

**КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УЗЛОВ И  
ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК  
(СУ)**

**Лекция №6**

Силовые схемы ГТД.

## Силовые схемы авиационных ГТД

При работе ГТД все детали и узлы испытывают воздействие различных нагрузок:

- газовые;
- Центробежные;
- Инерционные;
- Вибрационные;
- Акустические;
- Температурные;
- Крутящие и изгибающие моменты;

## Силовые схемы авиационных ГТД

Усилия от нагрузок передаются от детали к детали.

Усилия суммируются и передаются на внешнюю подвеску двигателя или взаимно компенсируются без передачи на наружные элементы ГТД.

Узлы и детали, которые воспринимают основные внутренние усилия и по которым осуществляется их дальнейшая передача, называют силовыми.

Совокупность силовых деталей и узлов определяет **силовую схему** двигателя.

## Основные группы нагрузок в ГТД:

- Газовые – обусловлены перепадом давления в газовом тракте двигателя и изменением скорости и направлением потока;
- Массовые (т.н. силы инерции и инерционные моменты) – возникают при вращении роторов двигателя, при эволюциях самолета, при взлете и посадке, при наличии дисбалансов роторов;
- Температурные – возникают из-за неравномерного нагрева и/или охлаждения деталей, различного коэффициента линейного расширения их материалов, а также при стеснении температурных деформаций.

## Силы и моменты, действующие на узлы и детали в ГТД:

- Растягивающие или сжимающие силы – возникают вследствие давления газов на детали двигателя и от действия ЦБС вращающихся масс;
- Изгибающие моменты – возникают от газовых сил, масс узлов и деталей , а также от инерционных сил;
- Крутящие моменты - возникают в роторах от действия воздуха и газов на РЛ компрессоров и турбин, в корпусных деталях от действия воздуха и газов на НА компрессоров и СА турбин.

## Осевые газовые силы:

Осевое усилие  $P_0$ , возникающее на элементах конструкции двигателя от газоздушных сил, определяется как сумма сил статических и динамических:

$$P_0 = P_c + P_d$$

$P_d$

Статические силы возникают из-за изменения статического давления во входном и выходном сечении элемента.

Газодинамические силы возникают из-за изменения импульса газа (воздуха) при прохождении его через рассматриваемый элемент конструкции.

Усилие от статического давления определяется как:

$$P_c = pF$$

Динамическое усилие от изменения импульса определяется как:

$$P_d = m(V_2 - V_1)$$

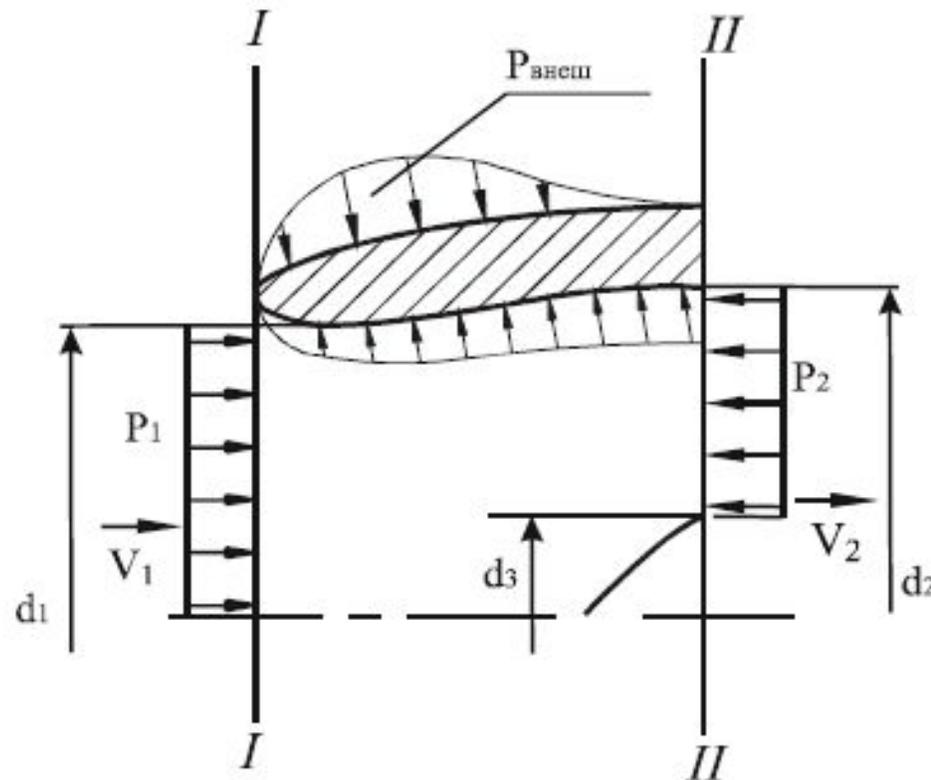
## Входное устройство:

$$P_C = P_1 F_1 - P_2 F_2$$

$$P_D = m(V_2 - V_1)$$

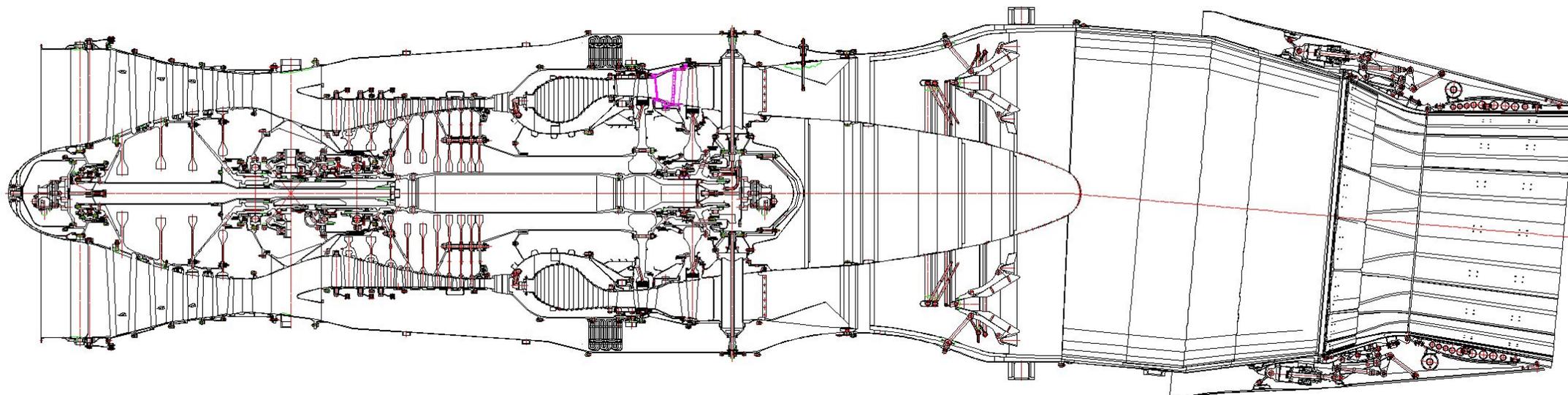
$$F_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$$

$$F_2 = \frac{\pi(d_2^2 - d_3^2)}{4}$$

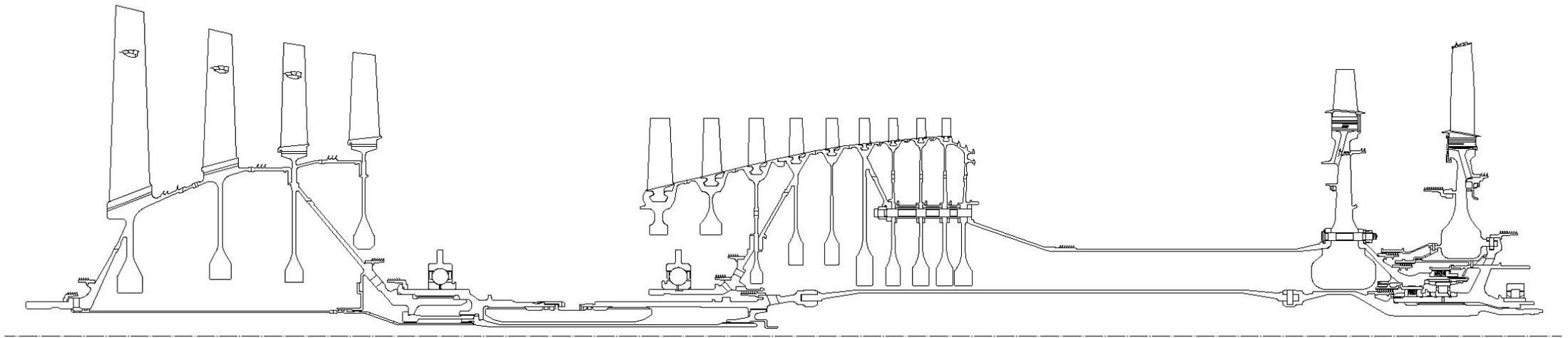


$$P_{ВУ} = P_C + P_D + P_B = P_1 F_1 - P_2 F_2 + m(V_2 - V_1) + P_B$$

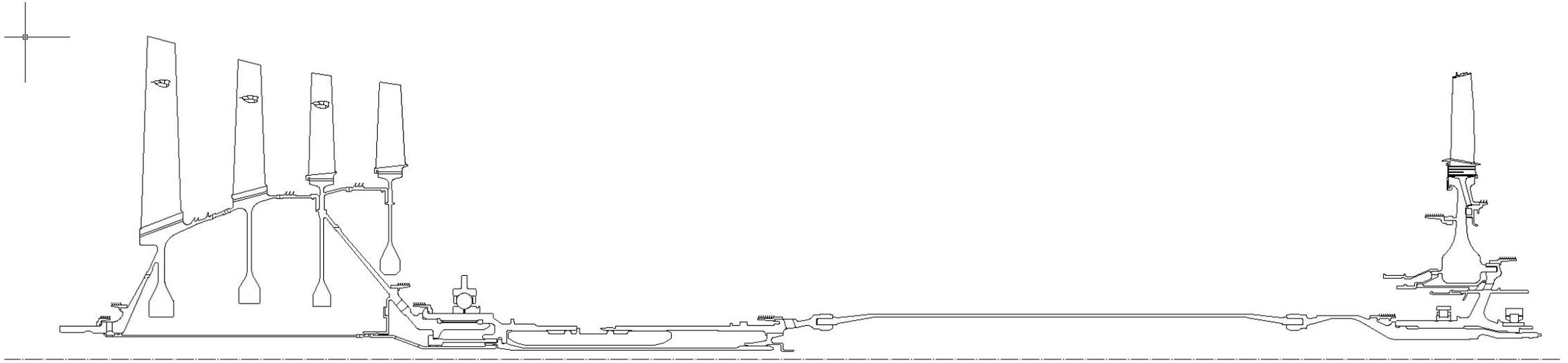
## Расчет осевых сил в ГТД и ГТУ:



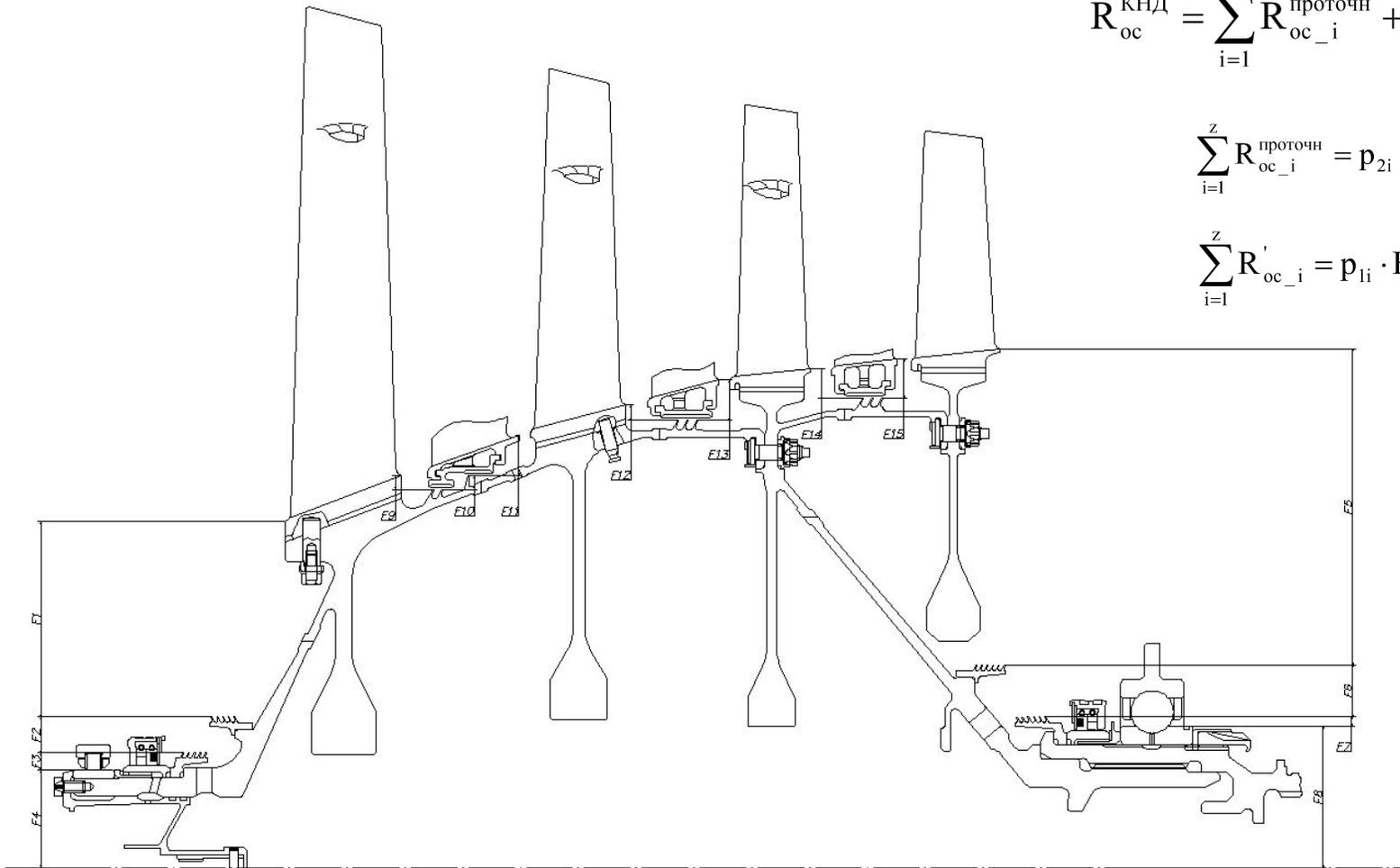
## Роторная часть ГТД или ГТУ:



## Ротор низкого давления:



## Ротор компрессора низкого давления:



$$R_{oc}^{КНД} = \sum_{i=1}^z R_{oc\_i}^{проточн} + \sum_{i=1}^z R'_{oc\_i} + \sum_{i=1}^z R_{oc\_i}^{скосов} + \sum_{i=1}^z R_{oc}^{полостей}$$

$$\sum_{i=1}^z R_{oc\_i}^{проточн} = p_{2i} \cdot F_{2i} - p_{1i} \cdot F_{1i} + \frac{G_{КНД}}{g} (C_{2a\_i} - C_{1a\_i})$$

$$\sum_{i=1}^z R'_{oc\_i} = p_{1i} \cdot F'_{1i} - p_{2i-1} \cdot F'_{2i-1} \quad F'_{1i} = \frac{\pi}{4} (D_{вт\_li-1}^2 - D_{лаб\_li-1}^2)$$

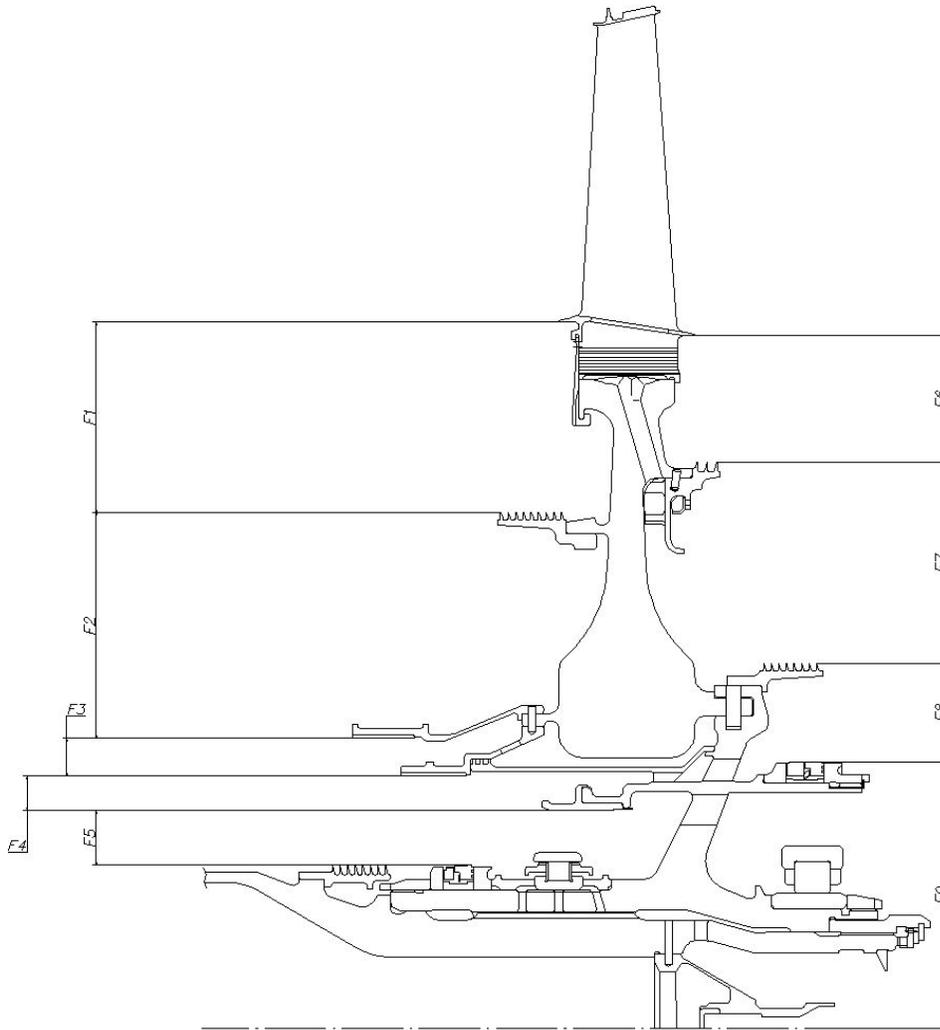
$$F'_{2i-1} = \frac{\pi}{4} (D_{вт\_li}^2 - D_{лаб\_2i-1}^2)$$

