

Хрулев А.Э., Сараев А.В.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ БОКОВОЙ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ПОРШЕНЬ В КРИВОШИПНО- ШАТУННОМ МЕХАНИЗМЕ ПРИ ЧРЕЗМЕРНЫХ НАГРУЗКАХ, ВЫЗВАННЫХ НАРУШЕНИЕМ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

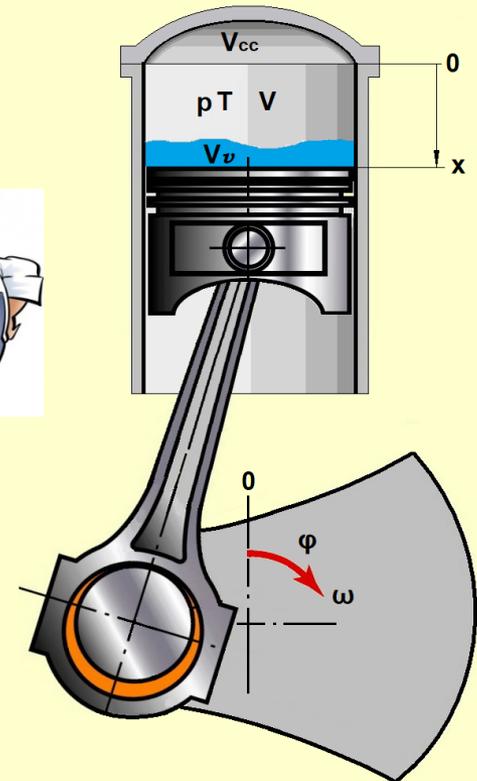


III Международная научно-
практическая конференция
MPP&O-2021

Одесса 28-29 апреля 2021 г.



- ❖ **Гидроудар в цилиндре** от попадания жидкости.
- ❖ Основные жидкости:
 - вода, масло, топливо, охлаждающая жидкость.
- ❖ Повреждение деталей поршневой группы и и кривошипно-шатунного механизма:
 - чрезмерно высокое давление в цилиндре
 - чрезмерные нагрузки на детали.
- ❖ Основная (видимая) повреждаемая деталь:
 - шатун.
- ❖ Вид повреждения:
 - деформация, потеря устойчивости, разрушение.





Последствия гидроудара в цилиндре:

- ❖ Детали, имеющие повреждения после гидроудара:
 - шатун, поршень, поршневой палец,
 - цилиндр (верхняя часть).
- ❖ Повреждения шатуна очевидны.
- ❖ Повреждения поршня и поршневого пальца могут носить неявный характер, требующий проверки.

Особенности повреждения:

Легкие повреждения - поврежденные детали не заменяются на новые при ремонте.

Тяжелые повреждения – неправильно определяется причина повреждения.

Цель работы: разработка методики расчета деформаций деталей, уточнение видов и

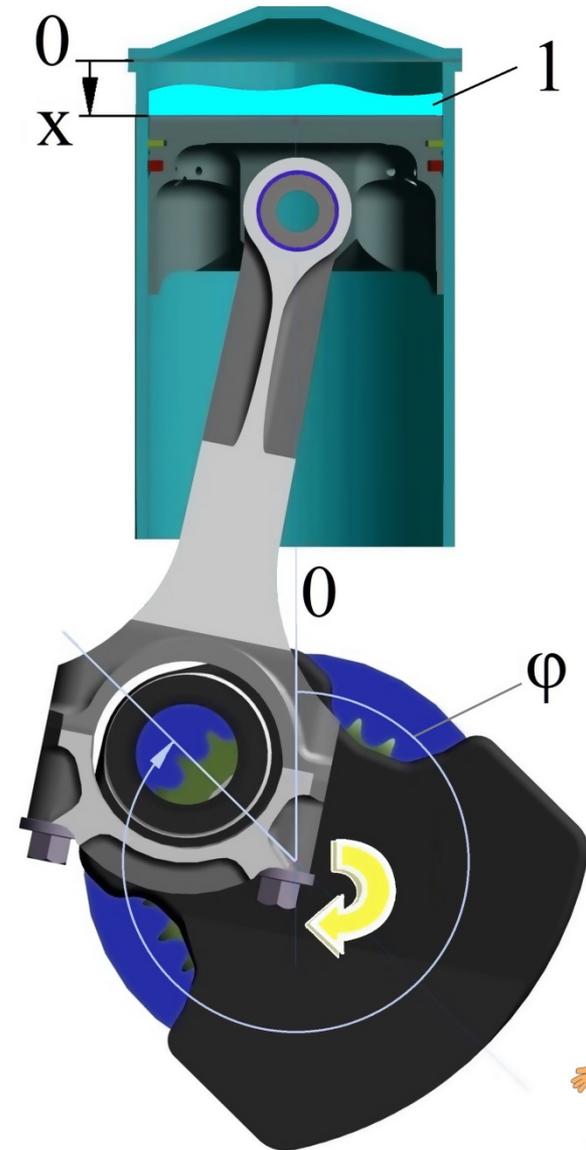
признаков различных воздействий на детали при нарушении условий эксплуатации.

