

Уравновешивание

Общие положения

Уравновешивание - введение в механизм новых сил инерции и моментов от сил инерции, действующих противоположно имеющимся неуравновешенным силам и моментам сил с целью их нейтрализации.

Уравновешенными называют силы и моменты сил, равнодействующие которых равны нулю.

Неуравновешенные силы передаются на опоры, т.е. они воздействуют на фундамент.

Неуравновешенные силы, постоянные по величине и направлению, не вызывают вибраций П.К.

Неуравновешенные силы, постоянные по величине и/или направлению, вызывают вибрации компрессора и фундамента.

Вибрации П.К. нежелательны по следующим причинам:

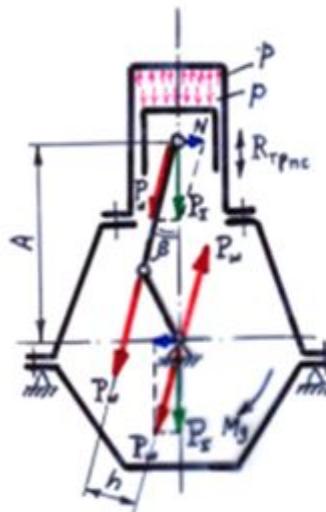
1. На вибрации П.К. и фундаментов расходуется до 5 % подводимой к П.К. энергии.
2. Вибрации П.К. и особенно фундаментов оказывают вредное влияние на обслуживающий персонал.
3. Вибрации могут вызвать ослабление креплений деталей и узлов.
4. Имеются специальные требования (ТУ, ГОСТы) на ограничение вибраций.

Уравновешиванию подлежат силы, переменные по величине и направлению.

Условия уравновешивания П.К. :

1. Поступательно движущиеся массы сосредоточены в точке на оси пальца поршня или крейцкопфа.
2. Неуравновешенные вращающиеся массы сосредоточены в точке на оси шатунной шейки коленчатого вала.
3. Угловая скорость коленвала постоянна.
4. Зазоры в сочленениях и податливость деталей не учитываются.

Действующие силы и моменты в П.К.



1. Силы давления газа P_r^{kp} и P_r^{ppr} замыкаются в станине.
2. Силы трения $R_{tpnc}^{\text{ппр}}$ и $R_{tpnc}^{\text{цил}}$ замыкаются в станине.
3. Неуравновешенные силы инерции J_{nc} и J_{fp} не замыкаются в станине и действуют на опоры и фундамент. Возможен резонанс этих сил и фундамента.

$$J = P_z - P_r \pm R_{tpnc}$$

4. Сила N дает опрокидывающий момент

$$M_{опр} = N \cdot A$$

5. Крутящий момент

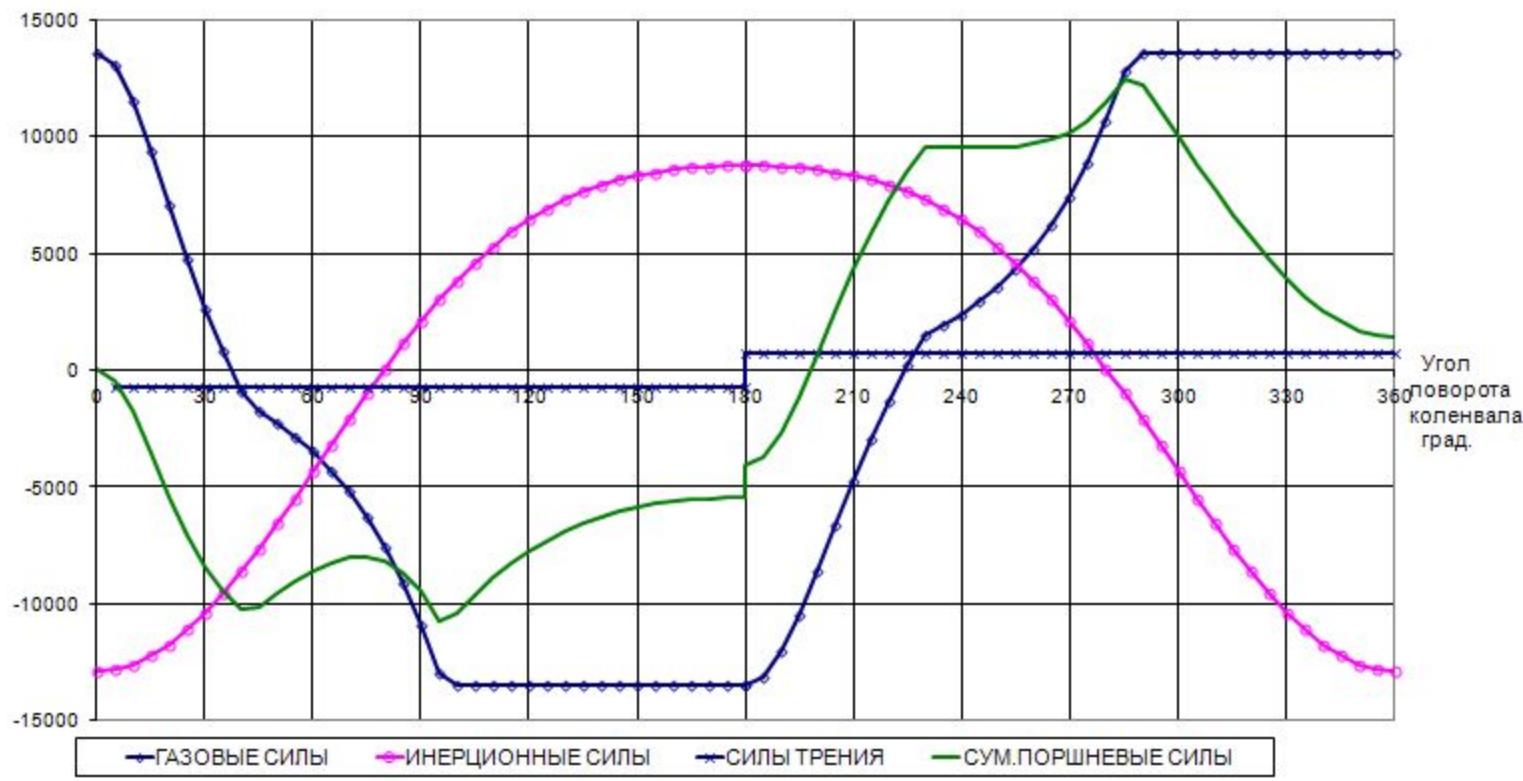
$$M_{кп} = P_w \cdot h$$

$$M_{кп} = P_w \cdot h = T \cdot R = P_z R \frac{\sin(4 + \beta)}{\cos \beta} \cong -M_{гб}.$$

$M_{кп}$ может замыкаться на жесткую связь между ПК и э/д

Силы, Н

Ряд I



- 6.** Силы инерции вращающихся неуравновешенных масс (касательные), возникающие при переменной угловой скорости вращения коленвала, обуславливают неуравновешенный момент вращения, действующий на фундамент

$$M_{\text{незр}}^{\text{инер}} = -J \cdot \varepsilon,$$

где J - момент инерции вращающихся масс,
 ε - угловое ускорение коленвала.

- 7.** Вес компрессора.
- 8.** Сила тяги и сила сопротивления вращению вентилятора

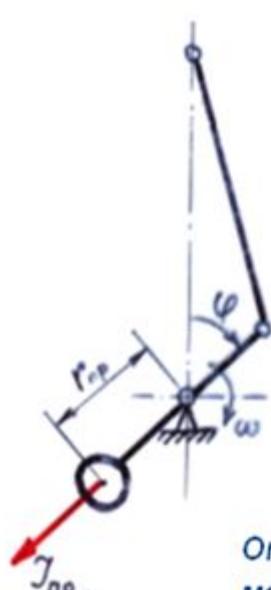
Уравновешиванию подлежат неуравновешенные силы инерции $J_{\text{не}}$ и $J_{\text{тв}}$, а также, моменты от сил $J_{\text{не}}$ и $J_{\text{тв}}$.

Для уравновешивания неуравновешенных сил (и моментов) вводятся массы, как правило, закрепленные на коленчатом валу, которые создают уравновешивающие силы инерции.

Силы инерции и моменты сил

инерции противовесов.

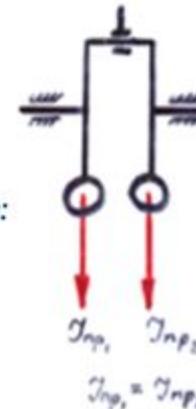
Противовесы в ПК закрепляются на валах:



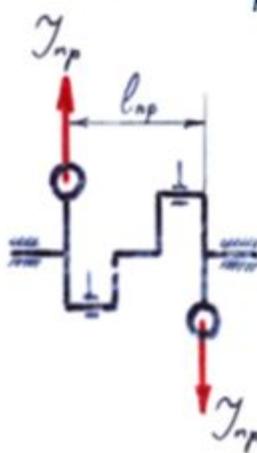
$$J_{np} = m_{np} \cdot \omega^2 \cdot r_{np}$$

Сила инерции противовеса:

- 1) постоянна по величине (не зависит от угла поворота);
- 2) направлена по радиусу от центра вращения;
- 3) вращается вместе с валом.



Отсюда, ясно, какие неуравновешенные силы могут быть уравновешены противовесами на коленчатом валу.



$$M_{J_{np}} = J_{np} \cdot \ell_{np} = m_{np} \cdot \omega^2 \cdot r_{np} \cdot \ell_{np}$$

Момент от сил инерции противовесов:

- 1) постоянен по величине (не зависит от φ);
- 2) плоскость действия $M_{J_{np}}$ вращается вместе с валом.

Основные этапы уравновешивания.

Этап I. Уравновешивание сил инерции неуравновешенных вращающихся масс.

Этап II. Уравновешивание моментов от сил инерции неуравновешенных вращающихся масс.

Этап III. Уравновешивание сил инерции I-го порядка от возвратно-поступательно движущихся масс.

Этап IV. Уравновешивание моментов от сил инерции I-го порядка возвратно-поступательно движущихся масс.

Этап V. Уравновешивание сил инерции II-го порядка от возвратно-поступательно движущихся масс.

Этап VI. Уравновешивание моментов от сил инерции II-го порядка возвратно-поступательно движущихся масс.

Примечание: могут быть силы и моменты высших порядков

Этап VII. Определение общей массы противовесов, используя принцип суперпозиции.

Этап VIII. Подведение итогов: значения сил и моментов, оставшихся неуравновешенными, их направление и плоскости действия.

Порядок выполнения этапов уравновешивания.

