

Министерство образования Российской Федерации

Владимирский государственный университет

Кафедра двигателей внутреннего сгорания

**ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДВИГАТЕЛЯ
И РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК
НА ШЕЙКИ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА**

Методические указания
к курсовому и дипломному проектированию

Составители А.Н. Гоц, А.М.Шарапов

Владимир 2001

УДК 621.43.01

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей
внутреннего сгорания Владимирского государственного университета
С.Г. Драгомиров

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Динамический расчет двигателя и расчет удельных нагрузок на
шейки коленчатого вала: Метод. указания к курсовому и дипломному
проектированию/ Владим. гос. ун-т. Сост. А.Н. Гоц, А.М. Шарапов,
Владимир, 2000. 20 с.

Изложены методика расчета нагрузок на шейки коленчатого вала двигателя
внутреннего сгорания, а также правила пользования программами динамического рас-
чета на ПЭВМ.

Предназначены для студентов специальностей 101200 - двигатели внутреннего
сгорания, 150200 - автомобили и автомобильное хозяйство и 230100 - эксплуатация и
обслуживание транспортных и технологических машин и оборудования.

Ил. 8 .Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.43.01

ВВЕДЕНИЕ

При работе двигателя внутреннего сгорания в кривошипно-шатунном механизме (КШМ) действуют основные силовые факторы: силы давления газов, силы инерции движущихся масс механизма, силы трения и момент полезного сопротивления. При динамическом анализе КШМ силами трения обычно пренебрегают.

Все расчеты проводятся с использованием удельных нагрузок, отнесенных к единице площади поршня.

При расчетах принято допущение, что нагрузки от газовых и инерционных сил воспринимаются только ближайшими опорами (расчет ведется по разрезной схеме коленчатого вала).

1. РЕАКЦИИ ОТ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ НЕУРАВНОВЕШЕННЫХ МАСС КРИВОШИПА

На детали кривошипно-шатунного механизма действуют центробежные силы от вращающихся масс. К таким массам относятся: неуравновешенные массы щек, массы шатунной шейки и противовесов, часть массы шатуна (для *V*-образного двигателя – двух шатунов), отнесенная к кривошипу, массы внешних противовесов, которые обычно устанавливаются для уравновешивания сил инерции первого порядка или их моментов (если они имеются). При расчетах оперируют массами, приведенными к радиусу кривошипа по зависимости:

$$m_{ir} = m_i \frac{c_i}{r}, \quad (1)$$

где m_i , ρ_i – действительная масса и расстояние от ее центра масс до оси вращения; m_{ir} – приведенная масса, r – радиус кривошипа.

Центробежные силы C_i (i – число неуравновешенных масс) определяются отдельно в соответствии с зависимостью $C_i = m_{ir} r \omega^2$, где m_{ir} – соответствующая масса, приведенная к радиусу кривошипа, ω – угловая скорость вращения коленчатого вала.

Выбирается следующая система координат: начало координат на нос-

ке вала, ось x направлена влево (если смотреть с носка, когда поршень первого кривошипа находится в ВМТ), ось y – вверх, а z – вдоль оси вала.

Для нахождения реакций от центробежных сил в плоскости кривошипа (содержащую ось y и силы Z , действующие вдоль кривошипа) и перпендикулярной этой плоскости (содержащую ось x и силы T , действующие перпендикулярно плоскости кривошипа), необходимо каждое колено рассматривать в положении верхней мертвой точки такта впуска. Для крайних колен учитывается также влияние внешних противовесов. Таким образом, возможны три варианта расчетных схем: для первого колена, промежуточного и последнего.

Все обозначения, координатные оси, размерная цепь колена, а также положительные направления центробежных сил и реакций показаны на рис. 1.

Принимают следующие обозначения сил и размерных цепей, указанных на рис. 1: C_1 – составляющая центробежной силы левого противовеса, направленная по оси y ; C_2 – центробежная сила левой щеки; C_3 – центробежная сила массы левого шатуна, отнесенной к кривошипу; C_4 – центробежная сила шатунной шейки; C_5 – центробежная сила массы правого шатуна, отнесенная к кривошипу (для рядных двигателей $C_5 = 0$); C_6 – центробежная сила правой щеки; C_7 – составляющая центробежной силы правого противовеса, направленная по оси y ; C_8 – составляющая центробежной силы левого противовеса, направленная по оси x ; C_9 – составляющая центробежной силы правого противовеса, направленная по оси x ; C_{10} , C_{12} – составляющие центробежных сил внешних противовесов, направленные по оси x ; C_{11} , C_{13} – составляющие центробежных сил внешних противовесов, направленные по оси y , l_{p1} – расстояние от точки приложения внешнего противовеса (неуравновешенной массы на носке коленчатого вала) до середины первой коренной шейки; l_1 – расстояние от середины левой коренной шейки (для всех трех расчетных схем, см. рис.1) до середины левой щеки; l_2 , l_5 – расстояние от середины левой, правой щеки до осевой линии левого, правого шатуна соответственно; l_3 , l_4 – расстояние от осевой линии левого, правого шатуна до середины шатунной шейки соответственно (для рядного двигателя $l_3 = l_4 = 0$); l_6 – расстояние от середины правой щеки до середины правой коренной шейки (рис.1); $l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6$; l_{p2} – расстояние от середины последней коренной шейки до точки приложения центробежной силы внешнего противовеса (например, до середины маховика, если неуравновешенная масса расположена на маховике).

