

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

13.03.03 (141100.62) «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Адаптация системы впуска двигателя Honda CBR – 600RR
под требования регламента FS

Студент(ка)	<u>Д.Р. Алтунбаев</u>	<u></u>
	(И.О. Фамилия)	(личная подпись)
Руководитель	<u>В.В. Смоленский</u>	<u></u>
	(И.О. Фамилия)	(личная подпись)
Консультант	<u>М.И. Фесина</u>	<u></u>
	(И.О. Фамилия)	(личная подпись)
Нормоконтроль	<u>А.Г. Егоров</u>	<u></u>
	(И.О. Фамилия)	(личная подпись)

Допустить к защите

Зав. кафедрой «ЭМСУ»

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 2016 г.

Тольятти 2016

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ» _____

(подпись)

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

« _____ »

2016 г.

ЗАДАНИЕ на выполнение бакалаврской работы

Студент Алтунбаев Динис Ринатович

1. Тема проекта Адаптация системы впуска двигателя Honda CBR – 600RR
под требования регламента FS

2. Срок сдачи студентом законченного проекта 16-22 июня 2016 года,
согласно утвержденному графику защиты ВКР на 2015-2016 уч. год

3. Исходные данные к проекту Двигатель Honda CBR – 600RR на жидком
топливе, $iV_h=0,599$ л, частота вращения коленчатого вала $n = 11500$ об/мин.
Степень сжатия $\varepsilon = 12,2$.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих
разработке вопросов, разделов)

Состояние вопроса

Тепловой расчет двигателя

Расчет кинематики и динамики двигателя

Расчет поршневой группы

Расчет корпуса двигателя

Расчет системы смазки

Расчет системы охлаждения

Безопасность и экологичность технического объекта

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала
Продольный и поперечный чертеж двигателя – 2 (А1)

Лист диаграмм теплового расчета – 1 (А1)

Лист диаграмм кинематического и динамического расчета – 3 (А1)

Лист трехмерной модели системы впуска и его элементов –1 (А1)

Лист процесса изготовления системы впуска –1 (А1)

6. Консультант _____

7. Дата выдачи задания « ____ » _____ 2016 г.

Руководитель дипломного проекта _____

(подпись)

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению _____

(подпись)

Д.Р. Алтунбаев

(И.О. Фамилия)

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ» _____

(подпись)

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

« _____ » _____

2016 г.

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
выполнения бакалаврской работы**

Студента Алтунбаева Диниса Ринатовича

по теме Адаптация системы впуска двигателя Honda CBR – 600RR

под требования регламента FS

№ этап работы	Содержание этапов работы	Форма представления материала	Плановый срок выполнения этапа и представления его на контроль	Планируемый объем выполнения, %	Фактический объем выполнения, %	Отметка о выполнении
1			30 апреля 2016 г.	90%		
2			5 мая 2016 г.	90%		
3			11 мая 2016 г.	90%		
4			15 мая 2016 г.	90%		
5			20 мая 2016 г.	80%		
6						
7			10 июня 2016 г.	100%		

Студент _____

(подпись)

Д.Р. Алтунбаев

(И.О. Фамилия)

Руководитель _____

(подпись)

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

« _____ » _____

2016 г.

АННОТАЦИЯ

Целью данной работы является проектирование и разработка впускной системы, создание оснастки под нее и установка изготовленной детали на двигатель внутреннего сгорания (ДВС) Honda CBR – 600RR, удовлетворяющей требованиям регламента студенческих инженерно-спортивных соревнований Formula Student.

Дипломный проект состоит из пояснительной записки 60 стр. и графической части состоящей из 8-9 листов А1.

Пояснительная записка включает в себя расчетную часть и описание спроектированной 3Д модели системы впуска, способ изготовления системы впуска, а также спроектированного кондуктора под нее.

Расчетная часть содержит тепловой расчет при выбранных условиях. Кинематический и динамический расчеты, а также расчеты основных деталей и систем проектируемого ДВС.

В графической части проекта приводятся продольный и поперечный разрезы ДВС, а также графики кинематического и динамического расчетов, диаграмма ВСХ и специальная часть посвященная описанию спроектированной системы.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	8
1 Актуальность темы.....	9
1.1 Система впуска под контролем электроники.....	10
1.2 Требования к составу топливо-воздушной смеси.....	11
2 Тепловой расчет двигателя Honda CBR – 600 RR.....	12
2.1 Тепловой расчет двигателя.....	12
2.1.1 Определение параметров рабочего тела.....	12
2.1.2. Параметры впуска.....	14
2.1.3 Параметры сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси	18
2.1.4 Термодинамический расчет.....	19
2.1.5 Расчет процесса расширения.....	21
2.1.6 Параметры выпуска	22
2.1.7 Индикаторные параметры цикла.....	23
2.1.8 Эффективные показатели двигателя.....	24
2.1.9 Построение индикаторной диаграммы.....	26
2.2 Тепловой баланс.....	26
3 Расчет кинематики двигателя.....	28
4 Динамический расчет двигателя.....	29
4.1 Силы давления газов.....	29
4.2 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма.....	29
4.3 Силы инерции.....	30
4.4 Суммарные силы.....	31
4.5 Крутящие моменты.....	32
4.6 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала...	33
4.7 Силы, действующие на колено вала.....	34
4.8 Силы, действующие на коренные шейки.....	34
5 Специальная часть.....	37

5.1. Трехмерная модель системы впуска.....	37
5.2 Составные части системы впуска и их назначение.....	37
5.3 Характер течения потока воздуха.....	38
5.4 Материалы которые можно использовать для создания системы впуска.....	39
5.5 Способы изготовления.....	40
6 Безопасность и экологичность технического объекта.....	43
6.1 Топливопровод.....	44
6.2 Топливо и топливная система.....	44
6.3 Требования расположения топливной системы.....	45
6.4 Электрическая система и система аварийного выключения.....	46
6.5 Базовый главный выключатель системы электрооборудования...	46
6.6 Аккумуляторная батарея.....	47
6.7 Безопасность жизнедеятельности пилота.....	48
6.7.1 Экипировка пилота.....	48
6.7.2 Шлем и система HANS.....	49
Заключение.....	51
Список использованных источников.....	52
Приложение А – Таблицы теплового расчета.....	55
Приложение Б – Таблицы теплового баланса и кинематического расчета	69
Приложение В – Таблицы динамического расчета.....	73
Приложение Г – Расчёт поршневой группы.....	93
Приложение Д – Расчет корпуса двигателя.....	100
Приложение Е – Расчёт системы смазки и системы охлаждения.....	102
Приложение Ж– Спецификация сборочного чертежа.....	109

ВВЕДЕНИЕ

Formula Student (FS) – это проект, в котором группа студентов из одного ВУЗа должна за год спроектировать и изготовить болид, который должен удовлетворять требованиям технического регламента болида (FS), а также показать наилучший результат в серии из нескольких статических и динамических тестов.

Победа команды на этапе зависит от ДВС. ДВС болида является сложно устроенным агрегатом, в состав которого входит множество узлов и систем. Для обеспечения максимальной эффективности работы ДВС необходима отлаженная работа всех систем. Одна из важных агрегатов ДВС это система впуска.

Впускная система предназначена для впуска в ДВС необходимого количества воздуха и образования топливно-воздушной смеси. Термин «впускная система» появился с развитием конструкции двигателей внутреннего сгорания, особенно с появлением системы непосредственного впрыска топлива. Оборудование для питания двигателя воздухом перестало быть просто воздухопроводом, а превратилось в отдельную систему.

В своей работе система впуска взаимодействует со многими системами ДВС, в том числе с системой впрыска, системой рециркуляции отработавших газов, системой улавливания паров бензина, вакуумным усилителем тормозов. Взаимодействие перечисленных систем и еще ряда других систем обеспечивает система управления ДВС.

С учетом вышесказанного был спроектирована система впуска на базе ДВС Honda CBR 600 RR с непосредственным впрыском топлива работающим на жидком топливе.

1 Актуальность темы

Как уже было сказано, победа в серии динамических тестов в большей степени зависит от ДВС, а именно отлаженная работа всех агрегатов ДВС. Одна из важных агрегатов ДВС это впускная система.

Впускная система состоит из коллектора, устройств подачи воздуха и топлива.

Каждый элемент впускной системы обладает сложной структурой.

Поток воздуха протекая по впускным патрубкам поступает в дроссельный узел, и далее во впускной коллектор, где смешивается с топливом.

На ДВС наряду с дроссельной заслонкой применяются впускные заслонки. Впускные заслонки служат для разделения воздуха на два впускных окна. Одно из окон перекрывает заслонку, а за счет другого – воздух проходит свободно. Эти заслонки крепятся на валу. Общий вал поворачивается при помощи электрического привода или вакуума.

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) нуждается в окислителе, которым является атмосферный воздух содержащий кислород, но так как в атмосфере содержатся твердые частицы, чтобы избежать износа деталей двигателя они не должны попадать в цилиндр двигателя.

Эти частицы могут иметь разную массу, кроме того атмосферный воздух всегда запылен, следовательно возникает необходимость в установки воздушного фильтра.

Список элементов впускной системы может включать в себя турбокомпрессор, задача которого увеличивать объем воздуха, поступающего в ДВС.

Впускная система очень близко связана с различными процессами, протекающие в других системах ДВС: системы впрыска, система рециркуляции отработавших газов, улавливания паров топлива и так далее.

1.1 Система впуска под контролем электроники

Всей работой впускной системы и взаимодействие его с другими системами осуществляется электронным блоком управления ДВС (ЭСУД), так как развитие микропроцессорных систем и автоматизации процессов не стоит на месте. ЭСУД – это совокупность измерительных, обрабатывающих, преобразовывающих и исполнительных механизмов объединенных в единый комплекс, целью, которого является управление.

Основной необходимостью применения ЭСУД, обусловлена большим количеством информации и ограниченным временем на ее обработку.

Так же ЭСУД обеспечивает работу всех подсистем ДВС, их взаимодействие и синхронизацию.

С переходом на электронное управление работой ДВС, впускная система стала главной в оптимизации расхода топлива.

Для работы ЭСУД необходимо провести измерения, которые обеспечивают в режиме реального времени различные датчики:

- датчик положения дроссельной заслонки;
- датчик давления во впускном коллекторе;
- датчик температуры воздуха на впуске;
- расходомер (MAF, ДМРВ, датчик массового расхода воздуха).

Расходомер и датчик температуры используются для определения необходимой нагрузки ДВС. В разных концепциях этой системы может применяться датчик давления в коллекторе, вместо расходомера. Датчик положения дроссельной заслонки предназначен для определения режима работы. Так же могут быть и другие датчики, все это зависит от конструкций самой системы.

С развитием ЭСУД в систему впуска для увеличения точности работы ДВС были введены различные исполнительные механизмы: блок управления

дроссельной заслонкой, электродвигатель привода впускных заслонок, запорный клапан системы улавливания паров бензина, электромагнитный клапан системы рециркуляции отработавших газов и многое другое.

1.2 Требования к составу топливо-воздушной смеси

Взаимодействие дроссельной и впускных заслонок современного ДВС с непосредственным впрыском обеспечивает несколько типов смесеобразования. Так как ДВС работает на разных режимах, то и состав смеси, тоже должен быть различным.

Для работы двигателя на низких оборотах требуется послойное смесеобразование. При этом большую часть времени впускные заслонки закрыты, а дроссельная заслонка полностью открыта.

Для работы двигателя на высоких оборотах, нужна однородная смесеобразование. Вследствие этого степень открытия дроссельной заслонки находится в прямой зависимости от требуемого крутящего момента двигателя. Впускные заслонки находится в открытом положении.

Существует также смесеобразование, при котором двигатель работает на средних скоростях. Открытие этой заслонки происходит в зависимости от величины крутящего момента, а впускные заслонки закрыты.

Таким образом, система впуска является важной, сложной и необходимой частью двигателя.

2 Тепловой расчет двигателя Honda CBR 600 RR

2.1 Тепловой расчет

Исходные данные: $i = 4$; $D = 67$ (мм); $S = 42,5$ (мм); $R = 21,25$ (мм); $L = 109$ (мм); $\lambda = 0,19$; $V_l = 0,599$ (л); $\tau = 4$; $\varepsilon = 12,2$;

Тепловой расчет проведен для следующих скоростных режимов:

- $n_{min} = 1300$ мин⁻¹;
- $n_M = 10000$ мин⁻¹;
- $n_N = 11500$ мин⁻¹;
- $n_{max} = 13500$ мин⁻¹.

Тепловой расчет проведен для двух различных коэффициентов избытка воздуха α :

- $\alpha = 0,86$
- $\alpha = 0,95$

2.1.1 Определение параметров рабочего тела

Для двигателей с искровым зажиганием назначают бензин, средний элементарный состав в массовых долях и молекулярная масса составляют:

$$C = 0,855; H = 0,145 \text{ и } \mu_m = 115 \text{ кг/моль.}$$

Низшая теплота сгорания (H_u) жидкого топлива определяется по формуле Менделеева

$$H_u = [34,013C + 125,6H - 10,9(O - S) - 2,512(9H + W)] \cdot 10^6 \quad (2.1)$$

$$H_u = 43897 \text{ КДж/кг}$$

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг

ЖИДКОГО ТОПЛИВА:

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = 0,5168 \frac{\text{кмоль} \cdot \text{воздуха}}{\text{кг} \cdot \text{топлива}} \quad (2.2)$$

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right) = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8 \cdot 0,145 \right) = 14,9565 \frac{\text{кг} \cdot \text{воздуха}}{\text{кг} \cdot \text{топлива}} \quad (2.3)$$

Количество горючей смеси (M_1) для двигателей с искровым зажиганием определяется величиной при $n = 11500$ об/мин

$$M_1 = \left(\alpha \cdot L_0 + \frac{1}{\mu_m} \right) = 0,525 \frac{\text{кмоль} \cdot \text{гор.смеси}}{\text{кг} \cdot \text{топлива}} \quad (2.4)$$

Количество отдельных компонентов продуктов неполного сгорания жидкого топлив при $n = 11500$ об/мин

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} - 2 \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 = 0,0698 \frac{\text{кмоль} \cdot CO_2}{\text{кг} \cdot \text{топлива}} \quad (2.5)$$

$$M_{CO} = 2 \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 = 0,0014 \frac{\text{кмоль} \cdot CO}{\text{кг} \cdot \text{топлива}} \quad (2.6)$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} - 2 \cdot K \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 = 0,0717 \frac{\text{кмоль} \cdot H_2O}{\text{кг} \cdot \text{топлива}} \quad (2.7)$$

$$M_{H_2} = 2 \cdot K \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 = 0,0007 \frac{\text{кмоль} \cdot H_2}{\text{кг} \cdot \text{топлива}} \quad (2.8)$$

$$M_{N_2} = 0,792 \cdot \alpha \cdot L_0 = 0,405 \frac{\text{кмоль} \cdot N_2}{\text{кг} \cdot \text{топлива}} \quad (2.9)$$

Общее количество продуктов неполного сгорания жидкого топлива при $n = 11500 \text{ об/мин}$.

$$\begin{aligned}
 M_2 &= M_{CO_2} + M_{CO} + M_{H_2O} + M_{H_2} + M_{N_2} = \\
 &= 0,0569 + 0,0143 + 0,0653 + 0,0072 + 0,3684 = 0,549 \frac{\text{кмоль}}{\text{кг} \cdot \text{топлива}}
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Коэффициент молекулярного изменения горючей смеси.

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1} = \frac{0,549}{0,52} = 1,055
 \tag{2.11}$$

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры рабочего тела

Параметры	Параметры рабочего тела			
	1300	10000	11500	13500
$n, \text{ мин}^{-1}$	1300	10000	11500	13500
α	0,86	0,95	0,95	0,95
$M_1, \text{ кмоль}$	0,453	0,525	0,525	0,525
$M_{CO}, \text{ кмоль}$	0,02006	0,0698	0,0698	0,0698
$M_{H_2O}, \text{ кмоль}$	0,0624	0,0717	0,0717	0,0717
$M_{H_2}, \text{ кмоль}$	0,0100	0,0007	0,0007	0,0007
$M_{N_2}, \text{ кмоль}$	0,352	0,405	0,405	0,405
$M_2, \text{ кмоль}$	0,495	0,549	0,549	0,549

2.1.2 Параметры впуска

Давление и температура окружающей среды

Принимаются стандартные условия окружающей среды: барометрическое давление $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$, температура воздуха $T_0 = 293 \text{ К}$.

$$P_k = P_0 = 0,1 \text{ МПа} \quad (2.12)$$

$$T_k = T_0 = 293 \text{ К} \quad (2.13)$$

Давление остаточных газов.

$$P_r = P_0 \cdot (1,035 + A_p \cdot 10^{-8} \cdot n^2), \quad (2.14)$$

$$A_p = (p_{rN} - p_0 \cdot 1,035) \cdot 10^8 / (n_N^2 p_0); \quad (2.15)$$

p_{rN} – давление остаточных газов на номинальном режиме, МПа;

n_N – частота вращения коленчатого вала на номинальном режиме, мин⁻¹.

Температура остаточных газов.

$$T_r = 1150 \text{ К}$$

Температура подогрева свежего заряда.

$$\Delta T = A_T \cdot (110 - 0,0125 \cdot n), \quad (2.16)$$

Давление в конце впуска.

$$P_a = P_k - \Delta P_a \text{ или } P_a = P_0 - \Delta P_a \quad (2.17)$$

Потери давления ΔP_a можно определить из уравнения Бернулли:

$$\Delta P_a = (\beta^2 + \xi_{en}) \cdot \left(A_n^2 \cdot \frac{n^2}{2} \right) \cdot \rho_k \cdot 10^{-6} \quad (2.18)$$

По опытным данным в современных автомобильных двигателях на

номинальном режиме $(\beta^2 + \xi_{\text{вп.}}) = 2,5 \div 4,0$; примем $(\beta^2 + \xi_{\text{en.}}) = 2,5$.

$$A_n = (R \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot \sqrt{1 + \lambda^2}) / 120 \cdot f_{\text{en.}}, \quad (2.19)$$

Площадь $f_{\text{вп.}}$ можно определить из уравнения неразрывности потока:

$$f_{\text{вп.}} = \frac{C_n^{\text{max}} \cdot F_n}{W_{\text{вп.}}} \quad (2.20)$$

где F_n – площадь поршня двигателя, который является прототипом заданного; C_n^{max} – максимальная скорость поршня (м/с).

$$C_n^{\text{max}} = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot R \cdot \sqrt{1 + \lambda^2} \quad (2.21)$$

$W_{\text{вп.}} = 50 - 130$ м/с – средняя скорость движения заряда в наименьшем сечении впускной системы.

Плотность заряда на впуске.

$$\rho_K = P_K \cdot 10^6 / (R_g \cdot T_K) \text{ или } \rho_0 = P_0 \cdot 10^6 / (R_g \cdot T_0) \quad (2.22)$$

$$\rho_K = \rho_0 = \frac{0,1 \cdot 10^6}{287 \cdot 293} = 1,189 \text{ кг/м}^3 \quad (2.23)$$

Тогда коэффициент остаточных газов определяется по формуле:

$$\gamma_r = \frac{T_K + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{\varphi_{\text{оч.}} \cdot P_r}{\varepsilon \cdot \varphi_{\text{оз.}} \cdot P_a - \varphi_{\text{оч.}} \cdot \varphi \cdot P_r} \quad (2.24)$$

Температура в конце впуска T_a с достаточной степенью точности определяется по формуле:

$$T_a = \frac{(T_K + \Delta T + \gamma_r \cdot T_r)}{(1 + \gamma_r)} \quad (2.25)$$

Величину коэффициента наполнения определяют по формуле:

$$\eta_v = \frac{T_K(\varepsilon \cdot P_a - P_r)}{(T_K + \Delta T)(\varepsilon - 1)P_K} \quad (2.26)$$

Тогда при $n = 11500$ об/мин η_v будет:

$$\eta_v = \frac{T_K(\varepsilon \cdot P_a - P_r)}{(T_K + \Delta T)(\varepsilon - 1)P_K} = 0,98 \quad (2.27)$$

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 2

Таблица 2 – Параметры процесса впуска

Параметры	Процесс впуска			
$n, \text{мин}^{-1}$	1300	10000	11500	13500
α	0,86	0,95	0,95	0,95
$T_r, \text{К}$	866	986	1010	1150
$P_r, \text{МПа}$	0,103	0,107	0,108	0,11
$\Delta T, \text{°С}$	15,4	5,62	5	2,3
$\Delta p_a, \text{МПа}$	0,0002	0,014	0,018	0,025
$p_a, \text{МПа}$	0,099	0,086	0,081	0,075
γ_r	0,0042	0,00509	0,00548	0,00618
$T_a, \text{К}$	302,8	303,8	304,3	305
η_v	1,22	1,05	0,98	0,88

2.1.3 Параметры сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси

Значение показателя политропы сжатия находится по формуле:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{20,16 + 1,738 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{n_1-1} + 1) \cdot T_a}; \quad (2.28)$$

Давление в конце сжатия:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1} \quad (2.29)$$

Температура в конце такта сжатия:

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} \quad (2.30)$$

Удельный объем, давление и температура рабочего тела в момент воспламенения, если угол опережения воспламенения $\Theta = 25$ (град) и $\lambda = 0,19$

$$V_y = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left[1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left[\cos\left(\frac{\Theta \cdot \pi}{180} \right) + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \left(\sin\left(\frac{(\Theta \cdot \pi)}{180} \right) \right)^2} \right] \right] \right] \quad (2.31)$$

$$P_y = \left(\frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1} \cdot P_a \quad (2.32)$$

$$T_y = \left(\frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1-1} \cdot T_a \quad (2.33)$$

Для остальных режимов окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры процесса сжатия

Параметры	Процесс сжатия			
	1300	10000	11500	13500
$n, \text{мин}^{-1}$	1300	10000	11500	13500
n_1	1,3861	1,38607	1,38604	1,385
$p_c, \text{МПа}$	3,19	2,765	2,621	2,399
$T_c, \text{К}$	795	798	799	801
$V_y, (\text{м}^3/\text{кг})$	0,109	0,126	0,134	0,148
$p_y, \text{МПа}$	1,63	1,41	1,34	1,23
$T_y, \text{К}$	660	662	663	665

2.1.4 Термодинамический расчет

Коэффициент эффективности сгорания топлива $\zeta = 0,95$

Общая удельная теплота сгорания топлива

$H_u = 43897$ (кМоль возд/кг топл.)

$$q_z = \frac{\zeta \cdot H_u}{(1 + \gamma_r)(\alpha \cdot l_0 + 1)}; \quad (2.34)$$

Давление газов в процессе сгорания

$$p_2 = E_2 \cdot \Delta X_{1-2} + p_1 \cdot (K_{1-2} \cdot \psi(\varphi_1) - \psi(\varphi_2)) / [K_{1-2} \cdot \psi(\varphi_1) - \psi(\varphi_1)]. \quad (2.35)$$

$$E_2 = \left(0,002 \cdot \frac{\varepsilon}{V_a} \right) \cdot q_z; \quad (2.36)$$

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 4.

Таблица 4 – Термодинамический расчет

Параметры	Термодинамический расчет			
$n, \text{ мин}^{-1}$	1300	10000	11500	13500
$q_z, (\text{кДж} / \text{кг})$	2995,5	2728,1	2727,2	2725,1
$E_2, \text{ МПа}$	88,4	70	65,8	59,6

Доля топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке

$$\Delta X_{1-2} = \exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right], \quad (2.37)$$

p_1 – давление в начальной точке рассматриваемого участка, МПа;

$$K_{1-2} = \frac{k_{1-2} + 1}{k_{1-2} - 1} - \text{фактор теплоемкостей};$$

Отношение средних теплоемкостей рабочего тела на участке 1-2

$$k_{1-2} = 1,259 + \left[76,7 - \left(13,6 - \frac{14,2}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2} \right] \cdot \frac{1}{T_{1-2}} - \left(0,0665 - \frac{0,0245}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2}; \quad (2.38)$$

среднее значение доли топлива сгоревшего на участке 1-2

$$x_{1-2} = 0,5 \left[\exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] \right]; \quad (2.39)$$

$T_{1-2} = (T_1 + T_2)/2$ – средняя температура на участке 1-2;

$$\psi(\varphi') = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \sigma; \quad (2.40)$$

$$\sigma = \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) - \left[\cos(\varphi') + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 (\sin(\varphi'))^2}\right]; \quad (2.41)$$

$$T_2 = \frac{T_y \cdot p_2 \cdot \psi(\varphi_2')}{p_y \cdot \psi(\varphi_y') \cdot \mu_{1-2}} - \text{температура газов в процессе сгорания};$$

$\mu_{1-2} = (\mu_1 + \mu_2)/2$ – средний на рассматриваемом участке коэффициент молекулярного изменения свежей смеси;

$$\mu_1 = 1 + \frac{(\mu_{0\max} - 1) \left[1 - \exp\left[-6,908 \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_z}\right)^{m+1}\right]\right]}{1 + \gamma_r}; \quad (2.42)$$

$\mu_0 = \mu_{0\max} = 1,065$ - расчетный коэффициент молекулярного изменения свежей смеси.

Результаты расчета при разных оборотах приведены в таблицах А3, А4, А5, А6 в приложении А.

2.1.5 Расчет процесса расширения

Степень последующего расширения:

$$\delta = V_a/V_z; \quad (2.43)$$

$$n_2 = 1 + \frac{8,341}{23,7 + 0,0046 \cdot T_Z \cdot \left(1 + \frac{1}{\delta^{n_2-1}}\right)}; \quad (2.44)$$

Параметры в конце процесса расширения как политропного процесса

$$p_b = \frac{p_Z}{\delta^{n_2}}; \quad (2.45)$$

$$T_b = \frac{T_Z}{\delta^{n_2-1}} \quad (2.46)$$

где p_Z и T_Z – параметры в конце.