Этапы с I по VI могут быть выполнены по единой схеме, а именно в следующем порядке:

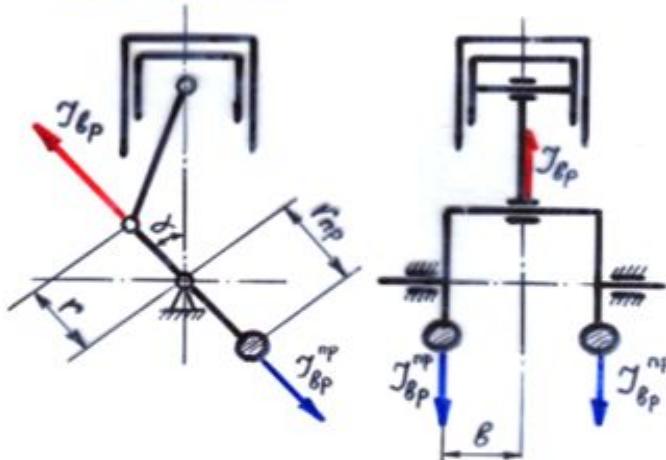
- 1.** Рисуется схема компрессора.
- 2.** Определяется направление действия сил (направление и плоскость действия моментов от сил) и наносится на схему компрессора.
- 3.** Для каждой силы (момента) выписывается формула, по которой определяют её (его) значение.
- 4.** Анализируется возможность уравновешивания сил инерции или момента от сил инерции силой инерции противовесов или моментов от сил инерции противовесов.
- 5.** Если неуравновешенные силы инерции (момент от этих сил) нельзя уравновесить полностью, то определяются величины оставшихся неуравновешенными сил (моментов) и их направление (плоскость действия).

Уравновешивание сил инерции неуравновешенных вращающихся масс.

1. Компрессоры с одним коленом на валу.

Этап I. Уравновешивание сил инерции вращающихся масс.

① Рисуем схему



② Наносим на схему направления действия сил



J_{ep} всегда действует по радиусу кривошипа

③ Записываем формулу для J_{ep}

$$J_{ep} = m_{ep} \cdot \omega^2 \cdot r \quad \text{т.е. } J_{ep} = \text{Const.}$$

④ Анализируем возможности уравновешивания неуравновешенных сил силами инерции противовесов на коленчатом валу.

Силы инерции противовеса, закрепленного на коленвалу

$$J_{np\ell_p} = m_{np} \cdot \omega^2 \cdot r_{np}. \quad J_{np\ell_p} = \text{const}$$

$J_{np\ell_p}$ постоянна по значению, т.е. не зависит от φ .
(Так же как сила J_{ℓ_p} !)

Направление действия силы $J_{np\ell_p}$ вращается в пространстве так же как и сила J_{ℓ_p} .
(Сила $J_{np\ell_p}$ может быть направлена против J_{ℓ_p} !)

Подберем $m_{np\ell_p}$, при которой

$$|J_{\ell_p}| = 2 |J_{np\ell_p}|.$$

Имеем

$$m_{\ell_p} \cdot \omega^2 \cdot r = 2 m_{np\ell_p} \cdot \omega^2 \cdot r_{np}.$$

Отсюда

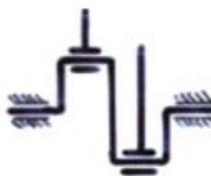
$$m_{np\ell_p} = \frac{1}{2} m_{\ell_p} \cdot \frac{r}{r_{np}}$$



Неуравновешенные силы инерции вращающихся масс всегда можно уравновесить полностью силами инерции противовесов, закрепленных на коленвалу.

- ⑤ Неуравновешенных сил от m_{ℓ_p} после уравновешивания нет.

2. Компрессоры с двумя коленами на валу.

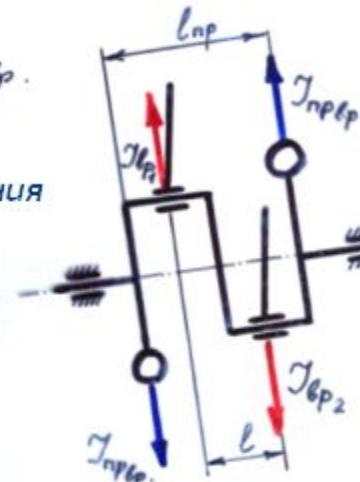


Этап I. Уравновешивание \mathcal{T}_{bp} .

- ① Рисуем схему
- ② Наносим на схему направления действия сил \mathcal{T}_{bp}
- ③ Записываем формулы для определения сил \mathcal{T}_{bp}

$$\mathcal{T}_{bp_1} = m_{bp_1} \cdot \omega^2 \cdot r$$

$$\mathcal{T}_{bp_2} = m_{bp_2} \cdot \omega^2 \cdot r$$



- ④ Анализируем систему.

При $m_{bp_1} = m_{bp_2}$ $|\mathcal{T}_{bp_1}| = |\mathcal{T}_{bp_2}|$

Силы \mathcal{T}_{bp_1} и \mathcal{T}_{bp_2} действуют друг против друга.
Т.о. силы \mathcal{T}_{bp_1} и \mathcal{T}_{bp_2} уравновешиваются друг друга,
т.е. уравновешиваются.

- ⑤ Подведение итогов:

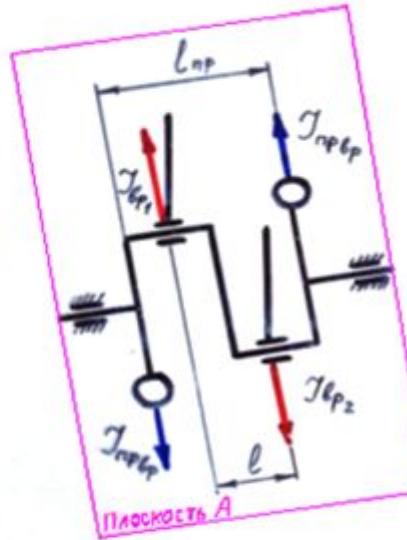
а) Силы \mathcal{T}_{bp_1} и \mathcal{T}_{bp_2} уравновешиваются, т.е.
нет неуравновешенных сил от m_{bp}

б) Силы \mathcal{T}_{bp_1} и \mathcal{T}_{bp_2} создают момент
неуравновешенный.

Этап II. Уравновешивание неуравновешенных моментов от сил \mathcal{T}_{fp} .

- ① Рисуем схему
- ② Наносим на схему плоскость действия момента от сил \mathcal{T}_{fp} .
- ③ Записываем формулу для определения момента (неуравновешенного) от сил \mathcal{T}_{fp} .

$$M_{\mathcal{T}_{\text{fp}}} = \mathcal{T}_{\text{fp}} \cdot l = m_{\text{fp}} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot l$$



Момент $M_{\mathcal{T}_{\text{fp}}}$ постоянен по величине и действует в плоскости кривошипов (вращается вместе с коленвалом).

- ④ Анализируем возможности уравновешивания $M_{\mathcal{T}_{\text{fp}}}$ моментом от сил инерции противовесов.

Силы $\mathcal{T}_{\text{pr}fp}$ постоянны по величине

$$\mathcal{T}_{\text{pr}fp} = m_{\text{pr}fp} \cdot \omega^2 \cdot r_{\text{pr}}$$

Момент от сил $\mathcal{T}_{\text{pr}fp} = \text{const.}$

$$M_{\mathcal{T}_{\text{pr}fp}} = \mathcal{T}_{\text{pr}fp} \cdot l_{\text{np}} = m_{\text{pr}fp} \cdot \omega^2 \cdot r_{\text{pr}} \cdot l_{\text{np}}$$

и может быть в плоскости А

$$|M_{\mathcal{T}_{\text{fp}}}| = |M_{\mathcal{T}_{\text{pr}fp}}|$$

$$m_{\text{fp}} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot l = m_{\text{pr}fp} \cdot \omega^2 \cdot r_{\text{pr}} \cdot l_{\text{np}}$$

Отсюда

$$m_{np\ell_p} = m_{\ell_p} \cdot \frac{r \cdot l}{r_{np} \cdot l_{np}} \quad \dots (A)$$

Если массы противовесов выбраны по уравнению (A) и противовесы закреплены на валу соответствующим образом, то момент от сил $\tau_{np\ell_p}$ полностью уравновешивают неуравновешенный момент от сил τ_{ℓ_p} .



Момент (неуравновешенный) от сил τ_{ℓ_p} , т.е. от m_{ℓ_p} , всегда может быть полностью уравновешен моментом от сил инерции противовесов, закрепленных на коленвалу.

Уравновешивание однорядного поршневого компрессора

Этап I. Уравновешивание сил инерции неуравновешенных
вращающихся масс.

Силы \mathcal{I}_y всегда можно уравновесить силами
инерции противовесов, закрепленных на колен-
валу (см. ранее.)

Этап II. Уравновешивание моментов от сил инерции
вращающихся масс.

Ранее было показано, что в П.К. с одноколенным
валом, моментов от сил инерции вращающихся
масс нет.

Этап III. Уравновешивание сил инерции первого порядка
от поступательно движущихся масс.

Уравновешивание производим по рассмотренной
ранее последовательности.

- ① Рисуем схему компрессора.
- ② Наносим направление действия неуравновешенной силы \bar{F}_{nc}^{\perp} .
- ③ Выписываем формулу для определения \bar{F}_{nc}^{\perp} .

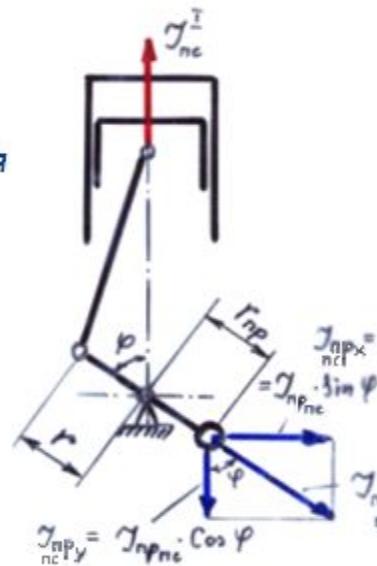
$$\bar{F}_{nc}^{\perp} = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \cos \varphi$$

- ④ Анализируем возможности уравновешивания:

Сила \bar{F}_{nc}^{\perp} - переменна по величине (зависит от φ)
 - направление ее действия вертикально
 (по оси цилиндра) и жестко
 ориентировано в пространстве

Сила \bar{F}_{npnc} - постоянна по величине,
 - направлена по кривошипу, т.е. вращается
 в пространстве вместе с коленвалом.

Вывод: Полностью уравновесить \bar{F}_{nc}^{\perp} силой инерции
 противовесов, закрепленных на валу нельзя.