Составляя уравнение моментов всех действующих сил относительно левой опоры, находят реакции на правой опоре (без учета центробежных сил инерции внешних противовесов):

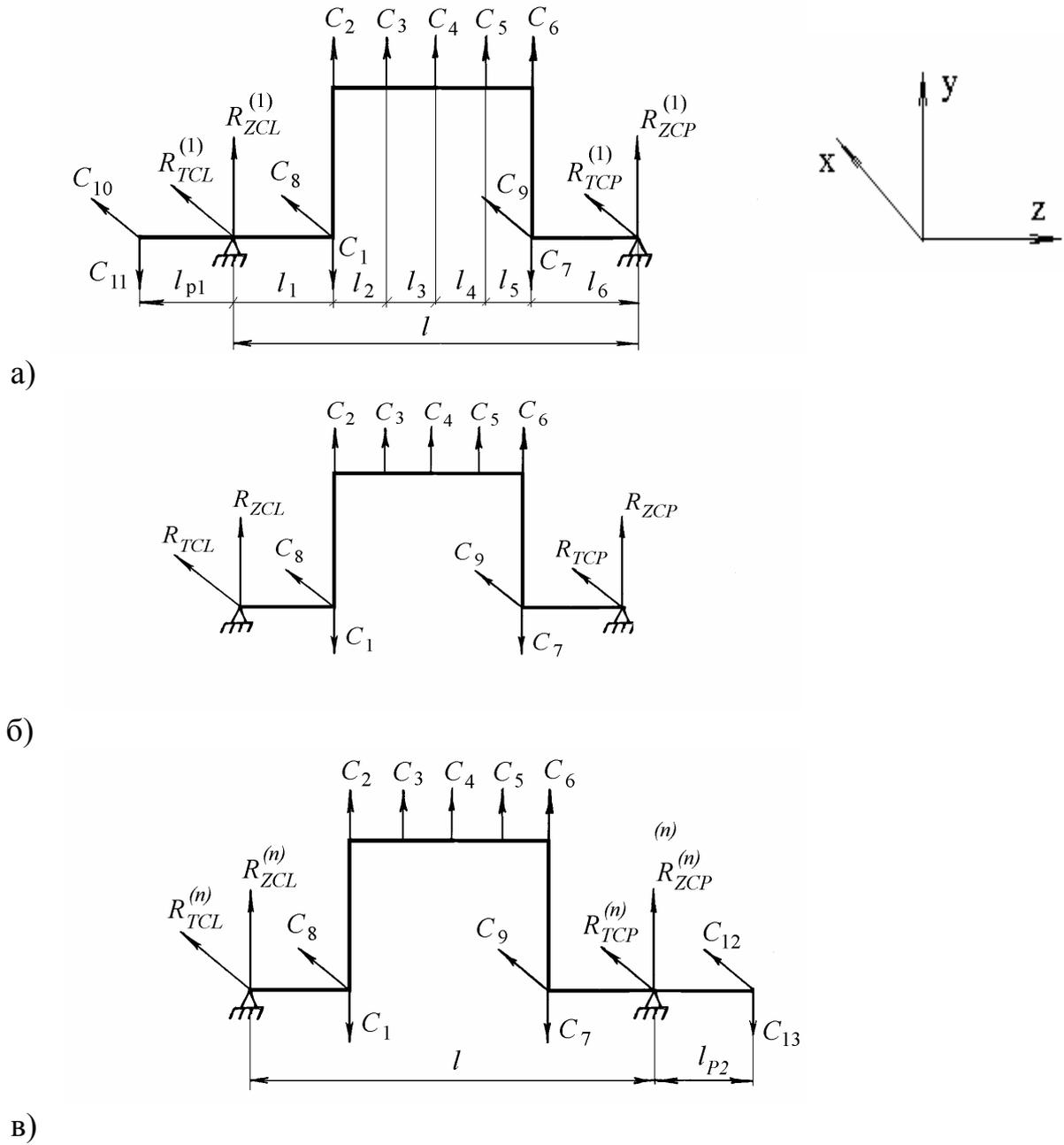


Рис. 1. Расчётные схемы для определения реакций на корневых опорах от центробежных сил:
а – для первого колена; б – для промежуточного колена;
в – для последнего колена

- в плоскости кривошипа

$$R_{ZCP} = \frac{C_1 l_1 - C_2 l_1 - C_3(l_1 + l_2) - C_4(l_1 + l_2 + l_3) - C_5(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)}{l} + \frac{-C_6(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5) + C_7(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5)}{l}; \quad (2)$$

- перпендикулярно плоскости кривошипа

$$R_{TCP} = -\frac{C_8 l_1 + C_9(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5)}{l}. \quad (3)$$

Составляя уравнение моментов относительно правой опоры, определяют реакции на левой опоре:

- в плоскости кривошипа

$$R_{ZCL} = \frac{C_7 l_6 - C_6 l_6 - C_5(l_5 + l_6) - C_4(l_4 + l_5 + l_6) - C_3(l_3 + l_4 + l_5 + l_6)}{l} + \frac{-C_2(l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) + C_1(l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6)}{l}; \quad (4)$$

- перпендикулярно плоскости кривошипа

$$R_{TCL} = -\frac{C_9 l_6 + C_8(l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6)}{l}. \quad (5)$$

Если в конструкции коленчатого вала имеются внешние противовесы, то для первого и последнего колена реакции от центробежных сил определяются со следующими поправками, учитывающими силы инерции внешних противовесов (см. формулы (2) - (5)):

- для первого колена

$$\begin{aligned} R_{ZCP}^{(1)} &= R_{ZCP} - \frac{C_{11} l_{p1}}{l}; & R_{TCP}^{(1)} &= R_{TCP} + \frac{C_{10} l_{p1}}{l}; \\ R_{ZCL}^{(1)} &= R_{ZCL} + \frac{C_{11}(l_{p1} + l)}{l}; & R_{TCL}^{(1)} &= R_{TCL} - \frac{C_{10}(l_{p1} + l)}{l}; \end{aligned} \quad (6)$$

- для последнего колена (n -го):

$$\begin{aligned} R_{ZCP}^{(n)} &= R_{ZCP} + \frac{C_{13}(l_{p2} + l)}{l}; & R_{TCP}^{(n)} &= R_{TCP} - \frac{C_{12}(l_{p2} + l)}{l}; \\ R_{ZCL}^{(n)} &= R_{ZCL} - \frac{C_{13} l_{p2}}{l}; & R_{TCL}^{(n)} &= R_{TCL} + \frac{C_{12} l_{p2}}{l}. \end{aligned} \quad (7)$$

Полученные зависимости позволяют определить реакции по направлению осей Z , T на левой и правой опорах от действия только сил инерции.

2. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В КРИВОШИПНО-ШАТУННОМ МЕХАНИЗМЕ

Усилия, действующие в кривошипно-шатунном механизме, можно получить лишь в результате рассмотрения совместного действия сил давления газов на поршень и сил инерции движущихся масс на данном расчетном режиме. Поэтому динамический расчет производят обычно для суммарных сил. Следует помнить, что все расчеты проводятся с использованием удельных нагрузок, отнесенных к единице площади поршня. Суммарная сила P_{Σ} , действующая на поршень равна:

$$P_{\Sigma} = P_{\Gamma} + P_j, \quad (8)$$

где $P_j = -m_j r \omega^2 (\cos\alpha + \lambda \cos 2\alpha)$ - сила инерции поступательно движущихся деталей; m_j - их масса; r - радиус кривошипа; $\lambda = r/L_{\text{ш}}$ - отношение радиуса кривошипа к длине шатуна; $L_{\text{ш}}$ - длина шатуна; ω - угловая скорость вращения коленчатого вала; α - угол поворота кривошипа.

Силу P_{Σ} раскладывают на две составляющие (рис. 2): силу $N = P_{\Sigma} \cdot \text{tg}\beta$, действующую перпендикулярно оси цилиндра, и силу $P_{\text{ш}} = P_{\Sigma} / \cos\beta$, действующую по оси шатуна, где β - угол поворота шатуна.

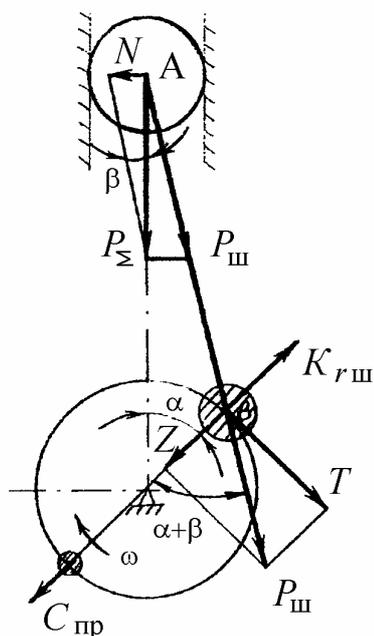


Рис. 2. Схема сил, действующих в кривошипе

В свою очередь силу $P_{\text{ш}}$ можно также разложить на две составляющие:

- нормальную силу Z , направленную по радиусу кривошипа

$$Z = P_{\Sigma} \frac{\cos(\beta + \nu)}{\cos\nu}; \quad (9)$$

- тангенциальную T , действующую перпендикулярно кривошипу

$$T = P_{\Sigma} \frac{\sin(\beta + \nu)}{\cos\nu}. \quad (10)$$

Значения усилий в остальных цилиндрах получаются сдвигом сил, действующих в первом цилиндре, на угол поворота кривошипа в соответствии с порядком работы цилиндров.

Зная величину T , можно определить крутящий момент одного цилиндра

$$M_{\text{кр.ц}} = Tr. \quad (11)$$

Затем сложением в соответствии с порядком работы цилиндров находят индикаторный суммарный крутящий момент двигателя $M_{\text{кр}}$, а по пра-

вилу трапеций - средний индикаторный крутящий момент двигателя $M_{кр.ср}$.

Равномерность крутящего момента определяется по формуле

$$m = \frac{M_{кр. max} - M_{кр. min}}{M_{кр. ср}}. \quad (12)$$

Эффективный крутящий момент двигателя

$$M_e = M_{кр. ср} \cdot \eta_m, \quad (13)$$

где η_m – механический КПД двигателя.

$$\text{Эффективная мощность двигателя } N_e : \quad N_e = \frac{M_e n}{9554}. \quad (14)$$

3. УДЕЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ШЕЙКИ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

Результирующая сила, действующая на шатунную шейку, определяется по формуле

$$R_{ш.ш} = \sqrt{Z_1^2 + T^2}, \quad \bar{R}_{ш.ш} = \bar{Z} + \bar{K}_{rш} + \bar{T}, \quad (15)$$

где $Z_1 = Z + K_{rш}$; $K_{rш} = -m_2 r_{ш}^2$; m_2 – часть массы шатуна, отнесенная к кривошипу.

Совокупность геометрических мест концов вектора $R_{ш.ш}$ представляет собой полярную диаграмму, ориентированную относительно кривошипа неподвижного коленчатого вала, вращение которого заменяется вращением цилиндра в обратную сторону.

Так как сила $P_{ш} = \sqrt{Z^2 + T^2}$, то первоначально строят полярную диаграмму этой силы, откладывая в прямоугольных координатах с полюсом O (рис. 3) значения слагающих Z и T для различных углов α_i и получая соответствующие им точки конца вектора $P_{ш}$. Полученные точки обозначают α_1, α_2 и т.д. и последовательно в порядке нарастания углов соединяют плавной кривой, которая представляет собой полярную диаграмму силы с полюсом в точке O .

Для получения полярной диаграммы результирующей силы $R_{ш.ш}$ достаточно в полученной полярной диаграмме полюс O переместить по вертикали на величину вектора $K_{rш}$ в точку $O_{ш}$, что равносильно геометрическому сложению, представленному формулой (15), так как сила $K_{rш}$ при $\omega = \text{const}$ постоянна и всегда направлена по радиусу кривошипа. Кри -

вая с точками α_1, α_2 и т.д., имеющая полюс $O_{ш}$, представляет собой полярную диаграмму нагрузки на шатунную шейку. Такая диаграмма, построенная по точкам через 30° угла поворота, изображена на рис. 3.

