

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет)
Институт «Политехнический»
Факультет «Автотранспортный»
Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания и электронные системы
автомобилей»

Допустить к защите
Заведующий кафедрой
Лазарев В.Е.
_____ 2019г.

Разработка программного модуля определения механических потерь в
двигателях внутреннего сгорания

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-13.03.03.2019.135 ПЗ ВКР

Руководитель проекта:
Мацулевич М.А.
_____ (должность)
_____ 2019 г.

Автор работы:
Сунагатулин Э.Р.
Студент группы П-408
_____ 2019 г.

Нормоконтролёр:
Клементьев В.В (Ф.И.О)
_____ (должность)
_____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

Сунагатулин Э.Р. Двигатель внутреннего сгорания ВАЗ 21124-100026080. – Челябинск: ЮУрГУ, 2019, 139 с. Библиография литературы – 8 наименований.

В данной работе рассчитан четырехцилиндровый бензиновый двигатель без наддува. Проведены тепловой (процессы впуска, сжатия, сгорания и расширения, индикаторные и эффективные показатели) и динамический (определены силы, действующие в кривошипно-шатунном механизме и нагрузки, действующие на шатунную шейку, рассчитан маховик) расчеты. Определена внешняя скоростная характеристика. Так же рассчитаны на прочность детали КШМ, расчет на прочность деталей механизма газораспределения, корпусных и расчет систем автомобиля.

Разработан программный модуль для определения механических потерь в узлах связи.

					13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
Разраб.	Сунагатулин				<i>Разработка программного модуля определения механических потерь в двигателях внутреннего сгорания.</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
Провер.	Мацулевич							
Реценз.								
Н. Контр.	Клементьев					<i>ЮУрГУ Кафедра ЛВСиЭСс</i>		
Утверд.	Лазарев							

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	5
ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ ДВИГАТЕЛЯ.....	8
1.1 Исходные данные для теплового расчета.....	8
1.2 Обоснование выбора исходных данных	9
1.3 Расчет процесса впуска.....	12
1.4 Расчет процесса сжатия	14
1.5 Расчет процесса сгорания.....	16
1.6 Расчет процесса расширения	21
1.7 Определение индикаторных показателей цикла.....	24
1.8 Определение эффективных показателей двигателя, диаметра цилиндра и хода поршня	25
ВНЕШНЯЯ СКОРОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА.	28
КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ	32
3.1 Расчет на ЭВМ.....	32
ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ.....	39
4.1 Определение сил, действующих в кривошипно-шатунном механизме .	39
4.2 Проверка мощности и определение суммарного набегающего момента на шатунную шейку.....	43
4.3 Определение нагрузок на шатунную шейку	45
4.4 Определение суммарного набегающего момента на коренную шейку.	54
4.5 Расчет нагрузок на коренные подшипники приведен в ПРИЛОЖЕНИИ Г-Г. Построение полярных диаграмм :.....	57
4.6 Расчет нагрузок на коренные шейки приведен в ПРИЛОЖЕНИИ Д- Д. Построение полярных диаграмм нагрузок.	63
РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ КШМ	68
5.1 Расчет поршневой группы.....	68
5.1.1 Расчет поршня	68
5.1.2 Расчет поршневого кольца.	71
5.1.3 Расчет поршневого пальца.	72
5.2 Расчет шатунной группы.....	74
5.2.1 Расчет поршневой головки шатуна.	74

5.2.2 Расчет кривошипной головки шатуна.....	77
5.2.3 Расчет стержня шатуна.....	78
5.2.4 Расчет шатунного болта.....	79
5.3 Расчет коленчатого вала.....	80
5.3.1 Расчет коренной шейки.....	81
5.3.2 Расчет шатунной шейки.....	82
5.3.3 Расчет щеки.....	84
РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНИЗМА	
ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ.....	86
6.1 Профилирование кулачка.....	86
6.2 Расчет пружины толкателя.....	92
6.3 Расчет распределительного вала.....	95
РАСЧЕТ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ.....	
7.1 Расчет гильзы цилиндра.....	96
7.2 Расчет шпильки головки блока двигателя.....	97
СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	
8.1 Расчет системы подачи топлива.....	99
8.2 Расчет масляного насоса.....	99
8.3 Расчет подшипников.....	101
8.4 Расчет жидкостного насоса.....	101
8.5 Расчет жидкостного радиатора.....	103
8.6 Расчет вентилятора.....	103
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ.....	
Уточненная модель расчета механических потерь в ДВС.....	105
Трение коленчатого вала.....	107
Оценка потерь в цилиндропоршневой группе.....	107
Прогнозирование потерь в клапанном механизме.....	108
Прогноз потерь на привод вспомогательных агрегатов.....	110
Уравнение механических потерь на совершение газообмена.....	110
ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В	
ДВС.....	111
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	119

ПРИЛОЖЕНИЕ А-А.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б-Б:.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ В-В:.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Г-Г:.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Д-Д:.....	137

					<i>13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		7

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ ДВИГАТЕЛЯ

Тепловой расчет двигателя выполняется с целью предварительного определения индикаторных показателей рабочего цикла, эффективных показателей проектируемого двигателя, диаметра цилиндра и хода поршня. Расчетным режимом является режим номинальной мощности.

1.1 Исходные данные для теплового расчета

Тип двигателя – бензиновый, ВАЗ-21124;

Мощность $N_e = 65 \text{ кВт}$;

Число цилиндров $i = 4$;

Диаметр цилиндра/ход поршня – 8,2/7,56 см;

Максимальная частота вращения коленчатого вала $n_{max} = 5600 \text{ мин}^{-1}$;

Степень сжатия – 10,3.

Помимо основных параметров проектируемого двигателя, указанных в задании, необходимо задаться рядом других исходных данных, используемых в методике теплового расчета.

- 1 Давление окружающей среды (для нормальных условий) $p_o = 0,1013 \text{ МПа}$;
- 2 Давление перед впускными клапанами $p_k = 0,1013 \text{ МПа}$;
- 3 Температура окружающей среды (нормальные условия) $T_o = 293 \text{ К}$;
- 4 Степень сжатия $\varepsilon = 10,3$;
- 5 Коэффициент наполнения $\eta_v = 0,825$;
- 6 Давление остаточных газов $p_r = (0,1,05 \dots 0,1,1)p_r$ (выбираем $p_r = 0,1090 \text{ МПа}$);

					<i>13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

- 7 Температура остаточных газов $T_r = 1000K$;
- 8 Подогрев свежего заряда $\Delta T = 10K$;
- 9 Массовая доля углерода в топливе $C = 0,870$;
- 10 Массовая доля водорода в топливе $H = 0,126$;
- 11 Массовая доля кислорода в топливе $O = 0,004$;
- 12 Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 0,95$;
- 13 Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна $\lambda = 0,31$;
- 14 Показатель политропы сжатия $n_1 = 1,39$
- 15 Низшая теплота сгорания топлива $H_U = 44 \text{ МДж/кг}$;
- 16 Показатель характерасгорания $m = 3,0$;
- 17 Продолжительность сгорания $\varphi_z = 50^\circ \text{ПКВ}$;
- 18 Показатель политропы расширения $n_2 = 1,35$;
- 19 Коэффициент эффективности сгорания (при $\alpha > 1$) $\xi = 0,7091$;
- 20 Понижение температуры в ОНВ $\Delta T_{\text{ОХЛ}} = 0K$;
- 21 Показатель политропы сжатия в компрессоре $n_H = 1$;
- 22 Угол опережения воспламенения (по прототипу) $\theta = 25^\circ \text{ПКВ}$;
- 23 Шаг расчета процесса сгорания $D_{FI} = 2,5^\circ \text{ПКВ}$;
- 24 Шаг расчета процесса сжатия и расширения $D_{AL} = 5^\circ \text{ПКВ}$.

1.2 Обоснование выбора исходных данных

Давление окружающей среды выбираем для нормальных атмосферных условий, равное $p_o = 0,1013 \text{ МПа}$.

Давление перед впускными клапанами соответствует давлению окружающей среды $p_o = p_k = 0,1013 \text{ МПа}$, поскольку рассчитываемый двигатель не снабжен наддувом.

Температуру окружающей среды принимаем для нормальных атмосферных условий, равная $T_o = 293 \text{ К}$.

Коэффициент наполнения η_v - отношение действительного количества свежего заряда, поступившего в цилиндры двигателя, к тому его количеству,

					<i>13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

которое могло бы поместиться в рабочем объеме при давлении и температуре заряда перед впускными органами. Полученное значение $\eta_v = 0,825$. Для современных бензиновых двигателей коэффициент наполнения на номинальном режиме равен $\eta_v = 0,75...0,94$. Коэффициент наполнения η_v зависит от тактности двигателя, его быстроходности и совершенства системы газораспределения.

Давление остаточных газов для четырехтактного бензинового двигателя без наддува находятся в диапазоне $P_r = (1,05...1,1)P_k$. Выбираем $p_r = 0,1090$ МПа. Давление остаточных газов устанавливается в зависимости от числа и расположения клапанов, сопротивлений впускного и выпускного трактов, фаз газораспределения, быстроходности двигателя, нагрузки, системы охлаждения и других факторов.

Температура остаточных газов устанавливается в зависимости от типа двигателя, степени сжатия, частоты вращения и коэффициента избытка воздуха $T_r = 900...1100^\circ K$. При увеличении степени сжатия и обогащении рабочей смеси температура остаточных газов снижается, а при увеличении частоты вращения – возрастает. В соответствии с нашими параметрами двигателя, а именно степени сжатия, частоты вращения и коэффициента избытка воздуха принимаем $T_r = 1000$ К.

Подогрев свежего заряда для четырехтактных двигателей находится в диапазоне $\Delta T = 10...40$ К. Для рассчитываемого двигателя, опираясь на расположение и конструкцию впускного трубопровода, быстроходности двигателя, отсутствие специального устройства для подогрева и наддува, принимаем $\Delta T = 10$ К.

Средний элементарный химический состав топлива в весовых долях для бензинов $C = 0,870$; $H = 0,126$; $O = 0,004$. При этом $C + H + O = 1$.

Коэффициент избытка воздуха – отношение количества воздуха, фактически поступившего в цилиндр, к теоретически необходимому для полного сгорания 1 кг топлива. У бензиновых ДВС с впрыском топлива и

наличием нейтрализатора коэффициент избытка воздуха равен $\alpha \approx 1,0$, так как именно при таком составе рабочей смеси обеспечиваются наилучшие условия для работы нейтрализатора.

Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна в целях уменьшения высоты двигателя принимаем значение $\lambda = 0,31$.

Показатель политропы сжатия устанавливается по опытным данным в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя, степени сжатия, размеров цилиндра, материала поршня и цилиндра, теплообмена и других факторов. Величину показателя политропы сжатия можно оценить по среднему показателю адиабаты κ_1 . Условно принимая $\kappa_1 = n_1$ по монограмме [2, стр.72] определяем показатель адиабаты в зависимости от температуры рабочего тела в конце впуска T_a (формула 8) и степени сжатия. Найденное значение $\kappa_1 = n_1 = 1,39$.

Низшая теплота сгорания топлива определенная по формуле Менделеева [3, стр.49] для бензина $H_U = 44 \text{ МДж/кг}$.

Показатель характера сгорания определяет относительный угол φ_m / φ_Z , при котором отвлеченная скорость сгорания имеет максимум. В двигателях с распределенной системой впрыска $m=3 \dots 4$. Примем $m=3,0$.

Продолжительность сгорания на номинальном режиме работы $\varphi_Z=45 \dots 55$ град ПКВ. $\varphi_Z=50$ град. ПКВ.

Показатель политропы расширения незначительно отличается от показателя адиабаты κ_2 , но при предварительных расчетах новых двигателей величину n_2 можно сопоставить с κ_2 . Величину κ_2 определим из номограммы [2, стр.83], зная температуру конца сгорания и коэффициент избытка воздуха. Получим $n_2 = 1,35$.

Понижение температуры в ОНВ по причине отсутствия специальных устройств охлаждения воздуха и наддува принимаем $\Delta T_{охл} = 0 \text{ }^\circ\text{K}$.

Показатель политропы сжатия в компрессоре для рассчитываемого двигателя, с учетом отсутствия наддува, принимаем $n_n = 1$.

Угол опережения воспламенения:

$$\theta = \kappa_\theta \theta', \quad (1.1)$$

					<i>13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

где θ - оптимальный угол опережения воспламенения, определенный в зависимости от φ_z и m по номограмме [1, стр.23] или по формуле 2:

$$\theta' = 0,25(0,35 + m)^{0,587} \varphi_z \quad (1.2)$$

K_θ эмпирический коэффициент, для карбюраторных двигателей $K_\theta = 1$.

В результате расчета получим $\theta = 25$ град.

Шаг расчета процесса сгорания и шаг расчета процессов сжатия и расширения согласно рекомендациям [1, стр.30] принимаем равными $2,5^\circ ПКВ$ и $5^\circ ПКВ$ для обеспечения повышенных требований к точности расчета.

Расчеты процессов впуска, сжатия, сгорания и расширения, а также индикаторных показателей цикла определяем с помощью программы DVS, в качестве исходных данных для расчета принимаются данные из пункта 1.1, теория расчета представлена ниже. Результаты расчетов представлены в приложении 1.

1.3 Расчет процесса впуска

1. Температура воздуха после компрессора при наддуве:

$$T_{K'} = T_o \left(\frac{P_K}{P_o} \right)^{\frac{n_H - 1}{n_H}}, \text{ K}, \quad (1.3)$$

где T_o - температура окружающей среды при нормальных условиях;

p_K - давление перед впускными клапанами;

p_o - давление окружающей среды при нормальных условиях;

n_H - показатель политропы сжатия воздуха в компрессоре. $n_H = 1$.

$$T_{K'} = 293 \left(\frac{0,1013}{0,1013} \right)^{\frac{1-1}{1}} = 293 \text{ K},$$

2. Температура воздуха охладителя наддувочного воздуха:

$$T_K = T_{K'} - \Delta T_{охл}, \text{ K}, \quad (1.4)$$

где $\Delta T_{охл}$ - понижение температуры в ОНВ, поскольку в данном случае охладитель не применяется, то $\Delta T_{охл} = 0 \text{ K}$.

					13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

3. Давление рабочего тела в конце впуска:

$$P_a = \frac{1}{\varepsilon} \left([\varepsilon - 1] \eta_v P_k \frac{T_k + \Delta T}{T_k} + P_r \right), \text{ МПа}, \quad (1.5)$$

где ε - степень сжатия;

η_v - коэффициент наполнения;

ΔT - подогрев свежего заряда;

P_r - давление остаточных газов.

$$P_a = \frac{1}{10,3} \left([10,3 - 1] 0,825 \cdot 0,1013 \frac{293 + 10}{293} + 0,109 \right) = 0,088 \text{ МПа}$$

4. Коэффициент остаточных газов:

$$\gamma = \frac{P_r T_k}{([\varepsilon - 1] \eta_v P_k T_r)} \quad (1.6)$$

где T_r - температура остаточных газов.

$$\gamma = \frac{0,109 \cdot 293}{([10,3 - 1] 0,825 \cdot 0,1013 \cdot 1000)} = 0,041.$$

5. Температура рабочего тела в конце впуска:

$$T_a = \frac{(T_k + \Delta T + \gamma T_r)}{1 + \gamma}, \text{ К}, \quad (1.7)$$

где γ - коэффициент остаточных газов, определенный по формуле 6.

$$T_a = \frac{(293 + 10 + 0,041 \cdot 1000)}{1 + 0,041} = 330,45 \text{ К}.$$

6. Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива
в киломолях:

$$L_o = \frac{\left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right)}{0,21}, \frac{\text{кг} \cdot \text{моль}}{\text{кг}}, \quad (1.8)$$

где C - массовая доля углерода в топливе, $C = 0,855$;

H - массовая доля водорода в топливе, $H = 0,145$;

					13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

O - массовая доля кислорода в топливе, $O = 0,000$.

$$L_o = \frac{\left(\frac{0,870}{12} + \frac{0,1126}{4} - \frac{0,004}{32} \right)}{0,21} = 0,494 \frac{\text{кг} \cdot \text{моль}}{\text{кг}}$$

7. Удельный объем рабочего тела в конце впуска:

$$V_a = \frac{0,008314 \cdot \left(\frac{\alpha L'_0}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_T} \right) \cdot T_a}{(1 + \alpha L'_0) P_a}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \quad (1.9)$$

$$V_a = \frac{0,008314 \cdot \left(\frac{0,95 \cdot 14,327}{29} + \frac{1}{114} \right) \cdot 330,45}{(1 + 0,95 \cdot 14,327) \cdot 0,088} = 1,02 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

где μ_B – кажущаяся молекулярная масса воздуха, равная $\mu_B = 29$

μ_T – кажущаяся молекулярная масса топлива, равная $\mu_T = 114$

T_a – температура рабочего тела в конце впуска, определенная по формуле 7;

p_a – давление рабочего тела в конце впуска, определенное по формуле 1.5.

1.4 Расчет процесса сжатия

Параметры рабочего тела в процессе сжатия определяются по уравнениям политропного процесса.

1. Текущее давление:

$$p = p_a \cdot \left(\frac{V_a}{V} \right)^{n_1}, \text{ МПа}, \quad (1.10)$$

где V_a – удельный объем рабочего тела в конце впуска определенный по формуле 9;

V – текущее значение удельного объема:

$$V = (V_a / \varepsilon) \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \sigma \right), \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}, \quad (1.11)$$

В уравнении σ – кинематическая функция перемещения поршня.

2. Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна:

					13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

$$\lambda = \frac{r}{l_{iu}} = \frac{37,8}{121} = 0,31 \quad (1.12)$$

$$\sigma = \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) - \left(\cos\alpha + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2\alpha}\right)$$

Для угла опережения воспламенения 25° : $\sigma = 0,127$.

$$V = (0,956/11) \cdot \left(1 + \frac{11-1}{2} \cdot 0,0775\right) = 0,157, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \quad (1.13)$$

$$p = 0,09 \cdot \left(\frac{0,956}{0,12}\right)^{1,39} = 1,186, \text{ МПа}, \quad (1.14)$$

3. Давление и температура конца сжатия соответственно:

$$p_y = p_a \cdot \left(\frac{V_a}{V_y}\right)^{n_1}, \text{ МПа}, \quad (1.15)$$

$$p_y = 0,09 \cdot \left(\frac{0,956}{0,12}\right)^{1,39} = 1,186 \text{ МПа}$$

$$T_y = T_a \cdot \left(\frac{V_a}{V_y}\right)^{n_1-1}, \text{ К}, \quad (1.16)$$

$$T_y = 331 \cdot \left(\frac{0,956}{0,12}\right)^{1,39-1} = 685,6 \text{ К}$$

4. Удельная работа политропного процесса сжатия:

$$l_{ay} = \left(\frac{p_a \cdot V_a - p_y \cdot V_y}{n_1 - 1}\right), \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}, \quad (1.17)$$

$$l_{a-y} = -0,247 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Таблица 1.1. Результаты расчета процесса сжатия

α , град ПКВ	δ	V , м ³ /кг	T , К	P , Мпа
180	1,999999	1,02	330,4501	0,088
185	1,997303	1,018758	330,607	0,088149
190	1,989013	1,01494	331,0915	0,08861
195	1,975114	1,00854	331,9093	0,089393
200	1,955586	0,999548	333,0707	0,090513
205	1,930404	0,987952	334,5899	0,091993
210	1,899542	0,97374	336,486	0,093864
215	1,862981	0,956905	338,7825	0,096168
220	1,820716	0,937442	341,5084	0,098954
225	1,772761	0,91536	344,6982	0,102288
230	1,719162	0,890678	348,3924	0,106249
235	1,660005	0,863437	352,6386	0,110937
240	1,595427	0,8337	357,4917	0,116475
245	1,52563	0,801559	363,0153	0,123017
250	1,450887	0,767141	369,2822	0,130756
255	1,371554	0,73061	376,3765	0,139931
260	1,288077	0,69217	384,3942	0,150849
265	1,200998	0,652071	393,4457	0,163895
270	1,110952	0,610606	403,6574	0,179568
275	1,018671	0,568112	415,1743	0,198506
280	0,924973	0,524966	428,1626	0,221541
285	0,830757	0,481581	442,8115	0,249762
290	0,736983	0,438399	459,3361	0,284602
295	0,644664	0,395887	477,9769	0,327954
300	0,554838	0,354524	498,9971	0,382322
305	0,468558	0,314793	522,6729	0,451006
310	0,386862	0,277174	549,2709	0,538285
315	0,310761	0,24213	579,0031	0,649545
320	0,241211	0,210103	611,9428	0,791142
325	0,179103	0,181504	647,8801	0,969587
330	0,125239	0,1567	686,0931	1,1893
335	0,080322	0,136016	725,0359	1,447925

1.5 Расчет процесса сгорания

При этом расчете определяют величины давлений и температур рабочего тела в процессе сгорания в зависимости от угла поворота коленчатого вала.

Расчет выполняется с учетом угла опережения воспламенения и закономерности выгорания топлива.

1. Теоретически необходимое количество воздуха в килограммах для сгорания одного килограмма топлива:

$$L'_o = \frac{(\frac{8}{3}C + 8H - O)}{0,232}, \quad \text{кг воздуха/кг топлива.} \quad (1.18)$$

$$L'_o = 14,327 \text{ кг воздуха/кг топлива.}$$

2. V_1 - удельный объем рабочего тела в начале участка. Для первого участка $V_1 = V_y$. Для последующих участков в качестве V_1 принимаются значения V_2 предшествующих участков. Значение удельного объема V_2 для конца участка, определяется по зависимости 11.

3. Фактор теплоемкости:

$$K = \frac{k+1}{k-1} \quad (1.19)$$

где k - отношение теплоемкостей рабочего тела, равно $k = c_p/c_v = 1,28...1,30$

$$K = \frac{k+1}{k-1} = \frac{1,29+1}{1,29-1} = 7,9$$

4. x_1 - удельный объем рабочего тела в начале участка. Для первого участка $x_1 = 0$. Для последующих участков в качестве x_1 принимаются значения x_2 предшествующих участков. Доля выгоревшего топлива в конце участка:

$$x_2 = 1 - e^{-6.908 \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_z}\right)^{m+1}} \quad (1.20)$$

где e - основание натурального логарифма;

φ_2 - угол ПКВ, отчитываемый от начала сгорания до конца участка, определяемый $\varphi_2 = \alpha_2 + \theta$;

φ_z - продолжительность сгорания;

m - показатель характера сгорания.

$$x_2 = 1 - e^{-6.908 \left(\frac{2,5}{50}\right)^{3+1}} = 0,000043$$

					13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

5. Общая удельная использованная теплота:

$$q_z = \frac{\xi H_u}{[(1 + \gamma)(\alpha L'_0 + 1)]}, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}, \quad (1.21)$$

где ξ - коэффициент эффективности сгорания;

H_U – низшая теплота сгорания топлива;

L_o' - теоретически необходимое количество воздуха в кг для сгорания

одного кг топлива определенная по формуле 16.

$$q_z = \frac{0,7091 * 44}{[(1 + 0,041)(0,95 * 14,327 + 1)]} = 2,051, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}},$$

6. p_1 - давление в начале участка. Для первого участка $p_1 = p_y$, для последующих в качестве p_1 принимаются значения p_2 предшествующих участков.

Давление в конце участка:

$$p_2 = \frac{2q_z(x_2 - x_1) + p_1(KV_1 - V_2)}{KV_2 - V_1}, \text{ МПа}, \quad (1.22)$$

7. Среднее на участке 1-2 значение действительного коэффициента молекулярного изменения:

$$\beta_{1-2} = \frac{(\beta_1 + \beta_2)}{2}, \quad (1.23)$$

где β_1 – его значение в начале участка, для первого участка принимаем $\beta_1 = 1$

β_2 – то же для конца участка:

$$\beta_2 = 1 + (\beta_{\max} - 1) \cdot x_2, \quad (1.24)$$

здесь β_{\max} – максимальное значение действительного коэффициента молекулярного изменения:

$$\beta_{\max} = \frac{\beta_{0\max} + \gamma}{1 + \gamma}, \quad (1.25)$$

где $\beta_{0\max}$ – максимальное значение химического коэффициента молекулярного изменения.

					13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

$$\beta_{0\max} = 1 + \frac{\frac{H}{4} + \frac{O}{32} + 0.21(1-\alpha)L_0 - \frac{1}{\mu_T}}{\alpha L_0 + \frac{1}{\mu_T}} \quad (1.26)$$

$$\beta_{0\max} = 1 + \frac{\frac{0,145}{4} + \frac{0}{32} + 0.21(1-0,95)0,5119 - \frac{1}{120}}{0,95 * 0,5119 + \frac{1}{120}} = 1,058$$

$$\beta_{\max} = \frac{1,067 + 0,0417}{1 + 0,0417} = 1,055,$$

$$p_2 = \frac{2 * 2,051(0,000043 - 0) + 1,216(7,9 * 0,154 - 0,144)}{7,9 * 0,144 - 0,154} = 1,338 \text{ МПа},$$

8. Температура в конце участка:

$$T_2 = \frac{T_y}{p_y \cdot V_y} \cdot \frac{p_2 \cdot V_2}{\beta_{1-2}}, \quad K, \quad (1.27)$$

$$T_2 = \frac{685,6}{1,186 \cdot 0,157} \cdot \frac{1,338 \cdot 0,144}{1,00001} = 707,2K$$

9. Отвлеченная скорость сгорания:

$$\varpi_0 = 6.908 \cdot (m+1) \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^m (1-x_2), \quad (1.28)$$

$$\varpi_0 = 6.908 \cdot (3+1) \left(\frac{2,5}{50}\right)^3 (1-0,000043) = 0,000172$$

где φ - положение коленчатого вала;

φ_z - продолжительность сгорания.

Таблица 1.2. Результаты расчета процесса сгорания

Fz	α	V2	KV2	V1	KV2-V1	KV1-V2	P1	P1(KV1-V2)	X2
0	-25	0,154	1,2166		0	0	0	0	0
2,5	-22,5	0,144	1,1376	0,154	0,9836	1,2166	1,216	1,4793856	4,31741E-05
5	-20	0,135	1,0665	0,144	0,9225	1,1376	1,338	1,5221088	0,000690561
7,5	-17,5	0,126	0,9954	0,135	0,8604	1,0665	1,47	1,567755	0,003491067
10	-15	0,119	0,9401	0,126	0,8141	0,9954	1,621	1,6135434	0,010991942
12,5	-12,5	0,113	0,8927	0,119	0,7737	0,9401	1,803	1,6950003	0,02662355
15	-10	0,108	0,8532	0,113	0,7402	0,8927	2,04	1,821108	0,054418125
17,5	-7,5	0,104	0,8216	0,108	0,7136	0,8532	2,354	2,0084328	0,098471096
20	-5	0,101	0,7979	0,104	0,6939	0,8216	2,767	2,2733672	0,162090182
22,5	-2,5	0,099	0,7821	0,101	0,6811	0,7979	3,288	2,6234952	0,24668452
25	0	0,099	0,7821	0,099	0,6831	0,7821	3,906	3,0548826	0,350628301
27,5	2,5	0,099	0,7821	0,099	0,6831	0,7821	4,578	3,5804538	0,468538848
30	5	0,101	0,7979	0,099	0,6989	0,7821	5,242	4,0997682	0,591505488
32,5	7,5	0,104	0,8216	0,101	0,7206	0,7979	5,818	4,6421822	0,708618296
35	10	0,108	0,8532	0,104	0,7492	0,8216	6,233	5,1210328	0,809596695
37,5	12,5	0,113	0,8927	0,108	0,7847	0,8532	6,443	5,4971676	0,887604837
40	15	0,119	0,9401	0,113	0,8271	0,8927	6,441	5,7498807	0,940958624
42,5	17,5	0,126	0,9954	0,119	0,8764	0,9401	6,254	5,8793854	0,97284025
45	20	0,135	1,0665	0,126	0,9405	0,9954	5,936	5,9086944	0,989244508
47,5	22,5	0,144	1,1376	0,135	1,0026	1,0665	5,542	5,910543	0,996399236
50	25	0,154	1,2166	0,144	1,0726	1,1376	5,121	5,8256496	0,999000245

X2-1	2qz*X2-1	9+12	p2=13/6	B1-2	T2
0	0	0	1,216	1	689,2
0,000043178	0,0001771	1,479563	1,338	1,000001	707,2
0,000647387	0,00265558	1,524764	1,47	1,000019	726,7
0,002800506	0,01148767	1,579243	1,621	1,000096	751,4
0,007500875	0,03076859	1,644312	1,803	1,000302	787,7
0,015631607	0,06412085	1,759121	2,04	1,000732	844
0,027794575	0,11401335	1,935121	2,354	1,001496	928,9
0,044052971	0,18070529	2,189138	2,767	1,002708	1049,5
0,063619086	0,26096549	2,534333	3,288	1,004457	1209,5
0,084594338	0,34700598	2,970501	3,906	1,006784	1406,3
0,103943781	0,42637739	3,48126	4,578	1,009642	1630,6
0,117910547	0,48366906	4,064123	5,242	1,012885	1866,4
0,12296664	0,50440916	4,604177	5,818	1,016266	2093,3
0,117112808	0,48039674	5,122579	6,233	1,019487	2291,2
0,100978399	0,41421339	5,535246	6,443	1,022264	2444,8
0,078008142	0,3199894	5,817157	6,441	1,024409	2547
0,053353788	0,21885724	5,968738	6,254	1,025876	2599,8
0,031881625	0,13077843	6,010164	5,936	1,026753	2612,2
0,016404258	0,06729027	5,975985	5,542	1,027204	2596,6
0,007154727	0,02934869	5,939892	5,121	1,027401	2564,5
0,002601009	0,01066934	5,836319	4,704	1,027473	2524,3

10. Удельная работа газов в процессе сгорания:

$$l_{y-z} = \sum_1^n \frac{p_1 + p_2}{2} (V_2 - V_1), \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}, \quad (1.29)$$

где n – число элементарных участков процесса сгорания.

Таблица 1.3. Результаты расчета удельной работы процесса сгорания.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
f	W0	V2	V1	V2-V1	P2	P1	P1+P2/2	[5]*[8]
0	0	0,154			1,216			
2,5	0,003454	0,144	0,154	-0,01	1,338	1,216	1,277	-0,01277
5	0,027613	0,135	0,144	-0,009	1,47	1,338	1,404	-0,012636
7,5	0,092932	0,126	0,135	-0,009	1,621	1,47	1,5455	-0,0139095
10	0,218626	0,119	0,126	-0,007	1,803	1,621	1,712	-0,011984
12,5	0,420255	0,113	0,119	-0,006	2,04	1,803	1,9215	-0,011529
15	0,705465	0,108	0,113	-0,005	2,354	2,04	2,197	-0,010985
17,5	1,068061	0,104	0,108	-0,004	2,767	2,354	2,5605	-0,010242
20	1,4818	0,101	0,104	-0,003	3,288	2,767	3,0275	-0,0090825
22,5	1,896823	0,099	0,101	-0,002	3,906	3,288	3,597	-0,007194
25	2,24293	0,099	0,099	0	4,578	3,906	4,242	0
27,5	2,443273	0,099	0,099	0	5,242	4,578	4,91	0
30	2,438104	0,101	0,099	0,002	5,818	5,242	5,53	0,01106
32,5	2,211132	0,104	0,101	0,003	6,233	5,818	6,0255	0,0180765
35	1,8046	0,108	0,104	0,004	6,443	6,233	6,338	0,025352
37,5	1,310219	0,113	0,108	0,005	6,441	6,443	6,442	0,03221
40	0,835293	0,119	0,113	0,006	6,254	6,441	6,3475	0,038085
42,5	0,460887	0,126	0,119	0,007	5,936	6,254	6,095	0,042665
45	0,216656	0,135	0,126	0,009	5,542	5,936	5,739	0,051651
47,5	0,085306	0,144	0,135	0,009	5,121	5,542	5,3315	0,0479835
50	0,027625	0,154	0,144	0,01	4,704	5,121	4,9125	0,049125

$$l_{y-z} = 0,21588 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

1.6 Расчет процесса расширения

В результате процесса расширения тепловая энергия топлива преобразуется в механическую работу.

1 Давление и температура рабочего тела в конце расширения определяются по уравнениям политропного процесса 28 и 29:

$$p_b = p_z \left(\frac{V_z}{V_A} \right)^{n_2}, \text{ МПа}, \quad (1.30)$$

$$p_b = 4,704 \left(\frac{0,154}{1,02} \right)^{1,35} = 0,366 \text{ МПа}$$

$$T_b = T_z \left(\frac{V_z}{V_a} \right)^{n_2-1}, \text{ К}, \quad (1.31)$$

$$T_b = 2524,3 \left(\frac{0,154}{1,02} \right)^{1,35-1} = 1302,45 \text{ К}$$

Таблица 1.4. Результаты расчета процесса расширения.

α	v	p	t
385	0,154	4,704	2524,3
390	0,178	3,881	2401,7
395	0,205	3,204	2285,1
400	0,236	2,658	2177
405	0,269	2,223	2078,5
410	0,305	1,877	1989,5
415	0,343	1,602	1909,5
420	0,382	1,383	1837,8
425	0,423	1,206	1773,8
430	0,465	1,063	1716,6
435	0,507	0,956	1665,5
440	0,549	0,85	1619,9
445	0,59	0,77	1579,2
450	0,63	0,704	1542,9
455	0,67	0,649	1510,4
460	0,708	0,602	1481,6
465	0,744	0,563	1455,8
470	0,779	0,53	1433
475	0,811	0,501	1412,6
480	0,841	0,477	1394,7
485	0,869	0,456	1378,8
490	0,895	0,439	1364,9
495	0,915	0,424	1352,7
500	0,939	0,411	1342,2
505	0,957	0,401	1333,2
510	0,973	0,392	1325,6
515	0,986	0,385	1319,2
520	0,997	0,379	1314,2
525	1,006	0,375	1310,3
530	1,012	0,372	1307,6
535	1,015	0,37	1305,9
540	1,016	0,37	1305,4

2. Удельная работа в процессе политропного расширения:

$$l_{z-b} = \frac{(p_z V_z - p_b V_a)}{n_2 - 1}, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}. \quad (1.32)$$

$$l_{z-b} = \frac{(4,704 * 0,154 - 0,37 * 1,016)}{1,35 - 1} = 0,9957 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

$$l_{z-b} = 0,9957 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

1.7 Определение индикаторных показателей цикла

1 Удельная работа цикла:

$$l_i = l_{ay} + l_{yz} + l_{zb}, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}, \quad (1.33)$$

где l_{zg} – удельная работа в процессе политропного расширения;

l_{yz} – удельная работа газов в процессе сгорания;

l_{ay} – удельная работа политропного процесса сжатия.

$$l_i = -0,247 + 0,21588 + 0,9957 = 0,96458 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

2 Среднее индикаторное давление цикла:

$$p_i = \frac{\varepsilon * l_i}{(\varepsilon - 1)V_a}, \text{ МПа}, \quad (1.34)$$

$$p_i = 1,04735 \text{ МПа}.$$

2 Индикаторный КПД:

$$\eta_i = \frac{\xi l}{q_z}. \quad (1.35)$$

$$\eta_i = 0,33348.$$

1 Индикаторный удельный расход топлива:

$$q_i = \frac{3600}{H_u \eta_i}, \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \quad (1.36)$$

$$q_i = 245,95 \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

По результатам теплового расчета строится диаграмма давления газов в зависимости от объема.

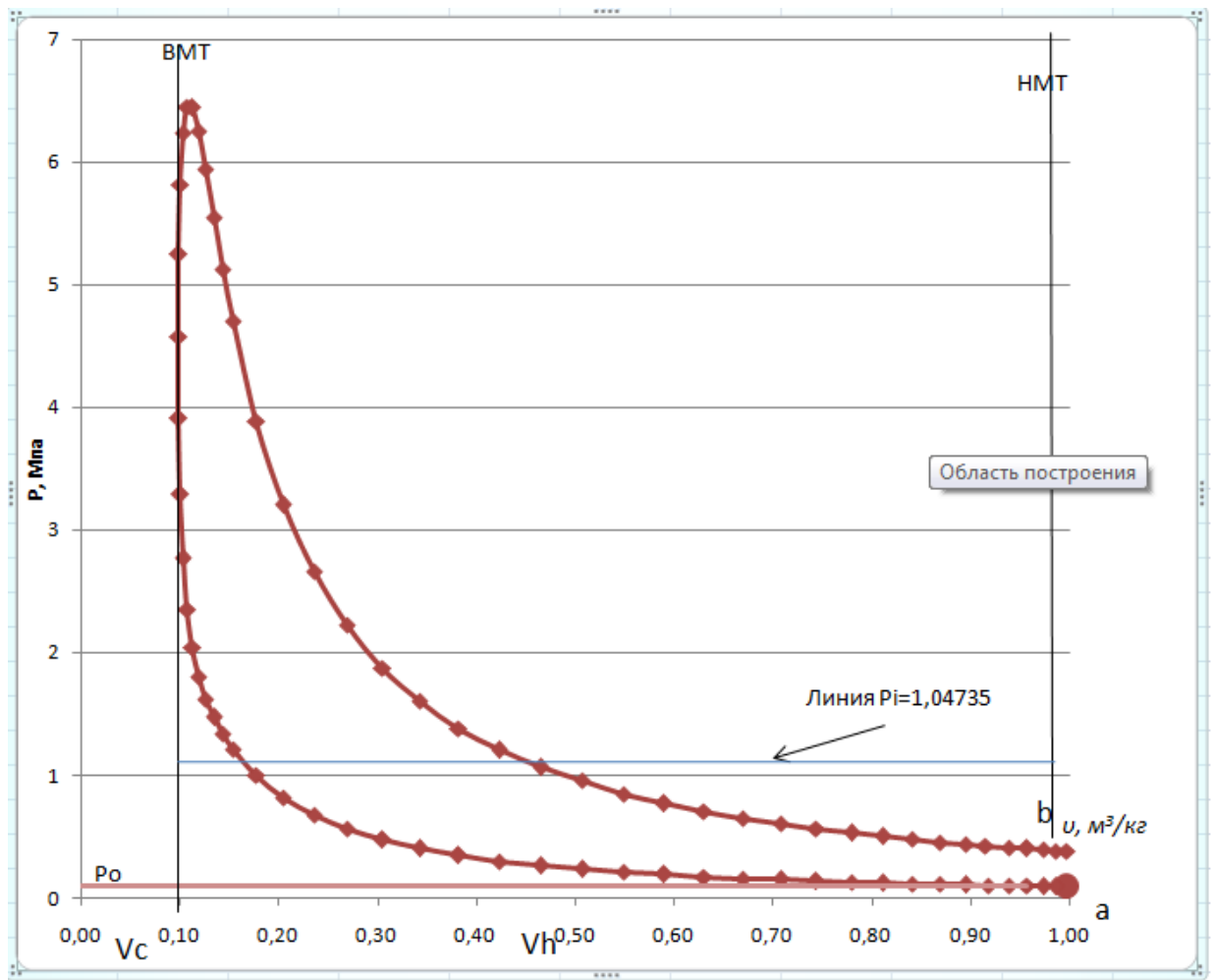


Рисунок 1.1 – P-V Диаграмма газов рабочего цикла бензинового двигателя

1.8 Определение эффективных показателей двигателя, диаметра цилиндра и хода поршня

1. Средняя скорость поршня:

$$c_n = \frac{Sn}{30}, \quad \frac{м}{с}, \quad (1.37)$$

здесь S – величина хода поршня;

n – частота вращения двигателя.

$$p_m = a + bc_n, \text{ МПа}, \quad (1.38)$$

где a, b – эмпирические коэффициенты, $a=0,034, b= 0,0113$ для бензиновых

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

двигателей с числом цилиндров 4;

После подстановки численных значений в формулы 35 и 36 получим:

$$c_n = \frac{75,6 \cdot 10^{-3} \cdot 5600}{30} = 14,112 \frac{м}{с}.$$

$$p_m = 0,034 + 0,0113 \cdot 14,112 = 0,1934 \text{ МПа}.$$

4. Среднее эффективное давление за цикл:

$$p_e = p_i - p_m, \text{ МПа.} \quad (1.39)$$

$$p_e = 1,04735 - 0,1934 = 0,8539 \text{ МПа}.$$

5. Механический КПД:

$$\eta_m = \frac{p_e}{p_i}, \quad (1.40)$$

где p_i – среднее индикаторное давление за цикл, определяемое по формуле 32.

$$\eta_m = \frac{0,8539}{1,04735} = 0,815$$

6. Эффективный КПД:

$$\eta_e = \eta_i \eta_m, \quad (1.41)$$

где η_i – индикаторный КПД.

$$\eta_e = 0,33348 \cdot 0,815 = 0,2717.$$

7. Удельный эффективный расход топлива:

$$g_e = \frac{3600}{H_u \eta_e} \cdot \frac{z}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \quad (1.42)$$

$$g_e = \frac{3600}{44 \cdot 0,2717} = 301,53 \frac{г}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

8. Диаметр цилиндра:

$$D = \sqrt[3]{\frac{120\pi N_e}{\pi \left(\frac{S}{D}\right) P_e i n}}, \text{ дм.} \quad (1.43)$$

где τ , i - тактность двигателя и число цилиндров двигателя соответственно;

N_e, n – мощность двигателя и число оборотов двигателя по заданию;

$$D = \sqrt[3]{\frac{120 \cdot 4 \cdot 65}{3,14 \left(\frac{75,6}{82}\right) 0,8539 \cdot 4 \cdot 5600}} = 0,75 \text{ дм}$$

9. Ход поршня:

$$S = D \left(\frac{S}{D}\right), \text{ м}^3. \quad (1.44)$$

$$S = 0,82 \left(\frac{0,756}{0,75}\right) = 0,826, \text{ дм.}$$

10. Объем цилиндра:

$$V_h = \frac{\pi D^2 S}{4}, \text{ л.} \quad (1.45)$$

$$V_h = \frac{3,14 \cdot 0,75^2 \cdot 0,826}{4} = 0,3647, \text{ л.}$$

ВНЕШНЯЯ СКОРОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА.

Для оценки динамических качеств и экономичности проектируемого автомобиля необходимо знать внешнюю скоростную характеристику двигателя. Эту характеристику можно получить расчетным путем, используя результаты теплового расчета двигателя.

Внешняя характеристика определяется для интервала от минимальной частоты вращения вала n_{min} до номинальной n_n . Шаг расчета выбирается так, чтобы получить 8 расчетных режимов по характеристике. Минимальную частоту вращения можно принять $n_{min} = 600-900$ об/мин для инжекторных двигателей. Принимаем $n_{min} = 800$ об/мин и с шагом в 600 об/мин.

1. Изменение среднего эффективного давления можно определить по эмпирической зависимости:

$$p_e = p_{emax} - a_p(n - n_m)^2, \text{ МПа}, \quad (2.1)$$

где p_{emax} – максимальное значение среднего эффективного давления по внешней характеристике:

$$p_{emax} = k_m p_{ен}, \text{ МПа}, \quad (2.2)$$

здесь k_m – коэффициент приспособленности по крутящему моменту равный $k_m = 1,2 \dots 1,35$. Принимаем $k_m = 1,25$;

$$p_{emax} = 1,25 * 0,8539 = 1,067 \text{ МПа};$$

a_p – постоянная величина:

$$a_p = \frac{P_{ен} (k_m - 1)}{(n_n - n_m)^2}. \quad (2.3)$$

n – частота вращения коленчатого вала на одном из рассматриваемых режимов;

n_m – частота вращения коленчатого вала на режиме максимального крутящего момента:

$$n_m = (0,6 \dots 0,8) n_H, \text{ об/мин}, \quad (2.4)$$

$$n_m = 0,6 \cdot 5600 = 3360 \text{ об/мин}.$$

$$a_p = \frac{0,8539 \cdot (1,25 - 1)}{(5600 - 3360)^2} = 4,2545 \cdot 10^{-8}.$$

4. Эффективная мощность:

$$N_e = \frac{p_e V_h i n}{30 \tau}, \text{ кВт}. \quad (2.5)$$

$$N_e = \frac{0,8795 \cdot 0,397 \cdot 4 \cdot 5600}{30 \cdot 4} = 65,17 \text{ кВт}.$$

где V_h – рабочий объем одного цилиндра;

i – число цилиндров;

τ – тактность двигателя.

