

Министерство образования и науки Российской Федерации  
«Южно-Уральский государственный университет»  
Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

621.43(07)  
Ш656

## **ДИНАМИКА ДВИГАТЕЛЕЙ**

Методические указания  
к курсовому проектированию

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2014

УДК 621.43.004.19(075.8)  
Ш656

*Одобрено*  
учебно-методической комиссией Автотракторного факультета

*Рецензент*  
Никифоров С.С.

Ш656

**Динамика двигателей:** методические указания к курсовому проектированию / сост. В.В. Шишков. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 27 с.

Методические указания подготовлены в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки «Энергетическое машиностроение» и программой курса «Динамика двигателей». В руководстве приведены основные расчетные зависимости для соответствующих разделов курсового проекта, а также последовательность выполнения вычислений и их объем.

Методические указания предназначены для студентов, проходящих подготовку по направлению «Энергетическое машиностроение» (степень бакалавр, профиль «Двигатели внутреннего сгорания»).

УДК 621.43.004.19(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование современных поршневых двигателей внутреннего сгорания предусматривает решение ряда сложных задач. Прежде всего, это синтез рабочего цикла двигателя и анализ кинематических и динамических параметров кривошипно-шатунного механизма (КШМ). Результаты кинематического и динамического расчетов позволяют определить уровень нагрузок, действующих на детали КШМ. Расчет сил и моментов, действующих в КШМ, необходим для выявления прочностных качеств деталей двигателя, а также полных и удельных нагрузок на подшипники коленчатого вала с целью прогнозирования их износа. Динамический расчет позволяет выработать мероприятия для обеспечения уравновешенности двигателя, определить параметры маховика при заданной неравномерности вращения коленчатого вала.

Методические указания способствуют систематизации и организации самостоятельной работы студентов при выполнении курсового проекта по дисциплине «Динамика двигателей». Данное руководство подготовлено в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки «Энергетическое машиностроение».

В указаниях наряду с теоретическими материалами приведены практические рекомендации по выполнению отдельных разделов курсового проекта по дисциплине. Изложение материала сопровождается примерами расчета применительно к конкретному двигателю.

## 1. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Выполнение курсового проекта начинается с анализа содержания, объема и требований задания на курсовой проект. Приступая к выполнению курсового проекта необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой. Качество и оформление текстовых и графических документов проекта должно соответствовать существующим нормативным документам и стандарту предприятия СТП ЮУрГУ 04-2008 (см. по ссылке <http://k.susu.ac.ru/olan/docs/UMU/nmo/CTOsusu04-2008.pdf>).

Задание на выполнение курсового проекта (КП) по дисциплине «Динамика двигателей» предусматривает подготовку пояснительной записки (ПЗ) и разработку графической части (ГЧ).

Пояснительная записка должна содержать: титульный лист; задание на курсовой проект; аннотацию; оглавление; введение; основную часть; заключение; библиографический список; приложения. Примерный объем ПЗ составляет 30...40 листов. Текст пояснительной записки выполняется в соответствии с ГОСТ 2.304-81 печатным способом через один интервал на одной стороне листа формата А4. Заголовки и подзаголовки ПЗ выделяются жирным (полужирным) шрифтом.

**Титульный лист** является первым листом пояснительной записки. В приложении приведен пример титульного листа пояснительной записки курсового проекта.

**Задание на курсовой проект** наряду с основными реквизитами (см. приложение) содержит: индивидуальную тему курсового проекта; плановый срок сдачи студентом законченного проекта; перечень вопросов, подлежащих разработке в ходе выполнения проекта; календарный план выполнения КП.

**Аннотация** помещается в ПЗ после задания и имеет основную надпись по форме 2 ГОСТ 2.104-2006 (см. приложение). Аннотация (в соответствии с ГОСТ 7.0-99) включает: характеристику основной темы; проблемы объекта; цели (и задачи) работы; результаты работы; новизну работы. Если КП не содержит сведений по какой-либо из перечисленных структурных частей аннотации, то в тексте аннотации она опускается, при этом последовательность изложения сохраняется. Рекомендуемый средний объем текста аннотации 500 печатных знаков.

**Оглавление** помещается за аннотацией, оно содержит номера и наименования разделов и подразделов с указанием соответствующих страниц, библиографический список, перечень приложений и другой документации, относящейся к курсовому проекту.

**Введение** должно отражать оценку современного состояния решаемой задачи. В нем раскрывается значение разрабатываемой темы. Обосновывается необходимость, значимость, цель, пути решения поставленных задач.

**Основная часть** содержит сведения о конструктивных особенностях двигателя, выбранного в качестве прототипа. Приводится обоснование исходных

данных для теплового, кинематического и динамического расчетов. Математические зависимости кинематических и динамических параметров указываются с примерами расчетов. Приводятся результаты исследований, выполняемых в соответствии с заданием на КП. Рисунки расчетных схем могут быть выполнены в любом графическом редакторе. Табличное и графическое представление результатов расчетов допускается в среде Microsoft Excel.

**Заключение** кратко определяет полученные в КП результаты. Приводятся выводы и рекомендации по результатам работы.

**Библиографический** список должен содержать сведения об информационных источниках (нормативно-технических, литературных, электронных и др.), использованных в КП. Оформление библиографического списка производится либо в виде сносок (для используемой литературы), либо в виде списка в конце работы. Библиографический список составляется либо в алфавитном порядке, либо в порядке использования источников (первой ссылки на них). Источники на иностранном языке располагаются в конце списка. Источники в библиографическом списке нужно нумеровать арабскими цифрами без точки и печатать с абзацного отступа. Оформление библиографического списка производится согласно ГОСТ 7.1-2003.

**В приложения** курсового проекта включаются распечатки результатов теплового и динамического расчетов. Графическая часть курсового проекта также приводится в приложении (листы графической части могут быть представлены в формате А4).

Нумерация листов пояснительной записки должна быть сквозной для текста и приложений, начиная с титульного листа. Проставляется нумерация с третьего листа (титульный лист и задание на курсовой проект не нумеруются).

## **2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВИГАТЕЛЯ**

В задании на курсовой проект указан двигатель, принимаемый в качестве прототипа. Выбор основных геометрических размеров элементов конструкции двигателя, их массовых характеристик, условий организации и протекания рабочего процесса, а также схемы кривошипно-шатунного механизма ориентирован на данные прототипа. В задании указана номинальная мощность двигателя и частота вращения коленчатого вала в режиме номинальной мощности. Этих условий достаточно для формирования исходных данных (ИД) к тепловому расчету рабочего цикла двигателя.

Синтез рабочего цикла может быть выполнен по одной из программ, разработанных на кафедре ДВС ЮУрГУ, например [1]. Рекомендации по выбору исходных данных доступны во вкладке «Справка», указанной программы, а также в учебной литературе [2, 3]. Пример с перечнем ИД, их численными значениями и результатами расчета приведен в приложении.

Соответствие результатов теплового расчета условиям задания на курсовой проект проверяется сопоставлением численных значений эффективных

показателей двигателя. Для этого определяют среднее давление механических потерь  $p_m$ . В курсовом проекте допустимо использование эмпирических зависимостей для нахождения  $p_m$  [2, 3].

Среднее эффективное давление цикла  $p_e = p_i - p_m$ , где  $p_i$  – среднее индикаторное давление, определяемое по результатам теплового расчета, МПа.

Эффективная мощность двигателя

$$N_e = \frac{p_e \cdot i \cdot V_h \cdot n}{30 \cdot \tau}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где  $i$  – число цилиндров двигателя;  $V_h$  – рабочий объем одного цилиндра,  $\text{дм}^3$ ;  $n$  – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $\tau$  – тактность двигателя.

Если численное значение  $N_e$  в задании на курсовой проект отличается от вычисленного по формуле (1) более чем на 3%, то исходные данные уточняются и расчет повторяется до достижения условия

$$\frac{|\Delta N_e|}{N_e} \cdot 100\% \leq 3\%.$$

### 3. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА

#### 3.1. Формирование исходных данных

Обоснование и выбор исходных данных ориентированы на особенности конструкции прототипа. Перечень ИД включает следующие параметры:

$R$  – радиус кривошипа, м;

$\lambda$  – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;

$n$  – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$m$  – масса возвратно-поступательно движущихся частей, кг;

$p_a$  – давление в конце впуска (начале сжатия), МПа;

$p_r$  – давление выпуска, МПа;

$F_{\text{п}}$  – площадь поршня,  $\text{м}^2$ ;

$p_{\text{кг}}$  – давление картерных газов, МПа;

массив давлений для углов 190...530 град. ПКВ с шагом 10 градусов (всего 35 значений).