Текущие значения удельного объема, давления и температуры газов от конца процесса сгорания до 540 град. п.к.в. находятся из соотношений

$$V_{pm} = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left[1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) - \left[\cos(\varphi_{pm}) + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2(\varphi_{pm})} \right] \right] \right], \quad (2.47)$$

φ_{pm} – текущее значение угла поворота коленчатого вала

$$p_{pm} = \left(\frac{V_a}{V_T}\right)^{n_2} \cdot p_b; \quad T_{pm} = \left(\frac{V_a}{V_T}\right)^{n_2-1} \cdot T_b. \quad (2.48)$$

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице А1 в приложении А.

2.1.6 Параметры выпуска

Для оценки правильности выбора значения температуры отработавших газов произведем проверку

$$T_r = T_g / \sqrt[3]{P_g / P_r} \quad (2.49)$$

$$T_r = \frac{2131}{\sqrt[3]{\frac{0,657}{0,115}}} = 1150,97 \quad (2.50)$$

$$\Delta T_r = \frac{1150 - 1150,97}{1150} \cdot 100\% = 0,084\% \quad (2.51)$$

2.1.7 Индикаторные параметры цикла

Для двигателя с искровым зажиганием, работающего по циклу с подводом теплоты при $V = \text{const}$, теоретическое среднее индикаторное давление

$$P_{ip} = \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \left[\frac{\lambda}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) \right] \quad (2.52)$$

Среднее индикаторное давление при $n = 11500 \text{ об/мин}$

Примем $\varphi_{II} = 0,94$

$$P_i = \varphi_{II} \cdot P_{ip} = 1,52 \text{ МПа} \quad (2.53)$$

Индикаторная мощность двигателя N_i составит при $n = 11500 \text{ об/мин}$

$$N_i = P_i \cdot V_h \cdot i \cdot n / (30 \cdot \tau) = 1386,9 \text{ кВт} \quad (2.54)$$

Индикаторный к.п.д. и удельный индикаторный расход топлива

$$\eta_i = P_i \cdot l_0 \cdot \alpha / (H_u \cdot \rho_k \cdot \eta_v) \quad (2.55)$$

Удельный индикаторный расход жидкого топлива, г/(кВт·ч), составит при $n = 11500$ об/мин

$$g_i = 3600 / (\eta_i \cdot H_u) = 195,31 \text{ г/(кВт·ч)} \quad (2.56)$$

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 6.

Таблица 6 – Индикаторные параметры цикла

Параметры	Индикаторные параметры цикла			
n , мин ⁻¹	1300	10000	11500	13500
P_{ip} , МПа	1,19	1,69	1,61	1,26
P_i , МПа	1,05	1,59	1,52	1,37
N_i , кВт	213,4	1273,8	1386,9	1486,4
η_i	0,413	0,417	0,419	0,424
g_i , г/(кВт·ч)	198,56	196,45	195,31	193,35

2.1.8 Эффективные показатели двигателя

при $n = 11500$ об/мин

$$C_n = S \times n / 30 = 16,29 \quad (2.57)$$

Среднее давление механических потерь при $n = 11500$ об/мин

$$P_M = 0,034 + 0,0113 C_n = 0,034 + 0,0113 \cdot 16,29 = 0,21 \text{ МПа} \quad (2.58)$$

$$P_e = P_i - P_M = 1,291 \text{ МПа} \quad (2.59)$$

Эффективная мощность при $n = 11500$ об/мин

$$N_e = N_i \cdot \eta_m = P_e \cdot V_h \cdot i \cdot n / (30 \cdot \tau) = 81,7 \text{ кВт} \quad (2.60)$$

Эффективный к.п.д. и эффективный удельный расход топлива

Для двигателей, работающих на жидком топливе при $n = 11500$ об/мин

$$\eta_e = \frac{P_e}{\rho_k \cdot \eta_v} \cdot \frac{\alpha \cdot l_0}{H_u} = 0,34 \quad (2.61)$$

Эффективный удельный расход в г/(кВт·ч) жидкого топлива при $n = 11500$ об/мин

$$g_e = 3600 / (H_u \cdot \eta_e) = 238,6 \text{ г/(кВт·ч)} \quad (2.62)$$

Крутящий момент при $n = 11500$ об/мин

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \cdot \frac{N_e}{n} = 67,9 \text{ Нм} \quad (2.63)$$

Часовой расход топлива при $n = 11500$ об/мин

$$G_t = g_e \cdot N_e = 19,5 \text{ кг/ч} \quad (2.64)$$

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице А2 в приложении А.

2.1.9 Построение индикаторной диаграммы

Индикаторная диаграмма двигателя внутреннего сгорания строится с использованием данных расчета рабочего процесса. Данные для построения индикаторной диаграммы приведены в таблице А7 в приложении А.

По данным таблицы А7 строится индикаторная диаграмма рабочего цикла бензинового ДВС и диаграмма рабочего цикла бензинового ДВС, которые представлены на плакатах.

Результаты расчетов данных, необходимых для построения внешней скоростной характеристики ДВС занесены в таблицу Б1 в приложении Б.

По данным таблицы Б1 построена внешняя скоростная характеристика двигателя, которая представлена на плакате.

2.2 Тепловой баланс

Общее количество теплоты, введенной в двигатель при номинальном скоростном режиме

$$Q_o = H_u \cdot G_t = 43897 \cdot 19,51 = 744334,3 \text{ Дж/час} \quad (2.65)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе

$$Q_e = 3600 \cdot N_e = 3600 \cdot 81,7 = 262880,4 \text{ Дж/час} \quad (2.66)$$

Теплота, передаваемая окружающей среде

$$Q_s = c \cdot i \cdot D^{1+2m} \cdot n^m \cdot (H_u - \Delta H_u) / (\alpha \cdot H_u) = 130789,5 \text{ Дж /час} \quad (2.67)$$

Приняли $c = 0,5$ – коэффициент пропорциональности для четырехтактных

двигателей; m – показатель степени для четырехтактных двигателей, принял $m = 0,65$ при $n = 1300 \text{ мин}^{-1}$, $m = 0,7$ при $n = 10000 \text{ мин}^{-1}$, при $n = 11500 \text{ мин}^{-1}$, при $n = 13500 \text{ мин}^{-1}$.

Теплота, унесенная отработавшими газами

$$Q_r = G_m \cdot \left\{ M_2 \left[(\mu c_{v_r}')_{t_0} + 8,315 \right] \cdot t_r - M_1 \cdot \left[(\mu c_v)_{t_0}^k + 8,315 \right] \cdot t_k \right\} = 261046,4 \text{ Дж/час} \quad (2.68)$$

$$Q_{н.с.} = \Delta H_u \cdot G_t = 3099,508 \cdot 19,51 = 52556,44 \text{ Дж/час} \quad (2.69)$$

Неучтенные потери теплоты

$$Q_{ост.} = Q_o - (Q_C + Q_b + Q_r + Q_{н.с.}) = 37061,55 \text{ Дж/час} \quad (2.70)$$

$$q_0 = q_e + q_b + q_r + q_{н.с.} + q_{ост.} = 100\% \quad (2.71)$$

Составляющие теплового баланса представлены в таблице Б2 в приложении Б.

3 Расчет кинематики двигателя

Исходные данные:

Радиус кривошипа $R = 21,25$ мм.

Длина шатуна $L_{ш} = 109$ мм.

Отношение $R/L_{ш}$, $\lambda = 0,19$.

Перемещение поршня вычисляется по формуле:

$$S_x = R[(1 - \cos\varphi) + \lambda/4(1 - \cos 2\varphi)], \quad (3.1)$$

где S_x - текущее перемещение поршня, λ – радиуса кривошипа к длине шатуна, φ – угол поворота коленчатого вала.

Расчет скорость поршня производится по формуле:

$$V_{п} = \omega R(\sin\varphi + \lambda/2(\sin 2\varphi)) \quad (3.2)$$

где $V_{п}$ - скорость поршня, ω – угловая скорость вращения коленчатого вала.

Расчет ускорения поршня производится по формуле:

$$j = dv_{п}/dt = \omega^2 * R(\cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi), \quad (3.3)$$

где j - ускорение поршня.

Результаты расчетов приведены в таблицах Б3 в приложении Б.

Диаграмма перемещения, скорости и ускорения поршня приведена на плакатах.

4 Динамический расчет двигателя

4.1 Силы давления газов

По индикаторной диаграмме в р-φ координатах через каждые 10° угла поворота кривошипа определяем значения $\Delta p_r = p_r - 0,1$ и заносим в сводную таблицу В1 в приложении В.

4.2 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма

Масса поршневой группы (для поршня из алюминиевого сплава $m_{\text{п}}' = 80$ кг/м²):

$$m_{\text{п}} = m_{\text{п}}' \cdot F_{\text{п}} = 80 \cdot 0,003526 = 0,282 \text{ кг.} \quad (4.1)$$

Масса шатуна (для стального кованого шатуна $m_{\text{ш}}' = 100$ кг/м²):

$$m_{\text{ш}} = m_{\text{ш}}' \cdot F_{\text{п}} = 100 \cdot 0,003526 = 0,3526 \text{ кг.} \quad (4.2)$$

Масса неуравновешенных частей одного колена вала без противовесов (для литого чугуна $m_{\text{к}}' = 110$ кг/м²):

$$m_{\text{к}} = m_{\text{к}}' \cdot F_{\text{п}} = 110 \cdot 0,003526 = 0,3878 \text{ кг.} \quad (4.3)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа:

$$m_{\text{ш.к}} = 0,725 m_{\text{ш}} = 0,725 \cdot 0,3526 = 0,2566 \text{ кг.} \quad (4.4)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца:

$$m_{ш.п} = 0,275m_{ш} = 0,275 \cdot 0,3526 = 0,097 \text{ кг.} \quad (4.5)$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение:

$$m_j = m_{п} + m_{ш.п} = 0,282 + 0,097 = 0,379 \text{ кг} \quad (4.6)$$

Массы, совершающие вращательное движение:

$$m_R = m_K + m_{ш.к} = 0,3878 + 0,2566 = 0,644 \text{ кг.} \quad (4.7)$$

4.3 Силы инерции

Сила инерции от возвратно-поступательно движущихся масс:

$$P_j = -m_j j = -m_j R \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) \quad (4.8)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс:

$$K_R = -m_R R \omega^2 = -0,644 \cdot 1413,717^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02125 = -27,45 \text{ кН} \quad (4.9)$$

Центробежная сила инерции K_R является результирующей двух сил: силы инерции вращающихся масс шатуна:

$$K_{Rш} = -m_{шк} R \omega^2 = -0,2566 \cdot 1413,717^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02125 = -10,79 \text{ кН} \quad (4.10)$$

и силы инерции вращающихся масс кривошипа

$$K_{RK} = -m_K R \omega^2 = -0,3878 \cdot 1413,717^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02125 = -16,45 \text{ кН} \quad (4.11)$$

4.4 Суммарные силы

Сила, сосредоточенная на оси поршневого пальца

$$p = \Delta p_r + p_j. \quad (4.12)$$

Нормальная сила

$$N = P \operatorname{tg} \beta \quad (4.13)$$

Сила (кН), действующая вдоль шатуна

$$S = P * (1 / \cos \beta) \quad (4.14)$$

Сила (кН), действующая по радиусу кривошипа

$$K = P * \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta \quad (4.15)$$

Полная тангенциальная сила (кН)

$$T = \frac{p \sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} \quad (4.16)$$

Среднее значение тангенциальной силы за цикл:

-по данным теплового расчета:

$$T_{cp} = \frac{2 \cdot 10^6}{\pi \cdot \tau} \cdot p_i \cdot F_n = \frac{2 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 4} \cdot 1,424 \cdot 0,003526 = 798,6 \text{ Н}; \quad (4.17)$$

-по площади, заключенной между кривой p_T и осью абсцисс:

$$p_{Tcp} = \frac{\sum_{i=1}^{72} (P_{Ti} + P_{Ti+1}) \cdot 10^6}{720^\circ} = 0,242 \text{ МПа}; \quad (4.18)$$

$$T_{cp} = p_{Tcp} \cdot F_n = 0,242 \cdot 0,003526 \cdot 10^6 = 821,05 \text{ Н}. \quad (4.19)$$

Ошибка $\Delta = (821,05 - 798,6) \cdot 100 / 821,05 = 2,7\%$.

Результаты расчетов заносим в таблицу В1 в приложении В. По данной таблицы, строим графики, которые представлены на плакатах.

4.5 Крутящие моменты

Крутящий момент одного цилиндра:

$$\dot{I}_{\text{ед.}\dot{\sigma}} = T \cdot R = T \cdot 0,02125 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (4.20)$$

Период изменения крутящего момента четырехтактного двигателя с равными интервалами между вспышками:

$$\Theta = 720/i = 720/4 = 180^\circ. \quad (4.21)$$

Суммирование значений крутящих моментов всех четырех цилиндров двигателя осуществим табличным методом (таблица В2 приложение В) через каждые 10° угла поворота коленчатого вала и по полученным данным построим кривую $M_{кр.}$ (Н·м), которая приведена на плакате.

Средний крутящий момент двигателя:

- по данным теплового расчета:

$$M_{кр.ц} = M_i = \frac{M_e}{\eta_M} = \frac{67,9}{0,85} = 79,88 \text{ Нм}; \quad (4.22)$$

- по площади, заключенной под кривой $M_{кр}$:

$$M_{кр.ср} = \frac{\sum_{i=1}^{72} \left(\frac{M_{кр.i} + M_{кр.i+1}}{2} \right) \cdot 10^\circ}{360^\circ} = 76,61 \text{ Нм}. \quad (4.23)$$

$$\text{Ошибка } \Delta = \frac{79,88 - 76,61}{79,88} \cdot 100\% = 4,1\% . \quad (4.24)$$

Максимальный и минимальный крутящие моменты:

$$M_{кр.макс} = 139 \text{ Нм}; \quad M_{кр.мин} = -136 \text{ Нм}. \quad (4.25)$$

4.6 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала

Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа:

$$P_K = K + K_{Rи} = (K - 10,79) \text{ кН}, \quad (4.26)$$

Среднее значение $R_{и.и.}$ определяется по развернутой диаграмме

$$R_{и.и.ср} = \frac{\sum_{i=1}^{72} \left(\frac{R_{и.и.i} + R_{и.и.i+1}}{2} \right) \cdot 10^\circ}{720^\circ} = 246,65 \text{ кН} \quad (4.27)$$

Результаты расчетов приведены в таблицах В3, В4 в приложении В.

4.7 Силы, действующие на колено вала

Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа:

$$K_{P_k} = P_k + K_{R_k} = (P_k - 16,45) \text{ кН.} \quad (4.28)$$

Результирующая сила, действующая на колено вала:

$$R_k = \sqrt{R_{u.u}^2 + K_{P_k}^2}. \quad (4.29)$$

Результаты расчетов приведены в таблице В5 в приложении В.

4.8 Силы, действующие на коренные шейки коленчатого вала

Сила, действующая на первую коренную шейку

$$R_{k.u.1} = -0,5 * R_{k1} \text{ (таблица В6 в приложении В).} \quad (4.30)$$

Сила, действующая на вторую коренную шейку

$$R_{k.u.2} = \sqrt{T_{k2}^2 + K_{k2}^2}, \quad (4.31)$$

где:

$$T_{k2} = -0,5 * (T_1 + T_2 * \cos \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} * \sin \gamma_{k(1-2)}) = -0,5 * (T_1 + T_2 * \cos 180^\circ - K_{pk2} * \sin 180^\circ) = -0,5 * (T_1 - T_2); \quad (4.32)$$

$$K_{k2} = -0,5 * (K_{pk1} + T_2 * \sin \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} * \cos \gamma_{k(1-2)}) = -0,5 * (T_1 + T_2 * \sin 180^\circ - K_{pk2} * \cos 180^\circ) = -0,5 * (K_{pk1} - K_{pk2}). \quad (4.33)$$

Расчет силы $R_{к.ш.2}$ приведен в таблице В6 в приложении В.

Сила, действующая на третью коренную шейку

$$R_{к.ш.3} = \sqrt{T_{k3}^2 + K_{k3}^2}, \quad (4.34)$$

где:

$$T_{k3} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \sin \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos 0^\circ - K_{pk3} * \sin 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (T_2 + T_3); \quad (4.35)$$

$$K_{k2} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \cos \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin 0^\circ - K_{pk3} * \cos 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (K_{pk2} - K_{pk3}).$$

Расчет силы $R_{к.ш.3}$ приведен в таблице В6 в приложении В.

Диаграммы $R_{к.ш1}$, $R_{к.ш2}$, $R_{к.ш3}$, перестроенные в прямоугольные координаты. По этим диаграммам определяем:

- для 1 (5)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш1cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш1i} + R_{к.ш1i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 9435 \text{ H}, \quad (4.36)$$

$$R_{к.ш1max} = 10889 \text{ H}, \quad (4.37)$$

$$R_{к.ш1min} = 3693 \text{ H}. \quad (4.38)$$

- для 2 (4)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш2cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш2i} + R_{к.ш2i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 3420 \text{ H}, \quad (4.39)$$

$$R_{к.ш2\max} = 13446 \text{ Н} , \quad (4.40)$$

$$R_{к.ш2\min} = 1088 \text{ Н} . \quad (4.41)$$

- для 3-й коренной шейки:

$$R_{к.ш3\text{ср}} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш3i} + R_{к.ш3i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 17158 \text{ Н} , \quad (4.42)$$

$$R_{к.ш3\max} = 18296 \text{ Н} , \quad (4.43)$$

$$R_{к.ш3\min} = 6459 \text{ Н} . \quad (4.44)$$

Результаты расчетов приведены в таблицах В7, В8 в приложении В.

Расчет поршневой группы, корпуса двигателя, системы смазки и системы охлаждения приведены в приложении Г, Д, Е.

5 Специальная часть

5.1 Трехмерная модель системы впуска.

Первым этапом создания системы впуска – это проектирование 3Д модели (рисунок 1). Трехмерная модель – это важная часть при создании любого объекта, т.к моделирование помогает существенно облегчить процесс изучения и создания реально существующих объектов. Для создания модели системы впуска использовалась программа КОМПАС-3D.

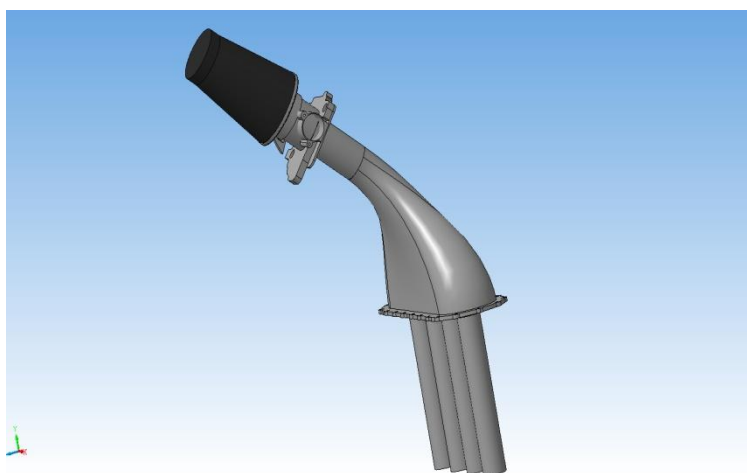


Рисунок 1– Трехмерная модель система впуска

5.2 Составные части системы впуска и их назначение

Рестриктор (рисунок 2) является одним из условий технического регламента болида «Formula Student» (FS), поэтому он также создавался в трехмерной модели. Рестриктор, уменьшает поток засасываемого воздуха тем самым, делает безопаснее соревнования FS.

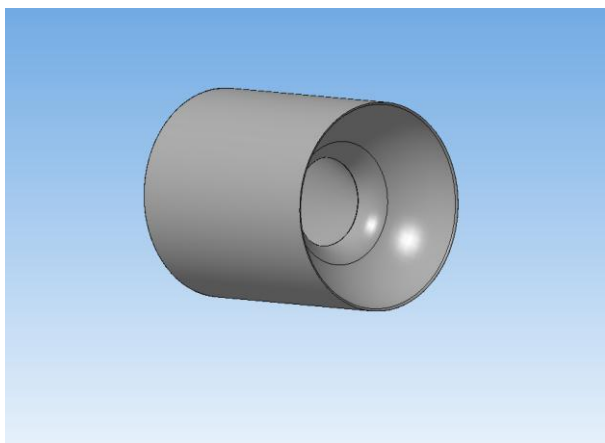


Рисунок 2- Рестриктор

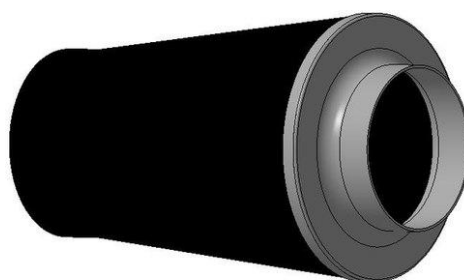


Рисунок 3- Воздушный фильтр

Воздушный фильтр болида FS (рисунок 3) очищает атмосферный воздух, который поступает в цилиндры двигателя внутреннего сгорания.

Патрубки болида FS (рисунок 4) исключают возникновения вихревых потоков на входе во внутренний канал цилиндров.

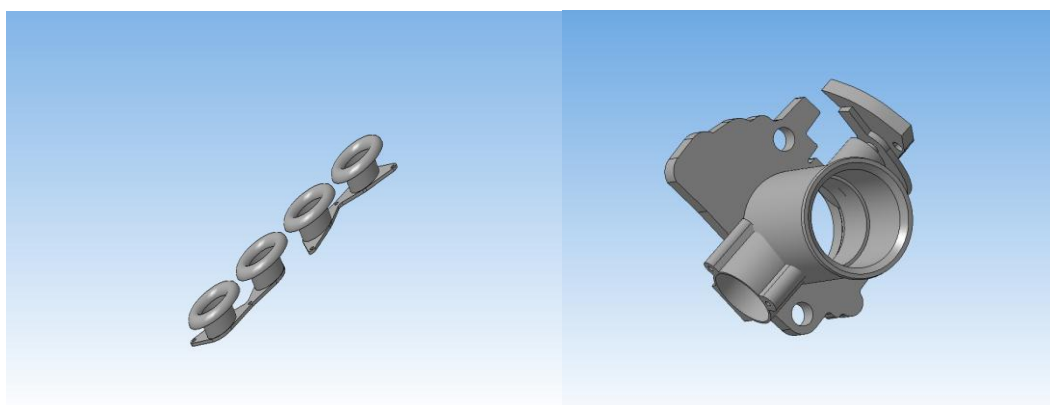


Рисунок 4- Патрубки

Рисунок 5- Дроссельная заслонка

Дроссельная заслонка болида FS (рисунок 5) также создавался в трехмерной модели.

5.3 Характер течения потока воздуха

Важным элементом системы впуска болида FS – это его форма. У

впускной системы не должны быть угловатые формы, так как это влечет к ухудшению течения потока воздуха. Поэтому, во всех ресиверах, а особенно в болидах FS, должны быть гладкие переходы между сегментами и округлые формы. Для просмотра движения воздуха в модели использовалась программа SolidWorks

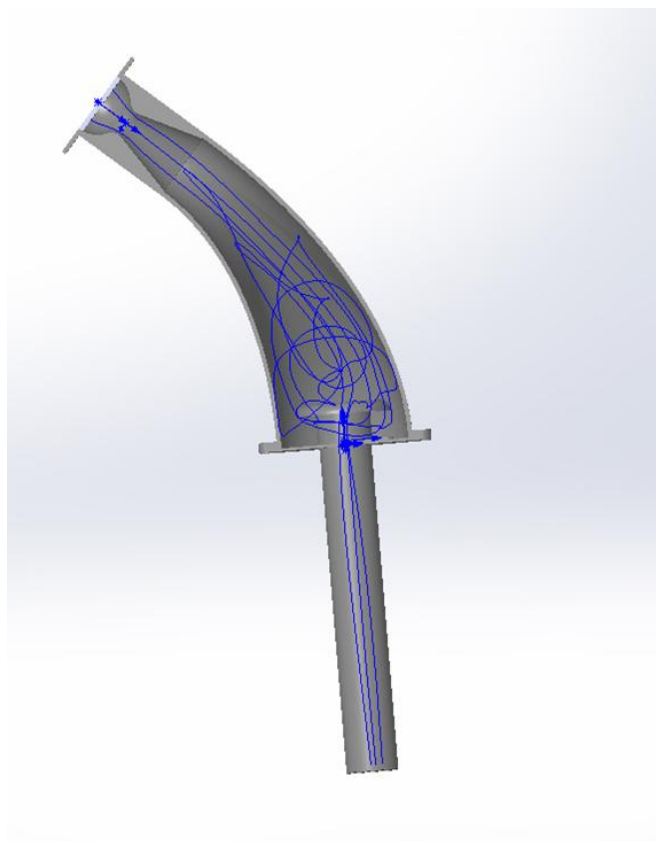


Рисунок 6 - Течения потока воздуха

5.4 Материалы которые можно использовать для создания системы впуска

До недавних пор материалом для изготовления системы впуска были алюминий, сталь и чугун. Такие материалы создавали определенные трудности.

Дело в том, что сам ресивер в процессе работы двигателя сильно нагревается и нагревает воздух, который в настоящее время находится внутри него. Воздух, в свою очередь, расширяется и поступает в цилиндры в меньшем объеме, тем самым увеличивая расход горючего и ухудшая эксплуатационные

характеристики ДВС.

В качестве альтернативы металлу, начали, применять композитные материалы на основе пластика. По причине того, что пластик имеет низкую теплопроводность, то такой ресивер нагревается не так сильно, и поэтому цилиндры лучше наполняются воздухом, и повышается мощность двигателя.

Материал	Температура плавления(°С)	Плотность(г/см ³)	Удельная прочность(Гпа/см ³)	Прочность при растяжении(МПа)
Алюминий	660,4	2,66	0.13	0,34
Чугун	1100	6,6	0.24	0,42
Углепластик (карбон)	400	1.5	0.66	1,5

5.5 Способы изготовления

Процесс изготовления ресивера начинается с создания кондуктора. Кондуктор (рисунок 7) вначале создается в 3D модели, затем отдается на лазерную резку и далее собирается по частям как конструктор.



