

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 Газопоршневой двигатель с искровым зажиганием

Студент(ка)

А.Н. Корнилов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультант

М.И. Фесина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Нормоконтроль

А.Г. Егоров

(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 Корнилов Алексей Николаевич

1. Тема работы Газопоршневой двигатель с искровым зажиганием

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

3. Исходные данные к работе Двигатель ВАЗ 2110 на сжатом природном
газе, $iV_h=1,6$ л, частота вращения коленчатого вала $n = 5600$ об/мин. Степень
сжатия $\varepsilon = 22$.

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

Анализ состояния вопроса

Тепловой расчет двигателя

Расчет кинематики и динамики двигателя

Расчет поршневой группы

Расчет корпуса двигателя

Расчет системы смазки

Расчет системы охлаждения

Безопасность и экологичность работы

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

Лист диаграмм теплового расчета - 1 (А1)

Лист диаграмм ВСХ - 1 (А1)

Лист диаграмм кинематического и динамического расчета - 2 (А1)

Лист спецчасти- 2 (А1)

6. Консультанты: Безопасность и экологичность работы
М.И.Фесина

7. Дата выдачи задания « 20 » марта 2016 г.

Руководитель бакалаврской работы _____ В.В. Смоленский
(подпись) (И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению _____ А.Н. Корнилов
(подпись) (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)

« 20 »

марта

2016 г.

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
выполнения бакалаврской работы**

Студента Корнилова Алексея Николаевича

по теме Газопоршневой двигатель с искровым зажиганием

№ этапов 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	Тепловой расчет двигателя <i>Чертеж диаграмм теплового расчета; ВСХ</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	30 апреля 2016 г.	90%		
2	Расчет кинематики и динамики двигателя <i>Чертеж диаграмм кинематического и динамического расчетов</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	5 мая 2016 г.	90%		
3	Расчет основных деталей двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	11 мая 2016 г.	90%		
4	Расчет механизмов и систем двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	15 мая 2016 г.	90%		
5	Описание конструкции спроектированного ДВС	Раздел записки Графический лист	20 мая 2016 г.	80%		
6	Безопасность и экологичность работы	Раздел записки	30 мая 2016 г.	90%		
7	Оформление и доработка пояснительной записки и листов графической части с учетом замечаний, полученных во время предварительной защиты	Сброшюрованная записка и подписанные чертежи	10 июня 2016 г.	100%		

Студент _____

(подпись)

А.Н. Корнилов

(И.О. Фамилия)

Руководитель _____

(подпись)

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

« _____ »

2016 г.

АННОТАЦИЯ

Целью данной работы является оценка возможностей и эффективности использования газопоршневого двигателя внутреннего сгорания со сверхвысокой степенью сжатия.

Бакалаврская работы состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка включает в себя расчетную часть и описание конструкции разработанной установки.

Расчетная часть содержит оценочные расчеты системы питания двигателя на сжатом природном газе. Конструкторская часть содержит тепловой расчет при выбранных условиях. Проведены кинематический и динамический расчеты, а также расчеты основных деталей и систем проектируемого двигателя.

В графической части работы приводятся продольный и поперечный разрезы двигателя, а также графики кинематического и динамического расчетов, диаграмма ВСХ и специальная часть посвященная описанию спроектированной установки.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании газопоршневых установок.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Анализ состояния вопроса	9
2 Тепловой расчет двигателя работающего на сжатом природном газе	12
2.1 Тепловой расчет двигателя	12
2.1.1 Топливо	12
2.1.2 Расчет процесса впуска	14
2.1.3 Расчет процесса сжатия и начала воспламенения смеси	15
2.1.4 Расчёт процесса сгорания	17
2.1.5 Расчет процессов расширения и выпуска	19
2.1.6 Индикаторные параметры рабочего тела	20
2.1.7 Эффективные показатели двигателя	20
2.1.8 Основные параметры цилиндра двигателя	22
2.1.9 Построение индикаторной диаграммы	24
2.2 Тепловой баланс	24
3 Расчет кинематики двигателя	27
4 Динамический расчет двигателя	29
4.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма	29
4.2 Силы инерции	30
4.3 Суммарные силы	30
4.4 Крутящие моменты	31
4.5 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала	32
4.6 Силы, действующие на колено вала	35
4.7 Силы, действующие на коренные шейки	36
4.8 Уравновешивание двигателя	41
4.9 Равномерность крутящего момента и хода двигателя	42
5 Специальная часть	44
6 Безопасность и экологичность работы	50
Заключение	55
Список использованных источников	56

Приложение А – Таблицы теплового расчета	60
Приложение Б – Расчет деталей	76
Б.1 Расчет поршневой группы	76
Б.2 Расчет шатунной группы	81
Б.3 Расчет коленчатого вала	90
Б.4 Расчёт механизма газораспределения двигателя	95
Приложение В – Расчет элементов систем двигателя	102
В.5 Расчет элементов системы смазки	102
В.2 Расчет элементов системы охлаждения	104
Приложение Г – Значений крутящих моментов всех цилиндров	107
Приложение Д – Спецификация сборочного чертежа	109

ВВЕДЕНИЕ

Появление двигателя внутреннего сгорания стало важным знаковым явлением в развитии технического прогресса. Его появление определило структуру развития транспортной индустрии. С момента появления первого ДВС учёные и изобретатели направляли свои знания на совершенствование силового агрегата, а именно на увеличение мощностных показателей, долговечности и исправности при разных климатических условиях.[16, 18]

К началу XX века двигатель внутреннего сгорания занял лидирующее положение не только в легковом, но и в коммерческом транспорте.

С момента введения экологических норм и стандартов, производителям ДВС стало необходимо находить решения, направленные не только на увеличение мощности и топливной экономичности двигателя, но и искать способы укладываться в рамки жёстких экологических стандартов.

В настоящее время для улучшения экологических показателей транспортных средств реализуются программы по переходу автотранспортных средств с на сжатый природный газ (СПГ). Газовый двигатель, имеет достаточно низкий уровень токсичности отработавших газов, низкие эксплуатационные затраты, вследствие полноты сгорания.

Данная работа посвящена изучению процесса сгорания сжатого природного газа и влиянию на рабочие характеристики двигателя.

С учетом вышесказанного был спроектирован газопоршневой силовой агрегат на базе двигателя ВАЗ-2110.