Радиус кривошипа равен половине хода поршня. Величины  $\lambda$  и  $p_r$  определены ранее (см. ИД к тепловому расчету). Изменение давления газов в такте выпуска не учитывается. Частота вращения коленчатого вала совпадает с предложенной в задании на КП. Масса возвратно-поступательно движущихся частей определяется в соответствии с рекомендациями по приведению масс кривошипно-шатунного механизма [4, 5, 6]. Давление в конце впуска (начале сжатия) вычисляется в тепловом расчете. Давление газов в такте впуска полагается постоянным. Одним из результатов теплового расчета [2] является уточненный диаметр цилиндра  $D$  и ход поршня  $S$ . Площадь поршня вычисляется для уточ-

ненного диаметра. Давление картерных газов в четырехтактных двигателях принимают равным атмосферному.

Программа расчета кинематики и динамики КШМ [7] разработана для работы в среде операционной системы Microsoft Windows. Доступны и более ранние версии программы, которые позволяют рассчитать силы и моменты, действующие в КШМ, только для одного цилиндра. Дальнейшие расчеты КШМ многоцилиндрового двигателя выполняются индивидуально с учетом особенностей конструкции двигателя.

### 3.2. Рекомендации к формированию расчетного блока

Разнообразие двигателей, отличающихся числом и расположением цилиндром, схемами КШМ и коленчатого вала, усложняет создание программы, в которой были бы предусмотрены все возможные варианты расчетных схем. Задача упрощается для расчетной схемы конкретного двигателя с последующей программной реализацией. Такая программа достоверна для группы двигателей с одинаковым числом и расположением цилиндром, схемами КШМ и коленчатого вала. Студенты самостоятельно достигают результата при решении задач указанного уровня. Примеры расчетов КШМ в настоящем руководстве приведены применительно к дизелю 4ЧН15/20,5.

#### 3.2.1. Кинематический расчет

Кинематический расчет может быть выполнен по приближенным зависимостям, обеспечивающим достаточную точность вычислений. Допускаемая погрешность вычислений будет присутствовать и в результатах динамического расчета.

Для двигателя с аксиальной схемой КШМ перемещение поршня рассчитывается по формуле:

$$s = R \left[ \left( 1 + \frac{\lambda}{4} \right) - \left( \cos \varphi + \frac{\lambda}{4} \cdot \cos 2\varphi \right) \right], \text{ м,}$$

где  $\varphi$  – угол поворота коленчатого вала, град. ПКВ.

Скорость поршня

$$v = R\omega \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right), \text{ м/с,}$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения коленчатого вала,  $\omega = \frac{\pi n}{30}$ , рад/с.

Средняя скорость поршня

$$v_{\text{cp}} = \frac{Sn}{30}, \text{ м/с,}$$

где  $S$  – ход поршня, м.

Ускорение поршня

$$j = R\omega^2 \cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi, \text{ м/с}^2.$$

В пояснительной записке необходимо привести указанные выше расчетные зависимости и примеры расчета для углов, отличающихся от 0, 90, 180 и других углов кратных приведенным.

### 3.2.2. Динамический расчет

Динамический расчет КШМ заключается в определении суммарных сил и моментов, возникающих от газовых и инерционных сил.

На детали КШМ действуют силы: давления газов; инерции; внутреннего (вредного) сопротивления; внешнего (полезного) сопротивления; тяжести (силы тяжести в динамических расчетах поршневых ДВС не учитывают).

Силы давления газов, действующие на поверхность поршня, для упрощения динамического расчета заменяют направленной по оси цилиндра силой, приложенной к оси поршневого пальца. Сила давления газов определяется по результатам теплового расчета

$$P_{\Gamma} = p - p_{\text{кг}} F_{\Pi} \cdot 10^3, \text{ кН},$$

где  $p$  – давление газов в цилиндре двигателя, МПа;  $p_{\text{кг}}$  – давление в картере, принимаемое равным давлению окружающей среды, МПа;  $F_{\Pi}$  – площадь поршня, м<sup>2</sup>.

Силы давления газов являются положительными, если они направлены к оси коленчатого вала, и отрицательными, если они направлены от коленчатого вала.

Силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс

$$P_j = -mj \cdot 10^{-3}, \text{ кН}.$$

Сила инерции (здесь и далее силы приведены в кН) направлена в сторону противоположную ускорению. Силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс действуют по оси цилиндра и являются положительными, если они направлены к оси коленчатого вала.

Суммарную силу находим сложением сил давления газов и сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс (суммарная и другие силы и моменты для схемы одноцилиндрового двигателя приведены на рис. 1):

$$P_{\Sigma} = P_{\Gamma} + P_j.$$

Нормальная сила  $N$ , действующая перпендикулярно оси цилиндра, воспринимается стенками цилиндра

$$N = P_{\Sigma} \operatorname{tg} \beta,$$

где  $\beta$  – угол отклонения оси шатуна от оси цилиндра, град.

Нормальная сила  $N$  считается положительной, если создаваемый ею момент относительно оси коленчатого вала направлен противоположно направлению вращения вала двигателя.

Сила  $P_{ш}$ , действующая вдоль шатуна, передается кривошипу. Она считается положительной, если сжимает шатун, и отрицательной, если его растягивает

$$P_{ш} = P_{\Sigma} / \cos \beta ,$$

Силу  $P_{ш}$  можно разложить на две составляющие:

– силу, действующую по оси кривошипа

$$Z = P_{ш} \cos \varphi + \beta ;$$

– касательную (тангенциальную) силу, перпендикулярную к силе  $Z$

$$T = P_{ш} \sin \varphi + \beta .$$

Сила  $Z$  считается положительной, если она сжимает щеки колена. Сила  $T$  считается положительной, если создаваемый ею момент имеет направление, совпадающее с направлением вращения коленчатого вала.

Пара сил  $N$  на плече  $H$  создает опрокидывающий момент  $M_{оп}$ . Реакции опор  $R$  на плече  $B$  создают реактивный момент  $M_R$ . Крутящий момент (индикаторный)  $M$  уравнивается моментом сопротивления  $M_c$ , который равен сумме

моментов сил полезного сопротивления (момент потребителя) и сил трения в двигателе (момент обусловленный механическими потерями).