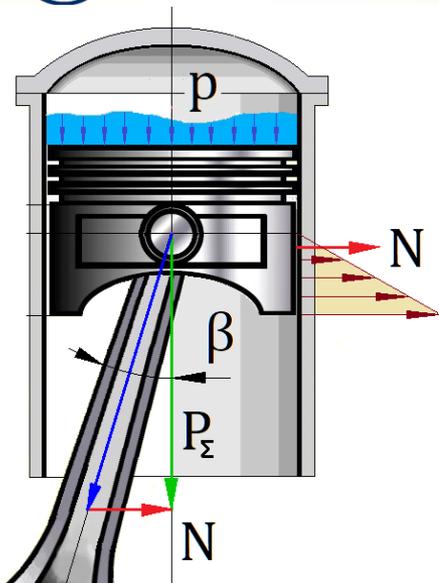


Основные задачи исследования:

- 1) анализ основных усилий, действующих в кривошипно-шатунном механизме и поршневой группе,
- 2) разработка модели расчета сил, действующих на детали при гидроударе,
- 3) расчет деформации стержня шатуна,
- 4) определение боковой силы, действующей на юбку поршня при деформации шатуна,
- 5) определение деформации поршневого пальца при перегрузке,
- 6) расчет деформации юбки поршня при заклинивании и проворачивании с трением в сопряжении с поршневым пальцем

Комплексная задача, для ее решения необходимо объединить данные сразу из нескольких разных задач





Классические труды по теории ДВС:

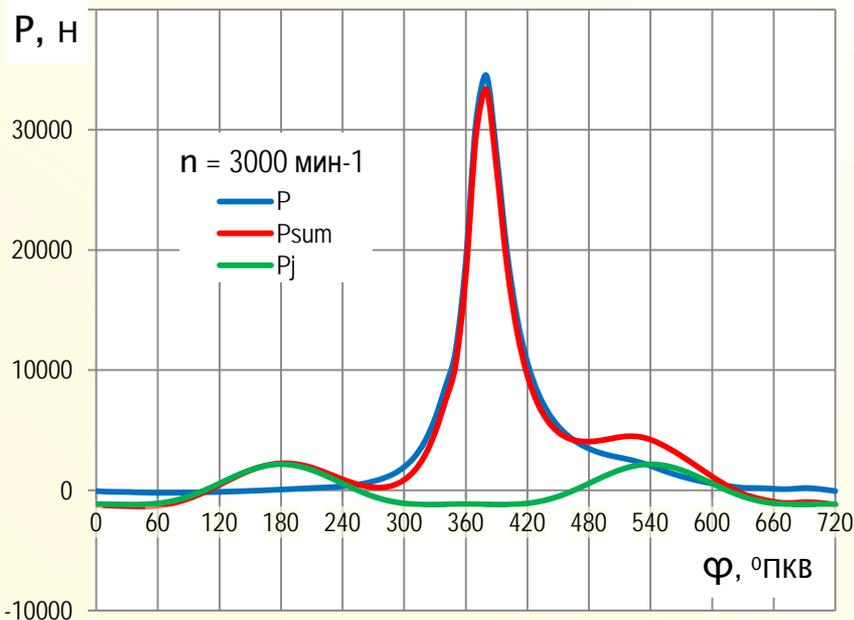
- боковая сила давления поршня на цилиндр возникает только из разложения по направлениям суммарной силы (давления и инерции), действующей на массу возвратно-поступательно движущихся деталей.

Фактически это означает, что трение в соединении пальца отсутствует (не учитывается).

Сила давления на юбку:
$$N = P_{\Sigma} \operatorname{tg} \beta = (P + P_j) \operatorname{tg} \beta$$

Удельное давление юбки на цилиндр

$$p_N = 2(p - p_0) \cdot \operatorname{tg} \beta$$



Связь удельного давления на юбку с давлением воздуха в цилиндре при гидроударе

- приближенно принято, что площадь стороны юбки в 2 раза меньше площади поршня.

Требуется рассчитать давление в цилиндре при гидроударе

Основные расчетные уравнения:



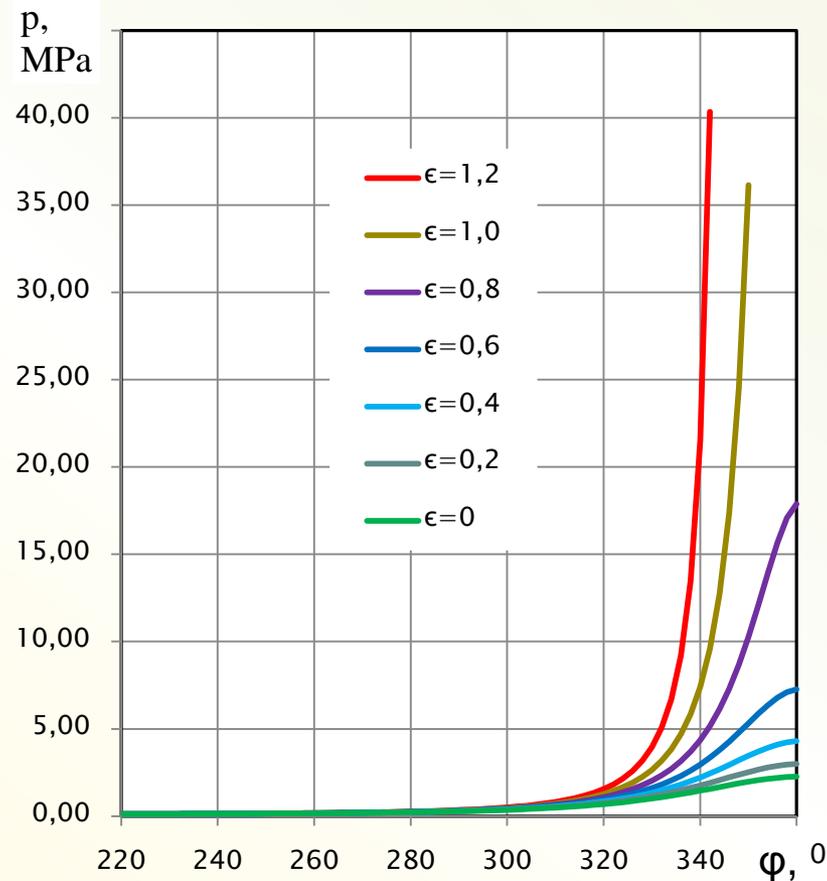
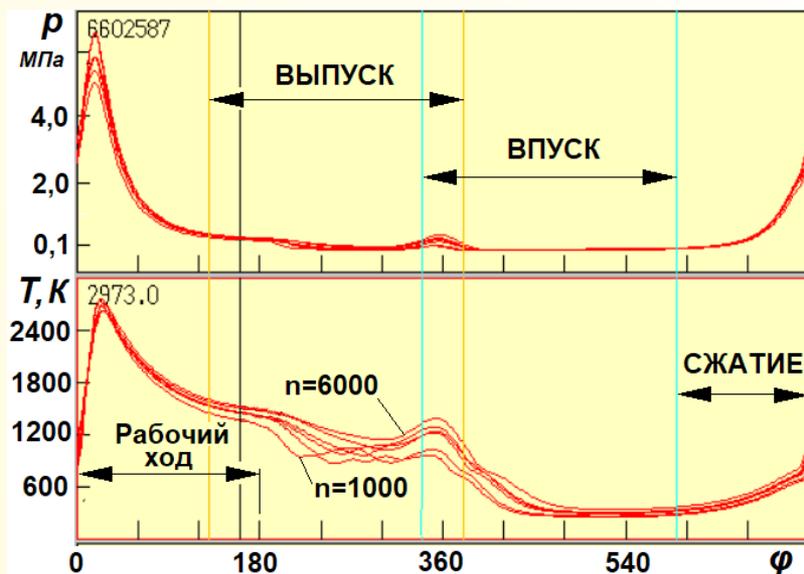
$$\frac{dp}{d\varphi} = -p\gamma \left(\psi + \frac{C_p}{R} \right)$$

$$\frac{dT}{d\varphi} = -T\gamma\psi \quad \gamma = \frac{RB_\varphi}{C_p A_\varphi}$$

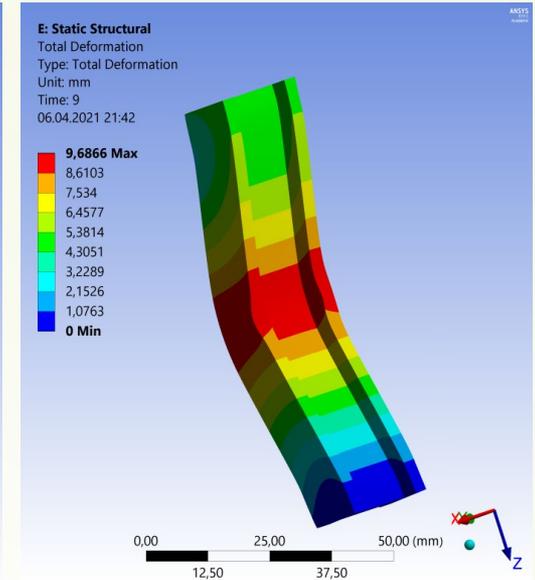
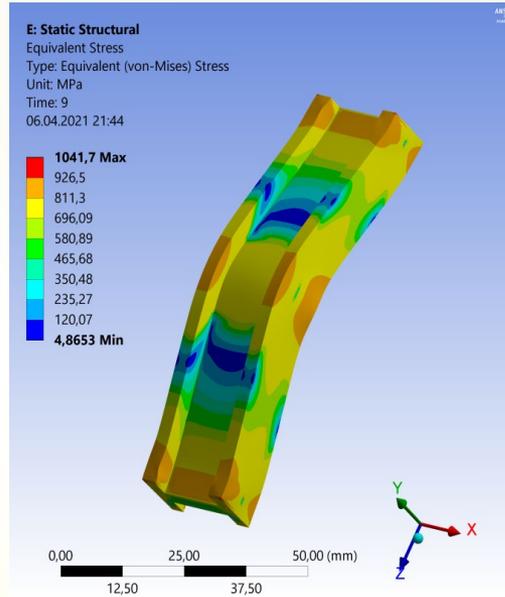
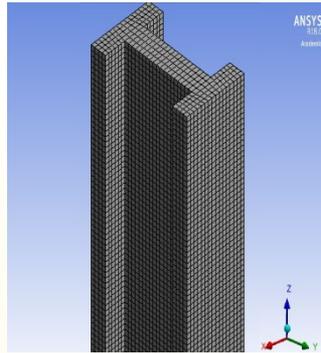
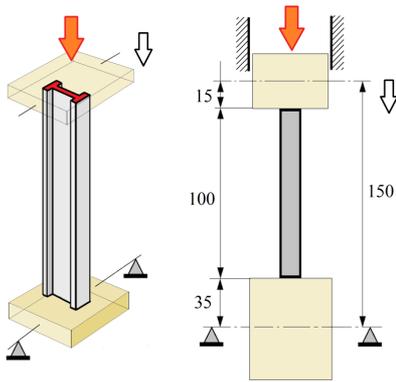
$$\psi = 1 + \frac{30 \cdot a_w F_w R}{\pi \cdot n \cdot m \cdot C_p A_\varphi} (T - T_w)$$

