



2 ФАКУЛЬТЕТ
«ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ»



САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

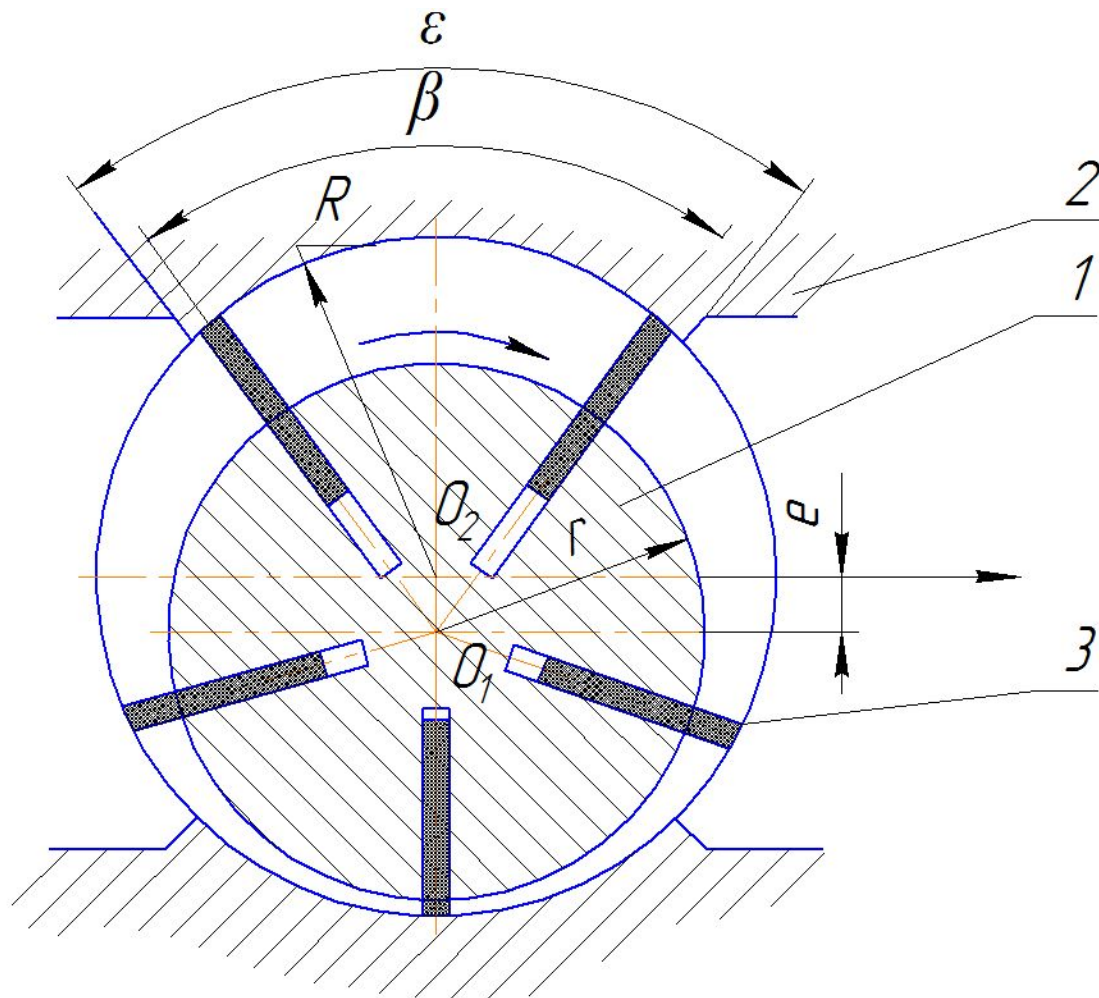
Лекция 8

Пластинчатые (шиберные) гидромашины

Пластичные гидромашины подразделяются на:

- машины однократного действия (за один оборот вала происходит один цикл работы, включающий в себя процесс всасывания и нагнетания);
- многократного действия (за один оборот вала происходит два, три и более циклов работы).

Пластинчатые гидромашины однократного действия



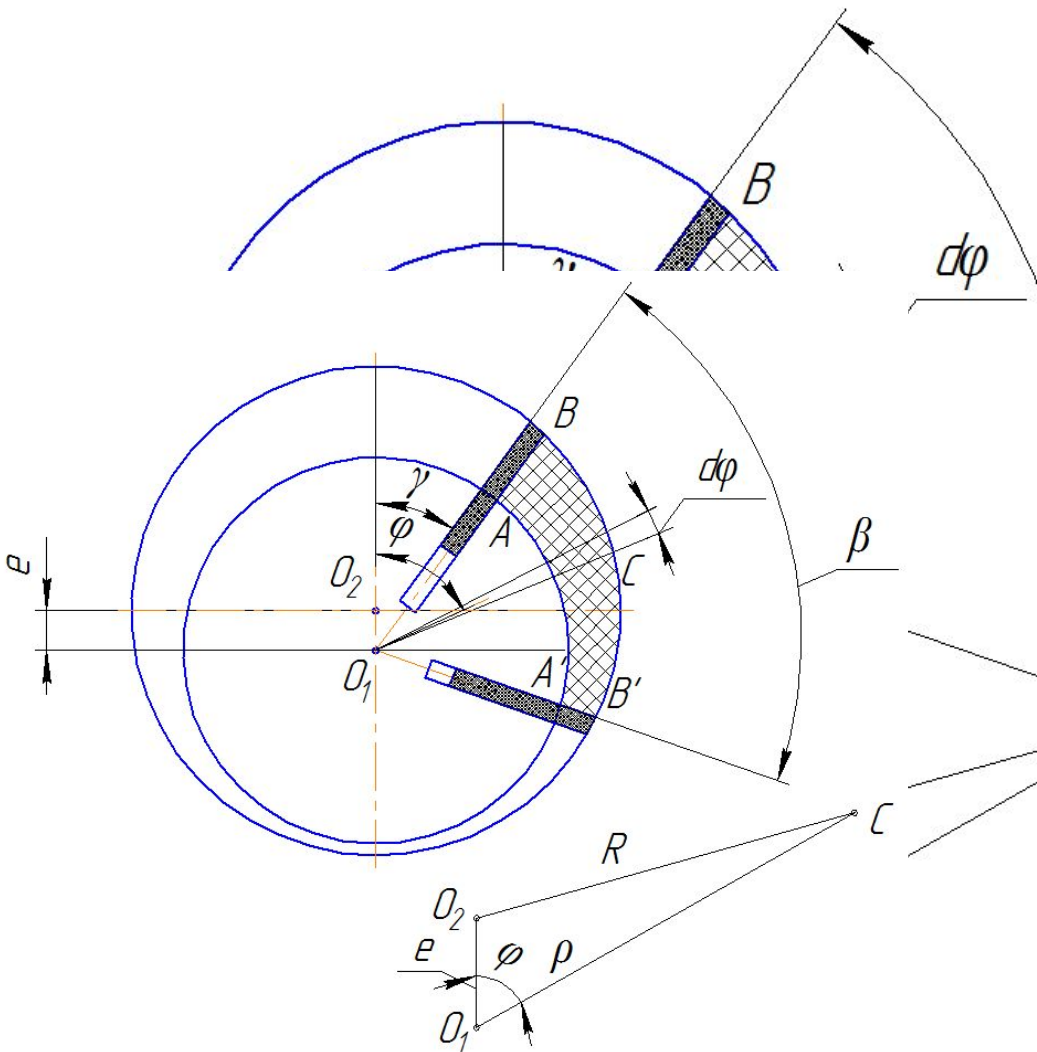
$$\beta = \frac{2\pi}{z}$$

угол между
шиберами в
роторе,
где z – число
шиберов

Ротор 1, статор 2, пластины 3

Определение подачи насоса

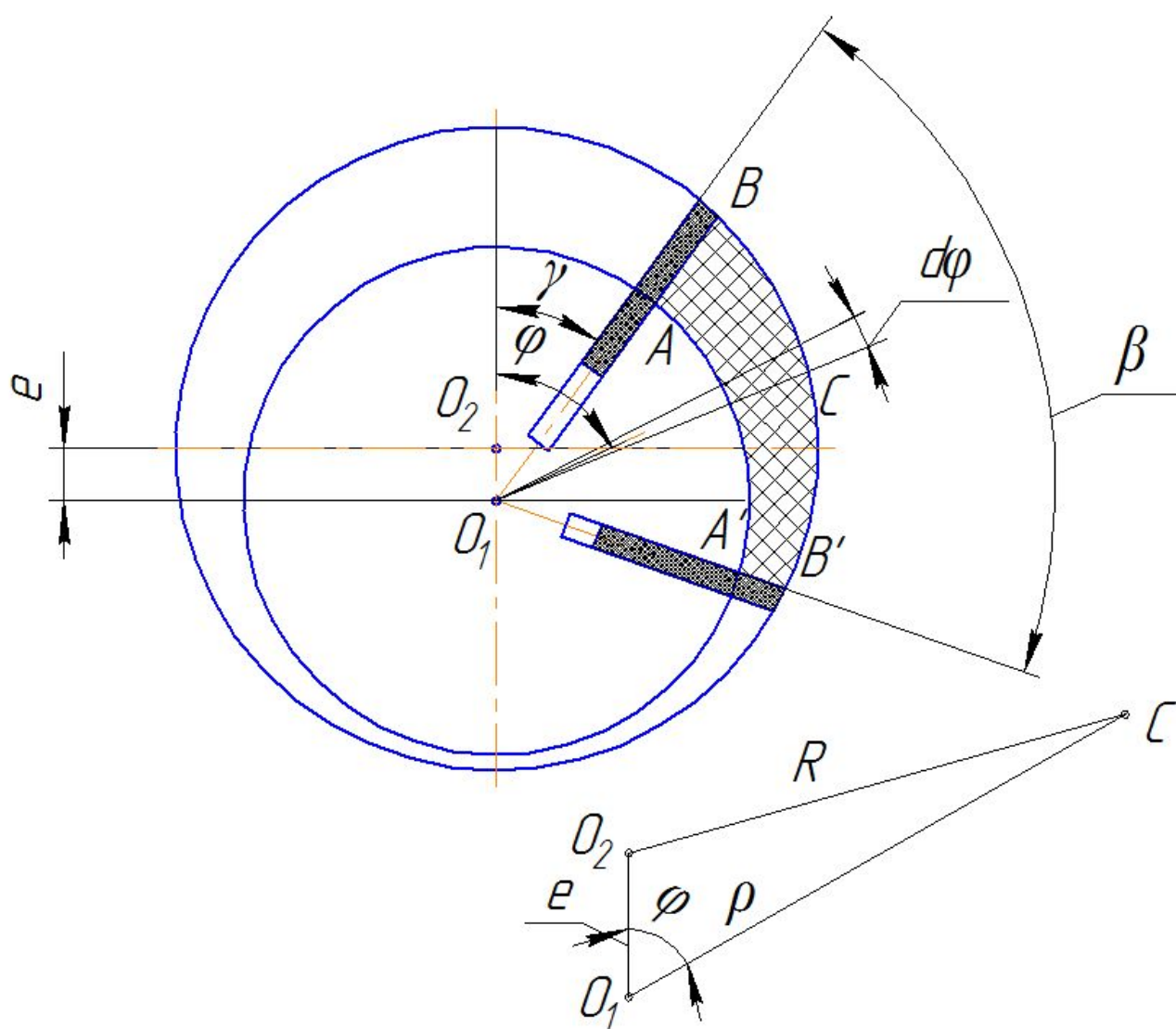
Необходимо определить площадь рабочей клетки $ABV'A'$ в функциях угла γ поворота ротора.