Предположим, что мы подберем массу противовесов из условия

$$|\gamma_{nc}^I|_{max} = |2\gamma_{npnc}|,$$

т.е.

$$m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r = 2 \cdot m_{npnc} \cdot \omega^2 \cdot r_{np}$$

Тогда

$$\begin{aligned} 2\gamma_{npnc_y} &= 2\gamma_{npnc} \cdot \cos \varphi = \\ &= m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi, \end{aligned}$$

т.е.

$$|2\gamma_{npnc_y}| = |\gamma_{nc}^I|$$

В вертикальной плоскости сила γ_{nc}^I уравновешивается силой инерции противовесов.

Внимание!

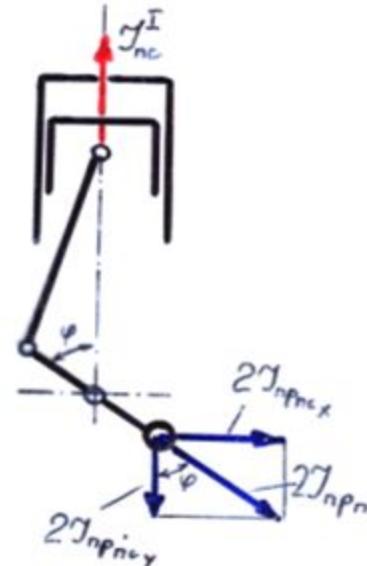
Остаётся в этом случае неуравновешенная сила $2\gamma_{npnc_x}$.

$$2\gamma_{npnc_x} = 2\gamma_{npnc} \cdot \sin \varphi = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \varphi.$$

Сила $2\gamma_{npnc_x}$ действует в горизонтальной плоскости и смещена по фазе.

$$|2\gamma_{npnc_x}|_{max} = |\gamma_{nc}^I|$$

В таком случае используют "частичное" уравновешивание



"Частичное" уравновешивание - перевод части неуравновешенной силы в другую плоскость, в перпендикулярное направление.

В вертикальных компрессорах в горизонтальное направление переводят 20 ... 30% неуравновешенной вертикальной силы.

В горизонтальных компрессорах в вертикальное направление переводят 30 ... 50% от горизонтальной неуравновешенной силы.

Для горизонтальных компрессоров

$$|(0,3 \dots 0,5) \cdot \frac{m_{nc}^2}{r_{nc}}|_{MAX} = |2 \cdot m_{np_{nc}}|$$

$$(0,3 \dots 0,5) \cdot m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r = 2m_{np_{nc}} \cdot \omega^2 \cdot r_{np}$$

откуда масса одного противовеса

$$m_{np_{nc}} = (0,15 \dots 0,25) m_{nc} \cdot \frac{2}{Z_{np}}$$

Для вертикальных компрессоров

$$|(0,2 \dots 0,3) \cdot \frac{m_{nc}^2}{r_{nc}}|_{MAX} = |2 \cdot m_{np_{nc}}|$$

$$(0,2 \dots 0,3) \cdot m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r = 2m_{np_{nc}} \cdot \omega^2 \cdot r_{np}$$

откуда масса одного противовеса

$$m_{np_{nc}} = (0,1 \dots 0,15) \cdot m_{nc} \cdot \frac{r}{r_{np}}$$

⑤ Подведение итогов III этапа.

В вертикальных компрессорах в вертикальной плоскости остается неуравновешенной сила

$$(0,7 \div 0,8) \cdot \mathcal{I}_{nc}^{\bar{I}} = (0,7 \div 0,8) \cdot m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi$$

в горизонтальной плоскости остается неуравновешенная сила

$$(0,2 \div 0,3) \cdot \mathcal{I}_{nc}^{\bar{I}} = (0,2 \div 0,3) \cdot m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \varphi.$$

В горизонтальных компрессорах в горизонтальной плоскости остается неуравновешенной сила

$$(0,5 \div 0,7) \cdot \mathcal{I}_{nc}^{\bar{I}} = (0,5 \div 0,7) m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi$$

в вертикальной плоскости остается неуравновешенная сила

$$(0,3 \div 0,5) \cdot \mathcal{I}_{nc}^{\bar{I}} = (0,3 \div 0,5) m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \varphi.$$

Этап IV Уравновешивание моментов от сил $\mathcal{I}_{nc}^{\bar{I}}$

Моментов от сил $\mathcal{I}_{nc}^{\bar{I}}$ нет

Этап V.

Уравновешивание сил инерции второго порядка поступательно движущихся масс.

① Рисуем схему.

② Наносим линию действия неуравновешенной силы.

③ Записываем формулу

$$\bar{\gamma}_{nc}^{\bar{z}} = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi$$



④ Анализируем возможность уравновешивания неуравновешенной силы.

Сила $\bar{\gamma}_{nc}^{\bar{z}}$ - переменна по величине (зависит от φ), с частотой 2ω .

- направлена по вертикали, т.е. в жестко закрепленном направлении

Сила γ_{np} - постоянна по величине,

- направлена по кривошипу,
направление действия изменяется с частотой ω .

Внимание: Изменение направления γ_{np} происходит с частотой в два раза меньшей, чем частота изменения величины $\bar{\gamma}_{nc}^{\bar{z}}$. Поэтому, невозможно даже "частичное" уравновешивание.

Этап VI. Уравновешивание моментов от сил инерции второго порядка .

Момента от сил $\mathcal{I}_{nc}^{\ddot{x}}$ нет

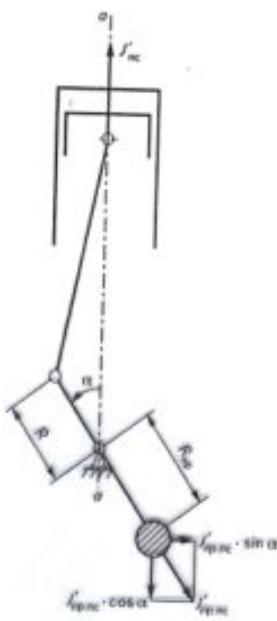
Этап VII. Определение суммарной массы противовесов.

Общая масса каждого противовеса

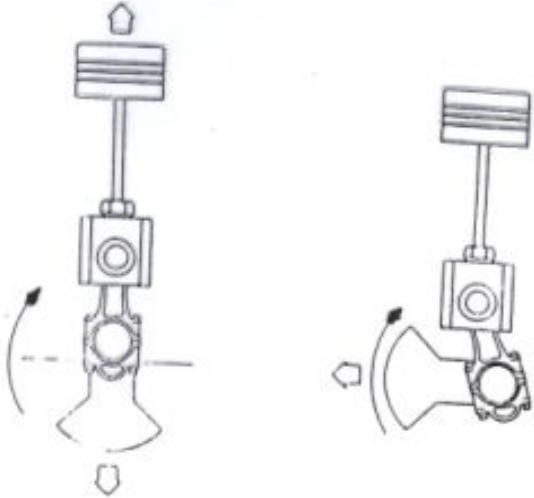
$$m_{np} = m_{np\ell_p} + m_{npn_c}$$

Этап VIII. Подведение итогов: определение оставшихся неуравновешенными силовых факторов.

a)



b)



Уравновешивание двухрядного П.К. с углом раз渲а колен 180°



Этап I. Уравновешивание сил инерции вращающихся масс.

Это было рассмотрено нами ранее.

Этап II. Уравновешивание моментов от сил инерции вращающихся масс.

Это было рассмотрено нами ранее.

Этап III. Уравновешивание сил γ_{nc}^I

- ① Рисуем схему П.К.
- ② Наносим линии действия сил
- ③ Запишем уравнения, определяющие неуравновешенные силы.

$$\gamma_{nc_1}^I = m_{nc_1} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_1$$

$$\begin{aligned}\gamma_{nc_2}^I &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_2 = \\ &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\varphi_1 + 180^\circ) = \\ &= -m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_1\end{aligned}$$

$$\gamma_{nc_2}^I = -m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_2$$

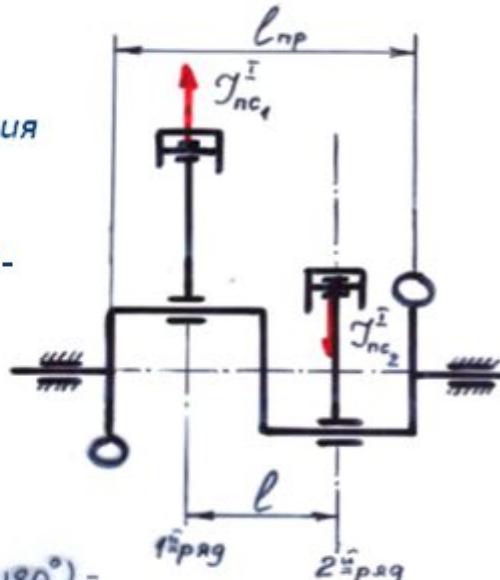
- ④ Анализируем возможность уравновешивания сил γ_{nc}^I

Силы $\gamma_{nc_1}^I$ и $\gamma_{nc_2}^I$ равны по величине, если $m_{nc_1} = m_{nc_2}$

$$|\gamma_{nc_1}^I| = |\gamma_{nc_2}^I|$$

Силы $\gamma_{nc_1}^I$ и $\gamma_{nc_2}^I$ действуют навстречу друг другу.

Выход: Силы $\gamma_{nc_1}^I$ и $\gamma_{nc_2}^I$ уравновешиваются, если $m_{nc_1} = m_{nc_2}$.



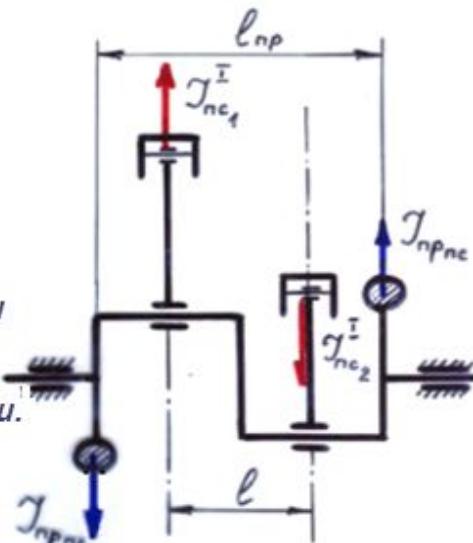
Этап IV. Уравновешивание моментов от \bar{J}_{nc} .

1 Рисуем схему П.К.

2 Определяем действие сил и плоскость действия момента.

Момент от сил \bar{J}_{nc} действует в плоскости осей цилиндров, т.е. в вертикальной плоскости.

3 Запишем формулу для определения неуравновешенного момента



$$M_{\bar{J}_{nc}} = \bar{J}_{nc} \cdot l = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot z \cdot l \cdot \cos \varphi$$

4 Анализируем возможность уравновешивания неуравновешенного момента от сил \bar{J}_{nc} моментом сил инерции противовесов.