Перестроив эту диаграмму в координатах $R_{ш.ш} - \alpha$ (угол поворота коленчатого вала), находят максимальное $R_{ш.ш.max}$ и среднее $R_{ш.ш.ср}$ значение нагрузки на шатунную шейку.

Затем определяют среднюю $K_{ср}$ и максимальную K_{max} удельные нагрузки, действующие на шатунную шейку:

$$K_{ср.} = \frac{R_{ш.ш.ср}}{l_{ш.ш} \cdot d_{ш.ш}}; K_{max} = \frac{R_{ш.ш.max}}{l_{ш.ш} \cdot d_{ш.ш}}, \quad (16)$$

где $l_{ш.ш}$ и $d_{ш.ш}$ - длина рабочей части и диаметр шатунной шейки соответственно.

Пользуясь полярной диаграммой, можно построить диаграмму износа шейки, дающую представление о характере износа, если предположить, что он пропорционален усилиям, действующим на шейку, и распространяется от каждой силы в обе стороны, например на 60° . Для этого к окружности (рис.4, а), изображающей шейку, прикладывают векторы усилий $R_{ш.ш}$, переносимые с полярной диаграммы в сектор $A'O_{ш}B'$, образуемый предельными касательными AA' и BB' к полярной диаграмме (рис. 3, а).

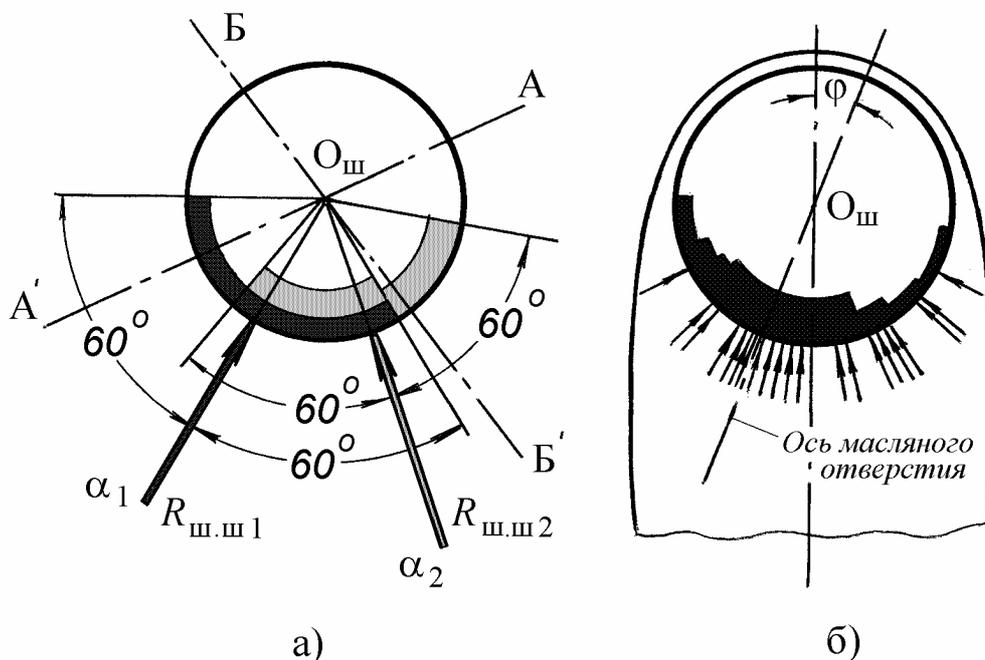


Рис. 4. Диаграмма износа шатунной шейки:
а - схема построения, б - диаграмма износа

Эти касательные, проведенные из полюса $O_{ш}$, определяют на окружности шейки условные границы силового воздействия. Поочередно под углом 60° к направлению каждого усилия в обе стороны проводят внутри окружности кольцевые полости, высота которых пропорциональна величине соответствующего усилия. Постепенно наращиваемая суммарная площадь этих полос в итоге представляет собой диаграмму износа, показанную на рис. 4, б.

Для расчета нагрузок на коренные шейки от газовых и инерционных сил необходимо рассмотреть реакции от сил Z_i и T_i на левой и правой опорах каждого колена. На рис. 5 приведена расчетная схема колена с приложенными нагрузками. Для рядного двигателя принимаем $Z_2 = T_2 = 0$, $l_3 = l_4 = 0$.

Составляя уравнение моментов относительно левой опоры, можно определить реакции на правой опоре:

$$R_{ZP} = \frac{Z_1(l_1 + l_2) + Z_2(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)}{l}; \quad (17)$$

$$R_{TP} = \frac{T_1(l_1 + l_2) + T_2(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)}{l}, \quad (18)$$

где Z_1, Z_2 – нормальные силы, действующие на кривошип от правого и левого шатунов (для рядного двигателя $Z_2 = 0$); T_1, T_2 – тангенциальные силы, действующие на кривошип от правого и левого шатунов (для рядного двигателя $T_2 = 0$).

