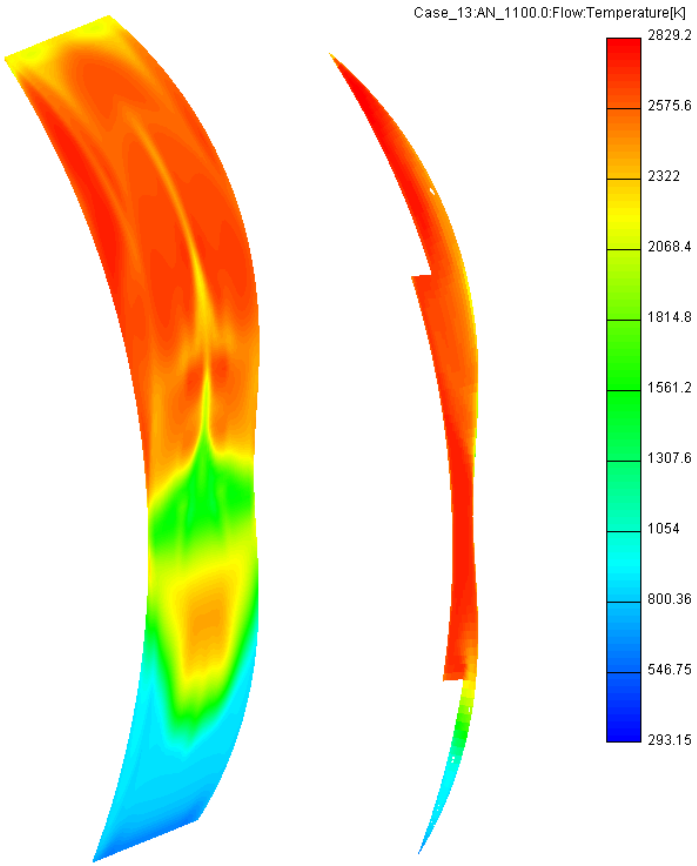
2. Продувка рабочей камеры РПД с радиальными впускным и выпускным каналами (упрощенная КС в роторе)