1 Анализ состояния вопроса

В 1860г. бельгийский механик Жан Этьен Ленуар запатентовал двигатель, который работал на светильном газе. Это дало начало применения газа в качестве моторного топлива. Однако бурный рост добычи нефти и появление новых более технически совершенных силовых установок вывели бензин на первое место на топливном рынке. Газ как топливо вновь стали рассматривать в начале XX века. В России в 1936г. вышло постановление о переводе части транспорта на газовое оборудование. Это было связано с активно развивающейся промышленностью в нашей стране. Стали открываться заправочные станции, разрабатывались новые газовые двигатели, работающие на двух видах газа-сжатом и углеводородном. Вторая Мировая война на некоторое время отодвинула реализацию программы, однако уже в мирное время вновь к ней приступили.

На сегодняшний день насчитывается свыше миллиона транспортных средств, работающих на газе. Такие страны, как Россия, США, Аргентина, Италия являются лидерами, использующими газ в качестве топлива. В настоящее время более 50 крупнейших моторостроительных компаний (например, BMW, HONDA, VOLVO и т.д.) занимаются разработкой автомобилей, которые работают на природном газе [16,17,18].

В России на данный момент насчитывается более 200 тыс. автомобилей, работающих на сжатом природном газе. В последние годы предпринимаются попытки расширить применение сжатого природного газа (КПГ) в двигателях автотранспорта. Государственные предприятия и частные компании занимаются разработкой более широкого применения КПГ в двигателях, а также готовят к серийному производству новые модульные и стационарные станции.

Газ как моторное топливо представлен двумя основными разновидностями - сжатым природным газом (КПГ), который

поступает на специальные заправки - АГНКС - по газопроводам, и сжиженный углеводородный газ (СУГ). Первый является метаном, а второй - смесью пропана и бутана, продуктом переработки попутного нефтяного газа (ПНГ). Так как КПГ в основном состоит из метана, то его массовая теплота сгорания составляет 49,46 МДж/кг, что на 10 % выше, чем у бензина.

Важнейшим фактором, стимулирующим государства мирового сообщества к развитию рынка газового моторного топлива, являются экологические проблемы. Автомобильный транспорт оказывает огромное влияние на загрязнение воздуха крупных городов и агломераций составляет от 50 до 90 % по всем видам загрязнений. Поэтому требования к снижению токсичности выпускных газов двигателей внутреннего сгорания транспортных средств постоянно возрастают – вводятся экологические нормы и стандарты Евро-5 и Евро-6. Помимо всего этого перевод автомобилей на газомоторное топливо сокращает выбросы диоксида углерода (основной парниковый газ) на 13%, оксидов азота - на 15-20 %, в 8-10 раз снижает дымность отработавших газов и почти полностью исключает выбросы соединений свинца. По уровню выбросов вредных веществ в атмосферу сжатый природный газ уступает только электроэнергии. Еще одним не менее важным преимуществом, которое получает предприятие, эксплуатирующее машины на метане – это повышение уровня безопасности, поскольку по своим физико-химическим свойствам природный газ менее опасен, чем пропан. Также благодаря использованию природного газа в качестве топлива увеличивается срок службы масла и самого двигателя внутреннего сгорания. При работе мотора на газовом топливе не происходит смывания масляной пленки со стенок блока цилиндров, кроме того, на головке блока цилиндров не образуются отложения углерода. Помимо этого, улучшается работа системы зажигания - срок эксплуатации свечей возрастает на 40,5%. На данный момент, Компримированный природный газ является наиболее устойчивым к кризисным явлениям в российской экономике и наиболее динамичным в ближайшей перспективе. К основным положительным и

отрицательным моментам использования природного газа, как моторного топлива можно отнести:

Основные плюсы:

- низкая себестоимость;
- повышенный уровень безопасности;
- сниженный уровень выбросов вредных веществ в атмосферу;
- увеличение срока службы масла и деталей подверженных трению;
- продление сроков изнашивания двигателя;
- снижение теплотворной способности газозоудшной смеси.

Основные минусы:

- возможное возникновение неровности работы двигателя;
- усложнение пуска холодного двигателя в сильный мороз;
- ухудшение динамических характеристик автомобиля;
- увеличение массы автомобиля и снижение ее грузоподъемности;

Требования к газотопливному оборудованию на транспортных средствах достаточно четко изложены в соответствующих Правилах ЕЭК ООН (Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций).

2 Тепловой расчет и тепловой баланс двигателя работающего на сжатом природном газе

2.1 Тепловой расчет

Тепловой расчет выполнен по методике Вибе [1,2,3]. Исходные данные: Двигатель ВАЗ 2110 четырехцилиндровый, $i = 4$ $V_h=1,6$ л, частота вращения коленчатого вала $n = 5600$ об/мин. Степень сжатия $\varepsilon = 22$.

При проведении теплового расчёта для нескольких скоростных режимов обычно выбирают 3-4 основных режима. Для газовых двигателей легковых автомобилей такими режимами являются:

- режим минимальной частоты вращения $n_{\min} = 900 \text{ мин}^{-1}$
- режим максимально крутящего момента при $n_M = 2700 \text{ мин}^{-1}$
- режим максимальной (номинальной) мощности $n_N = 5200 \text{ мин}^{-1}$
- режим максимальной скорости движения автомобиля при $n_{\max} = 5600 \text{ мин}^{-1}$

2.1.1 Топливо

Таблица 1 – Средний элементарный состав сжатого природного газа

Содержание м ³	
Метан CH ₄	90
Этан C ₂ H ₆	2,96
Пропан C ₃ H ₈	0,17
Бутан C ₄ H ₁₀	0,55
Тяж уг-ды C _n H _m	0,42
Водород H ₂	0,14
Окс.угл CO	0,14
Угл.газ CO ₂	0,47
Азот N ₂	5,15

Низшая теплота сгорания топлива

$$\begin{aligned}
 H_u' &= 12,8CO + 10,8H_2 + 35,7CH_4 + 63,3C_2H_6 + 90,9C_3H_8 + 119,7C_4H_{10} + \\
 &+ 146,2C_5H_{12} = 12,8 \cdot 0,0014 + 10,8 \cdot 0,0014 + 35,7 \cdot 0,9 + 63,6 \cdot 0,0296 + 90,9 \cdot 0,0017 + \\
 &+ 119,7 \cdot 0,0055 + 146,7 \cdot 0,0042 = 35,463 \text{ МДж/м}^3 = 35\,463 \text{ кДж/м}^3.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива:

