

ТЕМА №1: «КИНЕМАТИКА КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА»

РАССМАТРИВАЕМЫЕ ВОПРОСЫ:

- 1. АНАЛИЗ КШМ**
- 2. КИНЕМАТИКА ПОРШНЯ**

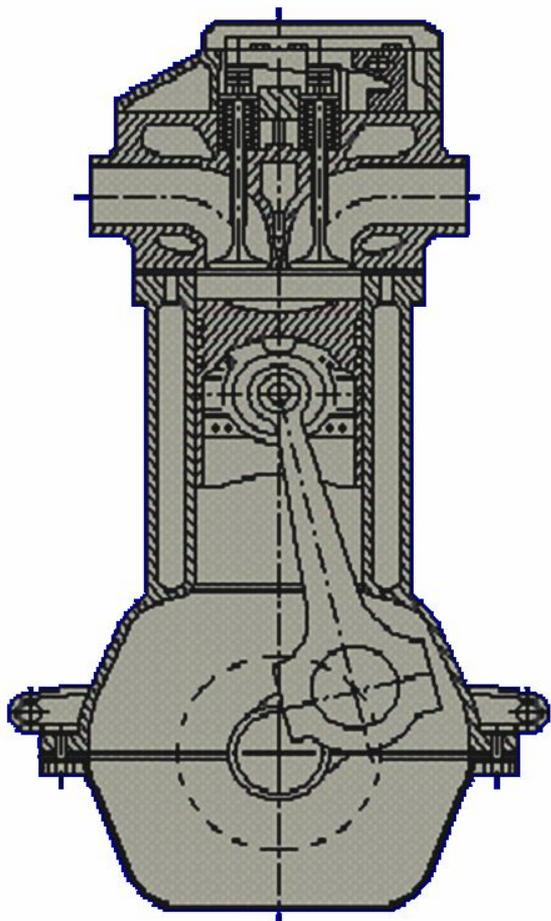
Цель кинематического анализа КШМ

Исследование законов движения деталей кривошипно-шатунного механизма (КШМ) ведется с учетом только его структуры и геометрическими соотношениями между звеньями механизма вне зависимости от сил, вызывающих его движение.

Это позволит:

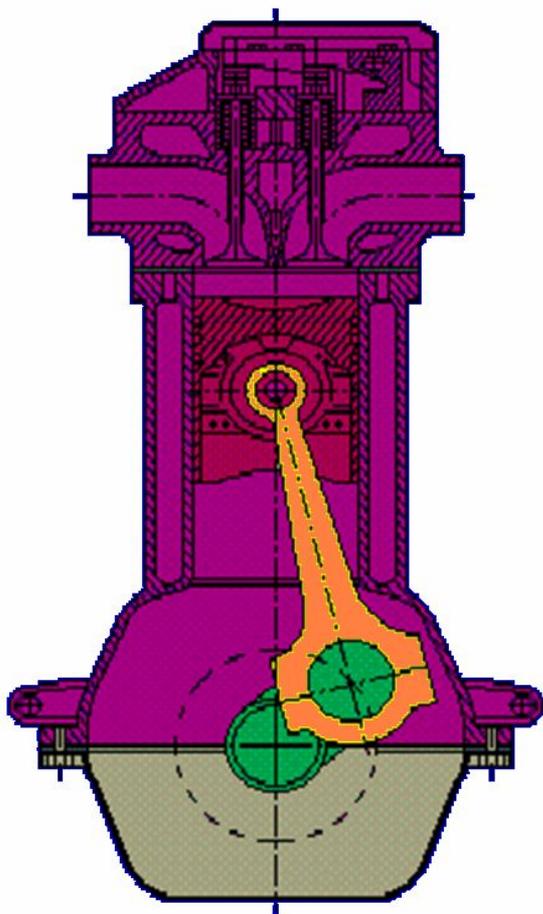
- оценить возможность функционирования КШМ с заданными геометрическими размерами;
- получить информацию о компоновочном решении, габаритных параметрах элементов КШМ и всего ДВС;
- определить влияние кинематических параметров КШМ на характеристики рабочих процессов ДВС;
- подготовить исходные данные для оценки нагрузок на детали КШМ.

Назначение КШМ



КШМ необходим для преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращательное движение коленчатого вала.

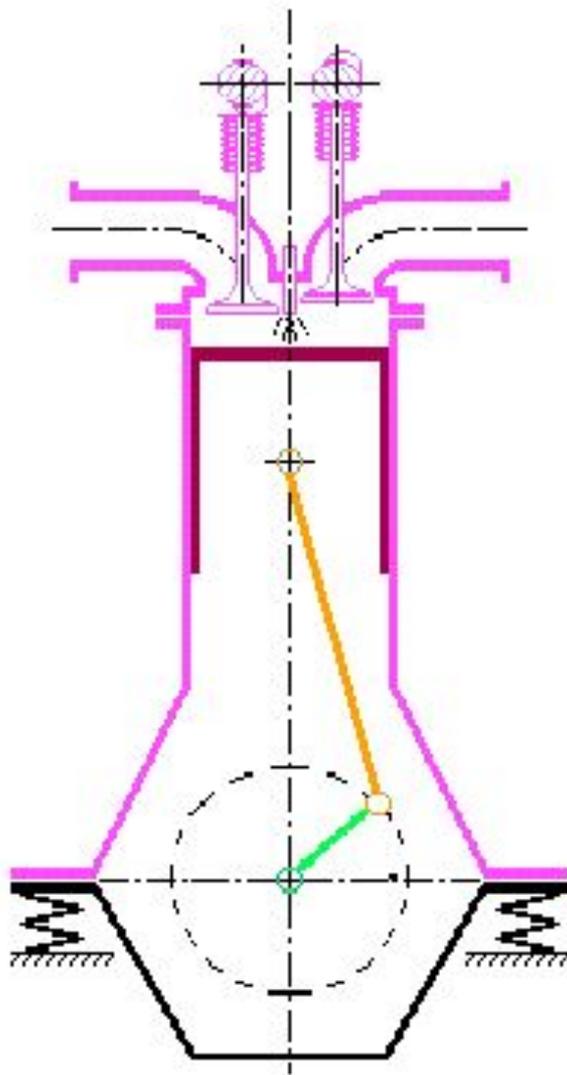
Назначение КШМ



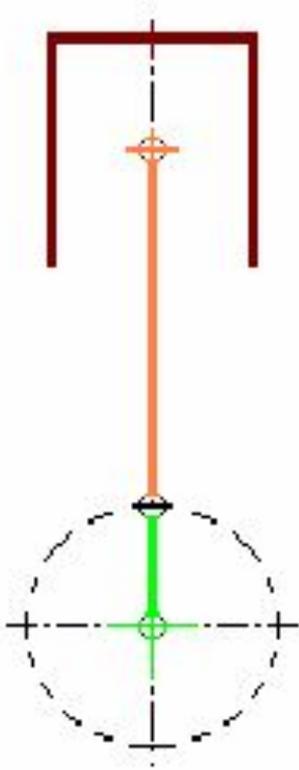
КШМ состоит из:

- Подвижных деталей (**поршня**, **шатун** и **коленчатого вала**);
- Неподвижных деталей (**цилиндра с головкой** и **картера**), обеспечивающих его функционирование.