Результаты численного моделирования



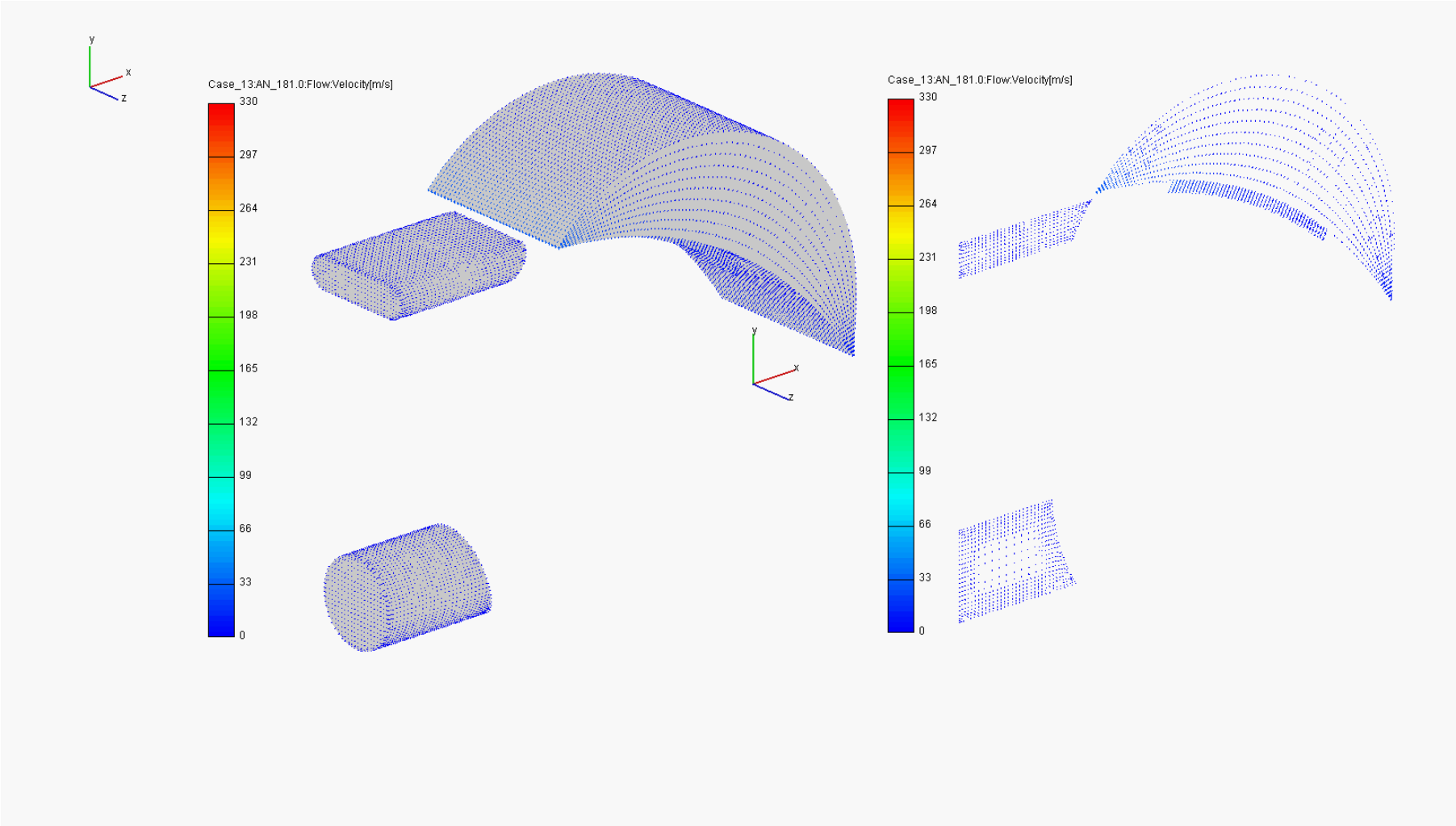


3. Процесс наполнения РПД с радиальным впускным каналом (упрощенная КС в роторе)



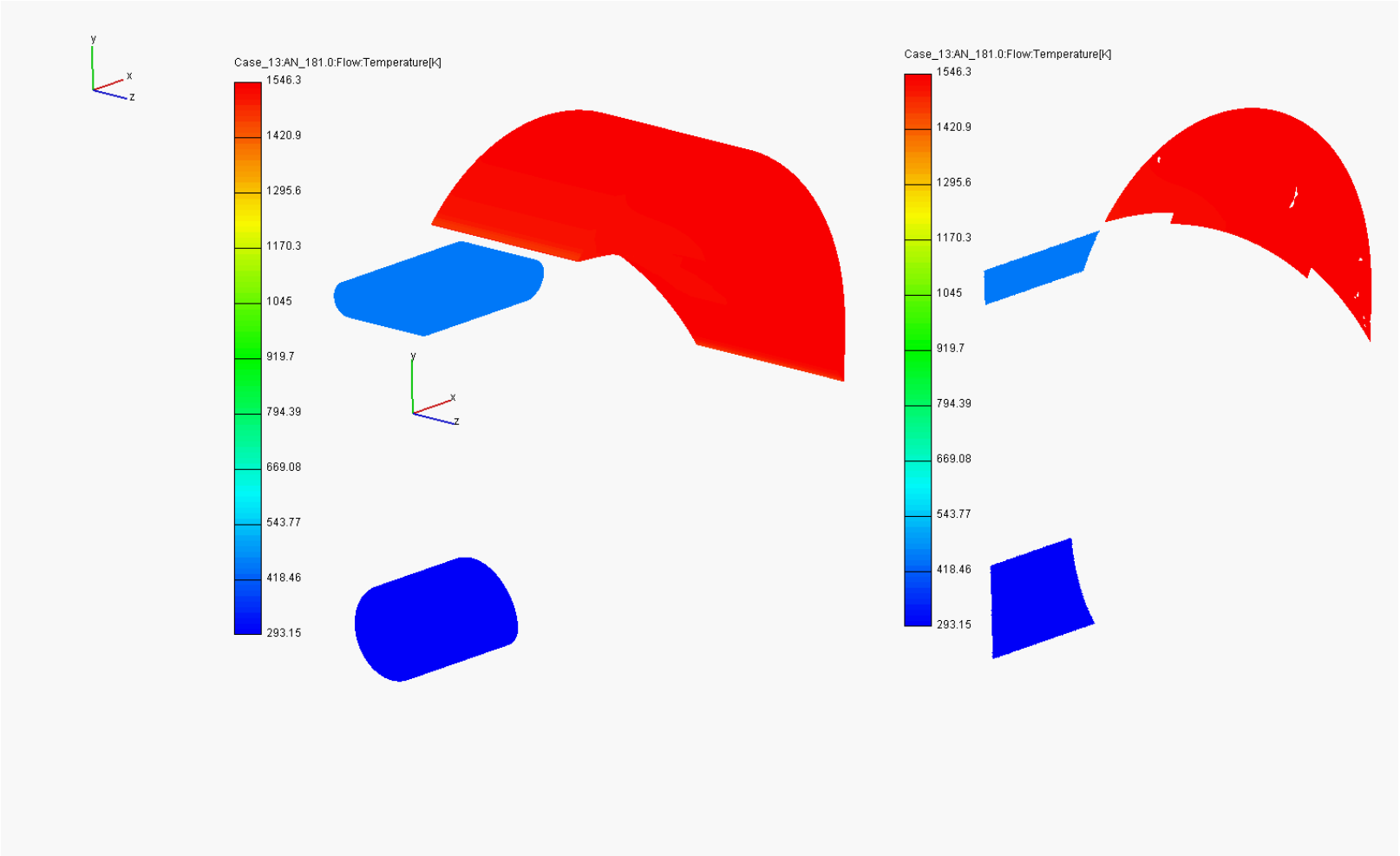
4. Процесс сгорания в РПД (упрощенная КС в роторе)