$$R_{oc\_i}^{скосов} = \left( \frac{p_{1i} - p_{2i}}{2} \right) \cdot \Delta F_{скосов\_i}$$

$$\Delta F_{скосов\_i} = \frac{\pi}{4} (D_{периф\_1i}^2 - D_{периф\_2i}^2)$$

$$R_{oc}^{полостей} = \sum p_{2i} \cdot F_{2i} - \sum p_{1i} \cdot F_{1i}$$

## Ротор турбины низкого давления:



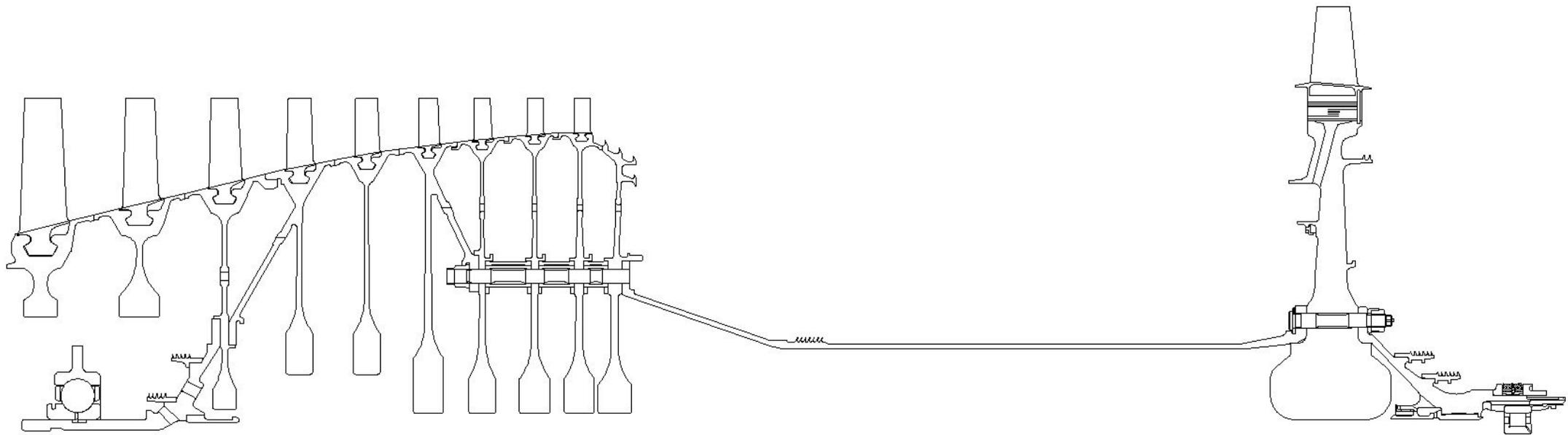
$$R_{\text{ос}}^{\text{ТНД}} = \sum_{i=1}^z R_{\text{ос}}^{\text{проточн}} + \sum_{i=1}^z R_{\text{ос}}^{\text{полостей}} + R_{\text{ос}}^{\text{банд}}$$

$$R_{\text{ос}}^{\text{проточ}} = p_2 \cdot F_2 - p_1 \cdot F_1 + \frac{G_{\text{РЛ\_ТНД}}}{g} (C_{2a} - C_{1a})$$

$$R_{\text{ос}}^{\text{полостей}} = \sum p_{1i} \cdot F_{1i} - \sum p_{2i} \cdot F_{2i}$$

$$R_{\text{ос}}^{\text{банд}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{банд}}^2 - D_{\text{периф\_1}}^2) \cdot p_{1\text{периф}}$$