$M_{\bar{J}_{np}}$ - переменен и меняется с частотой Π_0 ,
- всегда находится в вертикальной плоскости;

$M_{\bar{J}_{nc}}$ - постоянен (не зависит от φ),
- вращается с плоскостью колен с частотой Π_0 .

Имеем случай аналогичный однорядному П.К.
(там - силы, здесь - моменты).

Возможно "частичное" уравновешивание $M_{\bar{J}_{nc}}$.

"Частичное" уравновешивание неуравновешенного момента - перевод части неуравновешенного момента в другую плоскость.

В вертикальных компрессорах переводят в горизонтальную плоскость 0,15...0,5 неуравновешенного момента от сил J_{nc}^T .

В горизонтальных компрессорах переводят в вертикальную плоскость 0,5 от момента $M_{J_{nc}^T}$.

При этом массу каждого противовеса определяют из равенства

$$(0,15 \div 0,5) / M_{J_{nc}^T} \Big|_{\max} = M_{J_{npnc}}$$

или

$$(0,15 \div 0,5) \cdot m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot l = m_{npnc} \cdot \omega^2 \cdot r_{np} \cdot l_{np} .$$

Откуда масса каждого из противовесов

$$m_{npnc} = (0,15 \div 0,5) \cdot m_{nc} \cdot \frac{r}{r_{np}} \cdot \frac{l}{l_{np}}$$

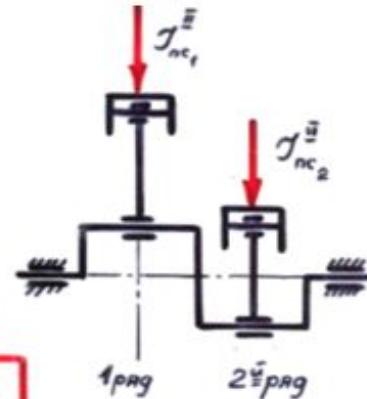
- ⑤ **Вывод этапа:** что осталось неуравновешенным, величину неуравновешенных моментов в горизонтальной и вертикальной плоскостях, частоту их изменения - определить **самостоятельно.**

Этап V. Уравновешивание неуравновешенных сил $\gamma_{nc}^{\bar{\pi}}$.

① Рисуем схему

② Наносим линии действия неуравновешенных сил

③ Записываем формулы для определения сил $\gamma_{nc}^{\bar{\pi}}$.



$$\gamma_{nc_1}^{\bar{\pi}} = m_{nc_1} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_i$$

$$\begin{aligned}\gamma_{nc_2}^{\bar{\pi}} &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_2 = \\ &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2(\varphi_i + 180^\circ) = \\ &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos(2\varphi_i + 360^\circ) = \\ &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_i\end{aligned}$$

$$\gamma_{nc_{\Sigma}}^{\bar{\pi}} = m_{nc_{\Sigma}} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_i$$

④ Вывод по этапу:

Силы $\gamma_{nc}^{\bar{\pi}}$ и $\gamma_{nc}^{\bar{\pi}}$ складываются, т.е. действует неуравновешенная сила $\gamma_{nc_{\Sigma}}^{\bar{\pi}}$.

$$\gamma_{nc_{\Sigma}}^{\bar{\pi}} = 2 \cdot m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_i$$

Эту силу $\gamma_{nc_{\Sigma}}^{\bar{\pi}}$ нельзя уравновесить даже "частично" противовесами на коленвалу, т.к. изменение $\gamma_{nc_{\Sigma}}^{\bar{\pi}}$ происходит в два раза чаще, чем изменение направления γ_{pr} .

Этап VI.

Уравновешивание момента от сил инерции второго порядка

Момента от сил \bar{J}_{nc}^{\perp} нет.

Этап VII.

Определение общей массы противовесов.

Масса каждого противовеса

$$m_{np} = m_{np_{ep}} + m_{np_{nc}}$$

Этап VIII.

Фиксация значений и направлений,
а также частоты изменения
неуравновешенных силовых факторов,
оставшихся после уравновешивания.

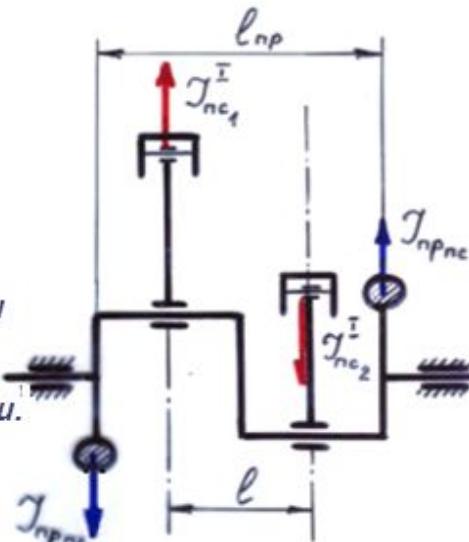
Этап IV. Уравновешивание моментов от $\mathcal{I}_{nc}^{\bar{I}}$.

1 Рисуем схему П.К.

2 Определяем действие сил и плоскость действия момента.

Момент от сил $\mathcal{I}_{nc}^{\bar{I}}$ действует в плоскости осей цилиндров, т.е. в вертикальной плоскости.

3 Запишем формулу для определения неуравновешенного момента



$$M_{\mathcal{I}_{nc}^{\bar{I}}} = \mathcal{I}_{nc}^{\bar{I}} \cdot l = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot z \cdot l \cdot \cos \varphi$$

4 Анализируем возможность уравновешивания неуравновешенного момента от сил \mathcal{I}_{nc} моментом сил инерции коленчатого вала.

Момент сил инерции коленчатого вала меняется с частотой Π_0 , т.е. вращается в вертикальной плоскости; величина момента зависит от φ), вращается с частотой колен с частотой Π_0 .

Коленчатый вал имеет одинаковый однорядному П.К.

(такие же неуравновешенные моменты).

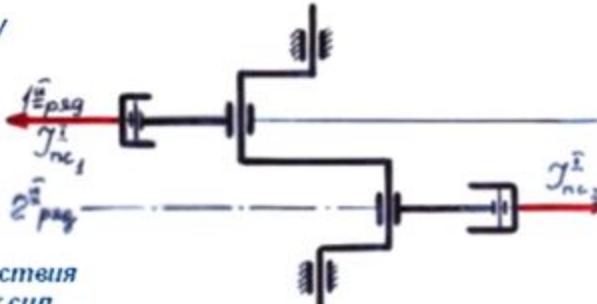
Возможна "однорядное" уравновешивание $M_{\mathcal{I}_{nc}^{\bar{I}}}$.

Уравновешивание оппозитных компрессоров.

Этапы I и II. Рассмотрены ранее.

Этап III. Уравновешивание \bar{M}_{nc}^I .

① Рисуем схему



② Наносим линии действия неуравновешенных сил

③ Запишем формулы:

$$\bar{M}_{nc_1}^I = m_{nc_1} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_1.$$

$$\bar{M}_{nc_2}^I = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_2 = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos (\varphi_1 + 360^\circ) =$$

$$\bar{M}_{nc_2}^I = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_1$$

④ При $m_{nc_1} = m_{nc_2}$ имеем $|\bar{M}_{nc_1}^I| = |\bar{M}_{nc_2}^I|$.

Направлены силы $\bar{M}_{nc_2}^I$ и $\bar{M}_{nc_1}^I$ против друг друга.

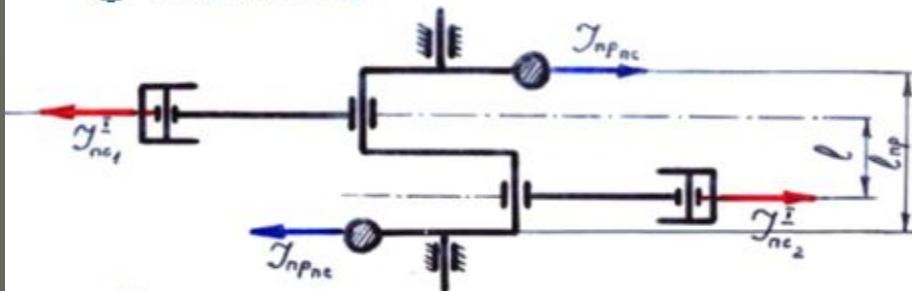
Силы $\bar{M}_{nc_1}^I$ и $\bar{M}_{nc_2}^I$ уравновешиваются, если

$$m_{nc_1} = m_{nc_2}$$

Силы $\bar{M}_{nc_1}^I$ и $\bar{M}_{nc_2}^I$ образуют момент.

Этап IV. Уравновешивание момента от силы

① Рисуем схему



② Наносим линии действия сил и определяем плоскость действия момента от $\mathcal{M}_{\mathcal{T}_{nc}^I}$

$M_{\mathcal{T}_{nc}^I}$ действует в горизонтальной плоскости, плоскости осей цилиндров.

③ Запишем формулу для определения $M_{\mathcal{T}_{nc}^I}$

$$M_{\mathcal{T}_{nc}^I} = \mathcal{T}_{nc}^I \cdot l = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot l \cdot \cos \varphi$$

④ Анализируем возможности уравновешивания
Момент $M_{\mathcal{T}_{nc}^I}$ - изменяется с изменением φ
с частотой N_O ,

- плоскость действия $M_{\mathcal{T}_{nc}^I}$ жестко закреплена (горизонтально)

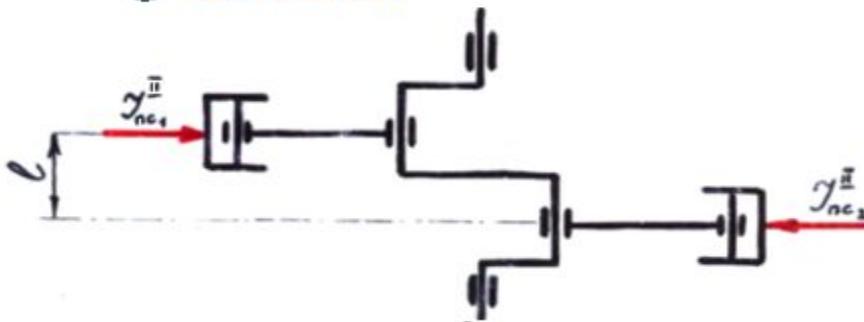
Момент от сил \mathcal{T}_{np} - постоянен по величине,

- плоскость действия вращается вместе с коленвалом с частотой N_O ,

Вывод: $M_{\mathcal{T}_{nc}^I}$ может быть "частично" уравновешен моментом от сил инерции противовесов на коленвалах

Этап V. Уравновешивание сил $\mathcal{T}_{nc}^{\bar{\Sigma}}$.