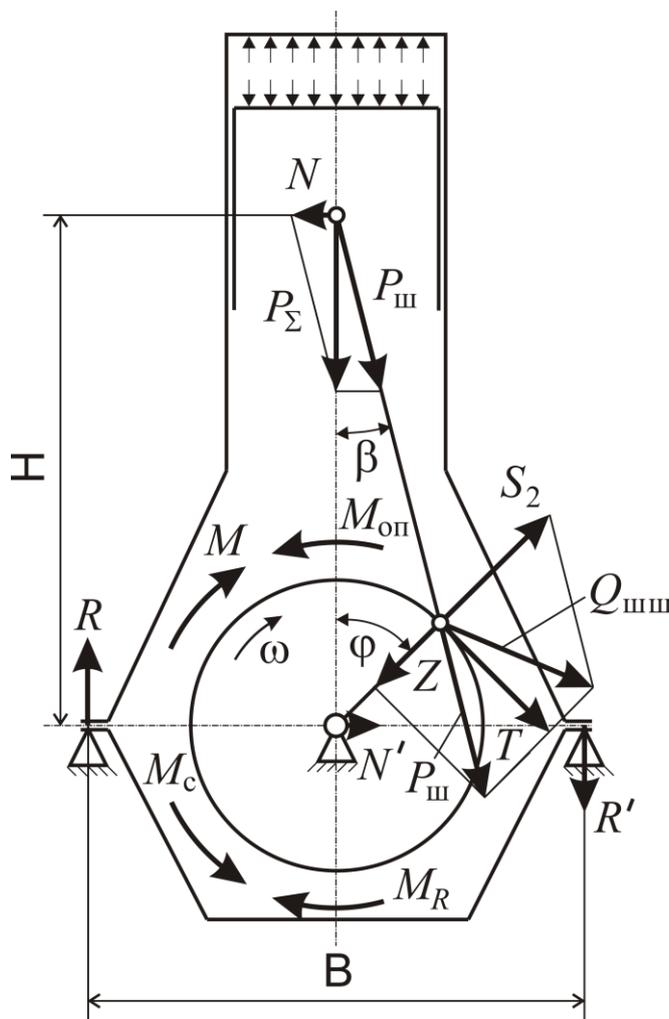


Рис. 1. Силы и моменты, действующие в одноцилиндровом двигателе

### 3.2.3. Суммарная тангенциальная сила

Для расчета суммарной тангенциальной силы  $T_{\Sigma}$  в Excel формируется таблица, включающая силы  $T$  для каждого из цилиндров двигателя. Значения сил  $T$  второго и последующих цилиндров в соответствующих ячейках таблицы получаются сдвигом силы  $T$  первого цилиндра на величину, определяемую порядком работы цилиндров и интервалами между вспышками. При построчном суммировании сил  $T$  всех цилиндров получаем  $T_{\Sigma}$ . Для определения суммарной средней тангенциальной силы  $T_{\Sigma ср}$  используется функция СРЗНАЧ – определения среднего значения.

### 3.2.4. Полярная диаграмма нагрузок на шатунную шейку

Кроме силы  $P_{ш}$  учитывается действие на шатунную шейку центробежной сила инерции  $S_2$ , которая определяется зависимостью

$$S_2 = -m_2 R \omega^2,$$

где  $m_2$  – часть массы шатуна, приведенная к оси шатунной шейки.

Величина силы  $S_2$  не зависит от угла поворота коленчатого вала. Сила  $S_2$  направлена по линии действия силы  $Z$  и результирующая этих сил

$$Z_1 = Z + S_2.$$

Полярная диаграмма сил, действующих на шатунную шейку (рис. 2) строится в координатах  $T-Z_1$ . Для оси силы  $Z_1$  задается обратный порядок, т.е. ось направляется сверху вниз. На диаграмме создаются одинаковые масштабы сил  $T$  и  $Z_1$ . При выполнении данного условия вектор, построенный от начала координат до одной из точек на диаграмме, соответствует величине результирующей силы

$$Q_{шш} = \sqrt{T^2 + Z_1^2}.$$

Развернутая диаграмма нагрузок на шатунную шейку  $Q_{шш}$  строится в функции угла поворота коленчатого вала. Для нахождения среднего значения  $Q_{шш}$  в Excel используется функция СРЗНАЧ.