Результаты численного моделирования



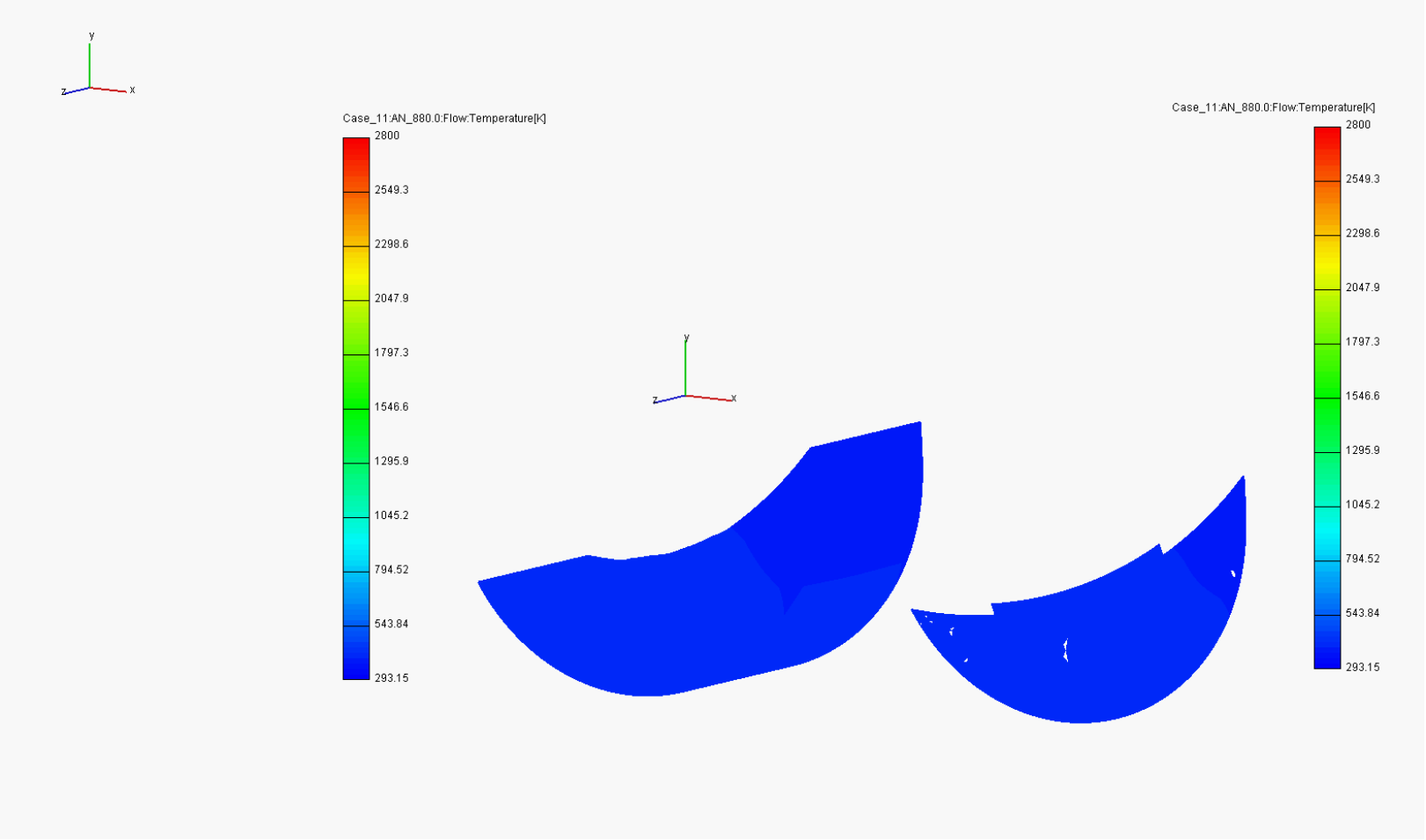
Изменение скорости газа в расчетном объеме в процессах выпуска, продувки и впуска в РПД