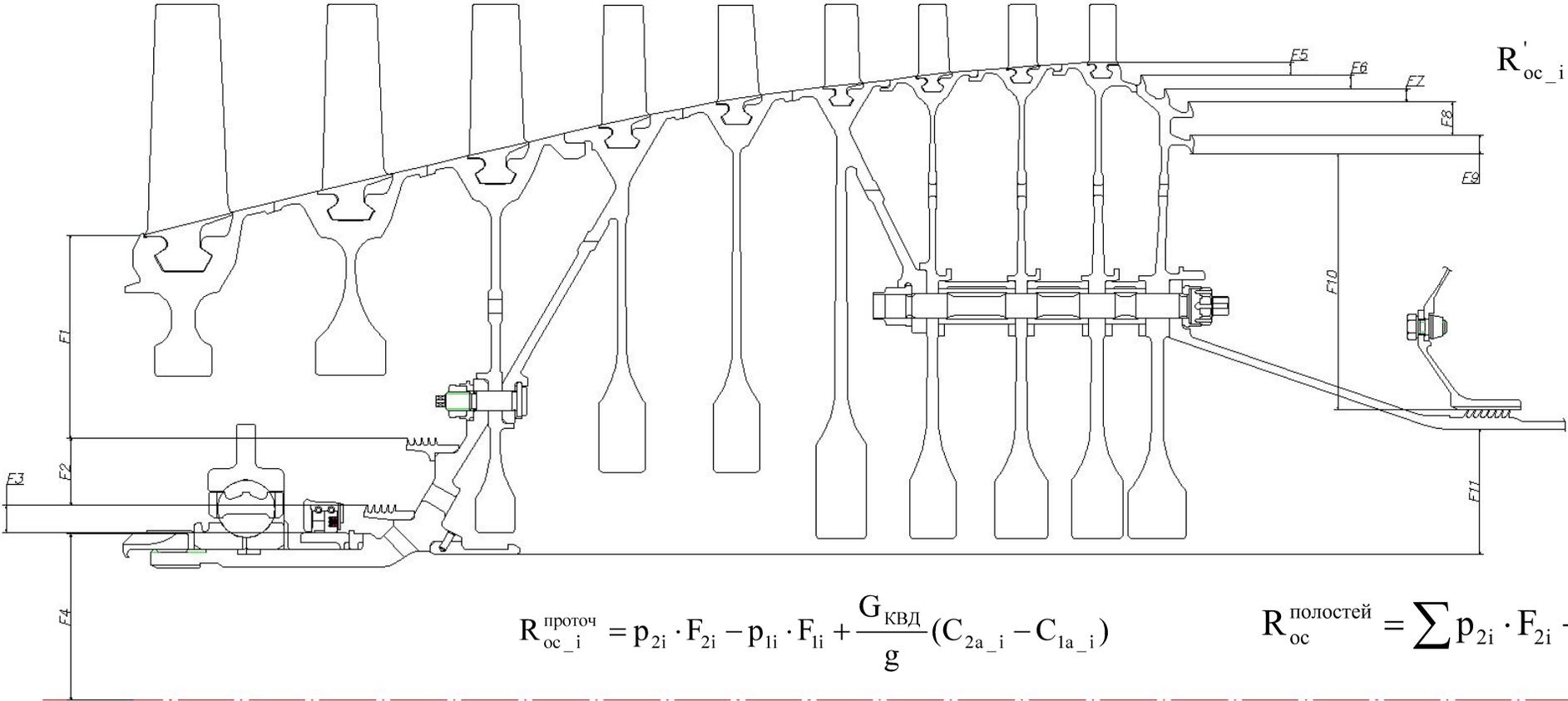
## Ротор высокого давления:



# Ротор компрессора высокого давления:

$$R_{oc}^{KBД} = \sum_{i=1}^z R_{oc\_i}^{проточн} + \sum_{i=1}^z R'_{oc\_i} + \sum_{i=1}^z R_{oc}^{полостей}$$

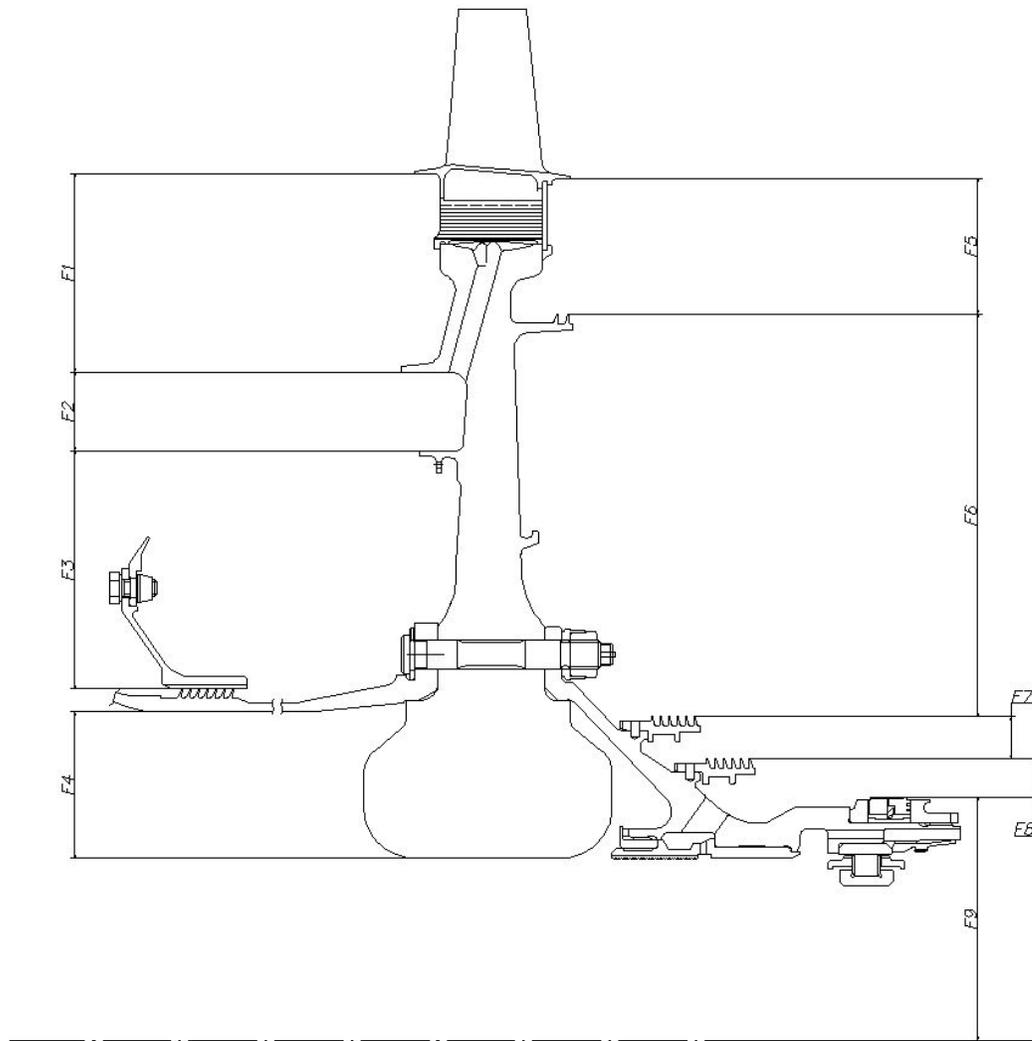
$$R'_{oc\_i} = \frac{\pi}{4} (D_{вт\_2i}^2 - D_{вт\_1i}^2)$$