5. Крутящий момент двигателя:

$$M = 9550 \frac{N_e}{n}, \text{ Нм}. \quad (2.6)$$

$$M = 9550 \frac{65,17}{5600} = 111 \text{ Нм}.$$

Эффективный расход топлива для инжекторных двигателей:

$$g_e = g_{en} \left[1,2 - 1,2 \frac{n}{n_H} + \left(\frac{n}{n_H} \right)^2 \right], \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}. \quad (2.7)$$

Расход двигателя в час G_T может быть выражен через цикловой расход топлива:

$$G_T = g_e \cdot N_e, \frac{\text{кг}}{\text{ч}}. \quad (2.8)$$

Таблица 2.1. Расчет показателей внешней скоростной характеристики.

n	P_e	P_m	P_i	N_e	M	η_m	g_e	G_t
800	0,83309375	0,0567808	0,88987455	8,8641175	105,8154	0,9361924	316,2988	2,80371
1400	0,94541255	0,0738664	1,01927895	17,6035817	120,0816	0,9275307	290,2226	5,108958
2000	1,02709895	0,090952	1,11805095	27,3208321	130,457	0,9186513	271,0693	7,405839
2600	1,07815295	0,1080376	1,18619055	37,282529	136,9416	0,9089205	258,8389	9,650168
3200	1,09857455	0,1251232	1,22369775	46,7553328	139,5354	0,8977499	253,5313	11,85394
3800	1,08836375	0,1422088	1,23057255	55,0059039	138,2385	0,8844369	255,1467	14,03457
4400	1,04752055	0,1592944	1,20681495	61,3009026	133,0508	0,8680043	263,6849	16,16412
5000	0,97604495	0,17638	1,15242495	64,9069892	123,9723	0,8469488	279,146	18,11853
5600	0,87393695	0,1934656	1,06740255	65,090824	111,0031	0,818751	301,53	19,62684

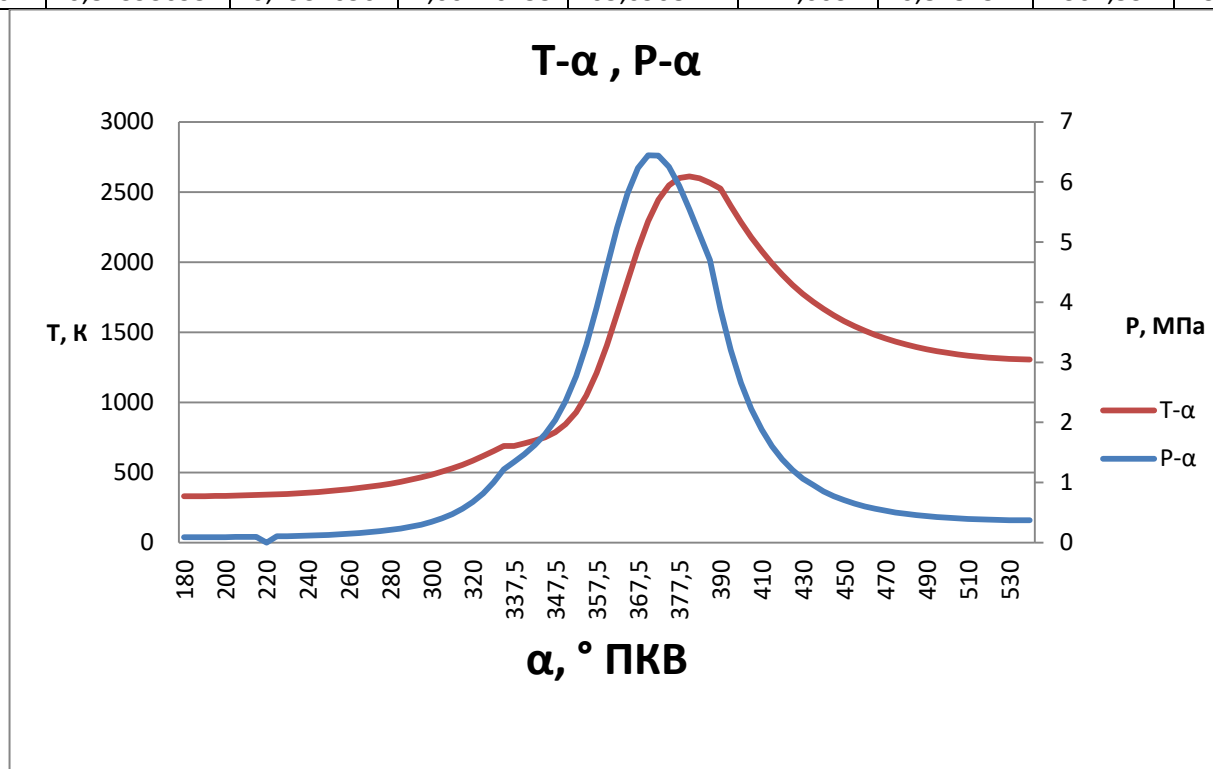


Рисунок 2.1 – P,T- α график цикла бензинового двигателя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

Лист

30

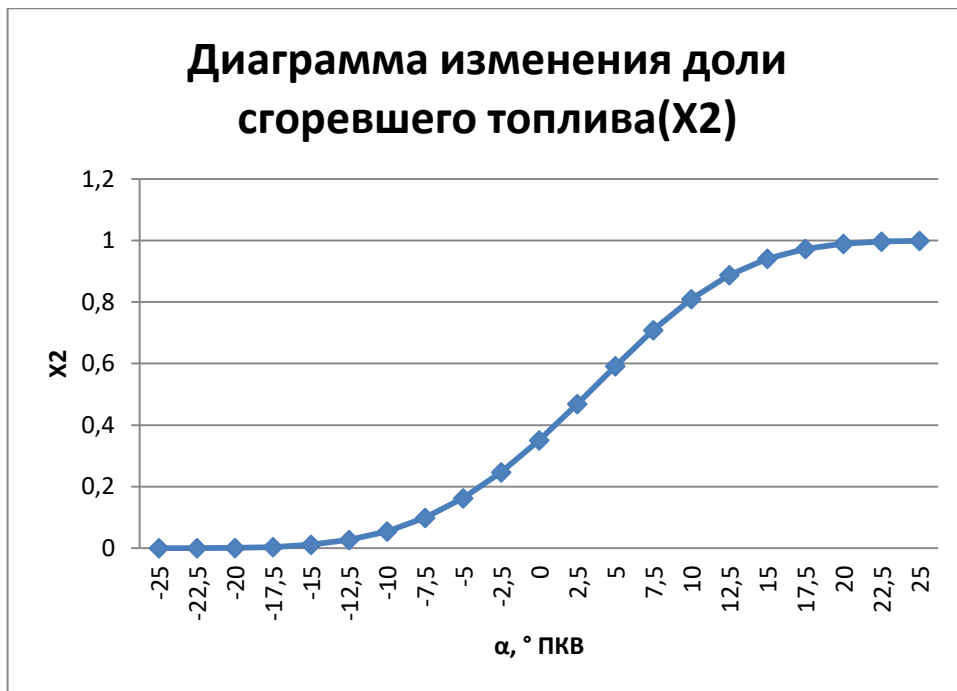


Рисунок 2.2 - Диаграмма изменения доли сгоревшего топлива

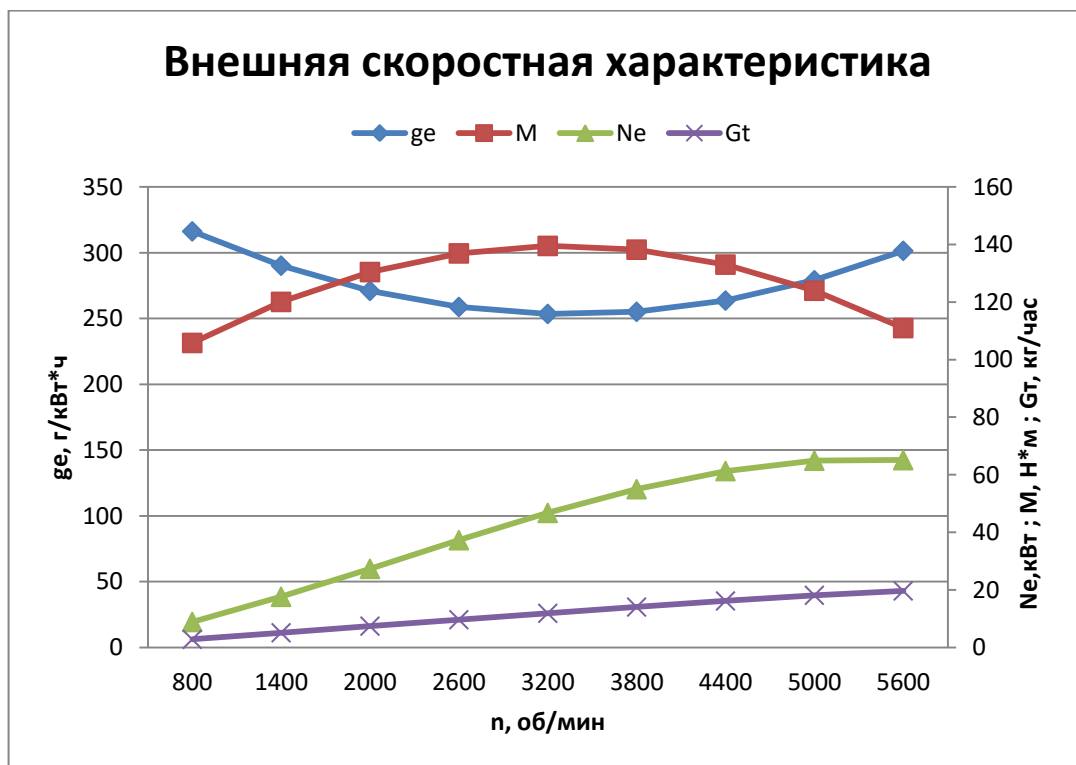


Рисунок 2.3 – Внешняя скоростная характеристика.

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ

В двигателях внутреннего сгорания возвратно-поступательное движение поршня преобразуется во вращательное движение коленчатого вала посредством кривошипно-шатунного механизма.

3.1 Расчет на ЭВМ.

Расчет кривошипно-шатунного механизма
двигателя внутреннего сгорания

Исходные данные

1 Радиус кривошипа, м.....	R=	.0378
2 Отношение R/L.....	lam=	.3100
3 Обороты коленчатого вала, мин ⁻¹	n=	5600.0
4 Масса движущихся частей, кг.....	m=	.6453
5 Давление в конце впуска, МПа.....	Pa=	.0880
6 Давление выпуска, МПа.....	Pr=	.1090
7 Площадь поршня, м ²	Fp=	.0053
8 Атмосферное давление, МПа.....	P0=	.1013

Массив давлений для углов 190...530

.0890	.0910	.0940	.0990	.1060	.1150	.1280
.1470	.1720	.2090	.2630	.3450	.4720	.6760
.9980	1.4700	2.3540	4.5780	6.4430	5.5420	3.8810
2.6580	1.8770	1.3830	1.0630	.8500	.7040	.6020
.5300	.4770	.4390	.4110	.3920	.3790	.3720

Кинематический расчет

a, grad	S, м	V, м/с	J, м/с ²	
.0	.0000	.000	17028.28	
10.0	.0008	5.024	16587.81	
20.0	.0030	9.790	15301.71	
30.0	.0065	14.058	13272.20	
40.0	.0113	17.632	10657.64	
50.0	.0169	20.364	7656.12	
60.0	.0233	22.172	4485.11	
70.0	.0300	23.038	1359.59	
80.0	.0369	23.005	-1528.74	
90.0	.0437	22.167	-4028.99	
100.0	.0500	20.655	-6043.26	
110.0	.0559	18.622	-7532.26	
120.0	.0611	16.222	-8513.88	
130.0	.0655	13.598	-9054.99	
140.0	.0692	10.866	-9257.81	
150.0	.0720	8.109	-9242.43	
160.0	.0740	5.374	-9127.98	
170.0	.0752	2.675	-9014.67	
180.0	.0756	.001	-8969.09	
190.0	.0752	-2.673	-9014.58	
200.0	.0740	-5.371	-9127.85	
210.0	.0720	-8.106	-9242.34	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

Лист

32

220.0	.0692	-10.863	-9257.8
230.0	.0655	-13.595	-9055.37
240.0	.0611	-16.219	-8514.67
250.0	.0559	-18.619	-7533.56
260.0	.0501	-20.653	-6045.12
270.0	.0437	-22.165	-4031.40
280.0	.0369	-23.004	-1531.62
290.0	.0301	-23.038	1356.37
300.0	.0233	-22.173	4481.73
310.0	.0169	-20.366	7652.81
320.0	.0113	-17.635	10654.62
330.0	.0065	-14.063	13269.70
340.0	.0030	-9.794	15299.93
350.0	.0008	-5.029	16586.88
360.0	.0000	-.005	17028.28

Динамический расчет

grad P_g, кНР_j, кНР_e, кНН, кНР_{Ph}, кНЗ, кНТ, кН

.0	-.070	-10.988	-11.059	.000	-11.059	-11.059	.000
10.0	-.070	-10.704	-10.775	-.581	-10.790	-10.510	-2.443
20.0	-.070	-9.874	-9.945	-1.060	-10.001	-8.982	-4.398
30.0	-.070	-8.565	-8.635	-1.355	-8.741	-6.801	-5.491
40.0	-.070	-6.877	-6.948	-1.413	-7.090	-4.414	-5.548
50.0	-.070	-4.940	-5.011	-1.225	-5.159	-2.283	-4.626
60.0	-.070	-2.894	-2.965	-.826	-3.078	-.767	-2.981
70.0	-.070	-.877	-.948	-.289	-.991	-.053	-.989
80.0	-.070	.986	.916	.294	.962	-.130	.953
90.0	-.070	2.600	2.529	.825	2.660	-.825	2.529
100.0	-.070	3.900	3.829	1.228	4.021	-1.874	3.558
110.0	-.070	4.861	4.790	1.459	5.007	-3.009	4.002
120.0	-.070	5.494	5.424	1.512	5.630	-4.021	3.941
130.0	-.070	5.843	5.773	1.411	5.943	-4.792	3.515
140.0	-.070	5.974	5.904	1.201	6.024	-5.294	2.875
150.0	-.070	5.964	5.894	.925	5.966	-5.566	2.146
160.0	-.070	5.890	5.820	.621	5.853	-5.681	1.408
170.0	-.070	5.817	5.747	.310	5.755	-5.713	.693
180.0	-.070	5.788	5.717	.000	5.717	-5.717	.000
190.0	-.065	5.817	5.752	-.310	5.760	-5.718	-.693
200.0	-.055	5.890	5.836	-.622	5.869	-5.697	-1.411
210.0	-.039	5.964	5.925	-.929	5.998	-5.597	-2.157
220.0	-.012	5.974	5.962	-1.212	6.084	-5.347	-2.903
230.0	.025	5.843	5.868	-1.434	6.041	-4.871	-3.573
240.0	.073	5.495	5.567	-1.551	5.779	-4.128	-4.045
250.0	.142	4.861	5.003	-1.523	5.230	-3.143	-4.180
260.0	.242	3.901	4.143	-1.328	4.351	-2.028	-3.849
270.0	.375	2.601	2.976	-.970	3.130	-.971	-2.976
280.0	.571	.988	1.559	-.500	1.637	-.222	-1.622
290.0	.857	-.875	-.018	.006	-.019	-.001	.019
300.0	1.292	-2.892	-1.600	.446	-1.661	-.414	1.609
310.0	1.965	-4.938	-2.974	.727	-3.061	-1.354	2.746
320.0	3.046	-6.875	-3.830	.779	-3.908	-2.432	3.059
330.0	4.753	-8.563	-3.810	.598	-3.857	-3.001	2.424
340.0	7.254	-9.873	-2.619	.279	-2.634	-2.365	1.159
350.0	11.939	-10.704	1.236	-.067	1.238	1.205	-.280
360.0	23.727	-10.988	12.738	-.001	12.738	12.738	-.003
370.0	33.611	-10.705	22.906	1.234	22.939	22.345	5.188
380.0	28.836	-9.875	18.960	2.021	19.068	17.127	8.380
390.0	20.032	-8.566	11.466	1.798	11.606	9.032	7.289
400.0	13.551	-6.879	6.671	1.356	6.808	4.240	5.326

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

Лист

33

410.0	9.411	-4.943	4.469	1.092	4.600	2.037	4.125
420.0	6.793	-2.896	3.897	1.086	4.045	1.009	3.917
430.0	5.097	-.879	4.218	1.284	4.409	.237	4.402
440.0	3.968	.985	4.953	1.588	5.201	-.702	5.153
450.0	3.194	2.598	5.793	1.889	6.093	-1.887	5.793
460.0	2.654	3.899	6.552	2.101	6.881	-3.205	6.089
470.0	2.272	4.860	7.132	2.172	7.455	-4.479	5.960
480.0	1.991	5.493	7.485	2.086	7.770	-5.548	5.440
490.0	1.790	5.843	7.633	1.866	7.858	-6.335	4.649
500.0	1.641	5.974	7.615	1.549	7.771	-6.828	3.710
510.0	1.541	5.964	7.505	1.178	7.597	-7.088	2.734
520.0	1.472	5.890	7.362	.786	7.404	-7.186	1.782
530.0	1.435	5.817	7.252	.392	7.263	-7.210	.876
540.0	.041	5.788	5.829	.001	5.829	-5.829	.001
550.0	.041	5.817	5.858	-.315	5.866	-5.824	-.705
560.0	.041	5.890	5.931	-.632	5.964	-5.790	-1.433
570.0	.041	5.964	6.005	-.942	6.078	-5.672	-2.185
580.0	.041	5.974	6.015	-1.223	6.138	-5.395	-2.928
590.0	.041	5.844	5.884	-1.438	6.058	-4.885	-3.582
600.0	.041	5.495	5.536	-1.543	5.747	-4.105	-4.022
610.0	.041	4.862	4.903	-1.493	5.125	-3.081	-4.096
620.0	.041	3.902	3.943	-1.264	4.141	-1.931	-3.663
630.0	.041	2.603	2.644	-.862	2.781	-.863	-2.644
640.0	.041	.990	1.031	-.331	1.083	-.147	-1.073
650.0	.041	-.873	-.832	.253	-.870	-.046	.869
660.0	.041	-2.890	-2.849	.794	-2.958	-.736	2.865
670.0	.041	-4.936	-4.895	1.197	-5.040	-2.228	4.520
680.0	.041	-6.873	-6.833	1.390	-6.973	-4.339	5.458
690.0	.041	-8.561	-8.521	1.338	-8.625	-6.708	5.421
700.0	.041	-9.872	-9.831	1.049	-9.887	-8.878	4.352
710.0	.041	-10.703	-10.662	.576	-10.678	-10.399	2.422
720.0	.041	-10.988	-10.948	.001	-10.948	-10.948	.005

1) Перемещение поршня определяется по формуле:

$$S = R[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\varphi)], \text{м}, \quad (3.1)$$

где φ - угол поворота кривошипа, град;

R – радиус кривошипа, определяется по формуле:

$$R = S / 2 = 0,756 / 2 = 0,0378, \text{м}. \quad (3.2)$$

2) Скорость поршня определяется по формуле:

$$V = \omega R(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi), \text{м/с}, \quad (3.3)$$

где ω - угловая скорость вращения коленчатого вала, определяется по формуле:

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,14 * 5600}{30} = 586,13, 1/c. \quad (3.4)$$

3) Ускорение поршня определяется по формуле:

$$j = \omega^2 R(\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi), \text{ м/с}^2. \quad (3.5)$$

4) Построение графиков к кинематическому расчёту

$$r = 0,0378$$

$$\lambda = 0,31$$

$$\omega = 586,13$$

$$\omega = n * \pi / 30$$

$$s = r \left[\left(1 + \frac{\lambda}{4} \right) - \left(\cos \varphi + \frac{\lambda}{4} \cdot \cos 2\varphi \right) \right] \quad v = r\omega \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right)$$

$$j = r\omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi)$$

$$v_{cp} = \frac{2r\omega}{\pi}$$

Таблица 3.1 - Кинематический расчет

φ	s, м	v, м/с	j, м/с ²	v_{cp} , м/с	β
0	0,000	0,000	17012,022	14,105	0
10	0,001	5,022	16571,949	14,105	3,0858
20	0,003	9,785	15287,008	14,105	6,0864
30	0,007	14,052	13259,318	14,105	8,9172
40	0,011	17,623	10647,128	14,105	11,495
50	0,017	20,354	7648,354	14,105	13,739
60	0,023	22,162	4480,265	14,105	15,576
70	0,030	23,027	1357,668	14,105	16,941
80	0,037	22,994	-1527,920	14,105	17,782
90	0,044	22,156	-4025,746	14,105	18,068
100	0,050	20,645	-6038,007	14,105	17,788
110	0,056	18,612	-7525,468	14,105	16,951
120	0,061	16,213	-8506,011	14,105	15,591
130	0,066	13,590	-9046,481	14,105	13,758

140	0,069	10,860	-9249,001	14,105	11,517
150	0,072	8,104	-9233,572	14,105	8,942
160	0,074	5,370	-9119,208	14,105	6,1132
170	0,075	2,673	-9006,022	14,105	3,1137
180	0,076	0,000	-8960,531	14,105	0,0283
190	0,075	-2,673	-9006,022	14,105	- 3,0579
200	0,074	-5,370	-9119,208	14,105	- 6,0597
210	0,072	-8,104	-9233,572	14,105	- 8,8924
220	0,069	-10,860	-9249,001	14,105	- 11,473
230	0,066	-13,590	-9046,481	14,105	-13,72
240	0,061	-16,213	-8506,011	14,105	- 15,561
250	0,056	-18,612	-7525,468	14,105	- 16,931
260	0,050	-20,645	-6038,007	14,105	- 17,777
270	0,044	-22,156	-4025,746	14,105	- 18,068
280	0,037	-22,994	-1527,920	14,105	- 17,793
290	0,030	-23,027	1357,668	14,105	- 16,961
300	0,023	-22,162	4480,265	14,105	- 15,605
310	0,017	-20,354	7648,354	14,105	- 13,777
320	0,011	-17,623	10647,128	14,105	- 11,539
330	0,007	-14,052	13259,318	14,105	- 8,9668
340	0,003	-9,785	15287,008	14,105	- 6,1399
350	0,001	-5,022	16571,949	14,105	- 3,1416
360	0,000	0,000	17012,022	14,105	- 0,0566

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

Лист

36

График перемещения поршня

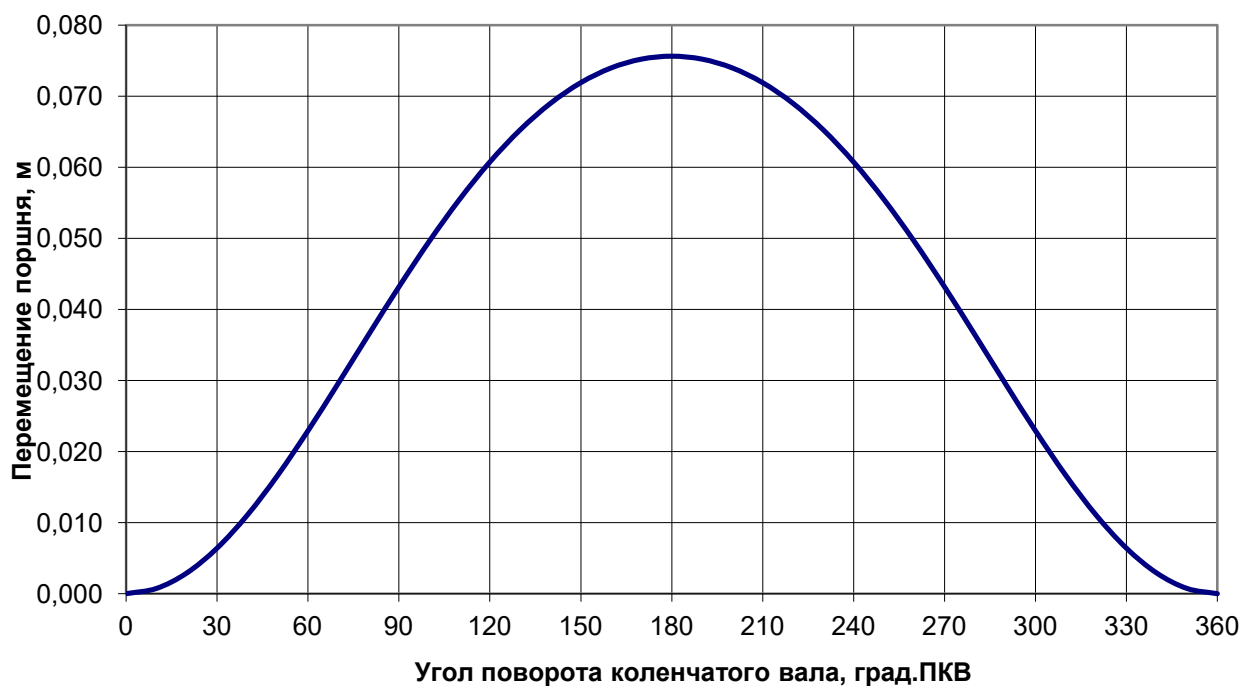
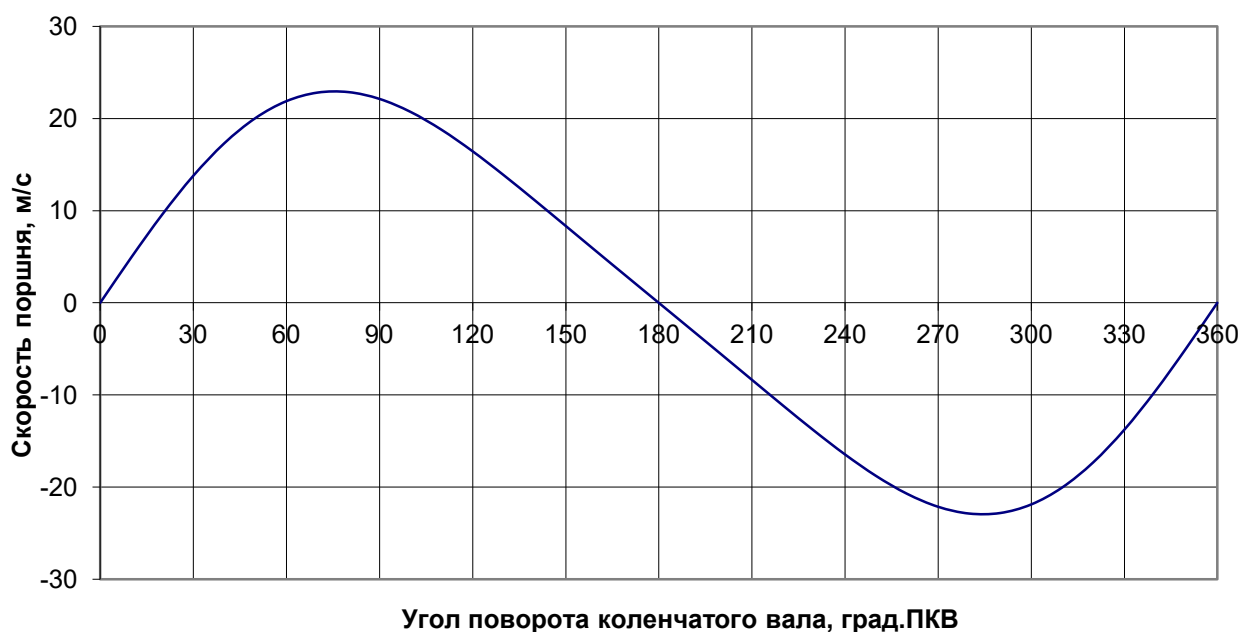


График скорости поршня



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

График ускорения поршня



График угла отклонения шатуна

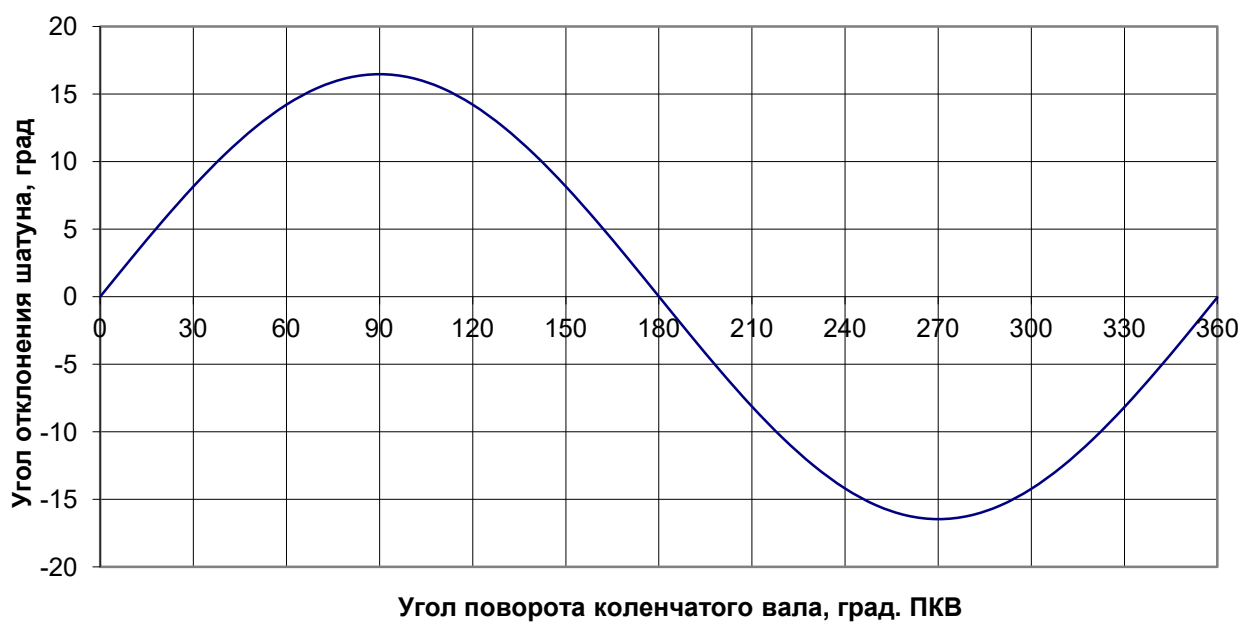


Рисунок 3.1 - Графики зависимости ускорения, скорости, перемещения поршня от угла поворота кривошипа.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

Лист

38

ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ

4.1 Определение сил, действующих в кривошипно-шатунном механизме

Схема сил, приложенных к оси поршневого пальца и к оси шатунной шейки, приведены на рисунке 4.1. За начало отсчета углов α принимается положение поршня в ВМТ начала процесса впуска.

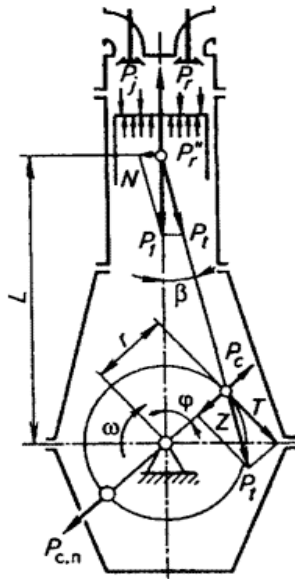


Рисунок 4.1 - Схема сил действующих в КШМ

Расчет кинематики поршня и сил, действующих в кривошипно-шатунном механизме, проводим с помощью программы «КШМ». В расчете используем следующие исходные данные:

1. Радиус кривошипа R . $R=0,5S$;
2. Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна λ . $\lambda=R/L_{ш}$;
3. Частота вращения коленчатого вала n (по заданию);
4. Масса возвратно-поступательно движущихся частей m :

$$m=m_{нк}+m_1;$$

$$m=0,25m_{ш};$$

где $m_{нк}$ – масса поршневого комплекта;

$m_{ш}$ – масса шатуна.

$m_{нк}=0,470\text{кг}, m_{ш}=0,701\text{ кг}$ – по данным прототипа

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

Лист

39

5. Давление в конце впуска p_a , давление процесса выпуска p_r , атмосферное давление p_0 приняты по данным теплового расчета.

6. Площадь поршня:

$$F_n = \frac{\pi D^2}{4}, \text{ м}^2$$

$$F_n = \frac{3,14 \cdot 0,082^2}{4} = 0,0053 \text{ м}^2.$$

Теория расчета приведена в ПРИЛОЖЕНИИ А-А.

					<i>13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		40

1. Сила от воздействия газов:

$$P_z = 10^6 * (p - p_0) * F_n, \text{ Н}, \quad (4.1)$$

где F_n – площадь поршня.

$$F_n = \pi \frac{D^2}{4}, \text{ м}^2, \quad (4.2)$$

В процессе впуска ($\alpha=0-180$ град ПКВ) принимается $p=p_a=\text{const}$; в процессе сжатия, сгорания, расширения ($\alpha=180-540$ град ПКВ) давление p принимается по данным результатов теплового расчета; в процессе выпуска ($\alpha=540-720$ град ПКВ) $p=p_r=\text{const}$.

2. Сила инерции возвратно-поступательно движущихся масс:

$$P_j = -m_l j, \text{ Н}, \quad (4.3)$$

где j – ускорение движения поршня:

$$j = w^2 r (\cos \alpha + \lambda \cos \alpha), \text{ м/с}^2; \quad (4.4)$$

m_l – масса поступательно движущихся частей:

$$m_l = m_n + 0,275 * m_{ш}, \text{ кг}. \quad (4.5)$$

3. Суммарная сила, действующая по оси цилиндра:

$$P = P_z + P_j, \text{ Н}. \quad (4.6)$$

4. Сила, действующая на стенку цилиндра:

$$N = P \operatorname{tg} \beta, \text{ Н}. \quad (4.7)$$

Величины функции $\operatorname{tg} \beta$ (β – угол отклонения оси шатуна от оси цилиндра) и других функций, используемых ниже приведены в приложении А-А.

5. Сила, действующая по оси кривошипа коленчатого вала (радиальная сила):

$$K = \frac{P \cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta}, \text{ Н}. \quad (4.8)$$

6. Тангенциальная сила:

$$T = \frac{P \sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}, \text{ Н}. \quad (4.9)$$

7. Индикаторный крутящий момент одного цилиндра:

$$M_i = Tr, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (4.10)$$

где $r = S/2$ - радиус кривошипа, м.

По результатам расчета сил, действующих в КШМ, строятся графики сил P_z, P_j, P (рисунок 4.2) и P, N, Z (рисунок 4.4)

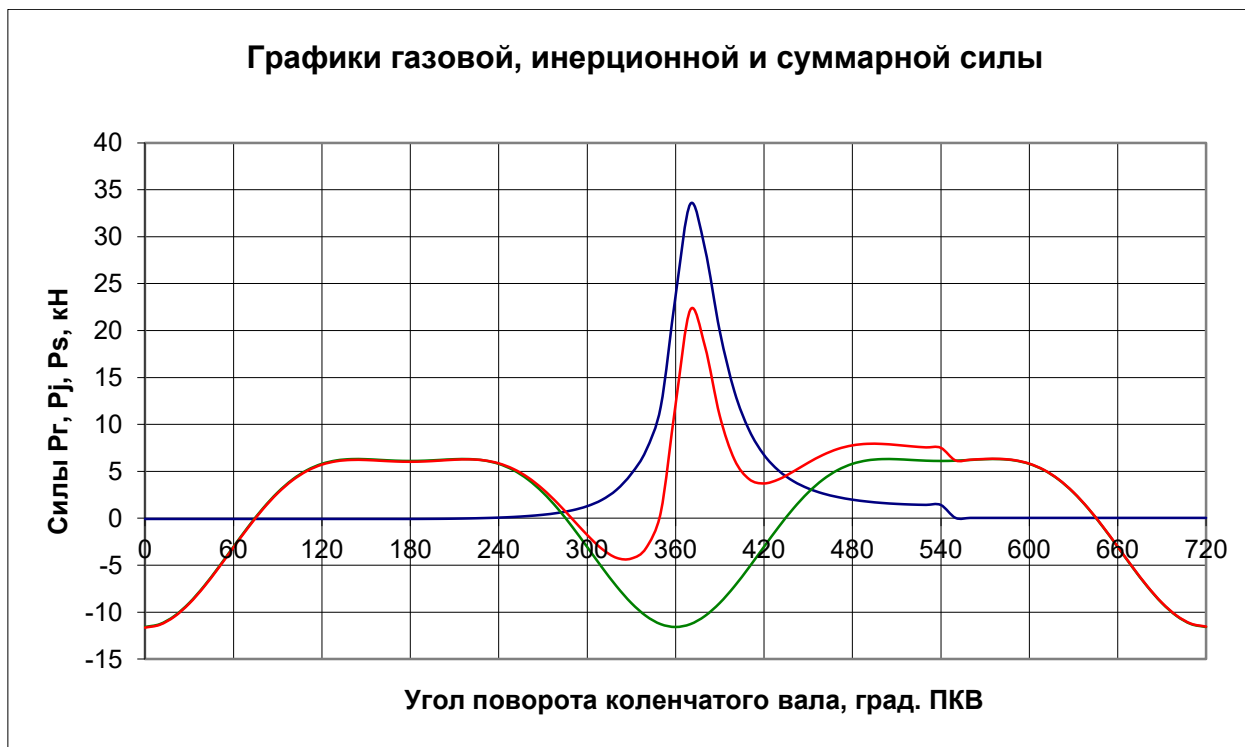


Рисунок 4.2 – Графики сил, действующих по оси цилиндров (P_z, P_j, P) в зависимости от угла ПКВ

Силы T, Tсумм, Tсумм.ср.

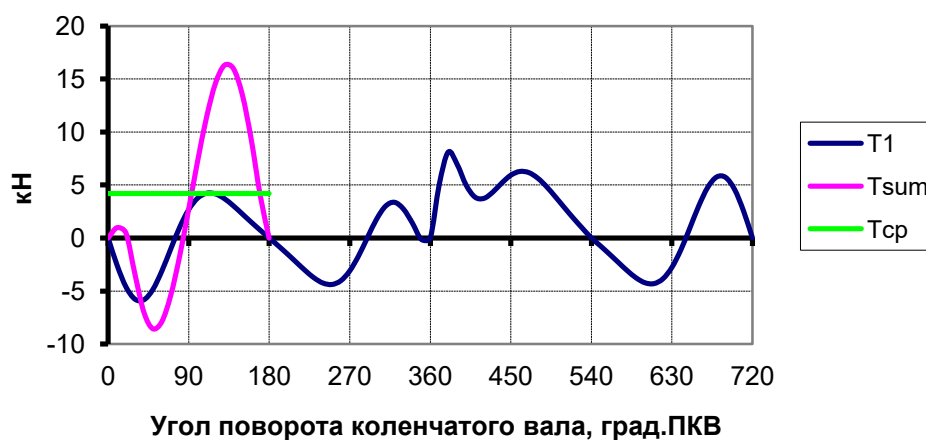


Рисунок 4.3 – Графики сил T в зависимости от угла ПКВ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

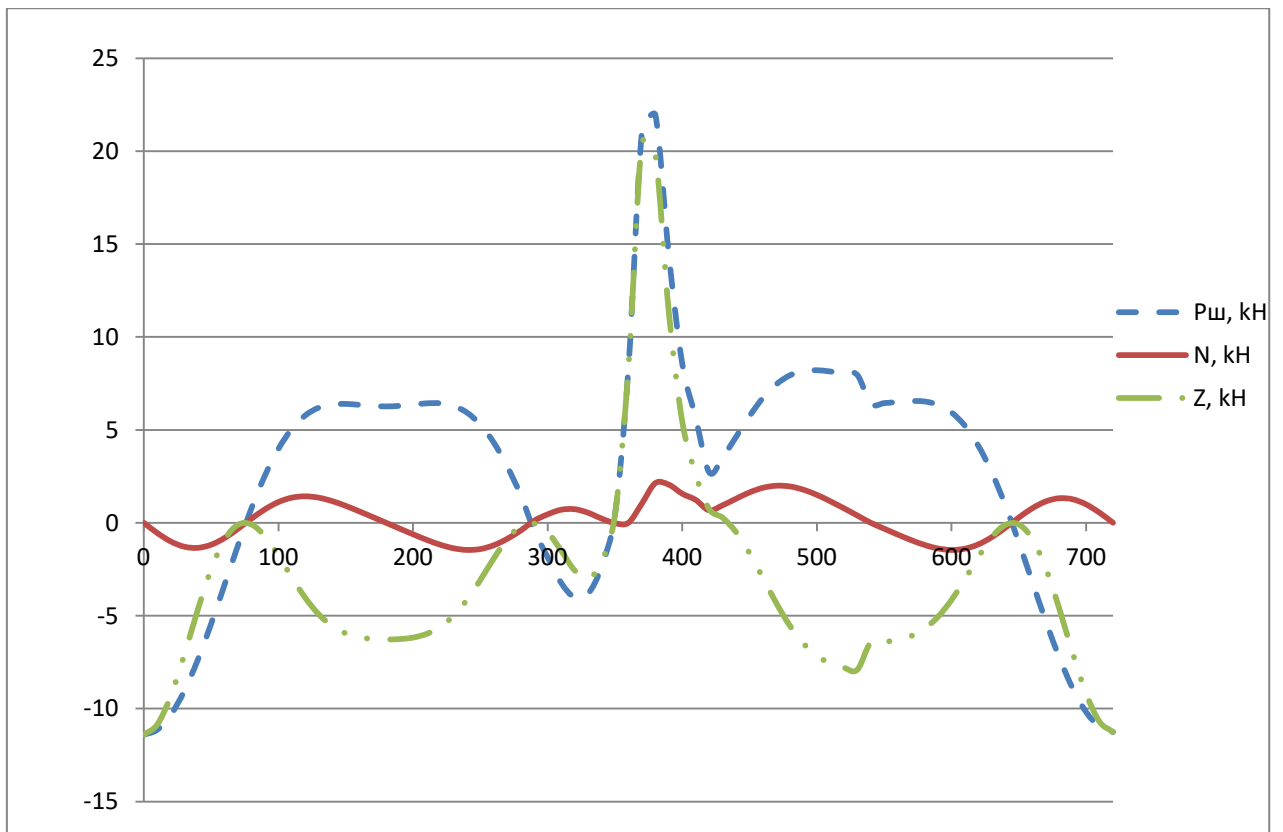


Рисунок 4.4 – графики сил P , N, Z

4.2 Проверка мощности и определение суммарного набегающего момента на шатунную шейку.

1. Индикаторный суммарный крутящий момент M_{Σ} двигателя определяется путем суммирования крутящих моментов от всех цилиндров. Величины и характер изменения крутящих моментов во всех цилиндрах по углу поворота коленчатого вала практически одинаковы и отличаются лишь угловыми интервалами, равным угловым интервалам между одноименными тактами в порядке работы цилиндров. В нашем случае, порядок работы цилиндров – 1-3-4-2

Суммарный крутящий момент можно определить табличным способом. В ПРИЛОЖЕНИИ Б-Б величины моментов.