Упрощенное представление КШМ



Характер перемещения подвижных элементов КШМ

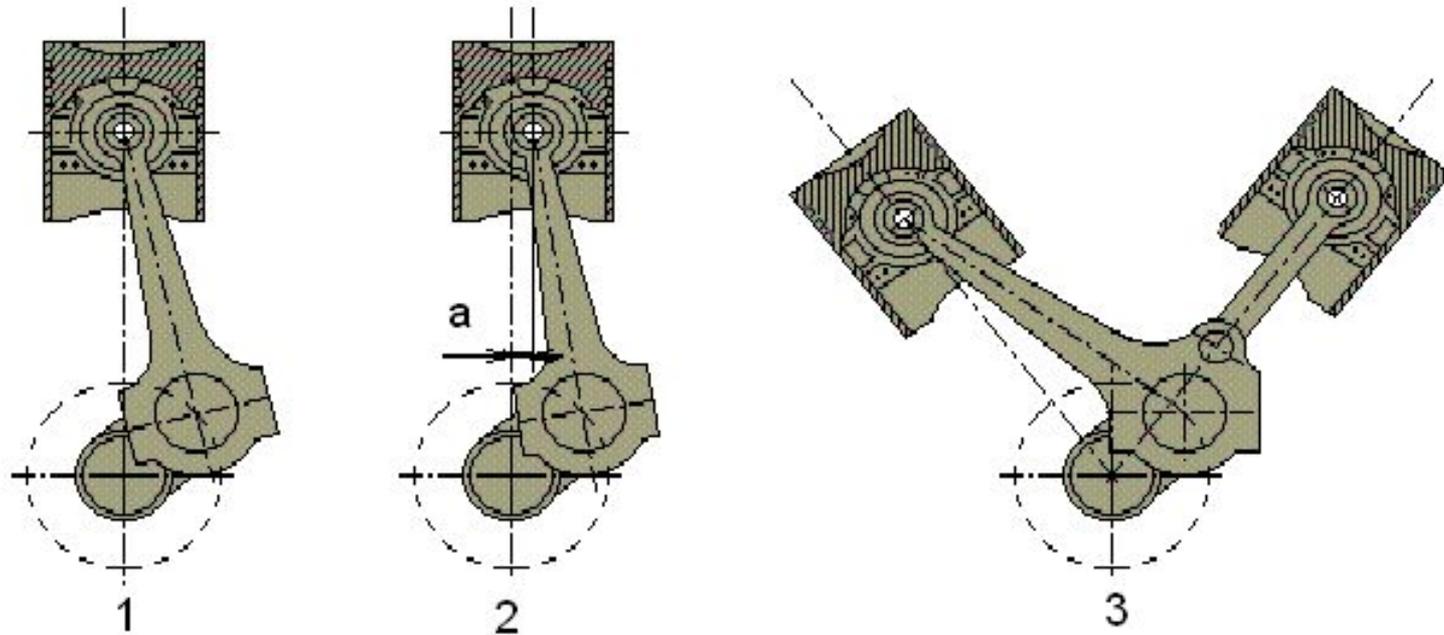


Поршень совершает возвратно-поступательное движение. При наличии зазоров и соответствующей нагрузке он также совершает качательное движение относительно поршневого пальца.

Коленчатый вал совершает вращательное движение.

Верхняя часть **шатуна** - **поршневая** головка движется вдоль оси цилиндра и качается относительно оси пальца. Нижняя часть шатуна - **кривошипная** головка вращается относительно оси коленчатого вала и оси шатунной шейки. Элементы стержня шатуна совершают сложное движение.

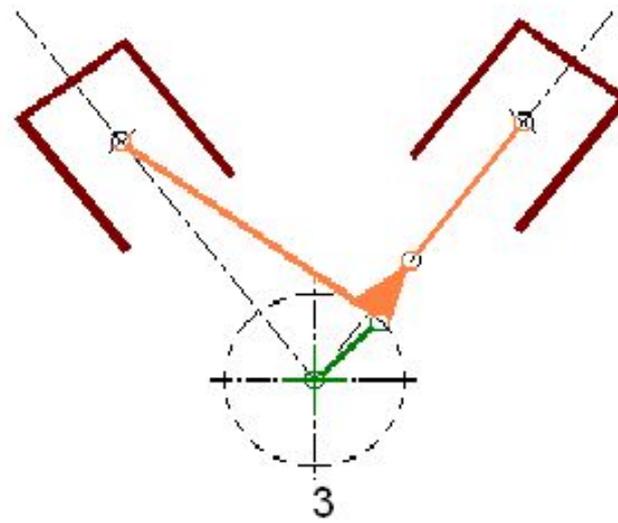
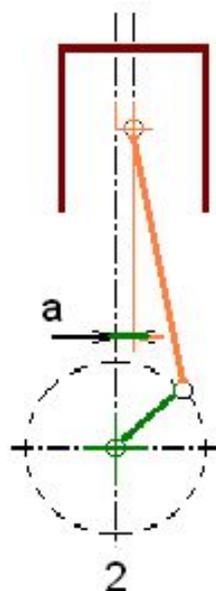
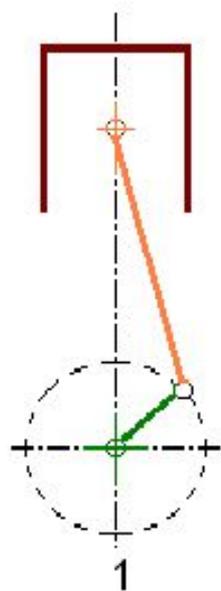
Типы КШМ