$$A_\varphi = \frac{1}{2} \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda_c}{4} (\cos 2\varphi) \right] - \frac{1 - \epsilon}{\epsilon_c - 1}$$

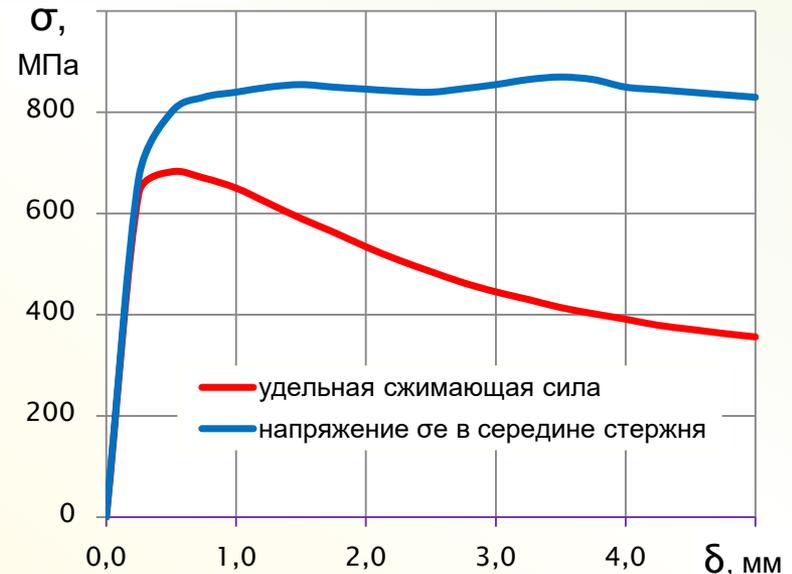
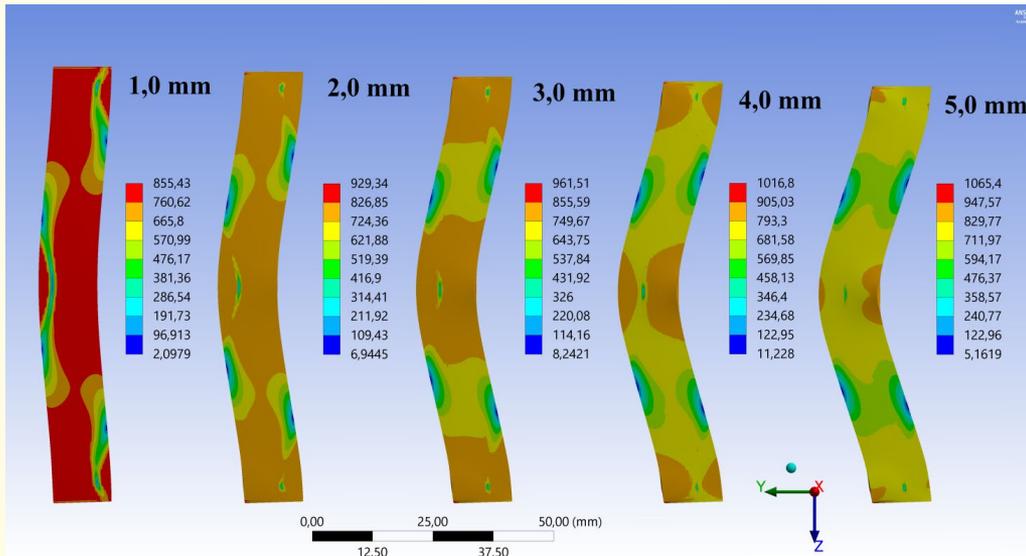
$$B_\varphi = \frac{1}{2} (\sin \varphi + \lambda_c \sin 2\varphi)$$