2. Средний суммарный момент от всех цилиндров при шаге определения суммарного момента $\Delta\alpha = 10$ град ПКВ можно определить как среднеарифметическую величину по таблице 4.

$$M_{\Sigma cp} = 185,59 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (4.11)$$

3. Для учета механических потерь определим средний эффективный крутящий момент

$$M_e = M_{\Sigma cp} \eta_m = 137,7 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (4.12)$$

Эффективная мощность по данным динамического расчета

$$N_e = \frac{M_e n}{9550} = 66,4 \text{ кВт}, \quad (4.13)$$

Расхождение полученной мощности с заданной для теплового расчета составляет 2,2% , что укладывается в норматив (5%).

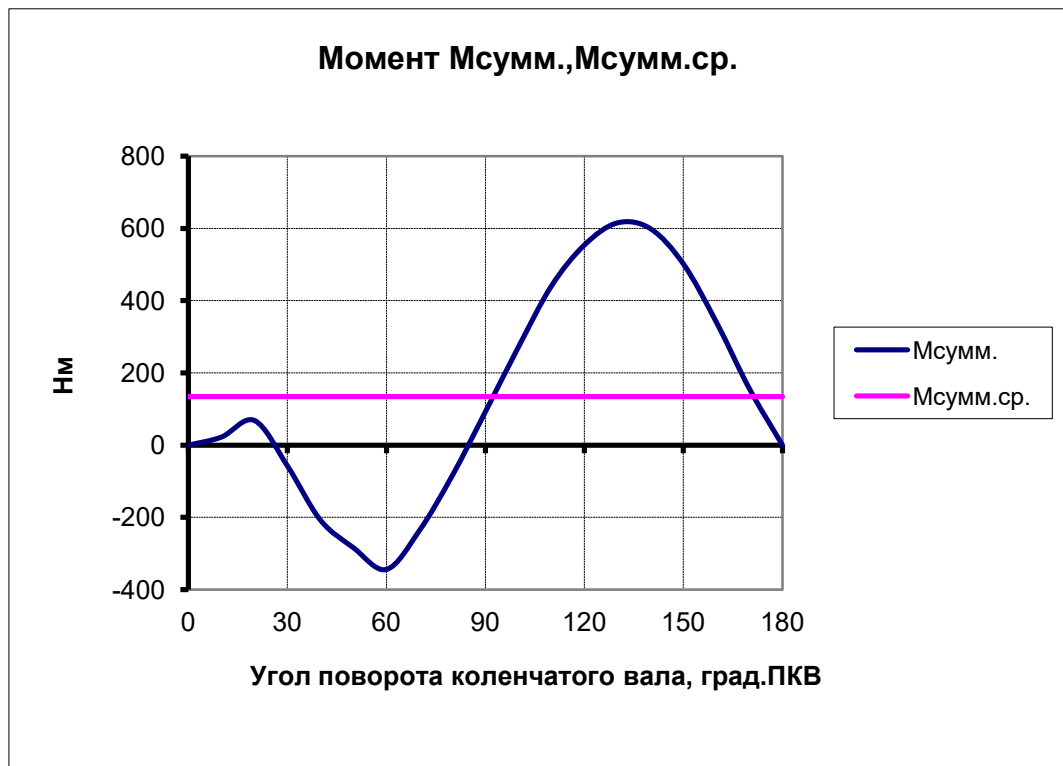


Рисунок 4.5 – Диаграмма суммарного крутящего момента

5. Момент инерции маховика составляет:

$$I_M = 0,8 I_o = 0,1025 \quad (4.14)$$

6. Масса маховика

$$m_M = \frac{4J_M}{D_{cp}^2} = 6,87 \text{ кг}, \quad (4.15)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

где $D_{cp}=0,21m$ – средний диаметр маховика,

4.3 Определение нагрузок на шатунную шейку

Для определения удельных давлений на поверхность шатунной шейки строятся диаграммы сил, действующих на эту шейку (рисунок 4,6).

1. Равнодействующая сила на шатунную шейку

$$Q_{шш} = S + K_{ру} = K + T + K_{ру} , \quad (4.16)$$

где $K_{ру}$ - сила инерции вращающихся масс шатуна:

$$K_{ру} = -0,75m_{ш}rw^2 = -6372 \text{ Н} \quad (4.17)$$

S – сила, действующая по оси шатуна.

Полярную диаграмму сил, действующих на шатунную шейку, построим в координатах Т-К относительно неподвижного кривошипа по данным приложения В-В через каждые 30 град ПКВ.

2. Для определения средней удельной нагрузки на шатунную шейку полярную диаграмму перестраивают в прямоугольные координаты $Q_{шш} = f(\alpha)$ путем измерения векторов равнодействующей силы $Q_{шш}$ на диаграмме К-Т и откладывания их абсолютных значений по вертикальной оси в координатах $Q_{шш}$ – для соответствующих углов.



Рисунок 4.6 - Развернутая диаграмма нагрузок на шатунную шейку в прямоугольных координатах

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

Лист

45

3. Максимальное удельное давление на шатунную шейку:

$$q_{шшш \max} = \frac{Q_{шшш \max}}{d_{шшш} \cdot l_{шшш}} \quad (4.18)$$

где $d_{шшш}$ – диаметр шатунной шейки:

$$d_{шшш} = 0,67 \cdot D, \quad (4.19)$$

$$d_{шшш} = 0,57 \cdot 82 = 47 \text{ мм},$$

$l_{шшш}$ – рабочая длина шатунной шейки:

$$l_{шшш} = 0,45 \cdot d_{шшш} \quad (4.20)$$

$$l_{шшш} = 0,45 \cdot 47 = 21 \text{ мм},$$

$$q_{шшш \max} = \frac{18824}{0,047 \cdot 0,021} = 19071935 \text{ Па} \approx 19,07 \text{ МПа}.$$

Таблица 4.1- Момент на шатунную и коренную шейку.

Угол	Момент 1 шшш	Момент 2 шшш	Момент 3 кшш	Момент 4 кшш
0	0,000	0,000	0,000	0,000
10	-0,047	-0,109	-0,139	-0,066
20	-0,084	-0,199	-0,260	-0,111
30	-0,106	-0,258	-0,349	-0,121
40	-0,108	-0,276	-0,397	-0,220
50	-0,091	-0,255	-0,401	-0,295
60	-0,060	-0,202	-0,363	-0,300
70	-0,023	-0,126	-0,288	-0,277
80	0,015	-0,041	-0,184	-0,153
90	0,046	0,043	-0,061	0,000
100	0,068	0,117	0,071	0,165
110	0,078	0,176	0,203	0,331
120	0,078	0,214	0,306	0,450
130	0,071	0,231	0,374	0,524
140	0,059	0,224	0,388	0,524
150	0,045	0,194	0,342	0,445
160	0,030	0,143	0,245	0,302
170	0,015	0,076	0,120	0,137
180	0,000	0,000	0,000	0,000
190	-0,015	-0,076	-0,035	0,038
200	-0,030	-0,144	-0,049	0,099
210	-0,045	-0,196	-0,029	0,199
220	-0,060	-0,228	-0,098	0,078
230	-0,072	-0,236	-0,149	-0,044

240	-0,080	-0,221	-0,139	-0,077
250	-0,082	-0,186	-0,117	-0,105
260	-0,073	-0,132	-0,013	0,021
270	-0,055	-0,064	0,098	0,165
280	-0,028	0,012	0,201	0,305
290	0,008	0,093	0,292	0,431
300	0,034	0,146	0,335	0,503
310	0,054	0,179	0,347	0,531
320	0,058	0,176	0,313	0,496
330	0,044	0,134	0,237	0,399
340	0,019	0,068	0,136	0,258
350	-0,002	0,011	0,045	0,110
360	0,000	0,000	0,000	0,000
370	0,088	0,161	0,131	0,069
380	0,179	0,328	0,268	0,153
390	0,273	0,502	0,410	0,258
400	0,237	0,414	0,294	0,125
410	0,178	0,284	0,139	-0,025
420	0,143	0,205	0,044	-0,097
430	0,092	0,102	-0,060	-0,163
440	0,104	0,135	-0,008	-0,064
450	0,116	0,177	0,073	0,070
460	0,122	0,216	0,170	0,220
470	0,120	0,248	0,275	0,373
480	0,111	0,255	0,346	0,482
490	0,096	0,246	0,388	0,548
500	0,078	0,214	0,377	0,542
510	0,058	0,160	0,309	0,457
520	0,038	0,095	0,198	0,311
530	0,019	0,036	0,080	0,141
540	0,000	0,000	0,000	0,000
550	-0,015	0,058	0,099	0,037
560	-0,031	0,118	0,213	0,099
570	-0,046	0,181	0,349	0,198
580	-0,061	0,115	0,245	0,077
590	-0,073	0,032	0,119	-0,044
600	-0,081	-0,019	0,063	-0,078
610	-0,080	-0,069	0,000	-0,104
620	-0,070	-0,036	0,083	0,024
630	-0,049	0,018	0,180	0,171
640	-0,018	0,086	0,276	0,315
650	0,020	0,160	0,358	0,443
660	0,058	0,226	0,415	0,527

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

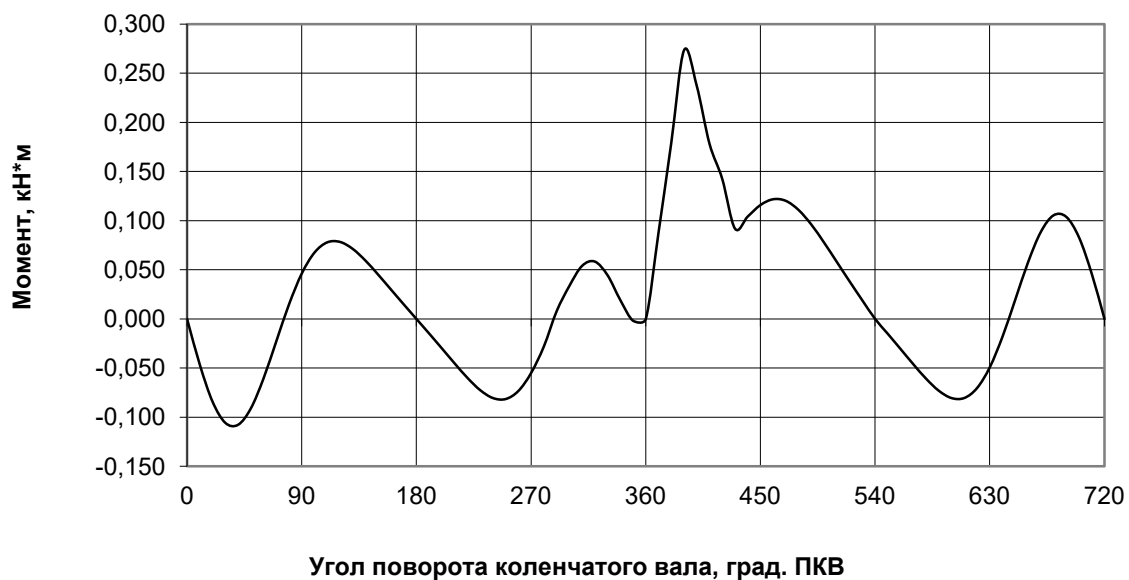
13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

Лист

47

670	0,088	0,273	0,440	0,565
680	0,105	0,288	0,425	0,543
690	0,104	0,266	0,369	0,458
700	0,083	0,204	0,272	0,321
710	0,046	0,111	0,145	0,158
720	0,000	0,000	0,000	0,000
	max	0,501541589	0,440070435	0,565387034
	min	-	-	-
	delta	0,276252931	0,400827824	-0,30047871
	delta	0,777794519	0,840898258	0,865865744

Набегающий момент на 1 шатунную шейку



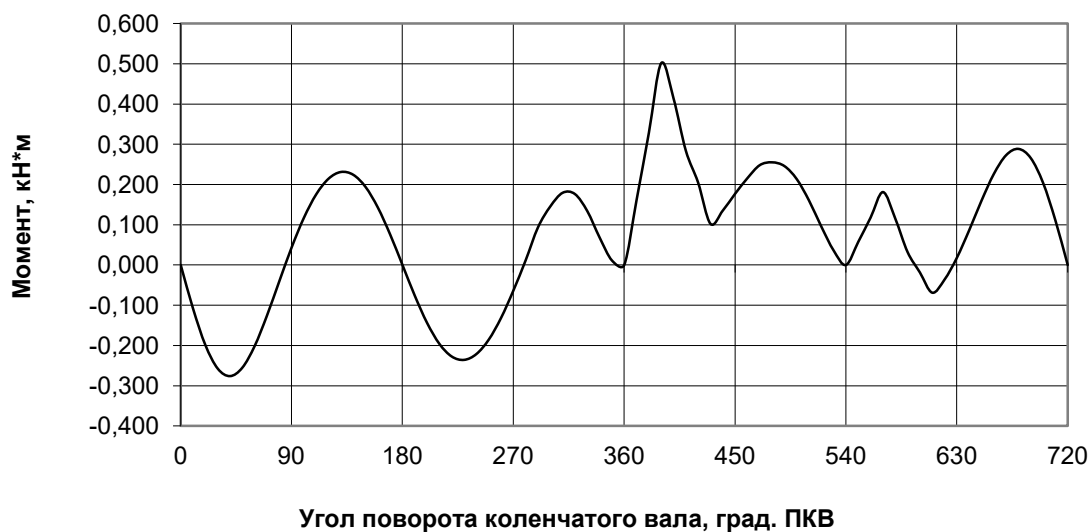
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

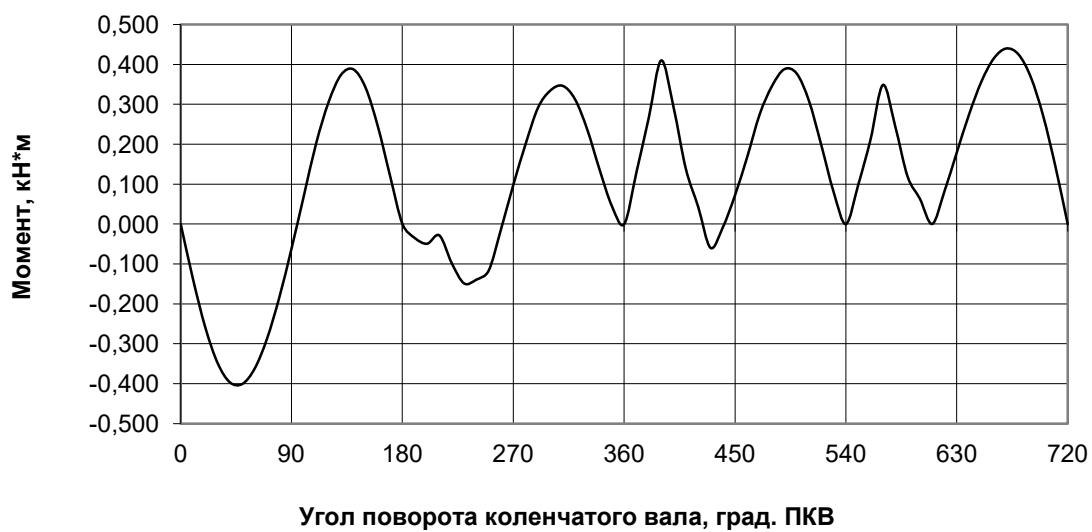
Лист

48

Набегающий момент на 2 шатунную шейку



Набегающий момент на 3 шатунную шейку



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР



Рисунок 4.7-график моментов на шатунную шейку.

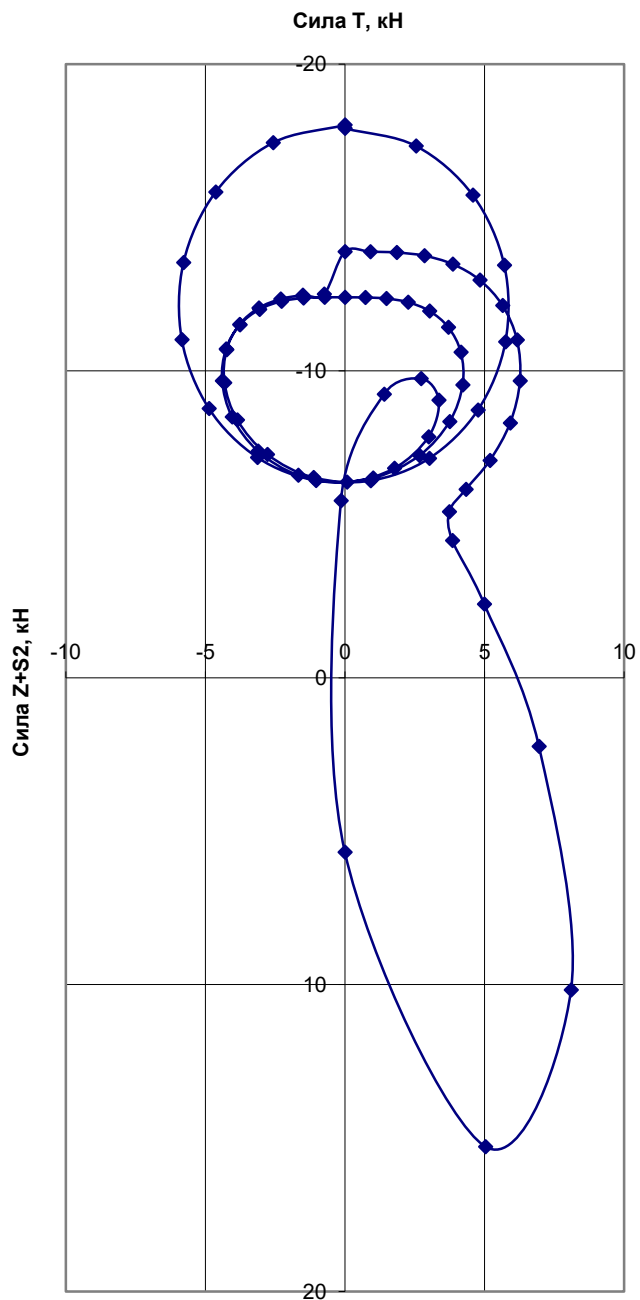
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

Лист

50

Полярная диаграмма нагрузок от силы Т,
(Z+S2)



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

Лист

51

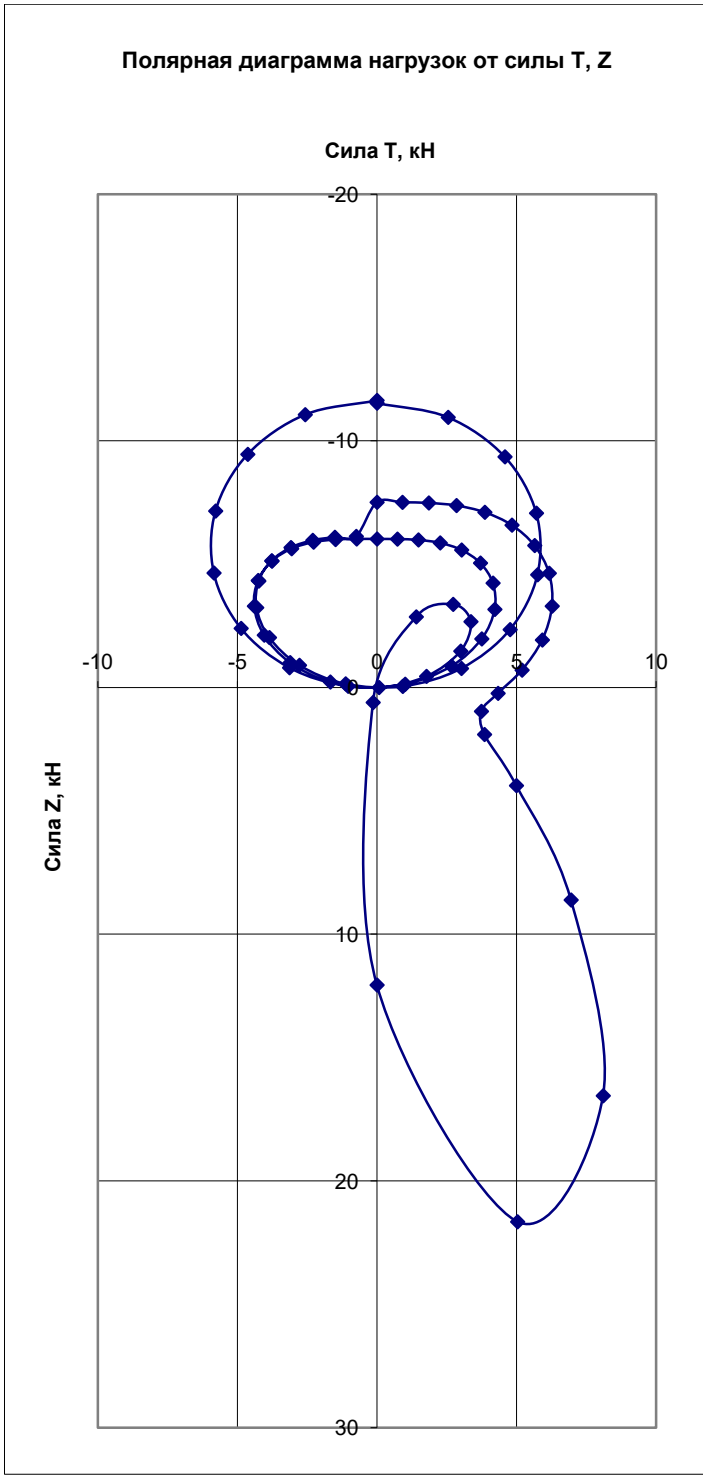


Рисунок 4.8 - Полярные диаграммы нагрузок T,Z,Z+S2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

Полярная диаграмма на шатунный подшипник

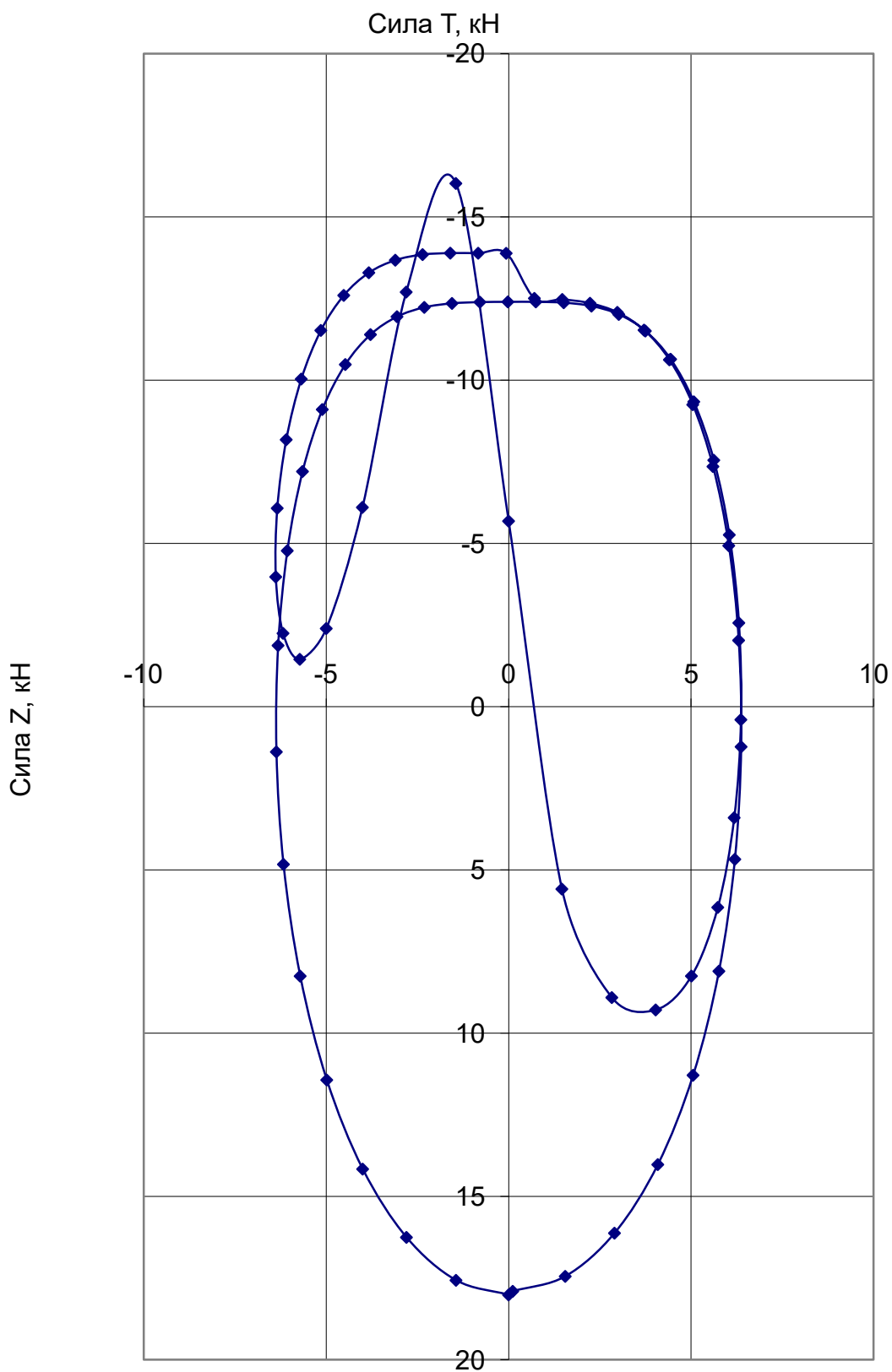


Рисунок 4.9 - Полярная диаграмма на шатунный подшипник

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

4.4 Определение суммарного набегающего момента на коренную шейку.

Таблица 4.2 - суммарный набегающий момент на коренную шейку.

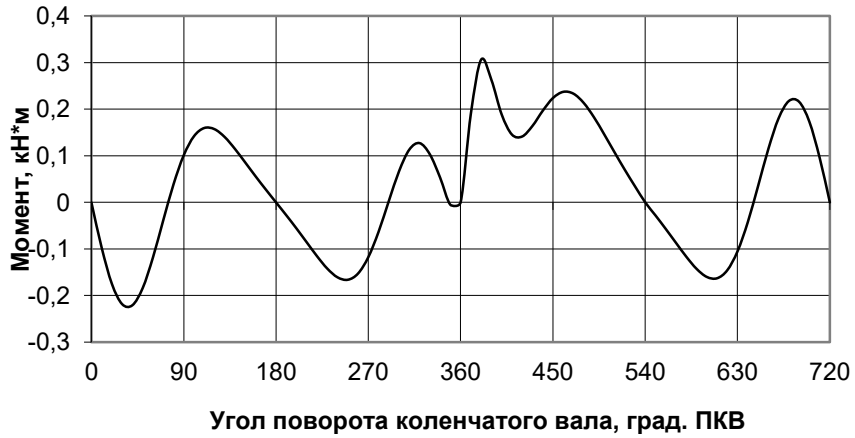
Угол	Момент 1 кШ	Момент 2 кШ	Момент 3 кШ	Момент 4 кШ	Момент 5 кШ
0	0	0	2,79051E-17	1,323E-16	2,06338E-17
10	0	0,097226947	0,124851481	-0,15295709	0,037310472
20	0	0,175013677	0,231225129	-0,28830506	0,017896896
30	0	0,218500693	0,304429551	-0,39144817	-0,12872795
40	0	0,220759508	0,336369109	-0,45295042	-0,26423434
50	0	0,184021807	0,326244191	-0,46883104	-0,32332801
60	0	0,118498711	0,279434432	-0,43950023	-0,29823011
70	0	0,039213504	0,205359008	-0,36833705	-0,20448868
80	0	0,038120387	0,114618115	-0,26031208	-0,06400232
90	0	0,100869786	0,016759785	-0,12181952	0,10195536
100	0	0,141800931	0,078561234	0,036081298	0,27316886
110	0	0,159477156	0,162243657	0,197083521	0,430245927
120	0	0,157021065	0,223967197	0,338253441	0,551674548
130	0	0,140035577	0,253326508	0,43348022	0,616158542
140	0	0,114540725	0,241614769	0,459028368	0,604955183
150	0	0,085492956	0,18854123	0,404377636	0,511956332
160	0	0,056066705	0,109144187	0,282304999	0,352412129
170	0	0,027600481	0,022315615	0,118592541	0,153024329
180	0	2,79051E-17	-8,37615E-17	1,29872E-16	2,34267E-16
190	0	0,027624535	0,162643031	0,065416084	0,037310472
200	0	0,056211452	0,249990505	0,074976828	0,017896896
210	0	0,085928859	0,176791355	-0,04170934	-0,12872795
220	0	0,115609601	0,07310647	-0,14765304	-0,26423434
230	0	0,142222384	0,003280644	-0,18074116	-0,32332801
240	0	-0,16093572	0,019665603	-0,13816431	-0,29823011
250	0	0,166145504	0,002297138	-0,04151064	-0,20448868
260	0	0,152738502	0,043571258	0,081691645	-0,06400232
270	0	0,117629571	0,106145306	0,207015092	0,10195536
280	0	0,063239697	0,173847865	0,315648797	0,27316886
290	0	0,002766502	0,235928908	0,395406064	0,430245927
300	0	0,066946133	0,28036724	0,437388304	0,551674548

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

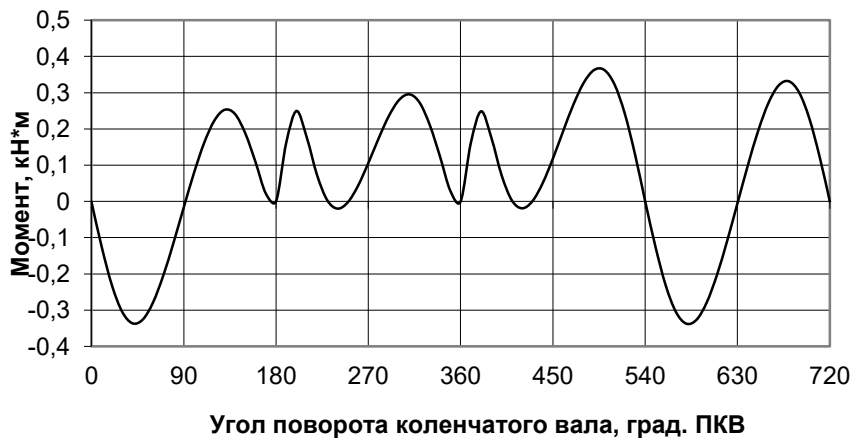
310	0	0,113290931	0,295969253	0,43600483	0,616158542
320	0	0,127074045	0,27300086	0,387541585	0,604955183
330	0	0,103048274	0,21062697	0,296119926	0,511956332
340	0	0,053077482	0,123184613	0,179251318	0,352412129
350	0	0,005284865	0,029146923	0,056747403	0,153024329
360	0	-1,11667E-16	-7,2713E-18	2,06338E-17	2,34267E-16
370	0	0,190267565	0,162161953	0,134537418	0,037310472
380	0	0,306201957	0,249122025	0,192910573	0,017896896
390	0	0,262720214	0,175701598	0,08977274	-0,12872795
400	0	0,188716071	0,072134765	-0,04347484	-0,26423434
410	0	0,145503029	0,002916176	-0,13930621	-0,32332801
420	0	0,141270117	0,018795679	-0,1797314	-0,29823011
430	0	0,163848366	0,000870328	-0,16527518	-0,20448868
440	0	0,196309759	0,050615794	-0,10212271	-0,06400232
450	0	0,223774877	0,118715145	0,001085574	0,10195536
460	0	0,237087562	0,194607625	0,131367929	0,27316886
470	0	0,233162406	0,26800227	0,270768771	0,430245927
480	0	0,213421107	0,327707351	0,394653484	0,551674548
490	0	0,182678323	0,362832035	0,476122966	0,616158542
500	0	0,145926815	0,363340414	0,490414458	0,604955183
510	0	0,107578696	0,323415102	0,426463376	0,511956332
520	0	0,070107131	0,243267942	0,296345424	0,352412129
530	0	0,034431788	0,130708713	0,125423848	0,153024329
540	0	1,04395E-16	3,18029E-16	2,06362E-16	2,34267E-16
550	0	0,028105613	0,125332559	0,064935006	0,037310472
560	0	0,057079932	0,232093609	0,074108348	0,017896896
570	0	0,087018616	0,305519308	-0,04279909	-0,12872795
580	0	0,116581306	0,337340814	-0,14862474	-0,26423434
590	0	0,142586852	0,326608659	-0,18110563	-0,32332801
600	0	0,160065797	0,278564508	-0,13729439	-0,29823011
610	0	0,162978039	0,202191543	-0,03834318	-0,20448868
620	0	0,145693965	0,107573578	0,088736182	-0,06400232
630	0	0,105059732	0,004189946	0,219584931	0,10195536
640	0	0,042479937	0,099320995	0,336408557	0,27316886
650	0	0,034839864	0,194317019	0,427479426	0,430245927
660	0	0,114286244	0,271307308	0,484728415	0,551674548
670	0	0,180153712	0,320189289	0,502867612	0,616158542
680	0	0,217413599	0,331954323	0,477881138	0,604955183
690	0	0,215836406	0,301329362	0,408908058	0,511956332
700	0	0,173160811	0,229227517	0,299334647	0,352412129
710	0	0,096276925	0,123877406	0,158309194	0,153024329
720	0	2,13633E-16	2,41538E-16	3,45934E-16	2,34267E-16
	max	0,306201957	0,363340414	0,502867612	0,616158542
	min	-	-	-0,46883104	-0,32332801

		0,220759508	0,337340814		
	delta	0,526961465	0,700681228	0,971698655	0,939486557

Набегающий момент на 2 коренную шейку



Набегающий момент на 3 коренную шейку



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.408.2019.135.ПЗ ВКР

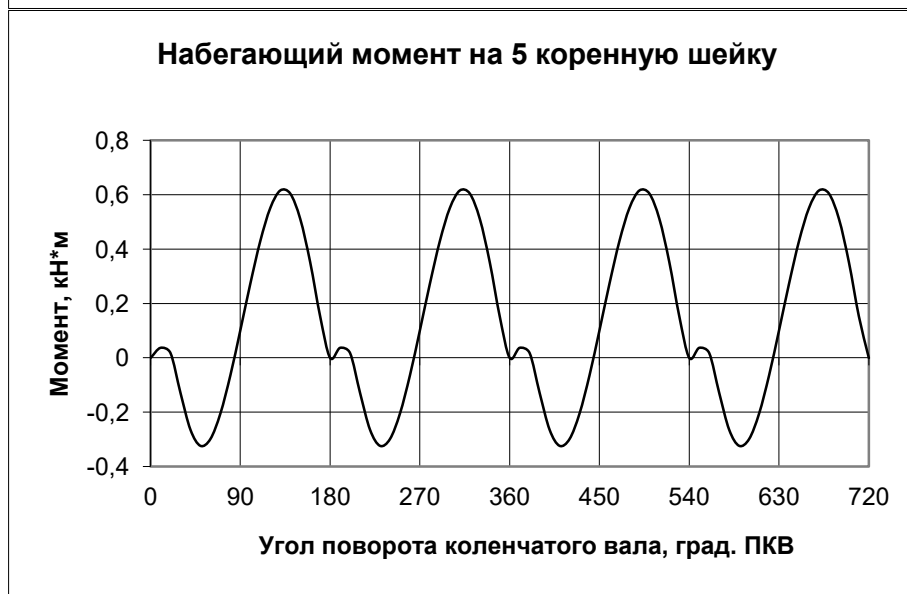
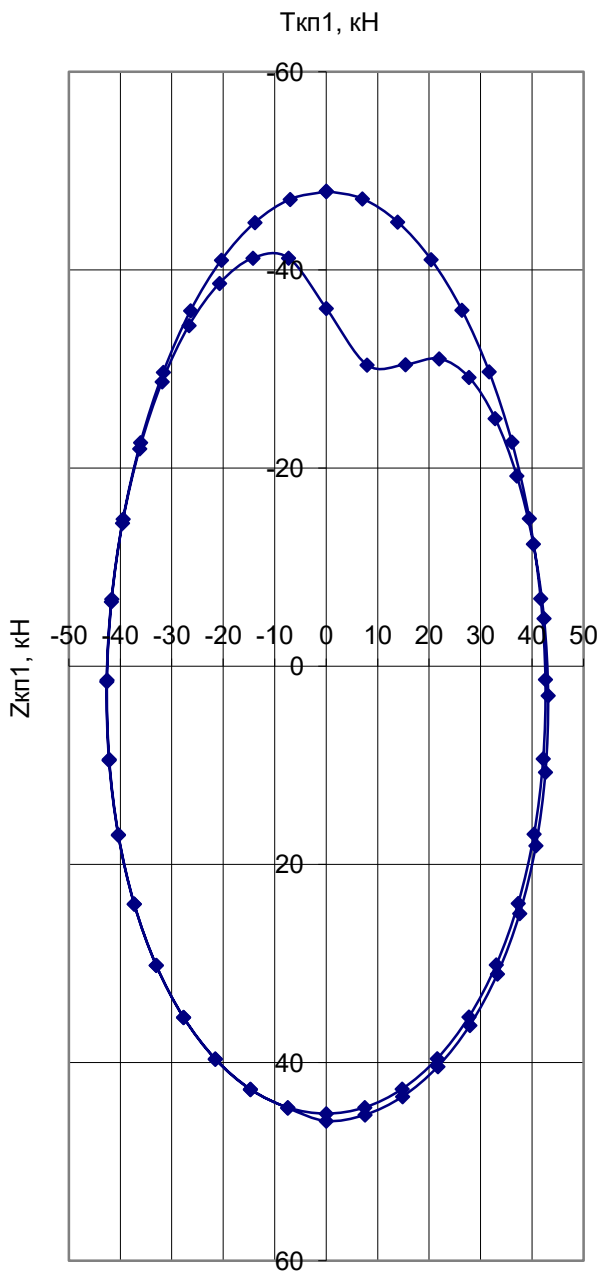


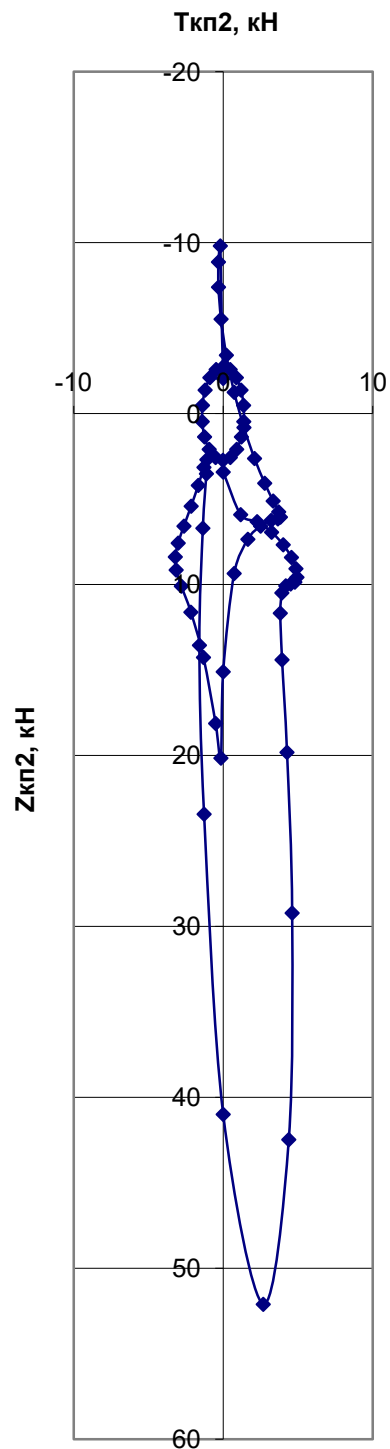
Рисунок 4.10 - набегающий момент на коренные шейки

4.5 Расчет нагрузок на коренные подшипники приведен в ПРИЛОЖЕНИИ Г-Г. Построение полярных диаграмм :

Полярная диаграмма нагрузок на 1
коренной подшипник



Полярная диаграмма
нагрузок на 2 коренной
подшипник

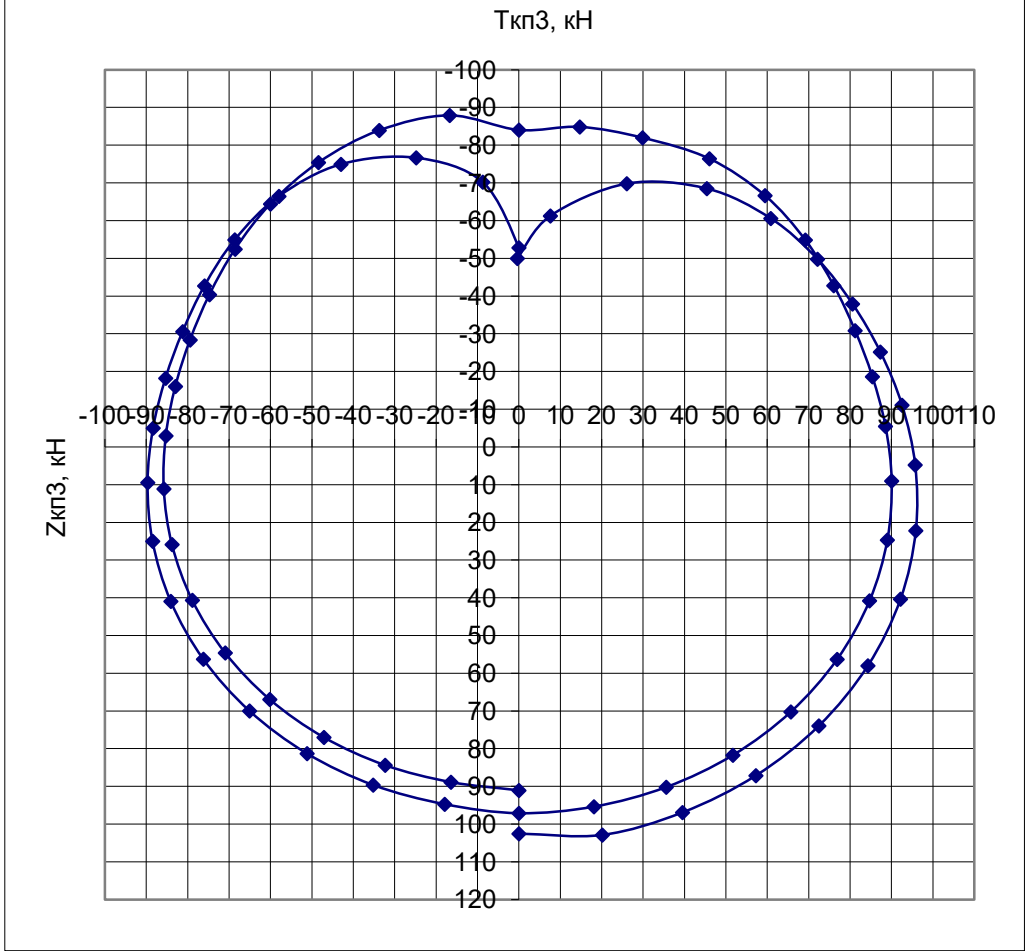


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.