а) в киломолях на 1 кг топлива

$$L_0' = \frac{1}{0,21} * \sum \left(n + \frac{m}{4} - \frac{r}{2} \right) \cdot C_n H_m O_r = 9,533 \frac{\text{мольвоздуха}}{\text{мольгазообртопл}}, \text{ или } \frac{\text{м}^3 \text{возд}}{\text{м}^3 \text{топл}}
 \tag{2.2}$$

Количество горючей см./кмоль газообразного топлива

$$M_1' = \alpha L_0' + 1 = 10,533 \text{ кмоль}
 \tag{2.3}$$

Количество отдельных компонентов продуктов сгорания при $\alpha \geq 1$:

$$\begin{aligned}
 M'_{CO_2} &= \sum n(C_i H_o O_r) = 1 \cdot 0,9 + 2 \cdot 0,0296 + 3 \cdot 0,0017 + 4 \cdot 0,0055 + 5 \cdot 0,0042 + 0,0014 + 0,0047 = \\
 &= 1,0346 \text{ кмоль}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

$$\begin{aligned}
 M'_{H_2O} &= \sum \frac{m}{2} (C_n H_m O_r) = \frac{4}{2} \cdot 0,9 + \frac{6}{2} \cdot 0,0296 + \frac{8}{2} \cdot 0,0017 + \frac{10}{2} \cdot 0,0055 + \frac{12}{2} \cdot 0,0042 + \frac{2}{2} \cdot 0,0014 = \\
 &= 1,9497 \text{ кмоль}
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

$$M'_{O_2} = 0,208(\alpha - 1)L_0' = 0,208 \cdot (1 - 1) \cdot 9,526 = 0 \text{ кмоль};
 \tag{2.6}$$

$$M'_{N_2} = 0,792\alpha L_0' + N_2 = 0,792 \cdot 1 \cdot 9,5 + 0,0515 = 7,5501 \text{ кмоль}.
 \tag{2.7}$$

Общее число продуктов сгорания

$$M'_2 = 1,0346 + 1,9697 + 0,02 + 7,5501 = 10,534 \text{ кмоль} \quad (2.8)$$

2.1.2 Процесс впуска

Плотность заряда на впуске

$$\rho_0 = p_0 \cdot 10^6 / (R_B T_0) = 0,1 \cdot 10^6 / (287 \cdot 293) = 1,189 \text{ кг/м}^3, \quad (2.9)$$

где $R_B = 287$ Дж/(кг град) – удельная газовая постоянная для воздуха.

Потери давления на впуске.

$$\Delta p_a = \frac{2,8 \cdot A_n^2 \cdot n^2 \cdot \rho_0 \cdot 10^{-6}}{2} = \frac{2,8 \cdot 0,01827^2 \cdot 1,189 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,015025 \text{ МПа}, \quad (2.10)$$

где потери давления на впуске, $A_n = 95/5200 = 0,018269$ МПа

Давление в конце впуска

$$P_a = p_0 - \Delta p = 0,1 - 0,015025 = 0,08498 \text{ МПа} \quad (2.11)$$

Коэффициент остаточных газов

$$\gamma_\Gamma = \frac{T_0 + \Delta T}{T_\Gamma} \cdot \frac{\phi_{оч} P_\Gamma}{\varepsilon \phi_{доз} P_\Gamma - \phi_{оч} P_\Gamma} = \frac{293 + 6}{985} \cdot \frac{0,118}{22 \cdot 1,1 \cdot 0,0850 - 0,118} = 0,02045 \quad (2.12)$$

Температура в конце впуска при $n = 5200$ мин⁻¹

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r} = \frac{293 + 6 + 0,02045 \cdot 985}{1 + 0,02045} = 319,165 \text{ К} \quad (2.13)$$

Коэффициент наполнения при $n=5200 \text{ мин}^{-1}$

$$\eta_v = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{p_0} (\phi_{\text{доз}} \varepsilon p_a - \phi_{\text{оч}} p_r) \quad (2.14)$$

$$\eta_v = \frac{293}{293 + 6} \cdot \frac{1}{22 - 1} \cdot \frac{1}{0,1} (1,1 \cdot 22 \cdot 0,085 - 0,118) = 0,904518$$

Удельный объем рабочего тела в конце процесса наполнения

$$V_a = 8,314 \cdot 10^{-3} \frac{T_a}{\mu_B \cdot p_a} = 8,314 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{319,165}{28,9 \cdot 0,08498} = 1,0805 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.15)$$

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры процесса впуска и газообмена

Параметры	Процесс впуска и газообмена							
	900		2700		5200		5600	
	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$
$n, \text{ мин}^{-1}$								
α	1	1	1	1	1	1	1	1
$T_r, \text{ К}$	900	895	930	925	985	985	990	985
$p_r, \text{ МПа}$	0,108	0,108	0,109	0,108	0,118	0,1179	0,121	0,120
$\Delta T, \text{ }^\circ\text{С}$	14	13	9	9	7	6	6	6,5
$\Delta p_a, \text{ МПа}$	0,014925	0,014875	0,0154	0,0151	0,015025	0,01502	0,0162	0,0164
$p_a, \text{ МПа}$	0,084508	0,08513	0,0846	0,0849	0,08498	0,08497	0,08387	0,08436
$\Phi_{\text{доз}}$	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
γ_r	0,02092	0,04995	0,020106	0,04754	0,020451	0,04890	0,02091	0,04992
$T_a, \text{ К}$	325,8441	351,7499	320,7188	346,0195	319,165	347,2176	319,713	348,217
η_v	0,885492	0,876689	0,899691	0,891204	0,904518	0,8893	0,90311	0,88708

2.1.3 Процесс сжатия и начала воспламенения смеси

Значение показателя политропы сжатия находится методом

последовательных приближений из уравнения:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{20,16 + 1,738 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{n_1-1} + 1)} \cdot T_a \quad (2.16)$$

Давление в конце сжатия при $n=5200 \text{ мин}^{-1}$

$$P_c = P_a \cdot \varepsilon^{n_1} = 0,08498 \cdot 22^{1,3650} = 5,776 \text{ МПа.} \quad (2.17)$$

Температура в конце сжатия при $n=5200 \text{ мин}^{-1}$

$$T_c = T_a \cdot \varepsilon^{n_1-1} = 319,165 \cdot 22^{1,3650-1} = 986,278 \text{ К} \quad (2.18)$$

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

Таблица 3 – Параметры процесса сжатия

Параметры	Процесс сжатия							
	900		2700		5200		5600	
$n, \text{ мин}^{-1}$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$
n_1	1,362	1,37	1,364	1,374	1,365	1,375	1,370	1,3765
$p_c, \text{ МПа}$	5,7235	1,991	5,7590	2,0104	5,776	2,0150	5,866	2,0220
$T_c, \text{ К}$	997,624	824,58	988,021	818,654	986,278	823,382	1003,3	828,611