Рисунок 7- Кондуктор

Вторым этапом изготовления ресивера является создание формы (рисунок 8). Форма создается из пластилина.



Рисунок 8 – Создание формы



Рисунок 9 – Форма из пластилина



Рисунок 10 – Форма из пластилина
(вид с боку)

Далее на эту форму накладывается несколько слоев карбона и полученное изделие помещается в печь на 4 часа при 80 градусов.



Рисунок 11 – Ресивер



Рисунок 12 – Система впуска

Окончательный вид системы впуска выглядит так (рисунок 12).

6 Безопасность и экологичность технического объекта

Согласно дипломному проекту двигатель внутреннего сгорания (ДВС) должен удовлетворять требованиям технического регламента болида «Formula Student» (FS) в отношении безопасности и экологичности. В частности, согласно указанному техническому регламенту FS (пункт IC1.1 и IC1.6), ДВС устанавливаемый на спортивный болид типа FS должен быть ограничен рабочим объемом цилиндров, который не должен превышать 610 см^3 , а также в системе впуска ДВС должен устанавливаться рестриктор, ограничивающий значение предельно допустимой площади проходного сечения впускного трубопровода системы впуска ДВС.

В качестве базового ДВС используется двигатель Honda CBR 600RR, применяемый на мотоциклах, у которого рабочий объем составляет 599 см^3 . Это означает, что он удовлетворяет требованиям технического регламента болида FS. Поэтому достаточно применить рестриктор в системе впуска ДВС, который ограничивает засасываемый расход воздуха в камеру сгорания и, тем самым, уменьшает эффективную мощность ДВС.

Отдельные технические требования, предъявляемые к рестриктору, приведены ниже:

- рестриктор должен быть расположен таким образом, чтобы обеспечивалось легкое измерение в течение инспекционного процесса технической комиссией;

- рестриктор не может быть подвижным или гибким, например, рестриктор не может быть подвижной частью дроссельного узла системы впуска ДВС;

- если в качестве силовой установки болида FS используется несколько ДВС то, тем не менее, весь воздушный поток засасываемый в ДВС, должен проходить через один рестриктор.

Другие требования в отношении безопасности и экологичности ДВС, смонтированного на болиде FS, рассмотрены ниже.

6.1 Топливопровод

Монтаж пластмассовых топливопроводов между топливным баком и ДВС запрещен.

Если используется резиновый шланг, часть шланга должна быть зажата фиксирующим элементом. Должны использоваться только специально разработанные зажимы. Зажимы шланга хомутом с червячным механизмом не подходят для использования в топливопроводах.

Все топливопроводы должны быть надёжно прикреплены к автомобилю и/или к корпусу ДВС.

Все топливопроводы должны быть защищены от возможных отломавшихся подвижных частей или от повреждений при столкновении болида FS с препятствием.

Все топливопроводы высокого давления, обычно расположенные после насоса высокого давления, должны быть произведены из нержавеющей стали или материала Aeroquip FC807, в виде гладкого полимерного (PTFE) шланга с надёжным стальным фитингом и видимым индикатором соединения Nomex. Эквивалентные изделия могут использоваться с предварительным одобрением Распорядительного Комитета. Использование эластичных уплотнений запрещено.

Топливопроводы должны быть надёжно закреплены через каждые 100 мм механическими креплениями к головке цилиндров или блоку цилиндров.

6.2 Топливо и топливная система

Основное топливо рассматриваемое в качестве рабочего тела, доступное на соревнованиях в Formula SAE – неэтилированный бензин.

Топливо для заправки топливной системы ДВС, при проведении соревнований Formula SAE, обеспечивается организаторами, если только организаторы не заявят об обратном.

В течение всего времени соревнований автомобили должны заправляться топливом, предоставленным организаторами

Добавки к топливу не допускаются. Под этот запрет попадает в частности, закись азота или любой другой окислитель.

В камеру сгорания ДВС может подаваться только топливо и воздух. Несоблюдение этого правила может привести к дисквалификации.

Температура топлива, введённого в топливную систему, не может быть изменена с намерением улучшить расчетную эффективность.

Топливный бак считается частью системы, которая находится в постоянном контакте с топливом. Он должен быть сделан из твердого материала или гибкого материала.

Любой топливный бак, который сделан из эластичного материала, например, в виде топливного мешка, должен быть помещён внутри в пределах твердого контейнера топливного бака, который надёжно прикреплен к раме транспортного средства. Ёмкость топливного бака может нести нагрузку.

Допускается к использованию топливный бак любого размера. Топливная система должна иметь возможность мгновенного опустошения топливного бака.

6.3 Требования расположения топливной системы

Все части топливной системы должны располагаться в пределах поверхности, определенной вершиной дуги и внешними гранями четырех шин.

Топливные баки должны быть защищены от столкновений сбоку или сзади. Любой топливный бак, который зафиксирован вне боковой защитной конструкции, должен быть огражден рамой.

Топливный бак должен быть способен к полному заполнению без дополнительных манипуляций с баком или автомобилем. Топливная система должна быть спроектирована таким образом, чтобы вовремя дозаправки болида FS на ровной поверхности было предотвращено образование воздушной

полости или других эффектов, которые вызывают снижение уровня топлива.

Во время заправки топливом к болиду имеют доступ только заправщики и официальные лица. Топливный бак должен быть заполнен по горловину или до автоматической остановки, если используется система автоматической заправки.

Топливная система должна быть разработана так, что пролившееся в течение дозаправки топливо не должно попасть на водителя, систему выпуска отработавших газов ДВС, горячие детали или систему зажигания ДВС.

6.4 Электрическая система и система аварийного выключения

Транспортное средство болида FS должно быть оборудовано двумя выключателями системы электрооборудования, которые являются частью системы выключения. Приведение в действие любого из выключателей должно остановить ДВС.

Рядом с каждым выключателем должен быть прикреплен международный электрический символ, представляемый в виде красной искры на синем треугольнике с белыми гранями.

6.5 Базовый главный выключатель системы электрооборудования

Базовый главный выключатель должен иметь возможность:

- фиксироваться на правой стороне панели приборов возле водителя транспортного средства, поблизости от главной дуги, на высоте плеча; легко приводиться в действие снаружи автомобиля;

- отключать электропитание всех электрических схем бортовой системы электропитания, включая аккумулятор, генератор, сигналы, топливный насос, зажигание и систему управления;

- весь электроток аккумулятора должен проходить через этот выключатель;

– быть вращательного типа и прямого действия, то есть работать не через реле.

На рисунке 1 изображено фото типичного выключателя бортовой системы электропитания, соответствующего требованиям регламента FS.



Рисунок 1 – Типичный выключатель бортовой системы электропитания болида FS

6.6 Аккумуляторная батарея

Все аккумуляторы (т.е. все источники электрического питания) бортовой системы электроснабжения должны быть надежно прикреплены к каркасу (раме).

Любой аккумулятор, состоящий из жидкостных элементов, зафиксированный (закрепленный) в водительском отсеке, должен находиться в защитном непроницаемом контейнере.

Незаземлённая клемма аккумулятора должна иметь электрическую изоляцию.

Литиевые аккумуляторы:

- должны быть коммерческого производства;
- должны иметь защиту от повышенного напряжения, недостаточного напряжения, короткого замыкания и перегрева элементов.

– должны отделяться от водителя противопожарной перегородкой

Все аккумуляторы, функционирующие на основе химических реакций, кроме кислотно-свинцовых батарей, должны быть представлены во время технической инспекции, с маркировками, позволяющими узнать их характеристики из спецификаций или других документов, подтверждающих, что аккумулятор и дополнительная электроника соответствуют все необходимым требованиям.

6.7 Безопасность жизнедеятельности пилота

Все пилоты, участвующие на соревнованиях FS должны иметь экипировку, отвечающую по требованиям безопасности FS. На протяжении всей дистанции пилот должен быть пристегнут ремнями безопасности, имеющими не менее пяти точек крепления, затянутыми в максимальном положении.

6.7.1 Экипировка пилота

Одним из наиболее важных факторов является гарантия защиты пилота и снаряжения от огня. Комбинезоны пилотов изготавливаются из легкого волокна Nomex. Материал типа Nomex схож по строению с кевларом. Этот материал не изменяет своих свойств при нагревании до 350 °С и способен выдержать воздействие открытого огня в течение 8 секунд. Поэтому пилот не получает каких-либо серьезных ожогов. Также из этого материала вот уже более 30 лет изготавливают гоночные комбинезоны. Кроме комбинезона, вся поверхность тела пилота защищена еще одним более тонким костюмом из материала Nomex, включающим в себя огнезащитное белье, кальсоны, балаклаву (подшлемник). Пилот также надевает обувь, изготовленную из волокна Nomex на твердой подошве, обеспечивающей хороший контакт с педалями, а также перчатки из материала Nomex с замшевыми вставками на ладонях для более удобного

захвата руля.



Рисунок 2 – Экипировка пилота.

6.7.2 Шлем и система HANS

Шлем прежде всего, является важнейшей частью защиты пилота, а также играет существенную аэродинамическую роль. Область шлема – одна из наиболее турбулентных зон в болиде FS, и поэтому одной из задач для производителей шлемов становится уменьшение этого нежелательного побочного эффекта.

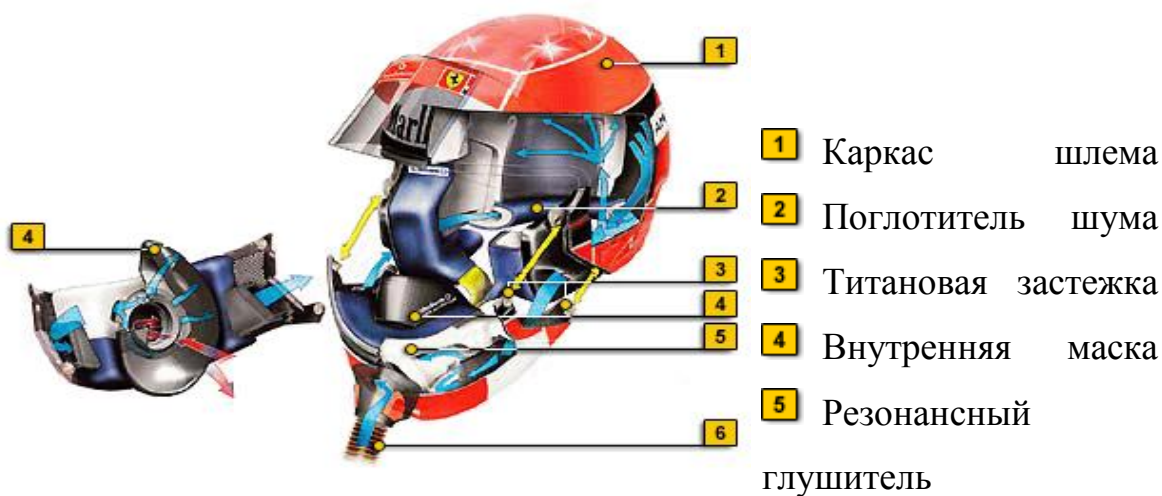


Рисунок 3 – Шлем пилота FS

При резком торможении во время аварии пилот подвергается

воздействию силы, в 80 раз превосходящей силу тяжести. В такой ситуации вес головы пилота и шлема может за считанные мгновения возрасти с 7 кг до 560 кг. Система HANS обеспечивает амортизацию этого колоссального напряжения, а также защищает голову пилота от ударов о руль и переднюю часть кокпита.



Рисунок 4 - Система HANS

Таким образом, двигатель внутреннего сгорания удовлетворяет требованиям технического регламента болида «Formula Student» (FS) в отношении безопасности и экологичности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работ были сделаны следующие основные выводы:

– выполнены тепловой расчёт для проектируемого двигателя, кинематический, динамический расчёты, прочностной расчет, позволяющие получить исходные данные для проектирования двигателя;

– получены следующие показатели двигателя: номинальная мощность $N_e=81,7$ кВт (при $n=11500$ мин⁻¹), максимальный крутящий момент $M_e =151,6$ Н·м (при $n=1300$ мин⁻¹), часовой расход топлива $G_T =2,8$ кг/час (при $n=1300$ мин⁻¹), удельный расход топлива $g_e=135,6$ г/ (кВт·час) при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=0,86$;

– произведен расчет систем двигателя, в результате чего определены основные параметры основных деталей и узлов системы охлаждения и смазки.

– произведена адаптация впускной системы для двигателя Honda CBR 600RR;

– построена 3Д модель системы впуска;

– построен кондуктор для системы впуска;

– построена модель, которая готова к испытанию на стенде.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Колчин, А.И. «Расчет автомобильных и тракторных двигателей»./ А.И. Колчин, В.П. Демидов - М.:Высшая школа, 1980 г.
2. Орлин, А.С. «Конструкция и расчет поршневых и комбинированных двигателей»./ А.С. Орлин, Д.Н. Вырубов, М.Г. Круглов - М.: Машиностроение,1972
3. Райков, И.Я «Конструкция автомобильных двигателей внутреннего сгорания»./ И.Я. Райков Г.Н. Рытвинский - М.: Высшая школа ,1986г.
4. Miroljub V. Tomi, Slobodan J. Popov, Nenad L. Milji, Stojan V. Petrovi, Miloš R. Cveti, Dragan M. Kneževi, and Zoran S. Jovanovi. A quick, simplified approach to the evaluation of combustion rate from an internal combustion engine indicator diagram thermal/ Miroljub V. Tomi etc. – Science: vol. 12, 2008. – p.p. 35.
5. Ioan Hiticas, Danila Iorga, Liviu Mihon, Narcis Uricanu, George Picioarea. The influence of the intake manifold system concerning the performances of the internal combustion engine/. Ioan Hiticas etc. – Science: vol., 2012. – p.p. 7.
6. Semin, Abdul Rahim Ismail, Rosli Abu Bakar and Ismail Ali. Heat Transfer Investigation of IntakePort Engine Based on Steady-State and Transient Simulation/ Abu Bakar etc. – Science: vol., 5 (11), 2008 , p.p. 1572-1579.
7. N. Saravanan, G. Nagarajan. An experimental investigation on hydrogen fuel injection in intake port and manifold with different EGR rates. – Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Guindy, Anna University Chennai: International Journal of Energy and Environment (IJEE), Volume 1, Issue 2, 2010, pp.221-248.
8. Jianyong Zhang , Zhongzhao LI, Kaiqiang Zhang,Lei Zhu, and Zhen Huang. An experiment study of homogeneous charge compression ignition combustion and emission in a gasoline engine. et al/ Jianyong Zhang etc.: An Experiment Study of Homogeneous Charge Compression.–Thermal science: 2014, Vol. 18, No. 1, p.p. 295-306.

9. Попык К.Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей. –М. «Высшая школа», 1970, 328 с., ил.
10. Бекман В.В. Гоночные автомобили – Л. Машиностроение, 1980. 320 с., ил.
11. Бекман В.В. Гоночные мотоциклы-Л. Машиностроение, 1983. 271с., ил.
12. Мягков В.Д., Палей М.А. и др. Допуски и посадки: Справочник. – Кн. I. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1982. – 543 с.
13. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. М. Машиностроение, 1979. 728с., ил.
14. ГОСТ 2.105-95. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. – Введ. 01.07.80.
15. Глазунов С.В. Спортивные автомобили (требования к конструкции). Изд-е 2-е, исправл. и доп., М., Физкультура и спорт, 1957.
16. С.В. Скоростные автомобили (типы и конструкции) М., ДОСААФ, 1964.
17. Классификация и технические требования к автомобилям, участвующим в спортивных соревнованиях. М., ДОСААФ, 1974.
18. Разинчев Н.В. Безопасность в автомобильном спорте М., ДОСААФ, 1972.
19. Шугуров Л.М. Спортивные и гоночные автомобили 1970 года М., НИИавтопром, 1971.
20. Honda Service Manual СИК600 F4, 1999, 362 с.
21. Ховах, М.С. «Автомобильные двигатели»./ М.С. Ховах - М.: Машиностроение, 1977 г.
22. Васильева, Л.С. «Автомобильные и эксплуатационные материалы»./ Л.С. Васильева - М.: Транспорт,1986г.
23. Венцель, С.В. «Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания»./ С.В. Венцель - М.: Химия, 1979г.
24. Григорьев, М.А. «Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания»./ М.А. Григорьев - М.: Машиностроение 1983г.
25. Кальней, Е.Д. Методические указания по выполнению курсовых и дипломных проектов по дисциплине «Основы технического творчества и патентоведения»./ Е.Д. Кальней

26. Кутенёв, В.Ф. Комплексное решение проблем снижения выбросов вредных веществ и расхода топлива автомобильными двигателями. Автореф. дисс. докт. техн. наук. 05.04.02 / Кутенёв Вадим Федорович. - М.: МАМИ. - 1990. - 45 с.
27. Машиностроение. Энциклопедия : в 40 т. / гл. ред. К.В. Фролов (пред.) и др.— М.: Машиностроение, 2013.- Т. IV-14: Двигатели внутреннего сгорания.- 784с.
28. Семенов, Е.С. Исследование турбулентности в цилиндре поршневого двигателя / Е.С. Семенов, А.С. Соколик // Известия АН СССР. – 1958. - № 8. – С. 130-140.
29. Смоленская, Н.М. Исследование эффективности рабочего процесса бензиновых двигателей с использованием электропроводности пламени / Н.М. Смоленская, В.В. Смоленский, П.В. Ивашин, А.П. Шайкин // ВНТК "Проведение научных исследований в области машиностроения". 27-28 ноября 2009. Тольятти: Изд-во ТГУ. - 2009. С.244-250.
30. Стечкин, Б.С. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя / Б.С. Стечкин, К.И. Генкин, В.С. Золотаревский. – М. : АН СССР, 1960. – 200 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – ТАБЛИЦЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

Таблица А1 – Расчет процесса расширения

Параметры	Расчет процесса расширения			
n , мин ⁻¹	1300	10000	11500	13500
n_2	1,199	1,194	1,187	1,196
P_b , МПа	0,8	0,643	0,607	0,551
T_b , К	1573	1589	1623	1613

Таблица А2 – Эффективные показатели двигателя

Параметры	Эффективные показатели двигателя			
n , мин ⁻¹	1300	10000	11500	13500
C_n	1,84	14,16	16,29	19,12
P_M , МПа	0,05	0,19	0,21	0,25
P_e , МПа	2,001	0,400	1,291	1,128
N_e , кВт	20,6	69,8	81,7	83,7
η_e	0,61	0,39	0,34	0,27
g_e , г/(кВт·ч)	135,6	207,1	238,6	302,8
M_e , Нм	151,6	74,1	67,9	59,2
G_t , кг/ч	2,8	16,1	19,5	25,3

Таблица А3 – Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 1300 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ															
γ_r	n_1	ε	L_o	ΔT	P_y	T_y	V_a	n_2	E_2	q_z	H_u	T_a	α		
0,004239843	1,3861572	12,2	0,5168	5	1,63866	660,46	0,82613	1,199	88,4747	2995,55	43897	302,855	0,86		
Расчёт процесса сгорания															
φ°	φ°	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{Мпа}$	χ	σ	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}
0	-25	0,148	663,873	671,320	667,596	0,000	0,000	1,374	6,349	1,230	0,000	0,111	1,620	1,000	1,000
1	-24	0,143	671,320	678,871	675,096	0,000	0,000	1,373	6,367	1,230	0,000	0,102	1,572	1,000	1,000
2	-23	0,139	678,871	686,638	682,755	0,000	0,000	1,371	6,386	1,281	0,000	0,094	1,527	1,000	1,000
3	-22	0,135	686,638	694,784	690,711	0,000	0,000	1,370	6,405	1,334	0,000	0,086	1,483	1,000	1,000
4	-21	0,131	694,784	703,517	699,150	0,000	0,000	1,369	6,424	1,390	0,000	0,079	1,440	1,000	1,000
5	-20	0,128	703,517	713,096	708,306	0,000	0,000	1,367	6,445	1,447	0,000	0,071	1,400	1,000	1,000
6	-19	0,124	713,096	723,822	718,459	0,000	0,001	1,366	6,468	1,508	0,001	0,065	1,362	1,000	1,000
7	-18	0,121	723,822	736,037	729,929	0,000	0,001	1,364	6,494	1,571	0,001	0,058	1,325	1,000	1,000
8	-17	0,118	736,037	750,122	743,080	0,001	0,001	1,362	6,522	1,639	0,002	0,052	1,290	1,000	1,000
9	-16	0,115	750,122	766,487	758,305	0,001	0,002	1,360	6,554	1,712	0,003	0,046	1,257	1,000	1,000
10	-15	0,112	766,487	785,568	776,027	0,001	0,002	1,358	6,590	1,790	0,005	0,040	1,226	1,000	1,000
11	-14	0,109	785,568	807,813	796,690	0,002	0,003	1,355	6,630	1,876	0,008	0,035	1,197	1,001	1,001
12	-13	0,107	807,813	833,681	820,747	0,002	0,004	1,352	6,676	1,969	0,011	0,030	1,170	1,001	1,001
13	-12	0,104	833,681	863,623	848,652	0,003	0,005	1,349	6,726	2,072	0,015	0,026	1,145	1,001	1,001
14	-11	0,102	863,623	898,075	880,849	0,003	0,006	1,346	6,781	2,186	0,020	0,022	1,122	1,001	1,002
15	-10	0,100	898,075	937,450	917,763	0,004	0,008	1,342	6,840	2,312	0,027	0,018	1,101	1,002	1,002
16	-9	0,099	937,450	982,119	959,785	0,005	0,009	1,339	6,904	2,452	0,034	0,015	1,082	1,002	1,003
17	-8	0,097	982,119	1032,406	1007,263	0,005	0,011	1,335	6,971	2,606	0,044	0,012	1,065	1,003	1,003
18	-7	0,096	1032,406	1088,575	1060,491	0,006	0,013	1,331	7,040	2,776	0,054	0,009	1,050	1,004	1,004
19	-6	0,094	1088,575	1150,816	1119,695	0,007	0,015	1,327	7,112	2,963	0,067	0,007	1,036	1,004	1,005
20	-5	0,093	1150,816	1219,238	1185,027	0,008	0,017	1,323	7,184	3,166	0,082	0,005	1,025	1,005	1,006

21	-4	0,093	1219,238	1293,858	1256,548	0,009	0,019	1,320	7,256	3,387	0,098	0,003	1,016	1,006	1,007
22	-3	0,092	1293,858	1374,587	1334,222	0,011	0,021	1,316	7,327	3,625	0,117	0,002	1,009	1,008	1,008
23	-2	0,092	1374,587	1461,226	1417,906	0,012	0,024	1,313	7,396	3,879	0,139	0,001	1,004	1,009	1,010
24	-1	0,091	1461,226	1553,455	1507,340	0,013	0,026	1,309	7,464	4,148	0,162	0,000	1,001	1,011	1,011
25	0	0,091	1553,455	1650,833	1602,144	0,014	0,028	1,306	7,528	4,430	0,188	0,000	1,000	1,012	1,013
26	1	0,091	1650,833	1752,791	1701,812	0,015	0,031	1,304	7,589	4,722	0,216	0,000	1,001	1,014	1,015
27	2	0,092	1752,791	1858,634	1805,712	0,016	0,033	1,301	7,647	5,023	0,247	0,001	1,004	1,016	1,017
28	3	0,092	1858,634	1967,552	1913,093	0,017	0,035	1,298	7,701	5,328	0,279	0,002	1,009	1,018	1,019
29	4	0,093	1967,552	2078,622	2023,087	0,018	0,037	1,296	7,751	5,633	0,314	0,003	1,016	1,021	1,022
30	5	0,093	2078,622	2190,832	2134,727	0,019	0,038	1,294	7,797	5,935	0,351	0,005	1,025	1,023	1,024
31	6	0,094	2190,832	2303,093	2246,962	0,020	0,039	1,292	7,839	6,230	0,389	0,007	1,036	1,026	1,027
32	7	0,096	2303,093	2414,264	2358,678	0,020	0,040	1,291	7,878	6,511	0,428	0,009	1,050	1,028	1,029
33	8	0,097	2414,264	2523,185	2468,725	0,020	0,041	1,289	7,913	6,777	0,469	0,012	1,065	1,031	1,032
34	9	0,099	2523,185	2628,699	2575,942	0,021	0,041	1,288	7,944	7,021	0,509	0,015	1,082	1,033	1,035
35	10	0,100	2628,699	2729,689	2679,194	0,020	0,041	1,287	7,972	7,240	0,551	0,018	1,101	1,036	1,037
36	11	0,102	2729,689	2825,109	2777,399	0,020	0,040	1,286	7,996	7,431	0,592	0,022	1,122	1,039	1,040
37	12	0,104	2825,109	2914,013	2869,561	0,020	0,039	1,285	8,017	7,590	0,632	0,026	1,145	1,041	1,043
38	13	0,107	2914,013	2995,583	2954,798	0,019	0,038	1,284	8,036	7,716	0,671	0,030	1,170	1,044	1,045
39	14	0,109	2995,583	3069,157	3032,370	0,018	0,036	1,284	8,051	7,807	0,709	0,035	1,197	1,047	1,048
40	15	0,112	3069,157	3134,241	3101,699	0,017	0,034	1,283	8,064	7,863	0,745	0,040	1,226	1,049	1,050
41	16	0,115	3134,241	3190,528	3162,385	0,016	0,031	1,283	8,075	7,883	0,778	0,046	1,257	1,051	1,052
42	17	0,118	3190,528	3237,895	3214,211	0,014	0,029	1,282	8,084	7,868	0,810	0,052	1,290	1,053	1,054
43	18	0,121	3237,895	3276,407	3257,151	0,013	0,026	1,282	8,090	7,820	0,838	0,058	1,325	1,055	1,056
44	19	0,124	3276,407	3306,305	3291,356	0,012	0,023	1,282	8,095	7,741	0,864	0,065	1,362	1,057	1,057
45	20	0,128	3306,305	3327,986	3317,146	0,010	0,020	1,282	8,099	7,635	0,888	0,071	1,400	1,058	1,059
46	21	0,131	3327,986	3341,983	3334,985	0,009	0,018	1,282	8,100	7,503	0,908	0,079	1,440	1,060	1,060
47	22	0,135	3341,983	3348,936	3345,460	0,008	0,015	1,282	8,101	7,349	0,926	0,086	1,483	1,061	1,061