Результаты численного моделирования



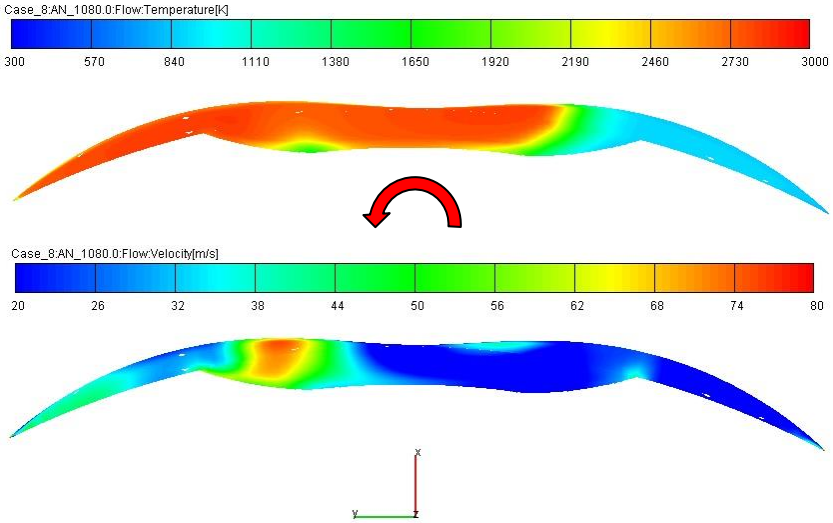
Изменение температуры газа в расчетном объеме в процессах выпуска, продувки и впуска в РПД