Удельный объем, давление и температура рабочего тела в момент воспламенения находятся по следующим формулам:

$$V_y = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left[1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left[\cos\left(\frac{\Theta \cdot \pi}{180}\right) + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \left(\sin\left(\frac{\Theta \cdot \pi}{180}\right) \right)^2} \right] \right] \right]; \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.19)$$

$$p_y = \left(\frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1} \cdot p_a; \text{ МПа} \quad (2.20)$$

$$T_y = \left(\frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1 - 1} \cdot T_a; \text{ К} \quad (2.21)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов рабочего тела в момент воспламенения

Параметры	Процесс воспламенения смеси							
	900		2700		5200		5600	
n, мин ⁻¹	ε=22	ε=10	ε=22	ε=10	ε=22	ε=10	ε=22	ε=10
V _y , м ³ /кг	0,07360	0,18430	0,11242	0,18130	0,0721	0,1819	0,11207	0,18245
p _y , МПа	3,3935	1,09500	1,87350	1,10320	3,4212	1,1052	1,8991	1,1083
T _y , К	868,222	701,534	732,179	695,2754	857,360	698,985	739,882	702,963

2.1.4 Процесс сгорания

Давление газов в процессе сгорания

$$p_2 = E_2 \cdot \Delta X_{1-2} + p_1 \cdot \left(K_{1-2} \cdot \psi(\phi_1') - \psi(\phi_2') \right) / \left[K_{1-2} \cdot \psi(\phi_1') - \psi(\phi_1') \right]; \text{ МПа} \quad (2.22)$$

Доля топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке

$$\Delta X_{1-2} = \exp \left[-6,908 \left[\frac{\phi_1}{\phi_Z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6,908 \left[\frac{\phi_2}{\phi_Z} \right]^{m+1} \right] \quad (2.23)$$

Фактор теплоемкостей находится следующим образом:

$$K_{1-2} = \frac{k_{1-2} + 1}{k_{1-2} - 1} \quad (2.24)$$

Отношение средних теплоемкостей рабочего тела на участке 1-2

$$k_{1-2} = 1,259 + \left[76,7 - \left(13,6 - \frac{14,2}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2} \right] \cdot \frac{1}{T_{1-2}} - \left(0,0665 - \frac{0,0245}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2} \quad (2.25)$$

Среднее значение доли топлива сгоревшего на участке 1-2

$$x_{1-2} = 0,5 \left[\exp \left[-6,908 \left[\frac{\phi_1}{\phi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6,908 \left[\frac{\phi_2}{\phi_z} \right]^{m+1} \right] \right] \quad (2.26)$$

Средняя температура на участке 1-2

$$T_{1-2} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad ; \text{ К} \quad (2.27)$$

$$\psi(\phi') = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \sigma \quad (2.28)$$

$$\sigma = \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left[\cos(\phi') + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 (\sin(\phi'))^2} \right] \quad (2.29)$$

Температура в процессе сгорания

$$T_2 = \frac{T_y \cdot p_2 \cdot \psi(\phi_2')}{p_y \cdot \psi(\phi_y') \cdot \mu_{1-2}} \quad ; \text{ К} \quad (2.30)$$

Средний коэффициент молекулярного изменения свежей смеси

$$\mu_{1-2} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} \quad (2.31)$$

$$\mu_1 = 1 + \frac{(\mu_{0\max} - 1) \left[1 - \exp \left[-6,908 \left(\frac{\phi_1}{\phi_z} \right)^{m+1} \right] \right]}{1 + \gamma_r} \quad (2.32)$$

Результаты расчета процесса сгорания приведены в Приложении А.

2.1.5 Процессы расширения и выпуска

Средний показатель политропы расширения находится методом последовательных приближений из уравнения:

$$n_2 = 1 + \frac{8,341}{23,7 + 0,0046 \cdot T_z \cdot \left(1 + \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right)} \quad (2.33)$$

Давление и температура в конце процесса расширения:

$$p_b = \frac{p_z}{\delta^{n_2}} = \frac{4,3465}{6,390^{1,25}} = 0,4278 \text{ МПа} \quad (2.34)$$

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} = \frac{2430,158}{6,390^{1,25-1}} = 1528,477 \text{ К} \quad (2.35)$$

Проверка ранее принятой температуры остаточных газов:

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{p_b / p_r}} = \frac{1528,477}{\sqrt[3]{0,4278 / 0,118}} = 995,367 \text{ К} \quad (2.36)$$

Для остальных режимов окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры процесса расширения и выпуска

Параметры	Процесс расширения и выпуска							
	900		2700		5200		5600	
	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$
n_2	1,258	1,268	1,257	1,262	1,2512	1,260	1,2525	1,261
p_b , МПа	0,41187	0,41745	0,42318	0,43403	0,4278	0,43077	0,42630	0,43033
T_b , К	1498,504	1354,72	1509,866	1401,865	1528,477	1447,337	1538,395	1403,31
T_r , К	949,5544	863,611	961,094	884,8579	995,36	940,378	1011,436	923,2437
$\Delta T_r\%$	5,116	4,214	3,235	5,102	1,041	4,745	2,119	5,125

2.1.6 Индикаторные параметры рабочего тела

Теоретическая индикаторная работа цикла

$$L_{iT} = \sum_{i=1}^n \frac{p_{1i} + p_{2i}}{2} (V_{2i} - V_{1i}), \quad (2.37)$$

где $\frac{p_{1i} + p_{2i}}{2}$ – среднее индикаторное давление на i -том участке;

Расчетное среднее индикаторное давление находится по формуле:

$$p_{iT} = \frac{\varepsilon \cdot L_{iT}}{(\varepsilon - 1)V_a} \quad (2.38)$$

Индикаторный КПД и индикаторный удельный расход газа:

$$\eta_i = 371,2 \cdot 10^{-6} M_1' T_k p_i / (H_u p_k \eta_v) \quad (2.39)$$

$$v_i = 3600 / (H_u \eta_i) \quad (2.40)$$

2.1.7 Эффективные показатели двигателя

Среднее давление механических потерь для бензиновых двигателей с числом цилиндров до шести и отношения $S / D \leq 1$

$$p_M = 0,034 + 0,0113v_{n.cp} \quad (2.41)$$

Для двигателя с впрыском топлива, приняв ход поршня равным 75,6 мм, получим значение средней скорости поршня при $n_N = 5600 \text{ мин}^{-1}$

$$v_{n.cp} = \frac{Sn}{3 \cdot 10^4} \quad (2.42)$$

Среднее эффективное давление и механический КПД

$$p_e = p_i - p_M \quad \eta_M = p_e / p_i \quad (2.43)$$

Эффективный КПД и эффективный удельный расход топлива:

$$\eta_e = 371,2 \cdot 10^{-6} p_e T_K M'_1 / (p_k \eta_v H'_u), \quad (2.44)$$

$$v_e = 3,6 / (\eta_e H'_u) \quad (2.45)$$

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 6.

Таблица 6 – Индикаторные и эффективные параметры двигателя

Параметры	Индикаторные и эффективные параметры двигателя							
	900		2700		5200		5600	
$n, \text{ мин}^{-1}$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=22$	$\varepsilon=10$
$p_i, \text{ Мпа}$	1,3121	0,9854	1,3356	1,1054	1,3347	1,0145	1,2520	0,9632
η_i	0,4332	0,3253	0,4340	0,359	0,4314	0,3279	0,4053	0,3118
$v_i, \text{ м}^3/(\text{кВт ч})$	0,2343	0,3119	0,2338	0,2826	0,2352	0,3095	0,2504	0,3255
$v_{n.cp}, \text{ м/с}$	2,268	2,268	6,804	6,804	13,104	13,104	14,112	14,112

p_m , МПа	0,0596	0,05962	0,1108	0,1108	0,1820	0,1820	0,1934	0,1934
p_e , МПа	1,2524	0,9258	1,2247	0,9945	1,1526	0,8324	1,0585	0,7697
η_{Mi}	0,9545	0,9394	0,9169	0,8996	0,8635	0,8205	0,8454	0,7991
η_e	0,4135	0,3056	0,3980	0,3231	0,3725	0,2690	0,3426	0,2491
v_e , м ³ /(кВт ч)	0,2454	0,3321	0,2550	0,3141	0,2724	0,3772	0,2962	0,4073

2.1.8 Основные параметры цилиндра двигателя

Литраж двигателя при $n=5200$ мин⁻¹

$$V_L = 30\tau N_e / (p_e n) = 30 \cdot 4 \cdot 79,76 / (1,1526 \cdot 5200) = 1,5969 \text{ л.} \quad (2.46)$$

Рабочий объем одного цилиндра

$$V_h = V_L / i = 1,5969 / 4 = 0,399 \text{ л.} \quad (2.47)$$

Диаметр цилиндра:

$$D = 2 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{V_h}{\pi \cdot S}} = 2 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{0,399}{3,14 \cdot 75,6}} = 82 \text{ мм} \quad (2.48)$$

Окончательно принимаем $S = 75,6$ мм и $D = 82$ мм.

Основные параметры и показатели двигателя определяем по окончательно принятым значениям S и D :

- площадь поршня

$$F_n = \pi D^2 / (4 \cdot 100) = 3,14 \cdot 82^2 / 400 = 52,78 \text{ см}^2 \quad (2.49)$$

- литраж двигателя

$$V_L = \pi D^2 S i / (4 \cdot 10^6) = 3,14 \cdot 82^2 \cdot 75,6 \cdot 4 / (4 \cdot 10^6) = 1,5969 \text{ л.} \quad (2.50)$$

- мощность двигателя при $n=5200 \text{ мин}^{-1}$

$$N_e = p_e V n / 30 \tau = 1,1526 \cdot 1,5969 \cdot 5200 / 30 \cdot 4 = 79,76 \text{ кВт} \quad (2.51)$$

- крутящий момент при $n=5200 \text{ мин}^{-1}$

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \frac{N_e}{n} = \frac{3 \cdot 10^4}{3,14} \frac{79,76}{5200} = 146,48 \text{ Н·м} \quad (2.52)$$

- часовой расход топлива при $n=5600 \text{ об/мин}$

$$V_T = N_e v_e = N_e v_e = 79,76 \cdot 0,2724 = 21,7338 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (2.53)$$

- литровая мощность двигателя

$$N_{л} = N_e / V_{л} = 79,76 / 1,5969 = 49,94 \text{ кВт/л} \quad (2.54)$$

Для остальных режимов окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 7.

Таблица 7 - Основные параметры и показатели двигателя ($\varepsilon=22$)

Параметры	Основные параметры и показатели двигателя			
	900	2700	5200	5600
$n, \text{мин}^{-1}$	900	2700	5200	5600
$N_e, \text{кВт}$	15,782	51,7576	79,7686	78,588
$M_e, \text{Н·м}$	167,452	183,055	146,487	134,3523
$V_T, \text{м}^3 / \text{ч}$	3,874	13,2008	21,73	23,274
$N_{л}, \text{кВт/л}$	49,94			

Таблица 8 - Основные параметры и показатели двигателя ($\varepsilon=10$)

Параметры	Основные параметры и показатели двигателя			
$n, \text{мин}^{-1}$	900	2700	5200	5600
$N_e, \text{кВт}$	11,089	35,73	57,610	55,902
$M_e, \text{Н} \cdot \text{м}$	107,659	123,457	105,796	97,823
$V_T, \text{м}^3 / \text{ч}$	3,674	13,202	21,53	22,274
$N_l, \text{кВт/л}$	36,076			

2.1.9 Построение индикаторной диаграммы

Построение индикаторной диаграммы осуществляется на режиме номинальной мощности, на основании данных, полученных в тепловом расчете.

2.2 Тепловой баланс

Общее количество теплоты, введенной в двигатель при номинальном скоростном режиме

$$Q_0 = H_u G_T = 35463 \cdot 21,73 = 770760,426 \text{ кДж/ч} \quad (2.55)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 секунду

$$Q_e = 1000 N_e = 1000 \cdot 79,76 \cdot 3600 / 1000 = 287167,22 \text{ кДж/с} \quad (2.56)$$

Теплота, передаваемая окружающей среде

$$Q_B = ciD^{1+2m} n^m (H_u - \Delta H_u) / (\alpha H_u) = 0,5 \cdot 4 \cdot 8,2^{1+2 \cdot 0,7} \cdot 5200^{0,7} \cdot (35463 - 0) / (1 \cdot 35463) = 67279,51 \text{ Дж/с} = 242206,3 \text{ кДж/ч} \quad (2.57)$$

Теплота, унесенная отработавшими газами

$$Q_r = (V_T / 22,4) \left\{ M_2 \left[(mc_v'')_{t_0}^{t_r} \right] \cdot t_r - \left[M_1 (mc_v)_{t_0}^{20} \right] t_0 \right\} = \frac{21,73}{22,4} \cdot \{10,93 \cdot 24,955 \cdot 722 - 11 \cdot 20,775 \cdot 20\} = 180409,6 \text{ кДж/ч} \quad (2.58)$$

где $(mc_v'')_{t_0}^{t_r} = 24,955 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{град)}$ – теплоемкость отработавших газов (определена методом интерполяции при $\alpha = 1,05$ и $t_r = T_r - 273 = 995 - 273 = 722$ °С).

Неучтенные потери теплоты

$$Q_{\text{отн}} = Q_0 - (Q_e + Q_r + Q_B + Q_{\text{н.с.}}) = 770760,42 - (287167,22 + 180409,6 + 242206,3 + 0) = 60977,33 \quad (2.59)$$

Составляющие теплового баланса представлены в таблице 9 и таблице 10.

Таблица 9 - Параметры теплового баланса (для степени сжатия 22)

Составляющие тепл. баланса	Частота вращения коленчатого вала, об/мин							
	900		2700		5200		5600	
	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч
Теплота, эквивалентная эффективной работе	43200	33,148	158434	39,80	287167,22	37,257	284009,5	34,26
Теплота, передаваемая окружающей среде	61064,17	46,10	123351,2	30,98	242206,3	31,42	289191,4	34,89
Теплота, унесенная отработавшими газами	29020,2	22,22	88659,47	22,27	180409,6	23,40	198393,8	23,93
Неучтенные потери теплоты	8258,79	6,32	27622,03	6,93	60977,33	7,91	57170,32	6,89

Общее количество теплоты, введенное в двигатель с топливом	130594,9	99,9	398066,7	99,9	770760,42	99,9	828765	99,9
--	----------	------	----------	------	-----------	------	--------	------

Таблица 10 - Параметры теплового баланса (для степени сжатия 10)

Составляющие тепл. баланса	Частота вращения коленчатого вала, об/мин							
	900		2700		5200		5600	
	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч
Теплота, эквивалентная эффективной работе	39921,02	30,56	128644,6	32,31	207398,44	26,90	206520,62	24,91
Теплота, передаваемая окружающей среде	39310,71	46,75	157153,1	39,47	355217,44	46,08	373853,72	45,10
Теплота, унесенная отработавшими газами	24883,790	19,05	78616,65	19,74	166383,74	21,58	174205,78	21,01
Неучтенные потери теплоты	4725,97	3,61	33652,17	8,45	41760,796	5,41	74184,9	8,95
Общее количество теплоты, введенное в двигатель с топливом	130594,7	99,9	398066,7	99,9	770760,42	99,9	828765	99,9

3 Кинематический расчет

Величина отношения радиуса кривошипа к длине шатуна предварительно была принята в тепловом расчете $\lambda=0,31239$ При этих условиях:

$$L_{ш} = R/\lambda = 37,8/0,31239 = 121 \text{ мм.} \quad (3.1)$$

Перемещение поршня рассчитывается по формуле

$$S_x = r \left[(1 - \cos \phi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\phi) \right]; \text{ мм.} \quad (3.2)$$

Скорость поршня рассчитывается по следующей формуле:

$$V_n = \omega R \left(\sin \phi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\phi \right); \text{ м/с} \quad (3.3)$$

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

$$\omega = 3,14 \cdot 5200/30 = 544,543 \text{ рад/с.} \quad (3.4)$$

Средняя скорость поршня

$$v_{п.ср.} = S_n/30 = 0,0756 \cdot 5200/30 = 13,104 \text{ м/с.} \quad (3.5)$$

Ускорение поршня рассчитывается по следующей формуле

$$j = \omega^2 R (\cos \phi + \lambda \cos 2\phi), \text{ м/с}^2. \quad (3.6)$$

Диаграмма перемещения, скорости и ускорения поршня приведена на плакатах.

Таблица 11 — Результаты кинематического расчета

φ, град	Sx, м	v _п , м/с	J _п , м ² /с
0	0,0000	0,0000	14709,7423
10	0,0008	4,1241	14539,9012
20	0,0030	8,0734	14034,0703
30	0,0065	11,6841	13208,1092
40	0,0113	14,8141	12087,9288
50	0,0170	17,3512	10705,9885
60	0,0233	19,2182	9105,5664
70	0,0301	20,3757	7335,1485
80	0,0370	20,8208	5447,4290
90	0,0437	20,5837	3501,3733
100	0,0501	19,7212	1555,0655
110	0,0559	18,3090	-332,5698
120	0,0611	16,4338	-2102,8479
130	0,0656	14,1849	-3703,5407
140	0,0692	11,6478	-5085,2597
150	0,0720	8,8997	-6205,4646
160	0,0740	6,0067	-7031,6144
170	0,0752	3,0245	-7537,1692
180	0,0756	0,0000	-7707,1898
190	0,0752	-3,0245	-7537,3854
200	0,0740	-6,0067	-7031,3261
210	0,0720	-8,8997	-6205,6331
220	0,0692	-11,6478	-5085,3234
230	0,0656	-14,1849	-3703,2873
240	0,0611	-16,4338	-2103,1222
250	0,0559	-18,3090	-332,4573
260	0,0501	-19,7212	1555,1897
270	0,0437	-20,5837	3501,0951
280	0,0370	-20,8208	5447,6759
290	0,0301	-20,3757	7335,0974
300	0,0233	-19,2182	9105,3877
310	0,0170	-17,3512	10706,2780
320	0,0113	-14,8141	12087,7213
330	0,0065	-11,6841	13208,0964
340	0,0030	-8,0734	14034,2949
350	0,0008	-4,1241	14539,6146
360	0,0000	0,0000	14709,9001