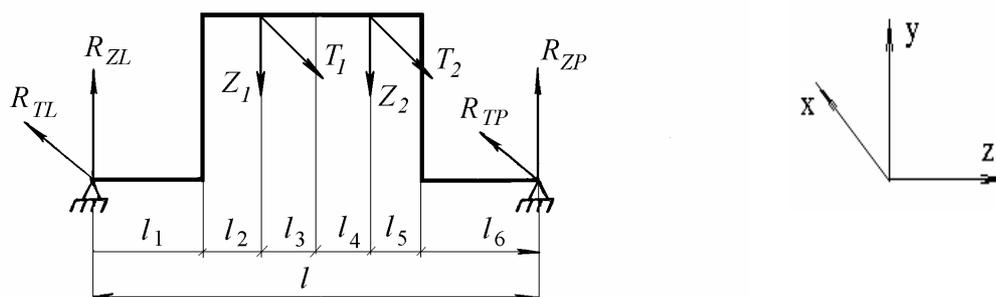


Рис. 5. Расчетная схема для определения реакций от сил T и Z

Составляя уравнения моментов относительно правой опоры, находят реакции на левой опоре:

$$R_{ZL} = \frac{Z_2(l_5 + l_6) + Z_1(l_3 + l_4 + l_5 + l_6)}{l}; \quad (19)$$

$$R_{TL} = \frac{T_2(l_5 + l_6) + T_1(l_3 + l_4 + l_5 + l_6)}{l}. \quad (20)$$

Суммарные реакции от сил Z , T и центробежных сил на левой и правой коренных опорах (см. зависимости (2) - (7)) каждого колена проектируются на оси x и y , связанные с первым коленом. Суммирование сил проводится на осях x и y в соответствии с принятым ранее направлением осей координат.

Для суммирования нагрузок с помощью ПЭВМ можно принять, что левее первого колена существует нулевое колено, реакции на коренных опорах которого равны нулю.

В исходных данных задается угол γ между 1-м и i -м коленами, измеренный от 1-го колена к i -му по часовой стрелке, если смотреть с носка вала.

При принятом направлении осей x и y :

- угол между осью y и реакциями, направленными вдоль плоскости кривошипа любого колена, численно равен γ_i ;
- угол между осью y и реакциями, направленными перпендикулярно плоскости кривошипа любого колена, численно равен $\gamma_i - 90^\circ$;
- угол между осью x и реакциями, направленными вдоль плоскости кривошипа любого колена, численно равен $\gamma_i + 90^\circ$;
- угол между осью x и реакциями, направленными перпендикулярно плоскости кривошипа любого колена, численно равен γ_i .

Для нахождения проекций реакций на оси x и y на каждой опоре предварительно по формулам, приведенным выше, определяются реакции на правой опоре предыдущего i -го колена и реакции на левой опоре последующего $(i + 1)$ -го колена. Затем определяются реакции на опорах по формулам

$$R_x = R_{TP} \cdot \cos \gamma_i + R_{TCP} \cdot \cos \gamma_i + R_{ZP} \cdot \cos(\gamma_i + 90) + R_{ZCP} \cdot \cos(\gamma_i + 90) + R_{TL} \cdot \cos \gamma_{i+1} + R_{TCL} \cdot \cos \gamma_{i+1} + R_{ZL} \cdot \cos(\gamma_{i+1} + 90) + R_{ZCL} \cdot \cos(\gamma_{i+1} + 90); \quad (21)$$

$$R_y = R_{TP} \cdot \cos(\gamma_i - 90) + R_{TCP} \cdot \cos(\gamma_i - 90) + R_{ZP} \cdot \cos \gamma_i + R_{ZCP} \cdot \cos \gamma_i + R_{TL} \cdot \cos(\gamma_{i+1} - 90) + R_{TCL} \cdot \cos(\gamma_{i+1} - 90) + R_{ZL} \cdot \cos \gamma_{i+1} + R_{ZCL} \cdot \cos \gamma_{i+1}. \quad (22)$$

При расчете R_x и R_y на ПЭВМ на последней n -й опоре учитывается, что $(n + 1)$ -е колено отсутствует и, следовательно, слагаемые, содержащие R_{TL} , R_{TCL} , R_{ZL} и R_{ZCL} , равны нулю.

4. ПОСТРОЕНИЕ ПОЛЯРНОЙ ДИАГРАММЫ НАГРУЗКИ НА КОРЕННЫЕ ШЕЙКИ

Для построения полярной диаграммы нагрузки на коренную шейку коленчатого вала ДВС, как правило, используют полярные диаграммы нагрузок на шатунные шейки двух рядом расположенных кривошипов [1...4]. В то же время вычисление удельных давлений на коренные шейки можно легко провести табличным методом [5]. Покажем расчёт нагрузок на коренную шейку коленчатого вала, расположенную между i -м и $(i+1)$ -м кривошипом. Угол между первым и i -м кривошипом обозначим γ_i , первым и $(i+1)$ -м – γ_{i+1} (рис.6). При таком положении координатных осей положительное направление тангенциальной силы T (в направлении вращения вала), действующей перпендикулярно плоскости кривошипа, а также силы Z ,

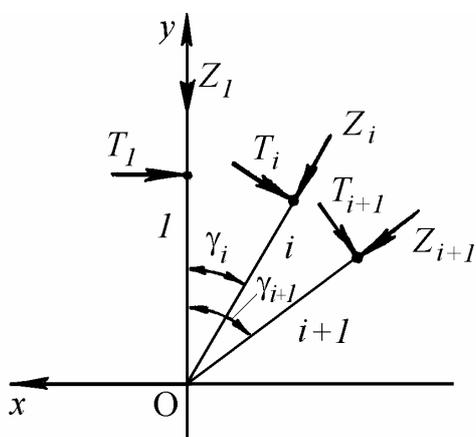


Рис. 6. Схема сил, действующих на 1-й, i -й и $(i+1)$ -й кривошипы

силы T и силы Z , направленной вдоль кривошипа.

Для симметрично нагруженного кривошипа силы T_k и Z_k ($k=i, i+1$) равномерно распределены между опорами. Если кривошип имеет несимметричную нагрузку (для V -образных двигателей или в случае установки противовесов для уравновешивания сил инерции или их моментов для всего двигателя), то реакции опор такого кривошипов определяются заранее. На рис. 7 приведена схема третьего кривошипа трёхцилиндрового дизеля. На схеме $P_{щ} = m_{щ}r\omega^2$ – силы инерции неуравновешенных масс щеки; $m_{щ}$ – приведённая к радиусу кривошипа неуравновешенная масса щеки; ω – угловая частота вращения коленчатого вала; $P_k = m_k r \omega^2$ – сила инерции неуравновешенной части шатунной шейки и массы шатуна, отнесённой к

действующей в его плоскости к оси вала (см. рис. 6), создают на коренных опорах отдельно выделенного кривошипа реакции, направленные в положительном направлении координатных осей.