### 3.2.5. Построение полярной диаграммы нагрузок на шатунный подшипник

Полярная диаграмма нагрузок (ПДН) на шатунный

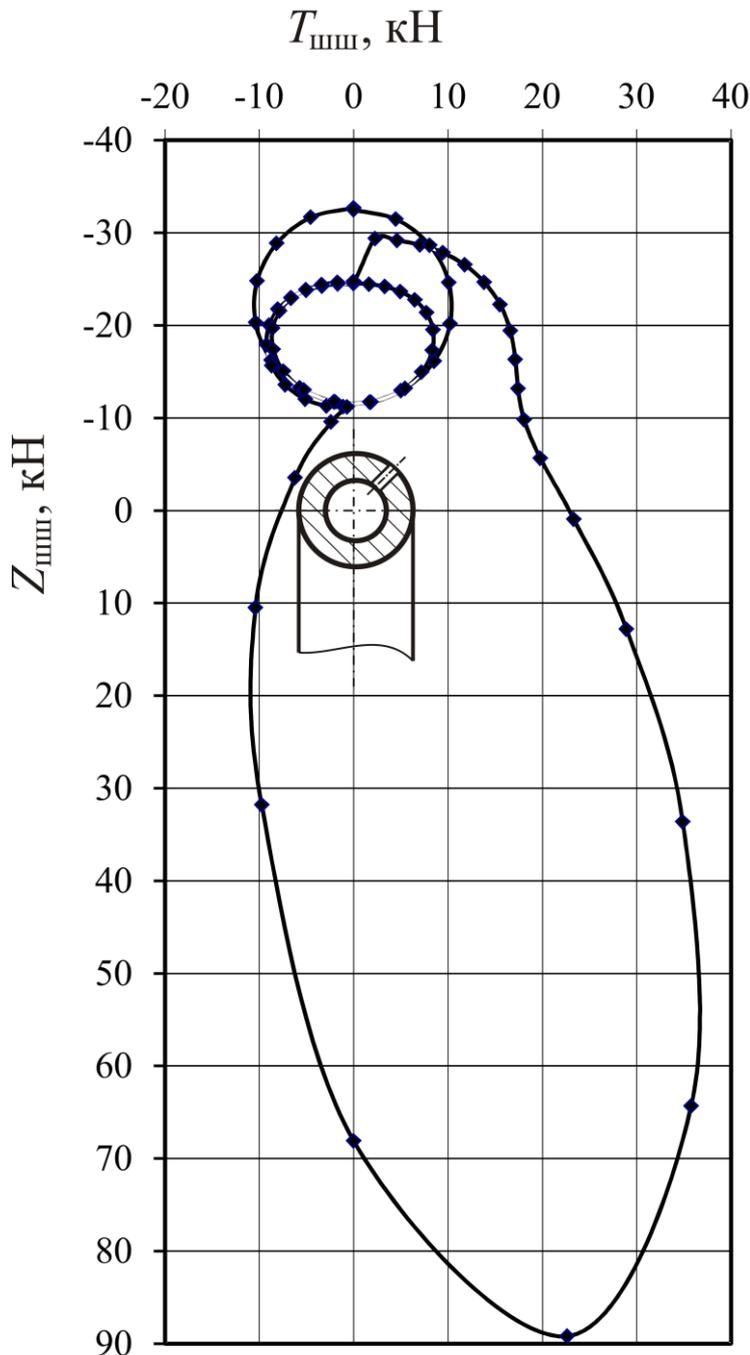


Рис. 2. Полярная диаграмма нагрузок на шатунную шейку

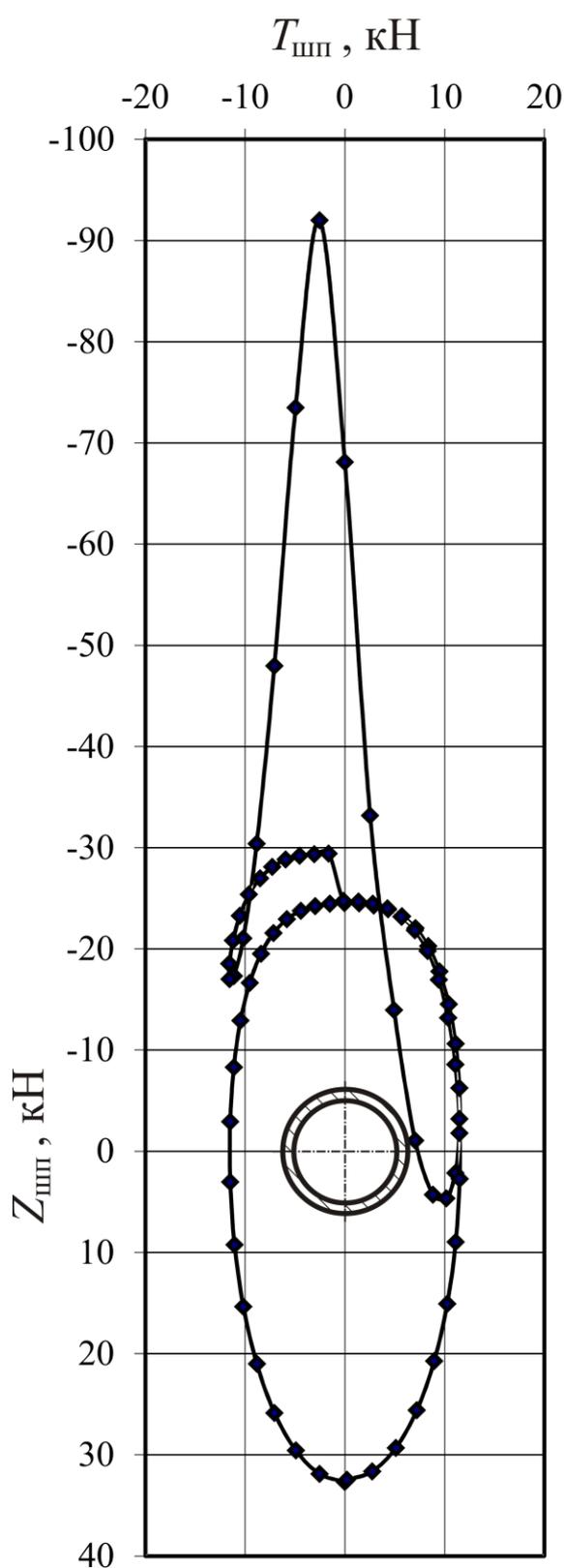


Рис. 3. Полярная диаграмма нагрузок на шатунный подшипник

подшипник строится на основе ПДН на шатунную шейку. В процессе построения кривошип полагают неподвижным, а шатун с подшипником поворачивается против часовой стрелки с угловым шагом  $(\varphi + \beta)$ . Полная технология «ручного» построения с использованием ватмана и прозрачной кальки подробно рассмотрена в учебной литературе [4, 5].

Алгоритм построения ПДН на шатунный подшипник в Microsoft Excel включает определение координат ПДН шатунного подшипника относительно координат ПДН шатунной шейки и вычисление координат точки (вектора силы) в подвижной плоскости через ее координаты в неподвижной плоскости. Построение ПДН на шатунный подшипник выполняется также в Microsoft Excel (рис. 3).

### 3.2.6. Построение диаграммы предполагаемого износа шатунной шейки

Построение предполагаемой диаграммы износа шатунной шейки включает следующие действия:

- из центра координат на ПДН шатунной шейки строим окружность произвольного радиуса, которую разбиваем лучами на равные части, например на 12 частей через 30 градусов;
- определяем угловой сектор ( $\pm 60^\circ$  от луча), в котором учитывается действие силы  $Q_{шши}$ ;
- составляем таблицу, у которой в столбцах лучей от 1 до 12 указываем значения  $Q_{шши}$  и суммируем эти силы отдельно для каждого из секторов;
- откладываем на исходной окружности полученные нагрузки в соответ-

ствии с масштабом, для каждой точки на дуге 120 градусов;

– диаграмму предполагаемого износа получаем путем суммирования нагрузок, откладывая отрезки их величин внутрь окружности и соединяя вершины отрезков кривой;

– в секторе с наименьшим износом размещаем отверстие для подвода масла.

### 3.2.7. Набегающие моменты на коренные шейки

Набегающие моменты вычисляются для всех коренных шеек. Определяется коренная шейка с максимальной амплитудой изменения набегающего момента. В курсе «Конструирование двигателей» полученные результаты могут быть использованы для расчета коренной шейки на кручение.

Результаты расчетов набегающих моментов на коренные шейки формируются в виде таблицы. Для каждой коренной шейки, кроме первой, строятся графики набегающих моментов.

### 3.2.8. Полярные диаграммы нагрузок на коренные шейки

Силы, действующие на коренные шейки коленчатого вала, определяются в зависимости от числа и расположения цилиндров, порядка работы цилиндров и кривошипной схемы коленчатого вала. Учитывается также наличие проти-

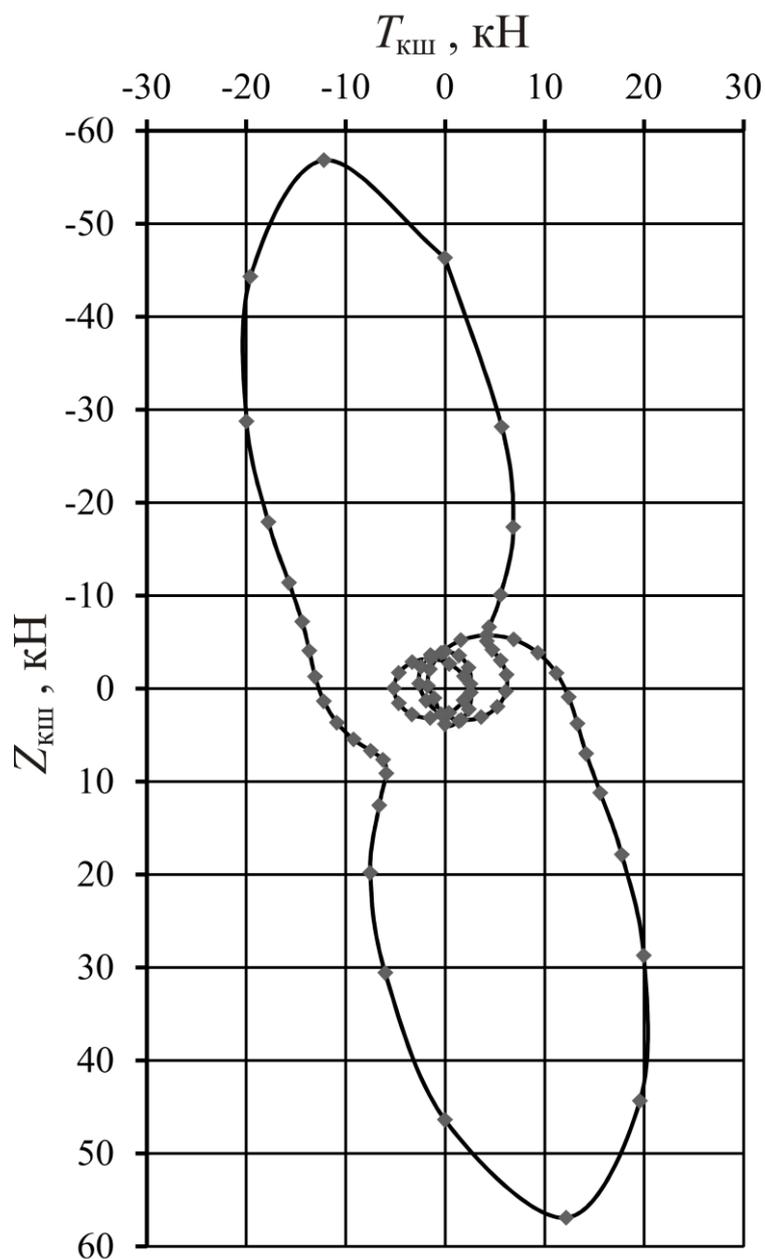


Рис. 4. Полярная диаграмма нагрузок на 4-ю коренную шейку

вовесов. Применительно к четырехцилиндровому рядному двигателю, рассматриваемому в качестве примера, на рис 4 приведена полярная диаграмма нагрузок на 4 коренную шейку.

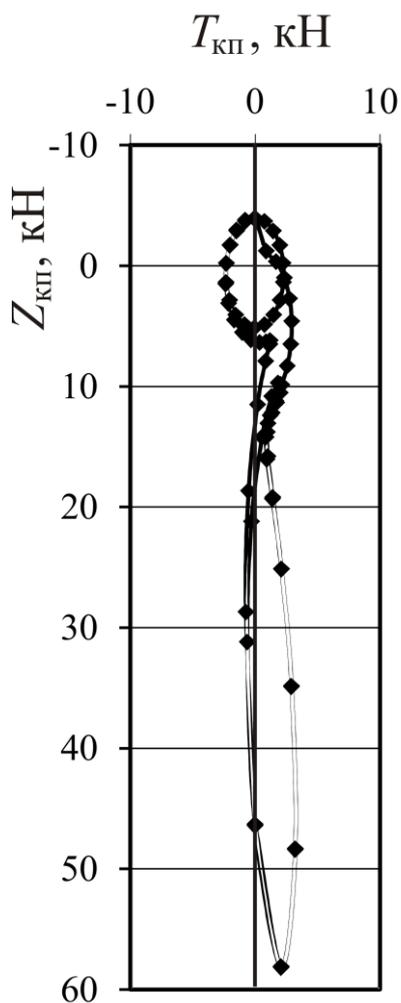


Рис. 5. Полярная диаграмма нагрузок на 4-й коренной подшипник

### 3.2.9. Полярные диаграммы нагрузок на коренные подшипники

Полярная диаграмма на коренной подшипник строится на основе ПДН на коренную шейку. В процессе построения коленчатый вал полагают неподвижным, а коренной подшипником с остовом двигателя поворачивается против часовой стрелки с угловым шагом  $\varphi$ .