① Рисуем схему



② Наносим линии действия неуравновешенных сил $\mathcal{T}_{nc}^{\bar{\Sigma}}$

③ Запишем формулы, определяющие $\mathcal{T}_{nc_1}^{\bar{\Sigma}}$ и $\mathcal{T}_{nc_2}^{\bar{\Sigma}}$

$$\mathcal{T}_{nc_1}^{\bar{\Sigma}} = m_{nc_1} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1$$

$$\begin{aligned}\mathcal{T}_{nc_2}^{\bar{\Sigma}} &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2(\varphi_1 + 360^\circ) = \\ &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1,\end{aligned}$$

$$\mathcal{T}_{nc_2}^{\bar{\Sigma}} = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1$$

④ Анализируем возможности уравновешивания.
 $\mathcal{T}_{nc_1}^{\bar{\Sigma}}$ и $\mathcal{T}_{nc_2}^{\bar{\Sigma}}$ равны по величине, направлены
друг против друга, т.е. полностью
уравновешиваются.

Вывод: неуравновешенным остается момент
от сил $\mathcal{T}_{nc}^{\bar{\Sigma}}$

Этап VI. Уравновешивание момента от сил $\mathcal{T}_{nc}^{\bar{x}}$.

Нам уже известно, что нельзя (даже частично) уравновесить силы и моменты от сил инерции второго порядка противовесами на коленвалу, т.к. частота вращения коленвала n_o в два раза меньше частоты изменения сил $\mathcal{T}_{nc}^{\bar{x}}$ и момента от этих сил.

Момент от сил $\mathcal{T}_{nc}^{\bar{x}}$ остаётся неуравновешенным.

Значение этого момента

$$M_{\mathcal{T}_{nc}^{\bar{x}}} = \mathcal{T}_{nc}^{\bar{x}} \cdot l = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_r \cdot l \cdot \cos 2\varphi$$

Момент от сил $\mathcal{T}_{nc}^{\bar{x}}$ действует в плоскости осей цилиндров, т.е. в горизонтальной плоскости.

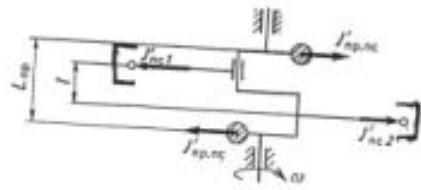
Этап VII. Определение суммарной массы $m_{np_{\Sigma}}$

$$m_{np_{\Sigma}} = m_{np_{ep}} + m_{np_{nc}}$$

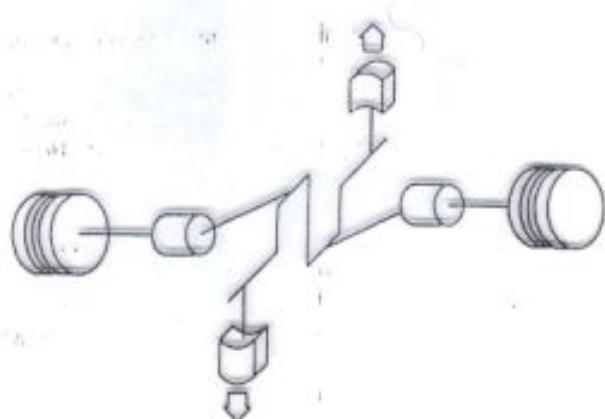
Этап VIII. Фиксирование оставшихся неуравновешенными сил и моментов (значения их, направления и плоскости их действия, частоты изменений)

самостоятельно!

a)

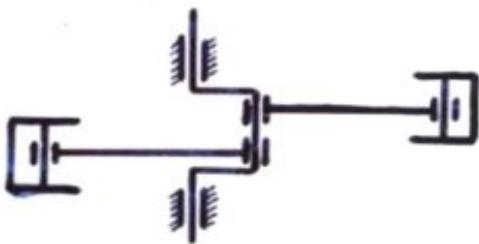


δ)

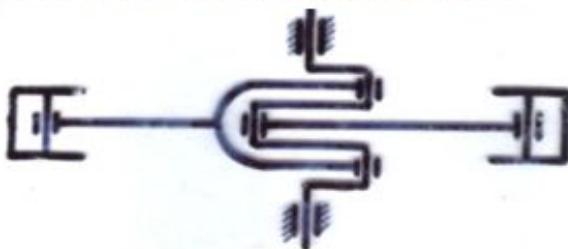


Специальные схемы оппозитных компрессоров

1. П.К. с совпадающим движением поршней.



2. П.К. с вильчатым шатуном



3. Оппозитная "тройка"



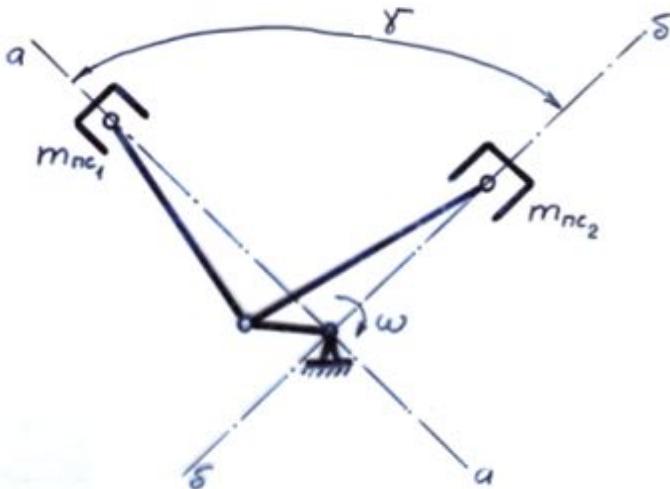
$$m_{nc_1} = m_{nc_2} + m_{nc_3}$$

$$m_{nc_2} = m_{nc_3}$$

Уравновешивание V-образных компрессоров.

Общая постановка вопроса.

1. Общая схема V-образного П.К.



γ - угол раз渲ала цилиндров

- 2 L-образный П.К. есть частный случай V-образного П.К.

3. Принципиальные случаи:

- | | | |
|---|--------------------------|------------------------|
| ① | $m_{nc_1} = m_{nc_2}$ | $\gamma = 90^\circ$ |
| ② | $m_{nc_1} \neq m_{nc_2}$ | $\gamma = 90^\circ$ |
| ③ | $m_{nc_1} = m_{nc_2}$ | $\gamma \neq 90^\circ$ |
| ④ | $m_{nc_1} \neq m_{nc_2}$ | $\gamma \neq 90^\circ$ |

Уравновешивание V-образного компрессора

$(m_{nc_1} = m_{nc_2}; \gamma = 90^\circ)$

Этап I. Уравновешивание сил инерции вращающихся масс

Такое уравновешивание рассмотрено ранее.

Особенность: При определении значения следует учитывать, что на одном колене вала расположено два шатуна.



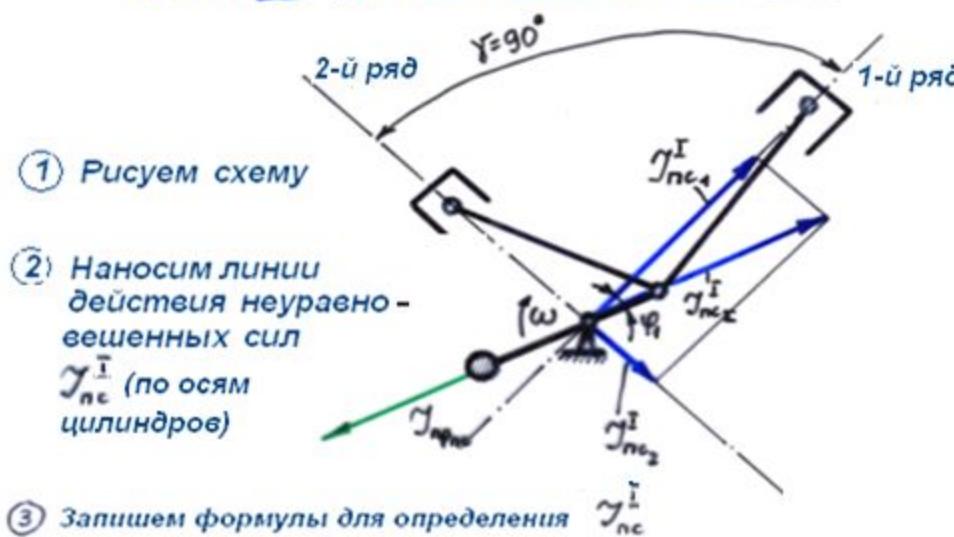
Поэтому

$$M_{fp} = m_{шейка} + m_{шест.} \cdot \frac{\rho}{r} + 2 \cdot \underline{\underline{\frac{2}{3} m_{шат.}}}$$

Этап II. Уравновешивание моментов сил инерции вращающихся масс

Моментов от M_{fp} нет.

Этап III. Уравновешивание сил $\bar{\gamma}_{nc}$



$$\bar{\gamma}_{nc_1}^I = m_{nc_1} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_1$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + 90^\circ$$

$$\bar{\gamma}_{nc_2}^I = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_2 = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\varphi_1 + 90^\circ)$$

$$\bar{\gamma}_{nc_\Sigma}^I = m_{nc_\Sigma} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \varphi_1$$

Равнодействующая $\bar{\gamma}_{nc_\Sigma}^I = \sqrt{(\bar{\gamma}_{nc_1}^I)^2 + (\bar{\gamma}_{nc_2}^I)^2}$. $m_{nc_1} = m_{nc_2}$

$$\bar{\gamma}_{nc_\Sigma}^I = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sqrt{\cos^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_1} = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r.$$

$$\bar{\gamma}_{nc_\Sigma}^I = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r$$

$$\bar{\gamma}_{nc_\Sigma}^I = \text{Const}$$

Можно показать, что $\bar{\gamma}_{nc_\Sigma}^I$ всегда совпадает по направлению с криевошипом (вращается с угловой скоростью ω)

④ Анализируем возможности уравновешивания неуравновешенных сил.