Нагрузка на коренную шейку, расположенную между i -м и $(i+1)$ -м кривошипами, может быть найдена как сумма реакций правой опоры i -го кривошипа и левой опоры $(i+1)$ -го кривошипа. Для кривошипа с полностью уравновешенными центробежными силами инерции реакции на опорах будут зависеть только от касательной си-

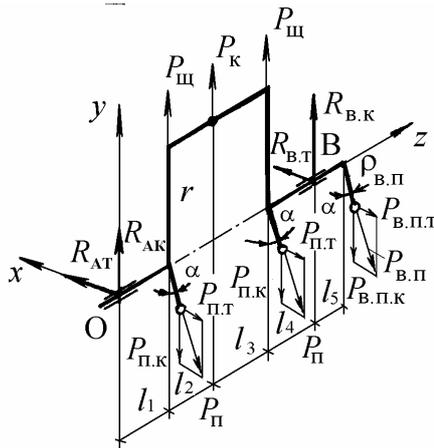


Рис. 7. Схема третьего кривошипа трёхцилиндрового дизеля с указанием действующих сил

массы внешнего противовеса; $P_{в.п.к}$ и $P_{в.п.т}$ – составляющие сил $P_{в.п}$ на плоскость кривошипа и перпендикулярно ей; α – угол наклона противовеса относительно плоскости кривошипа; $R_{ат}$ и $R_{ак}$ – реакции на опоре А от сил инерции, действующих в плоскости кривошипа и перпендикулярно ей. Реакции $R_{ат}$ и $R_{ак}$ (рис. 7) могут быть определены по величине и направлению. Таким образом, реакция на опоре между i -м и $(i+1)$ -м кривошипом в проекции на координатные оси x и y может быть найдена как сумма реакций на правой опоре i -го кривошипа и левой опоре $(i+1)$ -го кривошипа от сил T_k и Z_k ($k = i, i+1$), при этом в эти силы должны быть включены реакции от сил инерции.

Найденные реакции необходимо разделить на площадь поршня, чтобы перевести их в удельные силы как и силы T_k и Z_k .

В общем случае суммарные реакции R_x и R_y равны:

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \left(\frac{T_i}{2} \pm R_{i,T} \right) \cos \Gamma_i + \left(\frac{T_{i+1}}{2} \pm R_{i+1,T} \right) \cos \Gamma_{i+1} - \\ &\quad - \left(\frac{Z_i}{2} \pm R_{i,K} \right) \sin \Gamma_i - \left(\frac{Z_{i+1}}{2} \pm R_{i+1,K} \right) \sin \Gamma_{i+1} \\ R_y &= \left(\frac{T_i}{2} \pm R_{i,T} \right) \sin \Gamma_i + \left(\frac{T_{i+1}}{2} \pm R_{i+1,T} \right) \sin \Gamma_{i+1} + \\ &\quad + \left(\frac{Z_i}{2} \pm R_{i,K} \right) \cos \Gamma_i + \left(\frac{Z_{i+1}}{2} \pm R_{i+1,K} \right) \cos \Gamma_{i+1} \end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

Для трёхцилиндрового двигателя (см. рис. 7) вычисление реакций на правой опоре второго кривошипа не требуется ввиду отсутствия на продолжении щёк противовесов.

Приведем пример построения полярной диаграммы нагрузки на третью коренную шейку трёхцилиндрового четырехтактного дизеля с порядком работы цилиндров 1-3-2 с исходными данными (см. рис. 7): $r = 0,06$ м; $m_{\text{ш}} = 0,467$ кг; $m_{\text{к}} = 2,53$ кг; $m_{\text{п}} = 1,71$ кг; $m_{\text{в.п}} = 0,340$ кг; $l_1 = l_4 = 49$ мм; $l_2 = l_3 = 21$ мм; $l_5 = 23,5$ мм. В таблице приведен расчет сил T_k и Z_k для второго (индекс $i = 2$) и третьего ($i+1 = 3$) цилиндров.

Результаты расчета представлены в столбцах R_x и R_y таблицы, а полярная диаграмма, построенная по этим данным, показана на рис. 8.

Расчет сил T_k и Z_k для второго и третьего цилиндров

φ , ° П.К.В.	Z_2 , МПа	T_2 , МПа	Z_3 , МПа	T_3 , МПа	R_x , МПа	R_y , МПа
30	-0,122	-0,420	-0,889	0,359	0,036	0,762
60	0,050	-0,176	-0,806	0,000	0,087	0,437
90	0,813	-0,635	-0,642	0,259	0,287	0,516
120	6,447	-0,001	-0,438	-0,453	1,664	-1,526
150	2,690	2,103	-0,088	-0,301	0,073	-1,520
180	0,310	1,079	-0,071	0,246	-0,407	-0,249
210	-0,269	0,927	-0,639	0,500	-0,436	0,214
240	-0,112	0,738	-1,039	0,000	-0,124	0,140
270	-0,889	0,359	-0,056	-0,513	-0,341	0,031
300	-0,806	0,000	-0,077	-0,268	-0,287	0,277
330	-0,642	0,259	-0,081	0,250	-0,439	0,349
360	-0,438	-0,453	-0,422	0,437	-0,171	0,772
390	-0,088	-0,301	-0,622	0,251	-0,025	0,588
420	-0,071	0,246	-0,660	0,000	-0,086	0,248
450	-0,639	0,500	-0,631	-0,255	-0,235	0,162
480	-1,039	0,000	-0,454	-0,470	-0,200	0,342
520	-0,656	-0,513	-0,122	-0,420	-0,072	0,407
540	-0,077	-0,268	0,050	-0,176	-0,092	0,218
570	-0,081	0,280	0,813	-0,635	-0,306	-0,407
600	-0,422	0,437	6,447	-0,001	-1,998	-1,524
630	-0,622	0,251	2,690	2,103	-1,588	0,457
660	-0,660	0,000	0,310	1,079	-0,684	0,727
690	-0,631	-0,255	-0,269	0,927	-0,430	0,909
720	-0,454	-0,470	-0,712	0,738	-0,174	0,986