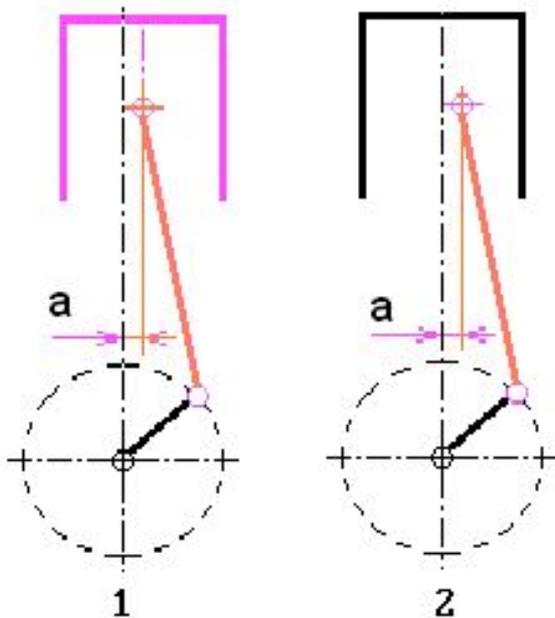
При компоновке автотракторных ДВС в основном применяют следующие три кинематические схемы КШМ:

1 - центральную (аксиальную), 2 – смещенную (деаксиальную), 3 - с прицепным шатуном (для V-образного ДВС).

Упрощенное представление различных типов КШМ



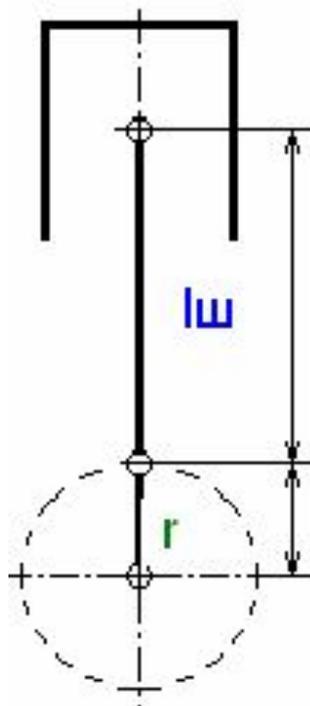
Варианты исполнения смещенного (дезаксиального) механизма



В первом случае ось цилиндра не пересекает ось коленчатого вала ДВС. Это позволяет при компоновке ДВС изменить расстояние между коленчатым и распределительным валами при нижнем расположении последнего в блок-картере.

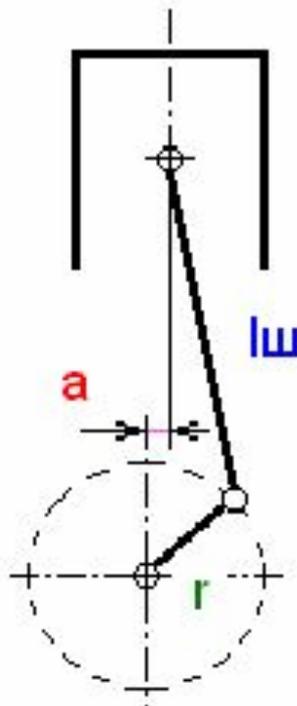
Во втором случае ось поршневого пальца смещается относительно оси поршня.

Условные обозначения элементов КШМ



$$\lambda = \frac{r}{l_{\text{ш}}}$$

$$\lambda = 0,24 \dots 0,31$$



$$k = \frac{a}{r}$$

$$k = 0,02 \dots 0,05$$

Геометрические
параметры:

r - радиус кривошипа
коленчатого вала;

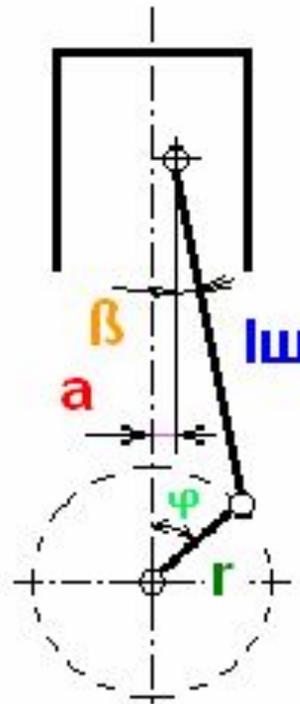
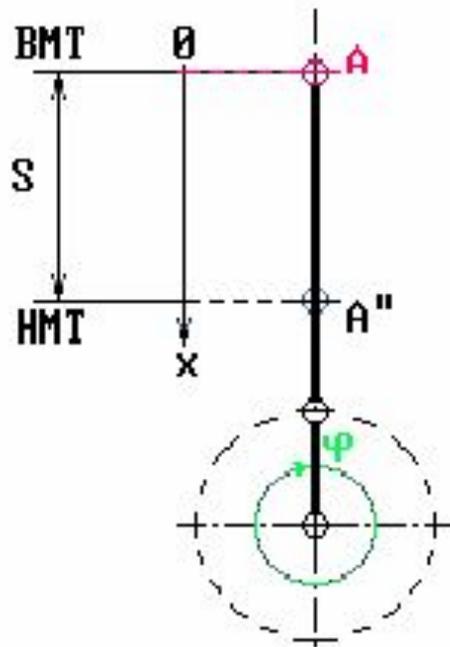
l_ш - длина шатуна;

λ – критерий
кинематического
подобия
центрального КШМ;

a - дезаксаж - смещение
осей цилиндра
(пальца)
относительно оси
коленчатого вала;

k - относительный
дезаксаж;