4 Динамический расчет двигателя работающего на газе

4.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма

С учетом диаметра цилиндра, отношения S/D , рядного расположения цилиндров

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

$$m_n = m_n \cdot F_n = 80 \cdot 0,005278 = 0,4223 \text{ кг.} \quad (4.1)$$

- масса шатуна (для стального кованного шатуна $m_{\text{ш}}=100$ кг/м²)

$$m_m = m_m \cdot F_n = 100 \cdot 0,005278 = 0,52783 \text{ кг.} \quad (4.2)$$

- масса неуравновешенных частей одного колена вала без противовесов (для стального кованого вала $m_{\text{к}}=120$ кг/м²)

$$m_k = m_k \cdot F_n = 120 \cdot 0,005278 = 0,63340 \text{ кг.} \quad (4.3)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца

$$m_{\text{ш.п.}} = 0,275 \cdot m_{\text{ш}} = 0,275 \cdot 0,52783 = 0,14515 \text{ кг.} \quad (4.4)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа

$$m_{\text{ш.к.}} = 0,725 \cdot m_{\text{ш}} = 0,725 \cdot 0,52783 = 0,38268 \text{ кг.} \quad (4.5)$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение

$$m_j = m_n + m_{ш.н} = 0,4223 + 0,14515 = 0,56745 \text{ кг.} \quad (4.6)$$

Массы, совершающие вращательное движение

$$m_R = m_k + m_{ш.к} = 0,6334 + 0,38268 = 1,0161 \text{ кг.} \quad (4.7)$$

4.2 Силы инерции

Определяем значения силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс

$$P_j = -m_j \cdot j = 0,746 \text{ j} \quad (4.8)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна одного цилиндра

$$K_{Rш} = -m_{ш.к.} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -0,38268 \cdot 0,0378 \cdot 544,54^2 \cdot 10^{-3} = -4289,35 \text{ кН} \quad (4.9)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа

$$K_{Rк} = -m_k \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -0,6334 \cdot 0,0378 \cdot 544,54^2 \cdot 10^{-3} = -7099,61 \text{ кН} \quad (4.10)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа:

$$K_{R\Sigma} = K_{Rш} + K_{Rк} = -4289,35 + (-7099,61) = -11389 \text{ кН} \quad (4.11)$$

4.3 Суммарные силы

Сила, сосредоточенная на оси поршневого пальца

$$P = \Delta P_r + P_j \quad (4.12)$$

Нормальная сила

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

Сила (кН), действующая вдоль шатуна

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

Сила (кН), действующая по радиусу кривошипа

$$K = \frac{P \cdot \cos(\phi + \beta)}{\cos \beta} \quad (4.15)$$

Полная тангенциальная сила (кН)

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

Результаты динамического расчета графически представлены на плакатах.

4.4 Крутящие моменты

Крутящий момент одного цилиндра

$$M_{кр.ц} = T \cdot R \quad (4.17)$$

Средний крутящий момент двигателя:

- по данным теплового расчета

$$M_{кр.ц.} = M_i = \frac{M_e}{\eta_M} = \frac{172}{0,866} = 198,61 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.18)$$

- по площади, заключенной под кривой $\dot{I}_{\text{ед}}$.

$$M_{\text{кр.ср.}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{M_{\text{кр.}i} + M_{\text{кр.}i+1}}{2} \right) \cdot 10^\circ}{360^\circ} = 189 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (4.19)$$

Ошибка

$$\Delta = (198,61 - 189) \cdot 100 / 198,61 = 4,4\%. \quad (4.20)$$

Максимальный и минимальный крутящие моменты:

$$M_{\text{кр.маx}} = 435,5 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (4.21)$$

$$M_{\text{кр.миn}} = -71,0 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (4.22)$$

4.5 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала

Таблица 12 - Результаты расчета сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала

$\phi,^\circ$	Полные силы, Н					
	T	K	P _K	$R_{ш.ш}$	K_{PK}	R_K
0	0	-7929	-12218	12218	-19397	22924,22
10	-1865	-8008	-12297	12438	-18895	22621,029
20	-3357	-6842	-11132	11627	-16568	20240,401
30	-4192	-5179	-9468	10354	-14748	18020,292
40	-4236	-3359	-7649	8744	-13124	15770,117
50	-3534	-1735	-6025	6985	-11970	13859,166
60	-2281	-582	-4871	5378	-11428	12630,474
70	-765	-39	-4329	4396	-11488	12300,123
80	711	-99	-4388	4446	-12016	12812,224
90	1908	-627	-4917	5274	-12812	13855,003
100	2686	-1423	-5712	6312	-13670	15057,394
110	3020	-2281	-6571	7231	-14432	16142,757
120	2970	-3043	-7333	7912	-15010	16967,045
130	2645	-3621	-7910	8341	-15382	17497,898
140	2161	-3993	-8283	8560	-15581	17777,08

150	1610	-4192	-8481	8633	-15661	17882,635
160	1055	-4272	-8561	8626	-15681	17897,167
170	519	-4292	-8582	8597	-15683	17884,695
180	0	-4294	-8583	8583	-15684	17879,072
190	-519	-4295	-8584	8600	-15682	17885,441
200	-1057	-4284	-8573	8638	-15607	17838,015
210	-1620	-4218	-8507	8660	-15429	17693,193
220	-2186	-4040	-8329	8611	-15081	17366,761
230	-2698	-3693	-7982	8426	-14532	16798,275
240	-3068	-3144	-7433	8041	-13797	15969,642
250	-3188	-2408	-6698	7418	-12957	14930,342
260	-2960	-1568	-5858	6563	-12157	13815,472
270	-2336	-768	-5057	5571	-11578	12848,449
280	-1359	-189	-4478	4680	-11379	12304,025
290	-190	10	-4280	4284	-11617	12382,124
300	896	-229	-4518	4606	-12152	12996,008
310	1555	-763	-5053	5287	-12532	13601,386
320	1441	-1143	-5432	5620	-11811	13079,781
330	341	-422	-4711	4723	-8329	9575,2715
340	-1501	3060	-1230	1940	-533	2012,3866
350	-2528	10856	6566	7036	10395	12552,506
360	0	21784	17495	17495	23369	29191,941
370	8095	34758	30469	31525	25439	40509,235
380	16333	33290	29001	33284	6895	33990,397
390	14799	18284	13995	20368	-2969	20583,443
400	10618	8420	4131	11393	-7433	13603,45
410	8056	3956	-333	8063	-9661	12583,355
420	6778	1728	-2561	7245	-11064	13225,588
430	6345	325	-3965	7482	-12266	14368,146
440	6309	-877	-5167	8155	-13467	15743,576
450	6319	-2078	-6367	8970	-14651	17178,738
460	6156	-3262	-7551	9742	-15723	18496,891
470	5737	-4334	-8624	10358	-16594	19561,344
480	5080	-5205	-9494	10768	-17218	20307,832
490	4259	-5829	-10118	10978	-17603	20745,559
500	3362	-6214	-10503	11028	-17797	20937,22
510	2462	-6408	-10698	10977	-17632	20769,555
520	1541	-6243	-10532	10644	-17268	20284,612
530	710	-5879	-10168	10193	-16856	19698,064
540	0	-5467	-9756	9756	-16427	19106,2
550	-609	-5038	-9328	9348	-16208	18710,228
560	-1174	-4758	-9047	9123	-16146	18461,933
570	-1791	-4662	-8951	9128	-16050	18271,981
580	-2402	-4440	-8729	9053	-15828	17883,849
590	-2948	-4034	-8323	8830	-15423	17235,583
600	-3331	-3413	-7702	8392	-14802	16308,615
610	-3435	-2595	-6884	7694	-13984	15154,793
620	-3147	-1668	-5957	6737	-13057	14154,793
630	-2405	-791	-5080	5621	-12180	13919,033
640	-1229	-171	-4460	4626	-11560	12853,8