$$R_{oc\_i}^{проточ} = p_{2i} \cdot F_{2i} - p_{1i} \cdot F_{1i} + \frac{G_{KBД}}{g} (C_{2a\_i} - C_{1a\_i})$$

$$R_{oc}^{полостей} = \sum p_{2i} \cdot F_{2i} - \sum p_{1i} \cdot F_{1i}$$

## Ротор турбины высокого давления:



$$R_{\text{ос}}^{\text{ТВД}} = \sum_{i=1}^z R_{\text{ос}}^{\text{проточн}} + \sum_{i=1}^z R_{\text{ос}}^{\text{полостей}}$$

$$R_{\text{ос}}^{\text{проточн}} = p_2 \cdot F_2 - p_1 \cdot F_1 + \frac{G_{\text{рл\_ТВД}}}{g} (C_{2a} - C_{1a})$$

$$R_{\text{ос}}^{\text{полостей}} = \sum p_{1i} \cdot F_{1i} - \sum p_{2i} \cdot F_{2i}$$

### Суммарная осевая сила на РВД и РНД:

$$R_{ос\_РНД} = R_{ос\_КНД} + R_{ос\_ТНД}$$

$$R_{ос\text{привед}}^{РНД} = \frac{R_{ос}^{РНД}}{P_{01}}$$

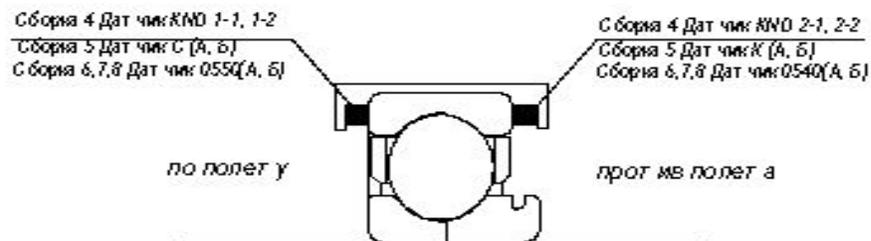
$$R_{ос\_РВД} = R_{ос\_КВД} + R_{ос\_ТВД}$$

$$R_{ос\text{привед}}^{РВД} = \frac{R_{ос}^{РВД}}{P_6}$$

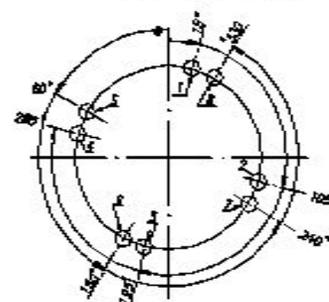
	Режимы			
	«ОР» (H=0; M=0)	«ОР» (H=0; M=1.143)	«ОР» (H=11; M=2.25)	«Кр» (H=11; M=0.8)
РНД	1021	938	1659	145
РВД	5093	5980	3063	1731