заключенную между радиусами,

$$dS = \frac{1}{2} (\rho^2 - r^2) d\varphi$$

где ρ – радиус-вектор в полярных координатах с центром в точке O_1 ;
 r – радиус ротора



Из $\Delta O_1 O_2 C$ $\rho = \varnothing \cos \varphi = \sqrt{R^2 - (\varnothing \sin \varphi)^2}$

где R – радиус статора

Проинтегрировав последнее выражение в пределах от γ до $(\gamma+\beta)$, получим выражение для площади рабочей клетки АВВ'А':

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{1}{2} \int_{\gamma}^{\gamma+\beta} \left\{ \left[\frac{\beta}{R} \cos \varphi + \sqrt{R^2 - \left(\frac{\beta}{R} \sin \varphi \right)^2} \right]^2 - r^2 \right\} d\varphi = \\
 &= \frac{1}{2} \left\{ \int_{\gamma}^{\gamma+\beta} \frac{\beta^2}{R^2} \cos^2 \varphi + \int_{\gamma}^{\gamma+\beta} 2 \frac{\beta}{R} \cos \varphi + \sqrt{R^2 - \left(\frac{\beta}{R} \sin \varphi \right)^2} d\varphi + \int_{\gamma}^{\gamma+\beta} R^2 d\varphi - \int_{\gamma}^{\gamma+\beta} \frac{\beta^2}{R^2} \sin^2 \varphi d\varphi - \int_{\gamma}^{\gamma+\beta} r^2 d\varphi \right\} = \\
 &= \frac{\beta^2}{4} [\sin 2(\gamma + \beta) - \sin 2\gamma] + \\
 &\quad - \frac{R\beta}{2} \left\{ \sin(\gamma + \beta) \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\beta}{R} \sin(\gamma + \beta) \right)^2 \right]} - \sin \gamma \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{R} \sin \gamma \right)^2} + \frac{R}{\beta} \arcsin \left[\frac{\beta}{R} \sin(\gamma + \beta) \right] - \frac{R}{\beta} \arcsin \left(\frac{\beta}{R} \sin \gamma \right) \right\} + \\
 &\quad + \frac{R^2 - r^2 - \beta^2}{2} \cdot \beta
 \end{aligned}$$

С учетом того, что $\frac{\beta}{R} \leq 0,1$

$$\sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{R} \sin \frac{\beta}{2} \right)^2} \approx 1;$$

можно принять

$$\arcsin \frac{\beta}{R} \approx \frac{\beta}{R},$$

$$S = \frac{\delta^2}{4} \sin 2(\gamma + \beta) - \frac{\delta^2}{4} \sin 2\gamma + R\delta \sin 2(\gamma + \beta) - R\delta \sin 2\gamma + \frac{R^2 - r^2 - \delta^2}{2} \cdot \beta$$

Без учета объема шиберов мгновенная подача одной рабочей камерой может быть выражена уравнением

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{d\gamma} \cdot \frac{d\gamma}{dt} = B \frac{dS}{d\gamma} \omega$$

Где $\frac{dS}{d\gamma} = \frac{\delta^2}{2} \cos 2(\gamma + \beta) - \frac{\delta^2}{2} \cos 2\gamma + R\delta \cos 2(\gamma + \beta) - R\delta \cos \gamma;$

$\omega = \frac{d\gamma}{dt}$ – угловая скорость вращения ротора.

$$\frac{dV}{dt} = -\omega BR \left\{ \cos \gamma - \cos(\gamma + \beta) + \frac{R}{R} [\cos^2 \gamma - \cos^2(\gamma + \beta)] \right\}$$

где минус указывает на то, что с увеличением угла γ объем камеры уменьшается

Мгновенная (геометрическая) подача всех рабочих камер

$$Q = \sum_H \frac{dV}{dt} = \omega BR \left\{ \sum_{K=0}^{M-1} \cos(\gamma + K\beta) - \sum_{K=0}^{M-1} \cos(\gamma + \beta + K\beta) + \frac{R}{R} \left[\sum_{K=0}^{M-1} \cos^2(\gamma + K\beta) - \sum_{K=0}^{M-1} \cos^2(\gamma + \beta + K\beta) \right] \right\},$$

m – число камер, одновременно находящихся в зоне нагнетания;

k – коэффициент, принимаемый $0, 1, \dots, (m-1)$

После суммирования получим

$$Q = \omega B \operatorname{Re} \left\{ \cos \gamma - \cos(\gamma + m\beta) + \frac{R}{e} \left[\cos^2 \gamma - \cos^2(\gamma + m\beta) \right] \right\}$$

Для определения средней подачи нужно определить рабочий объем гидромашины

Площадь рабочей клетки наибольшая при $\gamma = \beta / 2$

и наименьшая при $\gamma = \pi - \frac{\beta}{2}$

$$S_{MAX} = \frac{e^2}{2} \sin \beta + 2 Re \sin \frac{\beta}{2} + \frac{R^2 - r^2 - e^2}{2} \beta;$$

$$S_{MIN} = \frac{e^2}{2} \sin \beta - 2 Re \sin \frac{\beta}{2} + \frac{R^2 - r^2 - e^2}{2} \beta.$$

Количество жидкости, отдаваемой каждой рабочей камерой в нагнетательную магистраль: $(S_{MAX} - S_{MIN})B$

а рабочий объем гидромашины

$$V_0 = (S_{MAX} - S_{MIN})Bz = 4 Re \sin \frac{\beta}{2} Bz$$

Средняя подача гидромашины без учета толщины пластин

$$Q_{CP} = V_0 \cdot n = 4 Re \sin \frac{\beta}{2} Bz \frac{\omega}{2\pi} = 4\pi Re B\omega K$$

Где $\omega = 2\pi n; \beta = \frac{2\pi}{z}; K = \frac{\sin \frac{\pi}{z}}{\frac{\pi}{z}}$.

Неравномерность подачи зависит от числа шиберов

При z четном $m\beta = \pi$

мгновенная подача будет равна $(Q)_r = 2\omega B Re \cos \lambda$

максимальная подача будет при $\gamma = 0$

минимальная при $\gamma = \pm \frac{\beta}{2} = \pm \frac{\pi}{z}$

$$(Q)_{MAX} = 2\omega B Re;$$

$$(Q)_{MIN} = 2\omega B Re \cos \frac{\pi}{z}.$$

Неравномерность подачи

$$\delta_r = \frac{(Q)_{MAX} - (Q)_{MIN}}{Q_{CP}} = \frac{2\omega B Re - 2\omega B Re \cos \frac{\pi}{z}}{4\pi R \omega Ke B} = \frac{1 - \cos \frac{\pi}{z}}{2 \sin \frac{\pi}{z}} \cdot \frac{\pi}{z} = \operatorname{tg} \frac{\pi}{2z} \cdot \frac{\pi}{z}$$

Для приближенного вычисления можно принять

$$\operatorname{tg} \frac{\pi}{2z} \approx \frac{\pi}{2z},$$

И тогда $\delta_r = \frac{5}{z^2}$.

При z нечетном $m\beta = \begin{cases} \pi + \frac{\pi}{z} & \text{при } -\frac{\pi}{z} \leq \gamma \leq 0; \\ \pi - \frac{\pi}{z} & \text{при } 0 \leq \gamma \leq -\frac{\pi}{z}; \end{cases}$

Мгновенная подача

$$(Q)_H = \omega B \operatorname{Re}[\cos \gamma - \cos(\gamma + m\beta)]$$

Максимальное значение будет при $\gamma = \pm \frac{\pi}{2z}$
минимальное при $\gamma = \pm \frac{\pi}{z}$

$$(Q)_{MAX} = 2\omega B \operatorname{Re} \cos \frac{\pi}{2z};$$

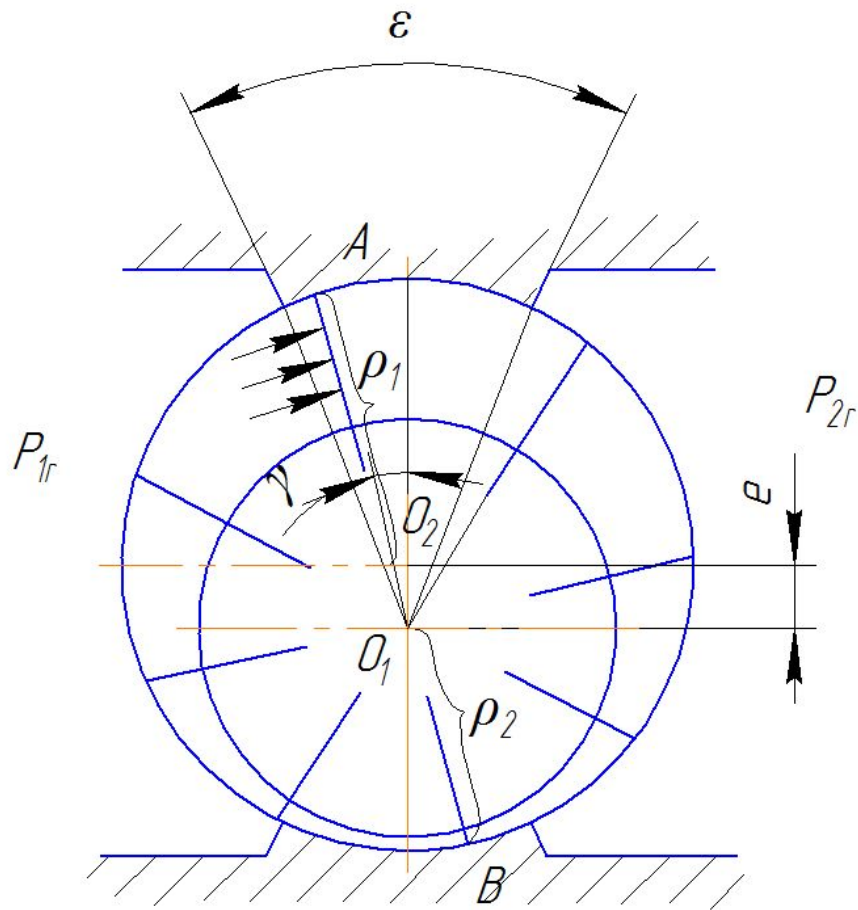
$$(Q)_{MIN} = 2\omega B \operatorname{Re} \left(1 + \cos \frac{\pi}{z} \right).$$

Неравномерность подачи $\delta_H = \frac{(Q)_{MAX} - (Q)_{MIN}}{Q_{CP}} = \operatorname{tg} \frac{\pi}{4z} \cdot \frac{\pi}{z}$

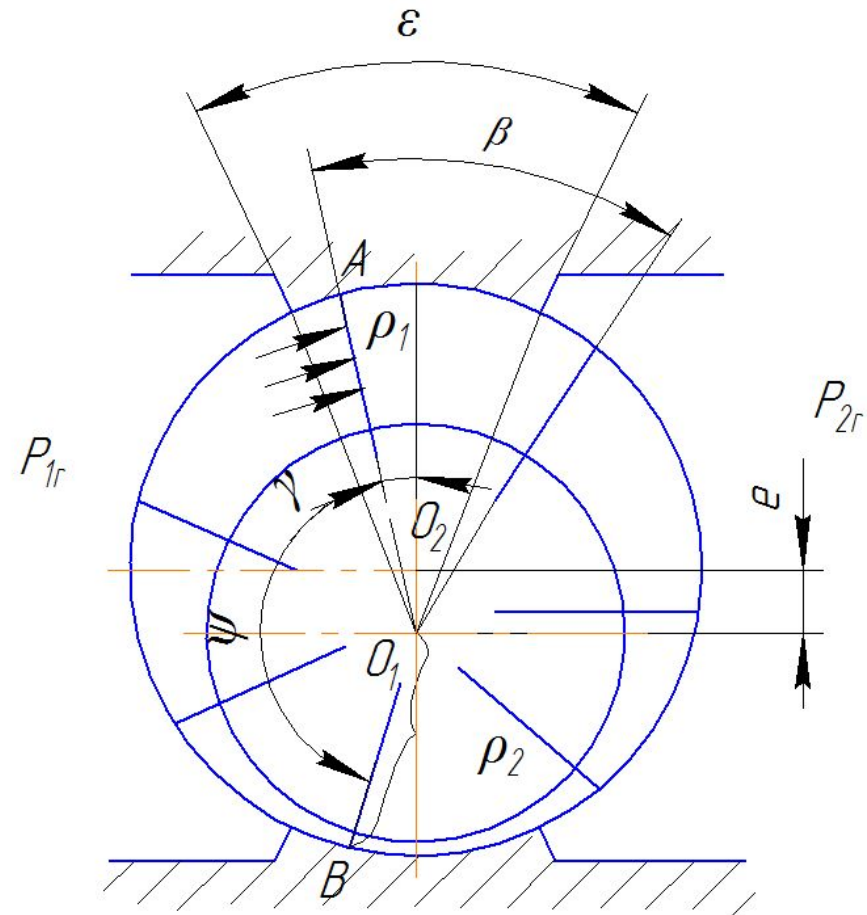
Принимая $\operatorname{tg} \frac{\pi}{4z} \approx \frac{\pi}{4z}$