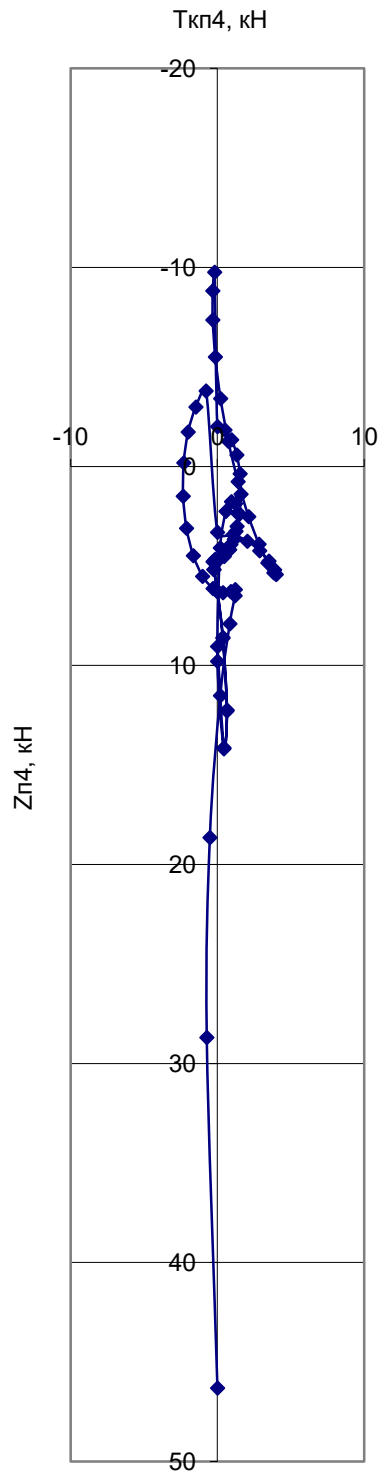
Лист

Полярная диаграмма нагрузок на 3 коренной подшипник



13.03.03.

Полярная диаграмма
нагрузок на 4 коренной
подшипник

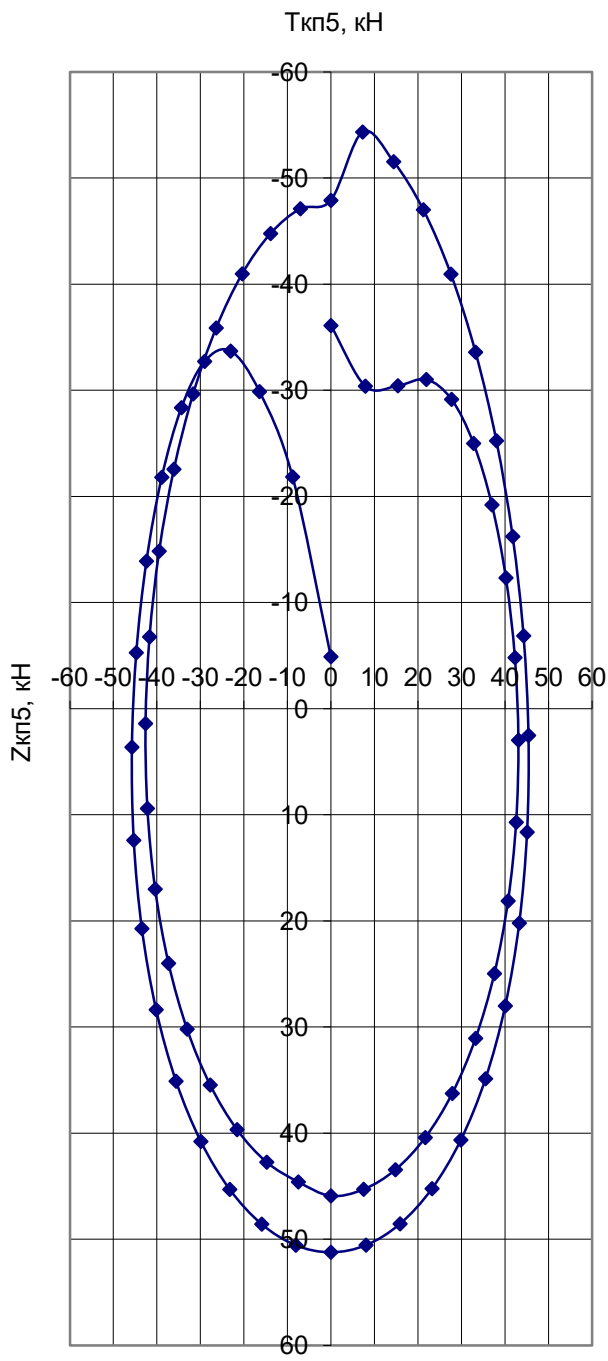


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.

Лист

Полярная диаграмма нагрузок на 5
коренной подшипник

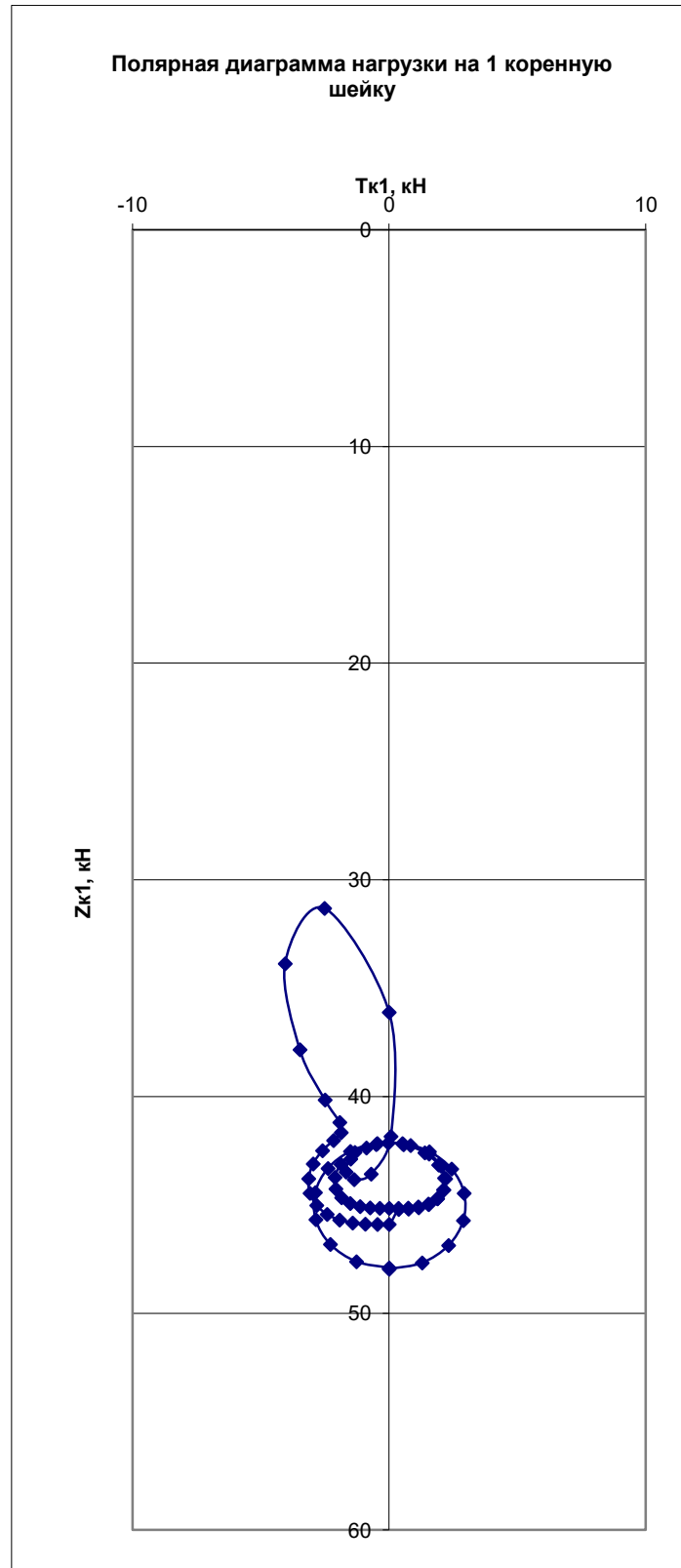


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.

Лист

4.6 Расчет нагрузок на коренные шейки приведен в ПРИЛОЖЕНИИ Д-Д. Построение полярных диаграмм нагрузок.



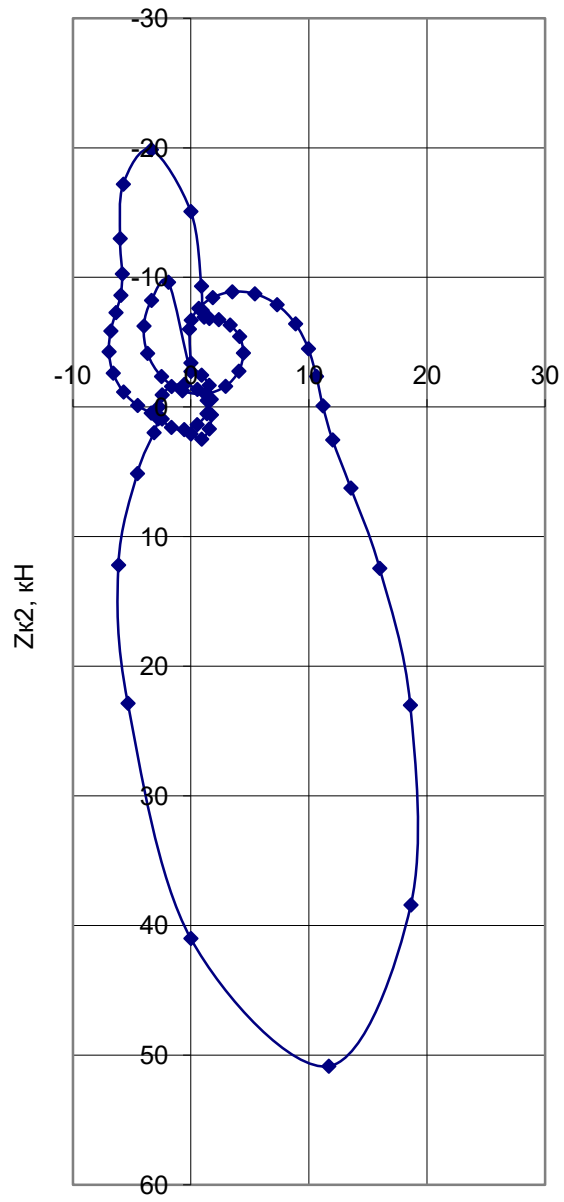
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.

Лист

Полярная диаграмма нагрузок на 2
коренную шейку

T_{k2} , кН

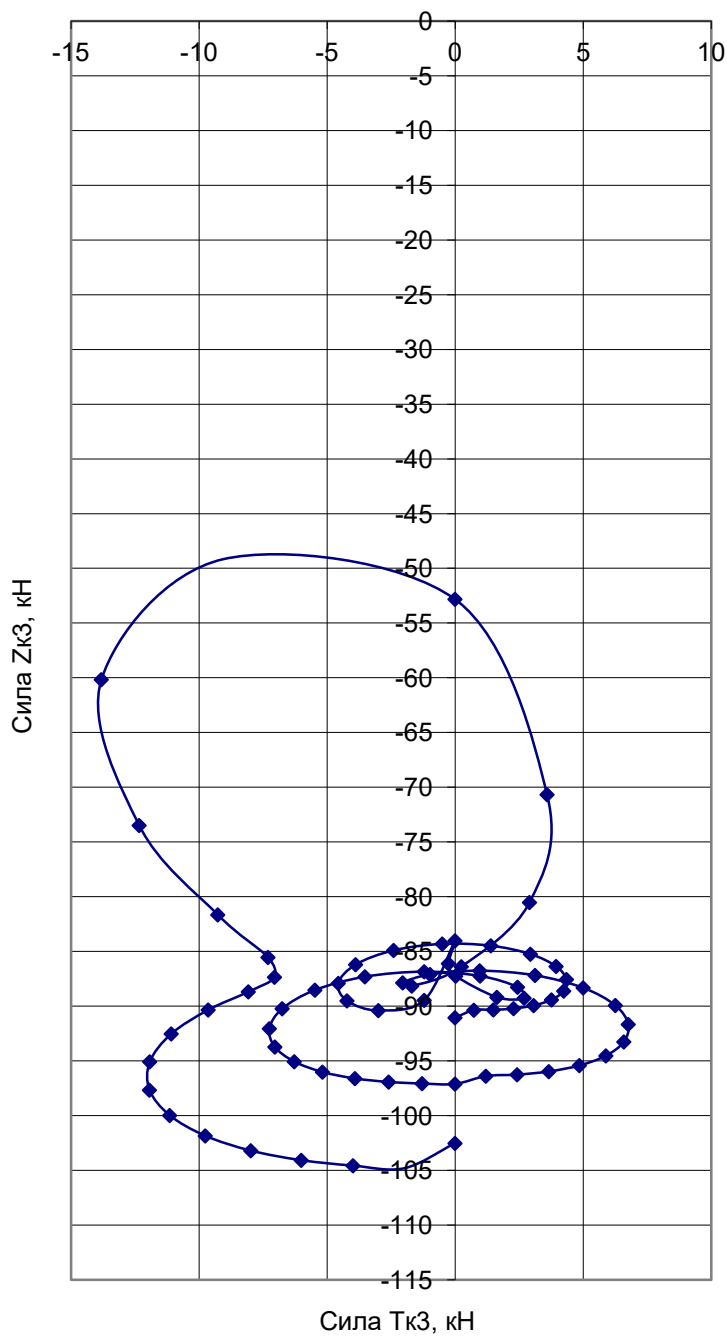


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

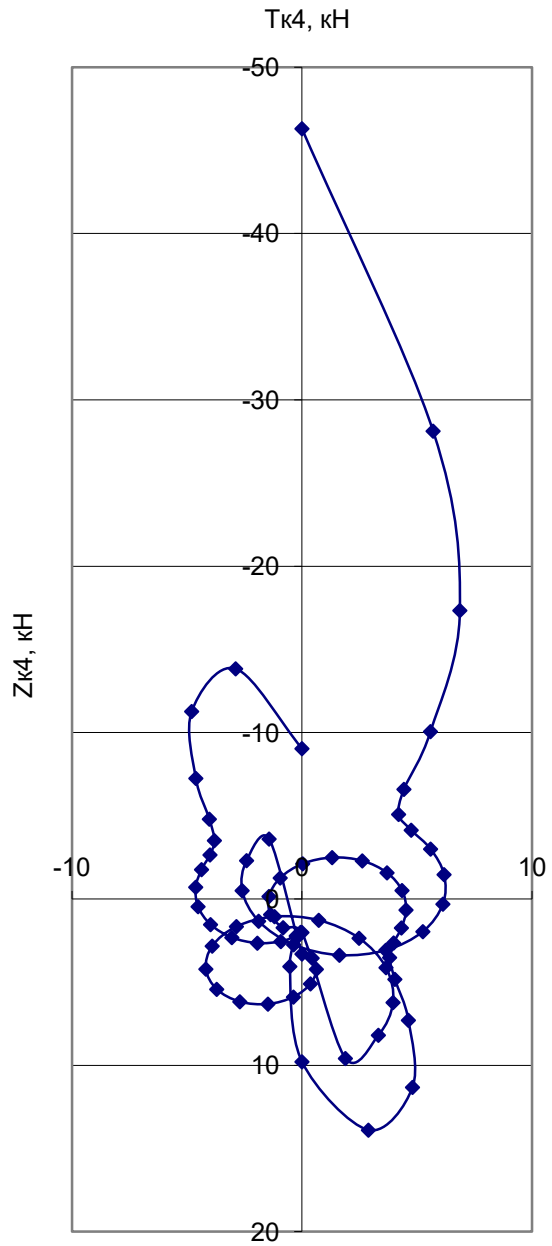
13.03.03.

Лист

Полярная диаграмма нагрузок на 3 коренную шейку



Полярная диаграмма нагрузок на 4
коренную шейку

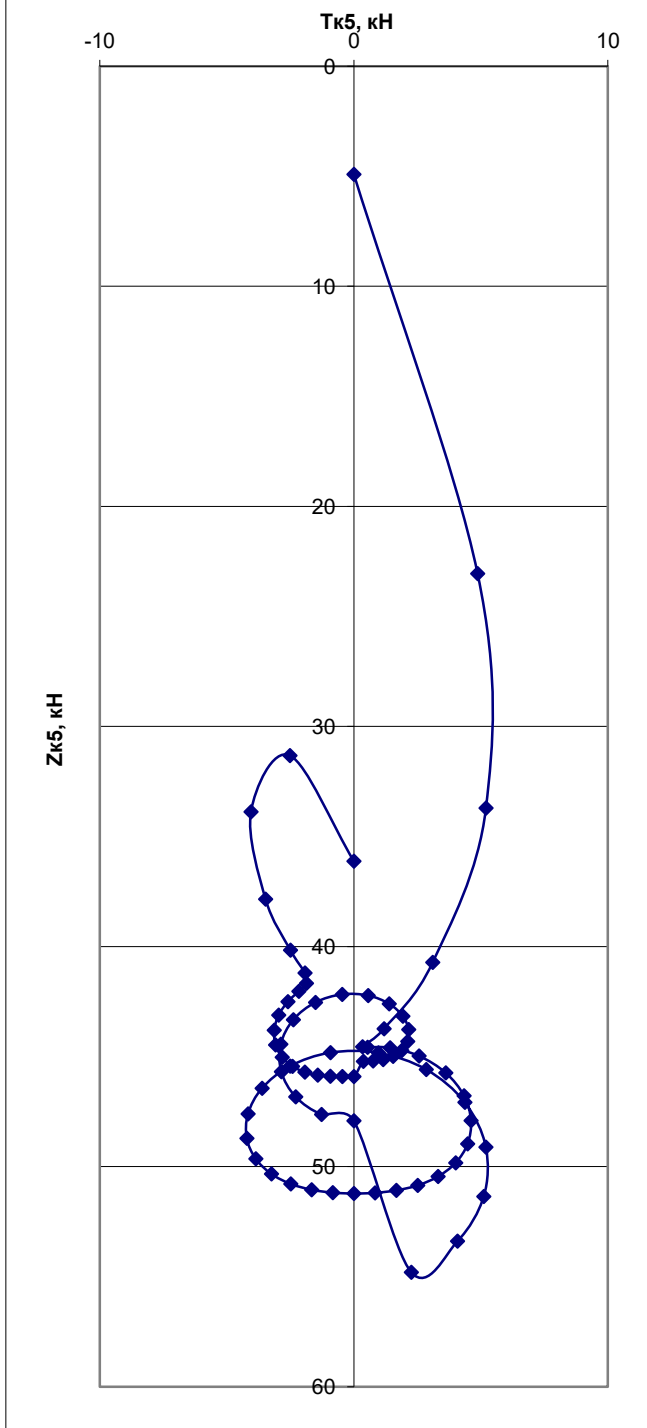


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.

Лист

Полярная диаграмма нагрузок на 5 коренную шейку



РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ КШМ

5.1 Расчет поршневой группы

Диаметры головок на основании теплового и динамического расчетов, скоростной характеристики двигателя имеем: диаметр цилиндра $D = 82$ мм, ход поршня

$S = 75,6$ мм, максимальное давление процесса сгорания $p_{\max} = 6,443$ МПа при $n = 5600$ об/мин, площадь поршня $F_{\pi} = 0,00528$ м², наибольшая нормальная сила $N_{\max} = 2,1519$ кН при $\varphi = 380^\circ$, масса поршневой группы $m_{\pi} = 0,47$ кг, максимальную частоту вращения холостого хода принимаем $n_{x.x.\max} = (1,05 - 1,2)n = 6160$ об/мин, $\lambda = 0,3123$.

В соответствии с данными двигателя-прототипа и с учетом соотношений выбираем основные конструктивные размеры поршневой группы рис. 5.1

5.1.1 Расчет поршня

Материал поршня: алюминиевый сплав

$$\alpha_{\pi} = 22 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K};$$

Материал гильзы цилиндра: чугун

$$\alpha_{\pi} = 11 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K};$$

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.03.				

D

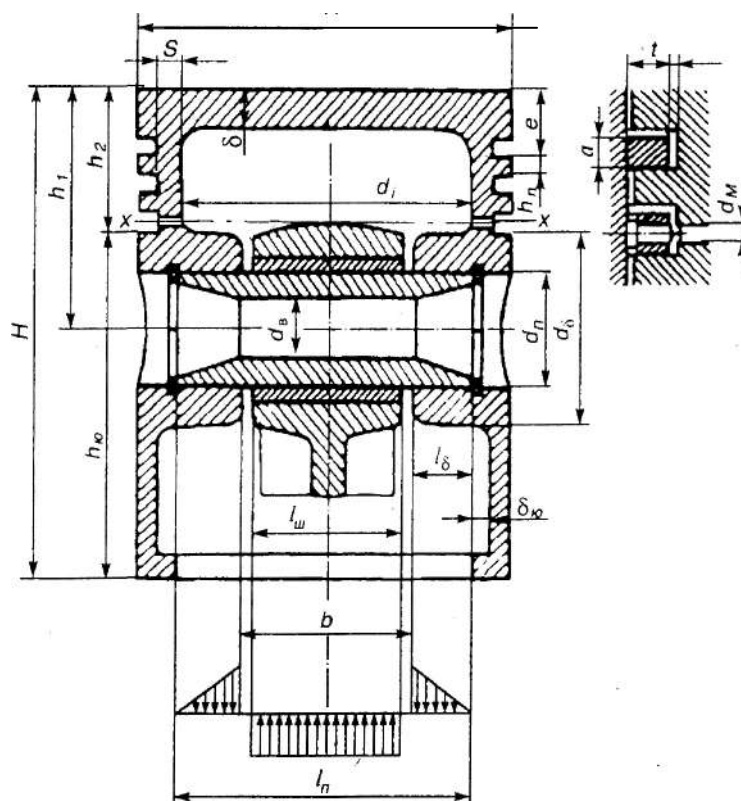


Рисунок 5.1 – Поперечный разрез поршня

Таблица 5.1 - Основные размеры:

Толщина днища поршня	$\delta=6,35$ мм
Высота поршня	$H=65,13$ мм
Высота юбки поршня	$h_{ю}= 46,2$ мм
Высота верхней части поршня	$h_1=37,9$ мм
Расстояние между торцами бобышек	$b =27,2$ мм
Толщина стенки головки поршня	$s = 7,05$ мм
Внутренний диаметр поршня	$d_i =62,46$ мм
Длина поршневого пальца	$l_n=63,84$ мм
Толщина первой кольцевой перемычки	$h_n= 3,51$ мм
Радиальная толщина кольца	$t = 3,51$ мм
Высота кольца	$a = 3$ мм
Радиальный зазор кольца в канавке	$\Delta t = 0,8$ мм
Число маслоотводящих отверстий	$n_M = 10$
Диаметр маслоотводящих отверстий	$d_M = 1,0$ мм
Внутренний радиус днища	$r_i=29,64$ мм
Высота жарового пояса	$e=7,5$ мм

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.03.

Лист

Напряжение изгиба в днище поршня:

$$\sigma_{из} = p_z \cdot \left(\frac{r_i}{\delta}\right)^2 = 140,337 \leq [\sigma_{из}] = 150 \text{ МПа} \quad (5.1)$$

Напряжение сжатия в сечении x-x

$$\sigma_{сж} = \frac{P_{z \max}}{F_{x-x}} = 31,841 \text{ МПа} \leq [\sigma_{сж}] = 40 \text{ МПа} \quad (5.2)$$

где $P_{z \max}$ – максимальная сила давления газов на днище поршня

$$P_{z \max} = p_{\max} \cdot F_n = 35339 \text{ Н} \quad (5.3)$$

F_{x-x} – площадь сечения x-x:

$$F_{x-x} = \left[\frac{\pi}{4} \cdot (d_k^2 - d_i^2) \right] - n_M^1 \cdot F^1 = 1110 \text{ мм}^2$$

Напряжение разрыва в сечении x-x

$$\sigma_p = P_j / F_{x-x} = 5142,18 / 1110,44 = 4,63 \text{ МПа} \leq [\sigma_p] = 10 \text{ МПа} \quad (5.4)$$

где P_j – сила инерции возвратно-поступательно движущихся масс

$$P_j = m_{x-x} \cdot R \cdot \omega_{x-x, \max}^2 \cdot (1 + \lambda) = 5142,18 \text{ Н} \quad (5.5)$$

Напряжение среза кольцевой перемычке

$$\tau = 0,0314 \cdot p_{\max} \cdot \frac{D}{h_n} = 4,909 \text{ МПа} \quad (5.6)$$

Напряжение изгиба кольцевой перемычки

$$\sigma_{из} = 0,0045 \cdot p_{\max} \cdot \left(\frac{D}{h_n}\right) = 16,437 \text{ МПа} \quad (5.7)$$

Суммарное напряжение:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_u^2 + 4 \cdot \tau^2} = \sqrt{154,72^2 + 4 \cdot 4,4^2} = 19,147 \text{ МПа} \leq [\sigma_{\Sigma}] = 40 \text{ МПа} \quad (5.8)$$

Максимальные удельные давления юбки и поршня на стенку цилиндра:

$$q_1 = N_{\max} \cdot 10^{-6} / (h_{ю} \cdot D) = 0,568 \text{ МПа} \quad (5.9)$$

$$q_2 = N_{\max} \cdot 10^{-6} / (H \cdot D) = 0,402 < 1 \text{ МПа} \quad (5.10)$$

где $N_{\max} = 2196 \text{ Н}$ – наибольшая нормальная сила.

и юбки поршня:

$$D_{\Gamma} = D - \Delta_{\Gamma} = 81,426 \text{ мм} \quad (5.11)$$

$$D_{ю} = D - \Delta_{ю} = 81,836 \text{ мм} \quad (5.12)$$

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.03.

где

$$\Delta_r = 0,007D = 0,574 \text{ мм},$$

$$\Delta_{ю} = 0,002D = 0,164 \text{ мм}$$

Диаметральные зазоры в горячем состоянии:

$$\Delta'_r = D \cdot [1 + \alpha_y \cdot (T_y - T_0)] - D_r \cdot [1 + \alpha_n (T_r - T_0)] = 0,1989 \text{ мм} \quad (5.13)$$

$$\Delta'_{ю} = D \cdot [1 + \alpha_y \cdot (T_y - T_0)] - D_{ю} \cdot [1 + \alpha_{ю} (T_{ю} - T_0)] = 0,1103 \text{ мм} \quad (5.14)$$

где $T_ц = 383 \text{ К}$, $T_r = 593 \text{ К}$, $T_{ю} = 413 \text{ К}$ приняты с учетом жидкостного охлаждения.

5.1.2 Расчет поршневого кольца.

Разность между величинами зазоров замка кольца в свободном и рабочем состоянии $A_0 = 3t = 3 \cdot 3,51 = 10,53 \text{ мм}$

Среднее давление кольца на стенку цилиндра

$$P_{cp} = 0,152 \cdot E \cdot \frac{A_0 / t}{(D/t - 1)^3 \cdot (D/t)} = 0,175 \text{ МПа} \quad (5.15)$$

где $E = 1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ – модуль упругости серого чугуна

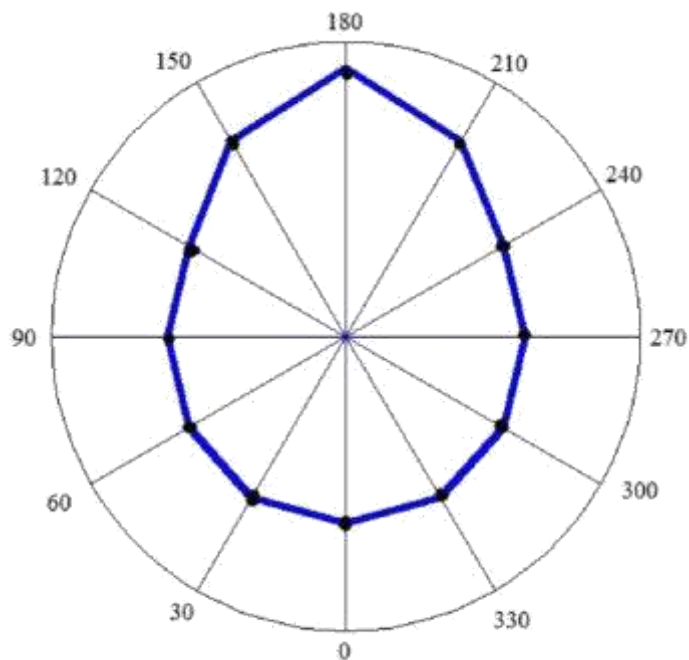


Рисунок 5.2 – Эпюра давлений компрессионного кольца

Таблица 5.2 - Давление компрессионного кольца на стенку цилиндра

Ψ, град	0	30	60	90	120	150	180
μ_k	1,05	1,04	1,02	1	1,02	1,27	1,5
P, МПа	0,183	0,182	0,178	0,175	0,178	0,222	0,262

Напряжение изгиба кольца в рабочем состоянии:

$$\sigma_{из1} = 2,61 \cdot p_{cp} \cdot (D/t - 1)^2 = 227,8 \text{ МПа} \leq [\sigma_{из}] = 450 \text{ МПа} \quad (5.16)$$

при надевании его на поршень:

$$\sigma_{из2} = \frac{4 \cdot E \cdot (1 - 0,114 \cdot A_0/t)}{m \cdot (D/t - 1,4) \cdot (D/t)} = 326,75 \text{ МПа} \leq [\sigma_{из}] = 450 \text{ МПа} \quad (5.17)$$

$m=1,57$ – коэффициент зависящий от способа надевания кольца

Монтажный зазор в замке поршневого кольца:

$$\Delta_k = \Delta'_k + \pi \cdot D [\alpha_k \cdot (T_k - T_0) - \alpha_u (T_u - T_0)] \quad (5.18)$$

$$\Delta_k = 0,3917 \text{ мм}$$

$$\Delta'_k = 0,08 \text{ мм}, T_u = 388 \text{ К}, T_k = 498 \text{ К} \text{ и } T_0 = 293 \text{ К}$$

5.1.3 Расчет поршневого пальца.

Таблица 5.3 - Геометрические размеры поршневого пальца

Наружный диаметр пальца	$d_{п} = 22 \text{ мм}$
Внутренний диаметр пальца	$d_{в} = 13,5 \text{ мм}$
Длина пальца	$L_{п} = 63,84 \text{ мм}$
Длина втулки шатуна	$L_{ш} = 29 \text{ мм}$
Материал пальца	12ХН3А ($E=2,2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$)

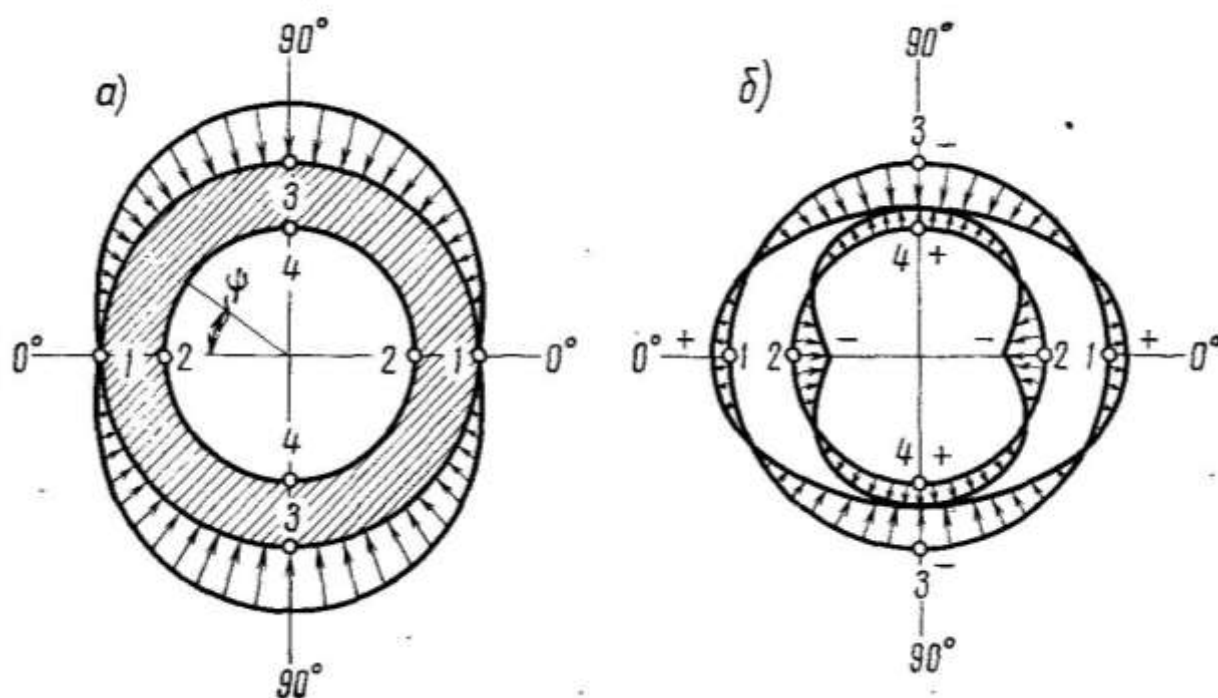


Рисунок 5.3 – Расчетная схема поршневого пальца
а) – распределение нагрузки б) – эпюры напряжений

Расчетная сила, действующая на поршневой палец:

$$P = p_{max} \cdot F_n + k \cdot P_j = 0,028M, \quad (5.19)$$

где P_j – сила инерции поршневой группы.

$$P_j = -m_n \cdot \omega_M^2 \cdot R \cdot (1 + \lambda) = -0,562 \cdot 575,6^2 \cdot 0,0378 \cdot (1 + 0,3123) \cdot 10^{-6} = -0,009MN \quad (5.20)$$

Удельное давление пальца на втулку поршневой головки шатуна

$$q_{uw} = P / (d_n \cdot l_{uw}) = 43,516MPa \leq [q_{uw}] = 60MPa$$

Удельное давление пальца на бобышки

$$q_{\delta} = P / [d_n \cdot (l_n - b)] = 34,443MPa \leq [q_{\delta}] = 50MPa$$

Напряжение изгиба пальца

$$\sigma_{uz} = \frac{P \cdot (l_n + 2b - 1,5 \cdot l_{uw})}{1,2 \cdot (1 - \alpha^4) \cdot d_n^3} = 189,227 \leq [\sigma_{uz}] = 250MPa \quad (5.21)$$

где $\alpha = d_g / d_n = 0,6136$

Касательные напряжения среза пальца в сечениях, расположенных между бобышками и головкой шатуна

$$\tau = \frac{0,85 \cdot P \cdot (1 + \alpha + \alpha^2)}{(1 - \alpha^4) \cdot d_n^2} = 113,07MPa \leq [\tau] = 250MPa \quad (5.22)$$

Максимальная овализация пальца:

$$\Delta d_{n,max} = \frac{1,35 \cdot P}{E \cdot l_n} \cdot \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 \cdot [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = 0,003mm \quad (5.23)$$

Напряжения овализации на внешней поверхности пальца:
в горизонтальной плоскости (точка 1, $\psi=0^\circ$)

$$\sigma_{\alpha 0^\circ} = \frac{15 \cdot P}{d_n \cdot l_n} \cdot \left[0,19 \frac{(2 + \alpha) \cdot (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} - \frac{1}{1 - \alpha} \right] \cdot [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] \quad (5.24)$$

$$\sigma_{\alpha 0^\circ} = 74,338 MPa$$

в вертикальной плоскости (точка 3, $\psi=90^\circ$)

$$\sigma_{\alpha 90^\circ} = -\frac{15 \cdot P}{d_n \cdot l_n} \cdot \left[0,174 \frac{(2 + \alpha) \cdot (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} + \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] \cdot [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] \quad (5.25)$$

$$\sigma_{\alpha 90^\circ} = -175,604 MPa$$

Напряжение овализации на внутренней поверхности пальца:
в горизонтальной плоскости (точка 2, $\psi=0^\circ$)

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.03.

$$\sigma_{i0^\circ} = -\frac{15 \cdot P}{d_n \cdot l_n} \cdot \left[0,19 \cdot \frac{(1+2 \cdot \alpha) \cdot (1+\alpha)}{(1-\alpha)^2 \cdot \alpha} + \frac{1}{1-\alpha} \right] \cdot [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] \quad (5.26)$$

$$\sigma_{i0^\circ} = -146,338 \text{ МПа}$$

в вертикальной плоскости (точка 4, $\psi=90^\circ$)

$$\sigma_{i90^\circ} = \frac{15 \cdot P}{d_n \cdot l_n} \cdot \left[0,174 \frac{(1+2 \cdot \alpha) \cdot (1+\alpha)}{(1-\alpha)^2 \cdot \alpha} - \frac{0,636}{1-\alpha} \right] \cdot [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] \quad (5.27)$$

$$\sigma_{i90^\circ} = 138,641 \text{ МПа}$$

5.2 Расчет шатунной группы

5.2.1 Расчет поршневой головки шатуна.

Из теплового и динамического расчета имеем: максимальное давление сгорания $p_{зд}=6,693$ МПа на режиме $n_N=5000$ об/мин при $\varphi=370^\circ$, масса поршневой группы $m_n=0,562$ кг, масса шатунной группы $m_{ш}=0,701$ кг, максимальную частоту вращения при холостом ходе $n_{х.х.}=5500$ об/мин, ход поршня $S=75,6$ мм; площадь поршня $F_n=0,00528\text{ м}^2$; $\lambda=0,3123$. Из расчета поршневой группы имеем: диаметр поршневого пальца $d_n=22$ мм и длину поршневой головки шатуна $l_{ш}=29$ мм. По таблице 5.1 [2] принимаем: наружный диаметр головки $d_r=30$ мм; внутренний диаметр головки $d=24$ мм; радиальную толщину стенки головки $h_r=(d_r-d)/2=(30-24)/2=3,01$ мм; радиальная толщина стенки втулки $s_b=(d-d_n)/2=(24-21,8)/2=1,09$ мм. Материал шатуна – сталь 40Х; $E_{ш}=2,2 \cdot 10^5$ МПа; $\alpha_r=1 \cdot 10^{-5}$ 1/К, $\mu_{ш}=0,3$. Материал втулки – бронза; $E_b=1,15 \cdot 10^5$ МПа; $\alpha_b=1,8 \cdot 10^{-5}$ 1/К, $\mu_b=0,3$.

По таблицам 4.3 и 4.5 [2] для стали 40Х: предел прочности $\sigma_B=980$ МПа; пределы усталости при изгибе $\sigma_{-1}=350$ МПа и растяжении–сжатии $\sigma_{-1P}=300$ МПа; предел текучести $\sigma_T=800$ МПа; коэффициент приведения цикла при изгибе $\alpha_\sigma=0,21$ и при растяжении–сжатии $\alpha_\sigma=0,17$.

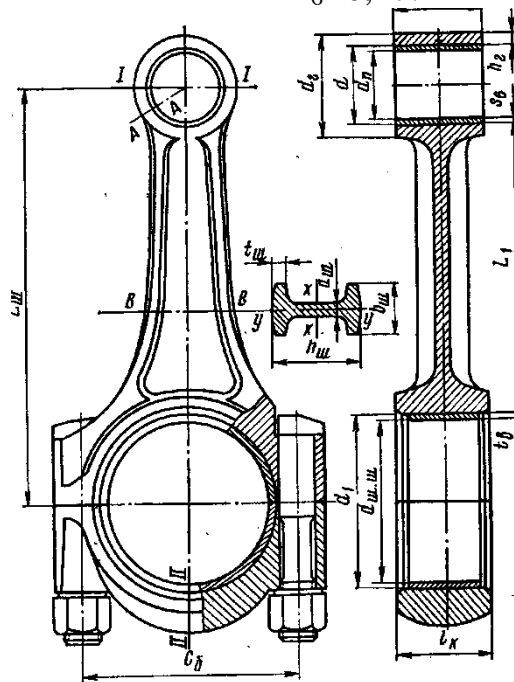


Рисунок 5.4 – Расчетная схема шатуна

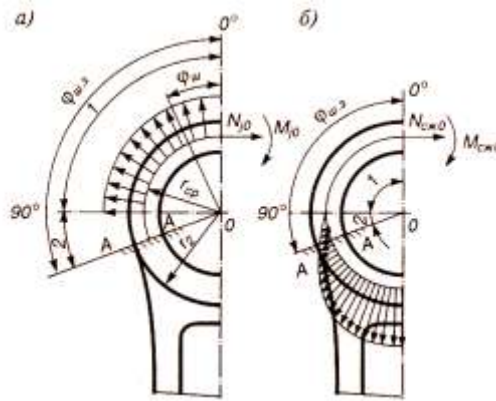


Рисунок 5.5– Распределение нагрузок на поршневую головку шатуна
а) – при растяжении б) – при сжатии

При изгибе

$$\beta_{\sigma} = \sigma_{-1} / \sigma_T = 350 / 800 = 0,438 \quad (5.28)$$

$$\text{и } (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = (0,438 - 0,21) / (1 - 0,438) = 0,404 \quad (5.29)$$

При растяжении–сжатии

$$\beta_{\sigma} = \sigma_{-1P} / \sigma_T = 300 / 800 = 0,375 \quad (5.30)$$

$$\text{и } (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = (0,375 - 0,17) / (1 - 0,375) = 0,328 \quad (5.31)$$

Расчет сечения I-I

Максимальное напряжение пульсирующего цикла

$$\sigma_{\max} = \frac{(m_{II} + m_{B.I}) \cdot \omega_{x.x,\max}^2 \cdot R \cdot (1 + \lambda) \cdot 10^{-6}}{2 \cdot h_{\Gamma} \cdot l_{III}} \quad (5.32)$$

$$\sigma_{\max} = 58,2 \text{ МПа}$$

где $m_{B.I} = 0,08 \cdot m_{III} = 0,0561 \text{ кг}$ – масса части головки выше сечения I–I.

$$\omega_{x-x,\max} = \pi \cdot n / 30 = 575,667 \text{ рад/с.} \quad (5.33)$$

Среднее напряжение и амплитуда напряжений

$$\sigma_{m0} = \sigma_{\alpha0} = \sigma_{\max} / 2 = 29,1 \text{ МПа} \quad (5.34)$$

$$\sigma_{\alpha\alpha0} = \sigma_{\alpha0} \cdot k_{\sigma} / (\varepsilon_m \cdot \varepsilon_n) = 27,113 \text{ МПа} \quad (5.35)$$

где $k_{\sigma} = 1,2 + 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot (\sigma_B - 400) = 1,2 + 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot (980 - 400) = 1,3$ эффективный коэффициент концентрации напряжений; ; $\varepsilon_m = 0,7$ определяется по таблице 48 (максимальный размер сечения) [2]; $\varepsilon_n = 2$ определяется по таблице 49 [2] (азотирование);

Так как $\frac{\sigma_{\alpha\alpha0}}{\sigma_{m0}} = 0,932 > \frac{\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}}{1 - \beta_{\sigma}} = 0,328$, то запас прочности поршневой

головки шатуна определяется по пределу усталости:

$$n_{\sigma} = \sigma_{-1P} / (\sigma_{\alpha\alpha0} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{m0}) = 9,358 \quad (5.36)$$

Напряжения от запрессованной втулки:

суммарный натяг

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta + \Delta_t = 0,0611 \text{ мм} \quad (5.37)$$

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.03.