## Препарирование подшипников при экспериментальном замере осевых сил:

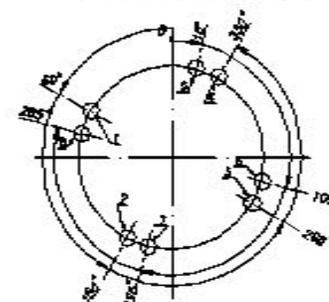
Подшипник КНД



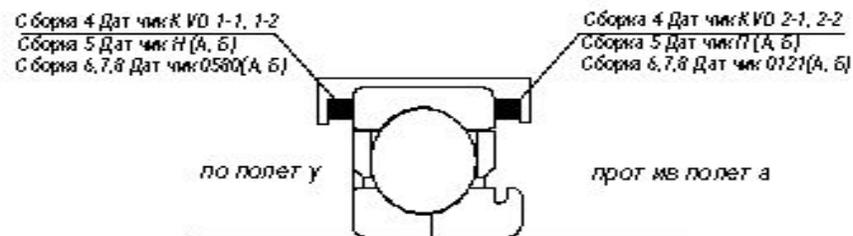
Датчики КНД по полету



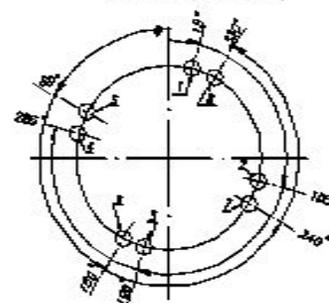
Датчики КНД против полета



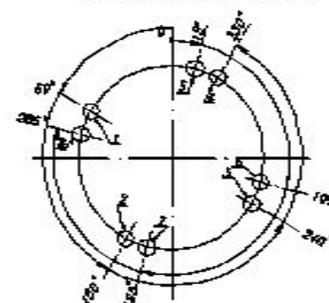
Подшипник КВД



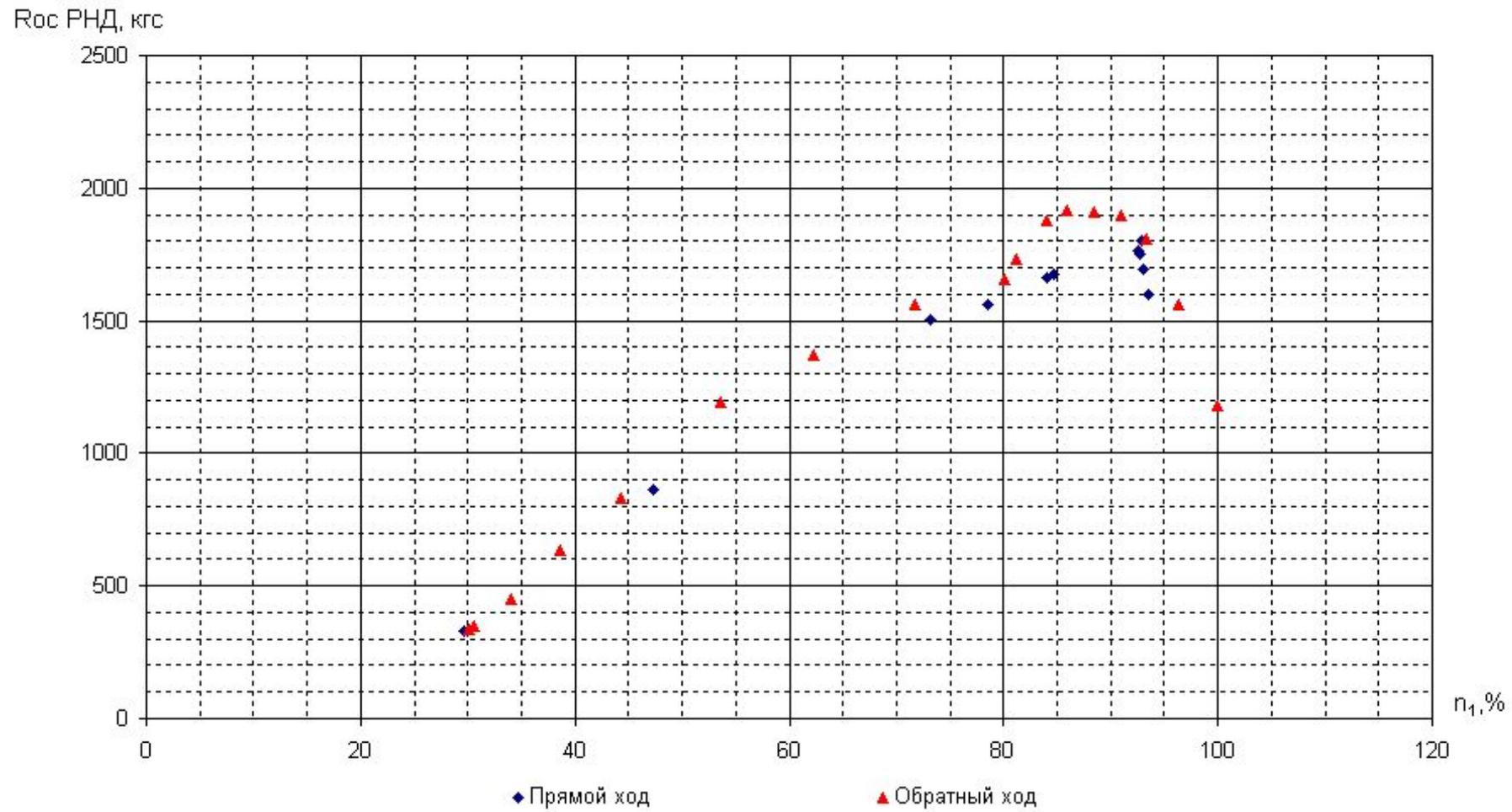
Датчики КВД по полету



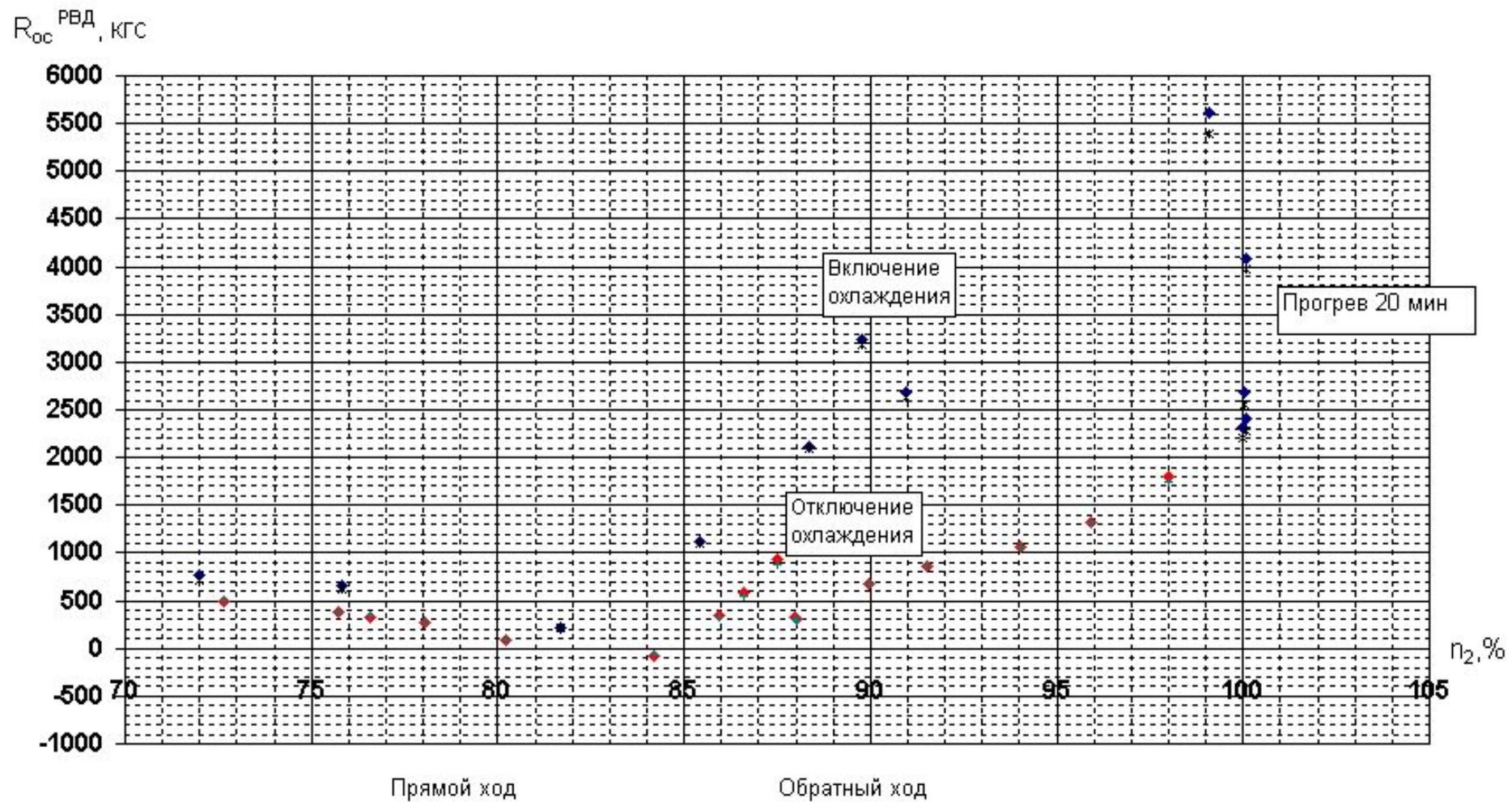
Датчики КВД против полета



## Экспериментальные замеры осевых сил:



## Экспериментальные замеры осевых сил:

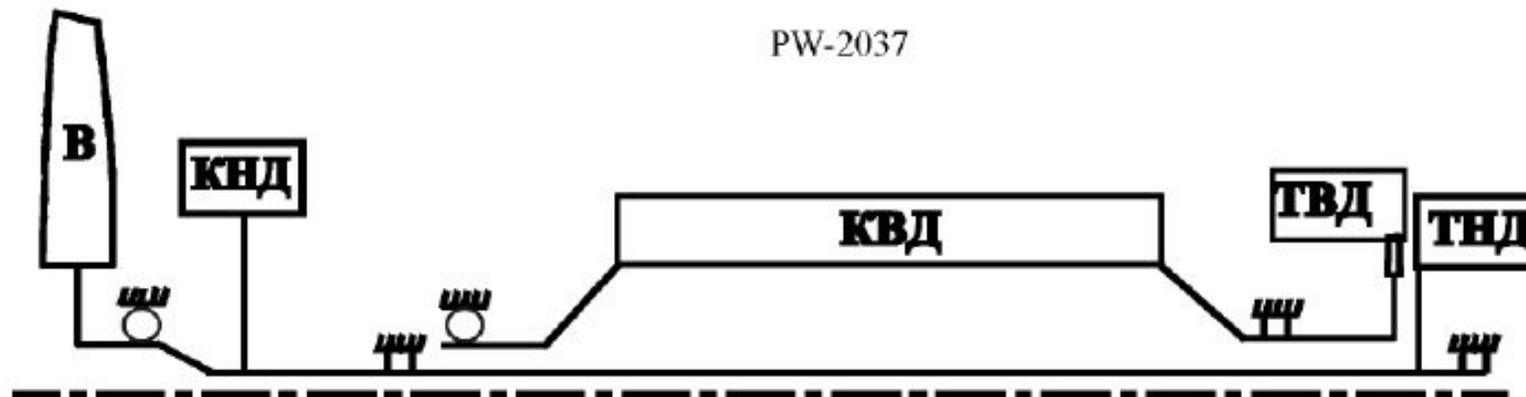