Алгоритм процедуры построения ПДН на коренной подшипник в Microsoft Excel включает определение координат ПДН коренного подшипника относительно координат ПДН коренной шейки и вычисление координат точки (вектора силы) в подвижной плоскости через ее координаты в неподвижной плоскости. Диаграмма сил, действующих на коренной подшипник, приведена на рис. 5.

### 3.2.10. Уравновешивание двигателя

Двигатель считается полностью уравновешенным, если при установившемся режиме работы силы и моменты, действующие на его опоры, постоянны по величине и направлению. Поршневые двигатели не могут быть полностью уравновешенными, так как крутящий момент  $M_{кр}$  всегда является периодической функцией угла поворота коленчатого вала и величина опрокидывающего момента  $M_{опр}$  также переменна.

Для уравновешивания поршневого двигателя должны обеспечиваться условия:

- равенство нулю равнодействующей сил инерции первого порядка движущихся возвратно-поступательно масс,  $\sum P_{j1} = 0$ ;
- равенство нулю равнодействующей сил инерции второго порядка движущихся возвратно-поступательно масс,  $\sum P_{j2} = 0$ ;
- равенство нулю равнодействующей центробежных сил,  $\sum P_c = 0$ ;
- равенство нулю момента от сил инерции первого порядка,  $M_1 = 0$ ;

- равенство нулю момента от сил инерции второго порядка,  $M_2 = 0$ ;
- равенство нулю момента от центробежных сил,  $M_c = 0$ .

### 3.2.11. Суммарный крутящий момент двигателя

Крутящий момент, создаваемый силой  $T$  для одного цилиндра

$$M = TR, \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

Суммарный крутящий момент двигателя  $M_\Sigma = T_\Sigma R$ .

Среднее значение суммарного крутящего момента двигателя  $M_{\Sigma\text{ср}} = T_{\Sigma\text{ср}} R$ .

### 3.2.12. Расчет маховика

Маховик предназначен для обеспечения равномерности хода двигателя. Необходимый момент инерции всех вращающихся и поступательно движущихся масс двигателя определяется из уравнения

$$J_0 = \frac{L_{\text{изб}}}{\delta \cdot \omega_{\text{ср}}^2}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

где  $L_{\text{изб}}$  – избыточная работа крутящего момента;  $\delta$  – коэффициент неравномерности вращения коленчатого вала;  $\omega_{\text{ср}}$  – среднее значение угловой скорости вращения коленчатого вала.

Избыточная работа крутящего момента рассчитывается по формуле:

$$L_{\text{изб}} = F_{\text{abc}} \cdot M_M \cdot M_\varphi, \text{ Дж,}$$

где  $F_{\text{abc}}$  – площадь, формируемая кривой суммарного момента над прямой среднего крутящего момента,  $\text{мм}^2$ ;  $M_M$  – масштаб крутящего момента,  $\text{Нм}/\text{мм}$ ;  $M_\varphi$  – масштаб угла поворота коленчатого вала,  $\text{рад}/\text{мм}$ :

Момент инерции маховика  $J_M = 0,85J_0$ .

Выбираем средний диаметр маховика по величине хода поршня  $D_{\text{ср}} = (2...3)S$ .

Из уравнения момента инерции маховика  $J_M = \frac{m_M \cdot D_{\text{ср}}^2}{4}$  определяем массу ма-

ховика  $m_M = \frac{4 \cdot J_M}{D_{\text{ср}}^2}$ , кг.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Все перечисленные в методических указаниях вычисления к кинематическому и динамическому расчетам происходят автоматически после задания исходных данных в расчетный файл Excel. Автоматически формируются графические зависимости, заложенные в программу расчета.

Объем расчетных исследований для оценки влияния режимных и конструктивных параметров двигателя на уровень нагрузок в КШМ определяется студентом самостоятельно. Результаты исследований выносятся на последующее публичное обсуждение и защиту курсового проекта.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машков, О.Г. Тепловой расчет рабочего цикла поршневых тепловых машин (двигателей) / О.Г. Машков, Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков; Свидетельство № 2011614351 об официальной регистрации программы для ЭВМ; 2.06.2011, М.
2. Фарафонов, М.Ф. Автомобильные двигатели: учебное пособие для студентов-заочников / М.Ф. Фарафонов. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1990. – 70 с.
3. Шароглазов, Б.А. Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчет процессов: учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания» по специальности 140501 «Двигатели внутреннего сгорания» направления подготовки 140500 «Энергомашиностроение» / Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 524 с.
4. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для вузов по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» и др. / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – М.: Высшая школа, 2008. – 495 с.
5. Попык, К.Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей: учебник для ВУЗов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1970. – 328 с.
6. Бунов, В.М. Дипломное проектирование: метод. указания / В.М. Бунов, Е.В. Бунова. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2003. – 35 с.
7. Машков, О.Г. Кинематический и динамический расчет поршневых тепловых машин (двигателей) / О.Г. Машков, Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков; Свидетельство № 2012618001 об официальной регистрации программы для ЭВМ; 5.09.2012, М.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

Пример титульного листа пояснительной записки курсового проекта

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Факультет «Автотракторный»  
Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

Кинематический и динамический расчет дизеля 4ЧН15/20,5  
мощностью 136 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1250 мин<sup>-1</sup>

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

по дисциплине «Динамика двигателей»

ЮУрГУ–130303.2014.581.ПЗ КП

Нормоконтролер, доцент  
\_\_\_\_\_ В.В. Клементьев  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Руководитель, доцент  
\_\_\_\_\_ В.В. Шишков  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Автор проекта  
студент группы АТ-441  
\_\_\_\_\_ С.П. Иванов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Проект защищен с оценкой  
\_\_\_\_\_  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Челябинск 2014

Пример задания на курсовой проект

Министерство образования и науки Российской Федерации  
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
 высшего профессионального образования  
 «Южно-Уральский государственный университет»  
 (научно-исследовательский университет)

Факультет «Автотракторный»  
 Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

УТВЕРЖДАЮ  
 Заведующий кафедрой  
 \_\_\_\_\_ В.Е. Лазарев  
 \_\_\_\_\_ 2014 г.

**ЗАДАНИЕ**

на курсовой проект студента

Иванова Сергея Петровича

(Фамилия, Имя, Отчество полностью)

Группа АТ-441

- 1) Дисциплина «Динамика двигателей»
- 2) Тема проекта **Кинематический и динамический расчет дизеля 4ЧН15/20,5 мощностью 126 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1250 мин<sup>-1</sup>**
- 3) Срок сдачи студентом законченной работы – 30 декабря 2014 г.
- 4) Перечень вопросов, подлежащих разработке.
  1. Формирование исходных данных и выполнение теплового расчета двигателя на ЭВМ. Проверка соответствия результатов расчета условиям задания на курсовой проект.
  2. Формирование исходных данных для расчетного определения кинематических и динамических параметров ДВС с применением ЭВМ. Выполнение расчетов на ЭВМ.
  3. Расчетные кинематические зависимости с примерами расчетов.
  4. Графики к кинематическому расчету (перемещение, скорость (средняя скорость) и ускорение поршня в функции угла поворота коленчатого вала).
  5. Схема внешних и внутренних сил, действующих на двигатель в процессе его работы.
  6. Определение сил и моментов, действующих на двигатель. Сила давления газов. Силы инерции возвратно-поступательно движущихся и вращающихся масс КШМ. Определение суммарной силы, действующей вдоль оси цилиндра двигателя, силы действующей по оси шатуна и на шатунную шейку коленчатого вала. Примеры расчетов.
  7. Графики к динамическому расчету: сила давления газов  $P_f$ ; сила инерции возвратно-поступательно движущихся масс  $P_j$ ; суммарная сила  $P_\Sigma$ ; сила, действующая вдоль оси шатуна,  $P_{ш}$ ; нормальная сила  $N$ ; сила, действующая вдоль оси кривошипа,  $Z$ ; тангенциальная сила  $T$ ; суммарная тангенциальная сила  $T_\Sigma$ ; средняя суммарная тангенциальная сила  $T_{\Sigma ср}$  в функции угла поворота коленчатого вала; полярная диаграмма нагрузок (ПДН) на шатунную шейку; ПДН на шатунный подшипник; развернутая диаграмма нагрузок (РДН) на шатунную шейку; ПДН на коренную шейку; ПДН на коренной подшипник; диаграмма предполагаемого износа шейки коленчатого вала (шатунной или коренной)

8. Уравновешивание двигателя. Определение мероприятий, направленных на уменьшение общей степени неуравновешенности двигателя.