В нашем случае следует рассмотреть возможность уравновешивания $\mathcal{I}_{nc_2}^{\perp}$

Сила $\mathcal{I}_{nc_2}^{\perp}$ – постоянна по величине (не зависит от угла φ)

- направление $\mathcal{I}_{nc_2}^{\perp}$ вращается вместе с коленвалом

Т.о. силу $\mathcal{I}_{nc_2}^{\perp}$ можно полностью уравновесить силой инерции противовеса на коленвалу.

$$2|\mathcal{I}_{np_{nc}}| = |\mathcal{I}_{nc_2}^{\perp}|$$

$$2m_{np_{nc}} \cdot \omega^2 \cdot r_{np} = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r$$

Масса $m_{np_{nc}}$ равна

$$m_{np_{nc}} = \frac{1}{2} \cdot m_{nc} \cdot \frac{r}{r_{np}}$$

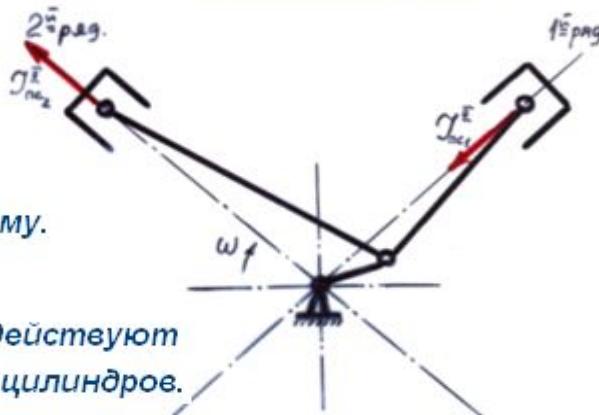
⑤ Вывод по этапу III:

Равнодействующая сила инерции I-го порядка полностью уравновешивается силами противовесов на коленвалу (это для случая

$$m_{nc_1} = m_{nc_2} \text{ и } \gamma = 90^\circ.$$

Этап IV. Моментов от сил \mathcal{I}_{nc}^{\perp} нет.

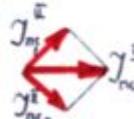
Этап V. Уравновешивание сил $\mathcal{T}_{nc}^{\Sigma}$.



① Рисуем схему.

② Силы $\mathcal{T}_{nc}^{\Sigma}$ действуют вдоль осей цилиндров.

③ Запишем формулы



$$\mathcal{T}_{nc_1}^{\Sigma} = m_{nc_1} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_i \quad \varphi_2 = \varphi_1 + 90^\circ$$

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{nc_2}^{\Sigma} &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2(\varphi_2) = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot \lambda_R \cdot r \cdot \cos 2(\varphi_1 + 90^\circ) = \\ &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos(2\varphi_1 + 180^\circ) = -m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1 \end{aligned}$$

$$\mathcal{T}_{nc_2}^{\Sigma} = -m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1$$

! Разные знаки при $\mathcal{T}_{nc_1}^{\Sigma}$ и $\mathcal{T}_{nc_2}^{\Sigma}$ не означает, что силы действуют друг против друга

$$\mathcal{T}_{nc_{\Sigma}}^{\Sigma} = \pm \sqrt{2} \cdot m_{nc} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_i$$

④ Равнодействующую $\mathcal{T}_{nc_{\Sigma}}^{\Sigma}$ нельзя уравновесить силами инерции противовесов.

Направление силы $\mathcal{T}_{nc_{\Sigma}}^{\Sigma}$ - по горизонтали

Этап VI. Моментов от сил M_{nc}^{π} нет.

Этап VII. Масса (общая) противовеса

$$M_{np} = M_{np\beta p} + M_{np\gamma c}$$

Этап VIII. Констатация неуравновешенных сил.

Уравновешивание V-образного компрессора ($m_{nc_1} \neq m_{nc_2}$; $\gamma = 90^\circ$).

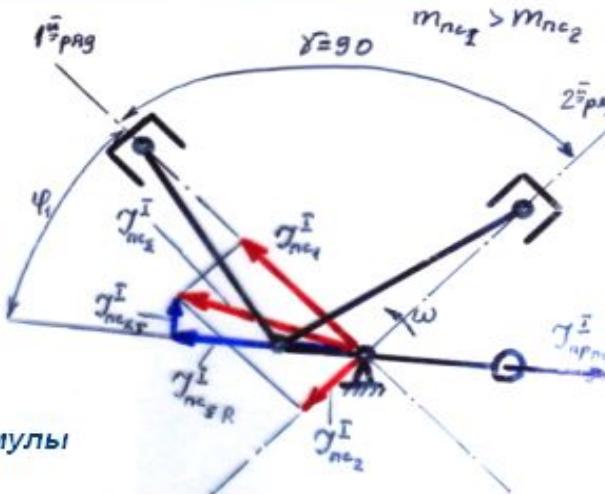
Этап I и Этап II. Как в предыдущем случае

Этап III. Уравновешивание сил \mathcal{T}_{nc}^I .

① Рисуем схему

② Наносим линии действия сил неуравновешенных

③ Записываем формулы



$$\mathcal{T}_{nc_x}^I = m_{nc_x} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_i$$

$$\mathcal{T}_{nc_y}^I = -m_{nc_x} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \varphi_i$$

Суммарная сила: $\mathcal{T}_{nc_x}^I$

$$\mathcal{T}_{nc_x}^I = \sqrt{|\mathcal{T}_{nc_x}^I|^2 + |\mathcal{T}_{nc_y}^I|^2} = \pm \sqrt{(m_{nc_x} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_i)^2 + (m_{nc_x} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \varphi_i)^2}$$

$$\mathcal{T}_{nc_x}^I = \omega^2 \cdot r \cdot \sqrt{(m_{nc_x} \cdot \cos \varphi_i)^2 + (m_{nc_x} \cdot \sin \varphi_i)^2}$$

Сила $\mathcal{T}_{nc_x}^I$ - не постоянна по величине (зависит от φ_i)
- не совпадает по направлению с кривошипом
(то отстает, то опережает)

Конец вектора $\vec{J}_{nc_1}^I$ описывает эллипс, оси которого совпадают с осями цилиндров.

Большая полуось эллипса пропорциональна "так" значению силы $J_{nc_1}^I$ (ряда с большей m_{nc_1})

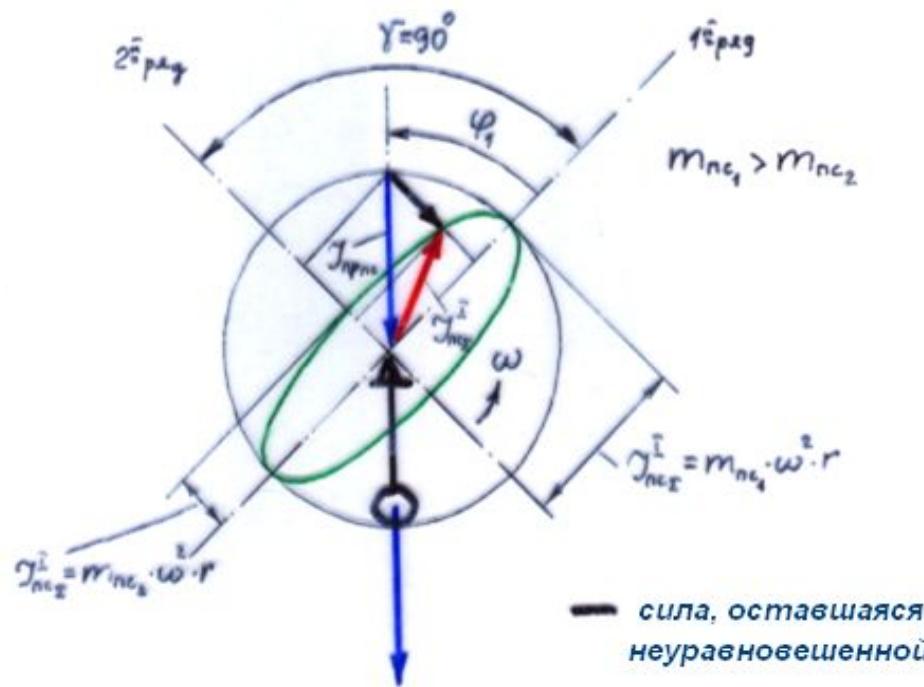
Малая полуось эллипса пропорциональна "так" значению силы $J_{nc_2}^I$ (ряда с меньшей m_{nc_2})

Большая полуось пропорциональна

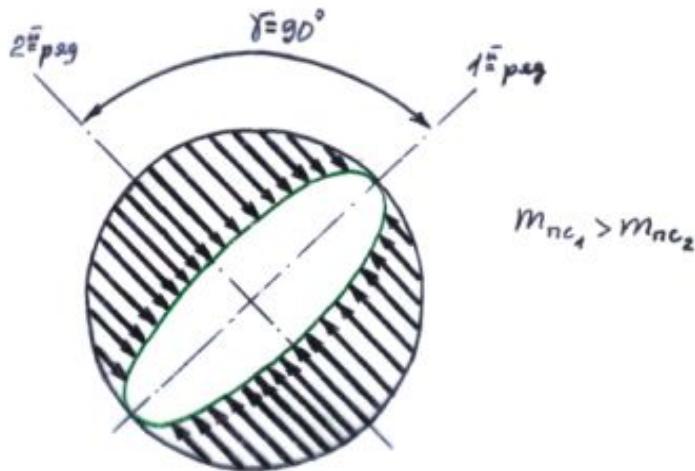
$$|J_{nc_1}^I|_{\max} = m_{nc_1} \cdot \omega^2 \cdot r .$$

Малая ось пропорциональна

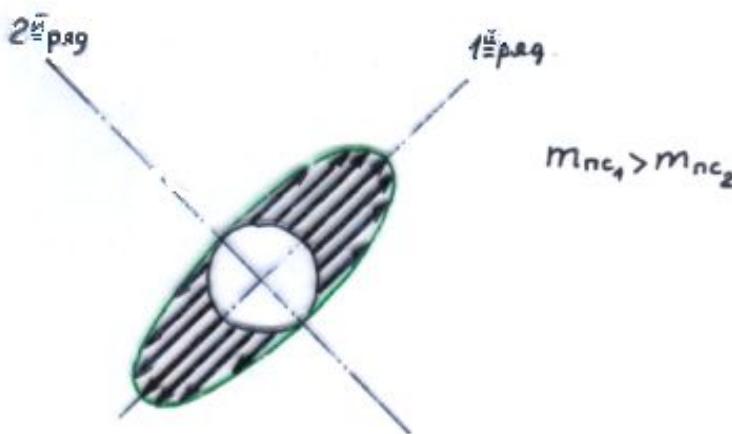
$$|J_{nc_2}^I|_{\max} = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r .$$



Рассмотрим случай, когда противовес выбран, исходя из равенства $\mathcal{I}_{np_{nc}} = |\mathcal{I}_{nc_1}^z|_{max}$



Рассмотрим случай, когда противовес выбран, исходя из равенства $\mathcal{I}_{np_{nc}} = |\mathcal{I}_{nc_2}^z|_{max}$



Рекомендуется массу противовеса выбирать таким образом, чтобы остались одинаковыми неуравновешенные силы, направленные по каждой оси (в первом ряду - "недоуравновешенные", а во 2-м ряду - "переуравновешенные" силы)

$$\gamma_{np_{nc}} = \frac{|\mathcal{T}_{nc_1}^{\perp}|_{max} + |\mathcal{T}_{nc_2}^{\perp}|_{max}}{2}$$



Уравновешивание V-образного компрессора ($m_{nc_1} = m_{nc_2}$; $\gamma \neq 90^\circ$).