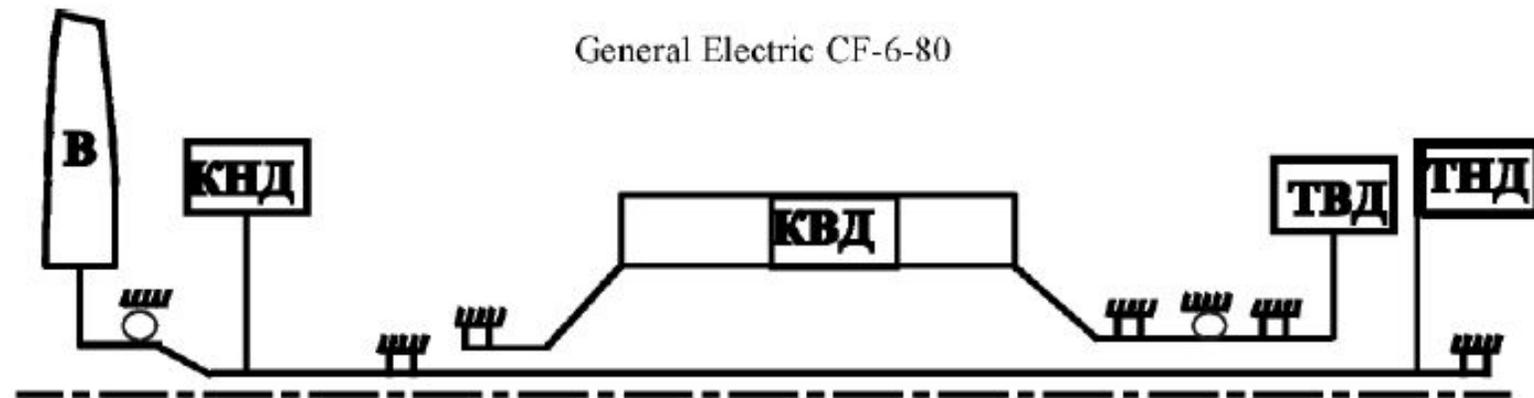


## Силовые схемы роторов:

Силовые схемы роторов отличаются следующим:

- Способом соединения дисков ступеней компрессора и турбины между собой;
- Числом и расположением опор;
- Способом соединения роторов турбины и компрессора для передачи крутящего момента и осевых сил;
- Способами фиксации осевого положения роторов, исключающего их смещение и нарушение осевых и радиальных зазоров между элементами ротора и корпуса двигателя.

Примеры силовых схем роторов:



Примеры силовых схем роторов:

