

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, переменные по величине и /или направлению, вызывают вибрации компрессора и фундамента.

Вибрации П.К. нежелательны по следующим причинам:

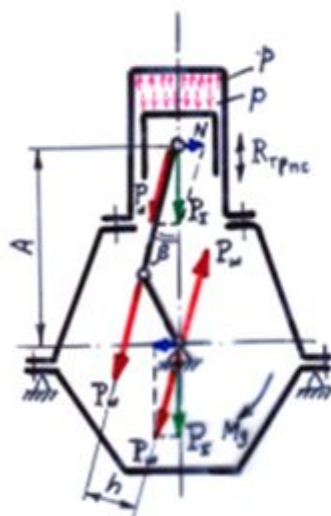
1. На вибрации П.К. и фундаментом расходуется до 5% подводимой к П.К. энергии.
2. Вибрации П.К. и особенно фундаментов оказывают вредное влияние на обслуживающий персонал.
3. Вибрации могут вызвать ослабление креплений деталей и узлов.
4. Имеются специальные требования (ТУ, ГОСТы) на ограничение вибраций.

Уравновешиванию подлежат силы, переменные по величине и направлению.

Условия уравновешивания П.К. :

1. Поступательно движущиеся массы сосредоточены в точке на оси пальца поршня или кривокопфа.
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 $P_r^{кр}$ и $P_r^{пор}$ замыкаются в станине.

2. Силы трения $R_{тр}^{пор}$ и $R_{тр}^{цил}$ замыкаются в станине.

3. Неуравновешенные силы инерции \mathcal{I}_{nc} и \mathcal{I}_{cp} не замыкаются в станине и действуют на опоры и фундамент. Возможен резонанс этих сил и фундамента.

$$\mathcal{I} = P_{\Sigma} - P_r \pm R_{тр}^{пор}$$

4. Сила N дает опрокидывающий момент

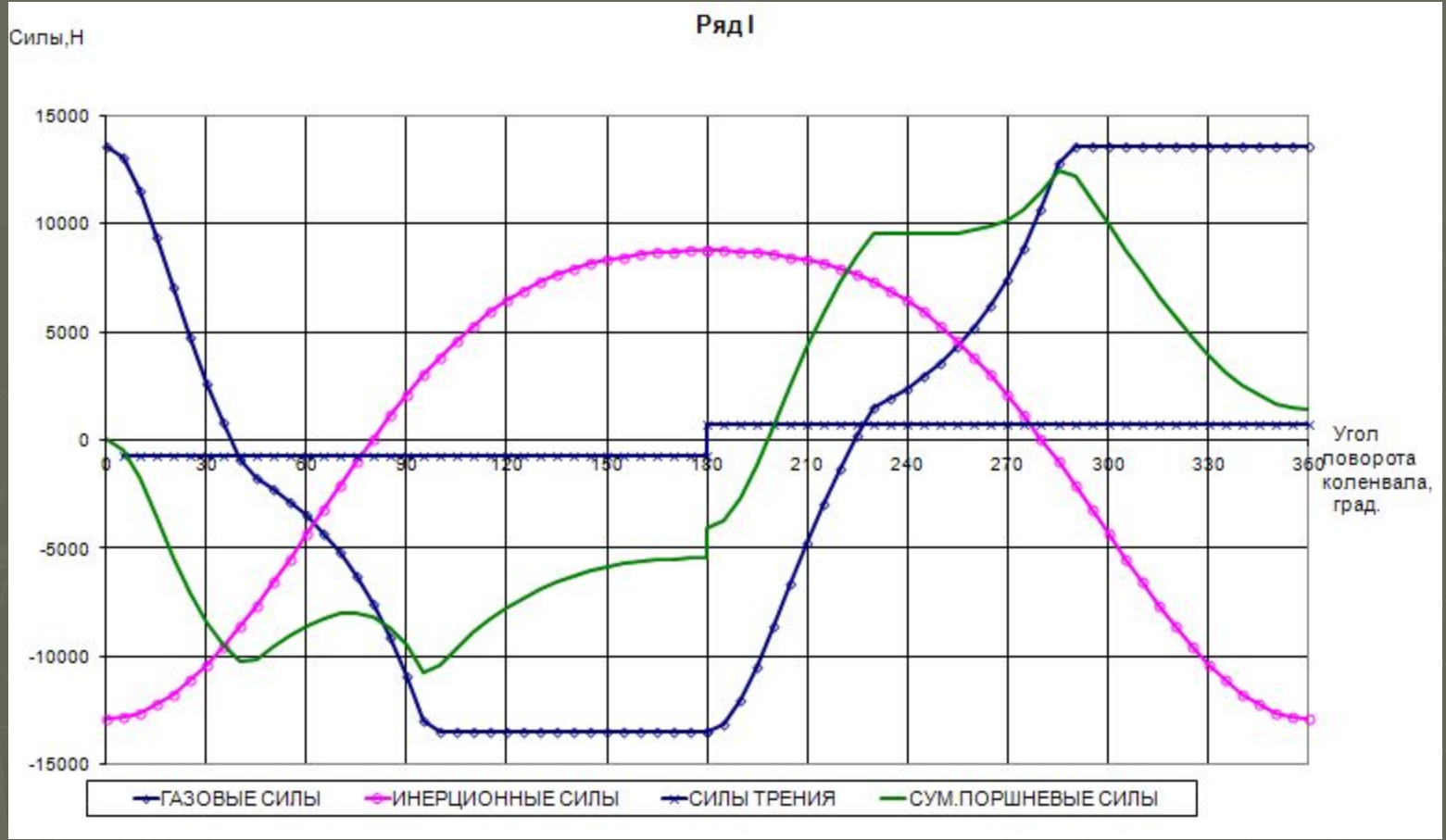
$$M_{опр} = N \cdot A$$

5. Крутящий момент

$$M_{кр} = P_{ш} \cdot h$$

$$M_{кр} = P_{ш} \cdot h = T \cdot R = P_{\Sigma} R \frac{\sin(\psi + \beta)}{\cos \beta} \approx -M_{zb}$$

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



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

$$M_{кр}^{неур} = -J \cdot \varepsilon,$$

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

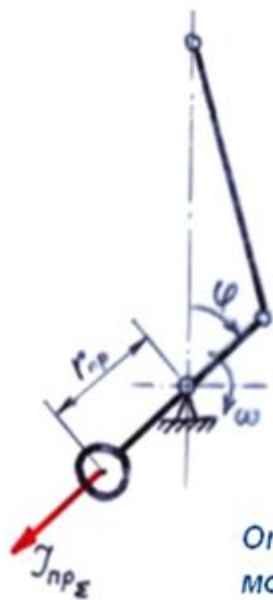
7. Вес компрессора.
8. Сила тяги и сила сопротивления вращению вентилятора

Уравновешиванию подлежат неуравновешенные силы инерции F_{nc} и F_{kr} , а также, моменты от сил M_{nc} и M_{kr} .

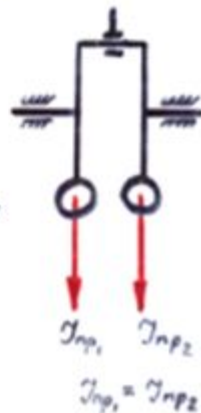
Для уравновешивания неуравновешенных сил (и моментов) вводятся массы, как правило, закрепленные на коленчатом валу, которые создают уравновешивающие силы инерции.

Силы инерции и моменты сил инерции противовесов.

Противовесы в ПК закрепляются на валах:



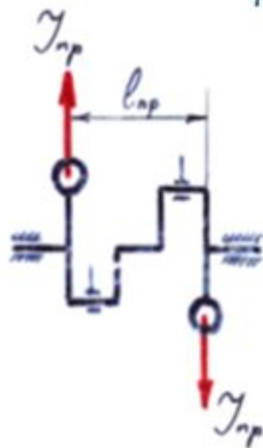
$$\mathcal{I}_{np} = m_{np} \cdot \omega^2 \cdot r_{np}$$



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.



$$M_{\mathcal{I}_{np}} = \mathcal{I}_{np} \cdot l_{np} = m_{np} \cdot \omega^2 \cdot r_{np} \cdot l_{np}$$

Момент от сил инерции противовесов:

- 1) постоянен по величине (не зависит от ψ);
- 2) плоскость действия $M_{\mathcal{I}_{np}}$ вращается вместе с валом.

Основные этапы уравнивания.

- Этап I.** Уравнивание сил инерции неуравновешенных вращающихся масс.
- Этап II.** Уравнивание моментов от сил инерции неуравновешенных вращающихся масс.
- Этап III.** Уравнивание сил инерции I-го порядка от возвратно-поступательно движущихся масс.
- Этап IV.** Уравнивание моментов от сил инерции I-го порядка возвратно-поступательно движущихся масс.
- Этап V.** Уравнивание сил инерции II-го порядка от возвратно-поступательно движущихся масс.
- Этап VI.** Уравнивание 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 \bar{I} по \bar{VI} могут быть выполнены по единой схеме, а именно, в следующем порядке:

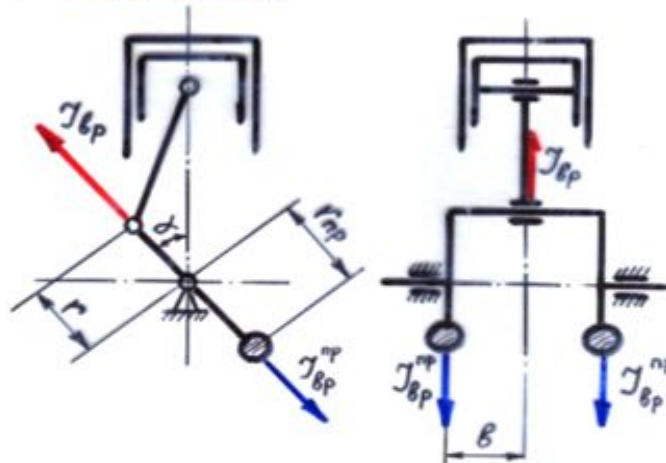
1. Рисуется схема компрессора.
2. Определяется направление действия сил (направление и плоскость действия моментов от сил) и наносится на схему компрессора.
3. Для каждой силы (момента) выписывается формула, по которой определяют её (его) значение.
4. Анализируется возможность уравновешивания сил инерции 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_{cp} всегда действует по радиусу
кривошипа

③ Записываем формулу для J_{cp}

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

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

Силы инерции противовеса, закрепленного на коленвалу

$$\boxed{F_{пр\epsilon p} = m_{пр} \cdot \omega^2 \cdot r_{пр}} \quad F_{пр\epsilon p} = \text{const}$$

$F_{пр\epsilon p}$ постоянна по значению, т.е. не зависит от φ .
(Так же как сила $F_{\epsilon p}$)!

Направление действия силы $F_{пр\epsilon p}$ вращается в пространстве так же как и сила $F_{\epsilon p}$.

(Сила $F_{пр\epsilon p}$ может быть направлена против $F_{\epsilon p}$!)

Подберем $m_{пр\epsilon p}$, при которой

$$|F_{\epsilon p}| = 2 |F_{пр\epsilon p}|.$$

Имеем

$$m_{\epsilon p} \cdot \omega^2 \cdot r = 2 m_{пр\epsilon p} \cdot \omega^2 \cdot r_{пр}.$$

Отсюда

$$\boxed{m_{пр\epsilon p} = \frac{1}{2} m_{\epsilon p} \cdot \frac{r}{r_{пр}}}$$



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

- ⑤ Неуравновешенных сил от $m_{\epsilon p}$ после уравновешивания нет.

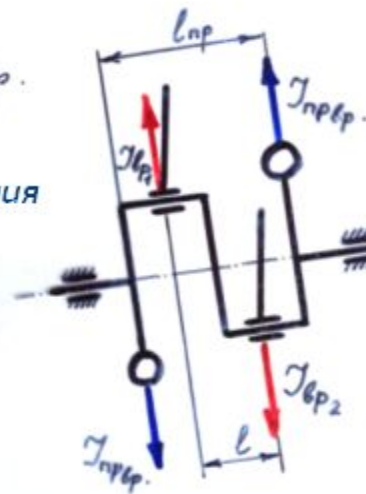
2. Компрессоры с двумя коленами на валу.



Этап I. Уравновешивание $\mathcal{J}_{\text{кр}}$.

- 1) Рисуем схему
- 2) Наносим на схему направления действия сил $\mathcal{J}_{\text{кр}}$
- 3) Записываем формулы для определения сил $\mathcal{J}_{\text{кр}}$

$$\mathcal{J}_{\text{кр}1} = m_{\text{кр}1} \cdot \omega^2 \cdot r$$
$$\mathcal{J}_{\text{кр}2} = m_{\text{кр}2} \cdot \omega^2 \cdot r$$



- 4) Анализируем систему.

При $m_{\text{кр}1} = m_{\text{кр}2}$

$$|\mathcal{J}_{\text{кр}1}| = |\mathcal{J}_{\text{кр}2}|$$

Силы $\mathcal{J}_{\text{кр}1}$ и $\mathcal{J}_{\text{кр}2}$ действуют друг против друга.
Т.о. силы $\mathcal{J}_{\text{кр}1}$ и $\mathcal{J}_{\text{кр}2}$ уравновешивают друг друга,
т.е. уравновешиваются.

- 5) Подведение итогов:

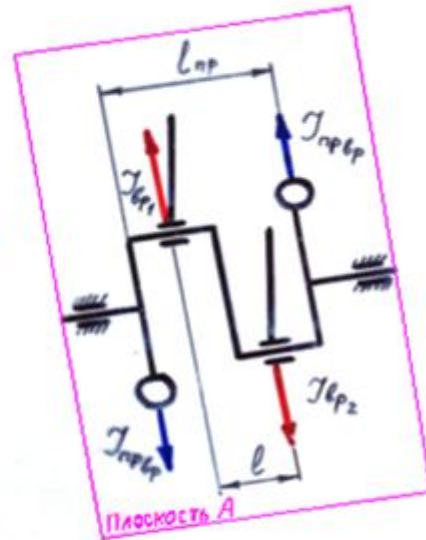
а) Силы $\mathcal{J}_{\text{кр}1}$ и $\mathcal{J}_{\text{кр}2}$ уравновешиваются, т.е. нет неуравновешенных сил от $m_{\text{кр}}$

б) Силы $\mathcal{J}_{\text{кр}1}$ и $\mathcal{J}_{\text{кр}2}$ создают момент неуравновешенный.

Этап II. Уравновешивание неуравновешенных моментов от сил F_{cp} .

- 1) Рисуем схему
- 2) Наносим на схему плоскость действия момента от сил F_{cp} .
- 3) Записываем формулу для определения момента (неуравновешенного) от сил F_{cp} .

$$M_{F_{cp}} = F_{cp} \cdot l = m_{cp} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot l$$



Момент $M_{F_{cp}}$ постоянен по величине и действует в плоскости кривошипов (вращается вместе с коленвалом).

- 4) Анализируем возможности уравновешивания $M_{F_{cp}}$ моментом от сил инерции противовесов.

Силы $F_{прв}$ постоянны по величине

$$F_{прв} = m_{прв} \cdot \omega^2 \cdot r_{пр}$$

Момент от сил $F_{прв} = \text{const.}$

$$M_{F_{прв}} = F_{прв} \cdot l_{пр} = m_{прв} \cdot \omega^2 \cdot r_{пр} \cdot l_{пр}$$

и может быть в плоскости А

$$|M_{F_{cp}}| = |M_{F_{прв}}|$$

$$m_{cp} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot l = m_{прв} \cdot \omega^2 \cdot r_{пр} \cdot l_{пр}$$

Отсюда

$$m_{прв} = m_{лв} \cdot \frac{r \cdot l}{r_{пр} \cdot l_{пр}} \quad \dots (A)$$

Если массы противовесов выбраны по уравнению (A) и противовесы закреплены на валу соответствующим образом, то момент от сил $\mathcal{M}_{прв}$ полностью уравновешивают неуравновешенный момент от сил \mathcal{M}_l .



Момент (неуравновешенный) от сил \mathcal{M}_l , т.е. от $m_{лв}$, всегда может быть полностью уравновешен моментом от сил инерции противовесов, закрепленных на коленвале.

Уравновешивание однорядного поршневого компрессора

Этап I. Уравновешивание сил инерции неуравновешенных вращающихся масс.

Силы F_g всегда можно уравновесить силами инерции противовесов, закрепленных на коленвалу (см. ранее.)

Этап II. Уравновешивание моментов от сил инерции вращающихся масс.

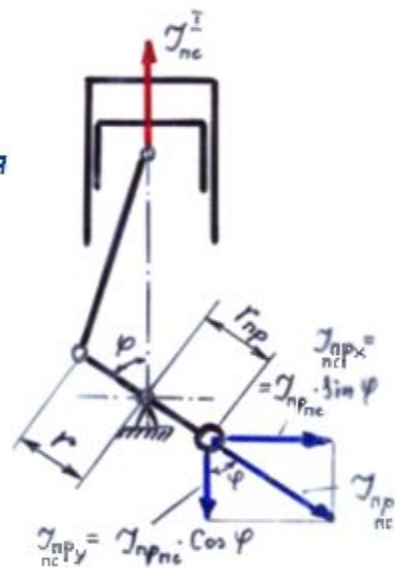
Ранее было показано, что в П.К. с одноколенным валом, моментов от сил инерции вращающихся масс нет.

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 \mathcal{F}_{nc}^I .
- ③ Выписываем формулу для определения \mathcal{F}_{nc}^I .

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



- ④ Анализируем возможности уравновешивания:

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

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

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

Предположим, что мы подберем массу противовесов из условия

$$|\mathcal{Y}_{nc}^I|_{\max} = |2\mathcal{J}_{прnc}|,$$

т.е.

$$m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r = 2 \cdot m_{прnc} \cdot \omega^2 \cdot r_{пр}$$

Тогда

$$\begin{aligned} 2\mathcal{J}_{прncy} &= 2\mathcal{J}_{прnc} \cdot \cos \varphi = \\ &= m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi, \end{aligned}$$

т.е.

$$|2\mathcal{J}_{прncy}| = |\mathcal{Y}_{nc}^I|$$

В вертикальной плоскости сила \mathcal{Y}_{nc}^I уравнивается силой инерции противовесов.

Внимание !