где $\Delta=0,04$ мм – натяг посадки бронзовой втулки;
 $\Delta_r=d \cdot (\alpha_b - \alpha_r) \cdot \Delta T = 0,0211$ мм; $\Delta T = 110$ К средняя температура подогрева головки и втулки;

удельное давление на поверхности соприкосновения втулки с головкой

$$p = \frac{\Delta_{\Sigma}}{d \cdot \left[\frac{(d_r^2 + d^2)/(d_r^2 - d^2) + \mu}{E_{ш}} + \frac{(d^2 + d_n^2)/(d^2 - d_n^2) - \mu}{E_{б}} \right]} \quad (5.38)$$

$$p = 21,284 \text{ МПа}$$

где $\mu=0,3$ коэффициент Пуассона;

напряжение от суммарного натяга на внешней поверхности головки

$$\sigma'_a = p \cdot 2 \cdot d^2 / (d_r^2 - d^2) = 75,677 \text{ МПа} \quad (5.39)$$

напряжение от суммарного натяга на внутренней поверхности головки

$$\sigma'_i = p \cdot (d_r^2 + d^2) / (d_r^2 - d^2) = 96,961 \text{ МПа} \quad (5.40)$$

Расчет сечения А-А на изгиб:

максимальная сила, растягивающая головку на режиме $n=n_N$:

$$P_{jII} = -m_n \cdot R \cdot \omega^2 \cdot (1 + \lambda) = -9238,5 \text{ Н} \quad (5.41)$$

$$\text{где } \omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = 575,667 \text{ рад/с}$$

нормальная сила и изгибающий момент в сечении О–О:

$$N_{j0} = -P_{jII} \cdot (0,572 - 0,0008\varphi_{3.ш.}) = 4471,454 \text{ Н} \quad (5.42)$$

$$M_{j0} = -P_{jII} \cdot r_{cp} \cdot (0,00033 \cdot \varphi_3 - 0,0297) = 0,823 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.43)$$

где $\varphi_3 = 110^\circ$ угол заделки; $r_{cp} = (d_r + d)/4 = 13,55$ мм

нормальная сила и изгибающий момент в расчетном сечении от растягивающей силы:

$$N_{j\varphi_{3.ш.}} = N_{j0} \cdot \cos \varphi_{3.ш.} - 0,5 \cdot P_{jII} (\sin \varphi_{3.ш.} - \cos \varphi_{3.ш.}) = 4391,251 \text{ Н} \quad (5.44)$$

$$M_{j\varphi_{3.ш.}} = M_{j0} + N_{j0} \cdot r_{cp} \cdot (1 - \cos \varphi_{3.ш.}) + 0,5 \cdot P_{jII} \cdot r_{cp} \cdot (\sin \varphi_{3.ш.} - \cos \varphi_{3.ш.}) \quad (5.45)$$

$$M_{j\varphi_{3.ш.}} = 1,906 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

напряжение на внешнем волокне от растягивающей силы:

$$\sigma_{cj} = \left[2 \cdot M_{j\varphi_{3.ш.}} \cdot \frac{6 \cdot r_{cp} + h_{\Gamma}}{h_{\Gamma} \cdot (2 \cdot r_{cp} + h_{\Gamma})} + K \cdot N_{j\varphi_{3.ш.}} \right] \cdot \frac{10^{-6}}{l_{ш} \cdot h_{\Gamma}} = 203,916 \text{ МПа} \quad (5.46)$$

где $K = E_{ш} \cdot F_{\Gamma} / (E_{ш} \cdot F_{\Gamma} + E_{б} \cdot F_{б}) = 0,852$;

$F_{\Gamma} = (d_r - d) \cdot l_{ш} = 174 \text{ мм}^2$;

$F_{б} = (d - d_n) \cdot l_{ш} = 58 \text{ мм}^2$.

суммарная сила, сжимающая головку:

$$P_{сж} = (p_{z0} - p_0) \cdot F_n - m \cdot R \cdot \omega^2 \cdot (\cos \varphi + \lambda \cdot \cos 2\varphi) = 25805,178 \text{ Н} \quad (5.47)$$

нормальная сила и изгибающий момент в расчетном сечении от сжимающей силы:

$$N_{сж\varphi_{3.ш.}} = P_{сж} \cdot \left[\frac{N_{сж0}}{P_{сж}} + \left(\frac{\sin \varphi_{3.ш.}}{2} - \frac{\varphi_{3.ш.}}{\pi} \cdot \sin \varphi_{3.ш.} - \frac{1}{\pi} \cdot \cos \varphi_{3.ш.} \right) \right] = 144,51 \text{ Н} \quad (5.48)$$

								13.03.03.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

$$M_{сж\varphi_{3.ш.}} = P_{сж} \cdot r_{cp} \cdot \left[\frac{M_{сж0}}{P_{сж} \cdot r_{сж}} + \frac{N_{сж0}}{P_{сж}} \cdot (1 - \cos \varphi_{3.ш.}) - \left(\frac{\sin \varphi_{3.ш.}}{2} - \frac{\varphi_{3.ш.}}{\pi} \cdot \sin \varphi_{3.ш.} - \frac{1}{\pi} \cdot \cos \varphi_{3.ш.} \right) \right] \quad (5.49)$$

$$M_{сж\varphi_{3.ш.}} = -1,129 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где $N_{сж0}/P_{сж}=0,0009$; $M_{сж0}/(P_{сж} \cdot r_{cp})=0,0003$ определяют по таблице 52 [1],

$$a \ f(\varphi_{3.ш.}) = \frac{\sin \varphi_{3.ш.}}{2} - \frac{\varphi_{3.ш.}}{\pi} \cdot \sin \varphi_{3.ш.} - \frac{1}{\pi} \cdot \cos \varphi_{3.ш.} = 0,0047 \text{ и } f(\varphi_{3.ш.}) = 1 - \cos \varphi_{3.ш.} = 1,342$$

– по таблице 53 [2].

напряжение на внешнем волокне от сжимающей силы

$$\sigma_{\alpha сж} = \left[2 \cdot M_{сж\varphi_{3.ш.}} \cdot \frac{6 \cdot r_{cp} + h_{\Gamma}}{h_{\Gamma} \cdot (2 \cdot r_{cp} + h_{\Gamma})} + K \cdot N_{сж\varphi_{3.ш.}} \right] \cdot \frac{10^{-6}}{l_{ш} \cdot h_{\Gamma}} = -22,658 \text{ МПа} \quad (5.50)$$

минимальное и максимальное напряжения асимметричного цикла:

$$\sigma_{\max} = \sigma'_a + \sigma_{aj} = 279,668 \text{ МПа} \quad (5.51)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma'_a + \sigma_{a сж} = 53,018 \text{ МПа} \quad (5.52)$$

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 = 166,343 \text{ МПа} \quad (5.53)$$

$$\sigma_{\alpha} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 = 113,325 \text{ МПа} \quad (5.54)$$

$$\sigma_{ак} = \sigma_{\alpha} \cdot k_{\sigma} / (\varepsilon_m \cdot \varepsilon_n) = 105,586 \text{ МПа} \quad (5.55)$$

Так как $\frac{\sigma_{ак}}{\sigma_m} = 0,635 < \frac{\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}}{1 - \beta_{\sigma}} = 0,404$, то запасы прочности определяется по

пределу усталости:

$$n_{\sigma} = \sigma_{-1} / (\sigma_{ак} + \alpha_{\sigma} \sigma_m) = 2,49 \quad (5.56)$$

5.2.2 Расчет кривошипной головки шатуна.

Из динамического расчета и расчета поршневой головки шатуна имеем: радиус кривошипа $R=0,0378$ м; массу поршневой группы $m_{п}=0,562$ кг; масса шатунной группы $m_{ш}=0,701$ кг; максимальную угловую скорость холостого хода

$$\omega_{x-x \max} = \pi \cdot n / 30 = 575,667 \text{ рад/с; } \lambda=0,3123. \text{ По таблице 54 [2] принимаем:}$$

диаметр шатунной шейки $d_{шш}=46$ мм; толщина стенки вкладыша $t_b=1,8$ мм; расстояние между шатунными болтами $c_b=82,2$ мм; длина кривошипной головки $l_k=43,7$ мм.

Максимальная сила инерции

$$P_{jP} = -\omega^2 \cdot R \cdot [(m_n + m_{ш.н.}) \cdot (1 + \lambda) + (m_{ш.к.} - m_{кр})] \cdot 10^{-6} \quad (5.57)$$

$$P_{jP} = -0,0167 \text{ МН}$$

					Лист
					13.03.03.
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

где $m_{кр}=0,2m_{ш}=0,168$ кг.

Момент сопротивления расчетного сечения

$$W_{уз} = l_k \cdot (0,5 \cdot c_B - r_1)^2 / 6 = 1,68 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \quad (5.58)$$

где $r_1=0,5(d_{ш.ш}+2 \cdot t_B)=0,0253$ м – внутренний радиус кривошипной головки шатуна.

Моменты инерции вкладыша и крышки

$$J_B = l_k \cdot t_B^3 = 34,58 \cdot 1,976^3 \cdot 10^{-12} = 5,32 \cdot 10^{-10} \text{ м}^4 \quad (5.59)$$

$$J = l_k \cdot (0,5c_B - r_1)^3 = 1,46 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4 \quad (5.60)$$

Напряжение изгиба крышки и вкладыша

$$\sigma_{уз} = P_{jP} \cdot \left[\frac{0,023c_B}{(1 + J_B / J) \cdot W_{уз}} + \frac{0,4}{F_\Gamma} \right] \quad (5.61)$$

$$\sigma_{уз} = 511,757 \text{ МПа}$$

где $F_\Gamma = l_k \cdot 0,5 \cdot (c_B - d_{ш.ш.}) = 0,000754 \text{ м}^2$.

5.2.3 Расчет стержня шатуна.

Из динамического расчета имеем: $P_{сж} = P_\Gamma + P_j = 0,0247$ МН при $\varphi = 370^0$; $P_p = P_\Gamma + P_j = -0,011$ МН при $\varphi = 0^0$; длину шатуна $L_{ш} = 121$ мм. По таблице 55 [2] принимаем: $h_{ш} = 20,475$; $b_{ш} = 20,216$; $\alpha_{ш} = 4$; $t_{ш} = 4$. Из расчетов поршневой и кривошипной головок: $d = 24$ мм; $d_1 = 46$ мм; характеристика прочности материала шатуна (сталь 40Х).

Площадь и моменты инерции расчетного сечения В-В

$$F_{cp} = h_{ш} \cdot b_{ш} - (b_{ш} - \alpha_{ш}) \cdot (h_{ш} - 2 \cdot t_{ш}) = 0,0002123 \text{ м}^2 \quad (5.62)$$

$$J_X = [b_{ш} \cdot h_{ш}^3 - (b_{ш} - \alpha_{ш}) \cdot (h_{ш} - 2 \cdot t_{ш})^3] / 12 = 1,188 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \quad (5.63)$$

$$J_Y = [h_{ш} \cdot b_{ш}^3 - (h_{ш} - 2 \cdot t_{ш}) \cdot (b_{ш} - \alpha_{ш})^3] / 12 = 9,77 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \quad (5.64)$$

Максимальное напряжение от сжимающей силы:

в плоскости качания шатуна

$$\sigma_{\max .x} = K_X \cdot P_{сж} / F_{cp} = 130,07 \text{ МПа} \quad (5.65)$$

где $K_X = 1 + \frac{\sigma_e}{\pi^2 \cdot E_{ш}} \cdot \frac{L_{ш}^2}{J_X} \cdot F_{cp} = 1,118$

в плоскости, перпендикулярной плоскости качания шатуна:

$$\sigma_{\max .y} = K_Y \cdot P_{сж} / F_{cp} = 129,84 \text{ МПа} \quad (5.66)$$

где $K_Y = 1 + \frac{\sigma_e}{\pi^2 \cdot E_{ш}} \cdot \frac{L_1^2}{4J_Y} \cdot F_{cp} = 1,116$

$$L_1 = L_{ш} - (d + d_1) / 2 = 86 \text{ мм}$$

Минимальное напряжение от растягивающей силы

$$\sigma_{\min} = P_p / F_{cp} = -51,813 \text{ МПа} \quad (5.67)$$

Средние напряжения и амплитуды цикла:

$$\sigma_{mx} = (\sigma_{\max .x} + \sigma_{\min}) / 2 = 39,130 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{my} = (\sigma_{\max .y} + \sigma_{\min}) / 2 = 39,014 \text{ МПа}$$

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

13.03.03.

$$\sigma_{ax} = (\sigma_{\max x} - \sigma_{\min}) / 2 = 90,943 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{ay} = (\sigma_{\max y} - \sigma_{\min}) / 2 = 90,827 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{акx} = \sigma_{ax} \cdot k_{\sigma} / (\varepsilon_m \cdot \varepsilon_n) = 67,174 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{акy} = \sigma_{ay} \cdot k_{\sigma} / (\varepsilon_m \cdot \varepsilon_n) = 67,088 \text{ МПа}$$

где $k_{\sigma} = 1,2 + 1,8 \cdot 10^{-4} (\sigma_B - 400) = 1,2 + 1,8 \cdot 10^{-4} (980 - 400) = 1,3$; $\varepsilon_m = 0,88$ определяется по таблице 48 (максимальный размер сечения) [2]; $\varepsilon_n = 2$ определяется по таблице 49 [2] с учетом поверхностного упрочнения стержня шатуна азотированием.

Так как $\frac{\sigma_{акx}}{\sigma_{mx}} = 1,717 > \frac{\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}}{1 - \beta_{\sigma}} = 0,4044$ (см. расчет поршневой головки шатуна) и $\sigma_{акy} / \sigma_{my} = 1,720 > 0,4044$, то запасы прочности в сечении В-В определяется по пределу усталости:

$$n_{\sigma X} = \sigma_{-1P} / (\sigma_{акx} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{mx}) = 4,064$$

$$n_{\sigma Y} = \sigma_{-1P} / (\sigma_{акy} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{my}) = 4,069$$

5.2.4 Расчет шатунного болта.

Из расчета кривошипной головки шатуна имеем: максимальную силу инерции, разрывающую кривошипную головку и шатунные болты, $P_{jP} = 0,0167 \text{ МН}$. Примем: номинальный диаметр болта $d = 10 \text{ мм}$; шаг резьбы $t = 1 \text{ мм}$; количество болтов $i_{\sigma} = 2$. Материал – сталь 40ХН.

По таблице 43 и 45 [2] определяем: пределы прочности $\sigma_B = 1300 \text{ МПа}$, текучести $\sigma_T = 1150 \text{ МПа}$, усталости при растяжении–сжатии $\sigma_{-1P} = 380 \text{ МПа}$; коэффициент приведения цикла при растяжении–сжатии $\alpha_{\sigma} = 0,2$.

$$\beta_{\sigma} = \sigma_{-1P} / \sigma_T = 380 / 1150 = 0,33; (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = (0,33 - 0,2) / (1 - 0,33) = 0,195$$

Сила предварительной затяжки

$$P_{np} = (2 \div 3) \cdot P_{jP} / i_{\sigma} = 0,0167 \text{ МН. (5.68)}$$

Суммарная сила, растягивающая болт

$$P_B = P_{np} + X \cdot P_{jP} / i_{\sigma} = 0,0183 \text{ МН. (5.69)}$$

где $X = 0,2$

Максимальные и минимальные напряжения, возникающие в болте:

$$\sigma_{\max} = 4 p_B / (\pi \cdot d_{\sigma}^2) = 315,474 \text{ МПа. (5.70)}$$

$$\sigma_{\min} = 4 p_{np} / (\pi \cdot d_{\sigma}^2) = 286,794 \text{ МПа. (5.71)}$$

где $d_B = d - 1,4 \cdot t = 8,6 \text{ мм}$

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 = 301,134 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\alpha} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 = 14,34 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{ак} = \sigma_{\alpha} \cdot k_{\sigma} / (\varepsilon_m \cdot \varepsilon_n) = 73,447 \text{ МПа}$$

					13.03.03.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где $k_\sigma = 1 + q \cdot (\alpha_{k\sigma} - 1) = 4,2$; $\alpha_{k\sigma} = 4,2$ определяется по таблице 47 [2]; $q = 1$ определяется по рисунку 95 [2] при $\sigma_B = 1300$ МПа и $\alpha_{k\sigma} = 4,2$; $\epsilon_M = 1$ определяется по таблице 48 [2] при $d = 10$ мм; $\epsilon_H = 0,82$ определяется по таблице 49 [2] (грубое обтачивание).

Так как $\frac{\sigma_{ак}}{\sigma_m} = 0,244 > \frac{\beta_\sigma - \alpha_\sigma}{1 - \beta_\sigma} = 0,195$, то запасы прочности болта

определяется по пределу усталости:

$$n_\sigma = \sigma_{-1P} / (\sigma_{ак} + \alpha_\sigma \cdot \sigma_m) = 3,070$$

5.3 Расчет коленчатого вала

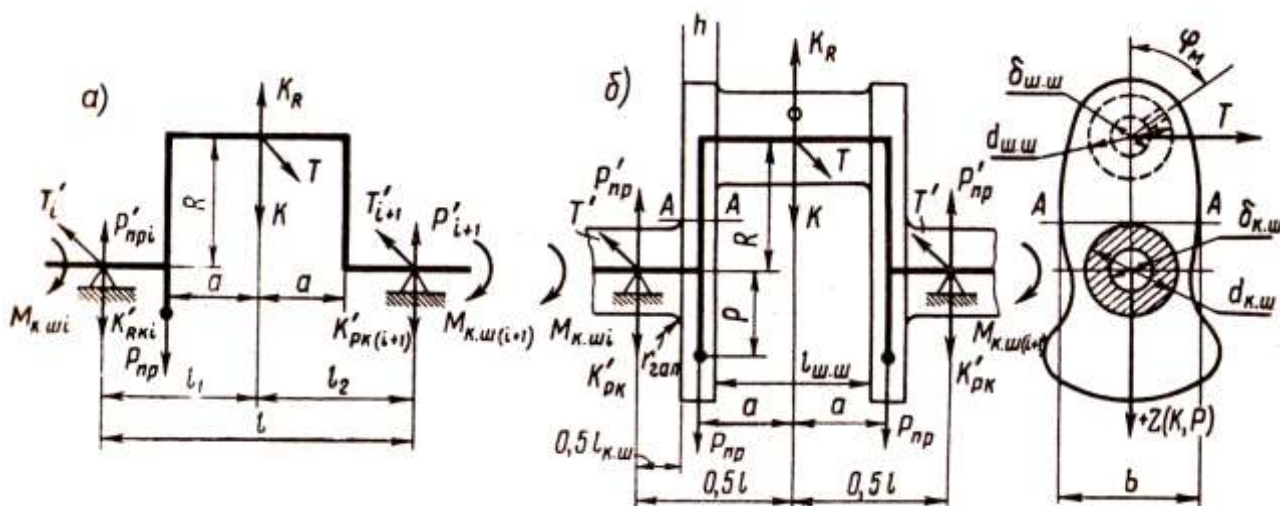


Рисунок 5.6 – Расчетная схема коленчатого вала

Выбор исходных данных.

На основании данных динамического расчета имеем: коленчатый вал с симметричными коленами, противовесами, расположенными на концах вала, центробежная сила инерции вращающихся масс $K_{R\Sigma} = -m_{R\Sigma} R \omega^2 = -6,835$ кН; радиус кривошипа $R = 37,8$ мм. С учетом соотношений, приведенных в п. 51 [1], и анализа существующих двигателей принимаем следующие размеры коленчатого вала: 1) коренная шейка – наружный диаметр $d_{к.ш.} = 50$ мм, длина $l_{к.ш.} = 27$ мм; 2) шатунная шейка – наружный диаметр $d_{ш.ш.} = 47$ мм, длина $l_{ш.ш.} = 27$ мм; внутренний диаметр $\delta_{ш.ш.} = 10$ мм; 3) расчетное сечение А–А – ширина $b = 76$ мм, толщина $h = 18$ мм. Радиус галтелей $r_{гал} = 2$ мм

Определение свойств материала вала.

Материал вала – ВЧ-60.

По таблице 46 [1] определяем: пределы прочности $\sigma_B = 600$ МПа и текучести $\sigma_T = 370$ МПа и $\tau_T = 250$ МПа; пределы усталости при изгибе $\sigma_{-1} = 340$ МПа; растяжении–сжатии $\sigma_{-1P} = 255$ МПа и кручении $\tau_{-1} = 400$ МПа; коэффициент приведения цикла при изгибе $\alpha_\sigma = 0,18$ и кручении $\alpha_\tau = 0,08$ и растяжение сжатии $\alpha_\sigma = 0,14$.

При изгибе:

$$\beta_{\sigma} = \sigma_{-1P} / \sigma_T = 340 / 370 = 0,919 \text{ и } (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = (0,919 - 0,18) / (1 - 0,919) = 0,91$$

При кручении:

$$\beta_{\tau} = \tau_{-1P} / \tau_T = 180 / 250 = 0,72; (\beta_{\tau} - \alpha_{\tau}) / (1 - \beta_{\tau}) = (0,72 - 0,08) / (1 - 0,72) = 2,3$$

При растяжении-сжатии:

$$\beta_{\sigma} = \sigma_{-1P} / \sigma_T = 255 / 370 = 0,689 (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = (0,689 - 0,14) / (1 - 0,689) = 1,8$$

Удельное давление на поверхности:

-шатунных шеек

$$k_{ш.ш. ср.} = R_{ш.ш. ср.} / (d_{ш.ш.} l'_{ш.ш.}) = 104,34 \text{ МПа} \quad (5.72)$$

$$k_{ш.ш. max.} = R_{ш.ш. max.} / (d_{ш.ш.} l'_{ш.ш.}) = 149,56 \text{ МПа} \quad (5.73)$$

где $R_{ш.ш. ср.} = 51,49 \text{ кН}$, $R_{ш.ш. max.} = 73,8 \text{ кН}$ – соответственно средняя и максимальная нагрузки на шатунную шейку; $l'_{ш.ш.} = (1/2)(l_{ш.ш.} - (2 \cdot r_{гал.} + (2...3) \text{ мм})) = 10,5 \text{ мм}$ – рабочая ширина вкладыша; $r_{гал.}$ – радиус галтели принят равным 2 мм.

-коренных шеек

$$k_{к.ш. ср.} = R_{к.ш. ср.} / (d_{к.ш.} l'_{к.ш.}) = 5,68 \text{ МПа}$$

$$k_{к.ш. max.} = R_{к.ш. max.} / (d_{к.ш.} l'_{к.ш.}) = 19,5 \text{ МПа}$$

где $R_{к.ш. ср.} = 5,97 \text{ кН}$ и $R_{к.ш. max.} = 20,5 \text{ кН}$ – максимальная нагрузка на 4 наиболее нагруженную шейку; $l'_{к.ш.} = l_{к.ш.} - (2 \cdot r_{гал.} + (2...3) \text{ мм}) = 21 \text{ мм}$ – рабочая ширина коренного вкладыша.

5.3.1 Расчет коренной шейки

Момент сопротивления коренной шейки кручению

$$W_{к.ш.} = \pi \cdot d_{к.ш.}^3 / 16 = 24,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (5.74)$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла для наиболее нагруженной коренной шейки, на которую воздействует крутящий момент, имеющий наибольший размах $\Delta M_{к.ш. max.}$:

$$\tau_{max} = M_{к.ш. max.} / W_{к.ш.} = 19,5 \text{ МПа} \quad (5.75)$$

$$\tau_{min} = M_{к.ш. min.} / W_{к.ш.} = -18,36 \text{ МПа} \quad (5.76)$$

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\tau_m = (\tau_{max} + \tau_{min}) / 2 = 0,56 \text{ МПа} \quad (5.77)$$

$$\tau_{\alpha} = (\tau_{max} - \tau_{min}) / 2 = 18,92 \text{ МПа} \quad (5.78)$$

$$\tau_{\alpha k} = \tau_{\alpha} \cdot k_{\tau} / (\varepsilon_{м\tau} \cdot \varepsilon_{н\tau}) = 36,88 \text{ МПа} \quad (5.79)$$

где $k_{\tau} = 0,6[1 + q \cdot (\alpha_{к\sigma} - 1)] = 0,6[1 + 0,71 \cdot (3,0 - 1)] = 1,45$ – коэффициент концентрации напряжений; $\alpha_{к\sigma} = 3,0$ определяется по таблице 47 [1] (по наличию в шейке масляного отверстия); $q = 0,71$ определяется по рисунку 95 [1] при $\sigma_B = 800 \text{ МПа}$ и $\alpha_{к\sigma} = 3,0$; $\varepsilon_{м\tau} = 0,62$ определяется по таблице 48 [1] при $d_{к.ш.} = 50 \text{ мм}$; $\varepsilon_{н\tau} = 1,2$ определяется по таблице 49 [1].

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.03.

Так как $\frac{\tau_{ак}}{\tau_m} = 65,88 > \frac{\beta_\tau - \alpha_\tau}{1 - \beta_\tau} = 2$, то запасы прочности болта определяется по пределу усталости:

$$n_\tau = \tau_{-1} / (\tau_{ак} + \alpha_\tau \cdot \tau_m) = 4,87$$

5.3.2 Расчет шатунной шейки

Момент сопротивления шатунной шейки кручению

$$W_{к.ш.} = \pi \cdot d_{ш.ш.}^3 / 16 \left[1 - \left(\frac{\delta_{ш.ш.}}{d_{ш.ш.}} \right)^4 \right] = 20,34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (5.80)$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла для наиболее нагруженной шатунной шейки, на которую воздействует крутящий момент, имеющий наибольший размах $\Delta M_{ш.ш. \max}$ (3-я шатунная шейка):

$$\tau_{\max} = M_{ш.ш. \max} / W_{ш.ш.} = 16,38 \text{ МПа}$$

$$\tau_{\min} = M_{ш.ш. \min} / W_{ш.ш.} = -10,8 \text{ МПа}$$

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\tau_m = (\tau_{\max} + \tau_{\min}) / 2 = 2,8 \text{ МПа}$$

$$\tau_\alpha = (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / 2 = 13,84 \text{ МПа}$$

$$\tau_{ак} = \tau_\alpha \cdot k_\tau / (\varepsilon_{м\tau} \cdot \varepsilon_{п\tau}) = 34,84 \text{ МПа}$$

где $k_\tau = 1,45$ – коэффициент концентрации напряжений; $\varepsilon_{м\tau} = 0,65$ определяется по таблице 48 [1] при $d_{ш.ш.} = 47$ мм; $\varepsilon_{п\tau} = 0,87$ определяется по таблице 49 [1]. Для внутренней поверхности шейки, на которую выходит масляное отверстие.

Так как $\frac{\tau_{ак}}{\tau_m} = 12,473 > \frac{\beta_\tau - \alpha_\tau}{1 - \beta_\tau} = 2$, то запасы прочности болта определяется по пределу усталости:

$$n_\tau = \tau_{-1} / (\tau_{ак} + \alpha_\tau \cdot \tau_m) = 5,13$$

Моменты, изгибающие шатунную шейку коленчатого вала

В плоскости, перпендикулярной плоскости колена, для сечения I-I по оси масляного отверстия

$$M_{T(I-I)} = T'_\Sigma (0,5 \cdot l - c) = 0,038 \cdot T'_\Sigma H \cdot \text{м} \quad (5.81)$$

Для сечения В-В

$$M_{T(B-B)} = T'_\Sigma 0,5l = 0,045 \cdot T'_\Sigma H \cdot \text{м} \quad (5.82)$$

$$T'_\Sigma = -\left(T_{II} \frac{0,5+c}{l} + T_{II} \frac{0,5-l}{l} \right) = -(97,92 \cdot T_{II} + 406,25 \cdot T_{II}) H; \quad (5.83)$$

Где

$$l = l_{к.ш.} + l_{ш.ш.} + 2h = 90 \text{ мм};$$

В плоскости колена для сечения I-I подсчет не производят, так как масляное отверстие на шатунной шейки целесообразно сделать в горизонтальной плоскости ($\varphi_m = 270^\circ$), следовательно, $M_{\varphi_m} = M_{T(I-I)}$;

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.03.

Для среднего сечения В-В

$$M_{K(B-B)} = M_{кр(B-B)} + M_{кR(B-B)} \quad (5.84)$$

Где

$$M_{кр(B-B)} = K'_\Sigma \cdot 0,5l = 0,045 \cdot K'_\Sigma H \cdot m; \quad (5.85)$$

$$M_{кR(B-B)} = K'_{R\Sigma} \cdot 0,5l + K_{Rud}c = 312,98 H \cdot m; \quad (5.86)$$

$$K'_{R\Sigma} = -0,5K_{R\Sigma} = 7,98 кН; \quad (5.87)$$

Расчеты моментов приведены в таблице.

Таблица 5.4-Максимальное и минимальное нормальное напряжения в шатунной шейки: в сечении I-I

φ°	Тл, кН	Тп, кН	T_Σ , кН	$M_{T(I-I)}$, Нм	$M_{T(B-B)}$, Нм	Кл, кН	Кп, кН	K'_Σ , кН	$M_{кр(B-B)}$, Нм	$M_{K(B-B)}$, Нм	$M_{из}$, Нм
0	0,0	-5,1	2178,0	83,3	98,0	-22,4	-1,4	2401,6	108,1	421,0	432,3
30	-10,8	6,2	-1761,3	-67,4	-79,3	-14,1	-1,9	1933,4	87,0	400,0	407,8
60	-6,1	10,9	-4129,0	-157,9	-185,8	-1,9	-14,1	6163,4	277,4	590,3	618,9
90	5,2	0,0	-417,4	-16,0	-18,8	-1,4	-22,4	9651,9	434,3	747,3	747,5
120	8,9	-10,8	3893,7	148,9	175,2	-8,3	-14,1	6665,1	299,9	612,9	637,5
150	5,3	-6,1	2185,5	83,6	98,3	-12,8	-1,9	1820,3	81,9	394,9	407,0
180	0,0	5,2	-2202,2	-84,2	-99,1	-13,8	-1,4	1708,9	76,9	389,9	402,3
210	-5,3	8,9	-3343,6	-127,9	-150,5	-12,9	-8,3	4579,3	206,1	519,0	540,4
240	-9,3	5,3	-1494,8	-57,2	-67,3	-8,7	-12,8	6139,4	276,3	589,2	593,1
270	-7,0	0,0	565,0	21,6	25,4	-1,9	-13,8	6003,0	270,1	583,1	583,7
300	0,4	-5,3	2234,5	85,5	100,6	-0,1	-12,9	5498,0	247,4	560,4	569,3
330	-4,0	-9,3	4281,5	163,8	192,7	5,2	-8,7	3294,3	148,2	461,2	499,8
360	0,0	-7,0	2980,7	114,0	134,1	125,5	-1,9	-9299,4	-418,5	-105,5	170,6
390	29,5	0,4	-2544,1	-97,3	-114,5	38,3	-0,1	-3034,3	-136,5	176,4	210,3
420	14,0	-4,0	575,7	22,0	25,9	4,2	5,2	-2551,9	-114,8	198,1	199,8
450	14,4	0,0	-1159,5	-44,3	-52,2	-3,9	125,5	-53033,0	-2386,5	-2073,5	2074,2
480	12,9	29,5	-13556,2	-518,5	-610,0	-12,1	38,3	-15309,2	-688,9	-375,9	716,6
510	6,8	14,0	-6481,0	-247,9	-291,6	-16,4	4,2	-471,1	-21,2	291,8	412,5
540	0,0	14,4	-6117,2	-234,0	-275,3	-17,3	-3,9	3061,6	137,8	450,7	528,2
570	-5,3	12,9	-5048,2	-193,1	-227,2	-12,7	-12,1	6158,3	277,1	590,1	632,3
600	-8,8	6,8	-2174,4	-83,2	-97,8	-8,3	-16,4	7654,7	344,5	657,4	664,7
630	-5,1	0,0	412,8	15,8	18,6	-1,4	-17,3	7467,7	336,0	649,0	649,3
660	6,2	-5,3	1736,5	66,4	78,1	-1,9	-12,7	5564,0	250,4	563,4	568,8
690	10,9	-8,8	2878,7	110,1	129,5	-14,1	-8,3	4661,9	209,8	522,8	538,6
720	0,0	-5,1	2178,0	83,3	98,0	-22,4	-1,4	2401,6	108,1	421,0	432,3

$$\sigma_{\max} = M_{\varphi \text{ м. max}} / W_{\text{ши.ш.}} = 16,1 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\min} = M_{\varphi \text{ м. min}} / W_{\text{ши.ш.}} = -50,98 \text{ МПа}$$

где $W_{\text{ши.ш.}} = 0,5 \cdot W_{\text{тш.ш.}} = 10,17 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$

											Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							

13.03.03.

в сечении В-В

$$\sigma_{\max} = M_{uz\max} / W_{\sigma u.u.} = 203,9 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\min} = M_{uz\min} / W_{\sigma u.u.} = 16,78 \text{ МПа}$$

Среднее напряжение и амплитуда напряжений:

Для сечения I-I

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 = -17,44 \text{ МПа}$$

$$\sigma_\alpha = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 = 33,54 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\sigma k} = \sigma_\alpha \cdot k_\sigma / (\varepsilon_{m\sigma} \cdot \varepsilon_{n\sigma}) = 86 \text{ МПа}$$

где $k_\sigma = 1 + q \cdot (\alpha_{k\sigma} - 1) = 1 + 0,7 \cdot (3,0 - 1) = 2,42$; $\alpha_{k\sigma} = 3,0$; $q = 0,71$; $\varepsilon_{m\sigma} = 0,69$; $\varepsilon_{n\sigma} = 0,87$.
для сечения В-В

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 = 110,34 \text{ МПа}$$

$$\sigma_\alpha = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 = 93,57 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\sigma k} = \sigma_\alpha \cdot k_\sigma / (\varepsilon_{m\sigma} \cdot \varepsilon_{n\sigma}) = 173,94 \text{ МПа}$$

Запас прочности шатунной шейки от нормальных напряжений определяются по пределу усталости (при $\sigma_m < 0$):

Для сечения I-I

$$n_\tau = \sigma_{-1} / (\sigma_{\sigma k} + \alpha_\sigma \cdot \sigma_m) = 4,1$$

Для сечения В-В по пределу текучести так как

$$\frac{\sigma_{\sigma k}}{\sigma_m} = 1,58 \pi \frac{\beta_\sigma - \alpha_\sigma}{1 - \beta_\sigma} = 9,1;$$

$$n_{T\sigma} = \sigma_T / (\sigma_{\sigma k} + \sigma_m) = 1,3$$

Общий запас прочности шатунной шейки для наиболее нагруженного сечения В-В

$$n_{u.u.} = n_{T\sigma} \cdot n_\tau / \sqrt{n_{T\sigma}^2 + n_\tau^2} = 1,26 \quad (5.88)$$

5.3.3 Расчет щеки.

Максимальное и минимальное моменты, скручивающие щеку:

$$M_{k.u. \max} = T_{\max} \cdot 0,5 \cdot (l_{k.u.} + h) = 96,33 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.89)$$

$$M_{k.u. \min} = T_{\min} \cdot 0,5 \cdot (l_{k.u.} + h) = -305,015 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.90)$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла щеки:

$$\tau_{\max} = M_{u.u. \max} / W_{\tau u.u.} = 13,87 \text{ МПа}$$

$$\tau_{\min} = M_{u.u. \min} / W_{\tau u.u.} = -43,925 \text{ МПа}$$

где $W_{\tau u.} = \mu \cdot b \cdot h^2 = 6,94 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – момент сопротивления щеки ($\mu = 0,282$ определен при $b/h = 76/18 \approx 4,22$).

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\tau_m = (\tau_{\max} + \tau_{\min}) / 2 = -15,026 \text{ МПа}$$

$$\tau_\alpha = (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / 2 = 28,9 \text{ МПа}$$

$$\tau_{\sigma k} = \tau_\alpha \cdot k_\tau / (\varepsilon_{m\tau} \cdot \varepsilon_{n\tau}) = 54,32 \text{ МПа}$$

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.03.

где $k_\tau=0,6[1+q \cdot (\alpha_{\text{к}\sigma}-1)]=0,6 \cdot [1+0,6 \cdot (1,4-1)]=0,75$ – коэффициент концентрации напряжений; $\alpha_{\text{к}\sigma}=1,4$ определяется по таблице 47 [1]; $q=0,6$; $\varepsilon_{\text{м}\tau}=0,57$; $\varepsilon_{\text{п}\tau}=0,7$ определяется по таблице 49 [1].

Запас прочности щеки от касательных напряжений определяются по пределу усталости (при $\tau_m < 0$):

$$n_\tau = \tau_{-1} / (\tau_{\text{ак}} + \alpha_\tau \cdot \tau_m) = 3,39$$

Максимальное и минимальное нормальные напряжения щеки:

$$\sigma_{\Sigma \text{max}} = M_{u, \text{ц max}} / W_{\text{щ}} + P_{\text{ц max}} / F_{\text{щ}} = -0,29 \text{ МПа} \quad (5.91)$$

$$\sigma_{\Sigma \text{min}} = M_{u, \text{ц min}} / W_{\text{щ}} + P_{\text{ц min}} / F_{\text{щ}} = -47,9 \text{ МПа} \quad (5.92)$$

где $M_{\text{и щ, max}} = 0,25 \cdot [K_{\text{сум max}} + K_{\text{Рсум}}] \cdot I_{\text{к.щ}} = -0,99 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (5.93)$

$$P_{\text{щ, max}} = 0,5 \cdot (K_{\text{сум max}} + K_{\text{Рсум}}) = -73,26 \text{ Н}; \quad (5.94)$$

$$M_{\text{и щ, min}} = 0,25 \cdot [K_{\text{сум min}} + K_{\text{сум R}}] \cdot I_{\text{к.щ}} = -160,92 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (5.95)$$

$$P_{\text{щ, min}} = 0,5 \cdot (K_{\text{сум min}} + K_{\text{сум R}}) = -11919,76 \text{ Н}; \quad (5.96)$$

$$W_{\text{щ}} = b \cdot h^2 / 6 = 4,104 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \quad (5.97)$$

$$F_{\text{щ}} = b \cdot h = 1368 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (5.98)$$

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\sigma_m = (\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}) / 2 = -24,1 \text{ МПа}$$

$$\sigma_\alpha = (\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}) / 2 = 23,81 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{ак}} = \sigma_\alpha \cdot k_\sigma / (\varepsilon_{\text{м}\sigma} \cdot \varepsilon_{\text{п}\sigma}) = 79,56 \text{ МПа}$$

где $k_\sigma = 1 + q \cdot (\alpha_{\text{к}\sigma} - 1) = 1 + 0,6 \cdot (1,4 - 1) = 1,24$; $\alpha_{\text{к}\sigma} = 1,4$; $q = 0,6$; $\varepsilon_{\text{п}\sigma} = \varepsilon_{\text{п}\tau} = 0,7$; $\varepsilon_{\text{м}\sigma} = 0,62$.

Так как $\sigma_m < 0$, то запасы прочности болта определяется по пределу усталости:

$$n_\sigma = \sigma_{-1} / (\sigma_{\text{ак}} + \alpha_\sigma \cdot \sigma_m) = 4,52$$

Общий запас прочности шатунной шейки

$$n = n_\sigma \cdot n_\tau / \sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2} = 2,71$$

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.03.

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНИЗМА ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

6.1 Профилирование кулачка

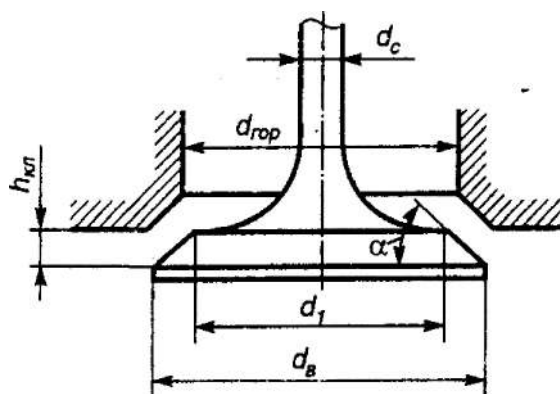


Рис. 6.1 – Расчетная схема проходного сечения в клапане

1. Основные размеры проходных сечений в горловинах и клапанах.

Площадь проходного сечения клапана:

$$F_{кл} = v_{н.ср.} \cdot \frac{F_n}{i_{кл} \cdot \omega_{вн}} = \frac{12,6 \cdot 0,00528}{2 \cdot 95} = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \quad (6.1)$$

Диаметры клапанов:

$$d_{кл.} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{кл}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3}}{3,14}} = 0,023 \quad (6.2)$$

Площадь проходного сечения седла горловины:

$$F_{гор} = 1,15 \cdot F_{кл} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \quad (6.3)$$

Диаметр горловины клапана:

$$d_{гор.} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{гор}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{3,14}} = 0,0252 \text{ м},$$

Максимальная высота подъема клапана при $\alpha = 45^\circ$.

$$h_{кл.мах} = 0,24 \cdot d_{гор} = 0,3 \cdot 0,252 = 0,00756 \text{ м}. \quad (6.4)$$

Максимальный подъем толкателя клапана:

$$h_{т.мах} = h_{кл.мах} \cdot \frac{l_T}{l_{кл}} = 0,0061 \text{ м},$$

где $l_T=40,5$ мм; $l_{кл}=49,8$ мм- расстояние от опоры до кулачка и клапана.

2. Основные размеры кулачков для впускных клапанов.

Радиус начальной окружности профиля кулачка:

$$r_0 = 2 \cdot h_{кл.мах} = 2 \cdot 7,6 = 15,1 \text{ мм}, \quad (6.5)$$

					13.03.03.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

принимаем $r_0=15$ мм.

3. Профилирование безударного кулачка, приводящего в движение один впускной клапан.

Участок набегаия и сбегания:

$$\Phi_o = \frac{\pi^2 \cdot \Delta s}{2 \cdot 180 \cdot \omega_{Ток}} = \frac{\pi^2 \cdot 0,3}{2 \cdot 180 \cdot 0,015} = 0,548 \text{ рад} \quad (6.6)$$

где $\Delta s=0,3$ мм – величина зазора, включающего в себя температурный зазор и упругие деформации ГРМ; $\omega_{Ток}=0,015$ мм/град - скорость толкателя при набегаии.

Максимальный рабочий угол кулачка:

$$\varphi_{po} = \frac{\varphi_{np} + 180 + \varphi_{зп}}{4} = \frac{20 + 180 + 45}{4} = 63^\circ \quad (6.7)$$

где $\varphi_{np}=25^\circ$, $\varphi_{зп}=45^\circ$ - соответственно угол предварительного открытия клапана и угол запаздывания закрытия клапана.

Радиус окружности тыльной части кулачка:

$$r_k = r_0 - \Delta s = 15,18 - 0,3 = 14,87 \text{ мм} \quad (7.8)$$

Угловая протяженность различных участков ускорения толкателя:

$$\Phi_1 = 0,36 \text{ рад } (21^\circ);$$

$$\Phi_2 = 0,12 \text{ рад } (7^\circ);$$

$$\Phi_3 = 0,61 \text{ рад } (35^\circ)$$

Проверка принятых величин:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \pi * \frac{\varphi_{po}}{180} = 0,36 + 0,12 + 0,61 - \pi * \frac{63}{180} = 0;$$

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_3} = \frac{0,12}{0,61} = 0,196 - \text{что находится в допустимых пределах} = 0,1 - 0,25;$$

$$\frac{\Phi_2 + \Phi_3}{\Phi_1} = \frac{0,12 + 0,61}{0,36} = 2,02 - \text{что находится в допустимых пределах} = 1,5 - 3,0.$$

Определение вспомогательных величин:

$$z = \frac{5}{8}; k_1 = 8z * \left(\frac{\Phi_2}{\pi}\right)^2 = 8 * \frac{5}{8} * \left(\frac{0,1221111}{3,1415926}\right)^2 = 0,007554; k_2 = \frac{5+z}{6} * \Phi_3^2 = \frac{5+\frac{5}{8}}{6} * 0,610555^2 = 0,349479; k_3 = \frac{4+2z}{3} * \Phi_3 = \frac{4+2*\frac{5}{8}}{3} * 0,610555 = 1,068472; K_1 = k_1 + k_2 + k_3 \Phi_2 = 0,007554 + 0,349479 + 1,068472 *$$

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.03.