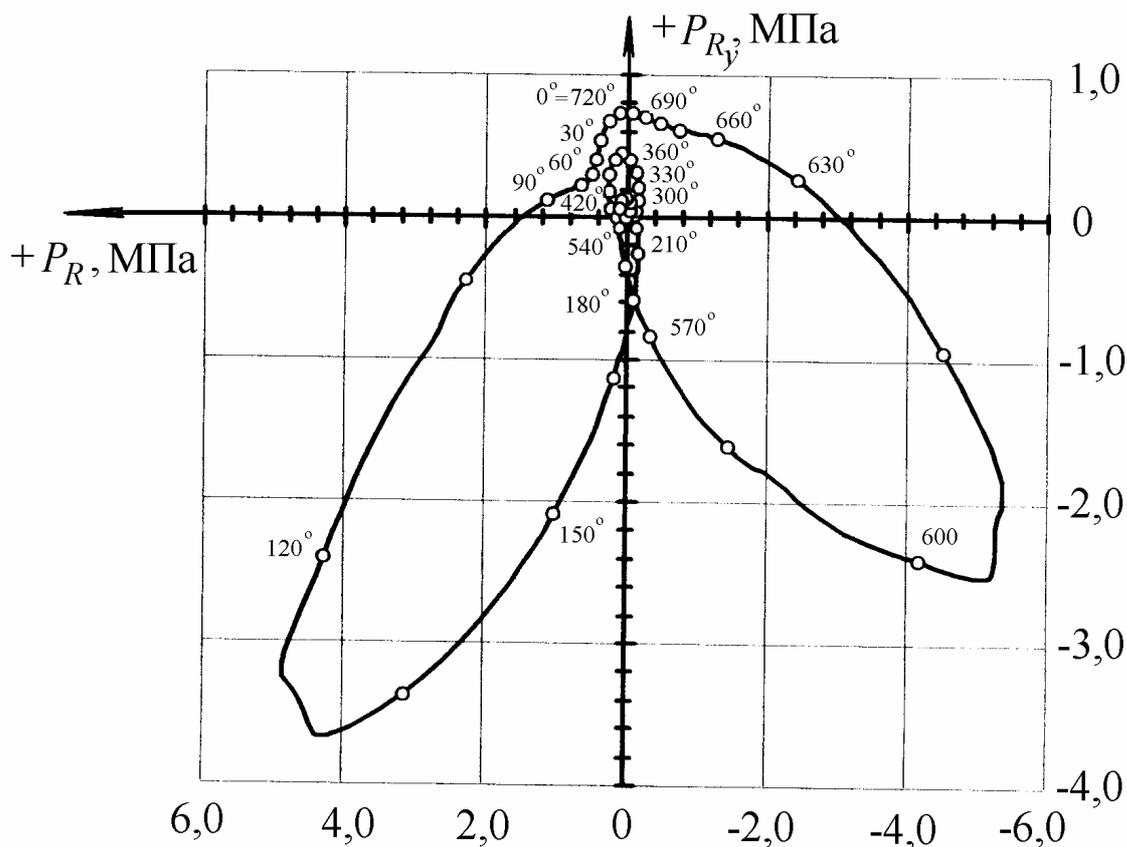


Рис. 8. Полярная диаграмма нагрузки на третью коренную шейку трёхцилиндрового дизеля

В заключение следует отметить, что расчет и построение полярной диаграммы нагрузок на коренные шейки можно проводить, используя любые электронные таблицы для ПЭВМ.

5. ПРОГРАММА ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА ДВС

Программа динамического расчета деталей КШМ ориентирована на ПЭВМ типа IBM под управлением MS DOS (расчет может проводиться из Windows). В программу входят файлы:

Имя	Назначение
dinn.exe	Запуск программы
din.c	Результаты расчета
rr1.c	Исходные данные
yy.c	Результаты расчета
egavga bgi	Графическое изображение

Исходные данные заносятся в файл «tr1.c» (открывается F4 или любым редактором). Исходные данные заполняются без смещения строк. Значение $ktr = 100$ внесено при программировании. Плечи l заполняются в соответствии с рис.1. Угловые смещения начала рабочего хода в цилиндрах проставляются, начиная с первого цилиндра и до последнего. Для V-образного двигателя нумерация цилиндров начинается с левой стороны от носка, а затем в той же последовательности - для правой стороны. В соответствии с этой нумерацией проставляются угловые интервалы рабочего хода в цилиндрах. Переводом курсора на файл «dinn.exe» и нажатием «Enter» программа запускается.

Пример заполнения исходных данных приведен в приложении. Линейные размеры для кривошипа повторяются перед каждой таблицей сил, действующих на коренную шейку, в файле «уу.с». Все усилия вычисляются для первого цилиндра через 3° по углу поворота коленчатого вала.

После проведения расчетов (если правильно занесены исходные данные) на экране загорается меню «Результаты расчета двигателя» в составе подменю «Таблицы», «Графики», «Выход». Выбор команды в меню осуществляется подводом синего окна (клавишами $\leftarrow \uparrow$ или $\rightarrow \downarrow$) и нажатием «Enter». Нажимом «Esc» производится отмена команды либо выход в предыдущее меню.