48	23	0,139	3348,936	3349,562	3349,249	0,006	0,013	1,282	8,101	7,177	0,941	0,094	1,527	1,062	1,062
49	24	0,143	3349,562	3344,623	3347,092	0,005	0,011	1,282	8,099	6,991	0,954	0,102	1,572	1,063	1,063
50	25	0,148	3344,623	3334,895	3339,759	0,004	0,009	1,282	8,097	6,794	0,964	0,111	1,620	1,063	1,064
51	26	0,152	3334,895	3321,141	3328,018	0,003	0,007	1,282	8,094	6,588	0,973	0,119	1,669	1,064	1,064
52	27	0,157	3321,141	3304,088	3312,615	0,003	0,005	1,282	8,091	6,378	0,980	0,129	1,720	1,064	1,064
53	28	0,162	3304,088	3284,406	3294,247	0,002	0,004	1,282	8,087	6,166	0,985	0,138	1,773	1,065	1,065
54	29	0,167	3284,406	3262,694	3273,550	0,002	0,003	1,282	8,083	5,953	0,989	0,148	1,827	1,065	1,065
55	30	0,172	3262,694	3239,476	3251,085	0,001	0,002	1,283	8,078	5,743	0,992	0,158	1,884	1,065	1,065
56	31	0,177	3239,476	3215,195	3227,335	0,001	0,002	1,283	8,074	5,536	0,995	0,168	1,941	1,065	1,065
57	32	0,182	3215,195	3190,217	3202,706	0,001	0,001	1,283	8,069	5,333	0,996	0,179	2,001	1,065	1,065
58	33	0,188	3190,217	3164,838	3177,528	0,000	0,001	1,283	8,064	5,137	0,998	0,190	2,062	1,065	1,065
59	34	0,194	3164,838	3138,953	3151,896	0,000	0,001	1,283	8,059	4,946	0,998	0,201	2,124	1,066	1,066
60	35	0,200	3138,953	3139,291	3112,624	0,000	0,000	1,287	7,962	4,763	0,999	0,212	2,188	1,066	1,066

Таблица А4 – Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 10000 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ															
γ_r	n_1	ε	L_0	ΔT	P_y	T_y	V_a	n_2	E_2	q_z	H_u	T_a	α		
0,00515571	1,38	12,2	0,5168	5	1,415858	662,628555	0,964105	1,199	69,03973	2727,933	43897	303,89865	0,95		
Расчёт процесса сгорания															
φ°	φ_s°	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{Мпа}$	χ	σ	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}
0	-25	0,128	664,338	671,785	668,062	0,000	0,000	1,374	6,350	1,230	0,000	0,111	1,620	1,000	1,000
1	-24	0,124	671,785	679,326	675,556	0,000	0,000	1,373	6,369	1,230	0,000	0,102	1,572	1,000	1,000
2	-23	0,121	679,326	687,059	683,193	0,000	0,000	1,371	6,387	1,281	0,000	0,094	1,527	1,000	1,000
3	-22	0,117	687,059	695,129	691,094	0,000	0,000	1,370	6,406	1,334	0,000	0,086	1,483	1,000	1,000

4	-21	0,114	695,129	703,722	699,425	0,000	0,000	1,369	6,425	1,389	0,000	0,079	1,440	1,000	1,000
5	-20	0,111	703,722	713,068	708,395	0,000	0,000	1,367	6,446	1,447	0,000	0,071	1,400	1,000	1,000
6	-19	0,108	713,068	723,436	718,252	0,000	0,001	1,366	6,468	1,507	0,001	0,065	1,362	1,000	1,000
7	-18	0,105	723,436	735,134	729,285	0,000	0,001	1,364	6,492	1,570	0,001	0,058	1,325	1,000	1,000
8	-17	0,102	735,134	748,502	741,818	0,001	0,001	1,362	6,519	1,637	0,002	0,052	1,290	1,000	1,000
9	-16	0,099	748,502	763,909	756,206	0,001	0,002	1,360	6,550	1,708	0,003	0,046	1,257	1,000	1,000
10	-15	0,097	763,909	781,746	772,828	0,001	0,002	1,358	6,584	1,785	0,005	0,040	1,226	1,000	1,000
11	-14	0,095	781,746	802,420	792,083	0,002	0,003	1,356	6,622	1,868	0,008	0,035	1,197	1,001	1,001
12	-13	0,092	802,420	826,342	814,381	0,002	0,004	1,353	6,664	1,958	0,011	0,030	1,170	1,001	1,001
13	-12	0,091	826,342	853,924	840,133	0,003	0,005	1,350	6,711	2,057	0,015	0,026	1,145	1,001	1,001
14	-11	0,089	853,924	885,561	869,742	0,003	0,006	1,347	6,763	2,165	0,020	0,022	1,122	1,001	1,002
15	-10	0,087	885,561	921,627	903,594	0,004	0,008	1,344	6,818	2,285	0,027	0,018	1,101	1,002	1,002
16	-9	0,086	921,627	962,460	942,043	0,005	0,009	1,340	6,878	2,416	0,034	0,015	1,082	1,002	1,003
17	-8	0,084	962,460	1008,357	985,409	0,005	0,011	1,337	6,941	2,560	0,044	0,012	1,065	1,003	1,003
18	-7	0,083	1008,357	1059,555	1033,956	0,006	0,013	1,333	7,007	2,718	0,054	0,009	1,050	1,004	1,004
19	-6	0,082	1059,555	1116,228	1087,892	0,007	0,015	1,329	7,075	2,891	0,067	0,007	1,036	1,004	1,005
20	-5	0,081	1116,228	1178,474	1147,351	0,008	0,017	1,326	7,144	3,080	0,082	0,005	1,025	1,005	1,006
21	-4	0,080	1178,474	1246,304	1212,389	0,009	0,019	1,322	7,213	3,283	0,098	0,003	1,016	1,006	1,007
22	-3	0,080	1246,304	1319,637	1282,970	0,011	0,021	1,318	7,282	3,501	0,117	0,002	1,009	1,008	1,008
23	-2	0,079	1319,637	1398,286	1358,962	0,012	0,024	1,315	7,350	3,734	0,139	0,001	1,004	1,009	1,010
24	-1	0,079	1398,286	1481,961	1440,124	0,013	0,026	1,312	7,416	3,979	0,162	0,000	1,001	1,011	1,011
25	0	0,079	1481,961	1570,254	1526,107	0,014	0,028	1,309	7,479	4,236	0,188	0,000	1,000	1,012	1,013
26	1	0,079	1570,254	1662,646	1616,450	0,015	0,031	1,306	7,539	4,502	0,216	0,000	1,001	1,014	1,015
27	2	0,079	1662,646	1758,507	1710,576	0,016	0,033	1,303	7,597	4,774	0,247	0,001	1,004	1,016	1,017
28	3	0,080	1758,507	1857,096	1807,801	0,017	0,035	1,301	7,650	5,050	0,279	0,002	1,009	1,018	1,019
29	4	0,080	1857,096	1957,577	1907,336	0,018	0,037	1,298	7,701	5,326	0,314	0,003	1,016	1,021	1,022
30	5	0,081	1957,577	2059,032	2008,305	0,019	0,038	1,296	7,747	5,598	0,351	0,005	1,025	1,023	1,024

31	6	0,082	2059,032	2160,474	2109,753	0,020	0,039	1,295	7,790	5,863	0,389	0,007	1,036	1,026	1,027
32	7	0,083	2160,474	2260,873	2210,674	0,020	0,040	1,293	7,829	6,115	0,428	0,009	1,050	1,028	1,029
33	8	0,084	2260,873	2359,177	2310,025	0,020	0,041	1,291	7,864	6,352	0,469	0,012	1,065	1,031	1,032
34	9	0,086	2359,177	2454,344	2406,761	0,021	0,041	1,290	7,896	6,570	0,509	0,015	1,082	1,033	1,035
35	10	0,087	2454,344	2545,365	2499,854	0,020	0,041	1,289	7,924	6,764	0,551	0,018	1,101	1,036	1,037
36	11	0,089	2545,365	2631,296	2588,331	0,020	0,040	1,288	7,949	6,933	0,592	0,022	1,122	1,039	1,040
37	12	0,091	2631,296	2711,286	2671,291	0,020	0,039	1,287	7,970	7,073	0,632	0,026	1,145	1,041	1,043
38	13	0,092	2711,286	2784,600	2747,943	0,019	0,038	1,286	7,989	7,182	0,671	0,030	1,170	1,044	1,045
39	14	0,095	2784,600	2850,641	2817,620	0,018	0,036	1,285	8,005	7,259	0,709	0,035	1,197	1,046	1,048
40	15	0,097	2850,641	2908,967	2879,804	0,017	0,034	1,285	8,019	7,304	0,745	0,040	1,226	1,049	1,050
41	16	0,099	2908,967	2959,304	2934,136	0,016	0,031	1,285	8,030	7,316	0,778	0,046	1,257	1,051	1,052
42	17	0,102	2959,304	3001,545	2980,425	0,014	0,029	1,284	8,038	7,297	0,810	0,052	1,290	1,053	1,054
43	18	0,105	3001,545	3035,753	3018,649	0,013	0,026	1,284	8,045	7,248	0,838	0,058	1,325	1,055	1,056
44	19	0,108	3035,753	3062,147	3048,950	0,012	0,023	1,284	8,050	7,171	0,864	0,065	1,362	1,057	1,057
45	20	0,111	3062,147	3081,091	3071,619	0,010	0,020	1,284	8,053	7,069	0,888	0,071	1,400	1,058	1,059
46	21	0,114	3081,091	3093,069	3087,080	0,009	0,018	1,283	8,055	6,944	0,908	0,079	1,440	1,060	1,060
47	22	0,117	3093,069	3098,663	3095,866	0,008	0,015	1,283	8,055	6,799	0,926	0,086	1,483	1,061	1,061
48	23	0,121	3098,663	3098,524	3098,593	0,006	0,013	1,283	8,055	6,638	0,941	0,094	1,527	1,062	1,062
49	24	0,124	3098,524	3093,343	3095,934	0,005	0,011	1,284	8,053	6,464	0,954	0,102	1,572	1,063	1,063
50	25	0,128	3093,343	3083,826	3088,585	0,004	0,009	1,284	8,051	6,280	0,964	0,111	1,620	1,063	1,064
51	26	0,132	3083,826	3070,664	3077,245	0,003	0,007	1,284	8,048	6,089	0,973	0,119	1,669	1,064	1,064
52	27	0,136	3070,664	3054,517	3062,591	0,003	0,005	1,284	8,044	5,894	0,980	0,129	1,720	1,064	1,064
53	28	0,140	3054,517	3035,992	3045,254	0,002	0,004	1,284	8,040	5,697	0,985	0,138	1,773	1,065	1,065
54	29	0,144	3035,992	3015,633	3025,812	0,002	0,003	1,284	8,035	5,500	0,989	0,148	1,827	1,065	1,065
55	30	0,149	3015,633	2993,916	3004,774	0,001	0,002	1,284	8,030	5,304	0,992	0,158	1,884	1,065	1,065
56	31	0,153	2993,916	2971,242	2982,579	0,001	0,002	1,285	8,025	5,113	0,995	0,168	1,941	1,065	1,065
57	32	0,158	2971,242	2947,946	2959,594	0,001	0,001	1,285	8,020	4,926	0,996	0,179	2,001	1,065	1,065

58	33	0,163	2947,946	2924,293	2936,119	0,000	0,001	1,285	8,015	4,744	0,998	0,190	2,062	1,065	1,065
59	34	0,168	2924,293	2900,242	2912,268	0,000	0,001	1,285	8,010	4,567	0,998	0,201	2,124	1,066	1,066
60	35	0,173	2900,242	2875,948	2888,095	0,000	0,000	1,289	7,931	4,398	0,999	0,212	2,188	1,066	1,066

Таблица А5 – Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 11500 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ															
γ_r		n_1	ε	L_o	ΔT	P_y	T_y	V_a	n_2	E_2	q_z	H_u	T_a	α	
0,005524		1,3860725	12,2	0,5168	5	1,342769	663,497528	1,017916	1,199	65,36608	2726,933	43897	304,31809	0,95	
Расчёт процесса сгорания															
φ°	φ_s°	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{Мпа}$	χ	σ	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}
0	-25	0,135	664,490	671,939	668,215	0,000	0,000	1,374	6,351	1,230	0,000	0,111	1,620	1,000	1,000
1	-24	0,131	671,939	679,481	675,710	0,000	0,000	1,373	6,369	1,230	0,000	0,102	1,572	1,000	1,000
2	-23	0,127	679,481	687,215	683,348	0,000	0,000	1,371	6,387	1,281	0,000	0,094	1,527	1,000	1,000
3	-22	0,124	687,215	695,286	691,251	0,000	0,000	1,370	6,406	1,334	0,000	0,086	1,483	1,000	1,000
4	-21	0,120	695,286	703,880	699,583	0,000	0,000	1,369	6,425	1,389	0,000	0,079	1,440	1,000	1,000
5	-20	0,117	703,880	713,227	708,553	0,000	0,000	1,367	6,446	1,447	0,000	0,071	1,400	1,000	1,000
6	-19	0,114	713,227	723,596	718,411	0,000	0,001	1,366	6,468	1,507	0,001	0,065	1,362	1,000	1,000
7	-18	0,111	723,596	735,295	729,445	0,000	0,001	1,364	6,493	1,570	0,001	0,058	1,325	1,000	1,000
8	-17	0,108	735,295	748,663	741,979	0,001	0,001	1,362	6,520	1,637	0,002	0,052	1,290	1,000	1,000
9	-16	0,105	748,663	764,070	756,366	0,001	0,002	1,360	6,550	1,708	0,003	0,046	1,257	1,000	1,000
10	-15	0,102	764,070	781,907	772,988	0,001	0,002	1,358	6,584	1,785	0,005	0,040	1,226	1,000	1,000
11	-14	0,100	781,907	802,579	792,243	0,002	0,003	1,356	6,622	1,868	0,008	0,035	1,197	1,001	1,001
12	-13	0,098	802,579	826,501	814,540	0,002	0,004	1,353	6,664	1,958	0,011	0,030	1,170	1,001	1,001
13	-12	0,096	826,501	854,080	840,291	0,003	0,005	1,350	6,711	2,057	0,015	0,026	1,145	1,001	1,001
14	-11	0,094	854,080	885,715	869,898	0,003	0,006	1,347	6,763	2,165	0,020	0,022	1,122	1,001	1,002

15	-10	0,092	885,715	921,779	903,747	0,004	0,008	1,344	6,819	2,284	0,027	0,018	1,101	1,002	1,002
16	-9	0,090	921,779	962,609	942,194	0,005	0,009	1,340	6,878	2,416	0,034	0,015	1,082	1,002	1,003
17	-8	0,089	962,609	1008,502	985,556	0,005	0,011	1,337	6,942	2,560	0,044	0,012	1,065	1,003	1,003
18	-7	0,088	1008,502	1059,697	1034,100	0,006	0,013	1,333	7,007	2,718	0,054	0,009	1,050	1,004	1,004
19	-6	0,086	1059,697	1116,365	1088,031	0,007	0,015	1,329	7,075	2,891	0,067	0,007	1,036	1,004	1,005
20	-5	0,086	1116,365	1178,606	1147,486	0,008	0,017	1,326	7,144	3,079	0,082	0,005	1,025	1,005	1,006
21	-4	0,085	1178,606	1246,431	1212,519	0,009	0,019	1,322	7,213	3,283	0,098	0,003	1,016	1,006	1,007
22	-3	0,084	1246,431	1319,758	1283,095	0,011	0,021	1,318	7,282	3,501	0,117	0,002	1,009	1,008	1,008
23	-2	0,084	1319,758	1398,402	1359,080	0,012	0,024	1,315	7,350	3,733	0,139	0,001	1,004	1,009	1,010
24	-1	0,084	1398,402	1482,070	1440,236	0,013	0,026	1,312	7,416	3,978	0,162	0,000	1,001	1,011	1,011
25	0	0,083	1482,070	1570,356	1526,213	0,014	0,028	1,309	7,479	4,235	0,188	0,000	1,000	1,012	1,013
26	1	0,084	1570,356	1662,742	1616,549	0,015	0,031	1,306	7,539	4,501	0,216	0,000	1,001	1,014	1,015
27	2	0,084	1662,742	1758,595	1710,668	0,016	0,033	1,303	7,597	4,773	0,247	0,001	1,004	1,016	1,017
28	3	0,084	1758,595	1857,176	1807,885	0,017	0,035	1,301	7,650	5,049	0,279	0,002	1,009	1,018	1,019
29	4	0,085	1857,176	1957,651	1907,413	0,018	0,037	1,298	7,701	5,325	0,314	0,003	1,016	1,021	1,022
30	5	0,086	1957,651	2059,098	2008,374	0,019	0,038	1,296	7,747	5,597	0,351	0,005	1,025	1,023	1,024
31	6	0,086	2059,098	2160,533	2109,815	0,020	0,039	1,295	7,790	5,861	0,389	0,007	1,036	1,026	1,027
32	7	0,088	2160,533	2260,924	2210,728	0,020	0,040	1,293	7,829	6,114	0,428	0,009	1,050	1,028	1,029
33	8	0,089	2260,924	2359,221	2310,072	0,020	0,041	1,291	7,864	6,351	0,469	0,012	1,065	1,031	1,032
34	9	0,090	2359,221	2454,380	2406,800	0,021	0,041	1,290	7,896	6,568	0,509	0,015	1,082	1,033	1,035
35	10	0,092	2454,380	2545,394	2499,887	0,020	0,041	1,289	7,924	6,763	0,551	0,018	1,101	1,036	1,037
36	11	0,094	2545,394	2631,319	2588,357	0,020	0,040	1,288	7,949	6,931	0,592	0,022	1,122	1,039	1,040
37	12	0,096	2631,319	2711,303	2671,311	0,020	0,039	1,287	7,970	7,071	0,632	0,026	1,145	1,041	1,043
38	13	0,098	2711,303	2784,611	2747,957	0,019	0,038	1,286	7,989	7,180	0,671	0,030	1,170	1,044	1,045
39	14	0,100	2784,611	2850,646	2817,629	0,018	0,036	1,285	8,005	7,257	0,709	0,035	1,197	1,046	1,048
40	15	0,102	2850,646	2908,968	2879,807	0,017	0,034	1,285	8,019	7,302	0,745	0,040	1,226	1,049	1,050
41	16	0,105	2908,968	2959,300	2934,134	0,016	0,031	1,285	8,030	7,314	0,778	0,046	1,257	1,051	1,052

42	17	0,108	2959,300	3001,538	2980,419	0,014	0,029	1,284	8,038	7,295	0,810	0,052	1,290	1,053	1,054
43	18	0,111	3001,538	3035,742	3018,640	0,013	0,026	1,284	8,045	7,246	0,838	0,058	1,325	1,055	1,056
44	19	0,114	3035,742	3062,133	3048,938	0,012	0,023	1,284	8,050	7,169	0,864	0,065	1,362	1,057	1,057
45	20	0,117	3062,133	3081,074	3071,604	0,010	0,020	1,284	8,053	7,067	0,888	0,071	1,400	1,058	1,059
46	21	0,120	3081,074	3093,050	3087,062	0,009	0,018	1,283	8,055	6,942	0,908	0,079	1,440	1,060	1,060
47	22	0,124	3093,050	3098,643	3095,847	0,008	0,015	1,283	8,055	6,797	0,926	0,086	1,483	1,061	1,061
48	23	0,127	3098,643	3098,502	3098,573	0,006	0,013	1,283	8,055	6,636	0,941	0,094	1,527	1,062	1,062
49	24	0,131	3098,502	3093,321	3095,911	0,005	0,011	1,284	8,053	6,462	0,954	0,102	1,572	1,063	1,063
50	25	0,135	3093,321	3083,802	3088,562	0,004	0,009	1,284	8,051	6,278	0,964	0,111	1,620	1,063	1,064
51	26	0,139	3083,802	3070,640	3077,221	0,003	0,007	1,284	8,048	6,087	0,973	0,119	1,669	1,064	1,064
52	27	0,144	3070,640	3054,493	3062,566	0,003	0,005	1,284	8,044	5,892	0,980	0,129	1,720	1,064	1,064
53	28	0,148	3054,493	3035,967	3045,230	0,002	0,004	1,284	8,040	5,695	0,985	0,138	1,773	1,065	1,065
54	29	0,152	3035,967	3015,608	3025,788	0,002	0,003	1,284	8,035	5,498	0,989	0,148	1,827	1,065	1,065
55	30	0,157	3015,608	2993,891	3004,750	0,001	0,002	1,284	8,030	5,303	0,992	0,158	1,884	1,065	1,065
56	31	0,162	2993,891	2971,218	2982,554	0,001	0,002	1,285	8,025	5,111	0,995	0,168	1,941	1,065	1,065
57	32	0,167	2971,218	2947,921	2959,569	0,001	0,001	1,285	8,020	4,924	0,996	0,179	2,001	1,065	1,065
58	33	0,172	2947,921	2924,268	2936,095	0,000	0,001	1,285	8,015	4,742	0,998	0,190	2,062	1,065	1,065
59	34	0,177	2924,268	2900,469	2912,369	0,000	0,001	1,285	8,010	4,566	0,998	0,201	2,124	1,066	1,066
60	35	0,183	2900,469	2873,987	2887,228	0,000	0,000	1,286	8,004	4,397	0,999	0,212	2,188	1,066	1,066

Таблица А6 – Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 13500 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ															
γ_r	n_1	ε	L_o	ΔT	P_y	T_y	V_a	n_2	E_2	q_z	H_u	T_a	α		
0,00618534	1,3859776	12,2	0,5168	5	1,229453	665,05384	1,114343	1,199	59,67057	2725,142	43897	305,06942	0,95		
Расчёт процесса сгорания															
φ°	φ°	V_{cr}	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{Мпа}$	χ	σ	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}

0	-25	0,148	665,054	684,242	674,648	0,000	0,000	1,373	6,366	1,229	0,000	0,111	1,620	1,000	1,000
1	-24	0,144	684,242	692,183	688,212	0,000	0,000	1,370	6,399	1,229	0,000	0,102	1,572	1,000	1,000
2	-23	0,139	692,183	700,253	696,218	0,000	0,000	1,369	6,418	1,281	0,000	0,094	1,527	1,000	1,000
3	-22	0,135	700,253	708,536	704,395	0,000	0,000	1,368	6,436	1,334	0,000	0,086	1,483	1,000	1,000
4	-21	0,132	708,536	717,141	712,838	0,000	0,000	1,367	6,456	1,389	0,000	0,079	1,440	1,000	1,000
5	-20	0,128	717,141	726,204	721,672	0,000	0,000	1,365	6,475	1,446	0,000	0,071	1,400	1,000	1,000
6	-19	0,124	726,204	735,886	731,045	0,000	0,001	1,364	6,496	1,506	0,001	0,065	1,362	1,000	1,000
7	-18	0,121	735,886	746,371	741,128	0,000	0,001	1,362	6,518	1,569	0,001	0,058	1,325	1,000	1,000
8	-17	0,118	746,371	757,867	752,119	0,001	0,001	1,361	6,541	1,636	0,002	0,052	1,290	1,000	1,000
9	-16	0,115	757,867	770,599	764,233	0,001	0,002	1,359	6,566	1,707	0,003	0,046	1,257	1,000	1,000
10	-15	0,112	770,599	784,810	777,704	0,001	0,002	1,358	6,593	1,784	0,005	0,040	1,226	1,000	1,000
11	-14	0,109	784,810	800,755	792,782	0,002	0,003	1,356	6,623	1,867	0,008	0,035	1,197	1,001	1,001
12	-13	0,107	800,755	818,696	809,725	0,002	0,004	1,354	6,655	1,957	0,011	0,030	1,170	1,001	1,001
13	-12	0,105	818,696	838,897	828,796	0,003	0,005	1,351	6,691	2,056	0,015	0,026	1,145	1,001	1,001
14	-11	0,103	838,897	861,619	850,258	0,003	0,006	1,349	6,729	2,164	0,020	0,022	1,122	1,001	1,002
15	-10	0,101	861,619	887,112	874,365	0,004	0,008	1,347	6,771	2,284	0,027	0,018	1,101	1,002	1,002
16	-9	0,099	887,112	915,606	901,359	0,005	0,009	1,344	6,815	2,415	0,034	0,015	1,082	1,002	1,003
17	-8	0,097	915,606	947,309	931,458	0,005	0,011	1,341	6,863	2,561	0,044	0,012	1,065	1,003	1,003
18	-7	0,096	947,309	982,392	964,851	0,006	0,013	1,338	6,913	2,721	0,054	0,009	1,050	1,004	1,004
19	-6	0,095	982,392	1020,987	1001,690	0,007	0,015	1,335	6,965	2,896	0,067	0,007	1,036	1,004	1,005
20	-5	0,094	1020,987	1063,177	1042,082	0,008	0,017	1,332	7,019	3,086	0,082	0,005	1,025	1,005	1,006
21	-4	0,093	1063,177	1108,988	1086,083	0,009	0,019	1,329	7,074	3,293	0,098	0,003	1,016	1,006	1,007
22	-3	0,092	1108,988	1158,387	1133,688	0,011	0,021	1,326	7,131	3,515	0,117	0,002	1,009	1,008	1,008
23	-2	0,092	1158,387	1211,269	1184,828	0,012	0,024	1,323	7,187	3,753	0,139	0,001	1,004	1,009	1,010
24	-1	0,091	1211,269	1267,461	1239,365	0,013	0,026	1,320	7,243	4,004	0,162	0,000	1,001	1,011	1,011
25	0	0,091	1267,461	1326,710	1297,086	0,014	0,028	1,318	7,298	4,267	0,188	0,000	1,000	1,012	1,013
26	1	0,091	1326,710	1388,691	1357,701	0,015	0,031	1,315	7,351	4,540	0,216	0,000	1,001	1,014	1,015