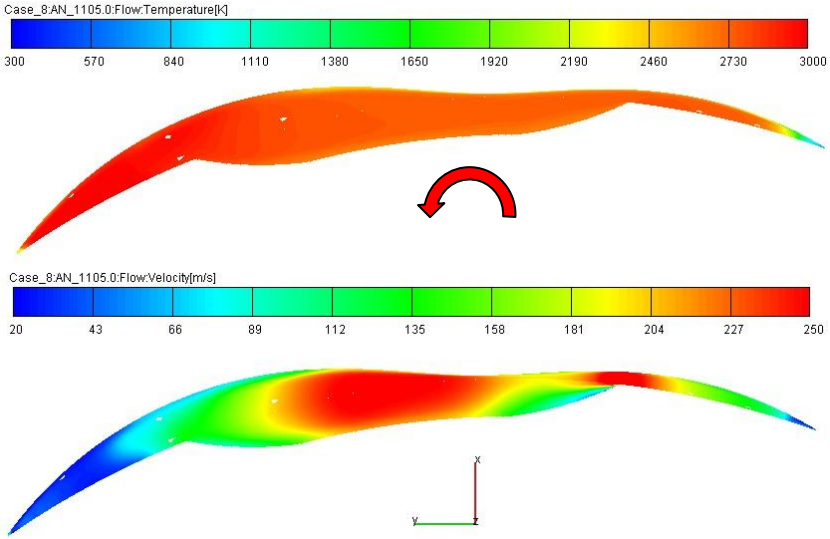
Результаты численного моделирования

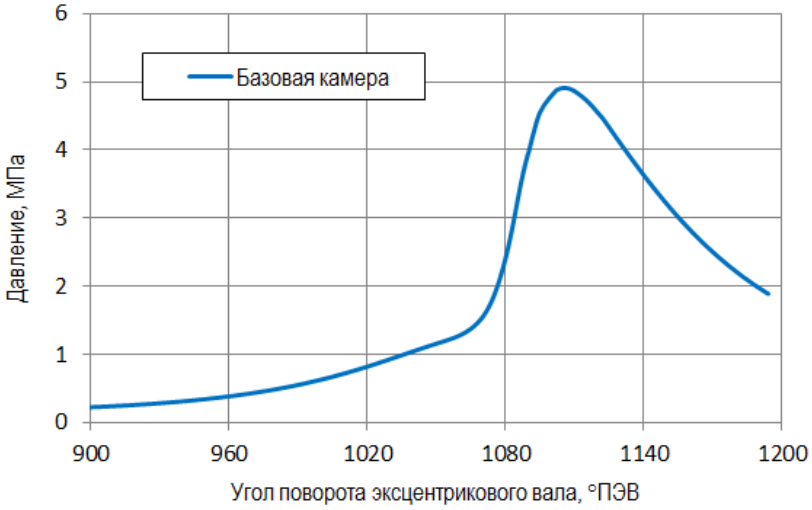


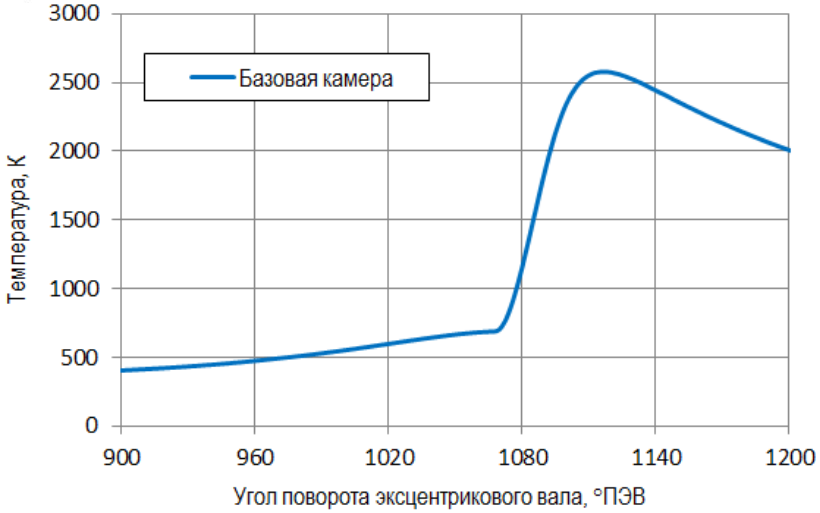
Изменение температуры газа в расчетном объеме при сгорании в РПД