9. Расчет необходимой маховой массы по зависимости крутящего момента двигателя от угла поворота коленчатого вала.

10. Исследовательская часть проекта.

11. В приложении пояснительной записки приводятся: распечатки теплового, кинематического и динамического расчетов, расчетные таблицы по определению суммарной тангенциальной силы, набегающих крутящих моментов на коренные шейки коленчатого вала; таблицы сил, действующих на шатунную, коренную шейки и подшипники коленчатого вала (при табличном способе определения сил); таблицы для построения диаграммы предполагаемого износа (шатунной или коренной) шейки коленчатого вала (при табличном способе определения).

12. Графическая часть курсового проекта содержит 3 листа формата А1.

Лист 1: графики к кинематическому расчету (перемещение, скорость (средняя скорость) и ускорение поршня в функции угла поворота коленчатого вала); графики к динамическому расчету: а) сила давления газов  $P_T$ ; сила инерции возвратно-поступательно движущихся масс  $P_I$ ; суммарная сила  $P_{\Sigma}$ ; б) сила, действующая вдоль оси шатуна,  $P_{\text{ш}}$ ; нормальная сила  $N$ ; сила, действующая вдоль оси кривошипа,  $Z$ ; схема внешних и внутренних сил, действующих на двигатель в процессе его работы.

Лист 2: графики к динамическому расчету: а) тангенциальная сила  $T$ ; суммарная тангенциальная сила  $T_{\Sigma}$ ; средняя суммарная тангенциальная сила  $T_{\Sigma \text{ ср}}$  в функции угла поворота коленчатого вала; б) графики к определению избыточной работы крутящего момента; в) диаграмма предполагаемого износа шатунной (коренной) шейки; г) развернутая диаграмма нагрузок (РДН) на шатунную шейку.

Лист 3: графики к динамическому расчету: а) полярная диаграмма нагрузок (ПДН) на шатунную шейку; б) ПДН на шатунный подшипник; в) ПДН на коренную шейку; г) ПДН на коренной подшипник.

#### 5) Календарный план

Наименование (номер) разделов курсового проекта	Срок выполнения разделов проекта	Отметка о выполнении руководителя

Руководитель работы (проекта) \_\_\_\_\_ /В.В. Шишков/  
(подпись)

Студент \_\_\_\_\_ /С.П. Иванов/  
(подпись)

Пример аннотации

АННОТАЦИЯ

Иванов С.П. Кинематический и динамический расчет дизеля 4ЧН15/20,5 мощностью 136 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1250 мин<sup>-1</sup>. – Челябинск: ЮУрГУ, АТ-441, 25 с., 5 ил., 6 табл., библиогр. список – 5 наим., 2 прил., 3 л. плакатов ф. А1.

Курсовой проект выполнен с целью оценки уровня нагруженности деталей кривошипно-шатунного механизма (КШМ) дизеля 4ЧН15/20,5.

В проекте выполнен синтез рабочего цикла дизеля, а также кинематический и динамический расчет КШМ дизеля 4ЧН15/20,5 мощностью 136 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1250 мин<sup>-1</sup>.

Определены силы и моменты, действующие в кривошипно-шатунном механизме. Выполнено приведение масс. Рассмотрено уравнивание двигателя. Определены массовые и габаритные параметры маховика для обеспечения заданной неравномерности вращения коленчатого вала.

Рассмотрено влияние конструктивных параметров КШМ на изменение сил и моментов, действующих в двигателе.

					<i>ЮУрГУ –130303.2014.581 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Кинематический и динамический расчёт дизеля 4ЧН15/20,5 мощностью 136 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1250 мин<sup>-1</sup></i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>	<i>Иванов С.П.</i>					<i>к</i>	<i>3</i>	<i>25</i>
<i>Провер.</i>	<i>Шшиков В.В.</i>					<i>ЮУрГУ</i>		
<i>Н. контр.</i>						<i>Кафедра ДВС</i>		
<i>Утв.</i>								

Пример синтеза рабочего цикла

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1	ДАВЛЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	PO=	.1013	МПА
2	ДАВЛЕНИЕ ПЕРЕД ВПУСКНЫМИ КЛАПАНАМИ..	PK=	.1450	МПА
3	ТЕМПЕРАТУРА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	TO=	293.0000	ГРАД К
4	СТЕПЕНЬ СЖАТИЯ.....	E=	14.5000	
5	КОЭФФИЦИЕНТ НАПОЛНЕНИЯ.....	MV=	.8500	
6	ДАВЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ.....	PR=	.1400	МПА
7	ТЕМПЕРАТУРА ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ.....	TR=	900.0000	ГРАД К
8	ПОДОГРЕВ СВЕЖЕГО ЗАРЯДА.....	DLT=	10.0000	ГРАД К
9	МАССОВАЯ ДОЛЯ УГЛЕРОДА В ТОПЛИВЕ.....	C=	.8600	
10	МАССОВАЯ ДОЛЯ ВОДОРОДА В ТОПЛИВЕ.....	H=	.1300	
11	МАССОВАЯ ДОЛЯ КИСЛОРОДА В ТОПЛИВЕ....	O=	.0100	
12	КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА.....	ALB=	1.7000	
13	ОТН. РАД. КРИВОШ. К ДЛ. ШАТУНА..	LAMBDA=	.2700	
14	ПОКАЗАТЕЛЬ ПОЛИТРОПЫ СЖАТИЯ.....	N1=	1.3300	
15	НИЗШАЯ ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА.....	HU=	42.5000	МДЖ/КГ
16	ПОКАЗАТЕЛЬ ХАРАКТЕРА СГОРАНИЯ.....	M=	.2000	
17	ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СГОРАНИЯ.....	FIZ=	110.0000	ГРАД ПКВ
18	ПОКАЗАТЕЛЬ ПОЛИТРОПЫ РАСШИРЕНИЯ....	N2=	1.4000	
19	КОЭФФИЦИЕНТ ЭФФЕКТИВНОСТИ СГОРАНИЯ..	KS=	.8600	
20	ПОНИЖ. ТЕМП. В ОХЛ. НАДД. ВОЗД..	DLTOXL=	.0000	ГРАД К
21	ПОКАЗАТЕЛЬ ПОЛИТРОПЫ СЖАТ. В КОМПР..	NH=	1.6000	
22	УГОЛ ОПЕРЕЖЕНИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ.....	Q=	5.0000	ГРАД ПКВ
23	ШАГ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ.....	DFI=	5.0000	ГРАД ПКВ
24	ШАГ РАСЧЕТА ПРОЦ.СЖАТ. И РАСШ.....	DAL=	5.0000	ГРАД ПКВ

\*\*\*\*\*

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ВПУСКА ДВИГАТЕЛЬ С НАДДУВОМ

ДАВЛЕНИЕ В НАЧАЛЕ СЖАТИЯ.....	PA=	.1278	МПА
ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХ. КОЛ-ВО ВОЗД..	LO1=	14.3247	КГ/КГ
	LO=	.4945	КМОЛЬ/КГ
КОЭФФ. ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ.....	GM=	.0313	
ТЕМПЕР. ВОЗД. ПОСЛЕ КОМПРЕССОРА..	TK1=	335.1792	ГРАД К
ТЕМПЕР. ВОЗД. ПОСЛЕ ОХЛАЖДЕНИЯ....	TK=	335.1792	ГРАД К
ТЕМПЕР. ВОЗД. В НАЧАЛЕ СЖАТИЯ.....	TA=	362.0368	ГРАД К
УДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ В НАЧАЛЕ СЖАТИЯ....	VA=	.8134	МЗ/КГ
ХИМИЧЕСКИЙ КОЭФФ. МОЛЕКУЛ. ИЗМ.ВО	MAKS=	1.0390	
ОБЩАЯ УДЕЛЬН. ИСПОЛЬЗ. ТЕПЛ. СГОР..	QZ=	1.4553	МДЖ/КГ
ДЕЙСТВ. КОЭФФ. МОЛЕКУЛЯРН. ИЗМ..	MAKS=	1.0378	