Рассмотрим только III-й этап уравновешивания.

Этап III. Уравновешивание сил \mathcal{F}_{nc}^I .

В этом случае равнодействующая $\mathcal{F}_{nc\Sigma}^I$ также не постоянна по величине и также не совпадает по направлению с кривошипом (то отстает, то опережает его)

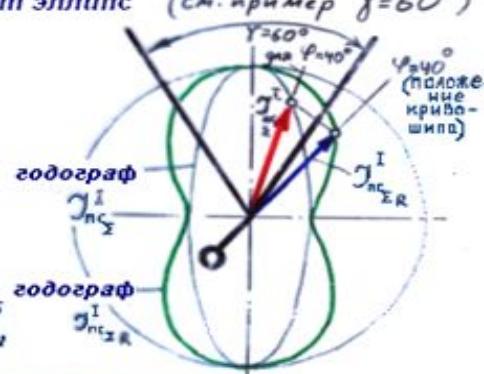
конец вектора $\mathcal{F}_{nc\Sigma}^I$ описывает эллипс (см. пример $\gamma=60^\circ$)

Большая полуось эллипса направлена по биссектрисе угла раз渲а цилиндров
(для $\gamma < 90^\circ$)

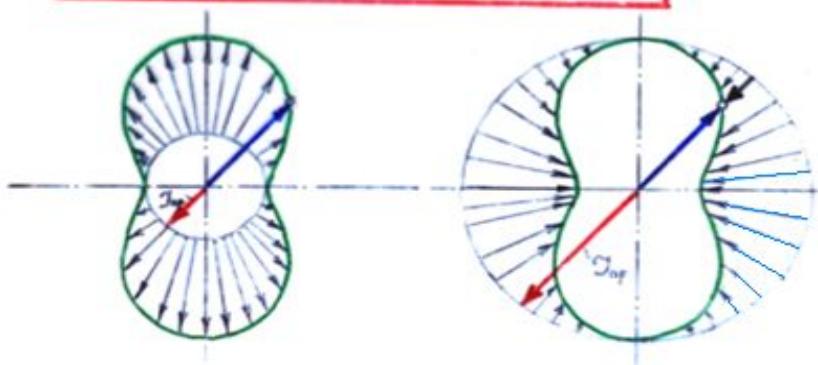
Пример относится к $\varphi=40^\circ$

— сила \mathcal{F}_{nc}^I

— часть силы, которая м.б
уравновешена противовесами



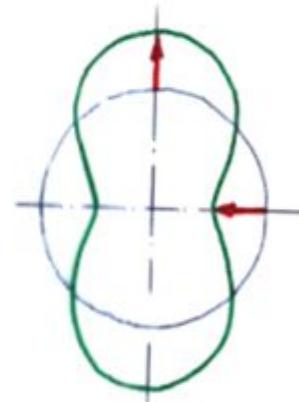
$$\mathcal{F}_{nc_2}^I = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sqrt{\cos^2 \varphi + \cos^2(\varphi + \gamma)}$$



Рекомендуется массу противовесов выбирать таким образом, чтобы "переуравновешенные" силы были равны "недоуравновешенным".

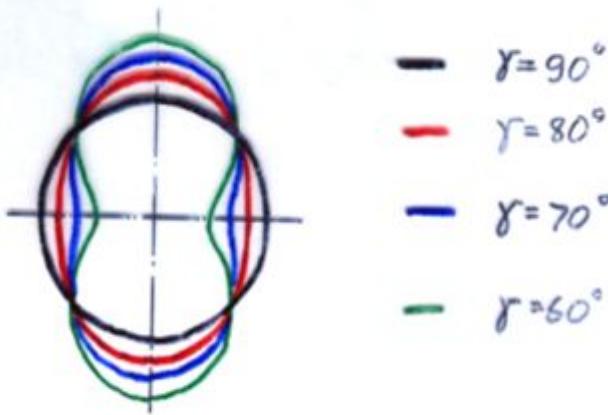
Другими словами силу инерции противовесов выбирают

$$m_{\text{прпс}}^I = \frac{|J_{\text{ре}}^I|_{\max} + |J_{\text{нс-мин}}^I|}{2}$$



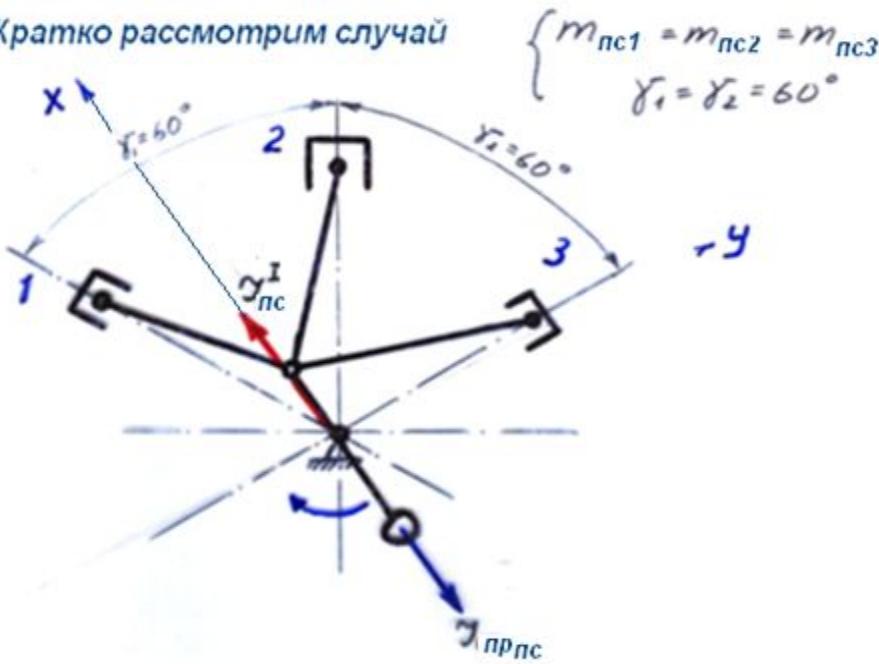
Из $J_{\text{прпс}}$ находят $m_{\text{прпс}}$.

Вид годографа силы, которая может быть уравновешена зависит от угла раз渲ала цилиндров γ .



Уравновешивание W - образного компрессора.

Кратко рассмотрим случай



$$\begin{cases} m_{pc1} = m_{pc2} = m_{pc3} \\ \gamma_1 = \gamma_2 = 60^\circ \end{cases}$$

$$\gamma_{pc,\Sigma}^I = \sqrt{(\gamma_{pc,x}^I)^2 + (\gamma_{pc,y}^I)^2}$$

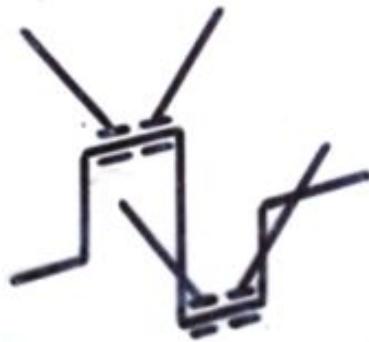
$$\gamma_{pc,\Sigma}^I = \frac{3}{2} m_{pc} \cdot \omega^2 \cdot r$$

Сила $\gamma_{pc,\Sigma}^I$ - постоянна по величине
(не зависит от φ),
- направлена всегда по линии кривошипа.

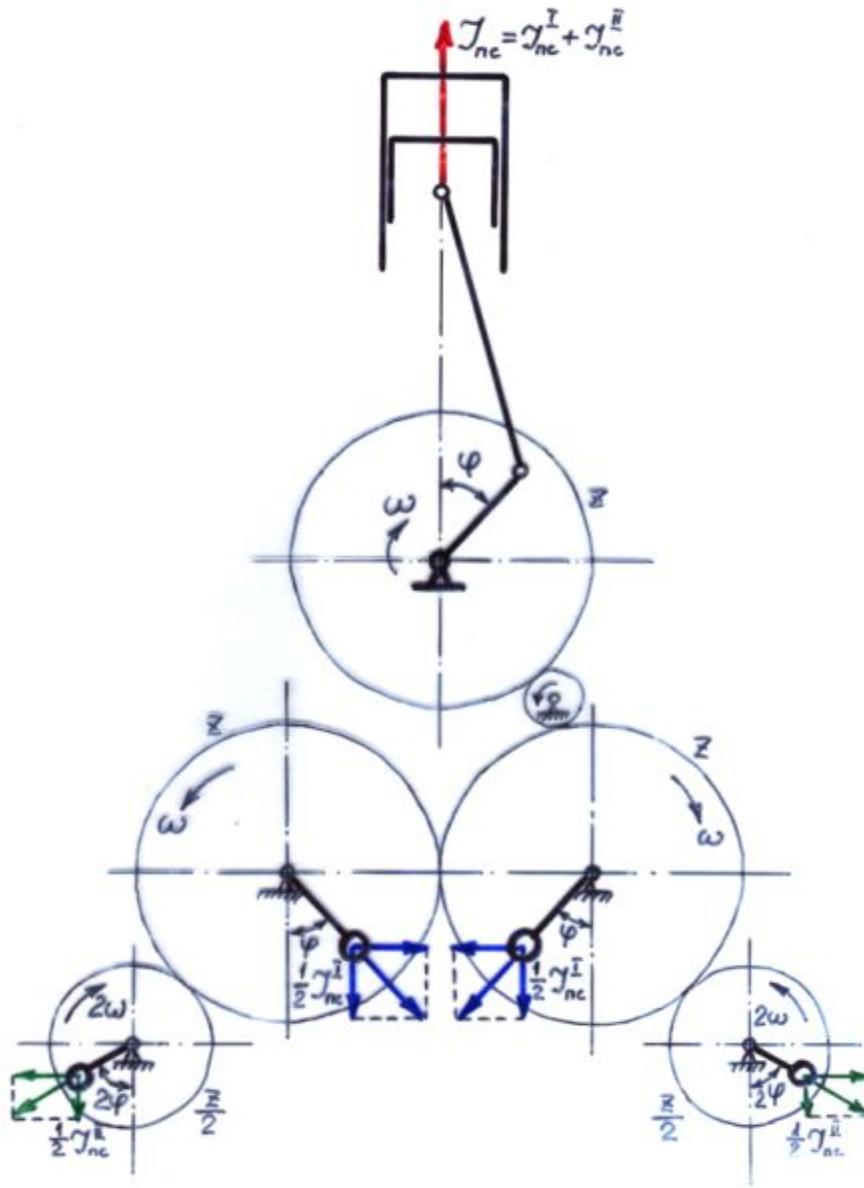
Следовательно, $\gamma_{pc,\Sigma}^I$ может быть полностью
уравновешена противовесами на валу.