Неравномерность (нечетное число шиберов) $\delta_H = \frac{1.25}{z^2}$

Крутящий момент гидромотора однократного действия



четное число



нечетное число

$$M_1 = P_r B (\rho_1 - r) \left(r + \frac{A - r}{2} \right) = \frac{PB}{2} (\rho_1^2 - r^2);$$

$$M_2 = \frac{P_r B}{2} (\rho_2^2 - r^2);$$

$$M = M_1 - M_2 = \frac{P_r B}{2} (\rho_1^2 - \rho_2^2),$$

Где $\rho_1 = R \cos \gamma + R$; $\rho_2 = R \cos(\gamma + \psi) + R$;

$\psi = \pi$ — для четного числа z ;

$\psi = \begin{cases} \pi - \pi / z & \text{при } \pi / z \geq \gamma \geq 0 \\ \pi + \pi / z & \text{при } -\pi / z \leq \gamma \leq 0 \end{cases}$ для нечетного числа z

Выражение для крутящего момента на валу гидромотора (без учета толщины шиберов) при четном числе шиберов

$$M_{ГМ} = 2 P_r B Re \cos \gamma$$

При нечетном числе шиберов

$$M_{ГМ} = 2 P_r B Re [\cos \gamma - \cos(\gamma + \psi)]$$

Среднее значение крутящего момента определяется из условия

$$N_{\text{шг}} = N_{\text{зг}} \cdot \eta_{\text{г}}$$

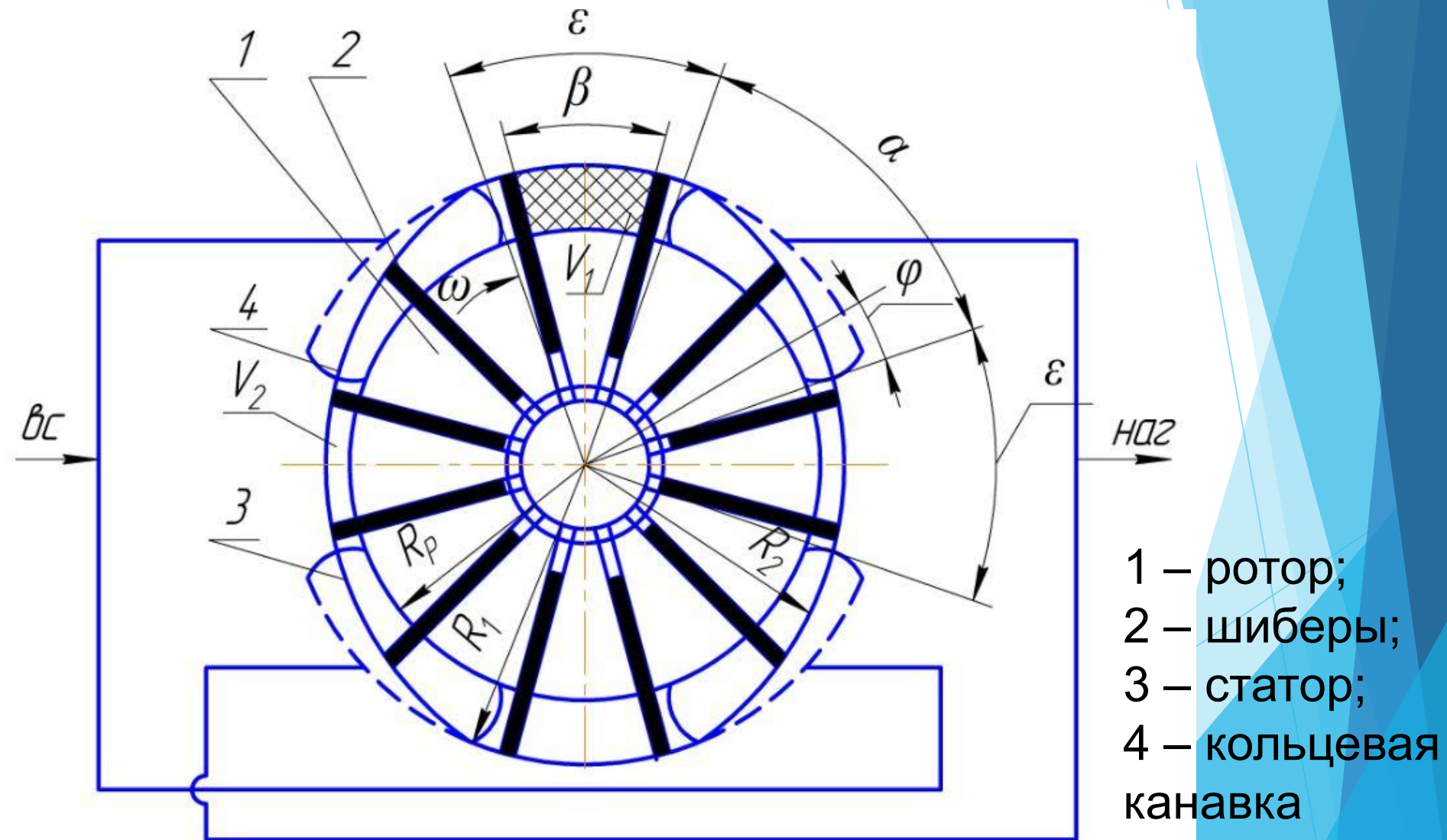
Где $N_{\text{пр}}$ – полезная мощность гидродвигателя
 $N_{\text{зг}}$ – затраченная мощность гидродвигателя
 $\eta_{\text{г}}$ – КПД гидродвигателя

$$M_{\text{г}} \omega = P_{\text{г}} Q_{\text{г}} \eta_{\text{г}}$$

$$M_{\text{г}} = \frac{P_{\text{г}} Q_{\text{г}} \eta_{\text{г}}}{\omega} = \frac{P_{\text{г}}}{2\pi} \cdot V_0 \cdot \eta_{\text{мг}}$$

Где $\eta_{\text{мг}}$ – механический КПД гидродвигателя
 V_0 – рабочий объем гидромашины

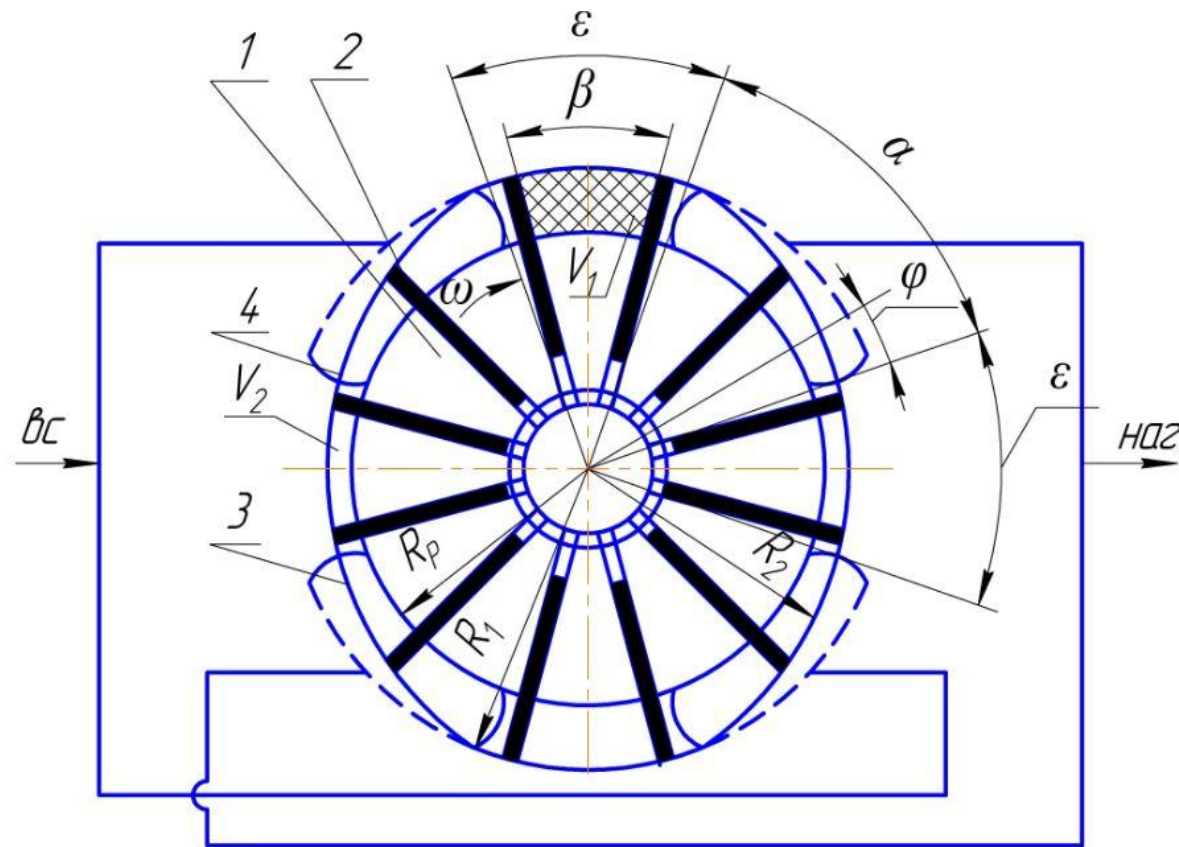
Шиберные гидромашины двукратного действия



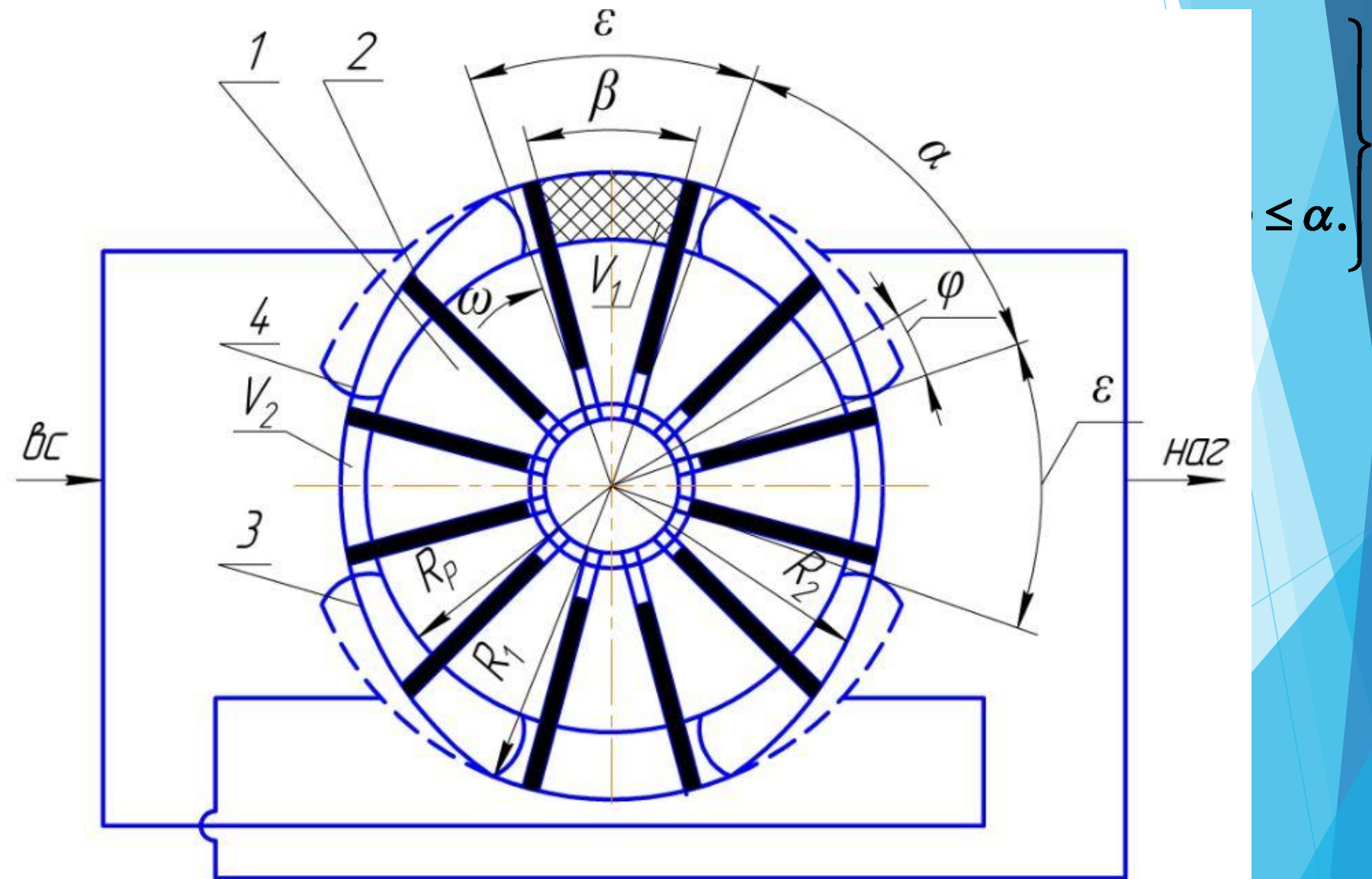
Внутренняя поверхность на углах α выполняется радиусами

$$\rho = R_2 + \frac{2(R_1 - R_2)}{\alpha^2} \cdot \varphi^2 \quad - \text{ на углах } 0 < \varphi \leq \frac{\alpha}{2};$$

$$\rho = 2R_2 - R_1 + \frac{4(R_1 - R_2)}{\alpha} \cdot \left(\varphi - \frac{\varphi^2}{2\alpha}\right) \quad - \text{ на углах } \frac{\alpha}{2} < \varphi \leq \alpha.$$