Моделирование осевого сжатия стержня шатуна



Определение сжимающей силы



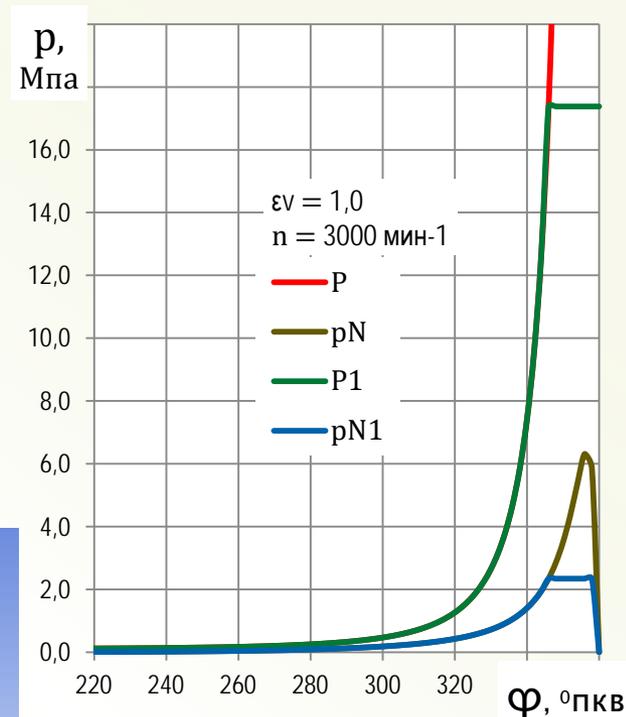
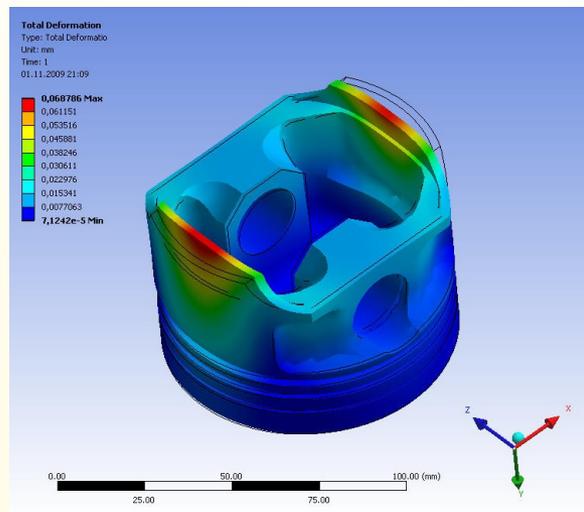
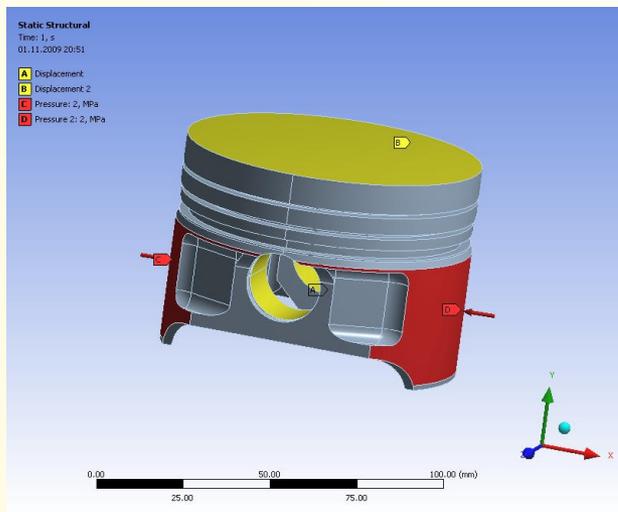
Моделирование давления на юбку поршня:

Расчет давления в цилиндре при гидроударе в отсутствии трения в сопряжении пальца дает удельное давление на юбку 2,0 МПа, которое ограничено потерей устойчивости шатуна

$$p_N = 2(p - p_0) \cdot \operatorname{tg} \beta$$

Моделирование сжатия юбки:

При удельном давлении на юбку 2,0 МПа ее упругая деформация равна 0,069 мм на сторону или 0,138 мм на диаметр



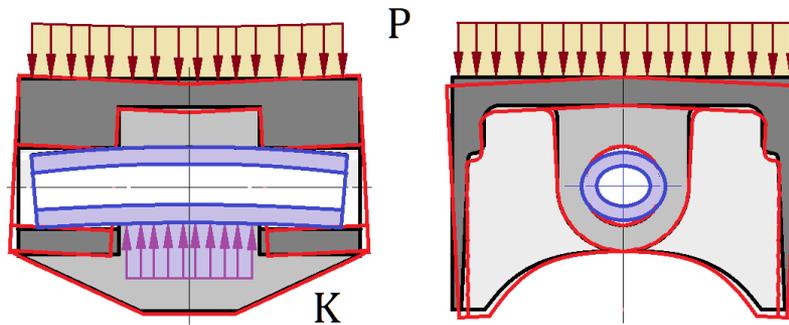
Несоответствие:

1. При гидроударе поршень деформируется по юбке.
2. Деформация поршня начинается при его сжатии по юбке от 0,5 мм, при этом требуется давление более 7,0 МПа.