27	2	0,092	1388,691	1452,997	1420,844	0,016	0,033	1,312	7,403	4,821	0,247	0,001	1,004	1,016	1,017
28	3	0,092	1452,997	1519,150	1486,073	0,017	0,035	1,310	7,453	5,105	0,279	0,002	1,009	1,018	1,019
29	4	0,093	1519,150	1586,604	1552,877	0,018	0,037	1,308	7,501	5,389	0,314	0,003	1,016	1,021	1,022
30	5	0,094	1586,604	1654,749	1620,677	0,019	0,038	1,306	7,545	5,669	0,351	0,005	1,025	1,023	1,024
31	6	0,095	1654,749	1722,929	1688,839	0,020	0,039	1,304	7,587	5,942	0,389	0,007	1,036	1,026	1,027
32	7	0,096	1722,929	1790,449	1756,689	0,020	0,040	1,302	7,626	6,203	0,428	0,009	1,050	1,028	1,029
33	8	0,097	1790,449	1856,592	1823,521	0,020	0,041	1,300	7,661	6,448	0,469	0,012	1,065	1,031	1,032
34	9	0,099	1856,592	1920,642	1888,617	0,021	0,041	1,299	7,694	6,672	0,509	0,015	1,082	1,033	1,035
35	10	0,101	1920,642	1981,897	1951,270	0,020	0,041	1,297	7,723	6,873	0,551	0,018	1,101	1,036	1,037
36	11	0,103	1981,897	2039,693	2010,795	0,020	0,040	1,296	7,749	7,047	0,592	0,022	1,122	1,039	1,040
37	12	0,105	2039,693	2093,421	2066,557	0,020	0,039	1,295	7,772	7,192	0,632	0,026	1,145	1,041	1,043
38	13	0,107	2093,421	2142,551	2117,986	0,019	0,038	1,294	7,792	7,305	0,671	0,030	1,170	1,044	1,045
39	14	0,109	2142,551	2186,644	2164,598	0,018	0,036	1,294	7,809	7,385	0,709	0,035	1,197	1,046	1,048
40	15	0,112	2186,644	2225,367	2206,005	0,017	0,034	1,293	7,824	7,432	0,745	0,040	1,226	1,049	1,050
41	16	0,115	2225,366	2258,501	2241,934	0,016	0,031	1,293	7,836	7,445	0,778	0,046	1,257	1,051	1,052
42	17	0,118	2258,501	2285,952	2272,227	0,014	0,029	1,292	7,845	7,426	0,810	0,052	1,290	1,053	1,054
43	18	0,121	2285,952	2307,743	2296,848	0,013	0,026	1,292	7,852	7,377	0,838	0,058	1,325	1,055	1,056
44	19	0,124	2307,743	2324,013	2315,878	0,012	0,023	1,292	7,857	7,298	0,864	0,065	1,362	1,057	1,057
45	20	0,128	2324,013	2335,007	2329,510	0,010	0,020	1,292	7,861	7,194	0,888	0,071	1,400	1,058	1,059
46	21	0,132	2335,007	2341,060	2338,033	0,009	0,018	1,291	7,862	7,066	0,908	0,079	1,440	1,060	1,060
47	22	0,135	2341,060	2342,579	2341,819	0,008	0,015	1,291	7,862	6,918	0,926	0,086	1,483	1,061	1,061
48	23	0,139	2342,579	2340,026	2341,303	0,006	0,013	1,292	7,861	6,754	0,941	0,094	1,527	1,062	1,062
49	24	0,144	2340,026	2333,894	2336,960	0,005	0,011	1,292	7,859	6,576	0,954	0,102	1,572	1,063	1,063
50	25	0,148	2333,894	2324,688	2329,291	0,004	0,009	1,292	7,855	6,387	0,964	0,111	1,620	1,063	1,064
51	26	0,152	2324,688	2312,906	2318,797	0,003	0,007	1,292	7,851	6,192	0,973	0,119	1,669	1,064	1,064
52	27	0,157	2312,906	2299,022	2305,964	0,003	0,005	1,292	7,846	5,992	0,980	0,129	1,720	1,064	1,064
53	28	0,162	2299,022	2282,215	2290,618	0,002	0,004	1,292	7,840	5,791	0,985	0,138	1,773	1,065	1,065

54	29	0,167	2282,215	3742,843	730,314	0,002	0,003	1,154	13,995	5,589	0,989	0,148	1,827	1,065	1,065
55	30	0,172	3742,843	2173,525	784,659	0,001	0,002	1,161	13,407	5,406	0,992	0,158	1,884	1,065	1,065
56	31	0,177	2173,525	2201,060	2187,293	0,001	0,002	1,294	7,802	5,225	0,995	0,168	1,941	1,065	1,065
57	32	0,183	2201,060	2228,594	2214,827	0,001	0,001	1,294	7,812	5,032	0,996	0,179	2,001	1,065	1,065
58	33	0,188	2228,594	2256,129	2242,362	0,000	0,001	1,293	7,822	4,845	0,998	0,190	2,062	1,065	1,065
59	34	0,194	2256,129	2283,664	2269,896	0,000	0,001	1,293	7,831	4,664	0,998	0,201	2,124	1,065	1,066
60	35	0,200	2283,664	2284,664	2284,164	0,000	0,000	1,293	7,836	4,490	0,999	0,212	2,188	1,066	1,066

Таблица А7 – Данные построения индикаторной диаграммы

φ, град	V, л	P, Мпа	φ, град	V, л	P, Мпа	φ, град	V, л	P, Мпа	φ, град	V, л	P, Мпа	φ, град	V, л	P, Мпа
0	0,049	0,100	280	0,316	0,205	357	0,050	3,555	385	0,081	4,591	413	0,183	1,751
10	0,054	0,096	290	0,266	0,260	358	0,049	3,735	386	0,084	4,433	414	0,187	1,701
20	0,070	0,090	300	0,217	0,343	359	0,049	3,919	387	0,087	4,274	415	0,192	1,654
30	0,096	0,088	310	0,171	0,475	360	0,049	4,107	388	0,089	4,118	416	0,197	1,608
40	0,130	0,088	320	0,130	0,692	361	0,049	4,296	389	0,092	3,976	417	0,201	1,564
50	0,170	0,088	330	0,096	1,050	362	0,049	4,484	390	0,095	3,838	418	0,206	1,522
60	0,216	0,088	335	0,082	1,311	363	0,050	4,668	391	0,098	3,691	419	0,211	1,482
70	0,265	0,088	336	0,080	1,369	364	0,050	4,847	392	0,101	3,549	420	0,215	1,443
80	0,315	0,088	337	0,077	1,428	365	0,050	5,016	393	0,105	3,412	421	0,220	1,406
90	0,364	0,088	338	0,075	1,490	366	0,051	5,174	394	0,108	3,280	422	0,225	1,371
100	0,410	0,088	339	0,073	1,554	367	0,052	5,318	395	0,111	3,154	423	0,230	1,337
110	0,453	0,088	340	0,071	1,620	368	0,052	5,445	396	0,115	3,049	424	0,235	1,304
120	0,491	0,088	341	0,069	1,689	369	0,053	5,554	397	0,118	2,942	425	0,240	1,273
130	0,524	0,088	342	0,067	1,762	370	0,054	5,642	398	0,122	2,840	426	0,244	1,243
140	0,551	0,088	343	0,065	1,838	371	0,055	5,709	399	0,125	2,742	427	0,249	1,214
150	0,572	0,088	344	0,063	1,918	372	0,057	5,752	400	0,129	2,649	428	0,254	1,186
160	0,587	0,088	345	0,061	2,002	373	0,058	5,773	401	0,133	2,560	429	0,259	1,159
170	0,596	0,088	346	0,060	2,092	374	0,059	5,770	402	0,137	2,474	430	0,264	1,134
180	0,599	0,085	347	0,058	2,187	375	0,061	5,744	403	0,141	2,393	431	0,269	1,109
190	0,596	0,086	348	0,057	2,288	376	0,062	5,696	404	0,145	2,315	432	0,274	1,085
200	0,587	0,087	349	0,056	2,397	377	0,064	5,628	405	0,149	2,240	433	0,279	1,062
210	0,572	0,091	350	0,055	2,512	378	0,066	5,542	406	0,153	2,169	434	0,284	1,040
220	0,551	0,095	351	0,054	2,636	379	0,068	5,438	407	0,157	2,101	435	0,289	1,019
230	0,524	0,102	352	0,053	2,768	380	0,070	5,320	408	0,161	2,036	436	0,294	0,998
240	0,492	0,111	353	0,052	2,909	381	0,072	5,189	409	0,165	1,974	437	0,299	0,979
250	0,454	0,124	354	0,051	3,058	382	0,074	5,049	410	0,170	1,915	438	0,304	0,960
260	0,411	0,143	355	0,051	3,216	383	0,076	4,901	411	0,174	1,858	439	0,309	0,942
270	0,365	0,168	356	0,050	3,382	384	0,079	4,748	412	0,178	1,803	440	0,314	0,924

441	0,319	0,907	470	0,452	0,600	499	0,548	0,478	528	0,594	0,434	710	0,055	0,118
442	0,324	0,890	471	0,456	0,593	500	0,550	0,475	529	0,595	0,433	720	0,049	0,100
443	0,329	0,875	472	0,460	0,587	501	0,553	0,473	530	0,596	0,433			
444	0,334	0,859	473	0,464	0,581	502	0,555	0,471	531	0,596	0,432			
445	0,339	0,845	474	0,468	0,576	503	0,557	0,468	532	0,597	0,432			
446	0,344	0,830	475	0,472	0,570	504	0,560	0,466	533	0,597	0,431			
447	0,348	0,817	476	0,476	0,565	505	0,562	0,464	534	0,598	0,431			
448	0,353	0,803	477	0,480	0,559	506	0,564	0,462	535	0,598	0,431			
449	0,358	0,791	478	0,483	0,554	507	0,566	0,460	536	0,598	0,430			
450	0,363	0,778	479	0,487	0,550	508	0,568	0,458	537	0,599	0,430			
451	0,368	0,766	480	0,491	0,545	509	0,570	0,456	538	0,599	0,430			
452	0,373	0,755	481	0,494	0,540	510	0,572	0,455	539	0,599	0,430			
453	0,377	0,743	482	0,498	0,536	511	0,573	0,453	540	0,599	0,430			
454	0,382	0,733	483	0,501	0,531	512	0,575	0,451	550	0,596	0,432			
455	0,387	0,722	484	0,504	0,527	513	0,577	0,450	560	0,587	0,395			
456	0,391	0,712	485	0,508	0,523	514	0,578	0,448	570	0,573	0,377			
457	0,396	0,702	486	0,511	0,519	515	0,580	0,447	580	0,552	0,359			
458	0,400	0,693	487	0,514	0,515	516	0,581	0,445	590	0,525	0,340			
459	0,405	0,683	488	0,517	0,512	517	0,583	0,444	600	0,492	0,322			
460	0,410	0,675	489	0,520	0,508	518	0,584	0,443	610	0,455	0,303			
461	0,414	0,666	490	0,523	0,505	519	0,585	0,442	620	0,412	0,285			
462	0,418	0,658	491	0,526	0,501	520	0,587	0,441	630	0,366	0,266			
463	0,423	0,649	492	0,529	0,498	521	0,588	0,440	640	0,317	0,248			
464	0,427	0,642	493	0,532	0,495	522	0,589	0,439	650	0,267	0,229			
465	0,431	0,634	494	0,535	0,492	523	0,590	0,438	660	0,218	0,211			
466	0,436	0,627	495	0,538	0,489	524	0,591	0,437	670	0,172	0,192			
467	0,440	0,620	496	0,540	0,486	525	0,592	0,436	680	0,131	0,174			
468	0,444	0,613	497	0,543	0,483	526	0,593	0,435	690	0,097	0,155			
469	0,448	0,606	498	0,545	0,480	527	0,594	0,435	700	0,071	0,137			

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – ТАБЛИЦЫ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА И КИНЕМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Таблица Б1 – Результаты расчетов данных для построения внешней скоростной характеристики

n , мин ⁻¹	$N_{ех}$, кВт	$M_{ех}$, Н·М	$p_{ех}$, МПа	g_e , г/(кВт · ч)	G_t , кг/ч	η_v
1500	10,203	64,957	1,364	257,025	2,626	0,041
2500	17,820	68,028	1,428	241,082	4,295	0,038
3500	25,835	70,462	1,476	227,753	5,883	0,038
4500	34,055	72,246	1,515	217,034	7,387	0,037
5500	42,254	73,381	1,538	208,927	8,831	0,037
6500	50,281	73,868	1,554	203,437	10,228	0,037
7500	57,886	73,706	1,545	200,565	11,611	0,036
8500	64,885	72,893	1,528	200,303	12,997	0,036
9500	71,064	71,435	1,497	202,652	14,403	0,035
10500	76,229	69,325	1,455	207,623	15,826	0,035
11500	80,167	66,568	1,398	215,204	17,254	0,035
12500	82,682	63,165	1,326	225,396	18,635	0,034
13500	83,563	59,112	1,241	238,204	19,905	0,034
14500	82,614	54,406	1,142	253,628	20,954	0,033
15500	79,625	49,054	1,028	271,667	21,632	0,032
16500	74,396	43,054	0,904	292,318	21,746	0,030

Таблица Б2 – Параметры теплового баланса

Составляющие тепл. баланса	Частота вращения коленчатого вала, об/мин							
	1300		10000		11500		13500	
	Q, Дж/ч	q, %	Q, Дж/ч	q, %	Q, Дж/ч	q, %	Q, Дж/ч	q, %
Теплота, эквивалентная эффективной работе	33531,41	39,959	232906,7	35,984	262880,4	35,317	300831,6	34,42
Теплота, передаваемая окружающей среде	28434,45	33,885	118600	18,323	130789,5	17,571	146324,9	16,74

Теплота, унесенная отработавшими газами	29429,71	35,071	226994,3	35,071	261046,4	35,071	306448,7	35,07
Теплота, потерянная из-за химической неполноты сгорания топлива	5925,08	7,0608	45700,74	7,0608	52556,44	7,0608	61697,29	7,060
Неучтенные потери теплоты	-13406,3	-15,97	23038,23	3,5594	37061,55	4,9791	58489,65	6,693
Общее количество теплоты, введенное в двигатель с топливом	83914,37	100	647239,9	100	744334,3	100	873792,1	100

Таблица Б3 – Расчетные значения перемещения, скорости и ускорения поршня.

$\varphi_{кв}$, град	$\varphi_{кв}$, рад	S_x , мм	V_x , м/с	W_{x1} , м/с ²	W_{x2} , м/с ²	W_x , м/с ²
0	0	0	0	30818,5	5899,943	36718,5
10	0,175	0,384	5,282	30350,3	5544,133	35894,5
20	0,349	1,519	10,33	28959,9	4519,618	33479,6
30	0,524	3,355	14,92	26689,6	2949,971	29639,6
40	0,698	5,812	18,86	23608,4	1024,514	24632,9
50	0,873	8,784	22,02	19809,8	-1024,51	18785,3
60	1,047	12,15	24,28	15409,3	-2949,97	12459,3
70	1,222	15,78	25,62	10540,6	-4519,62	6020,94
80	1,396	19,53	26,04	5351,58	-5544,13	-192,55
90	1,571	23,28	25,59	1,9E-12	-5899,94	-5899,9
100	1,745	26,91	24,36	-5351,58	-5544,13	-10896
110	1,92	30,31	22,47	-10540,6	-4519,62	-15060
120	2,094	33,4	20,04	-15409,3	-2949,97	-18359
130	2,269	36,1	17,19	-19809,8	-1024,51	-20834

140	2,443	38,37	14,04	-23608,4	1024,514	-22584
150	2,618	40,16	10,67	-26689,6	2949,971	-23740
160	2,793	41,46	7,178	-28959,9	4519,618	-24440
170	2,967	42,24	3,606	-30350,3	5544,133	-24806
180	3,142	42,5	3E-15	-30818,5	5899,943	-24919
190	3,316	42,24	-3,61	-30350,3	5544,133	-24806
200	3,491	41,46	-7,18	-28959,9	4519,618	-24440
210	3,665	40,16	-10,7	-26689,6	2949,971	-23740
220	3,84	38,37	-14	-23608,4	1024,514	-22584
230	4,014	36,1	-17,2	-19809,8	-1024,51	-20834
240	4,189	33,4	-20	-15409,3	-2949,97	-18359
250	4,363	30,31	-22,5	-10540,6	-4519,62	-15060
260	4,538	26,91	-24,4	-5351,58	-5544,13	-10896
270	4,712	23,28	-25,6	-5,7E-12	-5899,94	-5899,9
280	4,887	19,53	-26	5351,58	-5544,13	-192,55
290	5,061	15,78	-25,6	10540,6	-4519,62	6020,94
300	5,236	12,15	-24,3	15409,3	-2949,97	12459,3
310	5,411	8,784	-22	19809,8	-1024,51	18785,3
320	5,585	5,812	-18,9	23608,4	1024,514	24632,9
330	5,76	3,355	-14,9	26689,6	2949,971	29639,6
340	5,934	1,519	-10,3	28959,9	4519,618	33479,6
350	6,109	0,384	-5,28	30350,3	5544,133	35894,5
360	6,283	1E-31	-0	30818,5	5899,943	36718,5
370	6,458	0,384	5,282	30350,3	5544,133	35894,5
380	6,632	1,519	10,33	28959,9	4519,618	33479,6
390	6,807	3,355	14,92	26689,6	2949,971	29639,6
400	6,981	5,812	18,86	23608,4	1024,514	24632,9
410	7,156	8,784	22,02	19809,8	-1024,51	18785,3
420	7,33	12,15	24,28	15409,3	-2949,97	12459,3
430	7,505	15,78	25,62	10540,6	-4519,62	6020,94
440	7,679	19,53	26,04	5351,58	-5544,13	-192,55
450	7,854	23,28	25,59	9,4E-12	-5899,94	-5899,9
460	8,029	26,91	24,36	-5351,58	-5544,13	-10896
470	8,203	30,31	22,47	-10540,6	-4519,62	-15060
480	8,378	33,4	20,04	-15409,3	-2949,97	-18359
490	8,552	36,1	17,19	-19809,8	-1024,51	-20834
500	8,727	38,37	14,04	-23608,4	1024,514	-22584
510	8,901	40,16	10,67	-26689,6	2949,971	-23740
520	9,076	41,46	7,178	-28959,9	4519,618	-24440

530	9,25	42,24	3,606	-30350,3	5544,133	-24806
540	9,425	42,5	8E-15	-30818,5	5899,943	-24919
550	9,599	42,24	-3,61	-30350,3	5544,133	-24806
560	9,774	41,46	-7,18	-28959,9	4519,618	-24440
570	9,948	40,16	-10,7	-26689,6	2949,971	-23740
580	10,12	38,37	-14	-23608,4	1024,514	-22584
590	10,3	36,1	-17,2	-19809,8	-1024,51	-20834
600	10,47	33,4	-20	-15409,3	-2949,97	-18359
610	10,65	30,31	-22,5	-10540,6	-4519,62	-15060
620	10,82	26,91	-24,4	-5351,58	-5544,13	-10896
630	11	23,28	-25,6	-1,3E-11	-5899,94	-5899,9
640	11,17	19,53	-26	5351,58	-5544,13	-192,55
650	11,34	15,78	-25,6	10540,6	-4519,62	6020,94
660	11,52	12,15	-24,3	15409,3	-2949,97	12459,3
670	11,69	8,784	-22	19809,8	-1024,51	18785,3
680	11,87	5,812	-18,9	23608,4	1024,514	24632,9
690	12,04	3,355	-14,9	26689,6	2949,971	29639,6
700	12,22	1,519	-10,3	28959,9	4519,618	33479,6
710	12,39	0,384	-5,28	30350,3	5544,133	35894,5
720	12,57	5E-31	-0	30818,5	5899,943	36718,5

ПРИЛОЖЕНИЕ В – ТАБЛИЦЫ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Таблица В1 – Сводная таблица динамического расчета двигателя.

φ°	Удельные силы										$tg \beta$	$1/\cos\beta$	$\frac{\cos(\varphi+\beta)}{\cos\beta}$	$\frac{\sin(\varphi+\beta)}{\cos\beta}$
	$P_r, \text{Мпа}$	$\Delta P_r, \text{Н}$	$j, \text{м/с}^2$	$P_j, \text{Н}$	$P, \text{Н}$	$N, \text{Н}$	$S, \text{Н}$	$K, \text{Н}$	$T, \text{Н}$	$M_{кр}, \text{Н*м}$				
0	0,1	0	50539,38	-13899	-13899	0	-13899	-13899	0	0,00	0	1	1	0
10	0,099	-3,526	49407,53	-13588	-13592	-449	-13599	-13307	-2802	-56,62	0,033005	1,000545	0,979076	0,206152
20	0,096	-14,1	46090,26	-12676	-12690	-826	-12717	-11642	-5117	-93,93	0,065075	1,002115	0,917436	0,403171
30	0,092	-28,21	40814,82	-11225	-11253	-1074	-11304	-9209	-6557	-193,66	0,095287	1,00453	0,818382	0,582521
40	0,089	-38,78	33935,18	-9333	-9372	-1153	-9442	-6438	-6907	-283,95	0,122741	1,007504	0,687148	0,736812
50	0,088	-42,31	25898,01	-7123	-7165	-1054	-7242	-3798	-6166	-316,70	0,146585	1,010686	0,530497	0,860267
60	0,087	-45,83	17200,38	-4730	-4776	-797	-4842	-1698	-4535	-288,80	0,166046	1,013692	0,3562	0,949048
70	0,086	-49,36	8344,167	-2295	-2344	-425	-2382	-402	-2348	-207,35	0,180463	1,016153	0,17244	1,001415
80	0,085	-52,88	-207,824	57	4	1	4	0	4	-86,39	0,189328	1,017765	-0,0128	1,017684
90	0,085	-52,88	-8069,31	2219	2166	419	2207	-419	2166	56,72	0,19232	1,018326	-0,19232	1
100	0,085	-52,88	-14957,5	4114	4061	773	4134	-1467	3865	203,14	0,189328	1,017765	-0,3601	0,951931
110	0,085	-52,88	-20707,1	5695	5642	1024	5734	-2892	4952	334,06	0,180463	1,016153	-0,5116	0,877971
120	0,085	-52,88	-25269,7	6950	6897	1151	6992	-4445	5398	431,88	0,166046	1,013692	-0,6438	0,783002
130	0,085	-52,88	-28700,5	7893	7840	1153	7925	-5923	5265	481,73	0,146585	1,010686	-0,75508	0,671821
140	0,085	-52,88	-31132,7	8562	8509	1047	8573	-7192	4668	473,74	0,122741	1,007504	-0,84494	0,548763
150	0,085	-52,88	-32745,5	9006	8953	854	8994	-8181	3737	406,01	0,095287	1,00453	-0,91367	0,417479
160	0,085	-52,88	-33727,4	9276	9223	601	9242	-8872	2590	288,34	0,065075	1,002115	-0,96195	0,280869

170	0,085	-52,88	-34242,2	9417	9364	309	9370	-9276	1322	139,08	0,033005	1,000545	-0,99054	0,141144
180	0,085	-52,88	-34400,8	9461	9408	0	9408	-9408	0	0,00	2,33E-17	1	-1	1,23E-16
190	0,089	-40,03	-34242,2	9417	9377	-310	9382	-9289	-1324	-56,62	-0,03301	1,000545	-0,99054	-0,14114
200	0,091	-32,58	-33727,4	9276	9243	-602	9263	-8892	-2596	-93,93	-0,06508	1,002115	-0,96195	-0,28087
210	0,094	-19,55	-32745,5	9006	8986	-858	9027	-8211	-3750	-193,66	-0,09529	1,00453	-0,91367	-0,41748
220	0,1	0,0473	-31132,7	8562	8562	-1054	8627	-7236	-4697	-283,95	-0,12274	1,007504	-0,84494	-0,54876
230	0,108	27,836	-28700,5	7893	7921	-1165	8006	-5984	-5319	-316,70	-0,14659	1,010686	-0,75508	-0,67182
240	0,119	66,293	-25269,7	6950	7016	-1170	7113	-4522	-5491	-288,80	-0,16605	1,013692	-0,6438	-0,783
250	0,134	119,21	-20707,1	5695	5814	-1055	5909	-2980	-5103	-207,35	-0,18046	1,016153	-0,5116	-0,87797
260	0,155	192,47	-14957,5	4114	4306	-820	4384	-1556	-4098	-86,39	-0,18933	1,017765	-0,3601	-0,95193
270	0,184	295,35	-8069,31	2219	2515	-487	2561	-487	-2515	56,72	-0,19232	1,018326	-0,19232	-1
280	0,226	442,9	-207,824	57	500	-95	509	-7	-509	203,14	-0,18933	1,017765	-0,0128	-1,01768
290	0,287	660,28	8344,167	-2295	-1635	297	-1661	-280	1637	334,06	-0,18046	1,016153	0,17244	-1,00141
300	0,381	990,71	17200,38	-4730	-3740	624	-3791	-1330	3551	431,88	-0,16605	1,013692	0,3562	-0,94905
310	0,528	1509,8	25898,01	-7123	-5613	826	-5673	-2975	4830	481,73	-0,14659	1,010686	0,530497	-0,86027
320	0,766	2347,8	33935,18	-9333	-6985	860	-7038	-4798	5148	473,74	-0,12274	1,007504	0,687148	-0,73681
330	1,151	3704,4	40814,82	-11225	-7521	718	-7555	-6154	4382	406,01	-0,09529	1,00453	0,818382	-0,58252
340	1,739	5777,3	46090,26	-12676	-6899	449	-6913	-6329	2782	288,34	-0,06508	1,002115	0,917436	-0,40317
350	2,804	9533,4	49407,53	-13588	-4055	134	-4057	-3970	836	139,08	-0,03301	1,000545	0,979076	-0,20615
360	5,286	18285	50539,38	-13899	4386	0	4386	4386	0	0,00	-4,7E-17	1	1	-2,5E-16
370	8,178	28479	49407,53	-13588	14891	492	14899	14579	3070	-56,62	0,033005	1,000545	0,979076	0,206152
380	8,192	28528	46090,26	-12676	15853	1032	15886	14543	6392	-93,93	0,065075	1,002115	0,917436	0,403171
390	6,03	20908	40814,82	-11225	9683	924	9727	7924	5642	-193,66	0,095287	1,00453	0,818382	0,582521
400	4,203	14467	33935,18	-9333	5134	632	5172	3527	3784	-283,95	0,122741	1,007504	0,687148	0,736812
410	3,057	10426	25898,01	-7123	3303	486	3339	1751	2843	-316,70	0,146585	1,010686	0,530497	0,860267
420	2,311	7793,7	17200,38	-4730	3063	511	3106	1089	2908	-288,80	0,166046	1,013692	0,3562	0,949048
430	1,814	6042,9	8344,167	-2295	3748	680	3809	643	3755	-207,35	0,180463	1,016153	0,17244	1,001415