Условные обозначения элементов КШМ



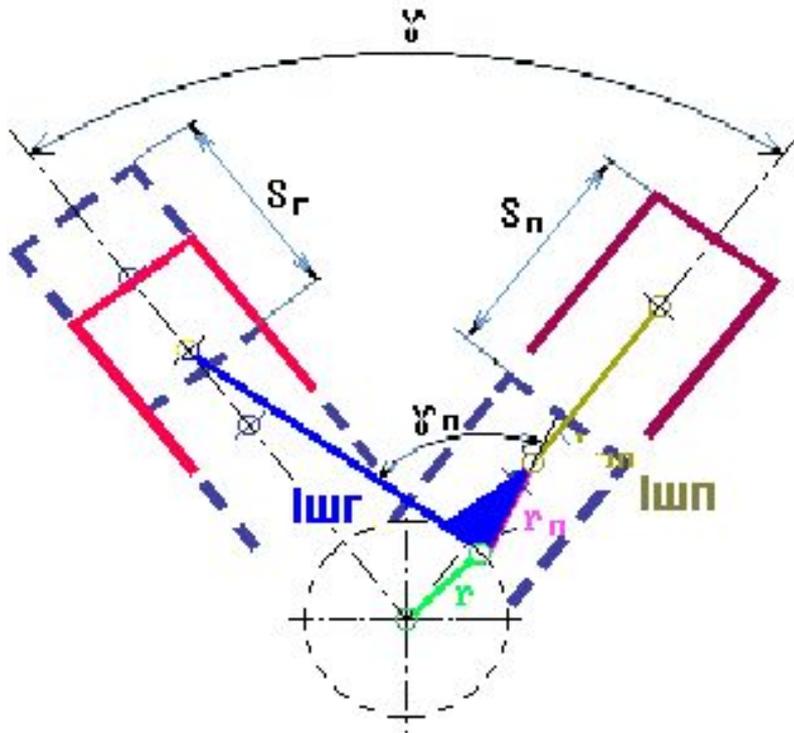
S – ход поршня –
расстояние между
верхней и нижней
мертвыми точками,
S=2*r

Xφ - перемещение
поршня;

φ - угол поворота
кривошипа;

β - угол отклонения
шатунa от оси
цилиндра.

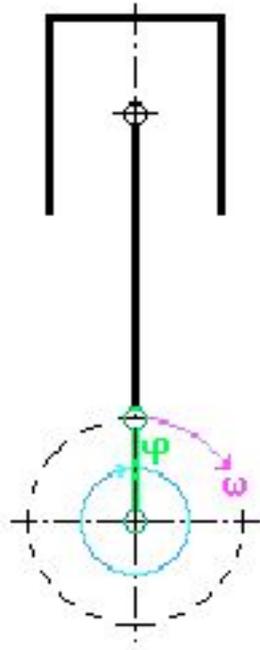
Условные обозначения элементов КШМ



Кинематика КШМ цилиндра с **главным шатуном** не отличается от кинематики КШМ в рассмотренных ранее схемах.

γ - угол развала

Допущения при выводе аналитического выражения для определения кинематики КШМ



Для описания вращательного движения кривошипа необходимо получить зависимости угла поворота (φ), угловой скорости (ω) и ускорения (ε) в функции времени (t).

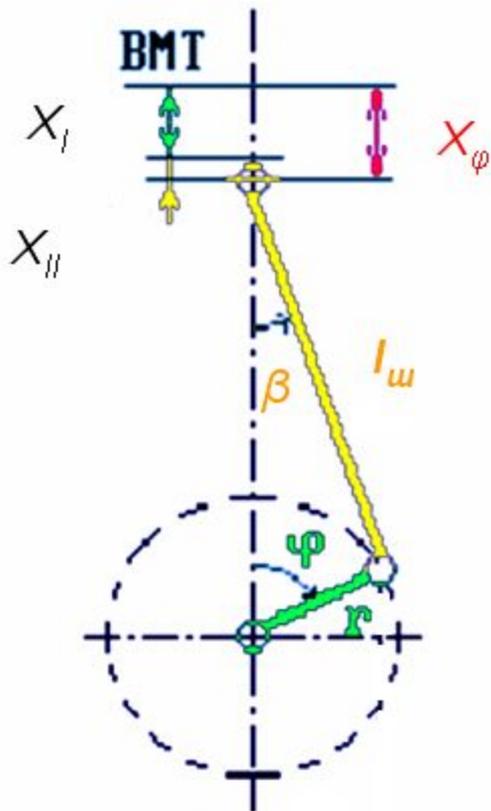
Допущения:

1. Элементы КШМ абсолютно жесткие.
2. Угловая скорость (частота) вращения коленчатого вала (ω) постоянна.
3. Зазоры в подвижных сочленениях не учитываются.

Тогда:

$$\begin{cases} \varphi = \varphi(t) \\ \omega = \omega(t) \\ \varepsilon = \varepsilon(t) \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} \varphi = t \\ \omega = \frac{\pi n}{30} = \text{const} \\ \varepsilon = 0 \end{cases}$$

Вывод аналитического выражения для определения кинематики поршня

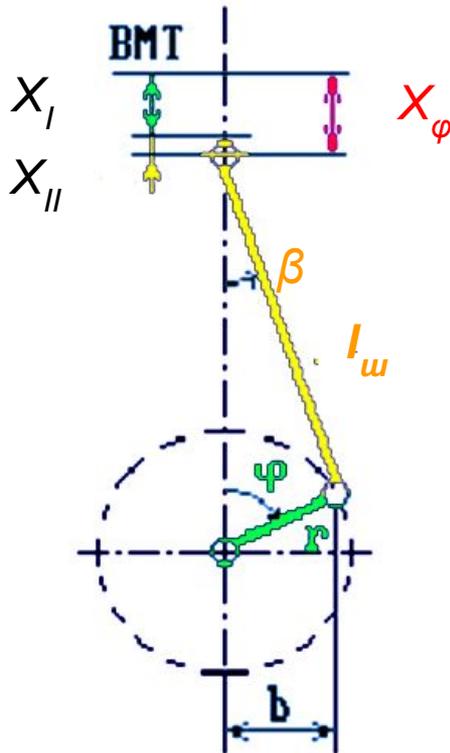


Для описания возвратно - поступательного движения поршня необходимо получить зависимости его перемещения x_t , скорости v_t и ускорения j_t в функции времени t .

Перемещение поршня

x_t определяется двумя гармоническими составляющими: x_I - смещением от поворота кривошипа на угол φ и x_{II} - смещением от поворота шатуна на угол β .