Вывод: Возникающая при гидроударе боковая сила на поршень намного больше, чем дает классическая теория.

$$\Delta d_p = 0,09(p - p_0)B_\alpha \quad B_\alpha = \left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha}\right)^3 \frac{FA_\alpha}{El_p}$$

$$A_\alpha = 1,5 - 15(\alpha - 0,4)^3 \quad \alpha = d_0/d_p$$



Палец 22x14x60 мм:

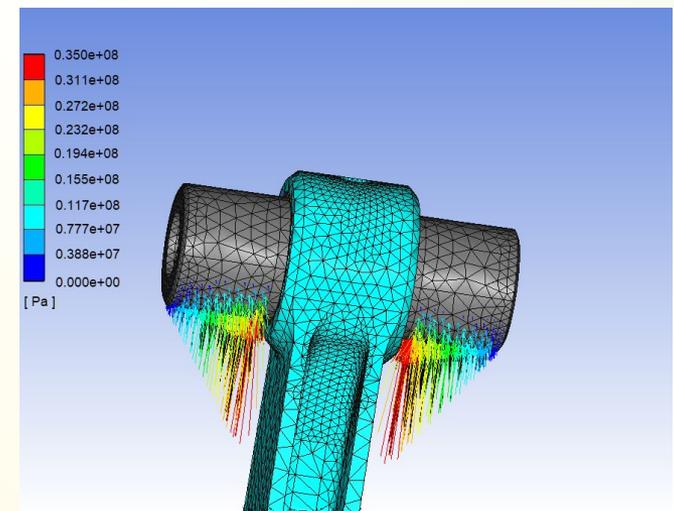
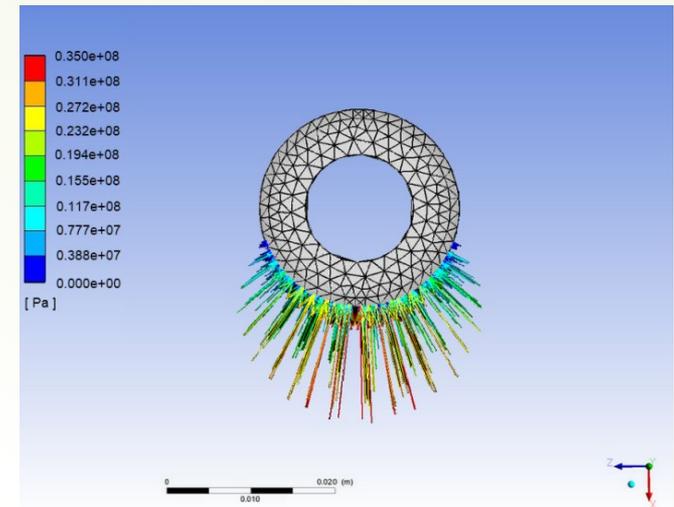
при $p = 17,4$ МПа $\Delta d_p = 0,083$ мм – далеко за допустимыми пределами (не более 0,02 мм).

Задача: найти, как влияет деформация пальца на его проворачивание в поршне и шатуне?

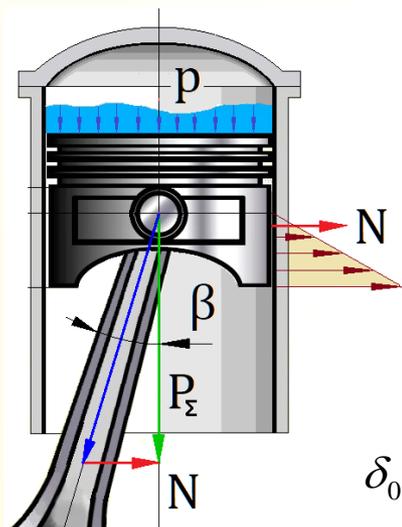
Варианты:

- 1) полное заклинивание,
- 2) проворачивание с трением,
- 3) проворачивание без трения – не соответствует гидроудару.

Распределенная нагрузка на палец по окружности по закону косинуса



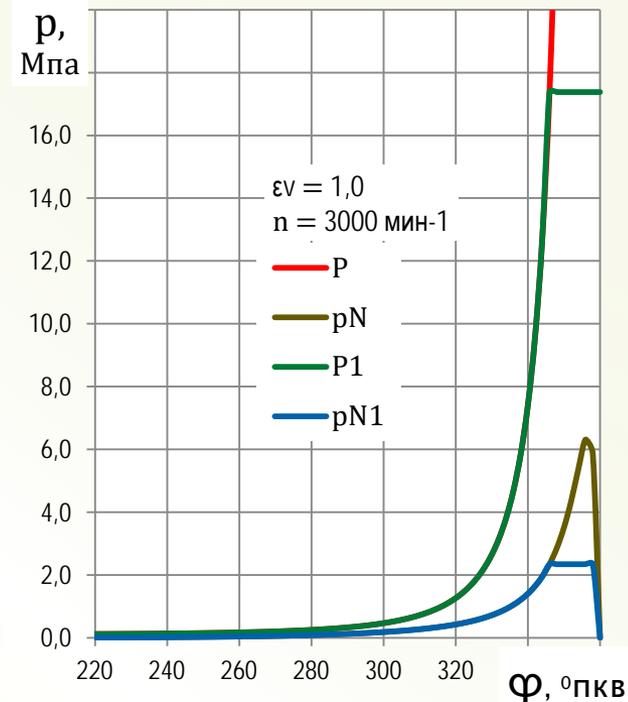
Вариант 1 – полное заклинивание деформированного пальца



- поршень стоит на месте, не доходя до верхней мертвой точки,
- шатун поворачивается относительно оси верхней (поршневой) головки вместе с поршнем,
- поршень поворачивается и давит юбкой на стенку цилиндра.

$$\delta_0 = \left(h - \frac{d_p}{2} \right) \operatorname{tg} \beta_0 \quad \sin \beta_0 = \lambda \sin \varphi_0$$

$$\delta_0 = \left(h - \frac{d_p}{2} \right) \frac{\lambda \sin \varphi_0}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi_0}} \quad \begin{array}{l} \text{Деформация} \\ \text{нижнего края юбки} \\ \text{высотой } h \end{array}$$



Исходные данные расчета: $h = 44 \text{ мм}$, $d = 22 \text{ мм}$, $\lambda = 0,333$, $\varphi_0 = 15^\circ$, что приблизительно соответствует полному заполнению камеры жидкостью ($\varepsilon = 1,0$).