Производительность ПЛГ двукратного действия



1 зона: ротор поворачивается на угол $0 < \varphi \leq \frac{\alpha}{2}$

$$S = \int_0^{\varphi} \frac{1}{2} (\rho^2 - r^2) d\varphi = \int_0^{\varphi} \frac{1}{2} \left\{ \left[R_2 + \frac{2(R_1 - R_2)}{\alpha^2} \varphi^2 \right]^2 - r^2 \right\} d\varphi.$$

2 зона: угол поворота $\frac{\alpha}{2} < \varphi \leq \alpha$

площадь рабочей камеры определится уравнением

$$S = \int_{\alpha/2}^{\varphi} \frac{1}{2} \left\{ \left[2R_2 - R_1 + \frac{4(R_1 - R_2)}{\alpha} \left(\varphi - \frac{\varphi^2}{2\alpha} \right) \right]^2 - r^2 \right\} d\varphi +$$
$$+ \int_{\varphi-\beta}^{\alpha/2} \frac{1}{2} \left\{ \left[R_2 + \frac{2(R_1 - R_2)}{\alpha^2} \varphi^2 \right] - r^2 \right\} d\varphi$$

второй член появиться при условии: $z > 8$;

площадь рабочей камеры в этой зоне

определяется двумя уравнениями профиля кривой статора

Геометрическая

подача

Расходы отдельных камер, одновременно находящихся в зоне нагнетания, при любом угле поворота

$$Q = \sum_H \frac{dV}{dt} = \omega B \sum_H \frac{dS}{d\varphi} = \omega B (R_1^2 - R_2^2).$$

С учетом влияния объема шибера

$$Q = \omega B (R_1^2 - R_2^2) - k \frac{v}{\omega} S$$

Где В – ширина шибера;

К – число шибера, одновременно находящихся в полости нагнетания;

V – скорость относительного движения шибера в роторе, принимаемая постоянной;

S - толщина шибера.

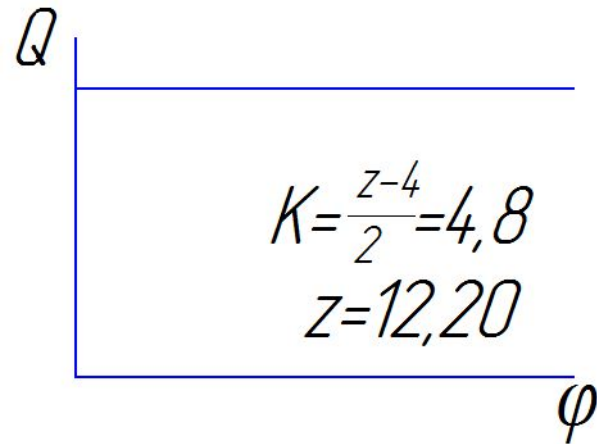
Неравномерность

подачи

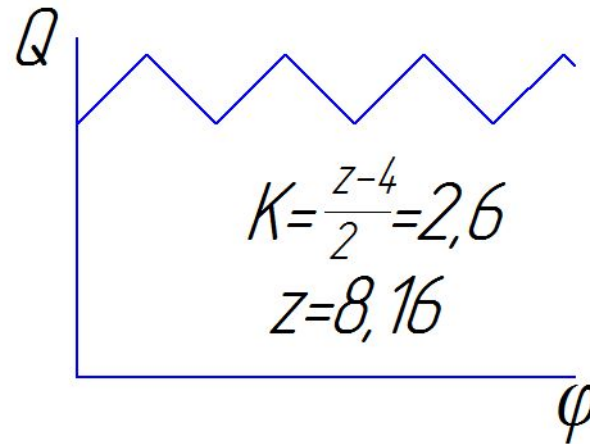
В соответствии с $\rho = R_2 + \frac{2(R_1 - R_2)}{\alpha^2} \cdot \varphi^2$ — на углах $0 < \varphi \leq \frac{\alpha}{2}$;

$\rho = 2R_2 - R_1 + \frac{4(R_1 - R_2)}{\alpha} \cdot (\varphi - \frac{\varphi^2}{2\alpha})$ — на углах $\frac{\alpha}{2} < \varphi \leq \alpha$.

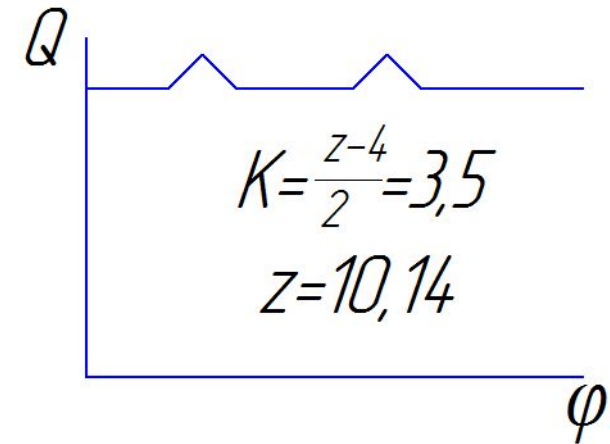
$$K = \frac{z-4}{2}$$



кратно четырем



кратно двум, не
кратно четырем



нечетное
число

По этим причинам в шиберных гидромашинах двукратного (двойного) действия принимают $z=12$.



Влияние объема шиберов на неравномерность подачи

$$Q = \sum_H \frac{dV}{dt} - \sum_H \frac{dV_1}{dt}$$

где

$\sum_H \frac{dV}{dt}$ – подача гидромашины при бесконечно тонких шиберах;

$\sum_H \frac{dV_1}{dt}$ – отрицательный расход, вызванный

погружением шиберов в ротор при их прибытии в отдающей полости.

Средняя подача ПЛГ двукратного действия

(без учета толщины шиберов)

$$Q_{cp} = \omega B (R_1^2 - R_2^2)$$

С учетом объема, занимаемого шиберами, подача гидромашины уменьшится на величину

$$(R_1 - R_2) S \cdot B \cdot z \frac{\omega}{\pi \cos \tau}$$

и будет равна
$$Q_{cp} = \omega B (R_1 - R_2) \left(R_1 + R_2 - \frac{S_z}{\pi \cos \tau} \right)$$

где τ - угол наклона шиберов в пазах ротора;
S - толщина шиберов.

Расчет основных деталей ПлГ двукратного действия

- Усилие прижима распределительного диска плавающего типа к статору;
- Геометрия распределительных дисков;
- Угол наклона шиберов в пазах ротора;
- Контактные напряжения в деталях шиберных гидромашин;
- Влияние длины шиберов на величину действующих на него усилий.



Расчет усилия прижима распределительного диска плавающего типа к статору

- 55% - утечки между торцами ротора и распределительных дисков;
- один из дисков плавающий с поджатием к статора давлением жидкости и несколькими пружинами;
- усилие прижима повышается с повышением давления;
- для нормальной работы гидромашины можно принять

$$\frac{F_n}{F_0} \geq 1,2$$

площадь прижима и отжима соответственно

- При пуске начальный прижим плавающего диска к статору осуществляется с помощью пружин;
- (возможно вертикальное расположение оси насоса);
- усилие должно обеспечить нужное уплотнение со стороны торцов статора и ротора

$$P_{np} = \frac{P_{np} - G}{F},$$

где

P_{np} – усилие прижима плавающего диска с помощью пружин, $P_{np} = P'_{np} \cdot z$;

P'_{np} – усилие прижима, развиваемого одной пружиной;

z – количество пружин;

F – площадь опорной поверхности диска;

G – вес плавающего диска и ротора с шиберами.

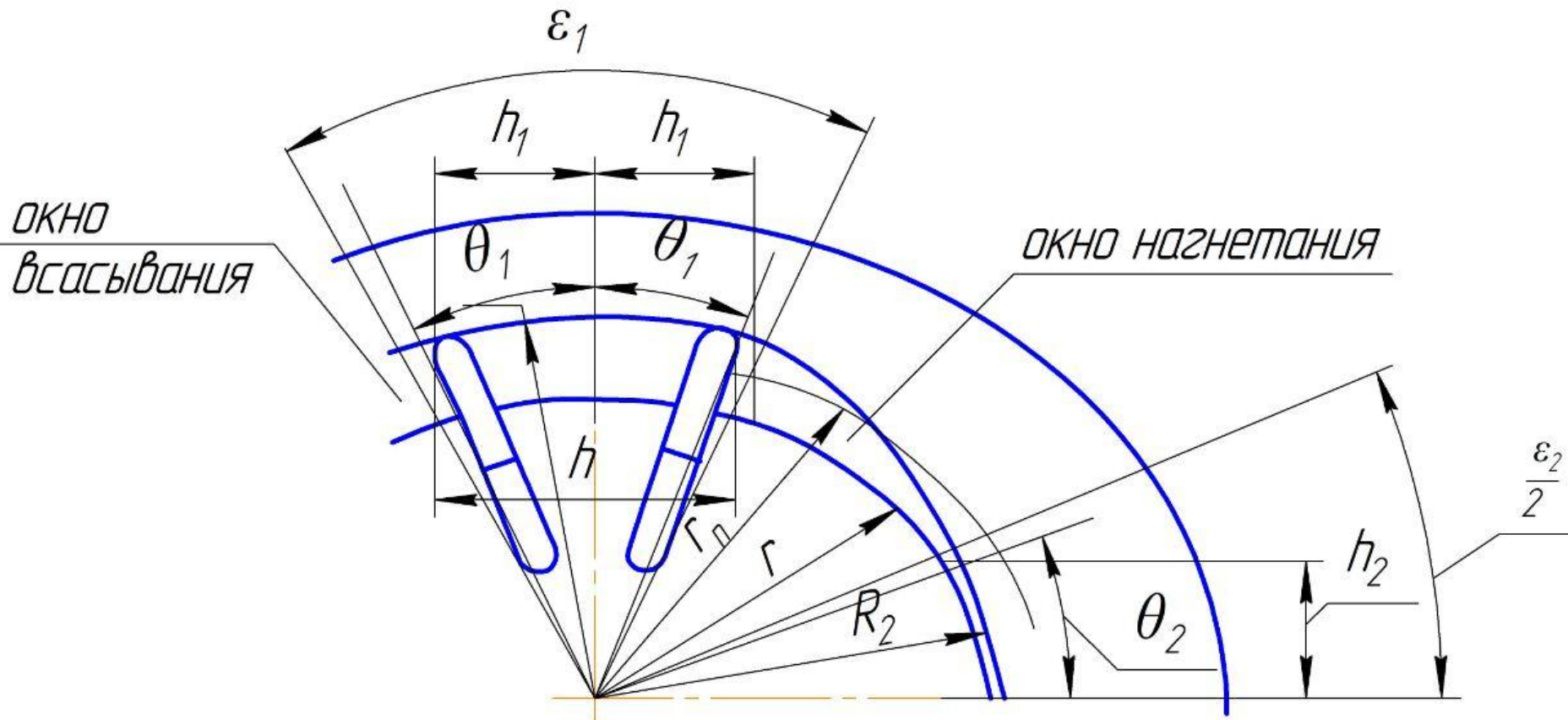
Усилие прижима в ПЛГ уменьшается при увеличении размеров машины.

Геометрия распределительных дисков

Для обеспечения герметичности гидромашины:

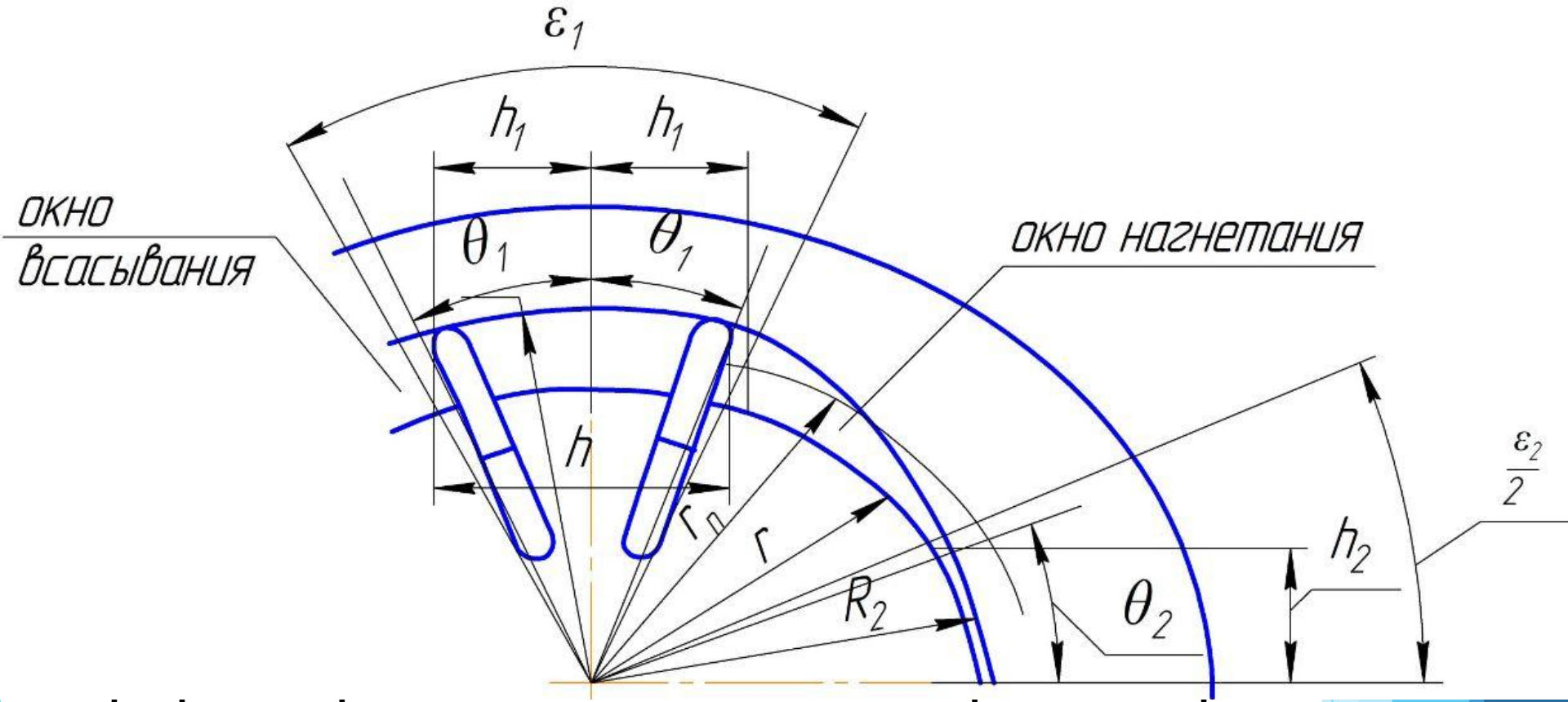
- расстояние между всасывающим и нагнетательным окнами должно быть несколько больше, чем расстояние между концами двух соседних пластин в положении их на этой перемычке;
- при переносе жидкости через перевальную перемычку не должно происходить изменения заземленного объема рабочей жидкости

Для обеспечения первого требования необходимо



$$2\theta_1 \leq \varepsilon_1; \quad 2\theta_2 \leq \varepsilon_2.$$

заземленный объем не попадет на переменный радиус статора раньше, чем произойдет открытие окна распределительного диска



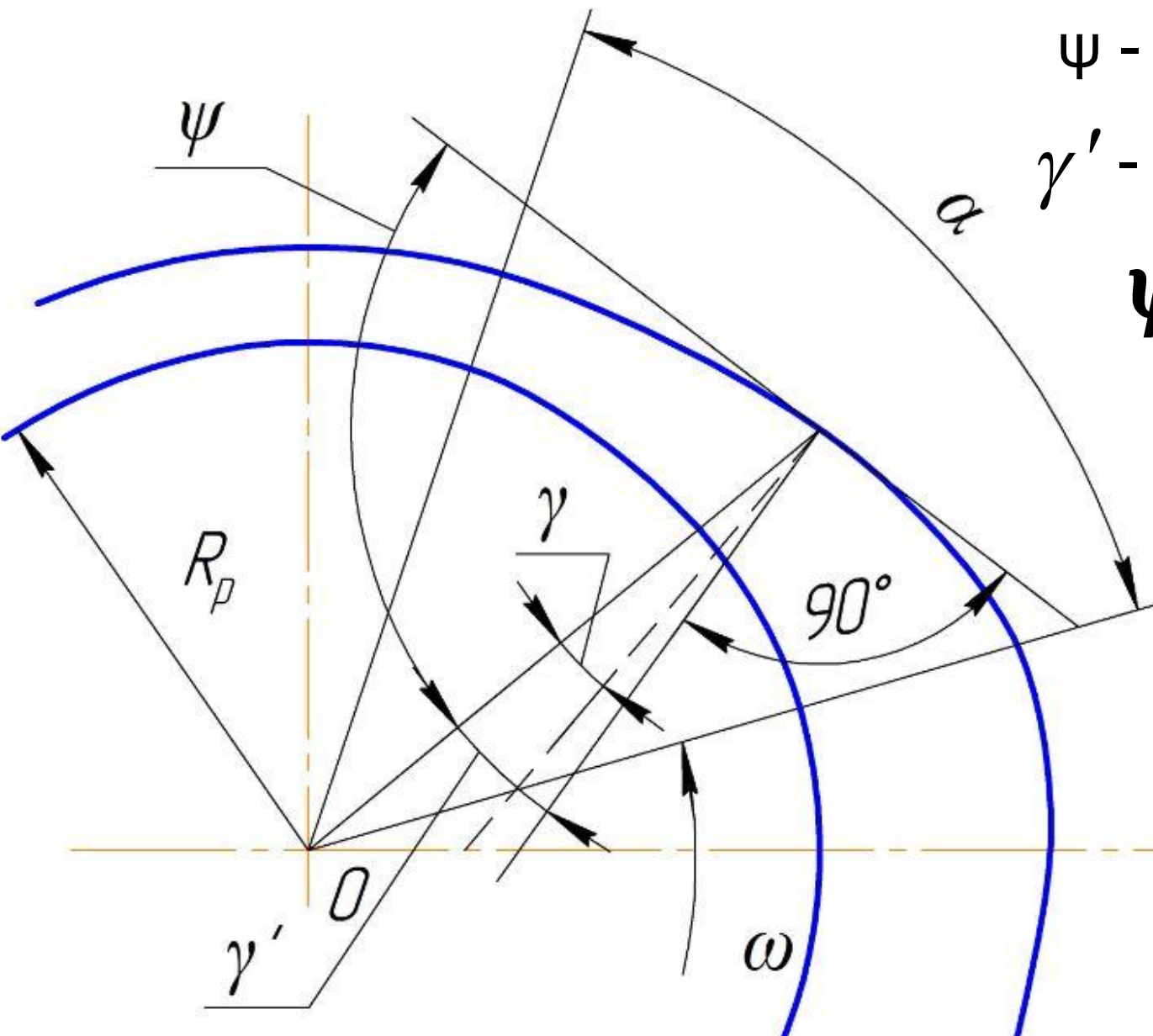
радиуса R_1 была открыта;

- прорезь R_2 была бы перекрыта статором.

$$r_n = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

Размеры прорези подбираются экспериментально

Расчет угла наклона шиберов в пазах ротора



ψ - угол передачи

γ' - угол давления

$$\psi + \gamma' = 90^\circ$$

γ'

Коэф

угла

к та

При

$\text{tg}\gamma$

Где

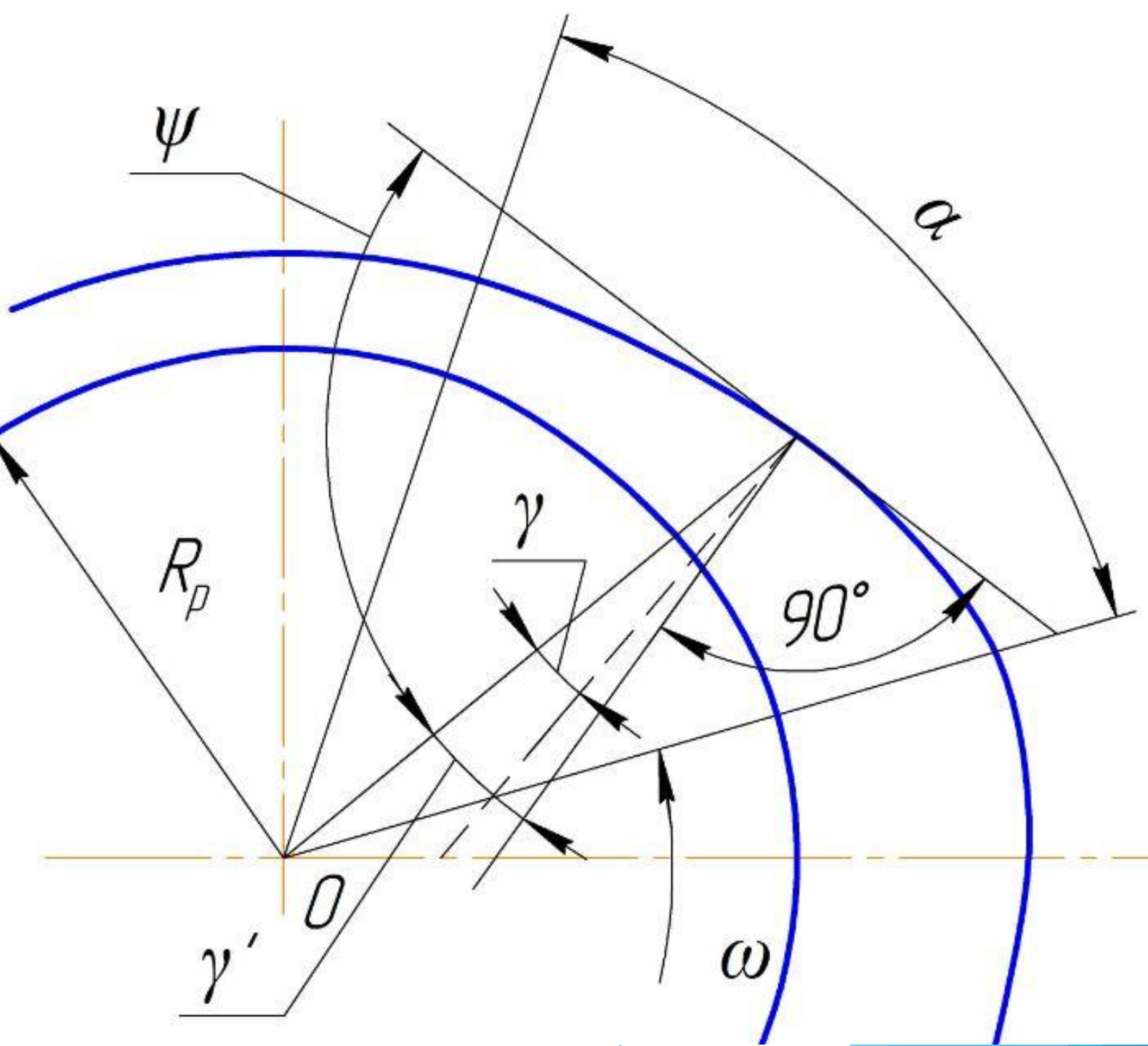
Уме

пут

Над

Нак

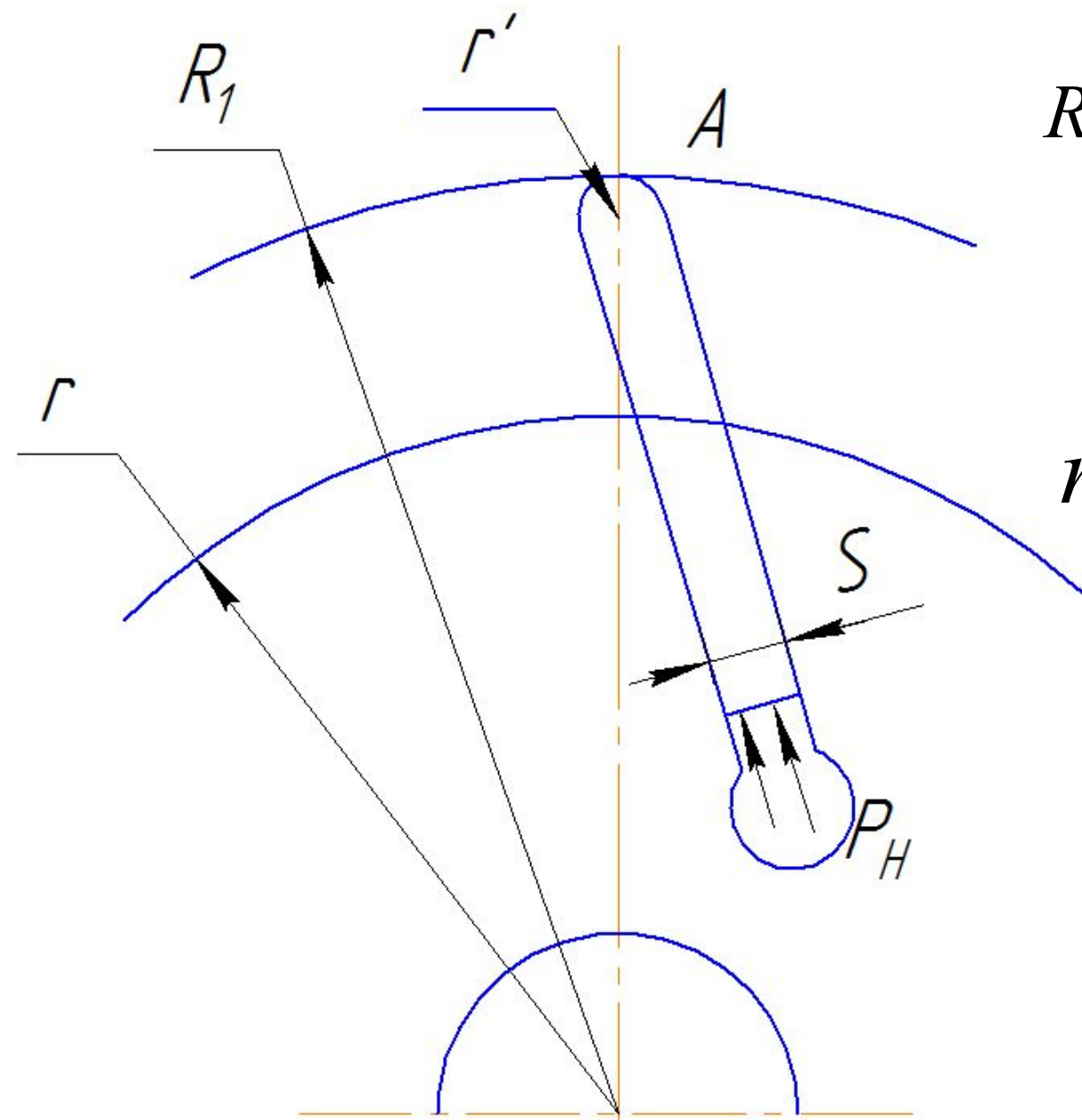
нап



ие

о

Контактные напряжения в деталю ПнГ



R_1 - радиус
внутренней
поверхности
статора;

r' - радиус
скругления
верхней кромки
шибера



Контактное напряжение

$$\sigma_{MAX} = 0.418 \sqrt{\frac{qE(R_1 - r')}{R_1 r'}} \leq [\sigma]$$

где $q = p_{НГ} b$ - нагрузка на единицу длины шибера;

$p_{НГ}$ - давления нагнетания;

b - толщина шибера;

E - модуль упругости материалов шиберов

$E = \frac{2E_1 E_2}{E_1 + E_2}$ - при сжатии тел из разных материалов

R_1 - радиус внутренней поверхности статора;

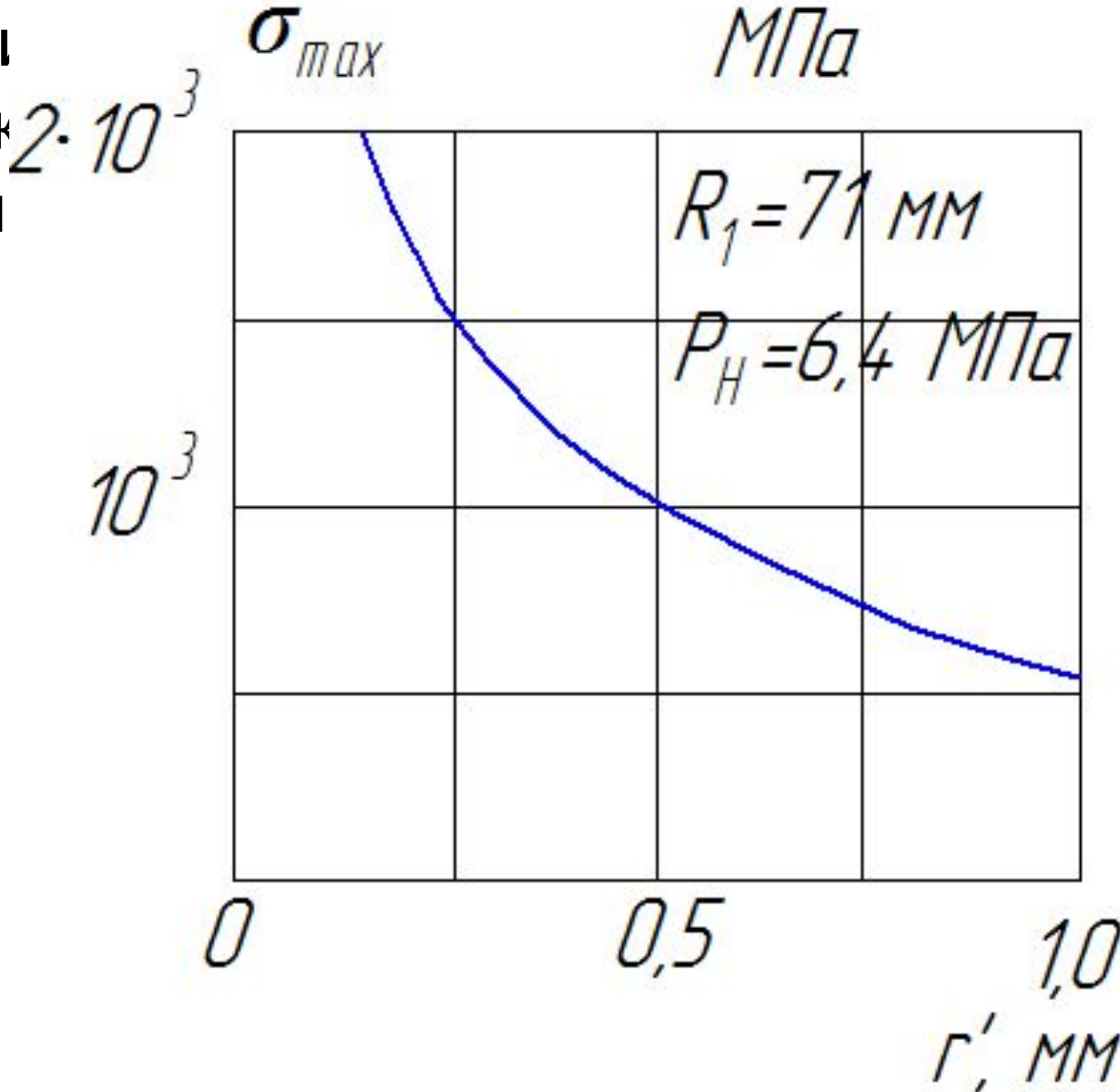
r' - радиус скругления верхней кромки шибера

обычно $r' = 0.1...0.2 \text{ мм}$; $[\sigma] = 2500 \text{ МПа}$

Не учет наклона шиберов при расчете подачи вводит ошибку в 1...2 %

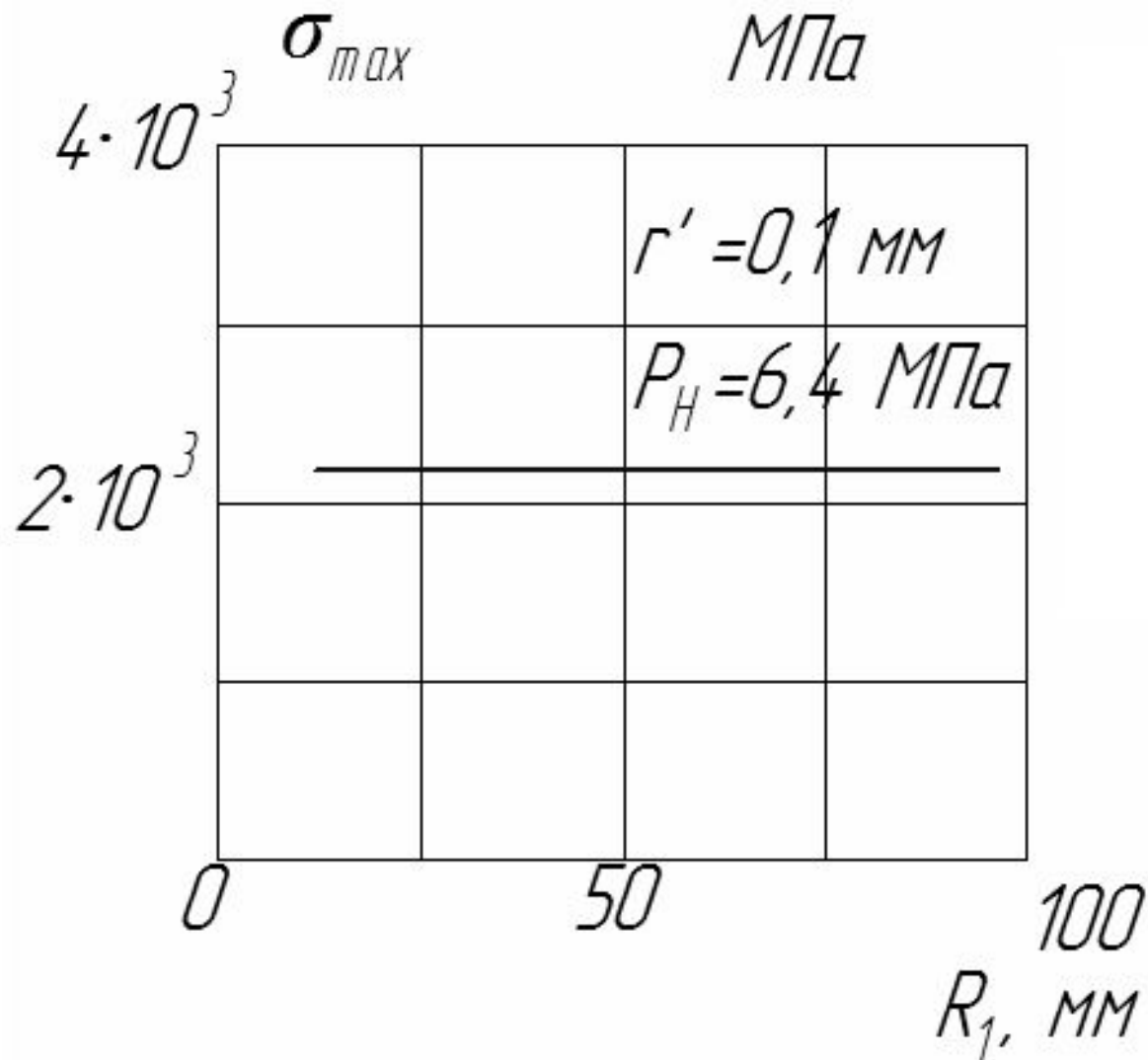
Увели

- СНИЖ
- ВОЗН



шиберов:
стей.

Увеличение радиуса внутренней поверхности статора не приводит к заметному изменению максимального контактного напряжения



Г
С
Э
Д
ОС
ИС
Ш

σ_{max}

МПа

$4 \cdot 10^3$

$r' = 0,1 \text{ мм}$

$R_1 = 71 \text{ мм}$

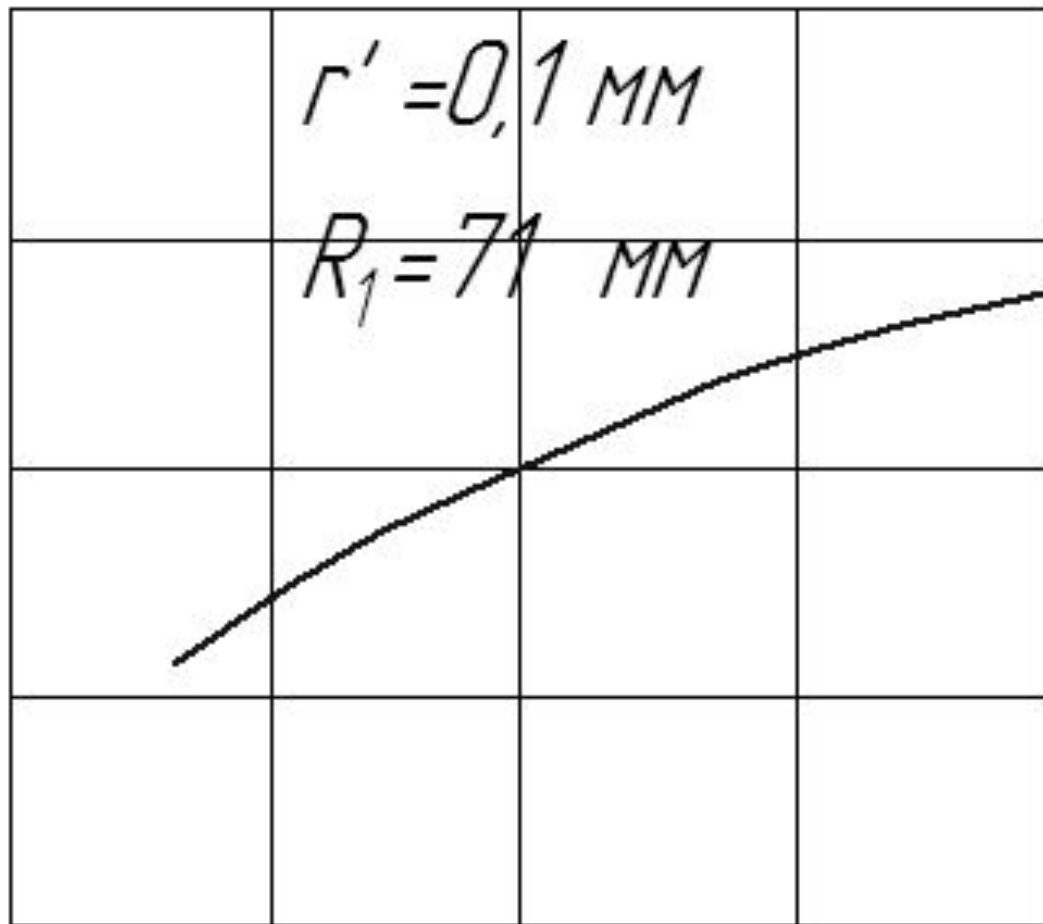
$2 \cdot 10^3$

0

5

10

$P_H, \text{ МПа}$



НИЯ

ие

НОСТЬ

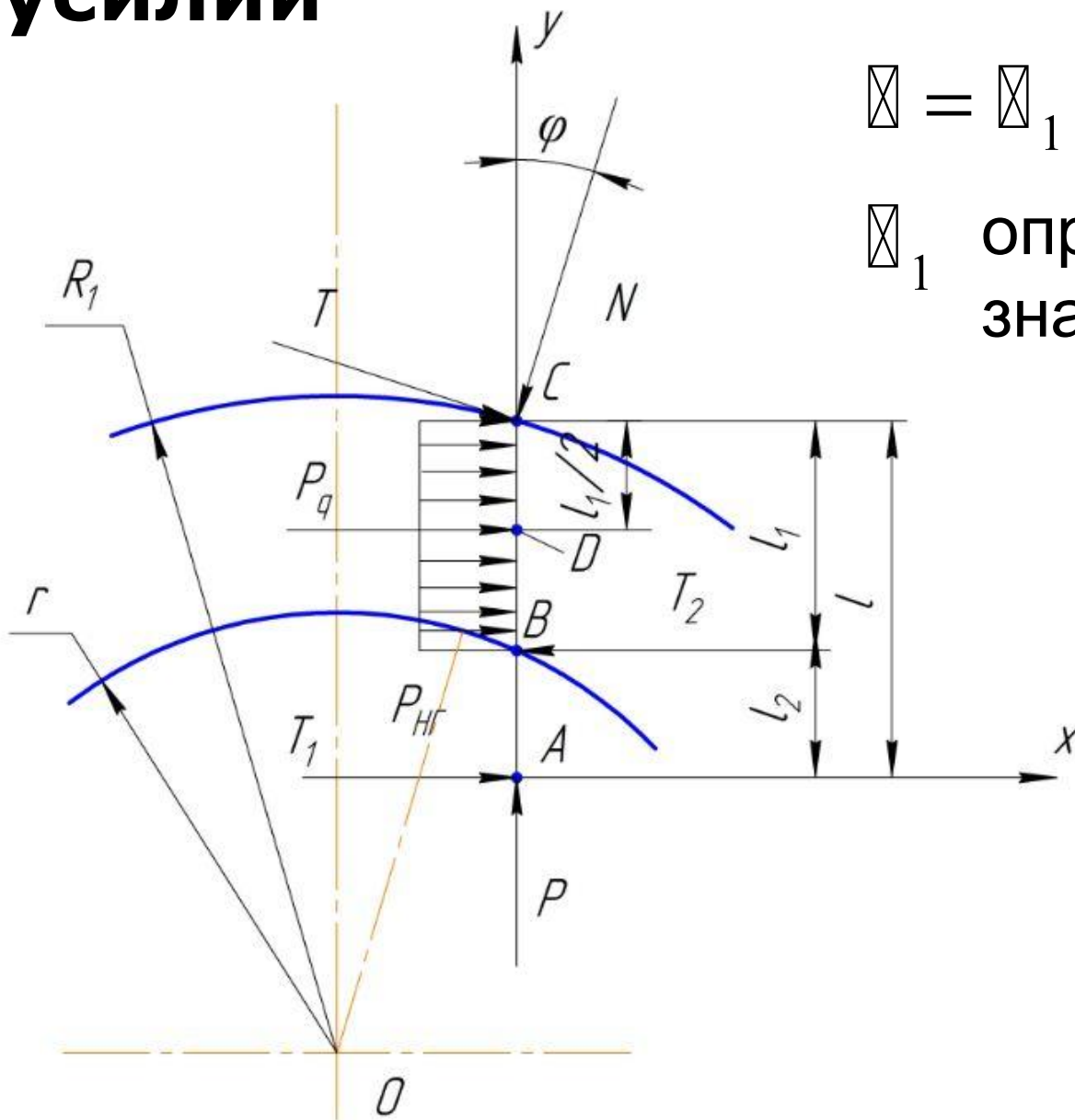
Существуют разные способы разгрузки шиберов:

- не обеспечивается надежный прижим шиберов к поверхности статора во время процесса всасывания;
- прижим осуществляется только центробежной силой;
- усилие прижима можно увеличивать за счет увеличения массы шибера или угловой скорости вращения ротора.

Отношение $\frac{R_1}{R_2}$ меньше, чем для машин с прижимом давлением жидкости

Контактные напряжения ограничивают величину давления для гидромашин без разгрузки шиберов

Влияние длины шибера на величину действующих на него усилий



$$\mathbb{X} = \mathbb{X}_1 + \mathbb{X}_2$$

\mathbb{X}_1 определяется значениями R_1 **r**

от \mathbb{X}_2 зависит усилие, действующее на шибер

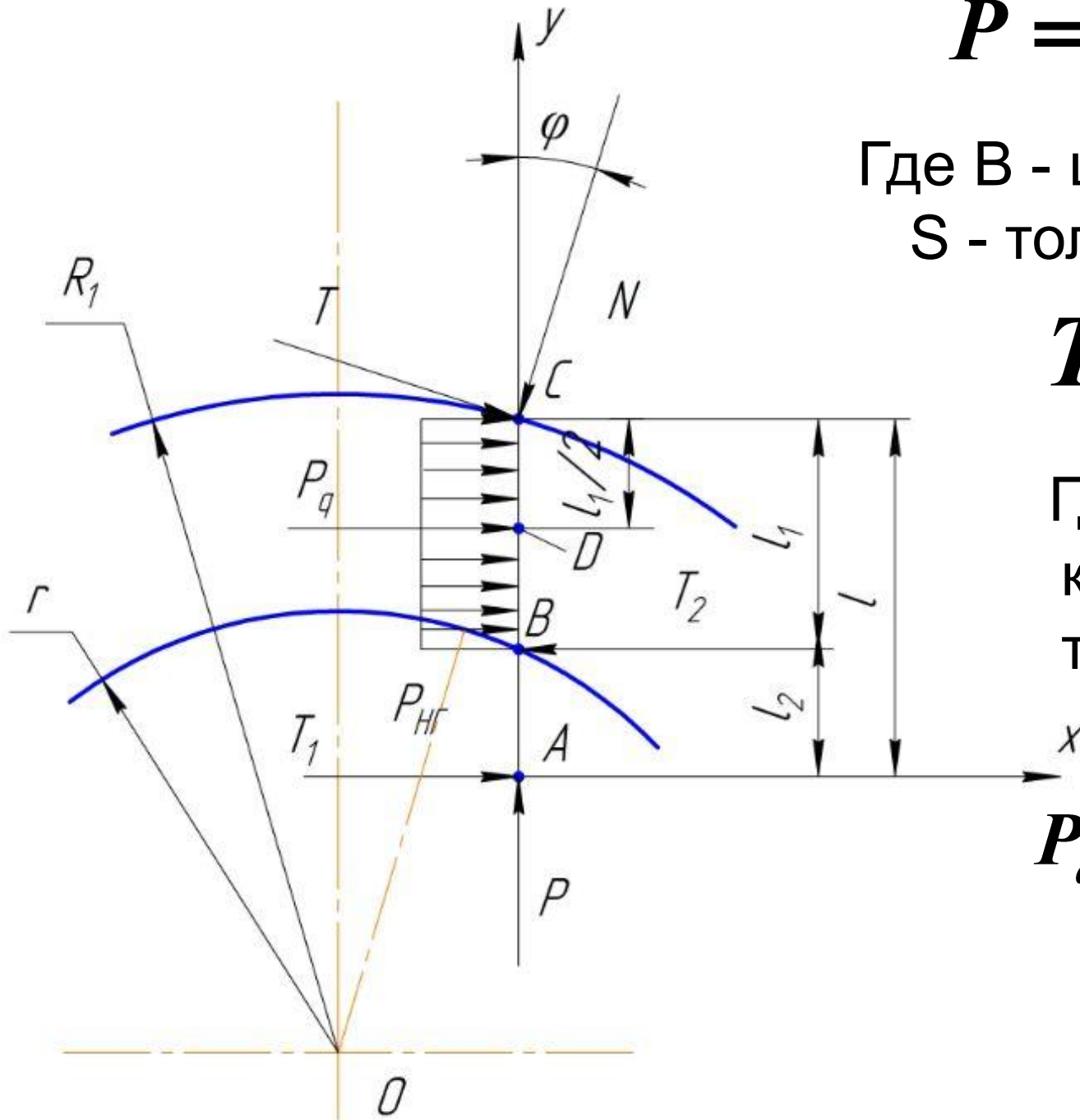
$$P = p_{\text{НГ}} \cdot B \cdot S$$

Где B - ширина шибера;
 S - толщина шибера

$$T = N \cdot f$$

Где f
 коэффициент
 трения

$$P_q = p_{\text{НГ}} \cdot B \cdot \boxtimes l$$



Определим 3 неизвестные реакции: T_1 , T_2 , N

$$\sum x = 0;$$

$$T_1 - T_2 + P_q - N \sin \varphi + T \cos \varphi = 0,$$

где $\varphi = \arcsin\left(\frac{r}{R_1} \sin \gamma\right);$

γ - угол наклона шибера;

$$\sum y = 0 \quad - N \cos \varphi - T \sin \varphi + P = 0;$$

$$\sum M_C = 0 \quad P_q \frac{\boxtimes_1}{2} + T_1 \boxtimes - T_2 \boxtimes_1 = 0.$$