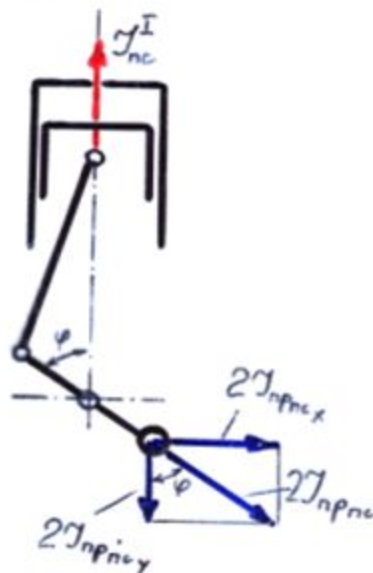
Остается в этом случае неуравновешенная сила $2\mathcal{J}_{прncx}$.

$$2\mathcal{J}_{прncx} = 2\mathcal{J}_{прnc} \cdot \sin \varphi = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \varphi.$$

Сила $2\mathcal{J}_{прncx}$ действует в горизонтальной плоскости и смещена по фазе.

$$|2\mathcal{J}_{прncx}|_{\max} = |\mathcal{Y}_{nc}^I|$$

В таком случае используют "частичное" уравнивание



"Частичное" уравнивание - 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

$$\left| (0,3 \dots 0,5) \cdot J_{nc}^i \right|_{\text{MAX}} = \left| 2 \cdot J_{прnc} \right|$$

$$(0,3 \div 0,5) \cdot m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r = 2 m_{прnc} \cdot \omega^2 \cdot r_{пр}$$

откуда масса одного противовеса

$$m_{прnc} = (0,15 \div 0,25) m_{nc} \cdot \frac{r}{r_{пр}}$$

Для вертикальных компрессоров

$$\left| (0,2 \dots 0,3) \cdot J_{nc}^i \right|_{\text{MAX}} = \left| 2 \cdot J_{прnc} \right|$$

$$(0,2 \div 0,3) \cdot m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r = 2 m_{прnc} \cdot \omega^2 \cdot r_{пр}$$

откуда масса одного противовеса

$$m_{прnc} = (0,1 \div 0,15) \cdot m_{nc} \cdot \frac{r}{r_{пр}}$$

⑤ Подведение итогов III этапа.

В вертикальных компрессорах в вертикальной плоскости остается неуравновешенной сила

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

в горизонтальной плоскости остается неуравновешенная сила

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

В горизонтальных компрессорах в горизонтальной плоскости остается неуравновешенной сила

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

в вертикальной плоскости остается неуравновешенная сила

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

Этап IV Уравновешивание моментов от сил J_{nc}^I

Моментов от сил J_{nc}^I нет

Этап \bar{V} . Уравновешивание сил инерции второго порядка поступательно движущихся масс.

- 1) Рисуем схему.
- 2) Наносим линию действия неуравновешенной силы.
- 3) Записываем формулу

$$J_{nc}^{\bar{II}} = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi$$



- 4) Анализируем возможность уравновешивания неуравновешенной силы.

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

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

Сила J_{nr} - постоянна по величине,

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

Внимание! Изменение направления J_{nr} происходит с частотой в два раза меньшей, чем частота изменения величины $J_{nc}^{\bar{II}}$.
Поэтому, невозможно даже "частичное" уравновешивание.

Этап VI. Уравновешивание моментов от сил инерции второго порядка.

Момент от сил $\mathcal{J}_{nc}^{\dot{\varphi}}$ нет

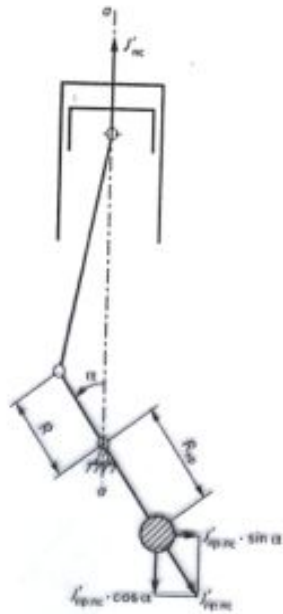
Этап VII. Определение суммарной массы противовесов.

Общая масса каждого противовеса

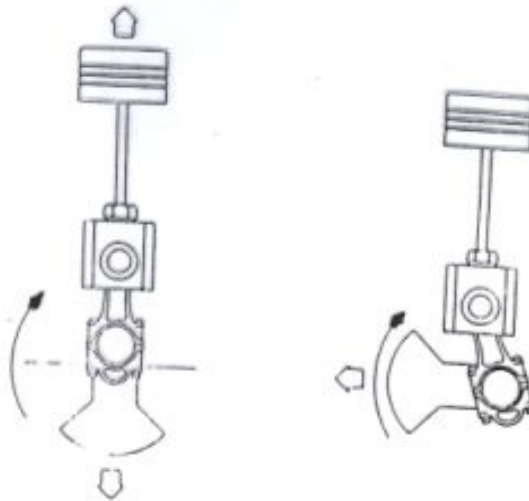
$$m_{np} = m_{np\zeta_p} + m_{npnc}$$

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

a)



b)



Уравновешивание двухрядного П.К.
с углом развала 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.

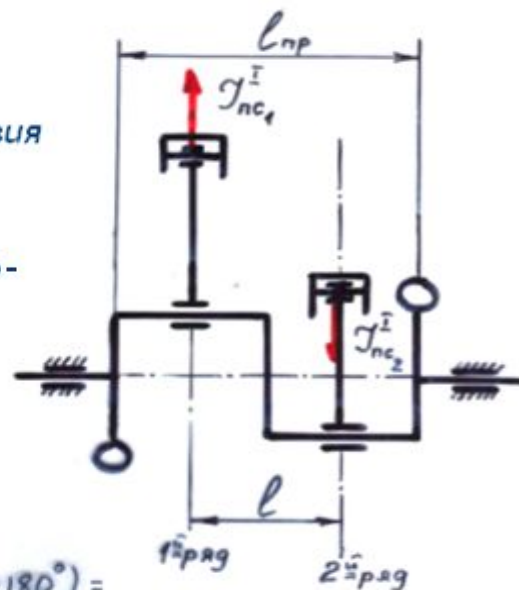
Этап III. Уравновешивание сил \mathcal{Y}_{nc}^I

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

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

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

$$\mathcal{Y}_{nc_2}^I = -m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_1$$



- 4) Анализируем возможность уравновешивания сил \mathcal{Y}_{nc}^I
Силы $\mathcal{Y}_{nc_1}^I$ и $\mathcal{Y}_{nc_2}^I$ равны по величине, если $m_{nc_1} = m_{nc_2}$

$$|\mathcal{Y}_{nc_1}^I| = |\mathcal{Y}_{nc_2}^I|$$

Силы $\mathcal{Y}_{nc_1}^I$ и $\mathcal{Y}_{nc_2}^I$ действуют навстречу друг другу.

Вывод: Силы $\mathcal{Y}_{nc_1}^I$ и $\mathcal{Y}_{nc_2}^I$ уравновешиваются, если $m_{nc_1} = m_{nc_2}$.

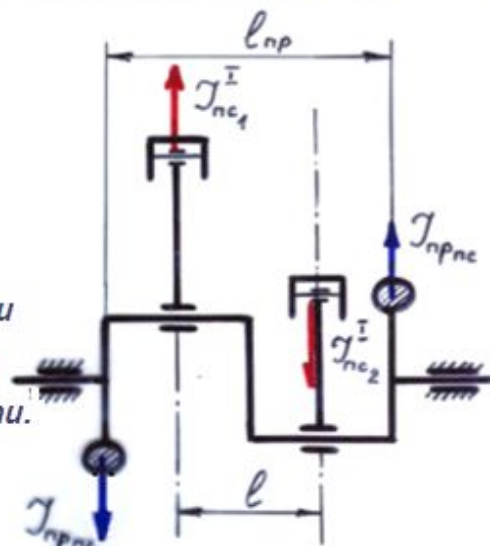
Этап IV. Уравновешивание моментов от \mathcal{J}_{nc}^I .

① Рисуем схему П.К.

② Определяем действие сил и плоскость действия момента.

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

③ Запишем формулу для определения неуравновешенного момента



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

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

$M_{\mathcal{J}_{nc}^I}$ - переменен и меняется с частотой ω ,
- всегда находится в вертикальной плоскости;

$M_{\mathcal{J}_{np}}$ - постоянен (не зависит от φ),
- вращается с плоскостью колен с частотой ω .

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

Возможно "частичное" уравновешивание $M_{\mathcal{J}_{nc}^I}$.

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

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

В горизонтальных компрессорах переводят в вертикальную плоскость 0,5 от момента $M_{\gamma_{nc}^I}$.

При этом массу каждого противовеса определяют из равенства

$$(0,15 \div 0,5) | M_{\gamma_{nc}^I} |_{\max} = M_{\gamma_{прnc}}$$

или

$$(0,15 \div 0,5) \cdot m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \ell = m_{прnc} \cdot \omega^2 \cdot r_{пр} \cdot \ell_{пр} .$$

Откуда масса каждого из противовесов

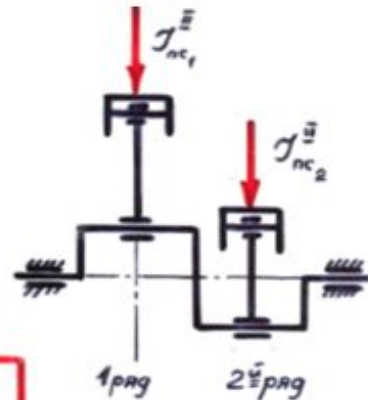
$$m_{прnc} = (0,15 \div 0,5) \cdot m_{nc} \cdot \frac{r}{r_{пр}} \cdot \frac{\ell}{\ell_{пр}}$$

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

Этап V. Уравновешивание неуравновешенных

сил $\mathcal{J}_{nc}^{\bar{z}}$.

- 1) Рисуем схему
- 2) Наносим линии действия неуравновешенных сил
- 3) Записываем формулы для определения сил $\mathcal{J}_{nc}^{\bar{z}}$.



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

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_{nc_2}^{\bar{z}} &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_2 = \\ &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2(\varphi_1 + 180^\circ) = \\ &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos (2\varphi_1 + 360^\circ) = \\ &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1 \end{aligned}$$

$$\mathcal{J}_{nc_\Sigma}^{\bar{z}} = m_{nc_\Sigma} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1$$

- 4) Вывод по этапv:
Силы $\mathcal{J}_{nc_1}^{\bar{z}}$ и $\mathcal{J}_{nc_2}^{\bar{z}}$ складываются, т.е. действует неуравновешенная сила $\mathcal{J}_{nc_\Sigma}^{\bar{z}}$.

$$\mathcal{J}_{nc_\Sigma}^{\bar{z}} = 2 \cdot m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1$$

Эту силу $\mathcal{J}_{nc_\Sigma}^{\bar{z}}$ нельзя уравновесить даже "частично" противовесами на коленвале, т.к. изменение $\mathcal{J}_{nc_\Sigma}^{\bar{z}}$ происходит в два раза чаще, чем изменение направления $\mathcal{J}_{пр}$.

Этап VI. Уравновешивание момента от сил инерции второго порядка

Момент от сил $\mathcal{M}_{nc}^{\text{II}}$ нет.

Этап VII. Определение общей массы противовесов.

Масса каждого противовеса

$$m_{np} = m_{np\epsilon p} + m_{npnc}$$

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

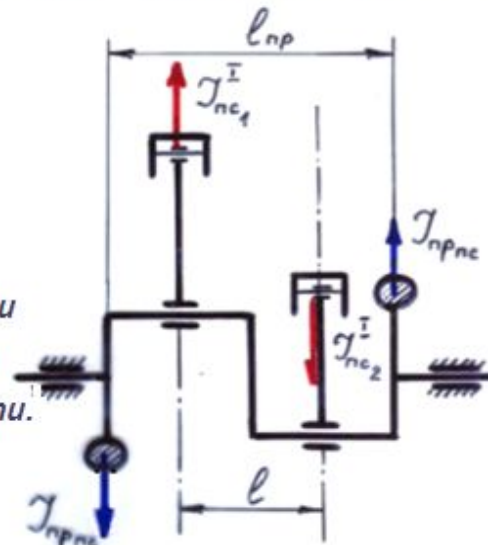
Этап IV. Уравновешивание моментов от \mathcal{J}_{nc}^I .

1 Рисуем схему П.К.

2 Определяем действие сил и плоскость действия момента.

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

3 Запишем формулу для определения неуравновешенного момента



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

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

Момент инерции шатуна $M_{ш}$ зависит от частоты ω , а момент от сил инерции шатуна $M_{ш}^I$ действует в вертикальной плоскости;

Момент от сил инерции шатуна $M_{ш}^I$ зависит от φ ,

Момент от сил инерции шатуна $M_{ш}^I$ действует в плоскости колен с частотой ω .

Момент от сил инерции шатуна $M_{ш}^I$ действует в плоскости колен с частотой ω .

Момент от сил инерции шатуна $M_{ш}^I$ действует в плоскости колен с частотой ω .

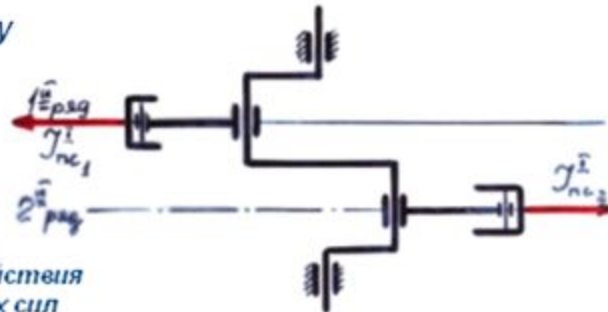
Возможность "полного" уравновешивания $M_{\mathcal{J}_{nc}^I}$.

Уравновешивание оппозитных компрессоров.

Этапы I и II. Рассмотрены ранее.

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

① Рисуем схему



② Наносим линии действия неуравновешенных сил

③ Запишем формулы

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

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

$$\mathcal{M}_{nc_2}^I = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_2$$

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

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

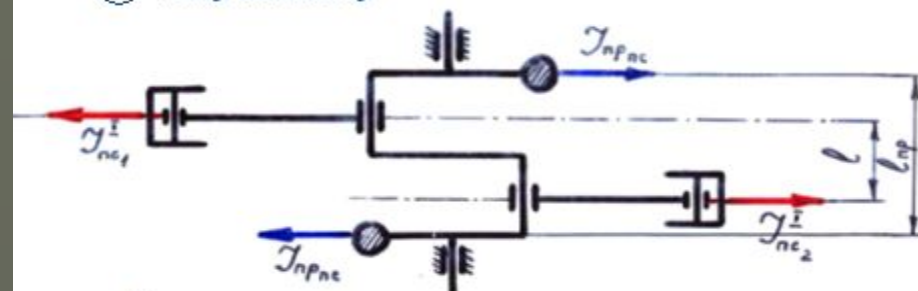
Силы $\mathcal{M}_{nc_1}^I$ и $\mathcal{M}_{nc_2}^I$ уравновешиваются, если

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

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

Этап IV. Уравновешивание момента от силы γ_{nc}^I

1) Рисуем схему



2) Наносим линии действия сил и определяем плоскость действия момента от γ_{nc}^I

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

3) Запишем формулу для определения $M_{\gamma_{nc}^I}$

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

4) Анализируем возможности уравновешивания
Момент $M_{\gamma_{nc}^I}$ - изменяется с изменением φ с частотой Π_0 ,

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

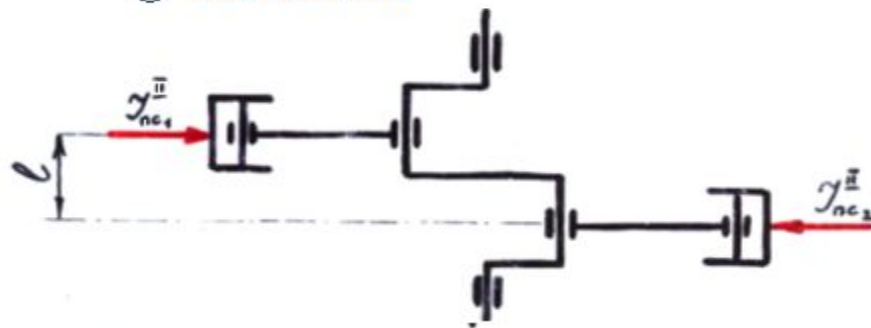
Момент от сил γ_{np} - постоянен по величине,

- плоскость действия вращается вместе с коленвалом с частотой Π_0 ,

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

Этап V. Уравновешивание сил $\mathcal{J}_{nc}^{\text{II}}$

① Рисуем схему



② Наносим линии действия неуравновешенных сил $\mathcal{J}_{nc}^{\text{II}}$

③ Запишем формулы, определяющие $\mathcal{J}_{nc_1}^{\text{II}}$ и $\mathcal{J}_{nc_2}^{\text{II}}$

$$\mathcal{J}_{nc_1}^{\text{II}} = m_{nc_1} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\psi_1$$

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_{nc_2}^{\text{II}} &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2(\psi_1 + 360^\circ) = \\ &= m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\psi_1 \end{aligned}$$

$$\mathcal{J}_{nc_2}^{\text{II}} = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\psi_1$$

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

Вывод: неуравновешенным остается момент от сил $\mathcal{J}_{nc}^{\text{I}}$

Этап VI. Уравновешивание момента от сил γ_{nc}^{Σ} .

Нам уже известно, что нельзя (даже частично) уравновесить силы и моменты от сил инерции второго порядка противовесами на коленвале. т.к. частота вращения коленвала n_0 в два раза меньше частоты изменения сил γ_{nc}^{Σ} и момента от этих сил.

Момент от сил γ_{nc}^{Σ} остаётся неуравновешенным.

Значение этого момента

$$M_{\gamma_{nc}^{\Sigma}} = \gamma_{nc}^{\Sigma} \cdot \ell = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \ell \cdot \cos 2\varphi$$

Момент от сил γ_{nc}^{Σ} действует в плоскости осей цилиндров, т.е. в горизонтальной плоскости.

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

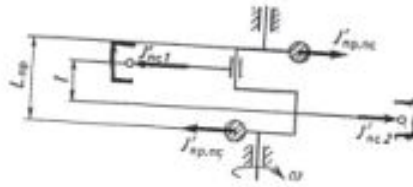
$$m_{np\Sigma} = m_{np\epsilon_p} + m_{npnc}$$

Этап VIII. Фиксирование оставшихся неуравновешенными сил и моментов

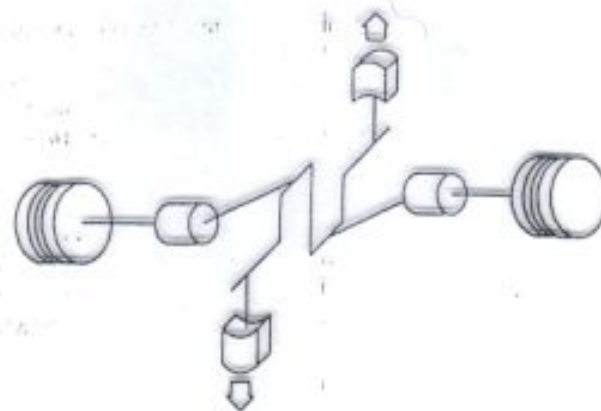
(значения их, направления и плоскости их действия, частоты изменений)

самостоятельно!

a)

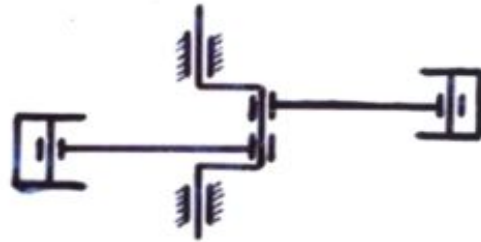


б)



Специальные схемы оппозитных компрессоров

1. П.К. с совпадающим движением поршней.



2. П.К. с вильчатым шатуном



3. Оппозитная "тройка"



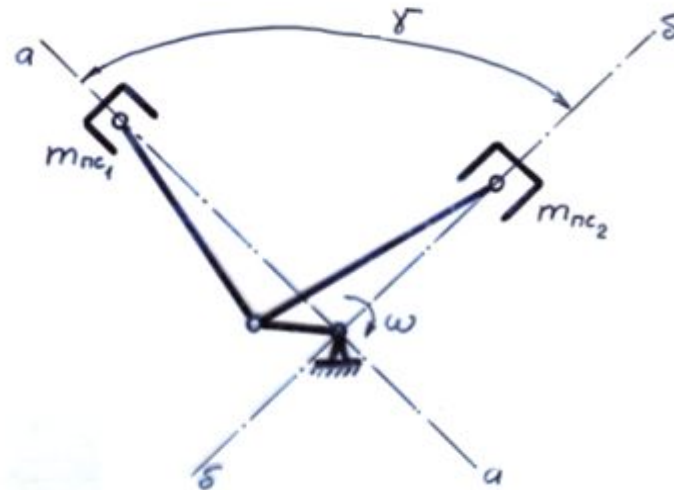
$$m_{nc_1} = m_{nc_2} + m_{nc_3}$$

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

Уравновешивание V-образных компрессоров.

Общая постановка вопроса.

1. Общая схема V-образного П.К.



γ - угол развала цилиндров

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

3. Принципиальные случаи:

- | | | |
|---|------------------------|------------------------|
| Ⓘ | $m_{nc1} = m_{nc2}$ | $\gamma = 90^\circ$ |
| Ⓜ | $m_{nc1} \neq m_{nc2}$ | $\gamma = 90^\circ$ |
| Ⓢ | $m_{nc1} = m_{nc2}$ | $\gamma \neq 90^\circ$ |
| Ⓣ | $m_{nc1} \neq m_{nc2}$ | $\gamma \neq 90^\circ$ |

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

$$m_{ef} = m_{шатуна} + m_{шатуна} \cdot \frac{\rho}{r} + 2 \cdot \frac{2}{3} m_{шат.}$$

Этап II. Уравновешивание моментов сил инерции вращающихся масс

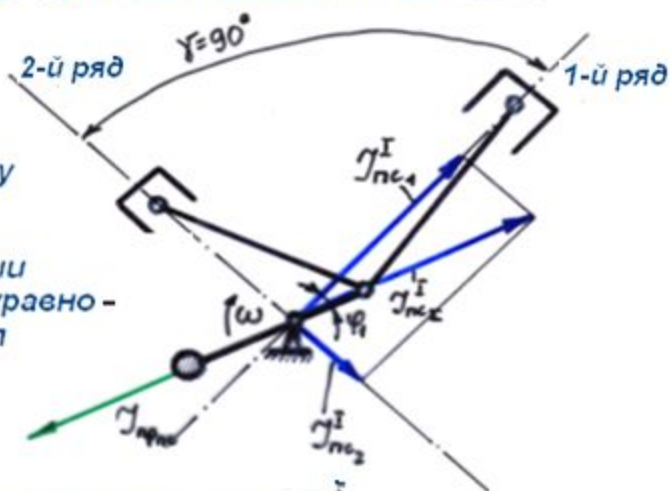
Моментов от γ_{ef} нет.

Этап III. Уравновешивание сил γ_{nc}^I

① Рисуем схему

② Наносим линии действия неуравновешенных сил

γ_{nc}^I (по осям цилиндров)



③ Запишем формулы для определения γ_{nc}^I

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

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

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

$$\gamma_{nc_2}^I = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \varphi_1$$

Равнодействующая $\gamma_{nc_\Sigma}^I = \sqrt{(\gamma_{nc_1}^I)^2 + (\gamma_{nc_2}^I)^2}$ $m_{nc_1} = m_{nc_2}$

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

$$\gamma_{nc_\Sigma}^I = m_{nc} \cdot \omega^2 \cdot r$$

$$\gamma_{nc_\Sigma}^I = \text{Const}$$

Можно показать, что $\gamma_{nc_\Sigma}^I$ всегда совпадает по направлению с кривошипом (вращается с угловой скоростью ω)

- ④ Анализирuем возможности уравниuешивания неуравниuешенных сил.

В нашем случае следует рассмотреть возможность уравниuешивания $\mathcal{J}_{nc_2}^I$

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

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

Т.о. силу $\mathcal{J}_{nc_2}^I$ можно полностью уравниuесить силой инерции противовеса на коленвале.

$$2|\mathcal{J}_{npnc}| = |\mathcal{J}_{nc_2}^I|$$

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

Масса m_{npnc} равна

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

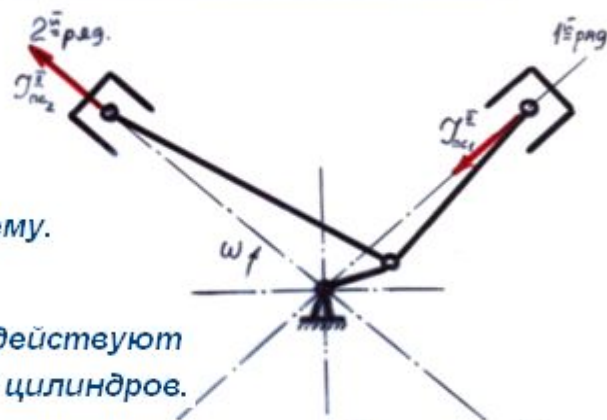
- ⑤ Вывод по этапу III:

Равнодействующая сил инерции I-го порядка полностью уравниuешивается силами противовесов на коленвале (это для случая

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

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

Этап V. Уравновешивание сил $\mathcal{J}_{nc}^{\text{II}}$.



- ① Рисуем схему.
- ② Силы $\mathcal{J}_{nc}^{\text{II}}$ действуют вдоль осей цилиндров.
- ③ Запишем формулы

$$\mathcal{J}_{nc₁}^{\text{II}} = m_{nc₁} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1 \quad \varphi_2 = \varphi_1 + 90^\circ$$

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_{nc₂}^{\text{E}} &= m_{nc₂} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2(\varphi_2) = m_{nc₂} \cdot \omega^2 \cdot \lambda_R \cdot r \cdot \cos 2(\varphi_1 + 90^\circ) = \\ &= m_{nc₂} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos(2\varphi_1 + 180^\circ) = -m_{nc₂} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1 \end{aligned}$$

$$\mathcal{J}_{nc₂}^{\text{E}} = -m_{nc₂} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1$$

! || Разные знаки при $\mathcal{J}_{nc₁}^{\text{II}}$ и $\mathcal{J}_{nc₂}^{\text{II}}$ не означает, что силы действуют друг против друга

$$\mathcal{J}_{nc\Sigma}^{\text{E}} = \pm\sqrt{2} \cdot m_{nc} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda_R \cdot \cos 2\varphi_1$$

- ④ Равнодействующую $\mathcal{J}_{nc\Sigma}^{\text{II}}$ нельзя уравновесить силами инерции противовесов.
Направление силы $\mathcal{J}_{nc\Sigma}^{\text{II}}$ - по горизонтали

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

Этап VII. Масса (общая) противовеса

$$m_{np} = m_{np\delta p} + m_{npnc}$$

Этап VIII. Констатация неуравновешенных сил.

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

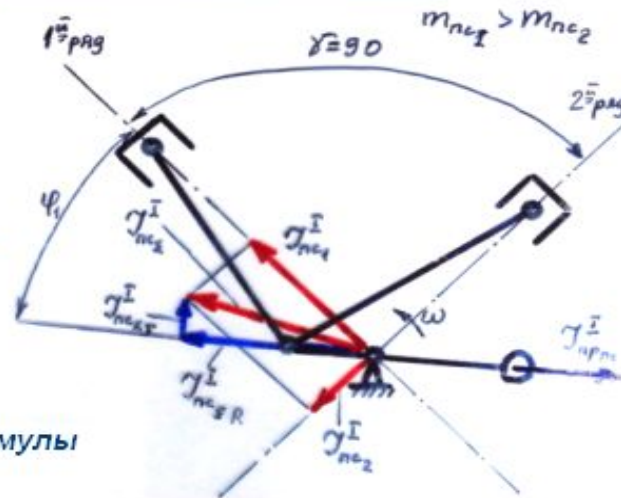
Этап I и Этап II. Как в предыдущем случае

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

① Рисуем схему

② Наносим линии действия сил неуравновешенных

③ Записываем формулы



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

$$\mathcal{J}_{nc_2}^I = -m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \varphi_1$$

Суммарная сила: $\mathcal{J}_{nc_{\Sigma}}^I$

$$\mathcal{J}_{nc_{\Sigma}}^I = \sqrt{|\mathcal{J}_{nc_1}^I|^2 + |\mathcal{J}_{nc_2}^I|^2} = \pm \sqrt{(m_{nc_1} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_1)^2 + (m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \varphi_1)^2}$$

$$\mathcal{J}_{nc_{\Sigma}}^I = \omega^2 \cdot r \cdot \sqrt{(m_{nc_1} \cdot \cos \varphi_1)^2 + (m_{nc_2} \cdot \sin \varphi_1)^2}$$

Сила $\mathcal{J}_{nc_{\Sigma}}^I$ - не постоянна по величине (зависит от φ_1)
- не совпадает по направлению с кривошипом (то отстает, то опережает)

Конец вектора $y_{nc_\Sigma}^I$ описывает эллипс, оси которого совпадают с осями цилиндров.

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

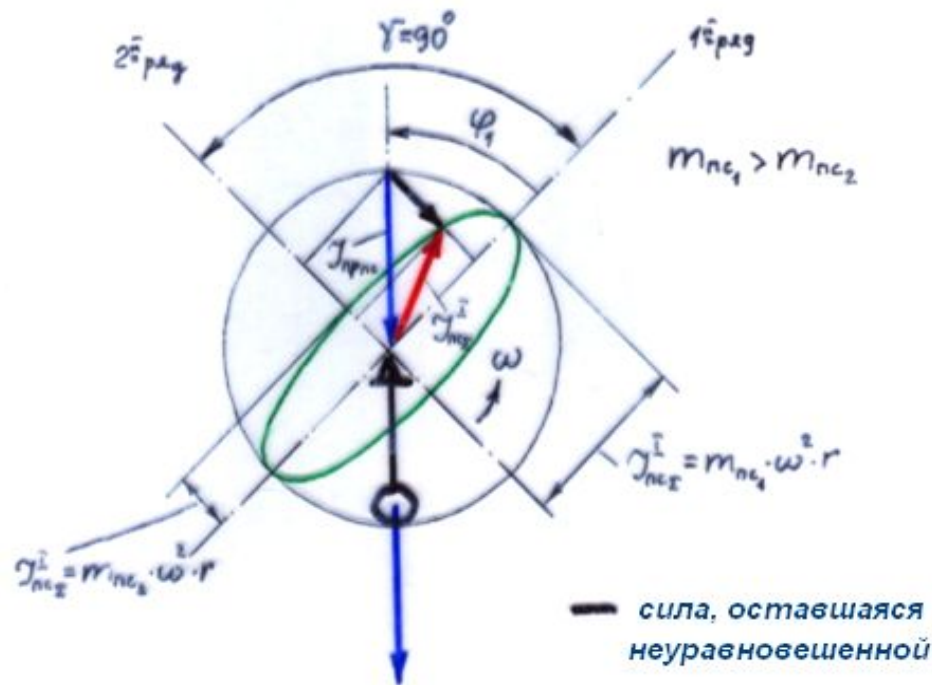
Малая полуось эллипса пропорциональна "max" значению силы $y_{nc_2}^I$ (ряда с меньшей m_{nc_2})

Большая полуось пропорциональна

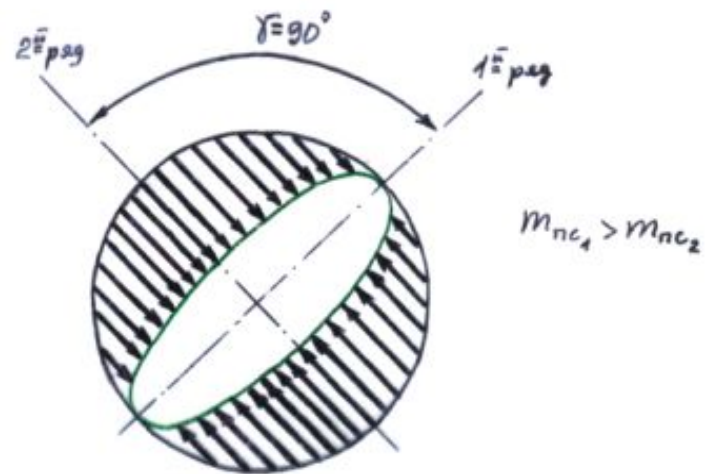
$$|y_{nc_1}^I|_{\max} = m_{nc_1} \cdot \omega^2 \cdot r$$

Малая ось пропорциональна

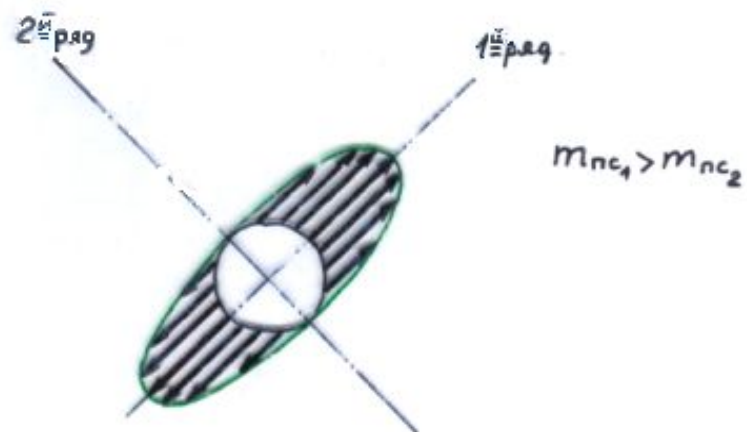
$$|y_{nc_2}^I|_{\max} = m_{nc_2} \cdot \omega^2 \cdot r$$



Рассмотрим случай, когда противовес выбран, исходя из равенства $\gamma_{прпс} = |\gamma_{пс_1}^I|_{max}$



Рассмотрим случай, когда противовес выбран, исходя из равенства $\gamma_{прпс} = |\gamma_{пс_2}^I|_{max}$

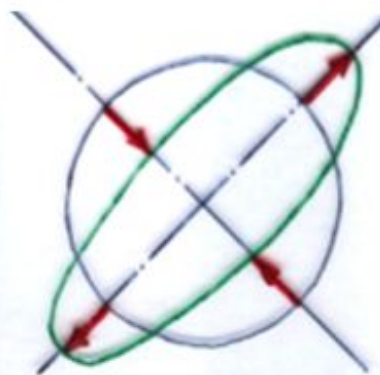


Рекомендуется массу противовеса выбирать таким образом, чтобы остались одинаковыми неуравновешенные силы, направленные по каждой оси (в первом ряду - "недоуравновешенные", а во 2-м ряду - "переуравновешенные" силы)

$$F_{прпс} = \frac{|F_{nc_1}^I|_{max} + |F_{nc_2}^I|_{max}}{2}$$

1-й ряд

2-й ряд



$$m_{nc_1} > m_{nc_2}$$

Уравновешивание V-образного компрессора ($m_{пс_1} = m_{пс_2}$; $\gamma \neq 90^\circ$).

Рассмотрим только III-й этап уравновешивания.

Этап III. Уравновешивание сил $\mathcal{J}_{пс}^I$:

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

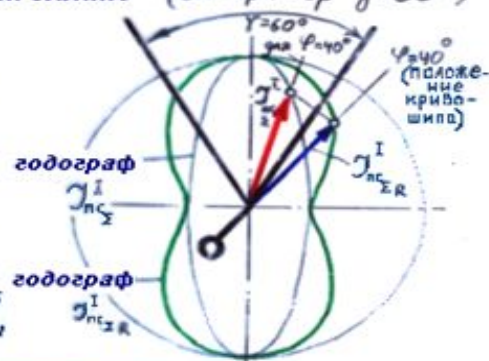
конец вектора $\mathcal{J}_{пс\Sigma}^I$ опишет эллипс (см. пример $\gamma = 60^\circ$)

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

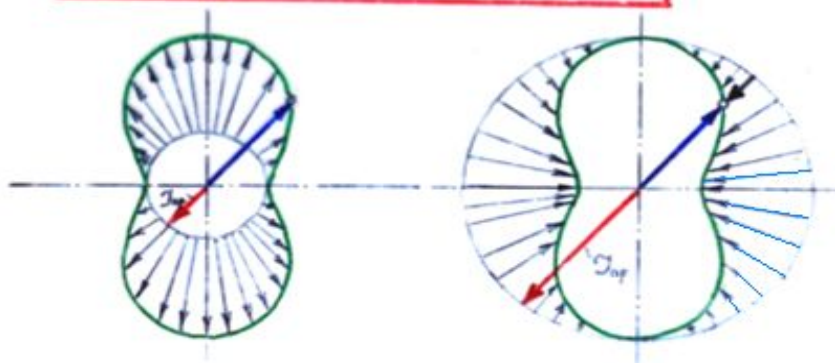
Пример относится к $\varphi = 40^\circ$

— сила \mathcal{J}_{Σ}^I

— часть силы, которая м.б. уравновешена противовесами



$$\mathcal{J}_{пс_2}^I = m_{пс} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sqrt{\cos^2 \varphi + \cos^2 (\varphi + \gamma)}$$

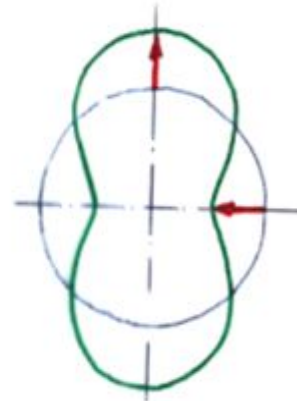


Рекомендуется массу противовесов выбирать таким образом, чтобы "переуравновешенные" силы были равны "недоуравновешенным".

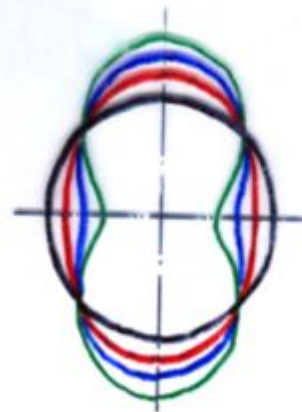
Другими словами силу инерции противовесов выбирают

$$J_{прпс}^I = \frac{|J_{н\bar{e}}^I|_{\max} + |J_{н\bar{e}}^I|_{\min}}{2}$$

Из $J_{прпс}^I$ находят $m_{прпс}$.



Вид годографа силы, которая может быть уравновешена зависит от угла развала цилиндров γ .

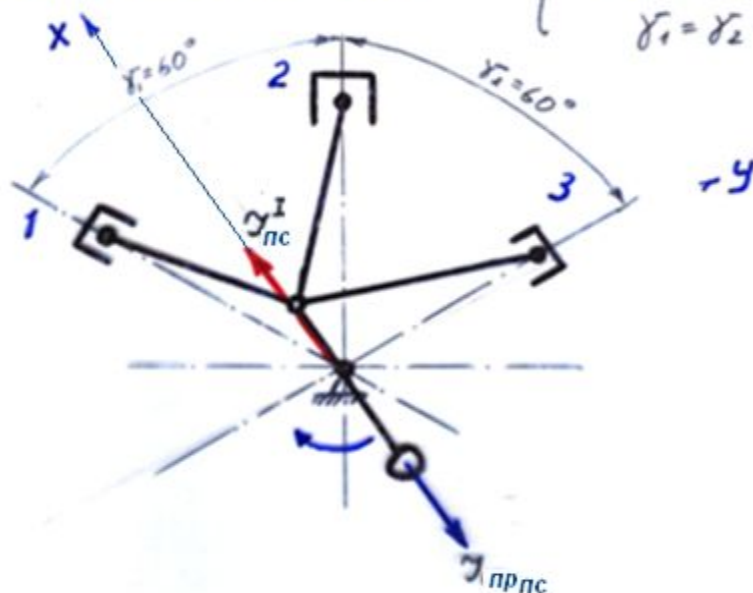


- $\gamma = 90^\circ$
- $\gamma = 80^\circ$
- $\gamma = 70^\circ$
- $\gamma = 60^\circ$

Уравновешивание W-образного компрессора.

Кратко рассмотрим случай

$$\begin{cases} m_{пс1} = m_{пс2} = m_{пс3} \\ \gamma_1 = \gamma_2 = 60^\circ \end{cases}$$



$$\gamma_{пс\Sigma}^I = \sqrt{(\gamma_{псx}^I)^2 + (\gamma_{псy}^I)^2}$$

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

Сила $\gamma_{пс\Sigma}^I$ - постоянна по величине
(не зависит от φ),

- направлена всегда по линии кривошипа.

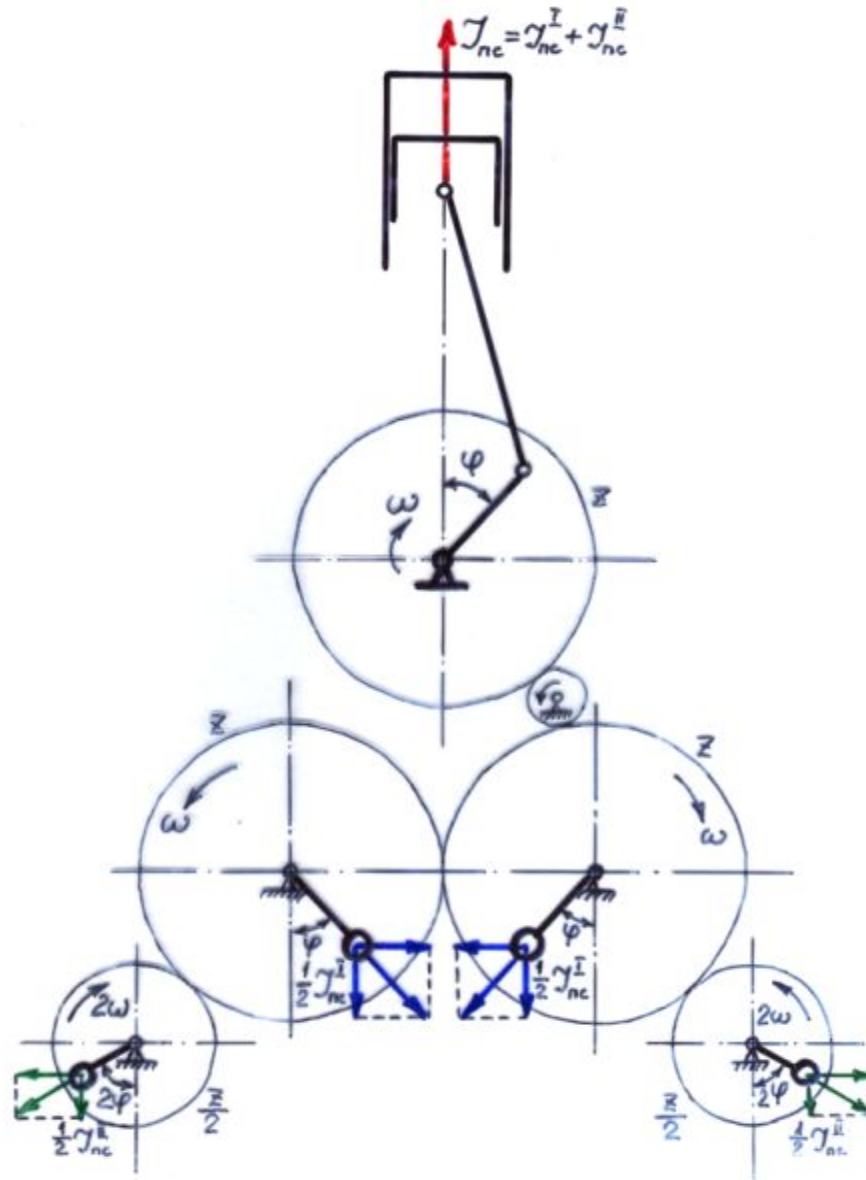
Следовательно, $\gamma_{пс\Sigma}^I$ может быть полностью уравновешена противовесами на валу.

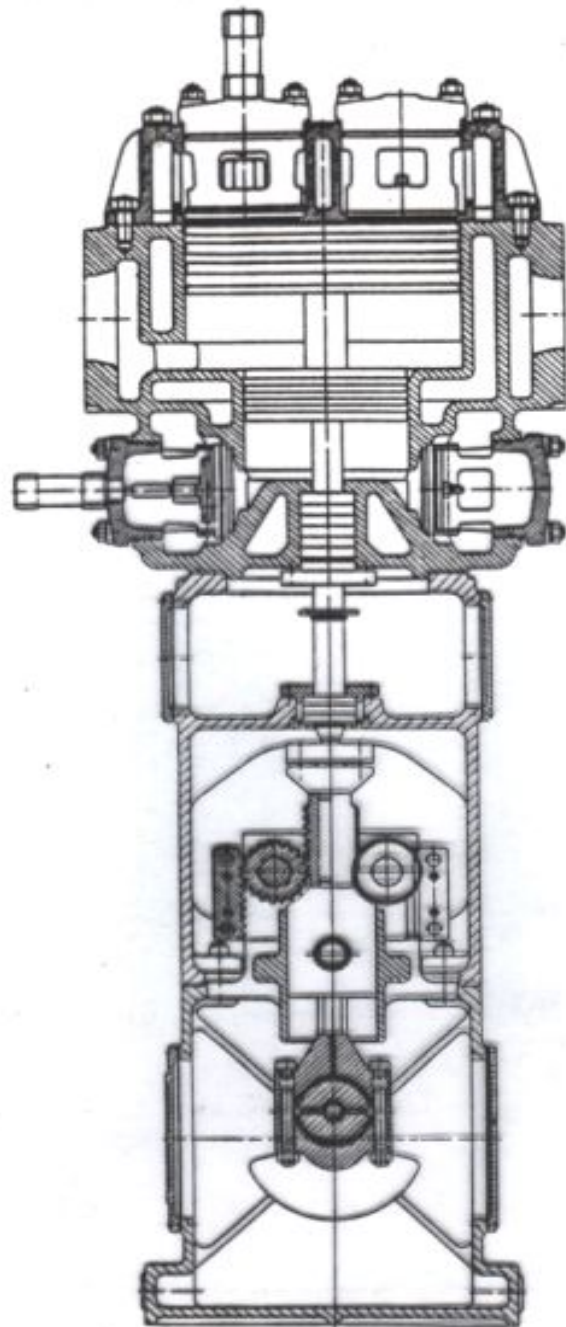
Уравновешивание компрессоров
производных схем.

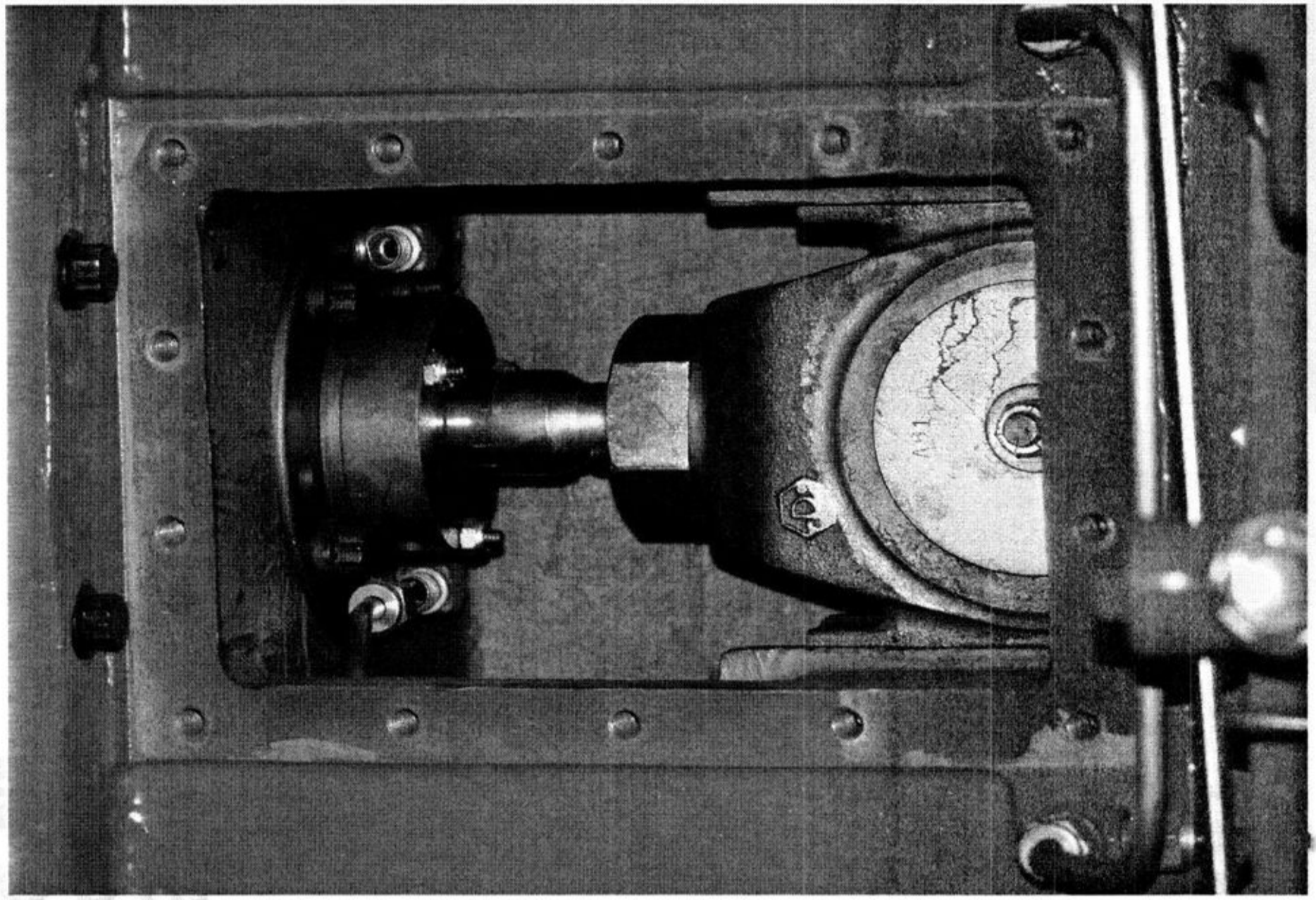
(Уравновесить самостоятельно).



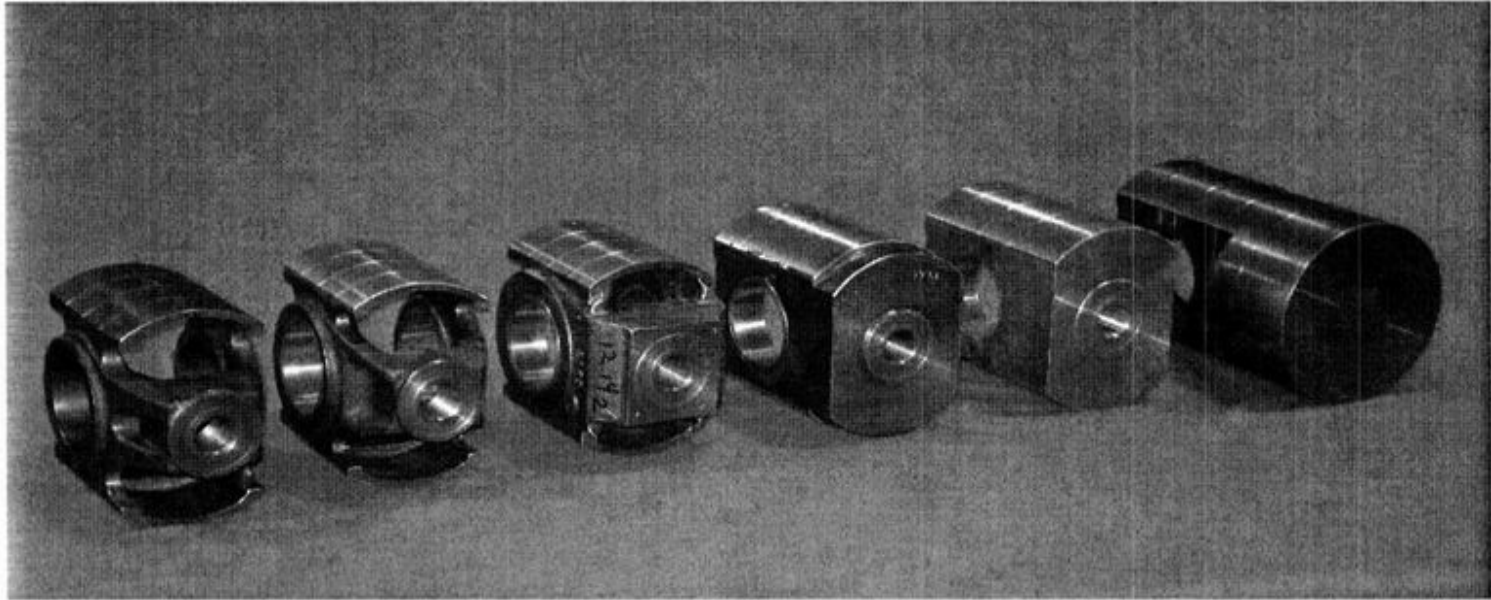
Уравновешивание с помощью спец. механизма.







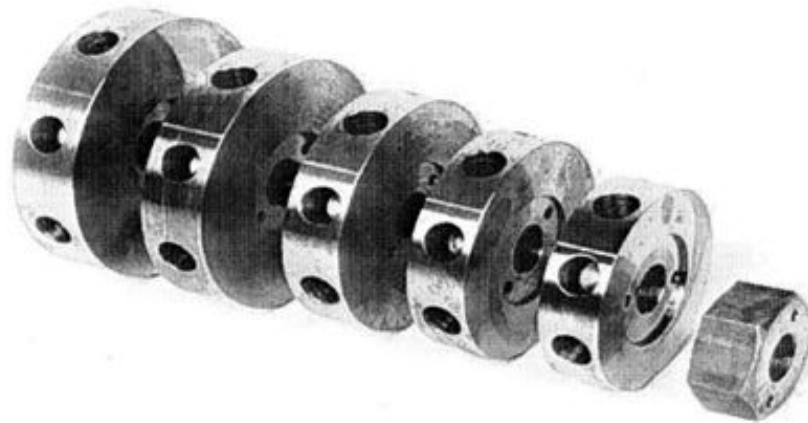
Крейцкопф



Крейцкопфы различных масс

На каждом крейцкопфе проштампован его вес.

БАЛАНСИРОВОЧНЫЕ ГАЙКИ



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