Результат: деформация нижнего края юбки при полном заклинивании пальца $\delta_0 = 2,85 \text{ мм}$. Это означает **разрушение юбки** при гидроударе, что не соответствует практическим данным экспертных исследований.

Вывод: заклинивания поршневого пальца при гидроударе не происходит.

Вариант 2 – проворачивание деформированного пальца с трением

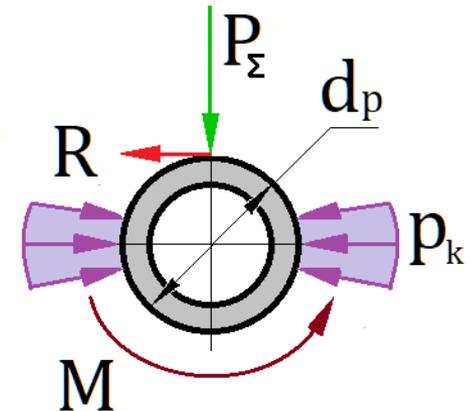
$$p_R = \frac{2M}{kfd_p} \quad - \text{контактное давление } p_R, \text{ возникающее на поверхности сопряжения}$$

Давление в цилиндре, при котором увеличение диаметра пальца сравняется с зазором δ в сопряжении:

$$p_\delta = p_0 + 11,1 \frac{\delta}{B_\alpha} \quad \Delta d_p = 0,09(p - p_0) B_\alpha$$

Условие для зазора:

$$\Delta = \begin{cases} 0, \Delta d_p \leq \delta, p \leq p_\delta \\ 0,09(p - p_\delta) B_\alpha, \Delta d_p > \delta, p > p_\delta \end{cases}$$



- начало действия трения на процесс приходится на момент достижения такого давления, которое овализирует палец до распирания отверстия бобышек

$$\Delta = p_R d_p C \quad C = \frac{C_d}{E_d} + \frac{C_p}{E_p} \quad C_d = \frac{1 + \left(\frac{d_0}{d_p}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_0}{d_p}\right)^2} - \mu_d \quad C_p = \frac{1 + \left(\frac{d_p}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_p}{d}\right)^2} + \mu_p$$

- натяг пальца в отверстии (при условии равномерности его распределения по окружности и длине)

Силы, действующие при проворачивании деформированного пальца с трением

$$M = \frac{1}{2} k f d_p p_R = \frac{1}{2} k f \frac{\Delta}{C}$$

$$N_k = \frac{2M}{h - \frac{d_p}{2}}$$

- момент трения в соединении поршневого пальца и сила от момента (приложена в середине юбки)

$$p_k = \frac{4M}{F \left(h - \frac{d_p}{2} \right)} \rightarrow p_k = \frac{2k f \Delta}{FC \left(h - \frac{d_p}{2} \right)}$$

- удельное давление на юбку от момента трения в сопряжении пальца:

$$f = \gamma \pi d_p l_b \quad \text{- площадь контакта}$$

l_b – суммарная длина части пальца в бобышках поршня (близка к 2/3 длины пальца),
 γ – коэффициент, учитывающий влияние различных факторов на площадь и характер контакта (учитывает, какая часть площади отверстия находится в контакте с пальцем, а также какое влияние имеет деформация поршня на площадь контакта и на трение в сопряжении).

$$p_k = k(p - p_\delta) \frac{0,18 \frac{\pi \gamma}{EC} \left[1 - 10(\alpha - 0,4)^3 \right] \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3}{\frac{h}{d_p} - \frac{1}{2}}$$

- суммарное удельное давление на юбку поршня при гидроударе

$$p_{N\Sigma} = p_N + p_k = (p - p_0) 2 \operatorname{tg} \beta + (p - p_\delta) k \frac{0,18 \frac{\pi \gamma}{EC} \left[1 - 10(\alpha - 0,4)^3 \right] \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3}{\frac{h}{d_p} - \frac{1}{2}}$$

при условии $p > p_\delta$

Трение в формуле начинает учитываться только после того, как давление в цилиндре достигнет значения p_δ – это означает, что палец создает натяг в отверстии поршня

Условия для расчета удельного давления на юбку поршня при проворачивании деформированного пальца с трением:

Сухое трение стали по силумину:

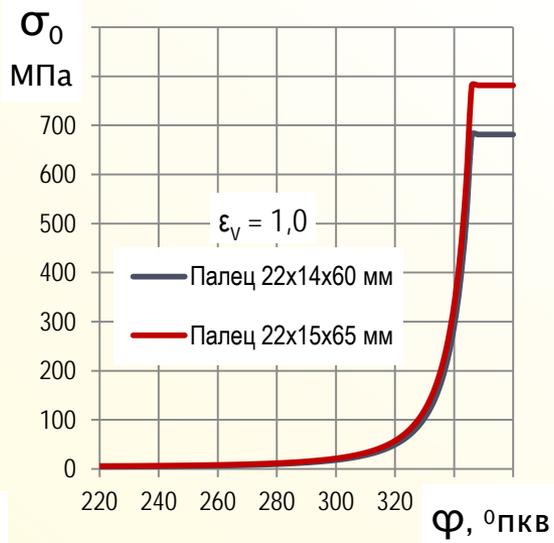
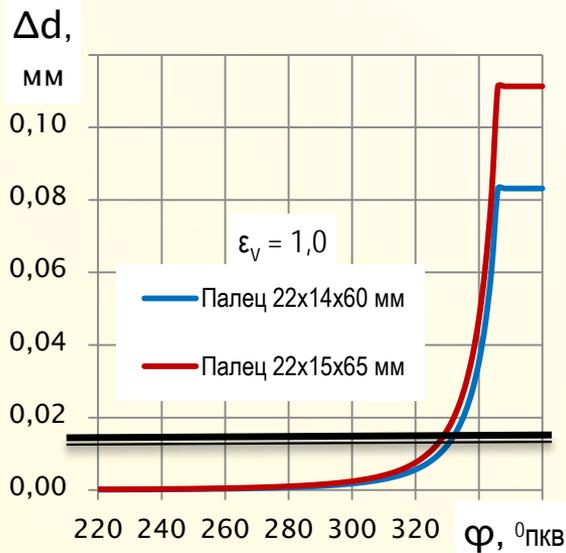
- коэффициент трения $k=0,3$

Площадь и характер контакта:

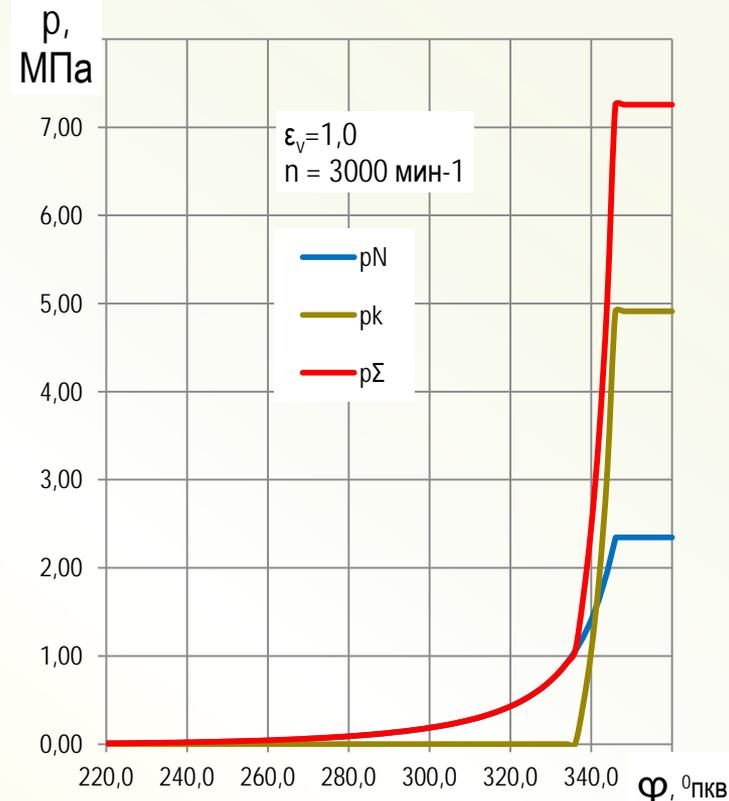
- коэффициент $\gamma=0,5$



Увеличение диаметра пальца при овализации, вызванной действием чрезмерного давления в цилиндре:



Удельное давление на юбку от боковой силы и в результате трения в сопряжении пальца



Напряжение в середине пальца

$$\sigma_0 = 0,8(p - p_0) \frac{F(l_p + 0,5b)}{d_p^3(1 - \alpha^4)}$$



1. На основании данных о напряженно-деформированном состоянии деталей поршневой группы предложено дальнейшее развитие математической модели гидроудара.
2. Разработан метод расчета действительного значения боковой силы в кривошипно-шатунном механизме при гидроударе, который позволяет не только объяснить характер повреждений деталей, но и дает возможность по величине их деформаций определять режимы, при которых эти повреждения появились.
3. Результаты, полученные с помощью разработанной модели, фактически подтверждают факт проворачивания с трением сильно овализированного поршневого пальца в отверстии поршня при чрезмерных нагрузках, вызванных гидроударом в цилиндре при нарушении условий эксплуатации.
4. Разработанная модель снимает противоречие между величиной боковой силы в кривошипно-шатунном механизме, рассчитанной по традиционным методикам, и фактом деформации юбки поршней и поршневых пальцев при гидроударе.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



А.Э.Хрулев, к.т.н., с.н.с.

Международное моторное бюро

Киевская обл., пгт Немешаево,

тел. +38 096 163 2183

E-mail: alo.engine@gmail.com

www.engine-expert.com



А.В.Сараев, д.т.н., профессор

Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет
(ХНАДУ)

тел. +38 050 275 5159

E-mail: sarayev9@gmail.com