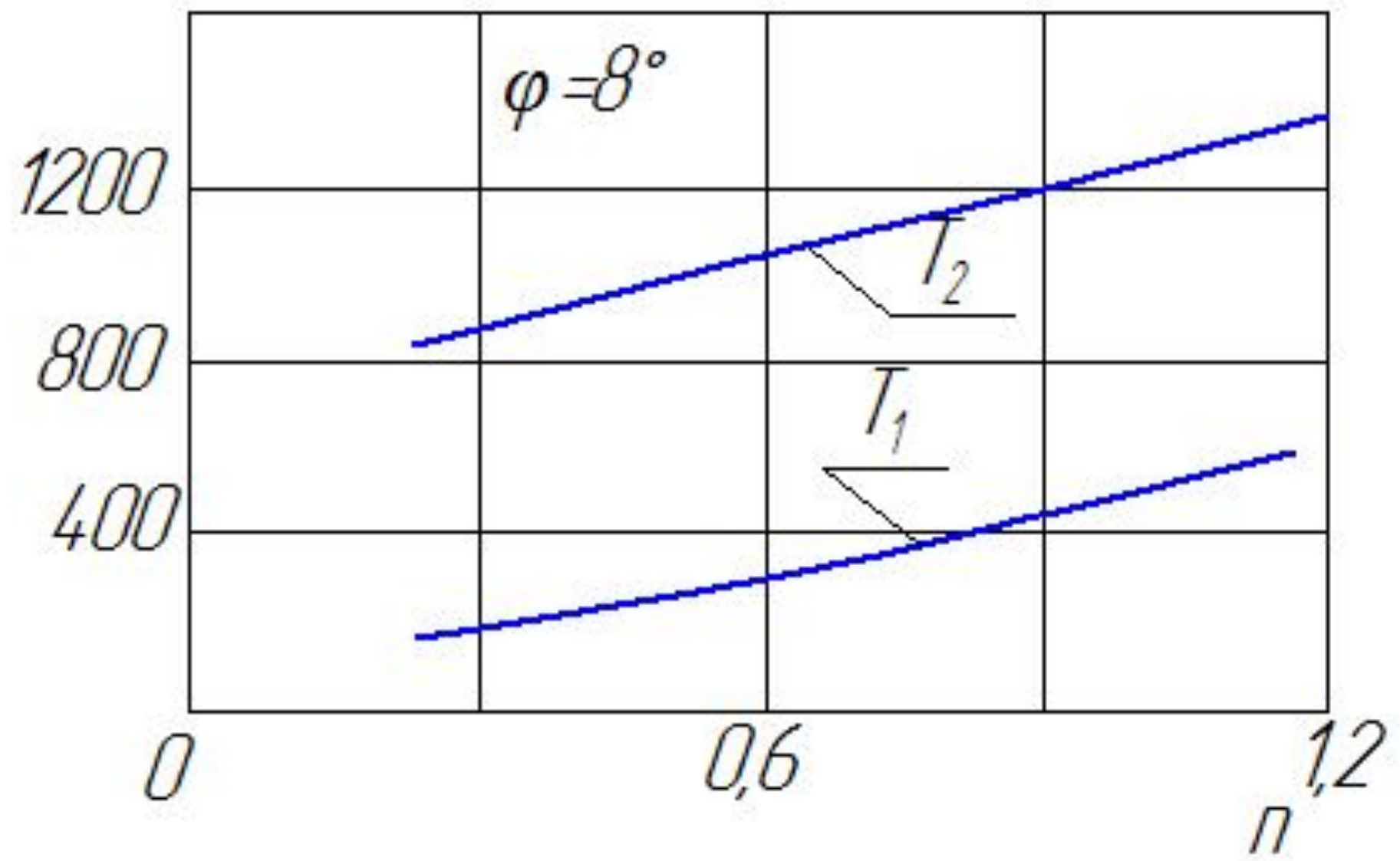
Получим следующее выражение для реакций:

$$N = \frac{P}{f \sin \varphi + \cos \varphi}; \quad T_1 = \frac{\frac{P(f \cos \varphi - \sin \varphi)}{f \sin \varphi + \cos \varphi} + \frac{P_q}{2}}{\frac{\sigma}{\sigma_1} - 1};$$

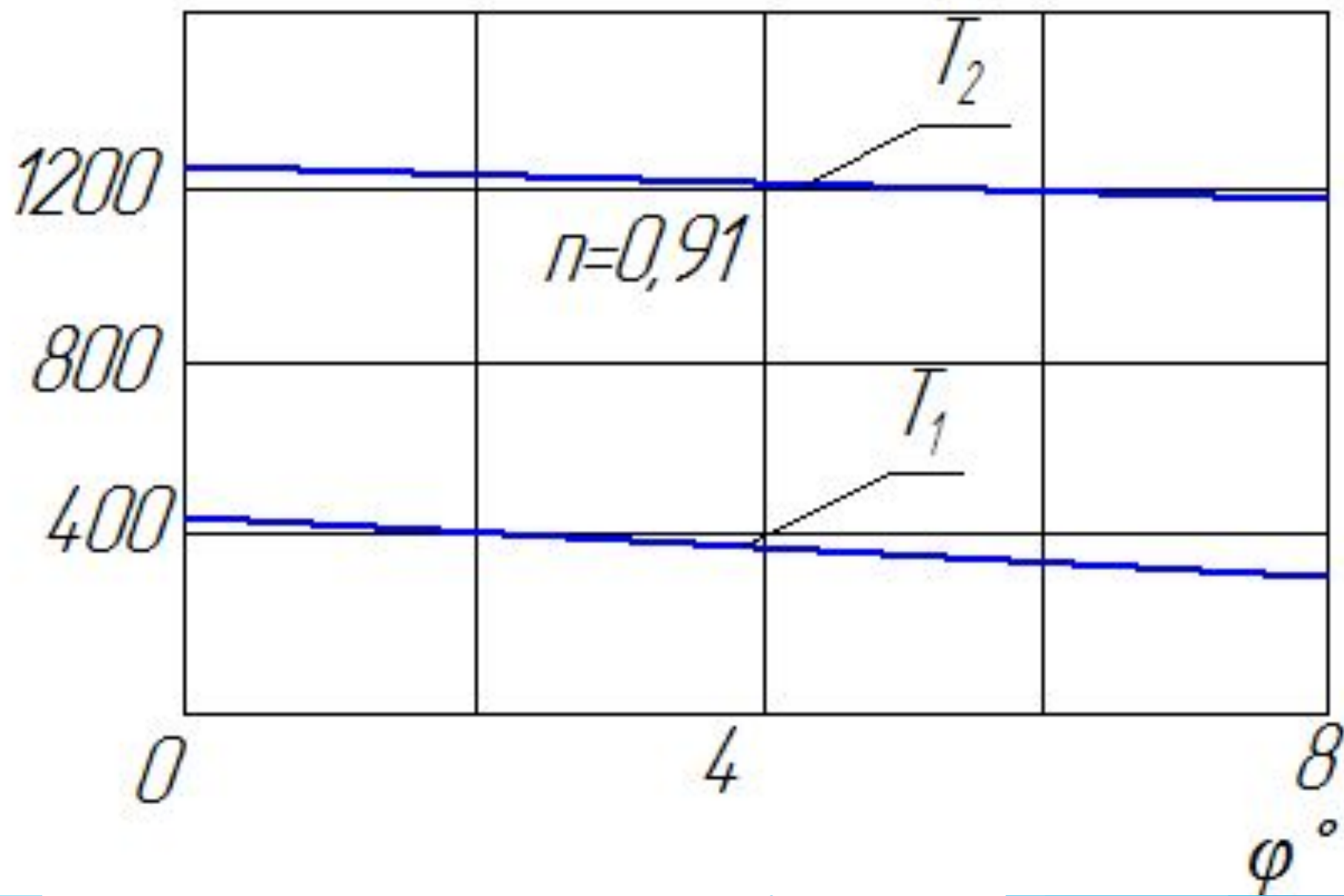
$$T_2 = \frac{P_q}{2} \cdot \frac{2\sigma - \sigma_1}{\sigma - \sigma_1} + \frac{P\sigma(f \cos \varphi - \sin \varphi)}{(\sigma - \sigma_1)(f \sin \varphi + \cos \varphi)}$$

При проектировании шиберных гидромашин, исходя из условий прочности, должно быть обеспечено условие $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \leq 0.92$.

T_1, T_2 H



T_1, T_2 H



T_1, T_2
H
2000

$\varphi = 8^\circ$

$n = 0,91$

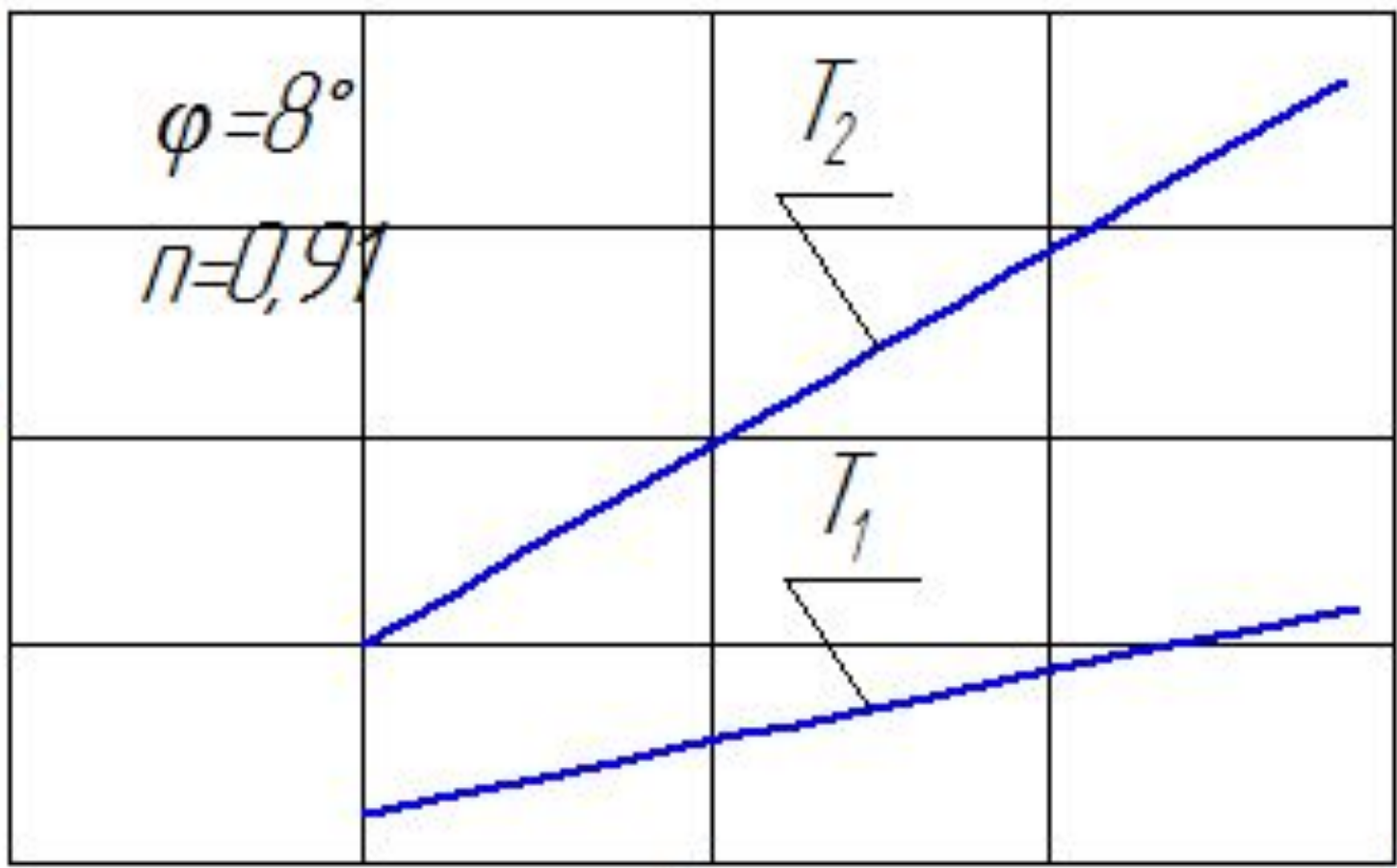
1000

0



5

10

$P_H, \text{МПа}$



ВЫВОДЫ

- Классификация по кратности действия;
- Неравномерность подачи зависит от числа шиберов; 
- Расчет деталей в ПлГ;
- Регулируемые (1), нерегулируемые (2); 
- Допустимое давление для машин без разгрузки шиберов;
- Отношение длин шибера;
- Обратимые (при наличие пружин).