440	1,475	4847	-207,824	57	4904	934	4992	-68	4992	-86,39	0,189328	1,017765	-0,0128	1,017684
450	1,237	4008,7	-8069,31	2219	6228	1205	6343	-1205	6228	56,72	0,19232	1,018326	-0,19232	1
460	1,067	3408,1	-14957,5	4114	7522	1433	7657	-2717	7159	203,14	0,189328	1,017765	-0,3601	0,951931
470	0,943	2970,5	-20707,1	5695	8665	1572	8807	-4441	7605	334,06	0,180463	1,016153	-0,5116	0,877971
480	0,851	2648,4	-25269,7	6950	9598	1601	9731	-6186	7512	431,88	0,166046	1,013692	-0,6438	0,783002
490	0,784	2410,7	-28700,5	7893	10304	1516	10415	-7784	6919	481,73	0,146585	1,010686	-0,75508	0,671821
500	0,734	2236,8	-31132,7	8562	10799	1329	10880	-9127	5924	473,74	0,122741	1,007504	-0,84494	0,548763
510	0,699	2112,9	-32745,5	9006	11119	1061	11169	-10160	4640	406,01	0,095287	1,00453	-0,91367	0,417479
520	0,676	2030,1	-33727,4	9276	11306	736	11330	-10876	3175	288,34	0,065075	1,002115	-0,96195	0,280869
530	0,662	1982,5	-34242,2	9417	11400	376	11406	-11292	1609	139,08	0,033005	1,000545	-0,99054	0,141144
540	0,658	1966,9	-34400,8	9461	11428	0	11428	-11428	0	0,00	6,98E-17	1	-1	3,68E-16
550	0,662	1982,5	-34242,2	9417	11400	-376	11406	-11292	-1609	-56,62	-0,03301	1,000545	-0,99054	-0,14114
560	0,6	1762,2	-33727,4	9276	11038	-719	11061	-10618	-3100	-93,93	-0,06508	1,002115	-0,96195	-0,28087
570	0,569	1652,1	-32745,5	9006	10658	-1017	10706	-9738	-4448	-193,66	-0,09529	1,00453	-0,91367	-0,41748
580	0,537	1541,9	-31132,7	8562	10104	-1243	10180	-8539	-5542	-283,95	-0,12274	1,007504	-0,84494	-0,54876
590	0,506	1431,8	-28700,5	7893	9325	-1372	9425	-7045	-6262	-316,70	-0,14659	1,010686	-0,75508	-0,67182
600	0,475	1321,6	-25269,7	6950	8271	-1380	8386	-5331	-6473	-288,80	-0,16605	1,013692	-0,6438	-0,783
610	0,444	1211,5	-20707,1	5695	6906	-1253	7019	-3540	-6061	-207,35	-0,18046	1,016153	-0,5116	-0,87797
620	0,412	1101,4	-14957,5	4114	5215	-993	5309	-1884	-4963	-86,39	-0,18933	1,017765	-0,3601	-0,95193
630	0,381	991,23	-8069,31	2219	3210	-621	3270	-621	-3210	56,72	-0,19232	1,018326	-0,19232	-1
640	0,35	881,09	-207,824	57	938	-179	955	-13	-955	203,14	-0,18933	1,017765	-0,0128	-1,01768
650	0,319	770,96	8344,167	-2295	-1524	277	-1549	-261	1527	334,06	-0,18046	1,016153	0,17244	-1,00141
660	0,287	660,82	17200,38	-4730	-4070	679	-4126	-1447	3864	431,88	-0,16605	1,013692	0,3562	-0,94905
670	0,256	550,68	25898,01	-7123	-6572	967	-6643	-3484	5656	481,73	-0,14659	1,010686	0,530497	-0,86027
680	0,225	440,55	33935,18	-9333	-8892	1094	-8959	-6109	6554	473,74	-0,12274	1,007504	0,687148	-0,73681
690	0,194	330,41	40814,82	-11225	-10895	1040	-10944	-8915	6348	406,01	-0,09529	1,00453	0,818382	-0,58252
700	0,162	220,27	46090,26	-12676	-12456	811	-12482	-11427	5022	288,34	-0,06508	1,002115	0,917436	-0,40317

710	0,131	110,14	49407,53	-13588	-13478	445	-13485	-13196	2779	139,08	-0,03301	1,000545	0,979076	-0,20615
720	0,1	0	50539,38	-13899	-13899	0	-13899	-13899	0	0,00	-9,3E-17	1	1	-4,9E-16

Таблица В2 – Суммирование значений крутящих моментов всех четырех цилиндров.

φ°	Цилиндры								M _{кр.} , Нм
	1-й		2-й		3-й		4-й		
	φ° кривошипа	M _{кр.ц.} , Нм	φ° кривошипа	M _{кр.ц.} , Нм	φ° кривошипа	M _{кр.ц.} , Нм	φ° кривошипа	M _{кр.ц.} , Нм	
0	0	0	180	0	360	0	540	0	0
10	10	-58,0882	190	-27,3816	370	27,55823	550	-31,0486	-88,96017
20	20	-106,165	200	-53,7017	380	51,774	560	-60,1841	-168,2768
30	30	-135,972	210	-77,5847	390	27,66846	570	-86,5438	-272,432
40	40	-143,109	220	-97,1362	400	-1,77322	580	-107,958	-349,9764
50	50	-127,698	230	-109,95	410	-9,99856	590	-121,929	-369,5756
60	60	-93,8507	240	-113,395	420	2,498712	600	-125,72	-330,467
70	70	-48,504	250	-105,183	430	29,92358	610	-116,932	-240,6954
80	80	0,290137	260	-84,1542	440	64,01064	620	-94,2853	-114,1387
90	90	45,07191	270	-51,0756	450	96,76846	630	-58,4209	32,34387
100	100	80,2611	280	-9,20763	460	122,0839	640	-12,4673	180,6701
110	110	102,7832	290	35,6362	470	136,4274	650	37,90674	312,7535
120	120	112,0181	300	75,71989	480	138,8087	660	85,12043	411,6671
130	130	109,2431	310	102,7341	490	130,2067	670	120,9742	463,1581
140	140	96,83689	320	109,7789	500	112,7581	680	138,3696	457,7435
150	150	77,50579	330	94,01576	510	88,969	690	133,0312	393,5218
160	160	53,71497	340	59,95513	520	61,13536	700	104,7475	279,553
170	170	27,40721	350	20,7739	530	31,05159	710	57,74123	136,9739
180	180	0	360	0	540	0	720	0	0

Таблица В3 – Силы, действующих на шатунную шейку коленчатого вала.

φ, град	K, Н	T, Н	P _к , Н	R _{ш.ш.} , Н	K _{рк} , Н	R _к , Н
0	-13899	0	-24689	24689	-41139	47979
10	-13307	-2802	-24097	24260	-40547	47251
20	-11642	-5117	-22432	23008	-38882	45180
30	-9209	-6557	-19999	21046	-36449	42088
40	-6438	-6907	-17228	18561	-33678	38454
50	-3798	-6166	-14588	15838	-31038	34845
60	-1698	-4535	-12488	13286	-28938	31842
70	-402	-2348	-11192	11436	-27642	29914
80	0	4	-10790	10790	-27240	29299
90	-419	2166	-11209	11417	-27659	29923
100	-1467	3865	-12257	12852	-28707	31452

110	-2892	4952	-13682	14550	-30132	33461
120	-4445	5398	-15235	16163	-31685	35569
130	-5923	5265	-16713	17523	-33163	37508
140	-7192	4668	-17982	18577	-34432	39124
150	-8181	3737	-18971	19335	-35421	40354
160	-8872	2590	-19662	19832	-36112	41199
170	-9276	1322	-20066	20109	-36516	41687
180	-9408	0	-20198	20198	-36648	41845
190	-9289	-1324	-20079	20122	-36529	41704
200	-8892	-2596	-19682	19852	-36132	41226
210	-8211	-3750	-19001	19368	-35451	40397
220	-7236	-4697	-18026	18628	-34476	39187
230	-5984	-5319	-16774	17597	-33224	37597
240	-4522	-5491	-15312	16266	-31762	35685
250	-2980	-5103	-13770	14685	-30220	33599
260	-1556	-4098	-12346	13008	-28796	31597
270	-487	-2515	-11277	11554	-27727	30038
280	-7	-509	-10797	10809	-27247	29313
290	-280	1637	-11070	11191	-27520	29709
300	-1330	3551	-12120	12629	-28570	31236
310	-2975	4830	-13765	14588	-30215	33553
320	-4798	5148	-15588	16417	-32038	36000
330	-6154	4382	-16944	17502	-33394	37703
340	-6329	2782	-17119	17343	-33569	37784
350	-3970	836	-14760	14784	-31210	34534
360	4386	0	-6404	6404	-22854	23735
370	14579	3070	3789	4877	-12661	13568
380	14543	6392	3753	7413	-12697	14702
390	7924	5642	-2866	6328	-19316	20327
400	3527	3784	-7263	8190	-23713	25088
410	1751	2843	-9039	9475	-25489	27193
420	1089	2908	-9701	10128	-26151	28044
430	643	3755	-10147	10820	-26597	28714
440	-68	4992	-10858	11951	-27308	29809
450	-1205	6228	-11995	13516	-28445	31493
460	-2717	7159	-13507	15287	-29957	33632
470	-4441	7605	-15231	17024	-31681	35966
480	-6186	7512	-16976	18563	-33426	38235
490	-7784	6919	-18574	19821	-35024	40244

500	-9127	5924	-19917	20779	-36367	41884
510	-10160	4640	-20950	21457	-37400	43118
520	-10876	3175	-21666	21897	-38116	43958
530	-11292	1609	-22082	22141	-38532	44440
540	-11428	0	-22218	22218	-38668	44596
550	-11292	-1609	-22082	22141	-38532	44440
560	-10618	-3100	-21408	21631	-37858	43602
570	-9738	-4448	-20528	21005	-36978	42528
580	-8539	-5542	-19329	20108	-35779	41043
590	-7045	-6262	-17835	18902	-34285	39150
600	-5331	-6473	-16121	17372	-32571	36914
610	-3540	-6061	-14330	15559	-30780	34489
620	-1884	-4963	-12674	13611	-29124	32147
630	-621	-3210	-11411	11854	-27861	30278
640	-13	-955	-10803	10845	-27253	29332
650	-261	1527	-11051	11156	-27501	29678
660	-1447	3864	-12237	12832	-28687	31426
670	-3484	5656	-14274	15353	-30724	34346
680	-6109	6554	-16899	18125	-33349	37956
690	-8915	6348	-19705	20702	-36155	41663
700	-11427	5022	-22217	22778	-38667	44877
710	-13196	2779	-23986	24146	-40436	47097
720	-13899	0	-24689	24689	-41139	47979

Таблица В4 – Определение суммарных сил, действующих по каждому лучу диаграммы износа шатунной шейки

$R_{ш.ш.i}$	Значения $R_{шш}$ в Н, для лучей												
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
24689	24689	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24689	24689
24260	24260	24260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24260	24260
23008	23008	23008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23008	23008
21046	21046	21046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21046	21046
18561	18561	18561	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18561	18561
15838	15838	15838	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15838	15838
13286	13286	13286	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13286	13286
11436	11436	11436	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11436	11436
10790	10790	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10790	10790	10790
11417	11417	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11417	11417	11417

12852	12852	0	0	0	0	0	0	0	0	12852	12852	12852
14550	14550	0	0	0	0	0	0	0	0	14550	14550	14550
16163	16163	0	0	0	0	0	0	0	0	16163	16163	16163
17523	17523	0	0	0	0	0	0	0	0	17523	17523	17523
18577	18577	0	0	0	0	0	0	0	0	18577	18577	18577
19335	19335	0	0	0	0	0	0	0	0	19335	19335	19335
19832	19832	0	0	0	0	0	0	0	0	19832	19832	19832
20109	20109	0	0	0	0	0	0	0	0	20109	20109	20109
20198	20198	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20198	20198
20122	20122	20122	0	0	0	0	0	0	0	0	20122	20122
19852	19852	19852	0	0	0	0	0	0	0	0	19852	19852
19368	19368	19368	0	0	0	0	0	0	0	0	19368	19368
18628	18628	18628	0	0	0	0	0	0	0	0	18628	18628
17597	17597	17597	0	0	0	0	0	0	0	0	17597	17597
16266	16266	16266	0	0	0	0	0	0	0	0	16266	16266
14685	14685	14685	0	0	0	0	0	0	0	0	14685	14685
13008	13008	13008	0	0	0	0	0	0	0	0	13008	13008
11554	11554	11554	0	0	0	0	0	0	0	0	11554	11554
10809	10809	10809	0	0	0	0	0	0	0	0	10809	10809
11191	11191	0	0	0	0	0	0	0	0	11191	11191	11191
12629	12629	0	0	0	0	0	0	0	0	12629	12629	12629
14588	14588	0	0	0	0	0	0	0	0	14588	14588	14588
16417	16417	0	0	0	0	0	0	0	0	16417	16417	16417
17502	17502	0	0	0	0	0	0	0	0	17502	17502	17502
17343	17343	0	0	0	0	0	0	0	0	17343	17343	17343
14784	14784	0	0	0	0	0	0	0	0	14784	14784	14784
6404	6404	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6404	6404
4877	4877	4877	4877	0	0	0	0	0	0	0	0	4877
7413	7413	7413	7413	0	0	0	0	0	0	0	0	7413
0	0	0	0	0	0	0	0	6328	6328	6328	6328	0
8190	8190	0	0	0	0	0	0	0	0	8190	8190	8190
9475	9475	0	0	0	0	0	0	0	0	9475	9475	9475
10128	10128	0	0	0	0	0	0	0	0	10128	10128	10128
10820	10820	0	0	0	0	0	0	0	0	10820	10820	10820
11951	11951	0	0	0	0	0	0	0	0	11951	11951	11951
13516	13516	0	0	0	0	0	0	0	0	13516	13516	13516
17024	17024	0	0	0	0	0	0	0	0	17024	17024	17024
18563	18563	0	0	0	0	0	0	0	0	18563	18563	18563
19821	19821	0	0	0	0	0	0	0	0	19821	19821	19821

20779	20779	0	0	0	0	0	0	0	0	20779	20779	20779	
21457	21457	0	0	0	0	0	0	0	0	21457	21457	21457	
21897	21897	0	0	0	0	0	0	0	0	21897	21897	21897	
22141	22141	0	0	0	0	0	0	0	0	22141	22141	22141	
22218	22218	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22218	22218	
22141	22141	22141	0	0	0	0	0	0	0	0	22141	22141	
21631	21631	21631	0	0	0	0	0	0	0	0	21631	21631	
21005	21005	21005	0	0	0	0	0	0	0	0	21005	21005	
20108	20108	20108	0	0	0	0	0	0	0	0	20108	20108	
18902	18902	18902	0	0	0	0	0	0	0	0	18902	18902	
17372	17372	17372	0	0	0	0	0	0	0	0	17372	17372	
15559	15559	15559	0	0	0	0	0	0	0	0	15559	15559	
13611	13611	13611	0	0	0	0	0	0	0	0	13611	13611	
11854	11854	11854	0	0	0	0	0	0	0	0	11854	11854	
10845	10845	10845	0	0	0	0	0	0	0	0	10845	10845	
11156	11156	0	0	0	0	0	0	0	0	11156	11156	11156	
12832	12832	0	0	0	0	0	0	0	0	12832	12832	12832	
15353	15353	0	0	0	0	0	0	0	0	15353	15353	15353	
18125	18125	0	0	0	0	0	0	0	0	18125	18125	18125	
20702	20702	0	0	0	0	0	0	0	0	20702	20702	20702	
22778	22778	0	0	0	0	0	0	0	0	22778	22778	22778	
24146	24146	0	0	0	0	0	0	0	0	24146	24146	24146	
24689	24689	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24689	24689	
$\Sigma R_{u.u.i}$	1184584	1184584	474641	12289	0	0	0	0	6328	6328	618072	1178623	1184584

Таблица В5 – Силы действующие на колено вала.

Крк, Н	Рк, Н	Тк1, Н	Тк3, Н	Тк4, Н	Тк2, Н	Крк1, Н	Крк3, Н	Крк4, Н	Крк2, Н	Тк2=Тк4, Н	Тк3, Н	Кк2,4, Н	Кк3, Н	Ф _{кв} , град
-35392	35392	0	4,195E-12	-1,076E-12	1,15045E-12	-35391,982	-32889,5948	-17084,428	-30867,288	1,15E-12	2,6726E-12	-4524,6937	-31878,442	0
-34797,9	34911,1	-2808,3985	-1604,134	3077,7596	-1318,83076	-34797,942	-32755,3417	-6878,3429	-30749,427	1489,5677	-1461,4823	-4048,5154	-31752,384	10
-33127,6	33522,1	-5127,4297	-3091,355	6408,8446	-2587,55474	-33127,604	-32085,8443	-6914,6782	-30356,907	2539,875	-2839,4551	-2770,6968	-31221,376	20
-30687,5	31382,5	-6568,077	-4438,324	5658,5597	-3740,87131	-30687,519	-31212,7395	-13541,852	-29682,829	2827,2057	-4089,5975	-1004,69	-30447,784	30
-27910,6	28754,6	-6915,7853	-5534,034	3799,2099	-4688,35795	-27910,597	-30020,9834	-17942,632	-28715,342	2227,4273	-5111,1957	804,74425	-29368,162	40
-25266,9	26008,9	-6168,3346	-6257,409	2859,4837	-5314,55709	-25266,858	-28533,0369	-19720,071	-27469,845	853,77747	-5785,9831	2202,9865	-28001,441	50
-23166,6	23605,3	-4529,5558	-6475,283	2927,8226	-5492,43335	-23166,598	-26823,0058	-20384,822	-26011,558	-962,87757	-5983,8582	2844,9607	-26417,282	60
-21873,7	21998,1	-2336,3692	-6070,081	3777,1169	-5110,80245	-21873,658	-25033,0969	-20835,655	-24471,108	-2774,4333	-5590,4417	2597,4505	-24752,102	70
-21477,3	21477,3	20,383741	-4977,928	5015,2805	-4112,07214	-21477,276	-23374,5877	-21552,881	-23044,518	-4132,4559	-4545,0001	1567,2412	-23209,553	80
-21902,7	22011,3	2182,9219	-3228,325	6249,4685	-2531,58299	-21902,745	-22106,6497	-22695,921	-21970,751	-4714,5048	-2879,9542	68,006029	-22038,7	90
-22955,4	23280,7	3878,335	-972,4817	7175,3865	-525,782877	-22955,415	-21491,6877	-24212,274	-21484,926	-4404,1178	-749,1323	-1470,4891	-21488,307	100
-24382,6	24881,9	4959,6614	1513,2001	7614,891	1624,266178	-24382,563	-21733,8925	-25938,117	-21752,75	-3335,3952	1568,73315	-2629,8124	-21743,321	110
-25934,5	26490,6	5399,1254	3857,346	7514,0495	3543,532244	-25934,523	-22915,8478	-27680,619	-22798,788	-1855,5931	3700,4391	-3135,7348	-22857,318	120
-27408,7	27908,9	5260,3468	5656,9363	6914,8223	4829,780893	-27408,715	-24952,6497	-29274,359	-24444,437	-430,56586	5243,35861	-2964,2786	-24698,543	130
-28670,5	29046,7	4659,3261	6561,7114	5915,1485	5152,855338	-28670,519	-27581,2089	-30609,388	-26270,576	493,52928	5857,28338	-2399,9435	-26925,892	140
-29652,3	29885,6	3726,9645	6358,6461	4630,6189	4388,259822	-29652,324	-30393,8299	-31634,552	-27630,716	661,29529	5373,45296	-2021,6076	-29012,273	150
-30337,3	30447	2581,8543	5032,7	3166,5517	2786,68125	-30337,345	-32912,3574	-32343,902	-27808,914	204,82697	3909,6906	-2528,4304	-30360,636	160
-30736,7	30764,9	1317,0169	2784,9091	1604,1339	837,5018779	-30736,674	-34686,526	-32755,342	-25449,46	-479,51497	1811,20549	-5287,2136	-30067,993	170
-30867,3	30867,3	1,15E-12	6,819E-12	4,195E-12	-1,0763E-12	-30867,288	-35391,9821	-32889,595	-17084,428	-2,227E-12	2,8714E-12	-13782,86	-26238,205	180
-30749,4	30777,7	-1318,8308	0	-1604,1339	3077,759558	-30749,427	-35391,9821	-32755,342	-6878,3429	4396,5903	1538,87978	-23871,084	-21135,163	190
-30356,9	30467	-2587,5547	-2808,399	-3091,3554	6408,844637	-30356,907	-34797,9424	-32085,844	-6914,6782	8996,3994	1800,22307	-23442,229	-20856,31	200
-29682,8	29917,6	-3740,8713	-5127,43	-4438,3237	5658,559742	-29682,829	-33127,6041	-31212,74	-13541,852	9399,4311	265,564998	-16140,978	-23334,728	210
-28715,3	29095,6	-4688,358	-6568,077	-5534,0335	3799,209928	-28715,342	-30687,5192	-30020,983	-17942,632	8487,5679	-1384,4335	-10772,71	-24315,076	220
-27469,8	27979,2	-5314,5571	-6915,785	-6257,4091	2859,483713	-27469,845	-27910,5974	-28533,037	-19720,071	8174,0408	-2028,1508	-7749,7739	-23815,334	230

-26011,6	26585,1	-5492,4333	-6168,335	-6475,283	2927,822613	-26011,558	-25266,8582	-26823,006	-20384,822	8420,256	-1620,256	-5626,7365	-22825,84	240
-24471,1	24999,1	-5110,8025	-4529,556	-6070,0809	3777,116923	-24471,108	-23166,5977	-25033,097	-20835,655	8887,9194	-376,21943	-3635,4528	-22001,126	250
-23044,5	23408,5	-4112,0721	-2336,369	-4977,928	5015,280489	-23044,518	-21873,6575	-23374,588	-21552,881	9127,3526	1339,45565	-1491,6365	-21713,269	260
-21970,8	22116,1	-2531,583	20,383741	-3228,3255	6249,46851	-21970,751	-21477,2764	-22106,65	-22695,921	8781,0515	3134,92613	725,17008	-22086,599	270
-21484,9	21491,4	-525,78288	2182,9219	-972,48173	7175,386526	-21484,926	-21902,7447	-21491,688	-24212,274	7701,1694	4679,15419	2727,3474	-23057,509	280
-21752,8	21813,3	1624,2662	3878,335	1513,2001	7614,890989	-21752,75	-22955,4154	-21733,893	-25938,117	5990,6248	5746,61298	4185,3664	-24446,766	290
-22798,8	23072,5	3543,5322	4959,6614	3857,346	7514,049519	-22798,788	-24382,5627	-22915,848	-27680,619	3970,5173	6236,85545	4881,8306	-26031,591	300
-24444,4	24917	4829,7809	5399,1254	5656,9363	6914,822303	-24444,437	-25934,5227	-24952,65	-29274,359	2085,0414	6156,97383	4829,922	-27604,441	310
-26270,6	26771,2	5152,8553	5260,3468	6561,7114	5915,148517	-26270,576	-27408,7152	-27581,209	-30609,388	762,29318	5587,74764	4338,8126	-29009,052	320
-27630,7	27977	4388,2598	4659,3261	6358,6461	4630,61887	-27630,716	-28670,5192	-30393,83	-31634,552	242,35905	4644,97247	4003,8362	-30152,536	330
-27808,9	27948,2	2786,6813	3726,9645	5032,7	3166,551697	-27808,914	-29652,3237	-32912,357	-32343,902	379,87045	3446,75811	4534,988	-30998,113	340
-25449,5	25463,2	837,50188	2581,8543	2784,9091	1604,133932	-25449,46	-30337,3445	-34686,526	-32755,342	766,63205	2092,99411	7305,8816	-31546,343	350
-17084,4	17084,4	-1,076E-12	1317,0169	6,819E-12	4,19465E-12	-17084,428	-30736,6737	-35391,982	-32889,595	5,271E-12	658,508426	15805,167	-31813,134	360
-6878,34	7535,53	3077,7596	1,15E-12	-2808,3985	-1604,13393	-6878,3429	-30867,2884	-34797,942	-32755,342	-4681,8935	-802,06697	25876,999	-31811,315	370
-6914,68	9427,94	6408,8446	-1318,831	-5127,4297	-3091,35537	-6914,6782	-30749,427	-33127,604	-32085,844	-9500,2	-2205,0931	25171,166	-31417,636	380
-13541,9	14676,5	5658,5597	-2587,555	-6568,077	-4438,32371	-13541,852	-30356,9073	-30687,519	-31212,74	-10096,883	-3512,9392	17670,888	-30784,823	390
-17942,6	18340,4	3799,2099	-3740,871	-6915,7853	-5534,03353	-17942,632	-29682,8292	-27910,597	-30020,983	-9333,2435	-4637,4524	12078,351	-29851,906	400
-19720,1	19926,3	2859,4837	-4688,358	-6168,3346	-6257,40909	-19720,071	-28715,3416	-25266,858	-28533,037	-9116,8928	-5472,8835	8812,9662	-28624,189	410
-20384,8	20594	2927,8226	-5314,557	-4529,5558	-6475,28304	-20384,822	-27469,8446	-23166,598	-26823,006	-9403,1057	-5894,9201	6438,184	-27146,425	420
-20835,7	21175,2	3777,1169	-5492,433	-2336,3692	-6070,08093	-20835,655	-26011,5584	-21873,658	-25033,097	-9847,1979	-5781,2571	4197,4417	-25522,328	430
-21552,9	22128,7	5015,2805	-5110,802	20,383741	-4977,92798	-21552,881	-24471,108	-21477,276	-23374,588	-9993,2085	-5044,3652	1821,7066	-23922,848	440
-22695,9	23540,6	6249,4685	-4112,072	2182,9219	-3228,32545	-22695,921	-23044,5176	-21902,745	-22106,65	-9477,794	-3670,1988	-589,27112	-22575,584	450
-24212,3	25253,1	7175,3865	-2531,583	3878,335	-972,48173	-24212,274	-21970,7508	-22955,415	-21491,688	-8147,8683	-1752,0324	-2720,586	-21731,219	460
-25938,1	27032,8	7614,891	-525,7829	4959,6614	1513,200116	-25938,117	-21484,9263	-24382,563	-21733,893	-6101,6909	493,70862	-4204,2242	-21609,409	470
-27680,6	28682,4	7514,0495	1624,2662	5399,1254	3857,34596	-27680,619	-21752,7503	-25934,523	-22915,848	-3656,7036	2740,80607	-4764,7708	-22334,299	480
-29274,4	30079,9	6914,8223	3543,5322	5260,3468	5656,936331	-29274,359	-22798,7879	-27408,715	-24952,65	-1257,886	4600,23429	-4321,7089	-23875,719	490
-30609,4	31175,7	5915,1485	4829,7809	4659,3261	6561,711423	-30609,388	-24444,4366	-28670,519	-27581,209	646,56291	5695,74616	-3028,1794	-26012,823	500