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА СЖАТИЯ

УГОЛ АЛЬФА	ОБЪЕМ	ДАВЛ.СЖАТ.	ТЕМП. СЖАТ.
180.0	.813	.128	362.0
185.0	.812	.128	362.2
190.0	.809	.129	362.7
195.0	.804	.130	363.4
200.0	.797	.131	364.5

Продолжение приложения 4

205.0	.787	.134	366.0
210.0	.775	.136	367.8
215.0	.762	.139	369.9
220.0	.746	.143	372.5
225.0	.728	.148	375.5
230.0	.708	.154	378.9
235.0	.687	.160	382.8
240.0	.663	.168	387.3
245.0	.637	.177	392.4
250.0	.610	.187	398.1
255.0	.581	.200	404.5
260.0	.551	.215	411.7
265.0	.519	.232	419.8
270.0	.487	.253	428.9
275.0	.453	.278	439.0
280.0	.419	.308	450.5
285.0	.385	.345	463.3
290.0	.351	.391	477.7
295.0	.317	.447	493.9
300.0	.284	.517	512.2
305.0	.252	.606	532.8
310.0	.222	.720	556.0
315.0	.193	.867	582.2
320.0	.166	1.059	611.7
325.0	.141	1.309	644.8
330.0	.120	1.636	681.4
335.0	.101	2.056	721.3
340.0	.085	2.581	763.1
345.0	.072	3.189	804.2
350.0	.063	3.808	840.4
355.0	.058	4.293	865.8
355.0	.058	4.293	865.8

-----  
 УДЕЛЬНАЯ РАБОТА СЖАТИЯ LAУ= - .4384 МДЖ/КГ

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ

УГОЛ АЛЬФА	ОБЪЕМ	ДАВЛЕН	ТЕМПЕР	УГОЛ ФИ	ВЫГОР ТОПЛ	СКОР СГОР	КОЭФ МОЛ.ИЗМ	ОТНОШ ТЕПЛОЕМ
355.0	.058	4.293	865.8	.0	.000	.000	1.000	
360.0	.056	5.834	1136.3	5.0	.156	3.772	1.006	1.334
365.0	.058	6.898	1378.9	10.0	.322	3.479	1.012	1.314
370.0	.063	7.134	1551.4	15.0	.469	2.957	1.018	1.301
375.0	.072	6.708	1658.4	20.0	.591	2.413	1.022	1.293
380.0	.085	5.937	1714.0	25.0	.689	1.918	1.026	1.287
385.0	.101	5.077	1733.0	30.0	.766	1.495	1.029	1.284
390.0	.120	4.270	1727.2	35.0	.826	1.148	1.031	1.282
395.0	.141	3.573	1705.7	40.0	.872	.870	1.033	1.281
400.0	.166	2.995	1674.5	45.0	.906	.652	1.034	1.280
405.0	.193	2.525	1638.0	50.0	.932	.485	1.035	1.281
410.0	.222	2.145	1599.1	55.0	.951	.357	1.036	1.281
415.0	.252	1.840	1559.5	60.0	.964	.261	1.036	1.282
420.0	.284	1.593	1520.7	65.0	.975	.189	1.037	1.283

425.0	.317	1.392	1483.4	70.0	.982	.136	1.037	1.284
430.0	.351	1.229	1448.1	75.0	.987	.098	1.037	1.285
435.0	.385	1.094	1415.1	80.0	.991	.070	1.038	1.286
440.0	.419	.983	1384.4	85.0	.994	.049	1.038	1.287
445.0	.453	.891	1356.2	90.0	.996	.035	1.038	1.288
450.0	.487	.814	1330.4	95.0	.997	.025	1.038	1.289
455.0	.519	.750	1306.8	100.0	.998	.017	1.038	1.290
460.0	.551	.695	1285.4	105.0	.999	.012	1.038	1.291
465.0	.581	.649	1266.1	110.0	.999	.008	1.038	1.292

-----  
 УДЕЛЬНАЯ РАБОТА СГОРАНИЯ LYZ= 1.0789 МДЖ/КГ

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА РАСШИРЕНИЯ

УГОЛ АЛЬФА	ОБЪЕМ	ДАВЛ. РАСШ.	ТЕМП. РАСШ.
465.0	.581	.649	1266.1
470.0	.610	.607	1241.8
475.0	.637	.571	1220.2
480.0	.663	.540	1201.2
485.0	.687	.514	1184.4
490.0	.708	.492	1169.7
495.0	.728	.473	1156.9
500.0	.746	.458	1145.8
505.0	.762	.445	1136.2
510.0	.775	.434	1128.2
515.0	.787	.425	1121.5
520.0	.797	.418	1116.2
525.0	.804	.412	1112.0
530.0	.809	.409	1109.2
535.0	.812	.406	1107.4
540.0	.813	.406	1106.9

-----  
 ДАВЛЕНИЕ КОНЦА РАСШИРЕНИЯ.....PV= .4056 МПА  
 ТЕМПЕРАТУРА КОНЦА РАСШИРЕНИЯ.....ТВ=1106.8510 ГРАД К  
 УДЕЛЬНАЯ РАБОТА РАСШИРЕНИЯ.....LZV= .1186 МДЖ/КГ

ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОЧЕГО ЦИКЛА

УДЕЛЬНАЯ РАБОТА ЦИКЛА.....LI= .7592 МДЖ/КГ  
 ИНДИКАТОРНЫЙ К П Д.....KPDIN= .4486  
 СРЕДНЕЕ ИНДИКАТОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ.....PI= 1.0025 МПА  
 ИНДИКАТОРН. УДЕЛЬНЫЙ РАСХ. ТОПЛ..GI= 188.8110 Г/КВТ\*Ч

Пример кинематического и динамического расчета КШМ

Расчет кривошипно-шатунного механизма  
двигателя внутреннего сгорания

Исходные данные

- 1 Радиус кривошипа, м.....R= .1025
- 2 Отношение R/L.....lam= .2670
- 3 Обороты коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>.....n=1250.0
- 4 Масса движущихся частей, кг.....m= 9.7200
- 5 Давление в конце впуска, МПа.....Pa= .1278
- 6 Давление выпуска, МПа.....Pr= .1400
- 7 Площадь поршня, м<sup>2</sup>.....Fp= .0176
- 8 Атмосферное давление, МПа.....P0= .1013

Массив давлений для углов 190...530

.1290	.1310	.1360	.1430	.1540	.1680	.1870
.2150	.2530	.3080	.3910	.5170	.7200	1.0590
1.6360	2.5810	3.8080	5.8340	7.1340	5.9370	4.2700
2.9950	2.1450	1.5930	1.2290	.9830	.8140	.6950
.6070	.5400	.4920	.4580	.4340	.4180	.4090

Кинематический расчет

a, grad	S, м	V, м/с	J, м/с <sup>2</sup>
.0	.0000	.000	2225.11
10.0	.0020	2.942	2170.16
20.0	.0078	5.740	2009.51
30.0	.0172	8.259	1755.40
40.0	.0296	10.388	1426.80
50.0	.0446	12.042	1047.50
60.0	.0615	13.170	643.72
70.0	.0795	13.759	241.54
80.0	.0980	13.826	-135.58
90.0	.1162	13.417	-468.83
100.0	.1336	12.601	-745.52
110.0	.1496	11.457	-959.80
120.0	.1640	10.069	-1112.51
130.0	.1764	8.515	-1210.26
140.0	.1867	6.861	-1263.89
150.0	.1947	5.158	-1286.46
160.0	.2004	3.438	-1291.09
170.0	.2039	1.718	-1288.90
180.0	.2050	.001	-1287.30
190.0	.2039	-1.716	-1288.90
200.0	.2004	-3.436	-1291.09
210.0	.1947	-5.156	-1286.47
220.0	.1867	-6.859	-1263.93
230.0	.1764	-8.513	-1210.34
240.0	.1640	-10.067	-1112.64
250.0	.1497	-11.455	-960.00
260.0	.1336	-12.600	-745.78