Радиус окружности тыльной части кулачка:

$$r_k = r_0 - \Delta s = 15,18 - 0,3 = 14,87 \text{ мм} \quad (6.8)$$

Участок сбега кулачка:

$$h_0 = \Delta s \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi}{2\Phi_0} \varphi_{k0} \right) = 0,3 \left(1 - \cos \frac{\pi}{2 \cdot 0,548} \right) \varphi_{k0}$$

$$\omega_{T0} = \Delta s \cdot \omega_k \cdot \frac{\pi}{2\Phi_0} \sin \frac{\pi}{2\Phi_0} \varphi_{k0} = 0,3 \cdot 104,7 \frac{\pi}{2 \cdot 0,548} \sin \frac{\pi}{2 \cdot 0,548} \varphi_{k0} \quad (6.9)$$

$$j_{T0} = \Delta s \cdot \omega_k^2 \left(\frac{\pi}{2\Phi_0} \right) \cos \frac{\pi}{2\Phi_0} \varphi_{k0} = 0,3 \cdot 104,7^2 \left(\frac{\pi}{2 \cdot 0,548} \right)^2 \cdot \cos \frac{\pi}{2 \cdot 0,548} \varphi_{k0}$$

Участок положительных ускорений:

$$h_1 = \Delta s + C_{11} \varphi_{r1} - C_{12} \sin \frac{\pi}{\Phi_1} \varphi_{k1} = 0,3 + 8,759409 \varphi_{k1} - 0,905676 \sin \frac{\pi}{0,36} \varphi_{k1}$$

$$\omega_{T1} = \omega_k \left(C_{11} - C_{12} \frac{\pi}{\Phi_1} \cos \frac{\pi}{\Phi_1} \varphi_{k1} \right) = 104,7 \left(8,759409 - 0,905676 \frac{\pi}{0,36} \cos \frac{\pi}{0,36} \varphi_{k1} \right) \quad (6.10)$$

$$j_{T1} = \omega_k^2 \left[C_{12} \left(\frac{\pi}{\Phi_1} \right)^2 \sin \frac{\pi}{\Phi_1} \varphi_{k1} \right] = 104,7^2 \left[0,905676 \left(\frac{\pi}{0,36} \right)^2 \sin \frac{\pi}{0,36} \varphi_{k1} \right]$$

Первый участок отрицательных ускорений:

$$h_2 = h_{1K} + C_{21} \varphi_{K2} + C_{22} \sin \frac{\pi}{2\Phi_2} \varphi_{K2} = 3,453387 + 15,269536 \varphi_{K2} + 0,106203 \sin \frac{\pi}{2 \cdot 0,12} \varphi_{K2}$$

$$h_{1K} = \Delta s + C_{11} \Phi_1 = 0,3 + 8,759409 \cdot 0,36 = 3,453387 \text{ мм}$$

$$\omega_{T2} = \omega_k \left(C_{21} + C_{22} \frac{\pi}{2\Phi_2} \cos \frac{\pi}{2\Phi_2} \varphi_{K2} \right) = 104,7 \left(15,269536 + 0,106203 \frac{\pi}{2 \cdot 0,12} \cos \frac{\pi}{2 \cdot 0,12} \varphi_{K2} \right) \quad (6.11)$$

$$j_{T2} = \omega_k^2 \left[-C_{22} \left(\frac{\pi}{2\Phi_2} \right)^2 \sin \frac{\pi}{2\Phi_2} \varphi_{K2} \right] = 104,7^2 \left[-0,106203 \left(\frac{\pi}{2 \cdot 0,12} \right)^2 \sin \frac{\pi}{2 \cdot 0,12} \varphi_{K2} \right]$$

Второй участок отрицательных ускорений:

$$\begin{aligned}
 h_3 &= h_{2k} + C_{31}(\Phi_3 - \varphi_{\kappa 3})^4 - C_{32}(\Phi_3 - \varphi_{\kappa 3})^2 + C_{33} = 5,39 + 2,524725(0,6 - \varphi_{\kappa 3})^4 - \\
 &- 14,542415(0,6 - \varphi_{\kappa 3})^2 + 4,908065 \\
 h_{2K} &= \Delta s + C_{11}\Phi_1 + C_{21}\Phi_2 + C_{22} = 0,3 + 8,759409 \cdot 0,36 + 15,269536 \cdot 0,12 + 0,106203 = 5,39 \text{ мм} \\
 \omega_{T3} &= \omega_K \left[-4C_{31}(\Phi_3 - \varphi_{\kappa 3})^3 + 2C_{32}(\Phi_3 - \varphi_{\kappa 3}) \right] = 104,7 \left[-4 \cdot 2,524725(0,6 - \varphi_{\kappa 3})^3 + \right. \\
 &\left. + 2 \cdot 14,542415(0,6 - \varphi_{\kappa 3}) \right] \\
 j_{T3} &= \omega_K^2 \left[12C_{31}(\Phi_3 - \varphi_{\kappa 3})^2 - 2C_{32} \right] = 104,7^2 \left[12 \cdot 2,524725(0,6 - \varphi_{\kappa 3})^2 - 2 \cdot 14,542415 \right]
 \end{aligned}
 \tag{6.12}$$

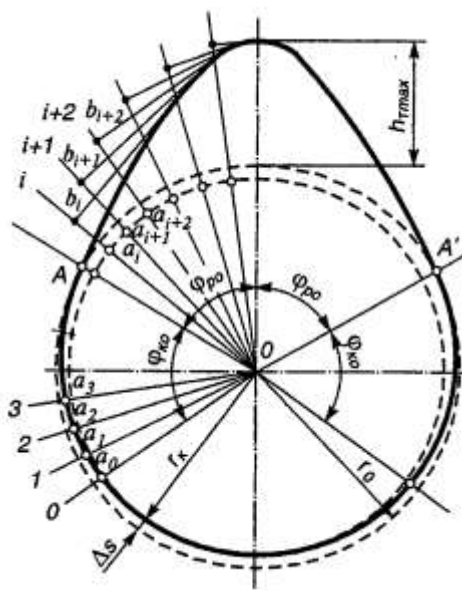


Рис. 6.2- Построение профиля выпуклого кулачка

Подставляя в (6.9), (6.10), (6.11) и (6.12) разные значения угла поворота кулачка находим текущие значения перемещения толкателя, скорости и ускорения. Данные расчетов сводим в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 - Профилирование кулачка

Фр1, град	hт, мм	ωт, м/с	jт, м/с ²
0	0,00	0,00	5926,28
1	0,01	0,35	5925,37
2	0,04	0,71	5922,67
3	0,09	1,06	5918,16
4	0,17	1,41	5911,84
5	0,26	1,76	5903,73
6	0,38	2,11	5893,81
7	0,51	2,46	5882,10
7,531367439	0,60	2,65	5875,15
Фр2, град	hт, мм	ωт, м/с	jт, м/с ²
0	6,00	0,00	-839,05
4	5,98	0,20	-837,01
8	5,90	0,40	-830,89
12	5,79	0,60	-820,72
16	5,62	0,79	-806,55
20	5,41	0,98	-788,45
24	5,16	1,16	-766,51
28	4,86	1,34	-740,84
32	4,52	1,52	-711,56
36	4,13	1,68	-678,81
40	3,71	1,84	-642,75
44	3,26	1,99	-603,56
48	2,77	2,13	-561,44
52	2,25	2,26	-516,57
63,46863256	0,59	2,56	-374,79

Минимальный радиус кривизны вершины профиля кулачка:

$$\rho_{\min} = r_k + h - 2C_{32} = 24,7 + 10,3 - 2 \cdot 14,542415 = 5,9 \text{ мм} \quad (6.13)$$

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.03.					

Максимальный радиус кривизны профиля кулачка:

$$\rho_{max} = r_k + \Delta s + \frac{C_{11}\Phi_1}{2} + C_{12} \left[\left(\frac{\pi}{\Phi_1} \right)^2 - 1 \right] = 24,7 + 0,3 + \frac{8,759409 \cdot 0,36}{2} + 0,905676 \left[\left(\frac{\pi}{0,36} \right)^2 - 1 \right] = 94,6 \text{ мм}$$

6.2 Расчет пружины толкателя

Материал пружин – пружинная сталь, $\tau_{-1}=300$ МПа, $\sigma_B=1500$ МПа.

Суммарная масса клапанного механизма, $M_{кл}$:

$$M_{кл} = 180 \cdot 2,16 \cdot 10^{-3} = 0,39 \text{ кг}$$

Максимальная сила упругости пружин

$$P_{np}^{max} = M_{кл} K a \omega_k^2 = 0,39 \cdot 1,4 \cdot 0,0291 \cdot 104,7^2 = 174 \text{ Н}$$

где $K=1,4$ – коэффициент запаса;

Минимальная сила упругости пружин:

$$P_{np}^{min} = M_{кл} K (r_0 - \rho_{min}) \omega_k^2 = 0,39 \cdot 1,4 \cdot 0,0191 \cdot 104,7^2 = 114 \text{ Н.} \quad (6.14)$$

Жесткость пружины:

$$c = M_{кл} \cdot k \cdot \omega_k^2 = 0,39 \cdot 1,4 \cdot 104,7^2 = 5,99 \text{ кН/м.} \quad (6.15)$$

Деформация пружины:

- предварительная

$$f_{min} = (r_0 - r_2) \cdot \frac{l_{кл}}{l_T} = 114 / 5990 = 0,019 \text{ м;} \quad (6.16)$$

- полная

$$f_{max} = f_{min} + h_{кл,max} = 0,019 + 0,01 = 0,029 \text{ м} \quad (6.17)$$

Распределение усилий между наружной и внутренней пружинами:

- внутренняя пружина

$$P_{np.s.}^{max} = 0,35 \cdot P_{np}^{max} = 0,35 \cdot 174 = 60,9 \text{ Н}$$

$$P_{np.s.}^{min} = 0,35 \cdot P_{np}^{min} = 0,35 \cdot 114 = 39,9 \text{ Н}$$

- наружная пружина:

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.03.

$$P_{np.n.}^{max} = P_{np}^{max} - P_{np.в.}^{max} = 174 - 60,9 = 113,1H;$$

$$P_{np.n.}^{min} = P_{np}^{min} - P_{np.в.}^{min} = 114 - 39,9 = 74,1H.$$

Жесткость наружной и внутренней пружин:

$$C_{np.n.} = 3,89кН / м;$$

$$C_{np.в.} = 2,096кН / м$$

Основные конструктивные размеры пружины:

- диаметр втулки клапана $d_{вт} = 20$ мм;

- диаметр проволоки: $\delta_{np.n.} = 3,6$ мм; $\delta_{np.в.} = 2,4$ мм;

- средний диаметр пружин $D_{np.n.} = 28$ мм; $D_{np.в.} = 19$ мм.

- число рабочих витков пружин

$$i_{p.в.} = \frac{G \cdot \delta_{np.n.}^4 \cdot f_{max}}{8 \cdot P_{np.n.}^{max} \cdot D_{np.n.}^3} = \frac{8,3 \cdot 0,35^4 \cdot 2,9}{8 \cdot 113,110^{-6} \cdot 3,8^3} = 7,3;$$

$$i_{p.n.} = \frac{G \cdot \delta_{np.в.}^4 \cdot f_{max}}{8 \cdot P_{np.в.}^{max} \cdot D_{np.в.}^3} = \frac{8,3 \cdot 0,25^4 \cdot 2,2}{8 \cdot 60,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5^3} = 7,4.$$
(6.18)

где $G=8,3$ – модуль упругости второго рода, МН/см²;

Полное число витков пружин: $i_{n.n.} = 9,3;$
 $i_{n.в.} = 9,4.$

Длина пружин при полном открытии клапана:

$$L_{н.мин} = i_{n.n.} \cdot \delta_{кр.n.} + i_{p.n.} \cdot \Delta_{мин} = 9,3 \cdot 3,5 + 7,3 \cdot 0,3 = 34,74мм$$

$$L_{в.мин} = 9,4 \cdot 2,2 + 7,4 \cdot 0,3 = 22,9мм$$
(6.19)

$$L_{мин} = L_{н.мин} = 34,74 мм,$$

Длина пружин при закрытом клапане:

$$L_0 = L_{мин} + h_{кл.маx} = 34,74 + 10 = 44,74 мм$$
(6.20)

Длина свободных пружин:

$$L_{н.св.} = L_{н.мин} + f_{max} = 34,74 + 29 = 63,74мм;$$

$$L_{в.св.} = L_{в.мин} + f_{max} = 22,9 + 29 = 51,9мм$$
(6.21)

Максимальные и минимальные напряжения в пружинах:

- внутренняя пружина

						Лист
					13.03.03.	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\tau_{max} = k_e^1 \cdot \frac{8 \cdot P_{np.в.}^{max} \cdot D_{np.в.}}{\pi \cdot \delta_{np.в.}^3} = 1,11 \cdot \frac{8 \cdot 60,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,025}{3,14 \cdot 0,0022^3} = 404,4 \text{ МПа}$$

$$\tau_{min} = 1,11 \cdot \frac{8 \cdot 39,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,025}{3,14 \cdot 0,0022^3} = 264,9 \text{ МПа}$$
(6.22)

где $k_e^1=1,11$ – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение напряжений по поперечному сечению витка пружины.

- наружная пружина

$$\tau_{max} = 1,11 \cdot \frac{8 \cdot 113,1 \cdot 0,038 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,035^3} = 283,5 \text{ МПа}$$

$$\tau_{min} = 1,11 \cdot \frac{8 \cdot 74,1 \cdot 0,038 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,035^3} = 185,7 \text{ МПа,}$$
(6.23)

Средние напряжения и амплитуды напряжений:

- внутренняя пружина:

$$\tau_m = \frac{404,4 + 264,9}{2} = 334,65 \text{ МПа;}$$

$$\tau_a = \frac{404,4 - 264,9}{2} = 69,75 \text{ МПа}$$

- наружная пружина:

$$\tau_m = \frac{283,5 + 185,7}{2} = 234,6 \text{ МПа;}$$

$$\tau_a = \frac{283,5 - 185,7}{2} = 48,9 \text{ МПа}$$

Запасы прочности пружин должны быть не менее 1,4:

- внутренняя пружина:

$$n_\tau = \frac{300}{69,75 + 0,2 \cdot 334,65} = 2,19$$

- наружная пружина:

$$n_\tau = \frac{300}{48,9 + 0,2 \cdot 234,6} = 3,13.$$

Расчет пружин на резонанс.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

13.03.03.

$$n_{c.в.} = \frac{2,17 \cdot 10^7 \cdot \delta_{np.в.}}{i_{p.в.} \cdot D_{np.в.}^2} = \frac{2,17 \cdot 10^7 \cdot 2,2}{7,4 \cdot 25^2} = 10322;$$

$$n_{c.в.} / n_p = 10322 / 1000 = 10,322 \neq 1,2,3\dots \quad (6.24)$$

$$n_{c.н.} = \frac{2,17 \cdot 10^7 \cdot 3,5}{7,3 \cdot 38^2} = 7205$$

$$n_{c.н.} / n_p = 7205 / 1000 = 7,205 \neq 1,2,3\dots$$

6.3 Расчет распределительного вала

Расстояние между опорами вала

$$l = 195 \text{ мм};$$

Наружный диаметр вала

$$d = 50 \text{ мм};$$

Расстояния от опор до точки приложения силы

$$l_1 = 65 \text{ мм}; \quad l_2 = 130 \text{ мм}.$$

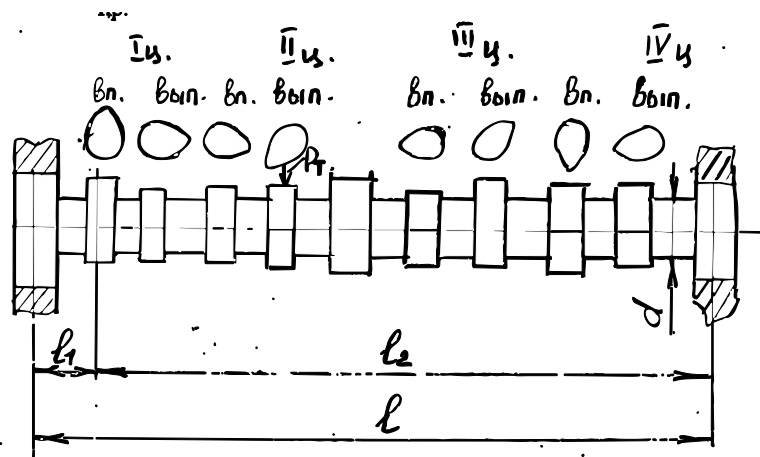


Рис. 6.3 – Расчетная схема распределительного вала

Максимальная сила, действующая на распределительный вал:

$$P_{Tmax} = \left[P_{np.min} + \frac{\pi \cdot d_6^2}{4} \cdot (P_2 - P_r) \right] + M_{кл} \cdot \omega^2 \cdot (r_1 - r_0) =$$

$$= \left[174 + \frac{3,14 \cdot 0,04^2}{4} \cdot (0,594 - 0,167) \cdot 10^6 \right] + 0,39 \cdot 104,7^2 \cdot (94,6 - 25) \cdot 10^{-3} = 1007,9 \text{ Н} \quad (6.25)$$

где $d_6 = 40 \text{ мм}$ – диаметр тарелки выпускного клапана;

Стрела прогиба распределительного вала:

$$y = 1,6 \cdot \frac{P_{T.max} \cdot l_1^2 \cdot l_2^2}{E \cdot l \cdot (d^4 - d_k^4)} = 1,6 \cdot \frac{1007,9 \cdot 65^2 \cdot 130^2}{2,2 \cdot 10^{11} \cdot 195 \cdot (50^4 - 15^4)} = 0,043 \text{ мм} \quad (6.26)$$

Напряжения смятия:

$$\sigma_{см} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{P_{тmax} \cdot E}{b_{к} \cdot r_1}} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{0,1007,9 \cdot 2,2 \cdot 10^{-1}}{0,02 \cdot 0,0946}} = 143 \text{ МПа} (6.27)$$

где $b_{к}=20$ мм – ширина кулачка.

Допускаемые напряжения смятия составляют 600...1200 МПа.

Напряжение смятия рассчитываемого вала ниже допустимых.

РАСЧЕТ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

7.1 Расчет гильзы цилиндра.

На основании проведенного теплового расчета имеем: - диаметр цилиндра $D= 82$ мм: - максимальное давление в конце сгорания $p_z = p_{zmax} = 6,683$ МПа при $n=n_m=3700$ мин-1; - материал гильзы цилиндра – чугун; $\alpha_c = 11 \cdot 10^{-6}$ 1/К; $E=1,0 \cdot 10^5$ МПа и $\mu=0,25$. - Толщину стенки гильзы цилиндра выбирают конструктивно: $\delta_r = 6$ мм.

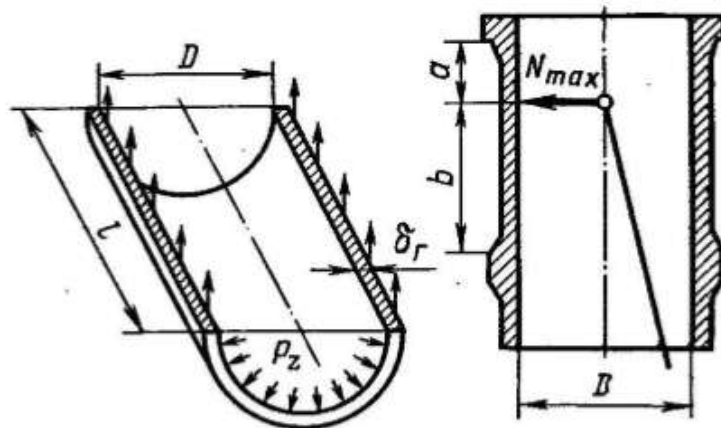


Рисунок 7.1 – Расчетная схема гильзы цилиндра.

Расчетная толщина стенки гильзы:

$$\delta_{г.р} = 0,5D \left(\sqrt{\sigma_z + 0,4p_z} / (\sigma_z - 1,3p_z) - 1 \right) = 0,5 * 82 * \left(\sqrt{\frac{60 - 0,4 * 6,683}{60 - 1,3 * 6,683}} - 1 \right) = 4,13 \text{ мм}; \quad (7.1)$$

где $\sigma_z=60$ МПа – допустимое напряжение на растяжение для чугуна.

Толщину стенки гильзы выбирают с некоторым запасом прочности, так как $\delta_r > \delta_{г.р}$.

Напряжение растяжения в гильзе от действия максимального давления газов:

$$\sigma_p = \frac{p_z D}{2\delta_r} = \frac{6,683 \cdot 82}{2 \cdot 6} = 45,667 \text{ МПа}; \quad (7.2)$$

Температурные напряжения в гильзе:

$$\sigma_t = (E\alpha_{ц}\Delta T)/(2(1 - \mu)) = \frac{(1,0 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 10^{-6} \cdot 120)}{2 \cdot (1 - 0,25)} = 88 \text{ МПа}, \quad (7.3)$$

где $\Delta T = 120 \text{ К}$ – температурный перепад между внутренней и наружной поверхностями гильзы.

Суммарные напряжения в гильзе от давления газов и перепада температур:

на наружной поверхности:

$$\sigma'_\varepsilon = \sigma_p + \sigma_t = 45,7 + 88 = 133,7 \text{ МПа};$$

на внутренней поверхности:

$$\sigma''_\varepsilon = \sigma_p - \sigma_t = 45,7 - 88 = 42,3 \text{ МПа};$$

7.2 Расчет шпильки головки блока двигателя.

На основании проведенного теплового расчета имеем:

- диаметр цилиндра $D = 82 \text{ мм}$;
- площадь поршня $F_n = 0,00528 \text{ м}^2$;
- максимальное давление в конце сгорания $p_z = p_{z\max} = 6,683 \text{ МПа}$ при $n = n_M = 3700 \text{ мин}^{-1}$;
- количество шпилек на один цилиндр $i_{шп} = 4$;
- номинальный диаметр шпильки $d = 12 \text{ мм}$; шаг резьбы $t = 1 \text{ мм}$; внутренний диаметр резьбы шпильки $d_b = d - 1,4 \cdot t = 12 - 1,4 \cdot 1 = 10,6 \text{ мм}$; материал шпильки – сталь 30Х.

По табл. 11.2 и 11.3 [2] для легированной стали 30Х определяем:

- пределы прочности $\sigma_b = 850 \text{ МПа}$,
- текучести $\sigma_T = 700 \text{ МПа}$,
- усталости при растяжении — сжатии $\sigma_{-1p} = 260 \text{ МПа}$;
- коэффициент приведения цикла при растяжении — сжатии $\alpha_\sigma = 0,14$.

Определяем по формулам (5.28), (5.29):

$$\beta_\sigma = \sigma_{-1p} / \sigma_T = 260 / 700 = 0,372;$$
$$\frac{\beta_\sigma - \alpha_\sigma}{1 - \beta_\sigma} = \frac{0,372 - 0,14}{1 - 0,372} = 0,369;$$

Проекция поверхности камеры сгорания на площадь, перпендикулярную оси цилиндра при верхнем расположении клапанов:

$$F_k = 1,25 \cdot F_n = 1,25 \cdot 0,00528 = 0,00658 \text{ м}^2. \quad (7.4)$$

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.03.

Сила давления газов на одну шпильку:

$$P'_{zmax} = p_{zmax} \cdot F_k / i_{шп} = 6,683 \cdot 0,0166 / 4 = 0,010269 \text{ МН.} \quad (7.5)$$

Сила предварительной затяжки:

$$P_{пр} = m \cdot (1 - \chi) \cdot P'_{zmax} = 3(1 - 0,2) \cdot 0,0101118 = 0,0246456 \text{ МН,} \quad (7.6)$$

где $m=3$ – коэффициент затяжки шпильки для соединений с прокладками;
 $\chi = 0,2$ – коэффициент основной нагрузки резьбового соединения.

Суммарная сила, растягивающая шпильку, без учета силы P_i :

$$P_{pmax} = P_{пр} + \chi \cdot P'_{zmax} = 0,02465 + 0,2 \cdot 0,010269 = 0,0267 \text{ МН.} \quad (7.7)$$

Минимальная сила, растягивающая шпильки:

$$P_{pmin} = P_{пр} = 0,02465 \text{ МН.} \quad (7.8)$$

Максимальные и минимальные напряжения, возникающие в шпильке:

$$\sigma_{max} = \frac{P_{p max}}{F_{op}} = \frac{P_{p max}}{\frac{\pi d_B^2}{4}} = \frac{0,0267}{\frac{3,14 \cdot 0,0106^2}{4}} = 302,7 \text{ МПа;} \quad (7.9)$$

$$\sigma_{min} = \frac{P_{p min}}{F_{op}} = \frac{P_{p min}}{\frac{\pi d_B^2}{4}} = \frac{0,02465}{\frac{3,14 \cdot 0,0106^2}{4}} = 279,5 \text{ МПа;} \quad (7.10)$$

где $F_{op} = \pi d^2 / 4$ – площадь сечения шпильки по внутреннему диаметру резьбы, м^2 .

Среднее напряжение и амплитуда цикла, МПа:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{302,7 + 279,5}{2} = 291,1 \text{ МПа;} \quad (7.11)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{302,7 - 279,5}{2} = 11,6 \text{ МПа;} \quad (7.12)$$

$$\sigma_{ак} = \frac{\sigma_a k_{\sigma}}{\varepsilon_m \varepsilon_{\Pi}} = \frac{11,6 \cdot 3,22}{0,98 \cdot 0,82} = 46,48 \text{ МПа;} \quad (7.13)$$

Так как $\frac{\sigma_{ак}}{\sigma_m} = \frac{46,48}{291,1} = 0,160 < \frac{\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}}{1 - \beta_{\sigma}} = \frac{0,372 - 0,14}{1 - 0,372} = 0,369$, то запасы

прочности определяется по пределу текучести:

$$\sigma_{T\sigma} = \frac{\sigma_T}{\sigma_{ак} + \sigma_m} = \frac{700}{46,48 + 291,1} = 2,07; \quad (7.14)$$

					13.03.03.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ

8.1 Расчет системы подачи топлива.

Цикловая подача топлива:

$$V_{\text{ц}} = \frac{g_e N_e \tau 10^3}{120 n i \rho_T} = \frac{270,2 * 64,7 * 4 * 10^3}{120 * 5000 * 4 * 0,74} = 78,74 \text{ мм}^3 / \text{цикл}, (8.1)$$

где $\rho_T = 0,740 \text{ г/см}^3$ – плотность топлива;

Время истечения топлива:

$$\Delta t = \Delta \varphi / (6 \cdot n) = 0,0084 \text{ с} (8.2)$$

Средняя скорость истечения топлива через сопловое отверстие форсунки:

$$w_a = \sqrt{\frac{2}{\rho_T} \cdot (p_\phi - p_u) \cdot 10^6} = 29 \text{ м/с}, (8.3)$$

где $p_\phi = 0,4 \text{ МПа}$ – среднее давление впрыска топлива;

$p_u = 0,092 \text{ МПа}$ – среднее давление газа во впускном трубопроводе в период впрыска;

Площадь соплового отверстия форсунки:

$$f_c = \frac{V_u}{\mu_\phi \cdot w_a \cdot \Delta t \cdot 10^3} = 0,45 \text{ мм}^2 (8.4)$$

где $\mu_\phi = 0,72$ – коэффициент расхода топлива;

Диаметр соплового отверстия форсунки (диаметр проходного сечения форсунки для обеспечения необходимой подачи):

$$d_c = \sqrt{4 \cdot f_c / \pi} = 0,573 \text{ мм} (8.5)$$

8.2 Расчет масляного насоса.

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				13.03.03.	

Масляная система обеспечивает смазку деталей двигателя с целью уменьшения трения, предотвращения коррозии, удаления продуктов износа и частичное охлаждение его отдельных узлов.

Одним из основных элементов смазочной системы является масляный насос, который служит для подачи масла к трущимся поверхностям движущихся частей двигателя.

Расчёт масляного насоса заключается в определении размеров его шестерён. Этому расчёту предшествует определение циркуляционного расхода масла в системе.

Основные размеры шестерен масляного насоса. Общее количество теплоты, выделяемое топливом в течение 1 с, определяется по данным теплового расчета $Q_0 = 212,5$ кДж/с.

- Количество теплоты, отводимое маслом от двигателя:

$$Q_M = 0,026Q_0 = 0,026 \cdot 212,5 = 5,525 \text{ кДж/с.} \quad (8.6)$$

- Теплоемкость масла $c_M = 2,094$ кДж/(кг · К).

- Плотность масла $\rho_M = 900$ кг/м³.

- Температура нагрева масла в двигателе $\Delta T_M = 10$ К.

Циркуляционный расход масла:

$$V_{\text{ц}} = Q_M / (\rho_M c_M \Delta T_M) = 5,525 / (900 \cdot 2,094 \cdot 10) = 0,000293 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (8.7)$$

Циркуляционный расход с учетом стабилизации давления масла в системе:

$$V' = 2V_{\text{ц}} = 2 \cdot 0,000293 = 0,000686 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (8.8)$$

Объемный коэффициент подачи $\eta_H = 0,8$.

Расчетная производительность насоса:

$$V_p = V' / \eta_H = 0,000686 / 0,8 = 0,000857 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (8.9)$$

Модуль зацепления зуба $m = 5$ мм.

$$\text{Высота зуба } h = 2m = 2 \cdot 0,005 = 0,01 \text{ м.} \quad (8.10)$$

Число зубьев шестерни $z = 8$.

Диаметр начальной окружности шестерни:

$$D_0 = zm = 8 \cdot 0,005 = 0,04 \text{ м.} \quad (8.11)$$

Диаметр внешней окружности шестерни:

$$D = m(z + 2) = 0,005 \cdot (8 + 2) = 0,05 \text{ м.} \quad (8.12)$$

Окружная скорость на внешнем диаметре шестерни $u_H = 8$ м/с.

Частота вращения шестерни (насоса):

$$n_H = u_H 60 / (\pi D) = 8 \cdot 60 / (3,14 \cdot 0,05) = 3057,3 \text{ мин}^{-1}. \quad (8.13)$$

Длина зуба шестерни:

$$b = \frac{60V_p}{2\pi m^2 z n_H} = \frac{60 \cdot 0,000857}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,005^2 \cdot 8 \cdot 3057,3} = 0,013 \text{ м.} \quad (8.14)$$

Рабочее давление масла в системе $p = 5 \cdot 10^5$ Па.

Механический КПД масляного насоса $\eta_{\text{м.н}} = 0,89$.

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				13.03.03.	

где $\eta_m = 0,84$ – механический КПД жидкостного насоса.

8.5 Расчет жидкостного радиатора.

По данным теплового баланса количество теплоты, отводимой от двигателя и передаваемого от жидкости к охлаждающему воздуху: $Q_{\text{возд}} = Q_{\text{ж}} = 67516$ Дж/с; средняя теплоемкости воздуха $c_{\text{возд}} = 1000$ Дж/(кг · К); объемный расход жидкости, проходящей через радиатор, принимается $G_{\text{ж}} = 0,00168$ м³/с; средняя плотность жидкости $\rho_{\text{ж}} = 1000$ кг/м³.

Количество воздуха, проходящего через радиатор:

$$G'_{\text{возд}} = Q_{\text{возд}} / (c_{\text{возд}} \Delta T_{\text{возд}}) = 2,84 \text{ кг/с},$$

где $\Delta T_{\text{возд}} = 24$ – температурный перепад воздуха в решетке радиатора, К.

Массовый расход жидкости, проходящей через радиатор:

$$G'_{\text{ж}} = G_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} = 1,68 \text{ кг/с}.$$

Величина $T_{\text{ср.возд}}$ определена по формуле:

$$T_{\text{ср.возд}} = \frac{T_{\text{возд.вх}} + (T_{\text{возд.вх}} - \Delta T_{\text{возд}})}{2} = 325 \text{ К}$$

где $T_{\text{возд.вх}} = 313$ – расчётная температура воздуха перед радиатором, К.

Средняя температура жидкости в радиаторе:

$$T_{\text{ср.ж}} = \frac{T_{\text{ж.вх}} + (T_{\text{ж.вх}} - \Delta T_{\text{ж}})}{2} = 358,2 \text{ К},$$

где $T_{\text{ж.вх}} = 363$ – температура воды перед радиатором, К; $\Delta T_{\text{ж}} = 9,6$ – температурный перепад воды в радиаторе.

Поверхность охлаждения радиатора:

$$F = \frac{Q_{\text{в}}}{K(T_{\text{ср.ж}} - T_{\text{ср.возд}})} = 11,39 \text{ м}^2,$$

где $K = 160$ – коэффициент теплопередачи для радиаторов грузовых автомобилей, Вт/(м² · К).

8.6 Расчет вентилятора.

По данным расчета жидкостного радиатора массовый расход воздуха, подаваемый вентилятором: $G'_{\text{возд}} = 0,056$ кг/с, а его средняя температура $T_{\text{ср.возд}} = 325$ К; напор, создаваемый вентилятором: $\Delta p_{\text{тр}} = 800$ Па.

Плотность воздуха при средней его температуре в радиаторе:

$$\rho_{\text{возд}} = P_0 \frac{10^6}{R_{\text{в}} T_{\text{ср.возд}}} = 1,07 \text{ кг/м}^3$$

Производительность вентилятора:

$$G_{\text{возд}} = G'_{\text{возд}} / \rho_{\text{возд}} = 0,057 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Фронтальная поверхность радиатора:

$$F_{\text{фр.рад}} = G_{\text{возд}} / w_{\text{возд}} = 0,00256 \text{ м}^2,$$

где $w_{\text{возд}} = 20$ – скорость воздуха перед фронтом радиатора без учета скорости движения автомобиля, м/с.

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.03.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

Уточненная модель расчета механических потерь в ДВС

Расчет механических потерь двигателя внутреннего сгорания определяется как сумма потерь на трение в коленчатом вале, цилиндропоршневой группе, привод вспомогательных агрегатов и совершение насосных ходов. Все перечисленные потери представлены как давление механических потерь по каждому из компонентов:

$$P_m = P_{\text{коленвала}} + P_{\text{порш.гр.}} + P_{\text{клап.мех}} + P_{\text{вспом.мех.}} + P_{\text{газообмена}} \cdot \quad (9.1)$$

где P_m – давление механических потерь двигателя в целом;
 $P_{\text{коленвала}}$ – давление механических потерь в коренных опорах коленчатого вала;
 $P_{\text{порш.гр.}}$ – давление механических потерь цилиндропоршневой группе;
 $P_{\text{клап.мех}}$ – давление механических потерь в механизме газораспределения;
 $P_{\text{вспом.мех}}$ – давление механических потерь вспомогательных агрегатов ДВС;
 $P_{\text{газообмена}}$ – давление механических потерь на совершение газообмена в ДВС.

В литературе по смазке двигателя предложено изменить гидродинамические параметры в модели, чтобы компенсировать различия между марками масла и температурной зависимостью вязкости моторного масла. Фундаментальная литература по трибологии поршневых двигателей показывает, что шкала вязкости, которая должна быть включена в термины гидродинамического трения, имеет вид :

$$C_{\text{пересч.}} = \sqrt{\frac{\mu(T)}{\mu_0(T)}} \quad (9.2)$$

где $\mu(T)$ - вязкость масла в двигателе, для которого делаются прогнозы трения, а $\mu_0(T)$ - эталонная вязкость двигателей, которые использовались для калибровки модели, когда она была впервые разработана. В работе Паттона указывается, что для получения данных о двигателе, которые он использовал, использовалось эталонное масло 10W30 (вязкость 10,6 сСт при 90 °С). Более подробный набор сортов масла, для которых указана кинематическая вязкость ν , приведен в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Характеристики моторных масел

Тип моторного масла	5W-20	5W-30	10W-30	10W-40	20W-50
Кинематическая вязкость при 40 °С	49,2	66,1	74,8	98,9	174,4
Кинематическая вязкость при 100 °С	8,6	11	10,8	14,4	19,1

SAE50	0,0384	1349,94	115,16	1
-------	--------	---------	--------	---

Трение коленчатого вала было оценено путем добавления прогноза трения уплотнения переднего и заднего главного подшипника к прогнозу трения основного подшипника. Прогнозирование трения в главном подшипнике включало в себя гидродинамический подшипник с опорным подшипником и турбулентный диссипативный член, причем последний учитывает потери из-за переноса масла через подшипники. В уравнение было включено масштабирования вязкости в слагаемом гидродинамического трения. Три условия, которые составляют трение коленчатого вала:

$$P_{\text{коленвала}} = C_{cb} \cdot \left(\frac{n \cdot d_{\kappa}^3 \cdot L_{\kappa} \cdot i_{\kappa}}{D^2 \cdot S \cdot i_{\psi}} \right) + C_{CS} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\mu_0}} \cdot \left(\frac{d_{\kappa}}{D^2 \cdot S \cdot i_{\kappa}} \right) + C_{td} \cdot \left(\frac{n^2 \cdot d^2 \cdot i_{\psi}}{i_{\kappa}} \right), \quad (9.5)$$

где n – частота вращения коленчатого вала; D – диаметр цилиндра; S – ход поршня; d_{κ} – диаметр коренной шейки коленчатого вала; L_{κ} – ширина коренной шейки коленчатого вала; i_{κ} – количество коренных шеек; i_{ψ} – количество цилиндров; C_{cb} – коэффициент гидродинамических потерь в коренных подшипниках ($C_{cb} = 3,03 \cdot 10^{-4}$); C_{CS} – коэффициент потерь на трение в уплотнении коренных подшипниках ($C_{CS} = 1,22 \cdot 10^5$); C_{td} – коэффициент потерь на трение за счет вязкой диссипации ($C_{td} = 1,35 \cdot 10^{-10}$).

Оценка потерь в цилиндропоршневой группе включало в себя трение поршней, поршневых колец и шатунных подшипников. Трение поршневого кольца было разделено на два члена, первый позволяет прогнозировать трение для поршневых колец без учета нагрузки на кольцо от давления газа внутри цилиндра, и второй – является аддитивной составляющей увеличения трения поршневых колец, вызванное дополнительным нагружением кольца от воздействия давления газа внутри цилиндра.

$$P_{\text{порш.гр.}} = P_{n.z.1} + P_{n.z.2} \quad (9.6)$$

где $P_{n.z.1}$ – давление механических потерь на трение в цилиндропоршневой группе без учета дополнительного нагружения поршневого кольца от воздействия на него давления газа; $P_{n.z.2}$ – аддитивное давление механических потерь на трение в цилиндропоршневой группе с учетом дополнительного нагружения поршневого кольца от воздействия на него давления газа

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.03.

настоящей математической модели учтены: гидродинамическое трение подшипников распределительного вала; трение толкателя кулачка для плоских или роликовых толкателей; гидродинамическое трение элементов, совершающих колебательное движение; смешанное смазывание компонентов клапанного механизма. Среднее давление механических потерь на трение в механизме газораспределения ($p_{\text{клап.мех.}}$) определяется зависимостью:

$$p_{\text{клап.мех.}} = C_{vB} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\mu_0}} \cdot \left(\frac{n \cdot i_{n.pв.}}{D^2 \cdot S \cdot i_u} \right) + C_{vO} + C_{ff} \cdot \left(1 + \frac{500}{n} \right) \cdot \left(\frac{i_{кл}}{S \cdot i_u} \right) + C_{rf} \cdot \left(\frac{n \cdot i_{кл}}{S \cdot i_u} \right) + C_{oh} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\mu_0}} \cdot \left(\frac{L_{кл}^{1,5} \cdot n^{0,5} \cdot i_{кл}}{D \cdot S \cdot i_u} \right) + C_{om} \cdot \left(1 + \frac{500}{n} \right) \cdot \frac{L_{кл} \cdot i_{кл}}{S \cdot i_u} \quad (9.9)$$

где $i_{n.pв.}$ – количество подшипников на распределительном вале; $L_{кл}$ – максимальная высота подъема клапана, м; $i_{кл}$ – количество клапанов; C_{vb} – коэффициент гидродинамических потерь в подшипниках распределительного вала ($C_{vb} = 244$); C_{vo} – аддитивный коэффициент ($C_{vo} = 4,12$); C_{ff} , C_{rf} , C_{oh} , C_{om} , – эмпирические коэффициенты.