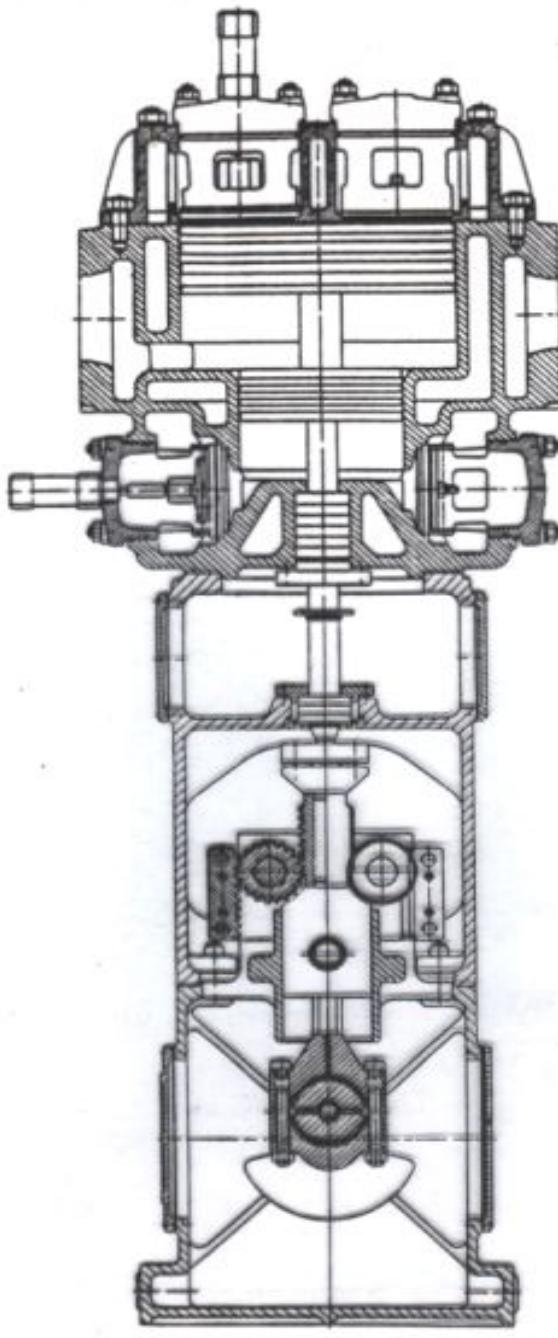
Уравновешивание компрессоров производных схем.

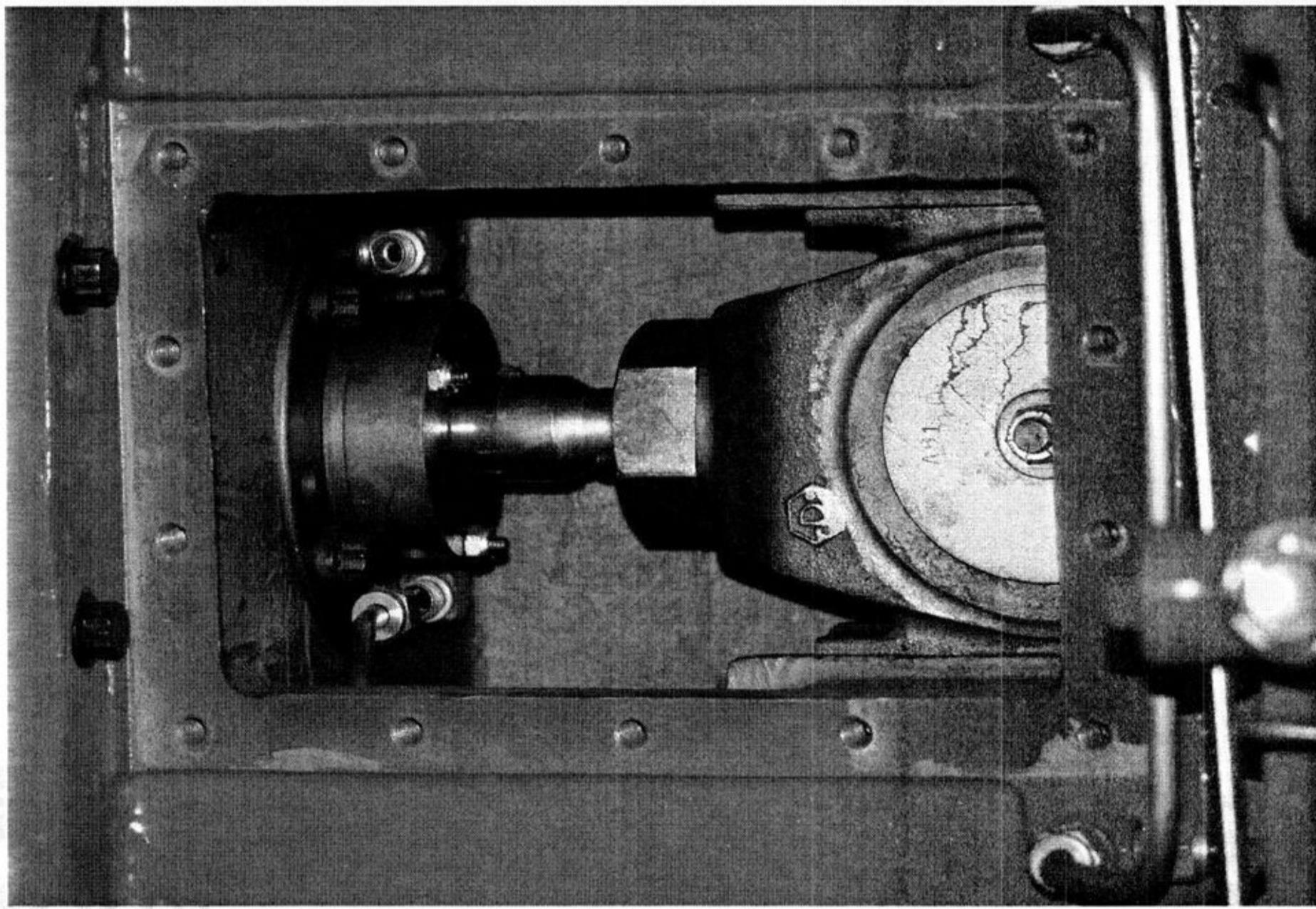
(Уравновесить самостоятельно).



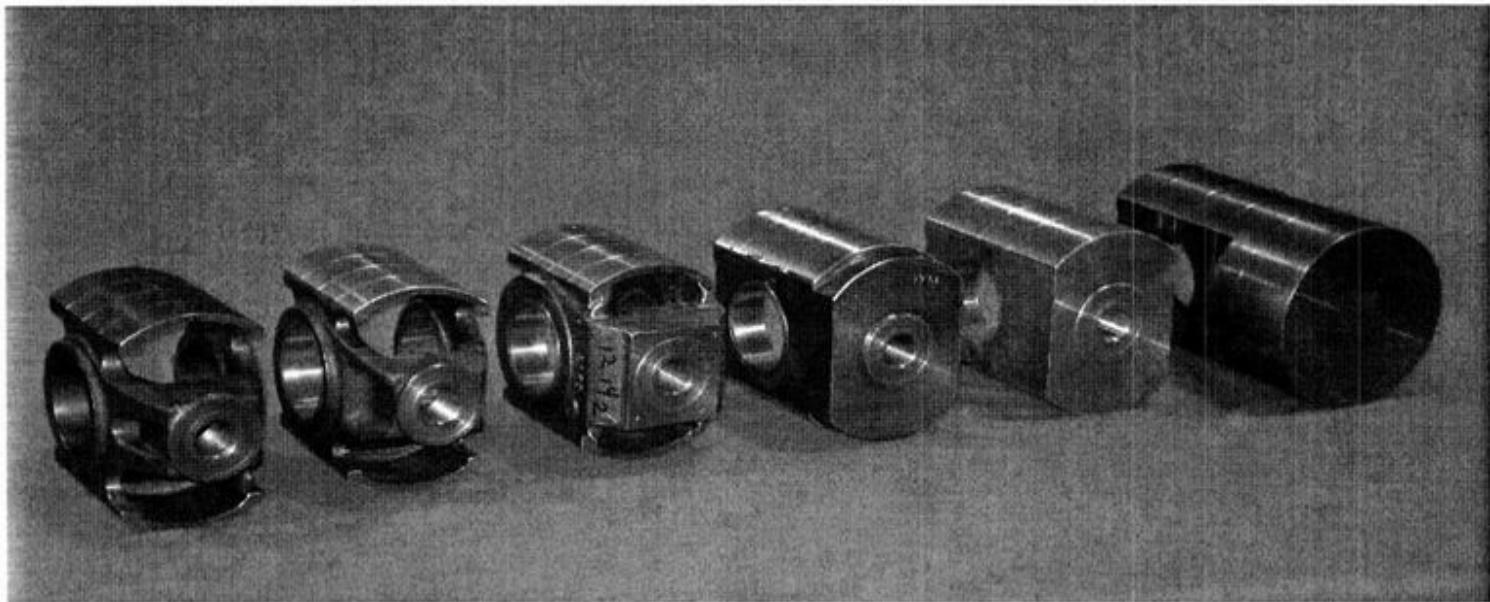
Уравновешивание с помощью спец. механизма.







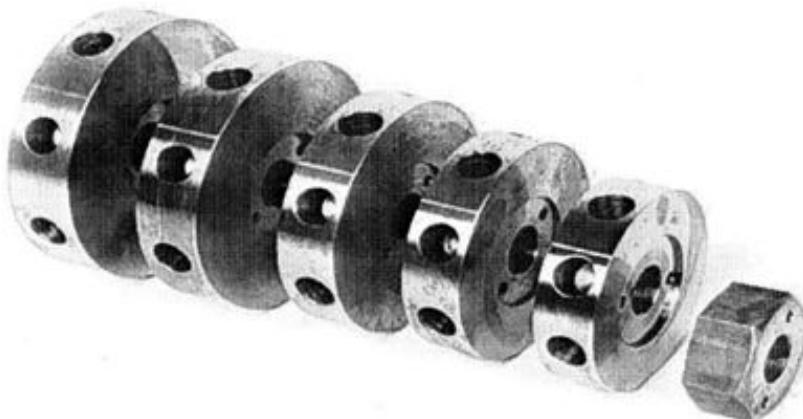
Крейцкопф



Крейцкопфы различных масс

На каждом крейцкопфе проштампован его вес.

БАЛАНСИРОВОЧНЫЕ ГАЙКИ



Балансировочные гайки (контр гайка штока)- финальная часть при балансировке компрессора. Крейцкопфы и балансировочные гайки подобраны для уменьшения несбалансированных сил и пар сил (моментов), для уменьшения вибрации.