-31634,6	31971,7	4630,6189	5152,8553	3726,9645	6358,646092	-31634,552	-26270,5757	-29652,324	-30393,83	1728,0272	5755,75072	-1240,7224	-28332,203	510
-32343,9	32498,5	3166,5517	4388,2598	2581,8543	5032,699951	-32343,902	-27630,7161	-30337,345	-32912,357	1866,1483	4710,47989	568,45526	-30271,537	520
-32755,3	32794,6	1604,1339	2786,6813	1317,0169	2784,909108	-32755,342	-27808,9141	-30736,674	-34686,526	1180,7752	2785,79518	1931,1843	-31247,72	530
-32889,6	32889,6	4,195E-12	837,50188	1,15E-12	6,81918E-12	-32889,595	-25449,4601	-30867,288	-35391,982	2,625E-12	418,750939	2502,3873	-30420,721	540
-32755,3	32794,6	-1604,1339	-1,08E-12	-1318,8308	0	-32755,342	-17084,4283	-30749,427	-35391,982	1604,1339	-5,382E-13	2636,6404	-26238,205	550
-32085,8	32234,4	-3091,3554	3077,7596	-2587,5547	-2808,3985	-32085,844	-6878,3429	-30356,907	-34797,942	282,95687	134,680527	2712,0981	-20838,143	560
-31212,7	31526,7	-4438,3237	6408,8446	-3740,8713	-5127,42975	-31212,74	-6914,67821	-29682,829	-33127,604	-689,10603	640,707445	1914,8646	-20021,141	570
-30021	30526,8	-5534,0335	5658,5597	-4688,358	-6568,077	-30020,983	-13541,8516	-28715,342	-30687,519	-1034,0435	-454,75863	666,53584	-22114,685	580
-28533	29211,1	-6257,4091	3799,2099	-5314,5571	-6915,78527	-28533,037	-17942,6319	-27469,845	-27910,597	-658,37618	-1558,2877	-622,43952	-22926,615	590
-26823	27593,5	-6475,283	2859,4837	-5492,4333	-6168,33457	-26823,006	-19720,0707	-26011,558	-25266,858	306,94848	-1654,4254	-1556,1477	-22493,464	600
-25033,1	25758,5	-6070,0809	2927,8226	-5110,8025	-4529,55578	-25033,097	-20384,8219	-24471,108	-23166,598	1540,5252	-800,86658	-1866,4992	-21775,71	610
-23374,6	23898,8	-4977,928	3777,1169	-4112,0721	-2336,3692	-23374,588	-20835,6552	-23044,518	-21873,658	2641,5588	720,373862	-1500,9302	-21354,656	620
-22106,6	22341,1	-3228,3255	5015,2805	-2531,583	20,38374094	-22106,65	-21552,8811	-21970,751	-21477,276	3248,7092	2517,83212	-629,37331	-21515,079	630
-21491,7	21513,7	-972,48173	6249,4685	-525,78288	2182,921851	-21491,688	-22695,9209	-21484,926	-21902,745	3155,4036	4216,19518	411,057	-22299,333	640
-21733,9	21786,5	1513,2001	7175,3865	1624,2662	3878,334973	-21733,893	-24212,2738	-21752,75	-22955,415	2365,1349	5526,86075	1221,5229	-23583,845	650
-22915,8	23238,2	3857,346	7614,891	3543,5322	4959,661384	-22915,848	-25938,1167	-22798,788	-24382,563	1102,3154	6287,27619	1466,7149	-25160,34	660
-24952,6	25585,8	5656,9363	7514,0495	4829,7809	5399,125352	-24952,65	-27680,6185	-24444,437	-25934,523	-257,81098	6456,58744	981,87302	-26807,571	670
-27581,2	28351	6561,7114	6914,8223	5152,8553	5260,346754	-27581,209	-29274,3586	-26270,576	-27408,715	-1301,3647	6087,58453	-172,49368	-28341,537	680
-30393,8	31051,8	6358,6461	5915,1485	4388,2598	4659,326062	-30393,83	-30609,3882	-27630,716	-28670,519	-1699,32	5287,23729	-1723,3107	-29639,954	690
-32912,4	33294,9	5032,7	4630,6189	2786,6813	3726,964529	-32912,357	-31634,5523	-27808,914	-29652,324	-1305,7354	4178,7917	-3260,0337	-30643,438	700
-34686,5	34798,1	2784,9091	3166,5517	837,50188	2581,854279	-34686,526	-32343,9021	-25449,46	-30337,345	-203,05483	2874,20299	-4349,1815	-31340,623	710
-35392	35392	6,819E-12	1604,1339	-1,076E-12	1317,016851	-35391,982	-32755,3417	-17084,428	-30736,674	1317,0169	1460,57539	-4655,3084	-31746,008	720

Таблица В6 – Расчет сил, действующих на коренные шейки коленчатого вала

1-ая кор. шейка	1-ый кривошип			2-ой кривошип			2-ая кор. шейка			3-ий кривошип			3-ая кор. шейка		
	$R_{к.ш1}$	φ_1	T_1, H K'_{pk1}	φ_2	T_2, H	K'_{pk2} H	T_{k2}, H	K_{k2}, H	$R_{к.ш2}$	φ_3	T_3, H	K'_{pk3}, H	T_{k3}	K_{k3}	$R_{к.ш3}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
10889	0	0	10889	180	0	9653	0	1236	1236	540	0	8643	0	18296	18296
10685	10	1535	10593	190	597	9585	-804	1008	1171	550	-1466	8583	-662	18169	18228
10090	20	3196	9760	200	1009	9248	-1550	512	1131	560	-2848	8385	-1298	17633	17862
9151	30	2821	8543	210	1054	8808	-2224	-265	1087	570	-4099	8045	-1875	16853	17344
7948	40	1892	7158	220	683	8209	-2771	-1051	1253	580	-5119	7557	-2348	15766	16576
6602	50	1421	5838	230	-48	7462	-3131	-1623	1624	590	-5790	6931	-2659	14393	15514
5298	60	1454	4788	240	-969	6604	-3237	-1816	2059	600	-5982	6200	-2745	12804	14133
4303	70	1877	4140	250	-1856	5709	-3031	-1569	2431	610	-5582	5429	-2551	11138	12459
3939	80	2496	3939	260	-2484	4881	-2482	-942	2656	620	-4531	4717	-2049	9598	10614
4288	90	3114	4149	270	-2688	4250	-1605	-101	2690	630	-2863	4182	-1257	8432	8905
5056	100	3579	4673	280	-2410	3946	-478	727	2517	640	-732	3943	-254	7888	7922
5927	по	3803	5385	290	-1713	4070	763	1315	2159	650	1582	4079	819	8149	8301
6727	120	3756	6162	300	-767	4663	1932	1499	1684	660	3707	4604	1775	9267	9981
7386	130	3459	6901	310	196	5681	2828	1220	1235	670	5243	5427	2415	11108	12283
7888	140	2962	7535	320	943	6993	3277	541	1088	680	5851	6338	2574	13332	14559
8244	150	2320	8029	330	1306	8397	3174	-367	1356	690	5365	7016	2191	15413	16320
8475	160	1587	8375	340	1216	9653	2511	-1277	1764	700	3902	7104	1391	16756	17205
8603	170	804	8577	350	728	10537	1389	-1960	2091	710	1807	5924	418	16461	16560
8643	180	0	8643	360	0	10889	0	-2246	2246	720	0	1746	0	12635	12635
8609	190	-804	8583	370	-739	10593	-1401	-2009	2141	10	134	-3350	1535	7242	7244
8485	200	-1550	8385	380	-1261	9760	-2558	-1375	1865	20	638	-3333	3196	6428	6459
8260	210	-2224	8045	390	-1403	8543	-3278	-499	1489	30	-457	-23	2821	8521	8533
7914	220	-2771	7557	400	-1105	7158	-3454	399	1175	40	-1562	2176	1892	9334	9464
7424	230	-3131	6931	410	-424	5838	-3083	1093	1172	50	-1662	3064	1421	8902	9056
6781	240	-3237	6200	420	478	4788	-2267	1412	1490	60	-813	3395	1454	8183	8223
5999	250	-3031	5429	430	1377	4140	-1174	1289	1886	70	703	3618	1877	7758	7790
5143	260	-2482	4717	440	2051	3939	2	778	2194	80	2498	3973	2496	7912	8297

4367	270	-1605	4182	450	2340	4149	1083	34	2341	90	4197	4542	3114	8691	9651
3951	280	-478	3943	460	2187	4673	1932	-730	2305	100	5512	5298	3579	9970	11392
4161	290	763	4079	470	1657	5385	2476	-1306	2110	110	6278	6160	3803	11545	13142
4934	300	1932	4604	480	923	6162	2699	-1558	1811	120	6455	7032	3756	13194	14688
5940	310	2828	5427	490	217	6901	2632	-1474	1490	130	6092	7831	3459	14732	15942
6841	320	3277	6338	500	-240	7535	2334	-1197	1220	140	5296	8502	2962	16037	16889
7350	330	3174	7016	510	-323	8029	1868	-1013	1063	150	4188	9019	2320	17048	17555
7238	340	2511	7104	520	-96	8375	1295	-1272	1275	160	2883	9377	1587	17752	17985
5939	350	1389	5924	530	243	8577	661	-2653	2664	170	1465	9585	804	18162	18221
1746	360	0	1746	540	0	8643	0	-6897	6897	180	0	9653	0	18296	18296
3685	370	-1401	-3350	550	-2197	8583	-662	-11934	1213	190	-1466	9585	-804	18169	18228
4617	380	-2558	-3333	560	-4494	8385	-1298	-11718	1255	200	-2848	9248	-1550	17633	17862
2821	390	-3278	-23	570	-4696	8045	-1875	-8067	9335	210	-4099	8808	-2224	16853	17344
2883	400	-3454	2176	580	-4240	7557	-2348	-5381	6851	220	-5119	8209	-2771	15766	16576
3377	410	-3083	3064	590	-4081	6931	-2659	-3868	5623	230	-5790	7462	-3131	14393	15514
3693	420	-2267	3395	600	-4200	6200	-2745	-2805	5050	240	-5982	6604	-3237	12804	14133
4076	430	-1174	3618	610	-4429	5429	-2551	-1811	4785	250	-5582	5709	-3031	11138	12459
4692	440	2	3973	620	-4545	4717	-2049	-744	4605	260	-4531	4881	-2482	9598	10614
5507	450	1083	4542	630	-4371	4182	-1257	359	4386	270	-2863	4250	-1605	8432	8905
6394	460	1932	5298	640	-3834	3943	-254	1355	4066	280	-732	3946	-478	7888	7922
7239	470	2476	6160	650	-2984	4079	819	2080	3638	290	1582	4070	763	8149	8301
7972	480	2699	7032	660	-1980	4604	1775	2428	3133	300	3707	4663	1932	9267	9981
8561	490	2632	7831	670	-1044	5427	2415	2405	2622	310	5243	5681	2828	11108	12283
9004	500	2334	8502	680	-388	6338	2574	2164	2199	320	5851	6993	3277	13332	14559
9313	510	1868	9019	690	-129	7016	2191	2003	2007	330	5365	8397	3174	15413	16320
9510	520	1295	9377	700	-197	7104	1391	2273	2282	340	3902	9653	2511	16756	17205
9619	530	661	9585	710	-387	5924	418	3661	3681	350	1807	10537	1389	16461	16560
9653	540	0	9653	720	0	1746	0	7907	7907	360	0	10889	0	12635	12635
9619	550	-662	9585	10	2339	-3350	1535	12936	1314	370	134	10593	-1401	7242	7244
9377	560	-1298	9248	20	4746	-3333	3196	12581	1344	380	638	9760	-2558	6428	6459
9085	570	-1875	8808	30	5045	-23	2821	8831	1017	390	-457	8543	-3278	8521	8533
8664	580	-2348	8209	40	4663	2176	1892	6033	7625	400	-1562	7158	-3454	9334	9464
8092	590	-2659	7462	50	4552	3064	1421	4398	6330	410	-1662	5838	-3083	8902	9056
7355	600	-2745	6604	60	4691	3395	1454	3210	5684	420	-813	4788	-2267	8183	8223
6464	610	-2551	5709	70	4908	3618	1877	2091	5335	430	703	4140	-1174	7758	7790

5476	620	-2049	4881	80	4978	3973	2496	908	5060	440	2498	3939	2	7912	8297
4543	630	-1257	4250	90	4719	4542	3114	-292	4728	450	4197	4149	1083	8691	9651
3974	640	-254	3946	100	4057	5298	3579	-1352	4276	460	5512	4673	1932	9970	11392
4141	650	819	4070	ПО	3039	6160	3803	-2090	3689	470	6278	5385	2476	11545	13142
5047	660	1775	4663	120	1824	7032	3756	-2369	2990	480	6455	6162	2699	13194	14688
6346	670	2415	5681	130	632	7831	3459	-2150	2241	490	6092	6901	2632	14732	15942
7723	680	2574	6993	140	-315	8502	2962	-1509	1542	500	5296	7535	2334	16037	16889
8977	690	2191	8397	150	-854	9019	2320	-622	1056	510	4188	8029	1868	17048	17555
9974	700	1391	9653	160	-924	9377	1587	276	964	520	2883	8375	1295	17752	17985
10628	710	418	10537	170	-585	9585	804	952	1117	530	1465	8577	661	18162	18221
10889	720	0	10889	180	0	9653	0	1236	1236	540	0	8643	0	18296	18296

Таблица В7 – Суммарные силы действующие на 3-ю коренную шейку.

$R_{k.mi}$	Значения $R_{k.mi}, H$, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
21208	21208	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21208
21131	21131	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21131	21131
20741	20741	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20741	20741
20185	20185	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20185	20185
19367	19367	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19367	19367
18248	18248	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18248	18248
16816	16816	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16816	16816
15118	15118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15118	15118
13305	13305	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13305	13305
11700	11700	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11700	11700
10825	10825	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10825	10825
11173	11173	11173	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11173
12730	12730	12730	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12730

14968	14968	14968	0	0	0	0	0	0	0	0	14968
17265	17265	17265	0	0	0	0	0	0	0	0	17265
19094	19094	19094	0	0	0	0	0	0	0	0	19094
20051	20051	20051	0	0	0	0	0	0	0	0	20051
15547	15547	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15547
10155	10155	10155	0	0	0	0	0	0	0	0	10155
9361	9361	9361	0	0	0	0	0	0	0	0	9361
11442	11442	0	0	0	0	0	0	0	0	11442	11442
12345	12345	0	0	0	0	0	0	0	0	12345	12345
11930	11930	0	0	0	0	0	0	0	0	11930	11930
11124	11124	0	0	0	0	0	0	0	0	11124	11124
10693	10693	10693	0	0	0	0	0	0	0	0	10693
11109	11109	11109	0	0	0	0	0	0	0	0	11109
12338	12338	12338	0	0	0	0	0	0	0	0	12338
14012	14012	14012	0	0	0	0	0	0	0	0	14012
15761	15761	15761	0	0	0	0	0	0	0	0	15761
17351	17351	17351	0	0	0	0	0	0	0	0	17351
18666	18666	18666	0	0	0	0	0	0	0	0	18666
19675	19675	19675	0	0	0	0	0	0	0	0	19675
20395	20395	20395	0	0	0	0	0	0	0	0	20395
20864	20864	20864	0	0	0	0	0	0	0	0	20864
21125	21125	21125	0	0	0	0	0	0	0	0	21125
21208	21208	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21208
21131	21131	0	0	0	0	0	0	0	0	21131	21131
20741	20741	0	0	0	0	0	0	0	0	20741	20741
20185	20185	0	0	0	0	0	0	0	0	20185	20185
19367	19367	0	0	0	0	0	0	0	0	19367	19367

16816	16816	0	0	0	0	0	0	0	0	16816	16816
15118	15118	0	0	0	0	0	0	0	0	15118	15118
11700	11700	0	0	0	0	0	0	0	0	11700	11700
10825	10825	0	0	0	0	0	0	0	0	10825	10825
11173	11173	11173	0	0	0	0	0	0	0	0	11173
12730	12730	12730	0	0	0	0	0	0	0	0	12730
14968	14968	14968	0	0	0	0	0	0	0	0	14968
17265	17265	17265	0	0	0	0	0	0	0	0	17265
19094	19094	19094	0	0	0	0	0	0	0	0	19094
20051	20051	20051	0	0	0	0	0	0	0	0	20051
19457	19457	19457	0	0	0	0	0	0	0	0	19457
15547	15547	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15547
10155	10155	10155	0	0	0	0	0	0	0	0	10155
9361	9361	9361	0	0	0	0	0	0	0	0	9361
11442	11442	0	0	0	0	0	0	0	0	11442	11442
12345	12345	0	0	0	0	0	0	0	0	12345	12345
11930	11930	0	0	0	0	0	0	0	0	11930	11930
11124	11124	0	0	0	0	0	0	0	0	11124	11124
10693	10693	10693	0	0	0	0	0	0	0	0	10693
11109	11109	11109	0	0	0	0	0	0	0	0	11109
12338	12338	12338	0	0	0	0	0	0	0	0	12338
14012	14012	14012	0	0	0	0	0	0	0	0	14012
15761	15761	15761	0	0	0	0	0	0	0	0	15761
17351	17351	17351	0	0	0	0	0	0	0	0	17351
18666	18666	18666	0	0	0	0	0	0	0	0	18666
19675	19675	19675	0	0	0	0	0	0	0	0	19675
20395	20395	20395	0	0	0	0	0	0	0	0	20395

	21125	21125	21125	0	0	0	0	0	0	0	0	21125
	21208	21208	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21208
$\sum R_{к.ш.i}$	1155755	1155755	632484	0	0	0	0	0	0	0	428553	1155755

Таблица В8 – Суммарные силы действующие на 1-ю коренную шейку

Rк.ш i	Значения Rк.ш i, Н, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rк.ш 0	17695,991	17695,991	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17695,991
Rк.ш 10	17455,543	17455,543	17455,543	0	0	0	0	0	0	0	0	17455,543
Rк.ш 20	16761,031	16761,031	16761,031	0	0	0	0	0	0	0	0	16761,031
Rк.ш 30	15691,267	15691,267	15691,267	0	0	0	0	0	0	0	0	15691,267
Rк.ш 40	14377,322	14377,322	14377,322	0	0	0	0	0	0	0	0	14377,322
Rк.ш 50	13004,446	13004,446	13004,446	0	0	0	0	0	0	0	0	13004,446
Rк.ш 60	11802,628	11802,628	11802,628	0	0	0	0	0	0	0	0	11802,628
Rк.ш 70	10999,04	10999,04	10999,04	0	0	0	0	0	0	0	0	10999,04
Rк.ш 80	10738,643	10738,643	0	0	0	0	0	0	0	0	10738,643	10738,643
Rк.ш 90	11005,628	11005,628	0	0	0	0	0	0	0	0	11005,628	11005,628
Rк.ш 100	11640,367	11640,367	0	0	0	0	0	0	0	0	11640,367	11640,367
Rк.ш 110	12440,937	12440,937	0	0	0	0	0	0	0	0	12440,937	12440,937
Rк.ш 120	13245,282	13245,282	0	0	0	0	0	0	0	0	13245,282	13245,282
Rк.ш 130	13954,47	13954,47	0	0	0	0	0	0	0	0	13954,47	13954,47
Rк.ш 140	14523,326	14523,326	0	0	0	0	0	0	0	0	14523,326	14523,326
Rк.ш 150	14942,812	14942,812	0	0	0	0	0	0	0	0	14942,812	14942,812
Rк.ш 160	15223,505	15223,505	0	0	0	0	0	0	0	0	15223,505	15223,505
Rк.ш 170	15382,438	15382,438	0	0	0	0	0	0	0	0	15382,438	15382,438
Rк.ш 180	15433,644	15433,644	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15433,644
Rк.ш 190	15388,848	15388,848	15388,848	0	0	0	0	0	0	0	0	15388,848
Rк.ш 200	15233,493	15233,493	15233,493	0	0	0	0	0	0	0	0	15233,493
Rк.ш 210	14958,814	14958,814	14958,814	0	0	0	0	0	0	0	0	14958,814
Rк.ш 220	14547,779	14547,779	14547,779	0	0	0	0	0	0	0	0	14547,779
Rк.ш 230	13989,611	13989,611	13989,611	0	0	0	0	0	0	0	0	13989,611
Rк.ш 240	13292,554	13292,554	13292,554	0	0	0	0	0	0	0	0	13292,554
Rк.ш 250	12499,554	12499,554	12499,554	0	0	0	0	0	0	0	0	12499,554
Rк.ш 260	11704,261	11704,261	11704,261	0	0	0	0	0	0	0	0	11704,261
Rк.ш 270	11058,06	11058,06	11058,06	0	0	0	0	0	0	0	0	11058,06
Rк.ш 280	10745,679	10745,679	10745,679	0	0	0	0	0	0	0	0	10745,679
Rк.ш 290	10906,654	10906,654	0	0	0	0	0	0	0	0	10906,654	10906,654

RK.ИИ 300	11536,262	11536,262	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11536,262	11536,262
RK.ИИ 310	12458,504	12458,504	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12458,504	12458,504
RK.ИИ 320	13385,581	13385,581	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13385,581	13385,581
RK.ИИ 330	13988,507	13988,507	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13988,507	13988,507
RK.ИИ 340	13974,095	13974,095	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13974,095	13974,095
RK.ИИ 350	12731,618	12731,618	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12731,618	12731,618
RK.ИИ 360	8542,2141	8542,2141	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8542,2141
RK.ИИ 370	3767,7648	3767,7648	3767,7648	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3767,7648
RK.ИИ 380	4713,9703	4713,9703	4713,9703	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RK.ИИ 390	0	7338,2737	7338,2737	0	7338,273	0	0	0	0	0	0	0	0
RK.ИИ 400	9170,224	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9170,224	9170,224
RK.ИИ 410	9963,1551	9963,1551	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9963,1551	9963,1551
RK.ИИ 420	10297,003	10297,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10297,003	10297,003
RK.ИИ 430	10587,624	10587,624	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10587,624	10587,624
RK.ИИ 440	11064,354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11064,354	11064,354
RK.ИИ 450	11770,309	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11770,309	11770,309
RK.ИИ 460	12626,563	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12626,563	12626,563
RK.ИИ 470	13516,402	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13516,402	13516,402
RK.ИИ 480	14341,178	14341,178	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14341,178	14341,178
RK.ИИ 490	15039,97	15039,97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15039,97	15039,97
RK.ИИ 500	15587,845	15587,845	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15587,845	15587,845
RK.ИИ 510	15985,834	15985,834	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15985,834	15985,834
RK.ИИ 520	16249,27	16249,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16249,27	16249,27
RK.ИИ 530	16397,299	16397,299	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16397,299	16397,299
RK.ИИ 540	16444,797	16444,797	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16444,797
RK.ИИ 550	16397,299	16397,299	16397,299	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16397,299
RK.ИИ 560	16117,21	16117,21	16117,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16117,21
RK.ИИ 570	15763,358	15763,358	15763,358	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15763,358
RK.ИИ 580	15263,396	15263,396	15263,396	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15263,396
RK.ИИ 590	14605,559	14605,559	14605,559	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14605,559
RK.ИИ 600	13796,765	13796,765	13796,765	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13796,765
RK.ИИ 610	12879,265	12879,265	12879,265	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12879,265
RK.ИИ 620	11949,384	11949,384	11949,384	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11949,384
RK.ИИ 630	11170,565	11170,565	11170,565	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11170,565
RK.ИИ 640	10756,839	10756,839	10756,839	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10756,839
RK.ИИ 650	10893,253	10893,253	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10893,253	10893,253
RK.ИИ 660	11619,114	11619,114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11619,114	11619,114
RK.ИИ 670	12792,924	12792,924	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12792,924	12792,924
RK.ИИ 680	14175,499	14175,499	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14175,499	14175,499

Рк.ш 690	15525,924	15525,924	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15525,924	15525,924
Рк.ш 700	16647,457	16647,457	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16647,457	16647,457
Рк.ш 710	17399,072	17399,072	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17399,072	17399,072
ΣРк.ш i	17695,991	17695,991	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17695,991

ПРИЛОЖЕНИЕ Г– РАСЧЕТ ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ

Г.1 Расчет поршня

Значения для расчета поршневой группы основаны на данных теплового расчета, скоростной характеристики и динамического расчета.