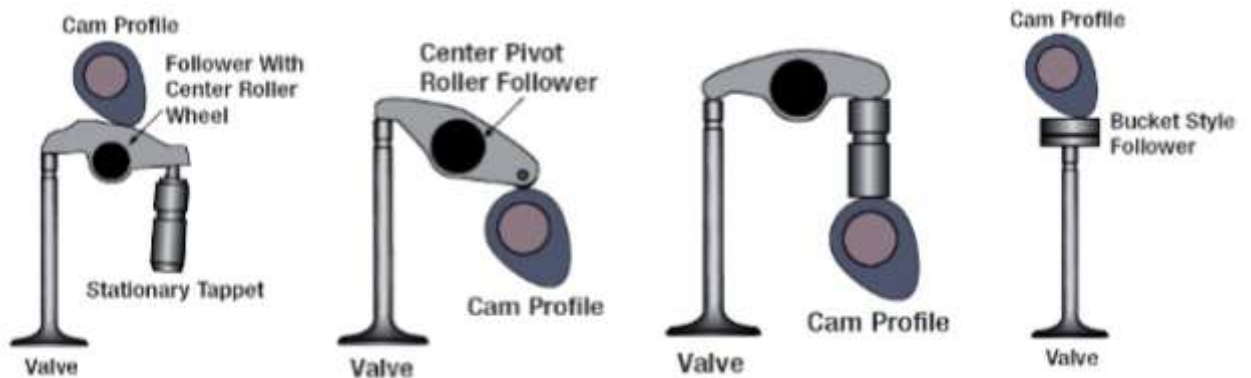


Рисунок 9.1 – Конструктивные исполнения клапанных механизмов в разрабатываемом программном модуле

Таблица 9.3 Коэффициенты в уравнении (9.9)

Конструктивное исполнение клапанного механизма	Тип	Коэффициент плоского толкателя C_{ff}	Коэффициент роликового толкателя C_{rf}	Коэффициент гидродинамических потерь C_{oh}	Коэффициент потерь при смешанном смазывании и C_{om}
Single overhead cam	I	200	0.0076	0.5	107

ПРИЛОЖЕНИЕ А-А

Исходные данные	
Радиус кривошипа, м	0,0378
Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна	0,31
Частота вращения, об/мин	5600
Масса поршневого комплекта, кг	0,47
Масса шатуна, кг	0,701
Масса m1, кг	0,2103
Масса m2, кг	0,4907
Масса возвр.-поступ. движущихся частей, кг	0,6803
Давление в конце впуска, Мпа	0,088
Диаметр цилиндра, м	0,082
Площадь поршня, м ²	0,0053
Атмосферное давление, Мпа	0,1013
Давление выпуска, Мпа	0,109
Угловая скорость КВ, рад/с	586,13
Сила S2	-6,372

φ	β	p, MPa	P_r, kH	P_j, kH	P_s, kH	$\text{tg}\beta$	N, kH	$\sin\varphi$	$1/\cos\beta$	$P_{\text{ин}}, \text{kH}$	$\frac{\cos(\varphi+\beta)}{\cos\beta}$	Z, kH	$\frac{\sin(\varphi+\beta)}{\cos\beta}$	T, kH
0	0,00	0,0880	-0,070	-11,5733	-11,6435	0,0000	0,0000	0	1,0000	-11,6435	1,0000	-11,6435	0,0000	0,0000
10	3,09	0,0880	-0,070	-11,2739	-11,3441	0,0539	-0,6116	0,173648	1,0015	-11,3606	0,9754	-11,0656	0,2267	-2,5721
20	6,09	0,0880	-0,070	-10,3998	-10,4700	0,1066	-1,1164	0,34202	1,0057	-10,5293	0,9032	-9,4567	0,4422	-4,6300
30	8,92	0,0880	-0,070	-9,0203	-9,0905	0,1569	-1,4263	0,5	1,0122	-9,2017	0,7876	-7,1595	0,6359	-5,7804
40	11,49	0,0880	-0,070	-7,2432	-7,3134	0,2033	-1,4871	0,642788	1,0205	-7,4631	0,6353	-4,6465	0,7986	-5,8402
50	13,74	0,0880	-0,070	-5,2032	-5,2734	0,2445	-1,2892	0,766044	1,0294	-5,4287	0,4555	-2,4021	0,9232	-4,8683
60	15,57	0,0880	-0,070	-3,0479	-3,1181	0,2787	-0,8690	0,866025	1,0381	-3,2370	0,2586	-0,8065	1,0054	-3,1349
70	16,94	0,0880	-0,070	-0,9236	-0,9938	0,3045	-0,3026	0,939693	1,0453	-1,0389	0,0559	-0,0555	1,0438	-1,0374
80	17,78	0,0880	-0,070	1,0394	0,9692	0,3206	0,3107	0,984808	1,0501	1,0178	-0,1421	-0,1377	1,0405	1,0085
90	18,06	0,0880	-0,070	2,7387	2,6685	0,3261	0,8701	1	1,0518	2,8068	-0,3261	-0,8701	1,0000	2,6685
100	17,78	0,0880	-0,070	4,1077	4,0375	0,3206	1,2944	0,984808	1,0501	4,2399	-0,4894	-1,9758	0,9291	3,7513
110	16,94	0,0880	-0,070	5,1196	5,0494	0,3045	1,5376	0,939693	1,0453	5,2783	-0,6282	-3,1719	0,8355	4,2190
120	15,57	0,0880	-0,070	5,7866	5,7164	0,2787	1,5932	0,866025	1,0381	5,9343	-0,7414	-4,2379	0,7267	4,1540
130	13,74	0,0880	-0,070	6,1543	6,0841	0,2445	1,4874	0,766044	1,0294	6,2633	-0,8301	-5,0502	0,6089	3,7046
140	11,49	0,0880	-0,070	6,2921	6,2219	0,2033	1,2652	0,642788	1,0205	6,3492	-0,8968	-5,5795	0,4870	3,0302
150	8,92	0,0880	-0,070	6,2816	6,2114	0,1569	0,9745	0,5	1,0122	6,2874	-0,9445	-5,8665	0,3641	2,2617
160	6,09	0,0880	-0,070	6,2038	6,1336	0,1066	0,6540	0,34202	1,0057	6,1684	-0,9762	-5,9874	0,2418	1,4832
170	3,09	0,0880	-0,070	6,1268	6,0566	0,0539	0,3265	0,173648	1,0015	6,0654	-0,9942	-6,0213	0,1206	0,7302
180	0,00	0,0880	-0,070	6,0958	6,0256	0,0000	0,0000	1,23E-16	1,0000	6,0256	-1,0000	-6,0256	0,0000	0,0000
190	-3,09	0,089	-0,065	6,1268	6,0619	-0,0539	-0,3268	-0,173648	1,0015	6,0707	-0,9942	-6,0265	-0,1206	-0,7308
200	-6,09	0,091	-0,054	6,2038	6,1494	-0,1066	-0,6557	-0,34202	1,0057	6,1843	-0,9762	-6,0028	-0,2418	-1,4871
210	-8,92	0,094	-0,039	6,2816	6,2431	-0,1569	-0,9795	-0,5	1,0122	6,3194	-0,9445	-5,8964	-0,3641	-2,2733
220	-11,49	0,099	-0,012	6,2921	6,2800	-0,2033	-1,2770	-0,642788	1,0205	6,4085	-0,8968	-5,6316	-0,4870	-3,0585
230	-13,74	0,106	0,025	6,1543	6,1791	-0,2445	-1,5106	-0,766044	1,0294	6,3611	-0,8301	-5,1290	-0,6089	-3,7625
240	-15,57	0,115	0,072	5,7866	5,8590	-0,2787	-1,6329	-0,866025	1,0381	6,0822	-0,7414	-4,3436	-0,7267	-4,2576
250	-16,94	0,128	0,141	5,1196	5,2605	-0,3045	-1,6019	-0,939693	1,0453	5,4990	-0,6282	-3,3045	-0,8355	-4,3954
260	-17,78	0,147	0,241	4,1077	4,3489	-0,3206	-1,3942	-0,984808	1,0501	4,5669	-0,4894	-2,1282	-0,9291	-4,0407
270	-18,06	0,172	0,373	2,7387	3,1119	-0,3261	-1,0147	-1	1,0518	3,2731	-0,3261	-1,0147	-1,0000	-3,1119
280	-17,78	0,209	0,568	1,0394	1,6079	-0,3206	-0,5155	-0,984808	1,0501	1,6885	-0,1421	-0,2284	-1,0405	-1,6730
290	-16,94	0,263	0,854	-0,9236	-0,0701	-0,3045	0,0214	-0,939693	1,0453	-0,0733	0,0559	-0,0039	-1,0438	0,0732
300	-15,57	0,345	1,286	-3,0479	-1,7616	-0,2787	0,4910	-0,866025	1,0381	-1,8287	0,2586	-0,4556	-1,0054	1,7711
310	-13,74	0,472	1,957	-5,2032	-3,2465	-0,2445	0,7937	-0,766044	1,0294	-3,3421	0,4555	-1,4788	-0,9232	2,9971
320	-11,49	0,676	3,033	-7,2432	-4,2098	-0,2033	0,8560	-0,642788	1,0205	-4,2959	0,6353	-2,6746	-0,7986	3,3617
330	-8,92	0,998	4,733	-9,0203	-4,2872	-0,1569	0,6726	-0,5	1,0122	-4,3397	0,7876	-3,3765	-0,6359	2,7261
340	-6,09	1,47	7,224	-10,3998	-3,1753	-0,1066	0,3386	-0,34202	1,0057	-3,1933	0,9032	-2,8680	-0,4422	1,4042
350	-3,09	2,354	11,891	-11,2739	0,6166	-0,0539	-0,0332	-0,173648	1,0015	0,6175	0,9754	0,6015	-0,2267	-0,1398
360	0,00	4,578	23,630	-11,5733	12,0563	0,0000	0,0000	-2,45E-16	1,0000	12,0563	1,0000	12,0563	0,0000	0,0000

330	-8,92	0,998	4,733	-9,0203	-4,2872	-0,1569	0,6726	-0,5	1,0122	-4,3397	0,7876	-3,3765	-0,6359	2,7261
340	-6,09	1,47	7,224	-10,3998	-3,1753	-0,1066	0,3386	-0,34202	1,0057	-3,1933	0,9032	-2,8680	-0,4422	1,4042
350	-3,09	2,354	11,891	-11,2739	0,6166	-0,0539	-0,0332	-0,173648	1,0015	0,6175	0,9754	0,6015	-0,2267	-0,1398
360	0,00	4,578	23,630	-11,5733	12,0563	0,0000	0,0000	-2,45E-16	1,0000	12,0563	1,0000	12,0563	0,0000	0,0000
370	3,09	6,443	33,474	-11,2739	22,1998	0,0539	1,1968	0,173648	1,0015	22,2320	0,9754	21,6547	0,2267	5,0335
380	6,09	5,542	28,718	-10,3998	18,3181	0,1066	1,9532	0,34202	1,0057	18,4220	0,9032	16,5454	0,4422	8,1006
390	8,92	3,881	19,951	-9,0203	10,9302	0,1569	1,7149	0,5	1,0122	11,0639	0,7876	8,6084	0,6359	6,9503
400	11,49	2,658	13,495	-7,2432	6,2519	0,2033	1,2713	0,642788	1,0205	6,3798	0,6353	3,9721	0,7986	4,9925
410	13,74	1,877	9,373	-5,2032	4,1696	0,2445	1,0193	0,766044	1,0294	4,2924	0,4555	1,8993	0,9232	3,8493
420	15,57	1,383	6,765	-3,0479	3,7173	0,2787	1,0360	0,866025	1,0381	3,8590	0,2586	0,9614	1,0054	3,7373
430	16,94	1,063	5,076	-0,9236	4,1526	0,3045	1,2645	0,939693	1,0453	4,3408	0,0559	0,2320	1,0438	4,3346
440	17,78	0,85	3,952	1,0394	4,9913	0,3206	1,6002	0,984808	1,0501	5,2416	-0,1421	-0,7092	1,0405	5,1934
450	18,06	0,704	3,181	2,7387	5,9200	0,3261	1,9303	1	1,0518	6,2267	-0,3261	-1,9303	1,0000	5,9200
460	17,78	0,602	2,643	4,1077	6,7505	0,3206	2,1642	0,984808	1,0501	7,0890	-0,4894	-3,3035	0,9291	6,2722
470	16,94	0,53	2,263	5,1196	7,3824	0,3045	2,2480	0,939693	1,0453	7,7171	-0,6282	-4,6374	0,8355	6,1683
480	15,57	0,477	1,983	5,7866	7,7697	0,2787	2,1654	0,866025	1,0381	8,0658	-0,7414	-5,7602	0,7267	5,6461
490	13,74	0,439	1,782	6,1543	7,9368	0,2445	1,9403	0,766044	1,0294	8,1705	-0,8301	-6,5880	0,6089	4,8328
500	11,49	0,411	1,635	6,2921	7,9268	0,2033	1,6119	0,642788	1,0205	8,0890	-0,8968	-7,1084	0,4870	3,8605
510	8,92	0,392	1,534	6,2816	7,8160	0,1569	1,2263	0,5	1,0122	7,9116	-0,9445	-7,3820	0,3641	2,8460
520	6,09	0,379	1,466	6,2038	7,6696	0,1066	0,8178	0,34202	1,0057	7,7131	-0,9762	-7,4868	0,2418	1,8547
530	3,09	0,372	1,429	6,1268	7,5556	0,0539	0,4073	0,173648	1,0015	7,5666	-0,9942	-7,5116	0,1206	0,9109
540	0,00	0,37	1,418	6,0958	7,5141	0,0000	0,0000	3,68E-16	1,0000	7,5141	-1,0000	-7,5141	0,0000	0,0000
550	-3,09	0,109	0,041	6,1268	6,1674	-0,0539	-0,3325	-0,173648	1,0015	6,1764	-0,9942	-6,1315	-0,1206	-0,7435
560	-6,09	0,109	0,041	6,2038	6,2444	-0,1066	-0,6658	-0,34202	1,0057	6,2798	-0,9762	-6,0956	-0,2418	-1,5101
570	-8,92	0,109	0,041	6,2816	6,3222	-0,1569	-0,9919	-0,5	1,0122	6,3996	-0,9445	-5,9712	-0,3641	-2,3021
580	-11,49	0,109	0,041	6,2921	6,3327	-0,2033	-1,2877	-0,642788	1,0205	6,4623	-0,8968	-5,6789	-0,4870	-3,0842
590	-13,74	0,109	0,041	6,1543	6,1950	-0,2445	-1,5145	-0,766044	1,0294	6,3774	-0,8301	-5,1422	-0,6089	-3,7721
600	-15,57	0,109	0,041	5,7866	5,8273	-0,2787	-1,6241	-0,866025	1,0381	6,0494	-0,7414	-4,3201	-0,7267	-4,2345
610	-16,94	0,109	0,041	5,1196	5,1602	-0,3045	-1,5713	-0,939693	1,0453	5,3942	-0,6282	-3,2415	-0,8355	-4,3116
620	-17,78	0,109	0,041	4,1077	4,1483	-0,3206	-1,3299	-0,984808	1,0501	4,3563	-0,4894	-2,0301	-0,9291	-3,8543
630	-18,06	0,109	0,041	2,7387	2,7794	-0,3261	-0,9062	-1	1,0518	2,9234	-0,3261	-0,9062	-1,0000	-2,7794
640	-17,78	0,109	0,041	1,0394	1,0801	-0,3206	-0,3463	-0,984808	1,0501	1,1342	-0,1421	-0,1535	-1,0405	-1,1238
650	-16,94	0,109	0,041	-0,9236	-0,8830	-0,3045	0,2689	-0,939693	1,0453	-0,9230	0,0559	-0,0493	-1,0438	0,9217
660	-15,57	0,109	0,041	-3,0479	-3,0073	-0,2787	0,8381	-0,866025	1,0381	-3,1219	0,2586	-0,7778	-1,0054	3,0234
670	-13,74	0,109	0,041	-5,2032	-5,1625	-0,2445	1,2621	-0,766044	1,0294	-5,3146	0,4555	-2,3516	-0,9232	4,7660
680	-11,49	0,109	0,041	-7,2432	-7,2026	-0,2033	1,4646	-0,642788	1,0205	-7,3500	0,6353	-4,5761	-0,7986	5,7517
690	-8,92	0,109	0,041	-9,0203	-8,9797	-0,1569	1,4089	-0,5	1,0122	-9,0895	0,7876	-7,0722	-0,6359	5,7100
700	-6,09	0,109	0,041	-10,3998	-10,3591	-0,1066	1,1046	-0,34202	1,0057	-10,4178	0,9032	-9,3566	-0,4422	4,5810
710	-3,09	0,109	0,041	-11,2739	-11,2333	-0,0539	0,6056	-0,173648	1,0015	-11,2496	0,9754	-10,9574	-0,2267	2,5470

670	-13,74	0,109	0,041	-5,2032	-5,1625	-0,2445	1,2621	-0,766044	1,0294	-5,3146	0,4555	-2,3516	-0,9232	4,7660
680	-11,49	0,109	0,041	-7,2432	-7,2026	-0,2033	1,4646	-0,642788	1,0205	-7,3500	0,6353	-4,5761	-0,7986	5,7517
690	-8,92	0,109	0,041	-9,0203	-8,9797	-0,1569	1,4089	-0,5	1,0122	-9,0895	0,7876	-7,0722	-0,6359	5,7100
700	-6,09	0,109	0,041	-10,3998	-10,3591	-0,1066	1,1046	-0,34202	1,0057	-10,4178	0,9032	-9,3566	-0,4422	4,5810
710	-3,09	0,109	0,041	-11,2739	-11,2333	-0,0539	0,6056	-0,173648	1,0015	-11,2496	0,9754	-10,9574	-0,2267	2,5470
720	0,00	0,109	0,041	-11,5733	-11,5326	0,0000	0,0000	-4,9E-16	1,0000	-11,5326	1,0000	-11,5326	0,0000	0,0000

ПРИЛОЖЕНИЕ Б-Б:

Угол	угол в рад	Сила Тсумм.	Мсумм., Нм	Мсумм.ср.	СРЕДНИЙ МОМЕНТ НА ШАГЕ	ШАГ УГЛА	изб мом	изб раб
0	0	5,45869E-16	2,06338E-14	129,7				
10	0,174533	0,987049512	37,31047156	129,7	18,65523578	0,174533	0	0
20	0,349066	0,47346287	17,89689648	129,7	27,60368402	0,174533	0	0
30	0,523599	-3,4055014	-128,727953	129,7	-55,41552828	0,174533	0	0
40	0,698132	-6,99032656	-264,2343441	129,7	-196,4811486	0,174533	0	0
50	0,872665	-8,55365118	-323,3280148	129,7	-293,7811794	0,174533	0	0
60	1,047198	-7,88968548	-298,2301111	129,7	-310,779063	0,174533	0	0
70	1,22173	-5,40975345	-204,4886805	129,7	-251,3593958	0,174533	0	0
80	1,396263	-1,69318308	-64,00232024	129,7	-134,2455004	0,174533	0	0
90	1,570796	2,69723174	101,9553598	129,7	18,97651977	0,174533	0	0
100	1,745329	7,226689417	273,16886	129,7	187,5621099	0,174533	57,86210987	10,09884
110	1,919862	11,38216738	430,2459271	129,7	351,7073935	0,174533	222,0073935	38,7476
120	2,094395	14,59456476	551,6745481	129,7	490,9602376	0,174533	361,2602376	63,05181
130	2,268928	16,30049054	616,1585425	129,7	583,9165453	0,174533	454,2165453	79,27574
140	2,443461	16,00410537	604,9551831	129,7	610,5568628	0,174533	480,8568628	83,92535
150	2,617994	13,54381831	511,956332	129,7	558,4557575	0,174533	428,7557575	74,832
160	2,792527	9,323072206	352,4121294	129,7	432,1842307	0,174533	302,4842307	52,79346
170	2,96706	4,048262665	153,0243287	129,7	252,7182291	0,174533	123,0182291	21,47073
180	3,141593	6,19754E-15	2,34267E-13	129,7	76,51216437	0,174533	0	0
190	3,316126	0,987049512	37,31047156	129,7	18,65523578	0,174533	0	0
200	3,490659	0,47346287	17,89689648	129,7	27,60368402	0,174533	0	0
210	3,665191	-3,4055014	-128,727953	129,7	-55,41552828	0,174533	0	0
220	3,839724	-6,99032656	-264,2343441	129,7	-196,4811486	0,174533	0	0
230	4,014257	-8,55365118	-323,3280148	129,7	-293,7811794	0,174533	0	0
240	4,18879	-7,88968548	-298,2301111	129,7	-310,779063	0,174533	0	0
250	4,363323	-5,40975345	-204,4886805	129,7	-251,3593958	0,174533	0	0
260	4,537856	-1,69318308	-64,00232024	129,7	-134,2455004	0,174533	0	0
270	4,712389	2,69723174	101,9553598	129,7	18,97651977	0,174533	0	0
280	4,886922	7,226689417	273,16886	129,7	187,5621099	0,174533	57,86210987	10,09884
290	5,061455	11,38216738	430,2459271	129,7	351,7073935	0,174533	222,0073935	38,7476
300	5,235988	14,59456476	551,6745481	129,7	490,9602376	0,174533	361,2602376	63,05181
310	5,410521	16,30049054	616,1585425	129,7	583,9165453	0,174533	454,2165453	79,27574
320	5,585054	16,00410537	604,9551831	129,7	610,5568628	0,174533	480,8568628	83,92535
330	5,759587	13,54381831	511,956332	129,7	558,4557575	0,174533	428,7557575	74,832

340	5,934119	9,323072206	352,4121294	129,7	432,1842307	0,174533	302,4842307	52,79346
350	6,108652	4,048262665	153,0243287	129,7	252,7182291	0,174533	123,0182291	21,47073
360	6,283185	6,19754E-15	2,34267E-13	129,7	76,51216437	0,174533	0	0
370	6,457718	0,987049512	37,31047156	129,7	18,65523578	0,174533	0	0
380	6,632251	0,47346287	17,89689648	129,7	27,60368402	0,174533	0	0
390	6,806784	-3,4055014	-128,727953	129,7	-55,41552828	0,174533	0	0
400	6,981317	-6,99032656	-264,2343441	129,7	-196,4811486	0,174533	0	0
410	7,15585	-8,55365118	-323,3280148	129,7	-293,7811794	0,174533	0	0
420	7,330383	-7,88968548	-298,2301111	129,7	-310,779063	0,174533	0	0
430	7,504916	-5,40975345	-204,4886805	129,7	-251,3593958	0,174533	0	0
440	7,679449	-1,69318308	-64,00232024	129,7	-134,2455004	0,174533	0	0
450	7,853982	2,69723174	101,9553598	129,7	18,97651977	0,174533	0	0
460	8,028515	7,226689417	273,16886	129,7	187,5621099	0,174533	57,86210987	10,09884
470	8,203047	11,38216738	430,2459271	129,7	351,7073935	0,174533	222,0073935	38,7476
480	8,37758	14,59456476	551,6745481	129,7	490,9602376	0,174533	361,2602376	63,05181
490	8,552113	16,30049054	616,1585425	129,7	583,9165453	0,174533	454,2165453	79,27574
500	8,726646	16,00410537	604,9551831	129,7	610,5568628	0,174533	480,8568628	83,92535
510	8,901179	13,54381831	511,956332	129,7	558,4557575	0,174533	428,7557575	74,832
520	9,075712	9,323072206	352,4121294	129,7	432,1842307	0,174533	302,4842307	52,79346
530	9,250245	4,048262665	153,0243287	129,7	252,7182291	0,174533	123,0182291	21,47073
540	9,424778	6,19754E-15	2,34267E-13	129,7	76,51216437	0,174533	0	0
550	9,599311	0,987049512	37,31047156	129,7	18,65523578	0,174533	0	0
560	9,773844	0,47346287	17,89689648	129,7	27,60368402	0,174533	0	0
570	9,948377	-3,4055014	-128,727953	129,7	-55,41552828	0,174533	0	0
580	10,12291	-6,99032656	-264,2343441	129,7	-196,4811486	0,174533	0	0
590	10,29744	-8,55365118	-323,3280148	129,7	-293,7811794	0,174533	0	0
600	10,47198	-7,88968548	-298,2301111	129,7	-310,779063	0,174533	0	0
610	10,64651	-5,40975345	-204,4886805	129,7	-251,3593958	0,174533	0	0
620	10,82104	-1,69318308	-64,00232024	129,7	-134,2455004	0,174533	0	0
630	10,99557	2,69723174	101,9553598	129,7	18,97651977	0,174533	0	0
640	11,17011	7,226689417	273,16886	129,7	187,5621099	0,174533	57,86210987	10,09884
650	11,34464	11,38216738	430,2459271	129,7	351,7073935	0,174533	222,0073935	38,7476
660	11,51917	14,59456476	551,6745481	129,7	490,9602376	0,174533	361,2602376	63,05181
670	11,69371	16,30049054	616,1585425	129,7	583,9165453	0,174533	454,2165453	79,27574
680	11,86824	16,00410537	604,9551831	129,7	610,5568628	0,174533	480,8568628	83,92535
690	12,04277	13,54381831	511,956332	129,7	558,4557575	0,174533	428,7557575	74,832
700	12,2173	9,323072206	352,4121294	129,7	432,1842307	0,174533	302,4842307	52,79346
710	12,39184	4,048262665	153,0243287	129,7	252,7182291	0,174533	123,0182291	21,47073
720	12,56637	6,19754E-15	2,34267E-13	129,7	76,51216437	0,174533	0	0
							сумм раб	424,1955

ПРИЛОЖЕНИЕ В-В:

ugol	T	Z	Z+S2	Pш	Qшш	Qшшср	bet-sat	ugol fi+bet-sat	ugol fi+bet-sat=rad	ugol vekt	логич угол	Tподш шат	Zподш шат	
0	0	-11,6435	-18,0158	11,64348	18,01585	11,05037	0,00	0,00	0,00	0	1,570796327	1,570796327	-1,1036E-15	18,01584631
10	-2,57214	-11,0656	-17,4379	11,36057	17,62661	11,05037	3,09	13,09	0,228274109	1,717243038	1,717243038	-1,440730251	17,56762744	
20	-4,62999	-9,45671	-15,8291	10,5293	16,49232	11,05037	6,09	26,09	0,455060943	1,855357447	1,855357447	-2,798333152	16,25318067	
30	-5,78044	-7,15948	-13,5319	9,201724	14,71477	11,05037	8,92	38,92	0,67888189	1,974506124	1,974506124	-3,998187942	14,16117802	
40	-5,8402	-4,64651	-11,0189	7,46311	12,47091	11,05037	11,49	51,49	0,898283042	2,058168547	2,058168547	-4,981436815	11,4327998	
50	-4,8683	-2,4021	-8,77447	5,42867	10,03452	11,05037	13,74	63,74	1,111865077	2,077337047	2,077337047	-5,709933007	8,251564774	
60	-3,13489	-0,80647	-7,17884	3,23696	7,833467	11,05037	15,57	75,57	1,318331038	1,982522098	1,982522098	-6,1681945	4,828723977	
70	-1,03739	-0,05553	-6,42789	1,038879	6,511068	11,05037	16,94	86,94	1,516551677	1,730806067	1,730806067	-6,362193695	1,384376277	
80	1,008476	-0,13771	-6,51007	1,017834	6,587721	11,05037	17,78	97,78	1,705641652	1,417107849	1,417107849	-6,315398897	-1,874515999	
90	2,668513	-0,8701	-7,24247	2,806785	7,71844	11,05037	18,06	108,06	1,885033243	1,217777397	1,217777397	-6,06301071	-4,776423379	
100	3,751347	-1,97582	-8,34819	4,239868	9,152315	11,05037	17,78	117,78	2,054530541	1,148474225	1,148474225	-5,645646651	-7,203578041	
110	4,218972	-3,17185	-9,54422	5,278292	10,43512	11,05037	16,94	126,94	2,214329455	1,154577518	1,154577518	-5,103698478	-9,101871322	
120	4,153996	-4,23794	-10,6103	5,934293	11,39449	11,05037	15,57	135,57	2,364997705	1,197633963	1,197633963	-4,473220753	-10,47972384	
130	3,704645	-5,05019	-11,4226	6,263287	12,00829	11,05037	13,74	143,74	2,507420632	1,257172999	1,257172999	-3,783660755	-11,3966212	
140	3,030178	-5,57948	-11,9519	6,349222	12,32999	11,05037	11,49	151,49	2,642727487	1,322496088	1,322496088	-3,057237325	-11,94495705	
150	2,261718	-5,8665	-12,2389	6,287384	12,44609	11,05037	8,92	158,92	2,772215224	1,388059847	1,388059847	-2,309487334	-12,22994188	
160	1,483246	-5,98738	-12,3597	6,168364	12,44843	11,05037	6,09	166,09	2,897283165	1,451361269	1,451361269	-1,55045315	-12,35149335	
170	0,730171	-6,02128	-12,3936	6,065389	12,41513	11,05037	3,09	173,09	3,01938522	1,511949359	1,511949359	-0,78610252	-12,3902227	
180	7,38E-16	-6,02565	-12,398	6,025647	12,39801	11,05037	0,00	180,00	3,14	1,570796327	1,570796327	-0,019745731	-12,39799718	
190	-0,73081	-6,02653	-12,3989	6,070675	12,42041	11,05037	-3,09	186,91	3,26061478	1,629669591	1,629669591	0,746623191	-12,39794981	
200	-1,48708	-6,00284	-12,3752	6,184289	12,46423	11,05037	-6,09	193,91	3,382716835	1,690388651	1,690388651	1,511074727	-12,37229411	
210	-2,27325	-5,89641	-12,2688	6,319441	12,4776	11,05037	-8,92	201,08	3,507784776	1,754005996	1,754005996	2,270462526	-12,26929368	
220	-3,05846	-5,63155	-12,0039	6,408472	12,38742	11,05037	-11,49	208,51	3,637272513	1,820276324	1,820276324	3,019064214	-12,01388453	
230	-3,7625	-5,12905	-11,5014	6,361095	12,1012	11,05037	-13,74	216,26	3,772579368	1,886956596	1,886956596	3,747152726	-11,50642333	
240	-4,25756	-4,3436	-10,716	6,08224	11,53077	11,05037	-15,57	224,43	3,915002295	1,948981553	1,948981553	4,439523193	-10,64186544	
250	-4,39538	-3,30448	-9,67684	5,498997	10,6283	11,05037	-16,94	233,06	4,065670545	1,997151293	1,997151293	5,074225249	-9,338787027	
260	-4,0407	-2,12822	-8,50059	4,566903	9,412083	11,05037	-17,78	242,22	4,225469459	2,014524958	2,014524958	5,621971533	-7,548558772	
270	-3,11189	-1,01467	-7,38704	3,27314	8,015749	11,05037	-18,06	251,94	4,394966757	1,969498274	1,969498274	6,046726009	-5,262065311	
280	-1,67301	-0,22845	-6,60081	1,688533	6,809531	11,05037	-17,78	262,22	4,574358348	1,819023871	1,819023871	6,307839819	-2,565319906	
290	0,073188	-0,00392	-6,37628	0,073293	6,376703	11,05037	-16,94	273,06	4,763448323	1,559318691	1,559318691	6,364238133	0,398519877	
300	1,771062	-0,45562	-6,82798	1,828728	7,053936	11,05037	-15,57	284,43	4,961668962	1,317006425	1,317006425	6,180000157	3,400824903	
310	2,997115	-1,47883	-7,85119	3,342099	8,403804	11,05037	-13,74	296,26	5,168134923	1,206129725	1,206129725	5,73071813	6,146771103	
320	3,361747	-2,67464	-9,047	4,295931	9,651403	11,05037	-11,49	308,51	5,381716958	1,215021322	1,215021322	5,009183071	8,249707096	
330	2,726145	-3,37652	-9,74889	4,339674	10,12288	11,05037	-8,92	321,08	5,60111811	1,298124746	1,298124746	4,029462374	9,286340513	
340	1,404166	-2,868	-9,24036	3,193287	9,346441	11,05037	-6,09	333,91	5,824939057	1,419989974	1,419989974	2,828416059	8,908200125	
350	-0,13981	0,601479	-5,77089	0,617515	5,77258	11,05037	-3,09	346,91	6,051725891	1,595018585	1,595018585	1,459914182	5,584919689	
360	-3E-15	12,05627	5,6839	12,05627	5,6839	11,05037	0,00	360,00	6,28	1,570796327	4,709203673	4,70014E-15	-5,683900291	
370	5,033533	21,65467	15,28231	22,23199	16,08991	11,05037	3,09	373,09	6,508274109	1,252616967	5,027383033	-1,44461973	-16,02493009	
380	8,100581	16,54536	10,17299	18,42195	13,0042	11,05037	6,09	386,09	6,735060943	0,98832596	5,38167404	-2,805015493	-12,69807354	
390	6,95027	8,608399	2,236034	11,06394	7,301103	11,05037	8,92	398,92	6,95888189	0,311261433	5,968738567	-4,005166196	-6,104485703	
400	4,992489	3,972068	-2,4003	6,379833	5,539528	11,05037	11,49	411,49	7,178283042	0,44815519	0,44815519	-4,995395692	-2,39424184	
410	3,849286	1,899303	-4,47306	4,292361	5,901296	11,05037	13,74	423,74	7,391865077	0,860210221	0,860210221	-5,720066914	-1,451251454	
420	3,737305	0,961446	-5,41092	3,858993	6,576131	11,05037	15,57	435,57	7,598331038	0,966341475	0,966341475	-6,180129883	-2,247552637	
430	4,334613	0,232016	-6,14035	4,340818	7,516166	11,05037	16,94	446,94	7,796551677	0,956106348	0,956106348	-6,379025851	-3,975020436	
440	5,19338	-0,70915	-7,08152	5,241574	8,78175	11,05037	17,78	457,78	7,985641652	0,938023183	0,938023183	-6,338445686	-6,078094756	
450	5,91997	-1,93028	-8,30265	6,22672	10,19706	11,05037	18,06	468,06	8,165033243	0,951384212	0,951384212	-6,092357661	-8,176992526	
460	6,272158	-3,30353	-9,67589	7,088952	11,53095	11,05037	17,78	477,78	8,334530541	0,995669714	0,995669714	-5,680607748	-10,03461698	
470	6,168318	-4,63738	-11,0097	7,717088	12,61993	11,05037	16,94	486,94	8,494329455	1,060110325	1,060110325	-5,143172186	-11,52434178	
480	5,646061	-5,76016	-12,1325	8,065819	13,38193	11,05037	15,57	495,57	8,644997705	1,135237993	1,135237993	-4,515925572	-12,59692709	
490	4,992489	-3,37652	-9,74889	4,339674	10,12288	11,05037	-8,92	321,08	5,60111811	1,298124746	1,298124746	4,029462374	9,286340513	
500	4,153996	-4,23794	-10,6103	5,934293	11,39449	11,05037	-15,57	135,57	2,364997705	1,197633963	1,197633963	-4,473220753	-10,47972384	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г-Г:

α	Tκ1	Zκ1	Qκш1	α, рад	угол вектора	угол логич	Tκп1	Zκп1	Tκ2	Zκ2	Qκш2	угол вектора	угол лог	Tκп2	Zκп2
0	0	47,96675	47,96675	0	1,57079633	4,712389	8,81496E-15	-47,9668	1,38089E-15	2,064671	2,064671	1,570796327	4,712389	-1,45437E-15	-2,06467
10	1,286071	47,67779	47,69514	0,174533	1,54382866	4,739357	7,012629444	-47,1768	0,91430336	2,467042	2,631017	1,215882518	5,067303	-0,472015652	-2,58833
20	2,314996	46,87337	46,9305	0,349066	1,52144813	4,761737	13,85625176	-44,8383	1,559970174	1,680566	2,292991	0,822595741	5,46059	-0,891105074	-2,11276
30	2,890221	45,72475	45,81601	0,523599	1,5076712	4,775514	20,35937239	-41,0439	1,739180913	0,594147	1,837869	0,329193985	5,953991	-1,209101416	-1,38414
40	2,920099	44,46827	44,56404	0,698132	1,50522344	4,777962	26,34672634	-35,9417	1,378018538	-0,51619	1,471524	0,358407078	0,358407	-1,387421109	-0,49035
50	2,434151	43,34606	43,41436	0,872665	1,51469903	4,768486	31,64036882	-29,727	0,548081408	-1,37005	1,475608	1,190250148	1,19025	-1,401815588	0,460793
60	1,567443	42,54825	42,57711	1,047198	1,53397378	4,749212	36,06414116	-22,6316	-0,549829175	-1,75682	1,840854	1,874107231	1,874107	-1,246539633	1,354578
70	0,518697	42,17278	42,17597	1,22173	1,55849761	4,724688	39,45204152	-14,9114	-1,637097021	-1,59298	2,28422	2,369853077	2,369853	-0,936987677	2,083198
80	-0,50424	42,21387	42,21688	1,396263	1,5827406	4,700445	41,66010206	-6,83378	-2,431406775	-0,94618	2,609022	2,770475187	2,770475	-0,509596273	2,558771
90	-1,33426	42,58006	42,60096	1,570796	1,60212131	4,681064	42,58006359	1,334256	-2,723935427	-0,01807	2,723995	3,134958508	3,134959	-0,018071249	2,723935
100	-1,87567	43,13292	43,17369	1,745329	1,61425484	4,668893	42,15193009	9,337132	-2,437577623	0,911184	2,602314	2,783868297	3,499317	0,474059779	2,558771
110	-2,10949	43,73094	43,78179	1,919862	1,61899681	4,664188	40,3721524	16,93913	-1,64864143	1,561258	2,270583	2,38341086	3,899774	0,903234083	2,083198
120	-2,077	44,26398	44,31269	2,094395	1,61768492	4,6655	37,29523456	23,93072	-0,565275407	1,73007	1,820077	1,886597128	4,396588	1,21564717	1,354578
130	-1,85232	44,6701	44,70849	2,268928	1,6122393	4,670946	33,02863542	30,13235	0,530663162	1,349287	1,449889	1,19608648	5,087099	1,374717608	0,460793
140	-1,51509	44,93475	44,96029	2,443461	1,60450109	4,678684	27,72287771	35,3959	1,360752299	0,501697	1,450292	0,353228255	5,929957	1,364881634	-0,49035
150	-1,13086	45,07826	45,09244	2,617994	1,59587764	4,687308	21,55977822	39,60435	1,72411971	-0,60284	1,826474	0,336365051	0,336365	1,191710238	-1,38414
160	-0,74162	45,1387	45,14479	2,792527	1,58722472	4,695961	14,74144728	42,67015	1,548863839	-1,68461	2,288424	0,827354538	0,827355	0,879285959	-2,11276
170	-0,36509	45,15565	45,15713	2,96706	1,5788812	4,704304	7,481657315	44,53303	0,908418581	-2,46808	2,629951	1,218117775	1,218118	0,46604009	-2,58833
180	-3,7E-16	45,15784	45,15784	3,141593	1,57079633	4,712389	-2,76625E-15	45,15784	2,45672E-15	-2,75349	2,753494	1,570796327	1,570796	2,27692E-15	-2,75349
190	0,365404	45,15828	45,15975	3,316126	1,56270488	4,72048	-7,48179959	44,53567	-1,894598778	-9,63625	9,82073	1,76493181	1,764932	-0,192499093	-9,81884
200	0,743538	45,14643	45,15255	3,490659	1,55432835	4,728857	-14,7422915	42,67807	-3,334055139	-8,23464	8,883985	1,955504069	1,955504	-0,316574984	-8,87834
210	1,136625	45,09322	45,10754	3,665191	1,54559554	4,73759	-21,56226267	39,62018	-3,974820253	-6,25816	7,413756	2,136655497	2,136655	-0,313214982	-7,40714
220	1,529228	44,96079	44,98679	3,839724	1,53679696	4,746388	-27,72878091	35,42493	-3,666446555	-4,14836	5,536396	2,294606284	2,294606	-0,142149386	-5,53457
230	1,881248	44,70954	44,7491	4,014257	1,52874401	4,754441	-33,04024884	30,17986	-2,486992329	-2,36371	3,43107	2,381604908	2,381605	0,212097128	-3,42451
240	2,128779	44,31681	44,36791	4,18879	1,52279774	4,760388	-37,315094	24,00198	-0,71857218	-1,26491	1,454764	2,087416525	2,087417	0,736156132	-1,25476
250	2,197692	43,79725	43,85236	4,363323	1,52065962	4,762526	-40,40429868	17,0447	1,232780408	-1,02637	1,604114	0,69428455	0,694285	1,386107658	0,807396
260	2,020351	43,20912	43,25633	4,537856	1,52407286	4,759112	-42,2018504	9,492843	2,941774476	-1,60669	3,351938	0,499892867	0,499893	2,093114079	2,618084
270	1,555947	42,65235	42,68072	4,712389	1,53433275	4,748853	-42,65234859	1,555947	4,066687421	-2,7745	4,922989	0,598714675	0,598715	2,774503805	4,066687
280	0,836504	42,25924	42,26751	4,886922	1,55100433	4,732181	-41,76248101	-6,51444	4,449692289	-4,17568	6,102139	0,753641185	0,753641	3,339565287	5,107191
290	-0,03659	42,14697	42,14699	5,061455	1,57166457	4,711521	-39,59268149	-14,4495	4,128846859	-5,45037	6,837684	0,922490225	0,92249	3,709524595	5,743984
300	-0,88553	42,37282	42,38207	5,235988	1,59169184	4,691493	-36,25317362	-21,9533	3,325553549	-6,33638	7,156048	1,087478784	1,087479	3,824689887	6,048204
310	-1,49856	42,88443	42,9106	5,410521	1,60572621	4,677459	-31,88812179	-28,7135	2,361606546	-6,75259	7,153645	1,234358942	1,234359	3,654771739	6,149576
320	-1,68087	43,48233	43,51481	5,585054	1,60943356	4,673752	-26,66227898	-34,3898	1,563977884	-6,84257	7,019035	1,346090586	1,346091	3,200245363	6,247022
330	-1,36307	43,83327	43,85446	5,759587	1,60188306	4,681302	-20,73618126	-38,6423	1,121087845	-6,94651	7,036396	1,410787434	1,410787	2,502365753	6,5764
340	-0,70208	43,57901	43,58467	5,934119	1,58690551	4,69628	-14,24515691	-41,191	0,961628695	-7,46675	7,528416	1,442713205	1,442713	1,650142677	7,345344
350	0,069906	41,84427	41,84433	6,108652	1,56912571	4,71406	-7,335025226	-41,1964	0,900498915	-9,33274	9,376084	1,474605947	1,474606	0,733795126	9,347326
360	1,48E-15	36,11688	36,11688	6,283185	1,57079633	4,712389	-2,21243E-15	-36,1169	2,2715E-15	-15,0987	15,09868	1,570796327	1,570796	2,77472E-15	15,09868
370	-2,51677	31,31768	31,41864	6,457718	1,6509865	4,632199	7,916788842	-30,4049	-3,348715864	-19,8699	20,15007	1,737759806	1,737776	-0,152523382	20,14949
380	-4,05029	33,87233	34,11363	6,632251	1,68980645	4,593379	15,39104818	-30,4443	-5,72123249	-17,2009	18,12739	1,891898475	1,891898	-0,506842916	18,1203
390	-3,47514	37,84081	38,00005	6,806784	1,66237509	4,62081	21,92996142	-31,0335	-5,987055497	-13,0066	14,31836	2,002191116	2,002191	-1,318340473	14,25754
400	-2,49624	40,15898	40,23649	6,981317	1,63287552	4,65031	27,72592752	-29,159	-5,809466495	-10,2838	11,81127	2,085018475	2,085018	-2,159981792	11,61209
410	-1,92464	41,19536	41,2403	7,15585	1,61748228	4,665703	32,79461375	-25,0055	-5,93097671	-8,62742	10,46942	2,173054346	2,173054	-2,796626647	10,08899
420	-1,86865	41,66429	41,70617	7,330383	1,61561651	4,667569	37,01665879	-19,2138	-6,34500153	-7,29549	9,668674	2,286625356	2,286625	-3,145581347	9,142679
430	-2,16731	42,029	42,08485	7,504916	1,62231762	4,660868	40,2356071	-12,3382	-6,777682036	-5,87448	8,969199	2,427460442	2,42746	-3,202105302	8,37813
440	-2,59669	42,49959	42,57884	7,679449	1,63181964	4,651366	42,30483561	-4,82274	-6,931819708	-4,27574	8,144451	2,588891388	2,588891	-3,007084889	7,568984
450	-2,95999	43,11015	43,21165	7,853982	1,63934971	4,643836	43,11015355	2,959985	-6,576398361	-2,62303	7,080207	2,762073069	2,762073	-2,623034442	6,576398
460	-3,13608	43,79677	43,90891	8,028515	1,64227957	4,640906	42,58682909	10,69366	-5,70002982	-1,16982	5,818832	2,939173591	2,939174	-2,141843309	5,410297
470	-3,08416	44,4637	44,57054	8,203047	1,64004892	4,643136	40,7273688	18,10564	-4,509506115	-0,13105	4,51141	3,112539376	3,112539	-1,665491284	4,192727
480	-2,82303	45,02509	45,11351	8,37758	1,63341341	4,649772	37,58135762	24,95736	-3,360764431	0,454478	3,391355	3,007177491	3,276008	-1,286792649	3,137746
490	-2,41638	45,43903	45,50323	8,552113	1,62392479	4,659261	33,25509712	31,0587	-2,756878946	0,890356	2,897087	2,829208959	3,453976	-1,090035693	2,684201