Вывод аналитического выражения для определения кинематики поршня



$$X_{\phi} = X_I + X_{II}$$

$$X_{\phi} = \underbrace{r(1 - \cos \phi)}_{X_I} + \underbrace{l_w(1 - \cos \beta)}_{X_{II}}$$

или

$$X_{\phi} = r \left[(1 - \cos \phi) + \frac{1}{\lambda} (1 - \cos \beta) \right]$$

$$l_w \sin \beta = r \sin \phi$$



$$\sin \beta = \lambda \sin \phi$$

n

Вывод аналитического выражения для определения кинематики поршня

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta &= \lambda \sin \phi \\ \cos \beta &= \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \phi} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \cos \beta = \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \phi}$$

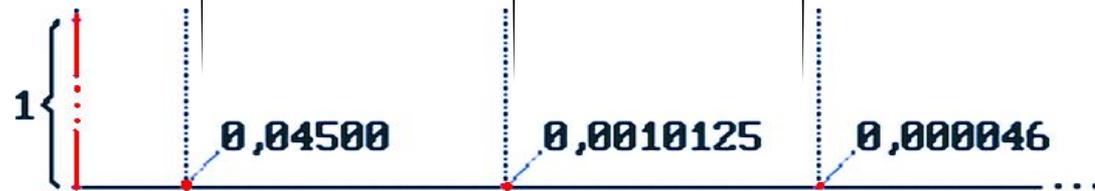
Точная зависимость перемещения поршня от угла поворота кривошипа:

$$X_\phi = r \left[(1 - \cos \phi) + \frac{1}{\lambda} (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \phi}) \right]$$

Вывод аналитического выражения для определения кинематики поршня

С целью упрощения расчетных зависимостей, разложим в ряд выражение $\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \phi}$ используя бином Ньютона:

$$\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \phi} = 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \phi - \frac{1}{8} \lambda^4 \sin^4 \phi - \frac{1}{16} \lambda^8 \sin^8 \phi \dots$$



С учетом соотношения амплитуд полученных гармоник с достаточной для инженерной практики точностью можно использовать **первые два члена разложения**.

Вывод аналитического выражения для определения кинематики поршня

Тогда выражение примет вид

$$\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi} \cong 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \varphi = 1 - \frac{1}{4} \lambda^2 \cos 2\varphi$$

Приближенная зависимость перемещения поршня от угла поворота кривошипа:

$$X_{\phi} \cong r \left[\left(1 - \cos \phi\right) + \frac{\lambda}{4} \left(1 - \cos 2\phi\right) \right]$$

Вывод аналитического выражения для определения кинематики поршня

Скорость поршня

Первая производная от перемещения поршня по времени определяет скорость поршня для любого угла поворота коленчатого вала:

$$v_{\varphi} = \frac{dx_{\varphi}}{dt} = \frac{dx_{\varphi}}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

Точная зависимость скорости поршня от угла поворота кривошипа:

$$v_{\varphi} = r\omega \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$$

Приближенная зависимость скорости поршня от угла поворота кривошипа:

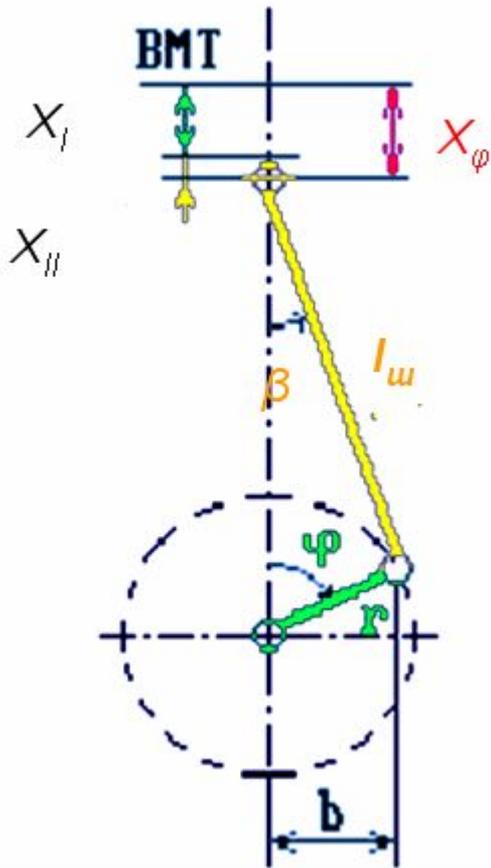
$$v_{\varphi} \cong r\omega \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right)$$

Для оценки конструкции ДВС используется средняя скорость поршня:

$$C_n = \frac{2S \cdot n}{60} = \frac{S \cdot n}{30}$$

Для современных автотракторных ДВС

$$C_n = 8 \dots 15 \text{ м/с}$$



Вывод аналитического выражения для определения кинематики поршня

Ускорение поршня

Первая производная от скорости поршня по времени даст ускорение поршня для любого угла поворота коленчатого вала:

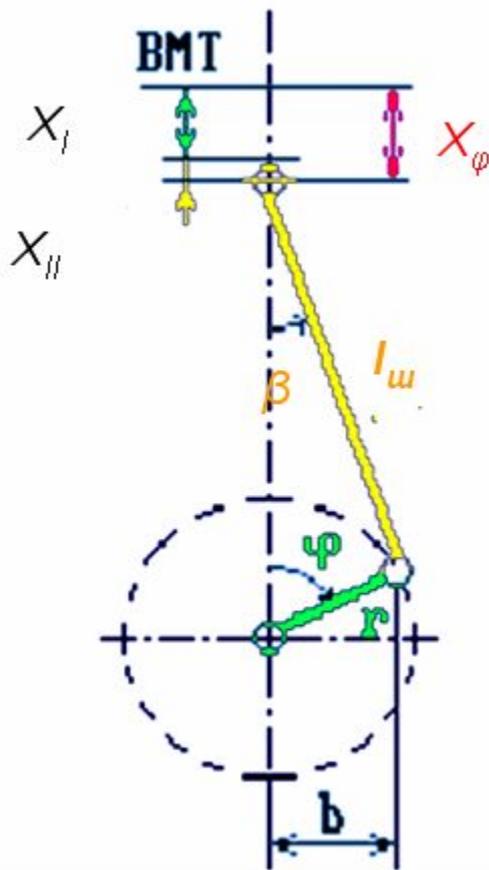
$$j_{\varphi} = \frac{d^2 x_{\varphi}}{dt^2} = \frac{dv_{\varphi}}{d\varphi} = \frac{dv_{\varphi}}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

Точная зависимость ускорения поршня от угла поворота кривошипа:

$$j_{\varphi} = r\omega^2 \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta} + \lambda \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \beta}$$

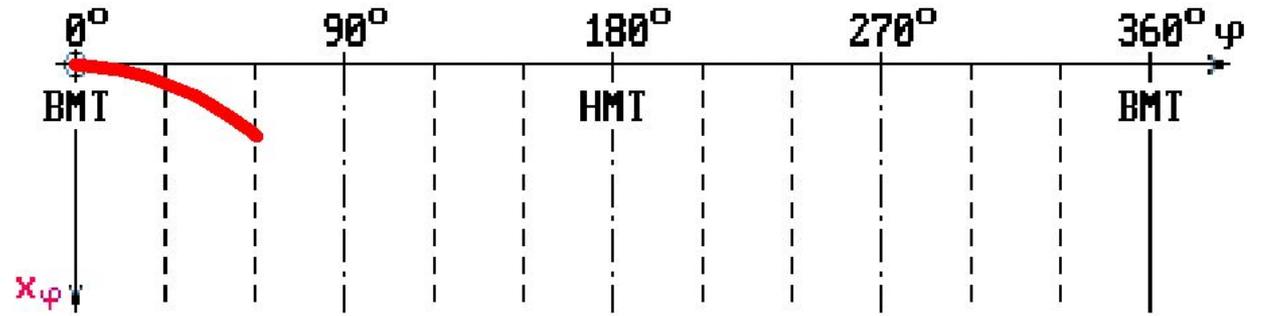
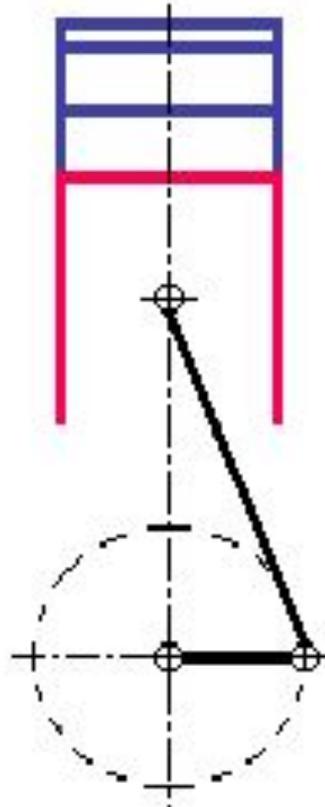
Приближенная зависимость ускорения поршня от угла поворота кривошипа:

$$j_{\varphi} \cong r\omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi)$$

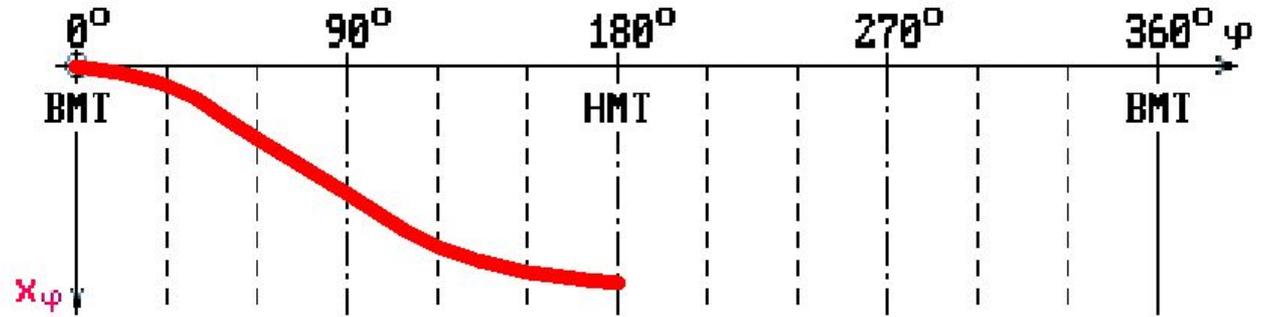
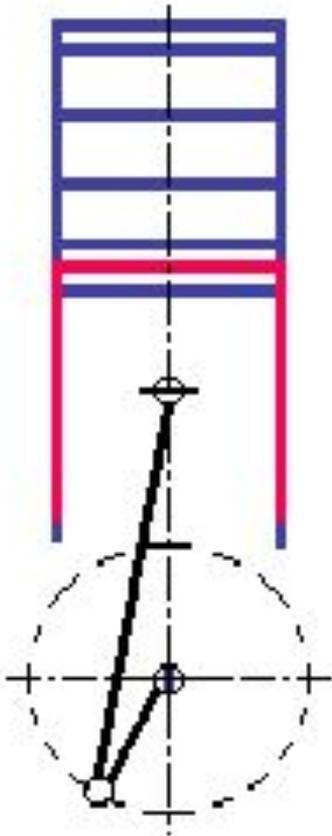


Для современных ДВС

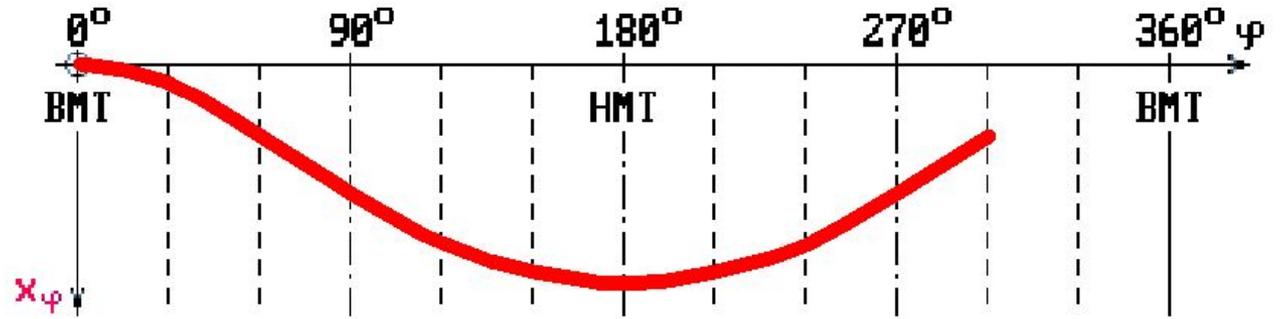
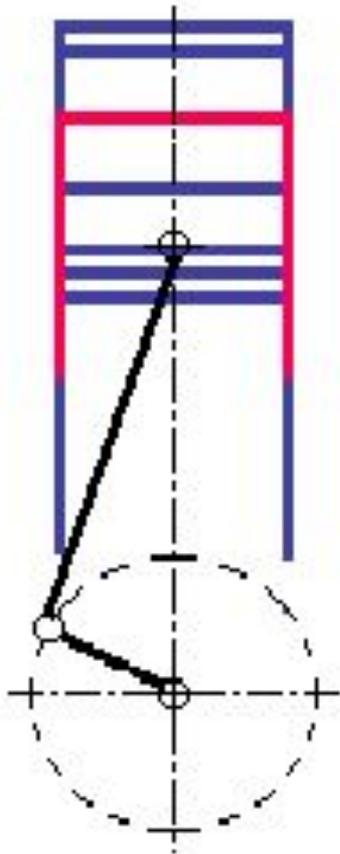
$$j_{\text{п}} = 5000 \dots 20000 \text{ м/с}^2$$



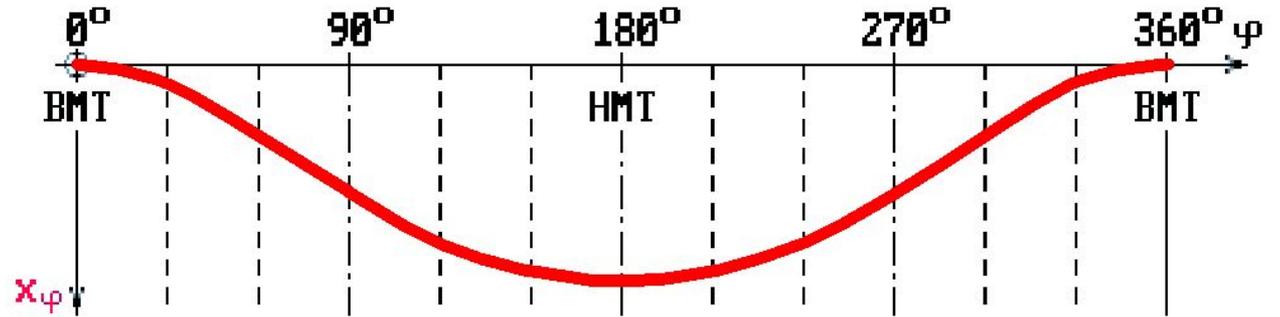
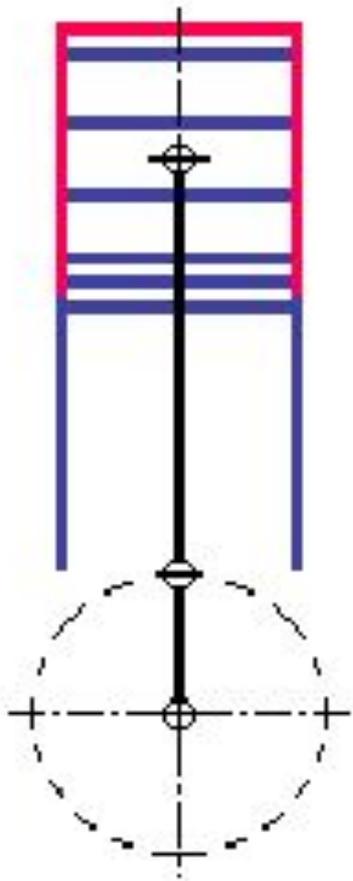
$$x_\varphi \cong r \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right]$$



$$x_{\varphi} \cong r \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right]$$



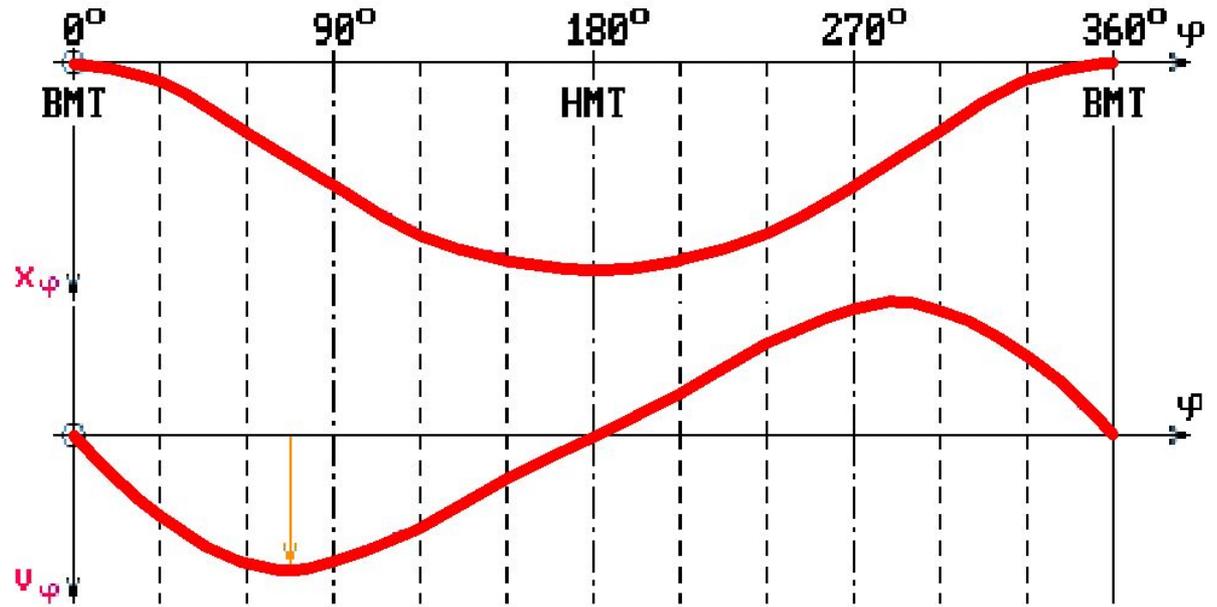
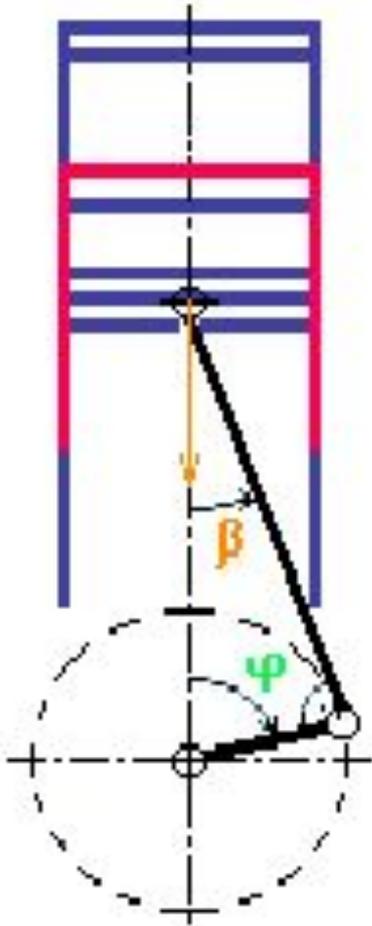
$$x_{\varphi} \cong r \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right]$$



$$x_{\varphi} \cong r \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right]$$

Для $\varphi=0^{\circ}$ и $\varphi=360^{\circ}$ $x_{\min}=0$, что соответствует положению поршня в ВМТ

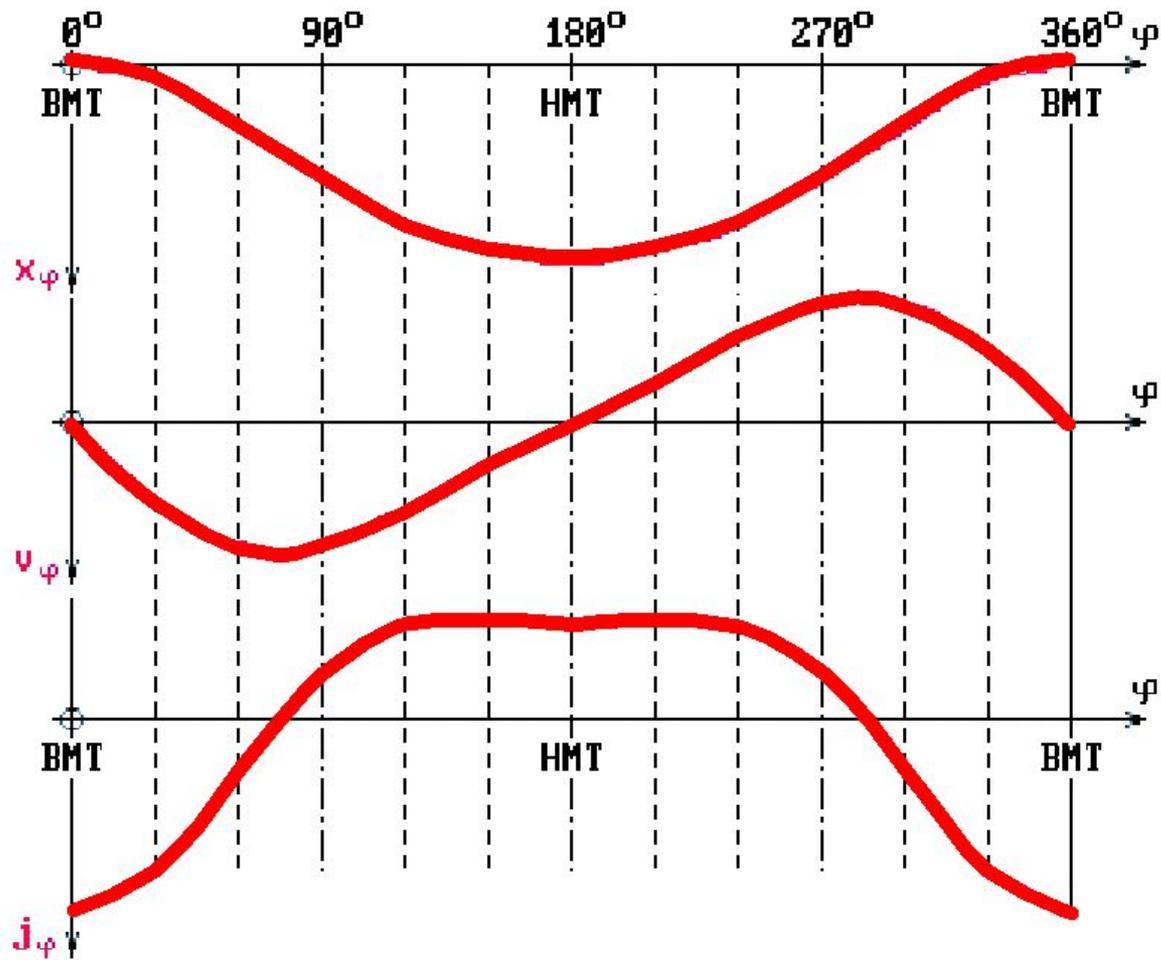
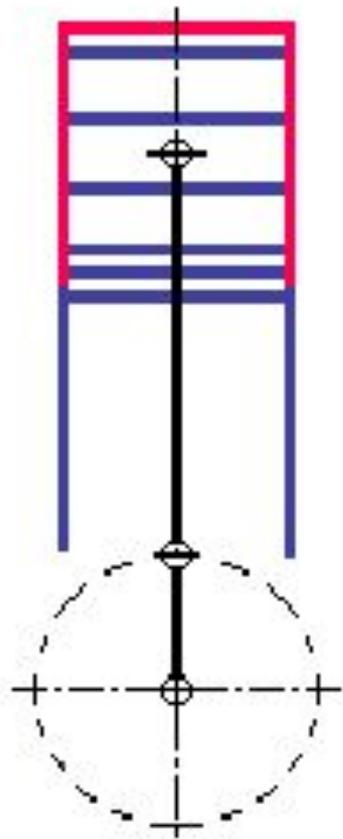
Для $\varphi=180^{\circ}$ $x_{\max}=S=2r$, что соответствует положению поршня в НМТ



$$v_{\varphi} \cong r\omega\left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi\right)$$

Для $\varphi=90^\circ$ пкв $v_{\varphi}=r\omega$

Максимальное значение скорости в первом приближении определяется для $\varphi+\beta=90^\circ$, когда ось шатуна перпендикулярна радиусу кривошипа.



$$j_{\varphi} \cong r\omega^2 (\cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi)$$

Для $\varphi=0^\circ$ $j_{\varphi} = j_I + j_{II}$
 Для $\varphi=180^\circ$ $j_{\varphi} = j_I - j_{II}$

$$j_{\max} = r\omega^2(1+\lambda)$$

$$j_{\min} = r\omega^2(1-\lambda)$$