270.0	.1162	-13.416	-469.15
280.0	.0980	-13.825	-135.96
290.0	.0795	-13.759	241.12
300.0	.0615	-13.171	643.29
310.0	.0447	-12.043	1047.08
320.0	.0296	-10.390	1426.42
330.0	.0172	-8.262	1755.09
340.0	.0078	-5.743	2009.29
350.0	.0020	-2.945	2170.04
360.0	.0000	-.003	2225.11

## Динамический расчет

grad	Pg, кН	Pj, кН	Pe, кН	N, кН	Ph, кН	Z, кН	T, кН
.0	.466	-21.628	-21.162	.000	-21.162	-21.162	.000
10.0	.466	-21.094	-20.628	-.957	-20.650	-20.148	-4.525
20.0	.466	-19.532	-19.066	-1.748	-19.146	-17.318	-8.164
30.0	.466	-17.062	-16.596	-2.236	-16.746	-13.255	-10.234
40.0	.466	-13.868	-13.402	-2.335	-13.604	-8.766	-10.403
50.0	.466	-10.182	-9.715	-2.030	-9.925	-4.690	-8.747
60.0	.466	-6.257	-5.791	-1.376	-5.952	-1.704	-5.703
70.0	.466	-2.348	-1.881	-.488	-1.943	-.185	-1.935
80.0	.466	1.318	1.784	.486	1.849	-.169	1.842
90.0	.466	4.557	5.023	1.392	5.213	-1.392	5.023
100.0	.466	7.246	7.713	2.102	7.994	-3.409	7.231
110.0	.466	9.329	9.796	2.539	10.119	-5.736	8.337
120.0	.466	10.814	11.280	2.681	11.594	-7.961	8.429
130.0	.466	11.764	12.230	2.556	12.494	-9.819	7.727
140.0	.466	12.285	12.751	2.222	12.944	-11.196	6.495
150.0	.466	12.504	12.971	1.747	13.088	-12.106	4.973
160.0	.466	12.549	13.016	1.194	13.070	-12.639	3.331
170.0	.466	12.528	12.994	.603	13.008	-12.902	1.663
180.0	.466	12.513	12.979	.000	12.979	-12.979	.001
190.0	.488	12.528	13.016	-.604	13.030	-12.923	-1.664
200.0	.523	12.549	13.072	-1.198	13.127	-12.694	-3.343
210.0	.611	12.505	13.115	-1.766	13.234	-12.242	-5.027
220.0	.734	12.285	13.019	-2.268	13.215	-11.432	-6.630
230.0	.928	11.765	12.692	-2.652	12.966	-10.191	-8.017
240.0	1.174	10.815	11.989	-2.849	12.323	-8.463	-8.957
250.0	1.508	9.331	10.839	-2.809	11.198	-6.348	-9.224
260.0	2.001	7.249	9.250	-2.521	9.587	-4.090	-8.671
270.0	2.670	4.560	7.230	-2.003	7.502	-2.004	-7.230
280.0	3.638	1.322	4.959	-1.352	5.140	-.471	-5.119
290.0	5.099	-2.344	2.755	-.714	2.846	.271	-2.833
300.0	7.316	-6.253	1.064	-.253	1.093	.313	-1.048
310.0	10.889	-10.178	.711	-.149	.727	.343	-.641
320.0	16.856	-13.865	2.991	-.521	3.036	1.956	-2.322
330.0	27.011	-17.059	9.951	-1.341	10.041	7.947	-6.138
340.0	43.643	-19.530	24.112	-2.212	24.214	21.900	-10.330
350.0	65.238	-21.093	44.145	-2.051	44.193	43.117	-9.693
360.0	100.896	-21.628	79.267	-.004	79.267	79.267	-.019
370.0	123.776	-21.095	102.680	4.761	102.791	100.298	22.499

## Окончание приложения 5

380.0	102.708	-19.535	83.174	7.623	83.522	75.557	35.596
390.0	73.369	-17.066	56.304	7.582	56.812	44.976	34.709
400.0	50.929	-13.872	37.057	6.454	37.615	24.245	28.759
410.0	35.969	-10.186	25.783	5.386	26.340	12.452	23.211
420.0	26.254	-6.261	19.993	4.751	20.550	5.886	19.688
430.0	19.848	-2.352	17.496	4.534	18.074	1.727	17.991
440.0	15.518	1.314	16.832	4.587	17.446	-1.591	17.373
450.0	12.544	4.554	17.097	4.737	17.741	-4.733	17.098
460.0	10.449	7.244	17.693	4.822	18.338	-7.817	16.589
470.0	8.900	9.327	18.228	4.725	18.830	-10.670	15.515
480.0	7.721	10.812	18.533	4.406	19.050	-13.079	13.851
490.0	6.876	11.763	18.639	3.896	19.042	-14.962	11.778
500.0	6.278	12.285	18.563	3.235	18.842	-16.297	9.458
510.0	5.856	12.504	18.360	2.474	18.526	-17.135	7.042
520.0	5.574	12.549	18.123	1.663	18.199	-17.598	4.640
530.0	5.416	12.528	17.944	.834	17.963	-17.815	2.299
540.0	.681	12.513	13.194	.001	13.194	-13.194	.003
550.0	.681	12.528	13.209	-.612	13.223	-13.115	-1.687
560.0	.681	12.549	13.231	-1.212	13.286	-12.848	-3.382
570.0	.681	12.505	13.186	-1.775	13.305	-12.308	-5.052
580.0	.681	12.286	12.967	-2.258	13.162	-11.387	-6.602
590.0	.681	11.765	12.446	-2.600	12.715	-9.994	-7.860
600.0	.681	10.816	11.497	-2.732	11.817	-8.117	-8.588
610.0	.681	9.333	10.014	-2.595	10.345	-5.866	-8.521
620.0	.681	7.252	7.933	-2.162	8.222	-3.509	-7.436
630.0	.681	4.563	5.244	-1.453	5.442	-1.455	-5.244
640.0	.681	1.325	2.006	-.547	2.080	-.191	-2.071
650.0	.681	-2.340	-1.658	.430	-1.713	-.163	1.706
660.0	.681	-6.249	-5.567	1.323	-5.723	-1.636	5.484
670.0	.681	-10.174	-9.492	1.984	-9.698	-4.579	8.549
680.0	.681	-13.861	-13.180	2.297	-13.379	-8.616	10.235
690.0	.681	-17.056	-16.375	2.207	-16.523	-13.074	10.104
700.0	.681	-19.528	-18.847	1.730	-18.926	-17.116	8.078
710.0	.681	-21.092	-20.411	.949	-20.433	-19.934	4.486
720.0	.681	-21.628	-20.947	.002	-20.947	-20.947	.010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩАЯ ЧАСТЬ.....	4
2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВИГАТЕЛЯ.....	5
3. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КРИВОШИП- НО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА.....	6
3.1. Формирование исходных данных .....	6
3.2. Рекомендации к формированию расчетного блока .....	7
3.2.1. Кинематический расчет.....	7
3.2.2. Динамический расчет.....	8
3.2.3. Суммарная тангенциальная сила.....	9
3.2.4. Полярная диаграмма нагрузок на шатунную шейку.....	10
3.2.5. Построение полярной диаграммы нагрузок на шатунный подшипник.....	10
3.2.6. Построение диаграммы предполагаемого износа шатунной шейки.....	11
3.2.7. Набегающие моменты на коренные шейки.....	12
3.2.8. Полярные диаграммы нагрузок на коренные шейки.....	12
3.2.9. Полярные диаграммы нагрузок на коренные подшипники...	13
3.2.10. Уравновешивание двигателя.....	13
3.2.11. Суммарный крутящий момент двигателя.....	14
3.2.12. Расчет маховика.....	14
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	15
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	16
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	17