440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440
450	-2,95999	43,11015	43,21165	7,853982	1,63934971	4,643836	43,11015355	2,959985	-6,576398361	-2,62303	7,080207	2,762073069	2,762073	-2,623034442	6,576398
460	-3,13608	43,79677	43,90891	8,028515	1,64227957	4,640906	42,58682909	10,69366	-5,70002982	-1,16982	5,818832	2,939173591	2,939174	-2,141843309	5,410297
470	-3,08416	44,4637	44,57054	8,203047	1,64004892	4,643136	40,7273688	18,10564	-4,509506115	-0,13105	4,51141	3,112539376	3,112539	-1,665491284	4,192727
480	-2,82303	45,02509	45,11351	8,37758	1,63341341	4,649772	37,58135762	24,95736	-3,360764431	0,454478	3,391355	3,007177491	3,276008	-1,286792649	3,137746
490	-2,41638	45,43903	45,50323	8,552113	1,62392479	4,659261	33,25509712	31,0587	-2,756878946	0,890356	2,897087	2,829208959	3,453976	-1,090035693	2,684201
500	-1,93025	45,69919	45,73994	8,726646	1,61300938	4,670176	27,89621701	36,24835	-3,11810486	1,968855	3,687678	2,578385092	3,7048	-1,123051123	3,51251
510	-1,423	45,83602	45,8581	8,901179	1,60183178	4,681354	21,68565722	40,40666	-4,525009084	5,122394	6,83481	2,294351638	3,988834	-1,357575938	6,698628
520	-0,92734	45,88839	45,89776	9,075712	1,59100224	4,692183	14,82333686	43,43815	-6,126461316	12,1861	13,63945	2,036634949	4,24655	-1,589098977	13,54656
530	-0,45545	45,90081	45,90306	9,250245	1,58071842	4,702467	7,522063494	45,28256	-5,324715543	22,85134	23,46352	1,799726736	4,483459	-1,275726808	23,42881
540	-1,4E-15	45,90208	45,90208	9,424778	1,57079633	4,712389	8,43553E-15	45,90208	-1,11388E-14	40,99403	40,99403	1,570796327	4,712389	7,53357E-15	40,99403
550	0,371767	45,21075	45,21228	9,599311	1,56257353	4,720612	-7,484645096	44,58845	11,68415219	50,85105	52,17614	1,344944424	4,938241	2,676450758	52,10744
560	0,755026	45,1928	45,19911	9,773844	1,55409112	4,729094	-14,74735684	42,72558	18,64476947	38,41126	42,69721	1,118897926	5,164287	4,382929165	42,47166
570	1,15104	45,13061	45,14528	9,948377	1,54529721	4,737888	-21,56847381	39,65977	18,59746265	22,99531	29,57448	0,890742623	5,392443	4,60821946	29,21326
580	1,542081	44,98445	45,01088	10,12291	1,53652944	4,746656	-27,73414745	35,45132	16,00153706	12,43686	20,26635	0,660701364	5,622484	4,263626333	19,81278
590	1,886069	44,71611	44,75587	10,29744	1,52864256	4,754543	-33,04218441	30,18777	13,55712277	6,242261	14,92519	0,431503006	5,851682	3,932501322	14,39781
600	2,117272	44,30507	44,35563	10,47198	1,52304417	4,760141	-37,3106808	23,98615	12,01356742	2,529805	12,27704	0,207546638	6,075639	3,815908689	11,66896
610	2,155794	43,76575	43,81881	10,64651	1,52157855	4,761607	-40,3890292	16,99455	11,19146377	-0,10032	11,19191	0,008963894	0,008964	3,921977677	10,48222
620	1,927169	43,16005	43,20305	10,82104	1,52617428	4,757011	-42,16969833	9,392554	10,6437599	-2,37133	10,90472	0,219210541	0,219211	4,183573668	10,07028
630	1,389679	42,59813	42,6208	10,99557	1,53818489	4,745	-42,59813484	1,389679	9,960423461	-4,50769	10,93295	0,42498094	0,424981	4,50769112	9,960423
640	0,561904	42,22174	42,22548	11,17011	1,55748871	4,725697	-41,67787031	-6,77836	8,871023085	-6,4274	10,95475	0,627006142	0,627006	4,789321015	9,852359
650	-0,46084	42,16968	42,1722	11,34464	1,58172424	4,701461	-39,46891832	-14,8559	7,306162951	-7,90579	10,76483	0,824795838	0,824796	4,930156441	9,569486
660	-1,51172	42,53391	42,56077	11,51917	1,60632296	4,676862	-36,07958739	-22,5761	5,419315345	-8,74467	10,28777	1,015997385	1,015997	4,863451431	9,065601
670	-2,38299	43,32082	43,38631	11,69371	1,62574881	4,657436	-31,65391782	-29,6716	3,509047775	-8,89845	9,565343	1,19517547	1,195175	4,56103408	8,407899
680	-2,87584	44,43306	44,52603	11,86824	1,63542919	4,647756	-26,35799608	-35,8863	1,854273189	-8,45223	8,653242	1,354834989	1,354835	4,012535793	7,666691
690	-2,85498	45,6811	45,77023	12,04277	1,63321317	4,649972	-20,36806798	-40,9885	0,665785767	-7,62266	7,651677	1,483674411	1,483674	3,234740791	6,934307
700	-2,29049	46,82331	46,8793	12,2173	1,61967503	4,66351	-13,86216132	-44,7829	0,028919326	-6,7111	6,711163	1,566487175	1,566487	2,268156177	6,316262
710	-1,2735	47,62373	47,64076	12,39184	1,59753092	4,685654	-7,015617225	-47,1214	-0,125193189	-6,01892	6,020219	1,591593281	1,591593	1,16846516	5,905736
720	-2,8E-15	47,91133	47,91133	12,56637	1,57079633	4,712389	-1,46746E-14	-47,9113	-4,02959E-16	-3,41197	3,411972	1,570796327	1,570796	1,46306E-15	3,411972

Тк3	Zк3	Qкш3	угол вектора	угол лог	Ткп3	Zкп3	Тк4	Zк4	Qкш4	угол век	угол лог	Ткп4	Zкп4
-1,75001E-15	-91,0599	91,05992	1,570796327	1,570796	-5,5781E-15	91,05992	1,84619E-15	-9,04096	9,040957	1,570796	1,570796	-2,5613E-15	9,040957
0,737171258	-90,369	90,37203	1,562639163	1,562639	-16,41838863	88,86811	-2,882170632	-13,8406	14,13751	1,776103	1,776103	0,434989252	14,13081
1,498563274	-90,3392	90,35166	1,55420967	1,55421	-32,30602604	84,37857	-4,793828157	-11,2741	12,25096	1,972843	1,972843	0,64875668	12,23377
2,287665004	-90,2238	90,25282	1,545446316	1,545446	-47,0930885	76,99229	-4,611760218	-7,25241	8,594517	2,137191	2,137191	0,367698751	8,586648
3,071308299	-89,9452	89,99766	1,536663166	1,536663	-60,16844567	66,92785	-4,025471854	-4,80181	6,265924	2,268473	2,268473	-0,00285339	6,265923
3,767317947	-89,4256	89,50496	1,528693286	1,528693	-70,92560385	54,59576	-3,80589171	-3,51418	5,180178	2,396025	2,396025	-0,2456351	5,174351
4,246051816	-88,6219	88,72354	1,522920935	1,522921	-78,87182662	40,63375	-3,997431717	-2,65252	4,79743	2,555746	2,555746	-0,29843521	4,788138
4,353486016	-87,563	87,67116	1,521118906	1,521119	-83,7712877	25,85737	-4,364998285	-1,76825	4,709555	2,7567	2,7567	-0,16869158	4,706533
3,947519404	-86,3692	86,45933	1,525122922	1,525123	-85,74250784	11,1103	-4,617040495	-0,70953	4,671242	2,989108	2,989108	0,102985207	4,670107
2,945625707	-85,2505	85,30136	1,536257469	1,536257	-85,25048343	-2,94563	-4,515931857	0,457805	4,539078	3,040562	3,242623	0,457804965	4,515932
1,398407854	-84,481	84,49255	1,554244906	1,554245	-82,95468937	-16,0471	-3,972582794	1,537539	4,259746	2,772311	3,510875	0,824348084	4,179221
-0,497438692	-84,3167	84,31812	1,576695908	1,576696	-79,40186792	-28,3706	-3,047564878	2,316732	3,828172	2,491601	3,791584	1,134687301	3,656143
-2,397253659	-84,9067	84,94057	1,599022792	1,599023	-74,73001467	-40,3773	-1,937499657	2,652271	3,284577	2,201704	4,081481	1,328184002	3,004059
-3,881542896	-86,2052	86,29259	1,615792696	1,615793	-68,53205496	-52,4382	-0,91782264	2,554604	2,71448	1,915716	4,367469	1,366975328	2,345161
-4,556714858	-87,9154	88,0334	1,622580675	1,622581	-60,00156725	-64,4181	-0,249375269	2,216861	2,230843	1,682816	4,60037	1,233938021	1,858509
-4,218051319	-89,5144	89,6137	1,617882992	1,617883	-48,41012843	-75,4127	-0,059926226	2,002747	2,003644	1,600709	4,682476	0,949475968	1,764393
-2,992570021	-90,4023	90,45184	1,603887045	1,603887	-33,73151016	-83,9269	-0,225259901	2,309382	2,320342	1,66803	4,615155	0,578179951	2,247152
-1,20359868	-89,468	89,4761	1,584248355	1,584248	-16,72126907	-87,8998	-0,525352554	4,056533	4,09041	1,699587	4,583598	0,187038268	4,086132
-1,34877E-15	-84,0282	84,02821	1,570796327	1,570796	-5,14735E-15	-84,0282	-2,85796E-15	9,785203	9,785203	1,570796	4,712389	-5,9942E-16	9,785203
-0,256764061	-86,1122	86,11258	1,573778057	1,573778	14,70036286	-84,8485	2,888534098	13,89307	14,19018	1,365805	4,91738	0,432143746	14,1836
0,027302427	-87,2534	87,2534	1,570483417	1,570483	29,86807648	-81,982	4,805315986	11,32047	12,29813	1,169366	5,113819	0,643691345	12,28128
1,636310264	-89,1922	89,2072	1,552452493	1,552452	46,01318163	-76,4245	4,626174993	7,289795	8,633806	1,005316	5,277869	0,361487616	8,626235
2,699429752	-89,2681	89,30893	1,540565967	1,540566	59,44832536	-66,6482	4,038325102	4,825476	6,29232	0,873971	5,409214	-0,00821993	6,292315
2,443597562	-88,2686	88,30242	1,543119741	1,54312	69,18838819	-54,8661	3,810712714	3,520748	5,188179	0,745868	5,537317	-0,24757067	5,182269
0,978699204	-87,246	87,2515	1,559579101	1,559579	76,04660813	-42,7754	3,985924792	2,640782	4,781352	0,585131	5,698054	-0,294022	4,772303
-1,202394985	-86,8526	86,86095	1,584639526	1,58464	81,20352683	-30,8352	4,323100593	1,736748	4,658915	0,382003	5,901183	-0,15342209	4,656389
-3,518113862	-87,3154	87,38625	1,611066563	1,611067	85,37797197	-18,6268	4,52385879	0,660456	4,571816	0,14497	6,138215	0,135137274	4,569818
-5,470725861	-88,537	88,70586	1,632508141	1,632508	88,53700595	-5,47073	4,349664147	-0,51202	4,379696	0,117175	0,117175	0,512018711	4,349664
-6,749267227	-90,2317	90,48376	1,645456589	1,645457	90,0328713	9,021839	3,697982792	-1,57504	4,019429	0,402647	0,402647	0,908958786	3,915304
-7,249599608	-92,061	92,34605	1,649381897	1,649382	88,98859308	24,67434	2,623314057	-2,29402	3,48487	0,718533	0,718533	1,25845048	3,249711
-7,034114923	-93,7343	93,99785	1,645699065	1,645699	84,69333605	40,77542	1,311307714	-2,49118	2,815226	1,086268	1,086268	1,501770226	2,381215
-6,276543762	-95,076	95,283	1,636716713	1,636717	76,86695977	56,30559	0,033394319	-2,11821	2,118476	1,555032	1,555032	1,6011793	1,387142
-5,175100368	-96,0241	96,16345	1,624638008	1,624638	65,68745511	70,23223	-0,945592374	-1,26613	1,580266	2,212268	2,212268	1,538220926	0,3621
-3,907158877	-96,6158	96,69478	1,611214465	1,611214	51,69160192	81,71816	-1,431980286	-0,15492	1,440336	3,033829	3,033829	1,317589242	-0,58183
-2,591054791	-96,9341	96,96877	1,597520015	1,59752	35,58822658	90,20211	-1,363143924	0,934918	1,652947	2,540424	3,742762	0,961175537	-1,34476
-1,286040221	-97,0778	97,08634	1,584043071	1,584043	18,12388861	95,37967	-0,818057374	1,722926	1,907273	2,014087	4,269098	0,506446269	-1,83881
-2,17532E-15	-97,1176	97,11764	1,570796327	1,570796	1,78475E-14	97,11764	-1,44495E-15	2,009248	2,009248	1,570796	4,712389	1,66149E-15	-2,00925
1,20371649	-96,3983	96,4058	1,558310068	1,55831	-17,92481598	94,72476	1,888235313	9,58377	9,768013	1,376264	4,906922	-0,1953446	-9,76606
2,425967607	-96,266	96,29657	1,545600991	1,545601	-35,20457565	89,63072	3,322567309	8,188265	8,836693	1,185324	5,097861	-0,32164032	-8,83084
3,662960282	-95,978	96,04786	1,532650252	1,53265	-51,16120902	81,28789	3,960405479	6,220771	7,37447	1,003869	5,279316	-0,31942612	-7,36755
4,85530294	-95,4272	95,55066	1,51996052	1,519961	-65,05881243	69,98056	3,653593307	4,124689	5,510155	0,84589	5,437296	-0,14751593	-5,50818
5,892402948	-94,5389	94,72234	1,508549026	1,508549	-76,20855202	56,25458	2,482171325	2,357135	3,423049	0,759566	5,523619	0,210161557	-3,41659
6,593621628	-93,2649	93,49764	1,500215943	1,500216	-84,06654256	40,92218	0,730079105	1,276647	1,470661	1,051316	5,23187	0,740569341	-1,27059
6,766169767	-91,6692	91,91861	1,497119242	1,497119	-88,45507431	24,99461	-1,190882716	1,057869	1,592887	2,415276	3,867909	1,401377142	0,757251

4,85530294	-95,4272	95,55066	1,51996052	1,519961	-65,05881243	69,98056	3,653593307	4,124689	5,510155	0,84589	5,437296	-0,14751593	-5,50818
5,892402948	-94,5389	94,72234	1,508549026	1,508549	-76,20855202	56,25458	2,482171325	2,357135	3,423049	0,759566	5,523619	0,210161557	-3,41659
6,593621628	-93,2649	93,49764	1,500215943	1,500216	-84,06654256	40,92218	0,730079105	1,276647	1,470661	1,051316	5,23187	0,740569341	-1,27059
6,766169767	-91,6692	91,91861	1,497119242	1,497119	-88,45507431	24,99461	-1,190882716	1,057869	1,592887	2,415276	3,867909	1,401377142	0,757251
6,262298617	-89,9354	90,15314	1,501277442	1,501277	-89,65649232	9,449954	-2,848592771	1,655768	3,294852	2,615068	3,668117	2,125266146	2,517795
5,006092211	-88,3313	88,47307	1,514182856	1,514183	-88,33132284	-5,00609	-3,900419711	2,828718	4,818186	2,514131	3,769054	2,82871755	3,90042
3,12585488	-87,1883	87,24435	1,534959918	1,53496	-85,3209447	-18,2185	-4,175092287	4,213181	5,931466	2,351654	3,931531	3,424175989	4,843274
0,964502545	-86,7644	86,7698	1,559680449	1,55968	-81,2020198	-30,5815	-3,704596038	5,427662	6,571419	2,169708	4,113478	3,833287774	5,337551
-0,973988885	-87,1045	87,10997	1,581977701	1,581978	-75,92172655	-42,7088	-2,699361607	6,175289	6,739491	1,98289	4,300295	3,998276111	5,42536
-2,04248659	-87,8695	87,89323	1,594036689	1,594037	-68,62482077	-54,9168	-1,477178225	6,316197	6,486632	1,800539	4,482647	3,888975711	5,191557
-1,687985267	-88,1634	88,17955	1,58994009	1,58994	-57,96340767	-66,4521	-0,369010241	5,891847	5,903392	1,633345	4,64984	3,504528268	4,750612
0,247031539	-86,3947	86,39508	1,567936999	1,567937	-42,98342997	-74,9435	0,370818667	5,098681	5,112148	1,498196	4,78499	2,870479028	4,230178
2,908631394	-80,5256	80,57811	1,534691444	1,534691	-24,80815824	-76,6641	0,626775131	4,222448	4,268713	1,423434	4,859752	2,033138263	3,753434
3,595764309	-70,6732	70,76461	1,519961402	1,519961	-8,731134388	-70,2239	0,442911013	3,553282	3,58078	1,446788	4,836398	1,053203127	3,422389
6,93202E-15	-52,8194	52,81938	1,570796327	1,570796	-1,61779E-14	-52,8194	2,03141E-15	3,30423	3,30423	1,570796	4,712389	3,54197E-15	3,40423
-9,052382156	-49,1542	49,98082	1,752918554	1,752919	-0,379315909	-49,9794	-1,428053546	-3,60699	3,879392	1,947775	1,947775	-0,78001173	-3,80017
-13,81215105	-60,1626	61,72775	1,796466064	1,796466	7,597649676	-61,2584	-2,406650806	-2,30787	3,3344	2,377144	2,377144	-1,47217458	-2,99181
-12,33497739	-73,4867	74,51472	1,737099299	1,737099	26,06093341	-69,8088	-2,599524975	-0,504	2,647933	2,950087	2,950087	-1,99925421	-1,73624
-9,263782209	-81,6567	82,18053	1,683761211	1,683761	45,39146754	-68,5073	-1,882451914	1,333622	2,306984	2,525218	3,757967	-2,29927779	-0,1884
-7,302812492	-85,5471	85,85823	1,655955858	1,655956	60,83871693	-60,5829	-0,361907328	2,749534	2,773249	1,701669	4,581516	-2,33889442	1,490129
-7,048943421	-87,357	87,64092	1,651313119	1,651313	72,1288962	-49,7831	1,628997632	3,378064	3,750326	1,121467	5,161718	-2,11099	3,099785
-8,07075816	-88,6897	89,05616	1,661546332	1,661546	80,58068948	-37,9177	3,645464159	3,079867	4,772315	0,701496	5,581689	-1,64730607	4,478992
-9,638014977	-90,3472	90,85982	1,67707193	1,677072	87,30098901	-25,1802	5,256553689	1,959516	5,609907	0,356819	5,926366	-1,01695602	5,516961
-11,08148518	-92,5327	93,19386	1,68998622	1,689986	92,53267835	-11,0815	6,127153926	0,306336	6,134807	0,049955	6,233231	-0,3063356	6,127154
-11,92230752	-95,0841	95,8286	1,695532368	1,695532	95,70981157	4,769994	6,177139315	-1,46833	6,349255	0,233373	0,233373	0,373373894	6,338268
-11,9324485	-97,6728	98,39899	1,692361489	1,692361	95,86355634	22,19323	5,590788096	-3,00259	6,346057	0,492854	0,492854	0,90934601	6,280567
-11,14212255	-99,9878	100,6067	1,681773313	1,681773	92,16302488	40,34453	4,748818324	-4,13859	6,299142	0,716843	0,716843	1,209713236	6,181891
-9,752197217	-101,856	102,3221	1,666250043	1,66625	84,2950285	58,00134	4,200662852	-5,08834	6,59824	0,880671	0,880671	1,197760718	6,488616
-7,974965931	-103,21	103,5178	1,647912265	1,647912	72,45141289	73,93739	4,432707475	-6,59457	7,945894	0,97899	0,97899	0,84325622	7,901022
-6,004924931	-104,084	104,2566	1,628425759	1,628426	57,24219086	87,13653	5,586170703	-10,0662	11,51229	1,064164	1,064164	0,195313847	11,51063
-3,983118041	-104,58	104,656	1,608864671	1,608865	39,51143034	96,9109	6,862830109	-17,3435	18,65192	1,194001	1,194001	-0,51713625	18,64475
-1,978904406	-104,82	104,8383	1,589673218	1,589673	20,15058354	102,8836	5,699861904	-28,1276	28,69926	1,37086	1,37086	-0,72896995	28,69
-3,21731E-15	-102,539	102,5389	1,570796327	1,570796	4,39689E-14	102,5389	1,05523E-14	-46,3075	46,30751	1,570796	1,570796	1,98568E-14	46,30751

Тк5	Zк5	Qкш5	угол век	угол лог	Ткп5	Zкп5
1,47707E-15	36,11688	36,11688	1,570796	4,712389	6,63728E-15	-36,1169
-2,516766736	31,31768	31,41864	1,650986	4,632199	7,916788842	-30,4049
-4,050290435	33,87233	34,11363	1,689806	4,593379	15,39104818	-30,4443
-3,475135104	37,84081	38,00005	1,662375	4,62081	21,92996142	-31,0335
-2,496244328	40,15898	40,23649	1,632876	4,65031	27,72592752	-29,159
-1,924643238	41,19536	41,2403	1,617482	4,665703	32,79461375	-25,0055
-1,868652347	41,66429	41,70617	1,615617	4,667569	37,01665879	-19,2138
-2,167306431	42,029	42,08485	1,622318	4,660868	40,2356071	-12,3382
-2,59668994	42,49959	42,57884	1,63182	4,651366	42,30483561	-4,82274
-2,959985148	43,11015	43,21165	1,63935	4,643836	43,11015355	2,959985
-3,136078866	43,79677	43,90891	1,64228	4,640906	42,58682909	10,69366
-3,084158813	44,4637	44,57054	1,640049	4,643136	40,7273688	18,10564
-2,823030515	45,02509	45,11351	1,633413	4,649772	37,58135762	24,95736
-2,416379928	45,43903	45,50323	1,623925	4,659261	33,25509712	31,0587
-1,930248876	45,69919	45,73994	1,613009	4,670176	27,89621701	36,24835
-1,422998629	45,83602	45,8581	1,601832	4,681354	21,68565722	40,40666
-0,927342999	45,88839	45,89776	1,591002	4,692183	14,82333686	43,43815
-0,45544693	45,90081	45,90306	1,580718	4,702467	7,522063494	45,28256
-1,38089E-15	45,90208	45,90208	1,570796	4,712389	-2,81184E-15	45,90208
0,371767362	45,21075	45,21228	1,562574	4,720612	-7,484645096	44,58845
0,755025552	45,1928	45,19911	1,554091	4,729094	-14,74735684	42,72558
1,151039889	45,13061	45,14528	1,545297	4,737888	-21,56847381	39,65977
1,542080774	44,98445	45,01088	1,536529	4,746656	-27,73414745	35,45132
1,886069476	44,71611	44,75587	1,528643	4,754543	-33,04218441	30,18777
2,117272445	44,30507	44,35563	1,523044	4,760141	-37,3106808	23,98615
2,155794162	43,76575	43,81881	1,521579	4,761607	-40,3890292	16,99455
1,927168849	43,16005	43,20305	1,526174	4,757011	-42,16969833	9,392554
1,389678998	42,59813	42,6208	1,538185	4,745	-42,59813484	1,389679
0,561903926	42,22174	42,22548	1,557489	4,725697	-41,67787031	-6,77836
-0,460844756	42,16968	42,1722	1,581724	4,701461	-39,46891832	-14,8559
-1,511722801	42,53391	42,56077	1,606323	4,676862	-36,07958739	-22,5761
-2,382985609	43,32082	43,38631	1,625749	4,657436	-31,65391782	-29,6716
-2,875841251	44,43306	44,52603	1,635429	4,647756	-26,35799608	-35,8863
-2,854978915	45,6811	45,77023	1,633213	4,649972	-20,36806798	-40,9885
-2,290486923	46,82331	46,8793	1,619675	4,66351	-13,86216132	-44,7829
-1,273504304	47,62373	47,64076	1,597531	4,685654	-7,015617225	-47,1214
-2,82584E-15	47,91133	47,91133	1,570796	4,712389	-2,93492E-15	-47,9113
2,260002675	54,79452	54,84111	1,529575	4,753611	7,289300497	-54,3545
4,077592861	53,38107	53,53658	1,494558	4,788627	14,42571652	-51,5564
5,111445368	51,35138	51,60514	1,471585	4,811601	21,24904769	-47,0273
5,10507400	49,10014	49,33300	1,43500	4,817705	27,53330150	-40,8505

-1,273504304	47,62373	47,64076	1,597531	4,685654	-7,015617225	-47,1214
-2,82584E-15	47,91133	47,91133	1,570796	4,712389	-2,93492E-15	-47,9113
2,260002675	54,79452	54,84111	1,529575	4,753611	7,289300497	-54,3545
4,077592861	53,38107	53,53658	1,494558	4,788627	14,42571652	-51,5564
5,111445368	51,35138	51,60514	1,471585	4,811601	21,24904769	-47,0273
5,19567408	49,10914	49,38323	1,46539	4,817795	27,58663152	-40,9595
4,3682408	47,07324	47,27549	1,478265	4,804921	33,25234597	-33,6044
2,847351551	45,58172	45,67056	1,50841	4,774775	38,05125014	-25,2567
0,964911446	44,82362	44,83401	1,549273	4,733913	41,79040634	-16,2373
-0,921423922	44,81581	44,82529	1,591354	4,691832	44,29496448	-6,87476
-2,510740713	45,42685	45,49618	1,62601	4,657175	45,42685239	2,510741
-3,613188361	46,43492	46,57528	1,648452	4,634734	45,1020463	11,62164
-4,165440795	47,59734	47,77926	1,658088	4,625097	43,30220609	20,19348
-4,211084408	48,7092	48,89089	1,657035	4,62615	40,07786351	28,00151
-3,860163834	49,63701	49,78689	1,648408	4,634777	35,54289353	34,86311
-3,244851492	50,3249	50,42941	1,635185	4,648	29,86252435	40,63686
-2,484160248	50,77979	50,84051	1,619678	4,663508	23,23854701	45,21866
-1,663711792	51,04576	51,07286	1,603377	4,679808	15,89529958	48,53634
-0,830593291	51,17701	51,18375	1,587025	4,696161	8,068820352	50,54375
-7,94427E-16	51,21556	51,21556	1,570796	4,712389	9,412E-15	51,21556
0,831949128	51,18754	51,1943	1,554545	4,728641	-8,069312224	50,55435
1,670942055	51,0732	51,10053	1,538091	4,745094	-15,8978911	48,5646
2,511920393	50,84738	50,90939	1,521435	4,76175	-23,2483019	45,29108
3,313222166	50,44277	50,55146	1,505208	4,777978	-29,88590931	40,7711
4,006333472	49,82278	49,9836	1,490557	4,792628	-35,59124039	35,09449
4,476349183	48,95978	49,16399	1,479621	4,803565	-40,16224014	28,35652
4,610375605	47,90349	48,12483	1,474849	4,808336	-43,4377124	20,71629
4,335129767	46,77533	46,97579	1,47838	4,804805	-45,3119205	12,39172
3,616413213	45,73319	45,87595	1,491884	4,791301	-45,733188	3,616413
2,563950954	44,96659	45,03963	1,513839	4,769346	-44,7286724	-5,28337
1,425347302	44,59476	44,61753	1,538845	4,74434	-42,39286008	-13,9129
0,537733916	44,57061	44,57386	1,558732	4,724453	-38,86815027	-21,8196
0,340499018	44,54867	44,54998	1,563153	4,720032	-34,34513281	-28,3745
1,187855984	43,73034	43,74647	1,54364	4,739546	-29,01926813	-32,7358
3,102010455	40,71363	40,83163	1,494752	4,788433	-23,04323316	-33,708
5,199118317	33,70229	34,10096	1,417737	4,865448	-16,41243584	-29,8916
4,869268613	23,04946	23,55817	1,362604	4,920581	-8,797790302	-21,8537
9,75786E-15	4,90805	4,90805	1,570796	4,712389	-1,02217E-14	-4,90805

ПРИЛОЖЕНИЕ Д-Д:

Центробежная сила инерции колена вала	
Приведенная масса колена, тк, кг	6
Приведенная масса противовеса, кг	0
Расстояние до центра тяжести противовеса, м	0,1025
	-
Сила инерции колена вала	77,9176581
Сила инерции противовеса	0

α	T1	Z1+S2	T2	Z2+S2	T3	Z3+S2	T4
0	0,000	-18,016	0,000	-13,887	0,000	-12,398	0,000
10	-2,572	-17,438	-0,744	-12,504	-0,731	-12,399	5,034
20	-4,630	-15,829	-1,510	-12,468	-1,487	-12,375	8,101
30	-5,780	-13,532	-2,302	-12,344	-2,273	-12,269	6,950
40	-5,840	-11,019	-3,084	-12,051	-3,058	-12,004	4,992
50	-4,868	-8,774	-3,772	-11,515	-3,762	-11,501	3,849
60	-3,135	-7,179	-4,235	-10,692	-4,258	-10,716	3,737
70	-1,037	-6,428	-4,312	-9,614	-4,395	-9,677	4,335
80	1,008	-6,510	-3,854	-8,402	-4,041	-8,501	5,193
90	2,669	-7,242	-2,779	-7,279	-3,112	-7,387	5,920
100	3,751	-8,348	-1,124	-6,526	-1,673	-6,601	6,272
110	4,219	-9,544	0,922	-6,422	0,073	-6,376	6,168
120	4,154	-10,610	3,023	-7,150	1,771	-6,828	5,646
130	3,705	-11,423	4,766	-8,724	2,997	-7,851	4,833
140	3,030	-11,952	5,752	-10,948	3,362	-9,047	3,860
150	2,262	-12,239	5,710	-13,445	2,726	-9,749	2,846
160	1,483	-12,360	4,581	-15,729	1,404	-9,240	1,855
170	0,730	-12,394	2,547	-17,330	-0,140	-5,771	0,911
180	0,000	-12,398	0,000	-17,905	0,000	5,684	0,000
190	-0,731	-12,399	-4,520	-31,671	5,034	15,282	-0,744
200	-1,487	-12,375	-8,155	-28,844	8,101	10,173	-1,510
210	-2,273	-12,269	-10,223	-24,785	6,950	2,236	-2,302
220	-3,058	-12,004	-10,391	-20,301	4,992	-2,400	-3,084
230	-3,762	-11,501	-8,736	-16,229	3,849	-4,473	-3,772
240	-4,258	-10,716	-5,695	-13,246	3,737	-5,411	-4,235
250	-4,395	-9,677	-1,930	-11,730	4,335	-6,140	-4,312
260	-4,041	-8,501	1,843	-11,714	5,193	-7,082	-3,854
270	-3,112	-7,387	5,021	-12,936	5,920	-8,303	-2,779
280	-1,673	-6,601	7,226	-14,952	6,272	-9,676	-1,124
290	0,073	-6,376	8,331	-17,277	6,168	-11,010	0,922
300	1,771	-6,828	8,422	-19,501	5,646	-12,133	3,023
310	2,997	-7,851	7,720	-21,356	4,833	-12,960	4,766
320	3,362	-9,047	6,490	-22,732	3,860	-13,481	5,752
330	2,726	-9,749	4,968	-23,642	2,846	-13,754	5,710
340	1,404	-9,240	3,327	-24,174	1,855	-13,859	4,581
350	-0,140	-5,771	1,661	-24,436	0,911	-13,884	2,547
360	0,000	5,684	0,000	-24,513	0,000	-13,887	0,000
370	5,034	15,282	-1,664	-24,457	-0,744	-12,504	-4,520
380	8,101	10,173	-3,342	-24,229	-1,510	-12,468	-8,155
390	6,950	2,236	-5,024	-23,777	-2,302	-12,344	-10,223
400	4,992	-2,400	-6,626	-22,968	-3,084	-12,051	-10,391
410	3,849	-4,473	-8,013	-21,728	-3,772	-11,515	-8,736
420	3,737	-5,411	-8,953	-20,002	-4,235	-10,692	-5,695

430	4,335	-6,140	-9,221	-17,889	-4,312	-9,614	-1,930
430	4,335	-6,140	-9,221	-17,889	-4,312	-9,614	-1,930
440	5,193	-7,082	-8,670	-15,633	-3,854	-8,402	1,843
450	5,920	-8,303	-7,233	-13,549	-2,779	-7,279	5,021
460	6,272	-9,676	-5,128	-12,016	-1,124	-6,526	7,226
470	6,168	-11,010	-2,851	-11,272	0,922	-6,422	8,331
480	5,646	-12,133	-1,075	-11,224	3,023	-7,150	8,422
490	4,833	-12,960	-0,681	-11,180	4,766	-8,724	7,720
500	3,860	-13,481	-2,376	-9,543	5,752	-10,948	6,490
510	2,846	-13,754	-6,204	-3,510	5,710	-13,445	4,968
520	1,855	-13,859	-10,398	10,513	4,581	-15,729	3,327
530	0,911	-13,884	-9,739	31,819	2,547	-17,330	1,661
540	0,000	-13,887	0,000	68,102	0,000	-17,905	0,000
550	-0,744	-12,504	22,625	89,198	-4,520	-31,671	-1,664
560	-1,510	-12,468	35,779	64,355	-8,155	-28,844	-3,342
570	-2,302	-12,344	34,893	33,647	-10,223	-24,785	-5,024
580	-3,084	-12,051	28,919	12,822	-10,391	-20,301	-6,626
590	-3,772	-11,515	23,342	0,970	-8,736	-16,229	-8,013
600	-4,235	-10,692	19,793	-5,633	-5,695	-13,246	-8,953
610	-4,312	-9,614	18,071	-9,814	-1,930	-11,730	-9,221
620	-3,854	-8,402	17,433	-13,145	1,843	-11,714	-8,670
630	-2,779	-7,279	17,141	-16,294	5,021	-12,936	-7,233
640	-1,124	-6,526	16,618	-19,381	7,226	-14,952	-5,128
650	0,922	-6,422	15,534	-22,233	8,331	-17,277	-2,851
660	3,023	-7,150	13,862	-24,640	8,422	-19,501	-1,075
670	4,766	-8,724	11,784	-26,521	7,720	-21,356	-0,681
680	5,752	-10,948	9,460	-27,853	6,490	-22,732	-2,376
690	5,710	-13,445	7,042	-28,690	4,968	-23,642	-6,204
700	4,581	-15,729	4,639	-29,151	3,327	-24,174	-10,398
710	2,547	-17,330	2,297	-29,368	1,661	-24,436	-9,739
720	0,000	-17,905	0,000	-24,729	0,000	-24,513	0,000

Z4+S2	Tk1	Zk1	Tk2	Zk2	Tk3	Zk3	Tk4	Zk4	Tk5	Zk5
5,684	0	47,967	1,38089E-15	2,064671	-1,75001E15	91,0599	1,84619E-15	-9,04096	1,47707E-15	36,11688
15,282	1,286071	47,678	0,91430336	2,467042	0,737171258	-90,369	2,882170632	-13,8406	2,516766736	31,31768
10,173	2,314996	46,873	1,559970174	1,680566	1,498563274	90,3392	4,793828157	-11,2741	4,050290435	33,87233
2,236	2,890221	45,725	1,739180913	0,594147	2,287665004	90,2238	4,611760218	-7,25241	3,475135104	37,84081
-2,400	2,920099	44,468	1,378018538	-0,51619	3,071308299	89,9452	4,025471854	-4,80181	2,496244328	40,15898
-4,473	2,434151	43,346	0,548081408	-1,37005	3,767317947	89,4256	-3,80589171	-3,51418	1,924643238	41,19536
-5,411	1,567443	42,548	0,549829175	-1,75682	4,246051816	88,6219	3,997431717	-2,65252	1,868652347	41,66429
-6,140	0,518697	42,173	1,637097021	-1,59298	4,353486016	-87,563	4,364998285	-1,76825	2,167306431	42,029
-7,082	-0,50424	42,214	2,431406775	-0,94618	3,947519404	86,3692	4,617040495	-0,70953	-2,59668994	42,49959
-8,303	-1,33426	42,580	2,723935427	-0,01807	2,945625707	85,2505	4,515931857	0,457805	2,959985148	43,11015
-9,676	-1,87567	43,133	2,437577623	0,911184	1,398407854	-84,481	3,972582794	1,537539	3,136078866	43,79677
-11,010	-2,10949	43,731	-1,64864143	1,561258	0,497438692	84,3167	3,047564878	2,316732	3,084158813	44,4637
-12,133	-2,077	44,264	0,565275407	1,73007	2,397253659	84,9067	1,937499657	2,652271	2,823030515	45,02509
-12,960	-1,85232	44,670	0,530663162	1,349287	3,881542896	86,2052	-0,91782264	2,554604	2,416379928	45,43903
-13,481	-1,51509	44,935	1,360752299	0,501697	4,556714858	87,9154	0,249375269	2,216861	1,930248876	45,69919
-13,754	-1,13086	45,078	1,72411971	-0,60284	4,218051319	89,5144	0,059926226	2,002747	1,422998629	45,83602
-13,859	-0,74162	45,139	1,548863839	-1,68461	2,992570021	90,4023	0,225259901	2,309382	0,927342999	45,88839
-13,884	-0,36509	45,156	0,908418581	-2,46808	-1,20359868	-89,468	0,525352554	4,056533	-0,45544693	45,90081
-13,887	-3,7E-16	45,158	2,45672E-15	-2,75349	-1,34877E-	-	-2,85796E-	9,785203	-1,38089E-	45,90208

						15	84,0282		15		15
-12,504	0,365404	45,158	1,894598778	-9,63625	0,256764061	86,1122	2,888534098	13,89307	0,371767362	45,21075	
-12,468	0,743538	45,146	3,334055139	-8,23464	0,027302427	87,2534	4,805315986	11,32047	0,755025552	45,1928	
-12,344	1,136625	45,093	3,974820253	-6,25816	1,636310264	89,1922	4,626174993	7,289795	1,151039889	45,13061	
-12,051	1,529228	44,961	3,666446555	-4,14836	2,699429752	89,2681	4,038325102	4,825476	1,542080774	44,98445	
-11,515	1,881248	44,710	2,486992329	-2,36371	2,443597562	88,2686	3,810712714	3,520748	1,886069476	44,71611	
-10,692	2,128779	44,317	-0,71857218	-1,26491	0,978699204	-87,246	3,985924792	2,640782	2,117272445	44,30507	
-9,614	2,197692	43,797	1,232780408	-1,02637	1,202394985	86,8526	4,323100593	1,736748	2,155794162	43,76575	
-8,402	2,020351	43,209	2,941774476	-1,60669	3,518113862	87,3154	4,52385879	0,660456	1,927168849	43,16005	
-7,279	1,555947	42,652	4,066687421	-2,7745	5,470725861	-88,537	4,349664147	-0,51202	1,389678998	42,59813	
-6,526	0,836504	42,259	4,449692289	-4,17568	6,749267227	90,2317	3,697982792	-1,57504	0,561903926	42,22174	
-6,422	-0,03659	42,147	4,128846859	-5,45037	7,249599608	-92,061	2,623314057	-2,29402	0,460844756	42,16968	
-7,150	-0,88553	42,373	3,325553549	-6,33638	7,034114923	93,7343	1,311307714	-2,49118	1,511722801	42,53391	
-8,724	-1,49856	42,884	2,361606546	-6,75259	6,276543762	-95,076	0,033394319	-2,11821	2,382985609	43,32082	
-10,948	-1,68087	43,482	1,563977884	-6,84257	5,175100368	96,0241	0,945592374	-1,26613	2,875841251	44,43306	
-13,445	-1,36307	43,833	1,121087845	-6,94651	3,907158877	96,6158	1,431980286	-0,15492	2,854978915	45,6811	
-15,729	-0,70208	43,579	0,961628695	-7,46675	2,591054791	96,9341	1,363143924	0,934918	2,290486923	46,82331	
-17,330	0,069906	41,844	0,900498915	-9,33274	1,286040221	97,0778	0,818057374	1,722926	1,273504304	47,62373	
-17,905	1,48E-15	36,117	2,2715E-15	-15,0987	-2,17532E-	97,1176	-1,44495E-	2,009248	-2,82584E-	47,91133	
-31,671	-2,51677	31,318	3,348715864	-19,8699	1,20371649	96,3983	1,888235313	9,58377	2,260002675	54,79452	
-28,844	-4,05029	33,872	-5,72123249	-17,2009	2,425967607	-96,266	3,322567309	8,188265	4,077592861	53,38107	

-24,785	-3,47514	37,841	5,987055497	-13,0066	3,662960282	-95,978	3,960405479	6,220771	5,111445368	51,35138
-20,301	-2,49624	40,159	5,809466495	-10,2838	4,85530294	95,4272	3,653593307	4,124689	5,19567408	49,10914
-16,229	-1,92464	41,195	-5,93097671	-8,62742	5,892402948	94,5389	2,482171325	2,357135	4,3682408	47,07324
-13,246	-1,86865	41,664	-6,34500153	-7,29549	6,593621628	93,2649	0,730079105	1,276647	2,847351551	45,58172
-11,730	-2,16731	42,029	6,777682036	-5,87448	6,766169767	91,6692	1,190882716	1,057869	0,964911446	44,82362
-11,714	-2,59669	42,500	6,931819708	-4,27574	6,262298617	89,9354	2,848592771	1,655768	0,921423922	44,81581
-12,936	-2,95999	43,110	6,576398361	-2,62303	5,006092211	88,3313	3,900419711	2,828718	2,510740713	45,42685
-14,952	-3,13608	43,797	-5,70002982	-1,16982	3,12585488	87,1883	4,175092287	4,213181	3,613188361	46,43492
-17,277	-3,08416	44,464	4,509506115	-0,13105	0,964502545	86,7644	3,704596038	5,427662	4,165440795	47,59734
-19,501	-2,82303	45,025	3,360764431	0,454478	0,973988885	87,1045	2,699361607	6,175289	4,211084408	48,7092
-21,356	-2,41638	45,439	2,756878946	0,890356	-2,04248659	87,8695	1,477178225	6,316197	3,860163834	49,63701
-22,732	-1,93025	45,699	-3,11810486	1,968855	1,687985267	88,1634	0,369010241	5,891847	3,244851492	50,3249
-23,642	-1,423	45,836	4,525009084	5,122394	0,247031539	86,3947	0,370818667	5,098681	2,484160248	50,77979
-24,174	-0,92734	45,888	6,126461316	12,1861	2,908631394	80,5256	0,626775131	4,222448	1,663711792	51,04576
-24,436	-0,45545	45,901	5,324715543	22,85134	3,595764309	70,6732	0,442911013	3,553282	0,830593291	51,17701
-24,513	-1,4E-15	45,902	-1,11388E-14	40,99403	6,93202E-15	52,8194	2,03141E-15	3,30423	-7,94427E-16	51,21556
-24,457	0,371767	45,211	11,68415219	50,85105	9,052382156	49,1542	1,428053546	-3,60699	0,831949128	51,18754
-24,229	0,755026	45,193	18,64476947	38,41126	13,81215105	60,1626	2,406650806	-2,30787	1,670942055	51,0732
-23,777	1,15104	45,131	18,59746265	22,99531	12,33497739	73,4867	2,599524975	-0,504	2,511920393	50,84738
-22,968	1,542081	44,984	16,00153706	12,43686	-	-	-	1,333622	3,313222166	50,44277

					9,263782209	81,6567	1,882451914				
					-	-	-				
-21,728	1,886069	44,716	13,55712277	6,242261	7,302812492	85,5471	0,361907328	2,749534	4,006333472	49,82278	
-20,002	2,117272	44,305	12,01356742	2,529805	7,048943421	-87,357	1,628997632	3,378064	4,476349183	48,95978	
					-	-	-				
-17,889	2,155794	43,766	11,19146377	-0,10032	-8,07075816	88,6897	3,645464159	3,079867	4,610375605	47,90349	
					-	-	-				
-15,633	1,927169	43,160	10,6437599	-2,37133	9,638014977	90,3472	5,256553689	1,959516	4,335129767	46,77533	
					-	-	-				
-13,549	1,389679	42,598	9,960423461	-4,50769	11,08148518	92,5327	6,127153926	0,306336	3,616413213	45,73319	
					-	-	-				
-12,016	0,561904	42,222	8,871023085	-6,4274	11,92230752	95,0841	6,177139315	-1,46833	2,563950954	44,96659	
					-	-	-				
-11,272	-0,46084	42,170	7,306162951	-7,90579	-11,9324485	97,6728	5,590788096	-3,00259	1,425347302	44,59476	
					-	-	-				
-11,224	-1,51172	42,534	5,419315345	-8,74467	11,14212255	99,9878	4,748818324	-4,13859	0,537733916	44,57061	
					-	-	-				
-11,180	-2,38299	43,321	3,509047775	-8,89845	9,752197217	101,856	4,200662852	-5,08834	0,340499018	44,54867	
					-	-	-				
-9,543	-2,87584	44,433	1,854273189	-8,45223	7,974965931	-103,21	4,432707475	-6,59457	1,187855984	43,73034	
					-	-	-				
-3,510	-2,85498	45,681	0,665785767	-7,62266	6,004924931	104,084	5,586170703	-10,0662	3,102010455	40,71363	
					-	-	-				
10,513	-2,29049	46,823	0,028919326	-6,7111	3,983118041	-104,58	6,862830109	-17,3435	5,199118317	33,70229	
					-	-	-				
31,819	-1,2735	47,624	0,125193189	-6,01892	1,978904406	-104,82	5,699861904	-28,1276	4,869268613	23,04946	
			-4,02959E-		-3,21731E-						
68,102	-2,8E-15	47,911	16	-3,41197	15	102,539	1,05523E-14	-46,3075	9,75786E-15	4,90805	