Результаты численного моделирования

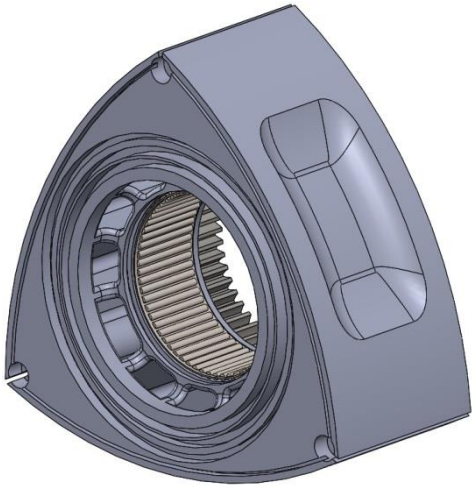


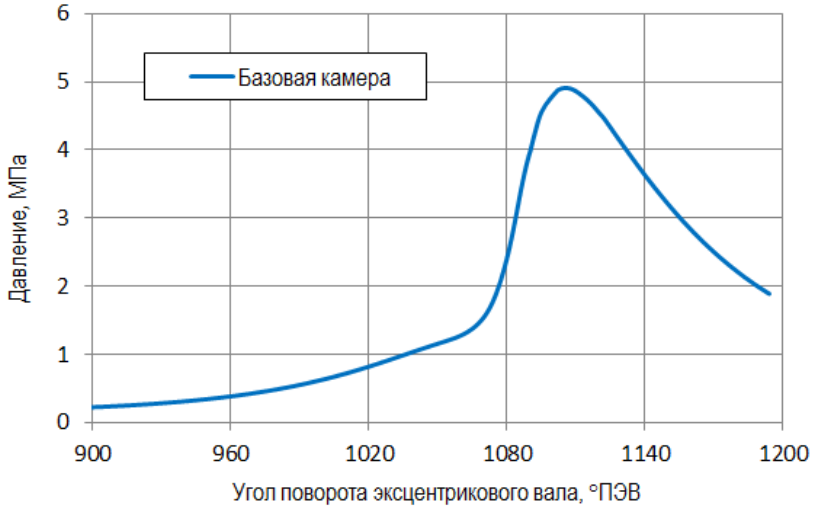




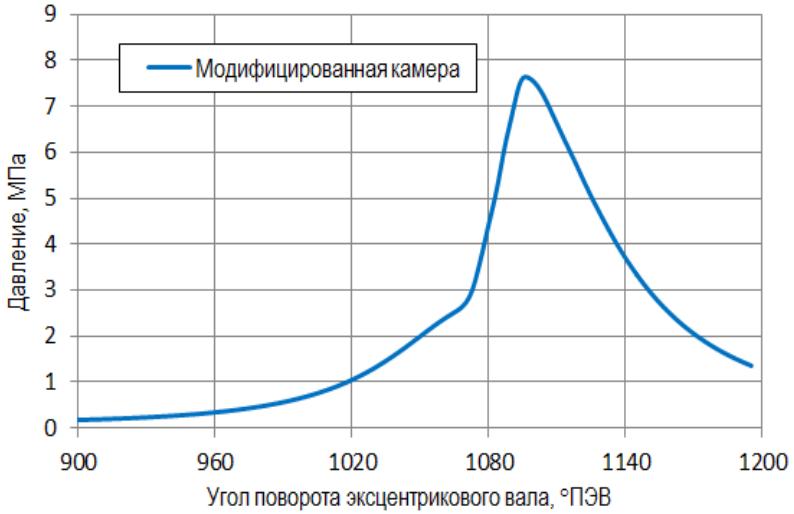


Модификация формы камеры сгорания (выемки) в роторе





Индикаторная диаграмма РПД с базовой камерой сгорания



Индикаторная диаграмма РПД с модифицированной камерой сгорания

Заключение

1. Разработана математическая модель РПД, позволяющая в трехмерной постановке определить параметры рабочего тела во всем расчетном объеме.
2. Показана необходимость индивидуального зажигания на первой и второй (по ходу движения ротора) свечах зажигания.
3. По результатам моделирования процессов турбулентного сгорания и переноса в рабочей камере РПД определено значительное влияние формы выемки в роторе на показатели двигателя. Предложена альтернативная конструкция формы камеры в роторе, позволяющая повысить эффективность работы РПД.

Работа была выполнена с использованием программных комплексов AVL BOOST и FIRE (Австрия).

Спасибо за внимание!