Напряжение изгиба в днище поршня

$$\sigma_{из.} = p_{z.маx} (r_i / \delta)^2 = 7,45 \cdot (24,2 / 6)^2 = 121,19 \text{ МПа} \quad (\text{Г.1})$$

$$\text{где } r_i = D / 2 - (s + t + \Delta t) = 67 / 2 - (5 + 3,5 + 0,8) = 24,2 \text{ мм.} \quad (\text{Г.2})$$

Напряжение сжатия в сечении, имеющем наименьшую площадь:

$$\sigma_{из.} = P_{zД} / F_{x-x} = 0,02627 / 0,00078 = 33,64 \quad (\text{Г.3})$$

$$\text{где } P_{zД} = p_{zД} \cdot F_n = 7,45 \cdot 0,003526 = 0,02627 \text{ МН,} \quad (\text{Г.4})$$

$$F_{x-x} = (\pi / 4)(d_k^2 - d_i^2) - n'_M F' = 0,00078 \text{ м}^2 \quad (\text{Г.5})$$

$$F' = (d_k - d_i)d_M / 2 = 5,76 \text{ мм}^2 \quad (\text{Г.6})$$

$$d_k = D - 2(t + \Delta t) = 67 - 2(3,5 + 0,8) = 58,4 \text{ мм} \quad (\text{Г.7})$$

Напряжение разрыва в сечении, имеющем наименьшую площадь:

$$\omega_{x.x.маx} = n_{x.x.маx} * \pi / 30 = \pi * 13500 / 30 = 1413 \text{ рад/с} \quad (\text{Г.8})$$

Масса головки поршня с кольцами, расположенными выше сечения с наименьшей площадью:

$$m_{x-x} = 0.5m_i = 0,5 * 0,282 = 0,141 \text{êã} \quad (\text{Г.9})$$

Максимальная разрывная сила:

$$P_j = m_{x-x} R \omega_{x.x.\text{max}}^2 (1 + \lambda) = 0.141 \cdot 0.02125 \cdot 1413^2 \cdot (1 + 0.19) \cdot 10^{-6} = 7,12 \text{МПа} \quad (\text{Г.10})$$

напряжение разрыва:

$$\sigma_p = P_j / F_{x-x} = 7,12 / 0.00078 = 9119,09 \text{МПа} \quad (\text{Г.11})$$

Напряжение в верхней кольцевой перемычке:

среза:

$$\tau = 0,0314 p_{z\text{д}} D / h_n = 0,0314 \cdot 7,45 \cdot 0,067 / 2,68 = 5,85 \text{МПа} \quad (\text{Г.12})$$

изгиба:

$$\sigma_{uz} = 0,0045 \cdot p_{z\text{д}} (D / h_n)^2 = 0,0045 \cdot 7,45 (0,067 / 2,68)^2 = 20,95 \text{МПа} \quad (\text{Г.13})$$

сложное:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{uz}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{20,95^2 + 4 \cdot 5,85^2} = 23,99 \text{МПа} \quad (\text{Г.14})$$

Удельное давление поршня на стенку цилиндра:

$$q_1 = N_{\text{max}} / (h_o D) = 0,015 / 0,047 \cdot 0,067 = 4,76 \text{МПа} \quad (\text{Г.15})$$

$$q_2 = N_{\max} / (HD) = 0,015 / 0,035 \cdot 0,067 = 6,39 \text{ МПа} \quad (\text{Г.16})$$

Диаметры головки и юбки поршня:

$$D_z = D - \Delta_z = 67 - 0,468 = 66,532 \text{ мм} \quad (\text{Г.17})$$

$$D_{ю} = D - \Delta_{ю} = 67 - 0,135 = 66,867 \text{ мм} \quad (\text{Г.18})$$

$$\text{где } \Delta_z = 0,007 D = 0,007 \cdot 67 = 0,468 \text{ мм}, \Delta_{ю} = 0,002 D = 0,002 \cdot 67 = 0,135 \text{ мм} \quad (\text{Г.19})$$

Диаметральные зазоры в холодном состоянии:

$$\begin{aligned} \Delta'_{\bar{A}} &= D[1 + \alpha_{\delta}(\dot{O}_{\delta} - \dot{O}_0)] - D_{\bar{A}}[1 + \alpha_{\bar{r}}(\dot{O}_{\bar{A}} - \dot{O}_0)] = \\ &67[1 + 11 \cdot 10^{-6}(383 - 293)] - 66,531[1 + 22 \cdot 10^{-6} \cdot (593 - 293)] = 0,096 \text{ мм} \end{aligned} \quad (\text{Г.20})$$

$$\begin{aligned} \Delta'_b &= D[1 + \alpha_{\delta}(\dot{O}_{\delta} - \dot{O}_0)] - D_{\bar{A}}[1 + \alpha_{\bar{r}}(\dot{O}_{\bar{A}} - \dot{O}_0)] = \\ &67[1 + 11 \cdot 10^{-6}(383 - 293)] - 66,866[1 + 22 \cdot 10^{-6} \cdot (413 - 293)] = 0,046 \text{ мм} \end{aligned} \quad (\text{Г.21})$$

где $T_{ц}=383 \text{ К}$, $T_{г}=593 \text{ К}$, $T_{ю}=413 \text{ К}$ приняты с учётом водяного охлаждения.

Г.2 Расчёт поршневого кольца

Необходимые данные для расчета приведены в предыдущих расчетах. Материал кольца – серый чугун, $E=1,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Среднее давление кольца на стенку цилиндра:

$$p_{cp} = 0,152 E \frac{A_0/t}{(D/t-1)^3(D/t)} = 0,152 \cdot 1,0 \cdot 10^5 \cdot \frac{10,5/3,5}{(67/3,5-1)^3(67/3,5)} = 0,387 \text{ МПа} \quad (\text{Г.22})$$

где $A_0=3t=3*3,5=10,5$

Давление кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности:

$$P = P_{cp} * \mu_k \quad (Г.23)$$

Результат расчёта p , а также μ_k для различных углов ψ сведены в таблицу Г1.

Таблица Г1 – значения давления кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности.

φ, град	180	150	120	90	60	30	0
μ_k	2,86	0,68	0,46	0,8	1,13	1,06	1,06
P,МПа	1,10682	0,26316	0,17802	0,3096	0,43731	0,41022	0,41022

Напряжение изгиба кольца в рабочем состоянии:

$$\sigma_{uz1} = 2,61 p_{cp} (D/t - 1)^2 = 2,61 \cdot 0,387 \cdot (62/3,5 - 1)^2 = 332,5 \text{ МПа} \quad (Г.24)$$

Напряжение изгиба при надевании кольца на поршень:

$$\sigma_{uz2} = 4E \frac{(1 - 0,114 A_0/t)}{m(D/t - 1,4)(D/t)} = 4 \cdot 1,0 \cdot 10^5 \cdot \frac{1 - 0,114 \cdot 10,5/3,5}{1,57 \cdot (62/3,5 - 1,4)(62/3,5)} = 493,57 \text{ МПа} \quad (Г.25)$$

Монтажный зазор в замке поршневого кольца

$$\Delta_k = \Delta'_k + \pi D (\alpha_k (T_k - T_0) - \alpha_y (T_y - T_0)) = 0,33 \text{ мм} \quad (Г.26)$$

где $\Delta'_k = 0,08$ мм, $T_y = 383\text{К}$, $T_k = 493\text{К}$, $T_0 = 293\text{К}$

Г.3 Расчет поршневого пальца

Расчетная сила, действующая на поршневой палец:

-газовая

$$P_{z \max} = p_{z \max} F_n = 7,45 \cdot 35,26 \cdot 10^{-4} = 0,02627 \text{ МН}; \quad (\text{Г.27})$$

-инерционная

$$P_j = -m_n R \omega_m^2 (1 + \lambda) \cdot 10^{-6} = -0,422 \cdot 0,02125 \cdot 1413^2 (1 + 0,19) \cdot 10^{-6} = -0,02131 \text{ МН} \quad (\text{Г.28})$$

$$\text{где } \omega_m = \pi n_m / 30 = 3,14 \cdot 13500 / 30 = 1413 \text{ рад/с}; \quad (\text{Г.29})$$

-расчетная

$$P = P_{z \max} + k P_j = 0,02627 - 0,82 \cdot 0,02131 = 0,04374 \text{ МН}. \quad (\text{Г.30})$$

Удельное давление пальца на втулку поршневой головки шатуна:

$$q_{w} = \frac{P}{d_n l_{w}} = \frac{0,04374}{0,022 \cdot 0,027} = 73,63 \text{ МПа}. \quad (\text{Г.31})$$

Удельное давление пальца на бобышки:

$$q_b = \frac{P}{d_n (l_n - b)} = \frac{0,04374}{0,022 \cdot (0,065 - 0,029)} = 55,22 \text{ МПа}. \quad (\text{Г.32})$$

Напряжение изгиба в среднем сечении пальца:

$$\sigma_{uz} = \frac{P(l_n + 2b - 1,5l_w)}{1,2(1 - \alpha^4)d_n^3} = \frac{0,04374 \cdot (0,065 + 2 \cdot 0,029 - 1,5 \cdot 0,027)}{1,2(1 - 0,645^4) \cdot 0,022^3} = 341,52 \text{ МПа} \quad (\text{Г.33})$$

где $\alpha = d_B/d_{II}=14/22=0,645$. (Г.34)

Касательные напряжения среза в сечениях между бобышками и головкой шатуна:

$$\tau = \frac{0,85 \cdot P(1 + \alpha + \alpha^2)}{(1 - \alpha^4)d_n^2} = \frac{0,85 \cdot 0,04374(1 + 0,645 + 0,645^2)}{(1 - 0,645^4)0,022^2} = 191,45 \text{ МПа} . \quad (\text{Г.35})$$

Наибольшее увеличение горизонтального диаметра пальца при овализации:

$$\begin{aligned} \Delta d_{n \max} &= \frac{1,35P}{El_n} \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \\ &= \frac{1,35 \cdot 0,04374}{2 \cdot 10^5 \cdot 0,065} \left(\frac{1 + 0,645}{1 - 0,645} \right)^3 [0,1 - (0,645 - 0,4)^3] \cdot 10^3 = 0,0385 \text{ мм} \end{aligned} \quad (\text{Г.36})$$

Напряжения овализации на внешней поверхности пальца:

-в горизонтальной плоскости

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha 0^\circ} &= \frac{15P}{l_n d_n} \left[0,19 \frac{(2 + \alpha)(1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} - \frac{1}{1 - \alpha} \right] [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \\ &= \frac{15 \cdot 0,04374}{0,065 \cdot 0,022} \left[0,19 \cdot \frac{(2 + 0,645) \cdot (1 + 0,645)}{(1 - 0,645)^2} - \frac{1}{1 - 0,645} \right] \cdot [0,1 - (0,645 - 0,4)^3] = 146,47 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (\text{Г.37})$$

-в вертикальной плоскости

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha 90^\circ} &= -\frac{15P}{l_n d_n} \left[0,174 \frac{(2 + \alpha)(1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} + \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \\ &= -\frac{15 \cdot 0,04374}{0,065 \cdot 0,022} \left[0,174 \frac{(2 + 0,645)(1 + 0,645)}{(1 - 0,645)^2} + \frac{0,645}{1 - 0,645} \right] [0,1 - (0,645 - 0,4)^3] = -306,19 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (\text{Г.38})$$

Напряжения овализации на внутренней поверхности пальца:

-в горизонтальной плоскости

$$\begin{aligned}\sigma_{i0^\circ} &= -\frac{15 \cdot P}{l_n d_n} \left[0,19 \frac{(1+2 \cdot \alpha)(1+\alpha)}{(1-\alpha)^2 \alpha} + \frac{1}{1-\alpha} \right] [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = & (\Gamma.39) \\ &= -\frac{15 \cdot 0,04374}{0,065 \cdot 0,022} \left[0,19 \frac{(1+2 \cdot 0,645)(1+0,645)}{(1-0,645)^2 \cdot 0,645} + \frac{1}{1-0,645} \right] [0,1 - (0,645 - 0,4)^3] = -454,81 \text{ МПа};\end{aligned}$$

-в вертикальной плоскости

$$\begin{aligned}\sigma_{i90^\circ} &= \frac{15P}{l_n d_n} \left[0,174 \frac{(1+2\alpha)(1+\alpha)}{(1-\alpha)^2 \alpha} - \frac{0,636}{1-\alpha} \right] [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = & (\Gamma.40) \\ &= \frac{15 \cdot 0,04374}{0,065 \cdot 0,022} \left[0,174 \frac{(1+2 \cdot 0,645)(1+0,645)}{(1-0,645)^2 \cdot 0,645} - \frac{0,645}{1-0,645} \right] [0,1 - (0,645 - 0,4)^3] = 244,45 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Д– РАСЧЕТ КОРПУСА ДВИГАТЕЛЯ

Д.1 Болты головки блока

Значения для расчета корпуса двигателя основаны на показаниях теплового расчета.

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

$$F_K = 1.2F_{II} = 1,2 \cdot 0,003526 = 0,00423\text{м}^2 \quad (\text{Д.1})$$

Сила давления газов, приходящаяся на один болт:

$$P_{ZMAX} = \frac{P_{zmax} F_K}{i} = \frac{7,45 \cdot 0,00423}{4} = 0,0078 \text{ МН} \quad (\text{Д.2})$$

Сила предварительной затяжки:

$$P_{PP} = m(1 - \chi)P_{ZMAX} = 3(1 - 0.2)0.0078 = 0,01897 \text{ МН}, \quad (\text{Д.3})$$

где $m=3$ – коэффициент затяжки болта для соединения с прокладками;

$\chi = 0,2$ – коэффициент основной нагрузки резьбового соединения.

Суммарная сила, растягиваемая болт без учета силы P_i :

$$P_{Pmax} = P_{PP} + \chi P_{ZMAX} = 0,01891 + 0,2 \cdot 0,0078 = 0,02049 \text{ МН} \quad (\text{Д.4})$$

Минимальная сила, растягивающая болт:

$$P_{Pmin} = P_{PP} = 0,01891\text{МН} \quad (\text{Д.5})$$

Максимальное и минимальное напряжение, возникающие в болте:

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{P\max} \cdot 4}{\pi \cdot d_B^2} = \frac{0,02049 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,0076^2} = 451 \text{ МПа} \quad (\text{Д.6})$$

$$\sigma_{\min} = \frac{P_{P\min} \cdot 4}{\pi \cdot d_B^2} = \frac{0,01891 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,0076^2} = 417 \text{ МПа} \quad (\text{Д.7})$$

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{451 + 417}{2} = 434 \text{ МПа} \quad (\text{Д.8})$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{451 - 417}{2} = 17 \text{ МПа.} \quad (\text{Д.9})$$

Величина $\sigma_{ak} = 42 \text{ МПа}$,

где $k_a = 1 + q(\alpha_{k\sigma} - 1) = 1 + 0,74(4 - 1) = 3,22$;

Так как $\frac{\sigma_{ak}}{\sigma_m} = \frac{42}{434} = 0,097 < 0,369$, то запас прочности болта определяется по

пределу текучести:

$$n_{T\sigma} = \frac{\sigma_T}{\sigma_{ak} + \sigma_m} = \frac{800}{42 + 434} = 1,67 \quad (\text{Д.10})$$

Допускаемый запас прочности: $n_{T\sigma} = 1,5 \div 2,5$

ПРИЛОЖЕНИЕ Е– РАСЧЁТ СИСТЕМЫ СМАЗКИ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Е.1 Расчет масляного насоса

Общее количество тепла, выделяемого топливом в течение 1 с:

$$Q_0 = H_u G_T / 3600 = 43897 \cdot 19,51 / 3600 = 237 \text{ кДж/с.} \quad (\text{E.1})$$

Количество тепла, отводимого маслом от двигателя:

$$Q_M = 0,02 Q_0 = 0,02 \cdot 237 = 4,75 \text{ кДж/с.} \quad (\text{E.2})$$

Теплоемкость масла: $c_M = 2,094 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Плотность масла: $\rho_M = 900 \text{ кг/м}^3$.

Температура нагрева масла в двигателе: $\Delta T = 10 \text{ К}$.

Циркуляционный расход масла:

$$V_{ц} = Q_M / (c_M \rho_M \Delta T) = 4,75 / (900 \cdot 2,094 \cdot 10) = 0,00025 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (\text{E.3})$$

Циркуляционный расход с учетом стабилизации давления масла в системе:

$$V' = 2V_{ц} = 2 \cdot 0,00025 = 0,0005 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (\text{E.4})$$

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

Расчетная производительность насоса

$$V_p = V' / \eta_H = 0,0005 / 0,8 = 0,00063 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (\text{E.5})$$

Модуль зацепления зуба $m = 4,5 \text{ мм} = 0,0045 \text{ м}$.

Высота зуба $h = 2m = 2 \cdot 4,5 = 9,0 \text{ мм} = 0,009 \text{ м}$.

Число зубьев шестерен $z = 7$.

Диаметр начальной окружности шестерни

$$D_o = z_m = 7 \cdot 4,5 = 31,5 \text{ мм} = 0,0315 \text{ м}. \quad (\text{E.6})$$

Диаметр внешней окружности шестерни:

$$D = m(z + 2) = 4,5(7 + 2) = 40,5 \text{ мм} = 0,0405 \text{ м}. \quad (\text{E.7})$$

Окружная скорость на внешнем диаметре шестерни $u_n = 6,37 \text{ м/с}$.

Частота вращения шестерни (насоса)

$$n_n = u_n 60 / (\pi D) = 6,37 \cdot 60 / (3,14 \cdot 0,0405) = 3005 \text{ мин}^{-1} \quad (\text{E.8})$$

Длина зуба шестерни:

$$b = 60V_p / (2\pi m^2 z n_n) = 60 \cdot 0,00063 / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,0045^2 \cdot 7 \cdot 3005) = 0,014 \text{ м}. \quad (\text{E.9})$$

Рабочее давление масла в системе $p = 40 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

Механический к. п. д. масляного насоса: $\eta_{\text{м.н.}} = 0,85$

Мощность, затрачиваемая на привод масляного насоса

$$N_n = V_p p / (\eta_{\text{м.н.}} 10^3) = 0,00063 \cdot 40 \cdot 10^4 / (0,85 \cdot 10^3) = 0,31 \text{ кВт}. \quad (\text{E.10})$$

Е.2 Расчёт водяного насоса

Расчёт водяного насоса рассчитывается по данным теплового баланса

Циркуляционный расход воды в системе охлаждения:

$$G_{\text{ж}} = Q_{\text{в}} / (c_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \Delta T_{\text{ж}}) = 36330,2 / (4187 \cdot 1000 \cdot 9) = 0,00096 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (\text{E.11})$$

где $\Delta T_{\text{ж}} = 9 \text{ К}$ – температурный перепад воды при принудительной циркуляции.

Расчетная производительность насоса

$$G_{\text{ж.р}} = G_{\text{ж}} / \eta = 0,00096 / 0,85 = 0,00118 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (\text{E.12})$$

где $\eta = 0,85$ – коэффициент подачи насоса.

Радиус входного отверстия крыльчатки:

$$r_1 = (G_{\text{ж.р}} / (\pi c_1) + r_0^2)^{1/2} = (0,00118 / (3,14 \cdot 2) + 0,008^2)^{1/2} = 0,01585 \text{ м}, \quad (\text{E.13})$$

где $c_1 = 2 \text{ м/с}$ – скорость воды на входе из колеса; $r_0 = 0,008 \text{ м}$ – радиус ступицы крыльчатки.

Окружная скорость потока воды на выходе из колеса

$$u_2 = (1 + \text{tg} \alpha_2 \text{ctg} \beta_2)^{1/2} (p_{\text{ж}} / (\rho_{\text{ж}} \eta_{\text{н}}))^{1/2} = 16,542 \text{ м/с}, \quad (\text{E.14})$$

где угол $\alpha_2 = 10^\circ$, а угол $\beta_2 = 45^\circ$; $\eta_{\text{н}} = 0,67$ – гидравлический к. п. д. насоса.

Радиус крыльчатки колеса на выходе

$$r_2 = 30 u_2 / (\pi n_{\text{в.н}}) = 30 \cdot 16,542 / (3,14 \cdot 5000) = 0,03161 \text{ м}. \quad (\text{E.15})$$

Окружная скорость входа потока

$$u_1 = u_2 r_1 / r_2 = 16,542 \cdot 0,01585 / 0,03161 = 8,294 \text{ м/с}. \quad (\text{E.16})$$

Угол между скоростями c_1 и u_1 принимается $\alpha_1 = 90^\circ$, при этом $\text{tg} \beta_1 = c_1 / u_1 = 2 / 8,294 = 0,2411$, откуда $\beta_1 = 14^\circ$.

Ширина лопатки на входе:

$$b_1 = G_{ж.р}/(2\pi r_1 - z\delta_1/\sin\beta_1)c_1 = 0,097 \text{ м}, \quad (\text{E.17})$$

где $z = 6$ – число лопаток на крыльчатке насоса; $\delta_1 = 0,0025$ м – толщина лопаток у входа.

Радиальная скорость потока на выходе из колеса

$$c_r = p_{ж} \operatorname{tg}\alpha_2 / (\rho_{ж} \eta_h u_2) = 120\,000 \operatorname{tg}10^\circ / (1000 \cdot 0,67 \cdot 16,542) = 2,567 \text{ м/с}. \quad (\text{E.18})$$

Ширина лопатки на выходе

$$b_2 = G_{ж.р}/(2\pi r_2 - z\delta_2/\sin\beta_2)c_r = 0,00453 \text{ м}, \quad (\text{E.19})$$

где $\delta_2 = 0,0025$ м – толщина лопаток на выходе.

Мощность, потребляемая насосом:

$$N_{в.н} = G_{ж.р} p_{ж} / (1000 \eta) = 0,00118 \cdot 120\,000 / (1000 \cdot 0,85) = 0,21 \text{ кВт}, \quad (\text{E.20})$$

где $\eta_m = 0,85$ – механический к. п. д. водяного насоса.

Е.3 Расчёт водяного радиатора

Количество воздуха, проходящего через радиатор:

$$G'_{\text{возд}} = Q_{\text{возд}} / (c_{\text{возд}} \Delta T_{\text{возд}}) = 36330,2 / (1000 \cdot 25) = 1,453 \text{ кг/с}, \quad (\text{E.21})$$

где $\Delta T_{\text{возд}} = 25$ К – температурный перепад воздуха в решетке радиатора.

Массовый расход воды, проходящей через радиатор:

$$G'_{ж} = G_{ж} \rho_{ж} = 0,00118 \cdot 1000 = 1,175 \text{ кг/с}. \quad (\text{E.22})$$

Средняя температура охлаждающего воздуха, проходящего через радиатор:

$$T_{\text{ср. возд}} = T_{\text{возд. вх}} + (T_{\text{возд. вх}} + \Delta T_{\text{возд}})/2 = 313 + (313 + 25)/2 = 324,7 \text{ К}, \quad (\text{E.22})$$

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

Средняя температура воды в радиаторе

$$T_{\text{ср. вод}} = T_{\text{вод. вх}} + (T_{\text{вод. вх}} - \Delta T_{\text{вод}})/2 = 362 + (362 - 9)/2 = 363,4 \text{ К}, \quad (\text{E.23})$$

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

Поверхность охлаждения радиатора:

$$F = Q_{\text{вод}}/K(T_{\text{ср. вод}} - T_{\text{ср. возд}}) = 36330,2/160(363,4 - 324,7) = 8,256 \text{ м}^2 \quad (\text{E.24})$$

где $K = 160 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – коэффициент теплопередачи для радиатора.

Е.4 Расчёт вентилятора

Плотность воздуха при средней его температуре в радиаторе

$$\rho_{\text{возд}} = p_0 \cdot 10^6 / (R_v T_{\text{ср. возд}}) = 0,1 \cdot 10^6 / (287 \cdot 324,7) = 1,073 \text{ кг}/\text{м}^3. \quad (\text{E.25})$$

Производительность вентилятора

$$G_{\text{возд}} = G'_{\text{возд}}/\rho_{\text{возд}} = 1,45/1,073 = 1,354 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{E.26})$$

Фронтальная поверхность радиатора

$$F_{\text{фр.рад}} = G_{\text{возд}}/\omega_{\text{возд}} = 1,354/24 = 0,056 \text{ м}^2, \quad (\text{E.27})$$

где $\omega_{\text{возд}} = 24 \text{ м/с}$ – скорость воздуха перед фронтом радиатора без учета скорости движения автомобиля.

Диаметр вентилятора:

$$D_{\text{вент}} = 2(F_{\text{фр.рад}}/\pi)^{1/2} = 2(0,056/3,14)^{1/2} = 0,268 \text{ м.} \quad (\text{E.28})$$

Окружная скорость вентилятора:

$$u = \psi_{\text{л}}(\Delta p_{\text{тр}}/\rho_{\text{возд}})^{1/2} = 2,9(905/0,975)^{1/2} = 84,21 \text{ м/с,} \quad (\text{E.29})$$

где $\psi_{\text{л}} = 2,9$ – безразмерный коэффициент для плоских лопастей.

Частота вращения вентилятора:

$$n_{\text{вент}} = 60u/(\pi D_{\text{вент}}) = 60 \cdot 88,37/(3,14 \cdot 0,338) = 6000 \text{ мин}^{-1}. \quad (\text{E.30})$$

Мощность, затрачиваемая на привод осевого вентилятора:

$$N_{\text{вент}} = G_{\text{возд}} \Delta p_{\text{тр}}/(1000\eta_{\text{в}}) = 2,093 \cdot 905/(1000 \cdot 0,65) = 1,885 \text{ кВт,} \quad (\text{E.31})$$

где $\eta_{\text{в}} = 0,65$ – к. п. д. вентилятора с плоскими лопастями.