По команде «Таблицы» высвечиваются меню «Удельные нагрузки», «Нагрузки на коренные шейки» и «Выход». При нажатии первых двух команд указываются файлы, где записаны результаты расчета: «din.c» и «уу.с.»

По команде «Графики» высвечиваются «Графики p_r, p_j, p_Σ », «Графики S и N », «График K и T », «График M -суммарного», «Удельные давления $R_{ш.ш}$ », «Удельные давления $R_{к.ш}$ » и «Выход». После подвода синего окна к соответствующей команде и нажатия «Enter» на экране строятся графики сил и моментов, которые указаны в меню. Отметим, что для построения графиков $M_{сум.}$, $R_{ш.ш}$ и $R_{к.ш}$ необходимо указать масштаб для построения (в левом углу экрана загорается «M=» и необходимо указать 1, 0,7 или другой масштаб). Печатать с экрана при работе в MS DOS можно редактором PZP или graphics.com. При работе в Windows нажать клавишу «Print Screen» для перевода содержимого экрана в буфер обмена. Затем, переключившись в «Paint Brush», вставить содержимое в буфере обмена с помощью клавиш «Shift» и «Insert».

После расчета R_x и R_y построение полярной диаграммы нагрузок на коренные шейки коленчатого вала можно провести следующим образом. Значения сил R_x и R_y , действующих на коренную шейку заносим в приведенную выше таблицу через $\alpha = 10^\circ$ поворота коленчатого вала.

В выбранной прямоугольной системе координат по оси x откладываем R_x , а по оси y – R_y , графически определяя вектор $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$. Соединяя концы полученных векторов, получим полярную диаграмму нагрузок на коренные шейки коленчатого вала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конструкция и расчет автотракторных двигателей / М.М. Вихерт, Р.П. Доброгаев, М.И. Ляхов и др. – М.: Машиностроение, 1964. – 552 с.
2. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей / Д.Н. Вырубов, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания. Кн. 2. Динамика и конструирование / В.Н. Луканин, И.В. Алексеев, М.Г. Шатров и др.; Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш.шк., 1995. – 240 с.
4. Попык К.Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей. – М.: Высш. шк., 1970. – 328 с.
5. Гоц А.Н. Построение полярной диаграммы нагрузки на коренные шейки // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2000. № 6. с. 16 - 18.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Реакции от центробежных сил неуравновешенных масс кривошипа	3
2. Силы, действующие в кривошипно-шатунном механизме	6
3. Удельные нагрузки, действующие на шейки коленчатого вала	8
4. Построение полярной диаграммы нагрузки на коренные шейки	13
5. Программа динамического расчета кривошипно-шатунного механизма ДВС	15
Библиографический список	18
Приложение	19

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пример заполнения исходных данных

Радиус кривошипа R, м.	0.06
Диаметр цилиндра D, м.	0.105
Число оборотов вала N, мин ⁻¹	2000
Степень сжатия E.	16.5
Количество цилиндров КС.	3
Длина шатуна DL, м.	0.286
Давление впуска PA, МПа.	0.162
Максимальное давление цикла PZ, МПа.	12
Давление остаточных газов PR, МПа.	0.111
Показатель политропы сжатия n1.	1.352
Показатель политропы расширения n2.	1.186
Степень предварительного расширения SR.	1.1
Механический КПД КPD.	0.8
Масса поступательно движущихся деталей VJ1, кг.	2.2
Масса шатуна, отнесенная к кривошипу VJ2, кг	1.6
Угол опережения впрыска UOV, град	20
Период задержки воспламенения UZV, град	13
Начало процесса впуска VPN, град	16
Конец процесса впуска VPN, град.	40
Начало процесса выпуска VIPN, град	40
Конец процесса впуска VIPN, град	16
Угловые смещения начала рабочего хода в цилиндрах. . .	0 480 240
Диаметр шатунной шейки DH, мм	65
Длина рабочей части шатунной шейки DLH, мм.	36
Количество коренных шеек ККН.	4

Номер щеки	Приведенные массы щеки VJS, кг	Приведенные массы противовесов VJP, кг	Угол наклона противовесов UN, град
1	0.74	1.97	0
2	0.74	1.97	0
2	0.74	1.97	0
4	0.74	1.97	0
5	0.74	1.97	0
6	0.74	1.97	0

Приведенная масса шатунной шейки VJH, кг. 0.86
 Приведенные массы внешних противовесов UV, кг:
 1-го и 2-го 0.311 0.311
 Угол наклона внешних противовесов UV, град 30

Номер коренной шейки	Рабочая длина коренной шейки DLK, мм
1	31.0
2	31.0
3	31.0
4	31.0

Диаметр коренных шеек DK, мм 70
 ktr 100
 Плечи PL1 и PL2 130 80

Плечи l:					
34.0	34.0	0.0	0.0	34.0	34.0
34.0	34.0	0.0	0.0	34.0	34.0
34.0	34.0	0.0	0.0	34.0	34.0

Угловые смещения колен, град 0 240 120

**ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДВИГАТЕЛЯ
И РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК
НА ШЕЙКИ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА**

Методические указания
к курсовому и дипломному проектированию

Составители
Гоц Александр Николаевич
Шарапов Александр Михайлович

Ответственный за выпуск зав.кафедрой ДВС, профессор В.В.Эфрос

Редактор А.П.Володина
Корректор О.В.Чезганова

Л.Р. № 020275 от 13.11.96. Подписано в печать 20.02.01.
Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.
Печать офсетная. Усл. печ. л.1,16. Уч.-изд.л. 1,25. Тираж 200 экз.
Заказ №

Владимирский государственный университет.
Подразделение оперативной полиграфии
Владимирского государственного университета.
Адрес университета и подразделения оперативной полиграфии:
600000, Владимир, ул. Горького, 87.