650	246	-13	-4302	4309	-11402	12304,419
660	1780	-454	-4743	5066	-11843	12602,417
670	3074	-1510	-5799	6563	-12899	13857,932
680	3839	-3044	-7333	8277	-14433	15855,387
690	3875	-4788	-9077	9869	-16176	18171,224
700	3137	-6393	-10683	11134	-17782	20337,652
710	1752	-7523	-11812	11941	-18912	21945,726
720	0	-7929	-12218	12218	-19318	22710,873

Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа

$$P_K = K + K_{Rш} = (K - 4289,345) \text{ Н.} \quad (4.23)$$

Среднее значение $R_{\phi, \phi}$ определяется по развернутой диаграмме

$$R_{ш.ш.ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{ш.ш.i} + R_{ш.ш.i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 9535 \text{ Н.} \quad (4.24)$$

Таблица 13 – Определение суммарных сил, действующих по каждому лучу диаграммы износа шатунной шейки

$R_{ш.ш.i}$	Значения $R_{шш}$ в Н, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	12218	12218	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12218
10	12438	12438	12438	0	0	0	0	0	0	0	0	12438
20	11627	11627	11627	0	0	0	0	0	0	0	0	11627
30	10354	10354	10354	0	0	0	0	0	0	0	0	10354
40	8744	8744	8744	0	0	0	0	0	0	0	0	8744
50	6985	6985	6985	69	0	0	0	0	0	0	0	0
60	5378	5378	5378	0	0	0	0	0	0	0	0	5378
70	4396	4396	4396	0	0	0	0	0	0	0	0	4396
80	4446	4446	0	0	0	0	0	0	0	0	4446	4446
90	5274	5274	0	0	0	0	0	0	0	0	5274	5274
100	6312	6312	0	0	0	0	0	0	0	0	6312	6312
110	7231	7231	0	0	0	0	0	0	0	0	7231	7231
120	7912	7912	0	0	0	0	0	0	0	0	7912	7912
130	8341	8341	0	0	0	0	0	0	0	0	8341	8341
140	8560	8560	0	0	0	0	0	0	0	0	8560	8560
150	8633	8633	0	0	0	0	0	0	0	0	8633	8633
160	8626	8626	0	0	0	0	0	0	0	0	8626	8626
170	8597	8597	0	0	0	0	0	0	0	0	8597	8597
180	8583	8583	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8583
190	8600	8600	8600	0	0	0	0	0	0	0	0	8600
200	8638	8638	8638	0	0	0	0	0	0	0	0	8638
220	8660	8660	8660	0	0	0	0	0	0	0	0	8660
230	8611	8611	8611	0	0	0	0	0	0	0	0	8611
240	8426	8426	8426	0	0	0	0	0	0	0	0	8426
250	8041	8041	8041	0	0	0	0	0	0	0	0	8041
260	7418	7418	7418	0	0	0	0	0	0	0	0	7418

270	6563	6563	6563	0	0	0	0	0	0	0	0	6563
280	5571	5571	5571	0	0	0	0	0	0	0	0	5571
290	4680	4680	4680	0	0	0	0	0	0	0	0	4680
300	4284	4284	4284	0	0	0	0	0	0	0	0	4284
310	4606	4606	0	0	0	0	0	0	0	0	4606	4606
320	5287	5287	0	0	0	0	0	0	0	0	5287	5287
330	5620	5620	0	0	0	0	0	0	0	0	5620	5620
340	4723	4723	0	0	0	0	0	0	0	0	4723	4723
350	1940	1940	1940	19	0	0	0	0	0	0	0	0
360	7036	7036	0	0	0	0	0	0	0	0	7036	7036
370	17495	17495	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17495
380	33284	33284	33284	0	0	0	0	0	0	0	0	33284
390	20368	20368	20368	20	0	0	0	0	0	0	0	0
400	0	11393	11393	11	11393	0	0	0	0	0	0	0
410	0	0	0	0	0	0	0	0	8063	8063	8063	8063
420	0	0	0	0	0	0	0	0	7245	7245	7245	7245
430	7482	0	0	0	0	0	0	0	0	7482	7482	7482
440	8155	0	0	0	0	0	0	0	0	8155	8155	8155
450	8970	0	0	0	0	0	0	0	0	8970	8970	8970
460	9742	0	0	0	0	0	0	0	0	9742	9742	9742
470	10358	0	0	0	0	0	0	0	0	10358	10358	10358
480	10768	10768	0	0	0	0	0	0	0	0	10768	10768
490	10978	10978	0	0	0	0	0	0	0	0	10978	10978
500	11028	11028	0	0	0	0	0	0	0	0	11028	11028
510	10977	10977	0	0	0	0	0	0	0	0	10977	10977
520	10644	10644	0	0	0	0	0	0	0	0	10644	10644
530	10193	10193	0	0	0	0	0	0	0	0	10193	10193
540	9756	9756	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9756
550	9348	9348	9348	0	0	0	0	0	0	0	0	9348
560	9123	9123	9123	0	0	0	0	0	0	0	0	9123
570	9128	9128	9128	0	0	0	0	0	0	0	0	9128
580	9053	9053	9053	0	0	0	0	0	0	0	0	9053
590	8830	8830	8830	0	0	0	0	0	0	0	0	8830
600	8392	8392	8392	0	0	0	0	0	0	0	0	8392
610	7694	7694	7694	0	0	0	0	0	0	0	0	7694
620	6737	6737	6737	0	0	0	0	0	0	0	0	6737
630	5621	5621	5621	0	0	0	0	0	0	0	0	5621
640	4626	4626	4626	0	0	0	0	0	0	0	0	4626
650	4309	4309	0	0	0	0	0	0	0	0	4309	4309
660	5066	5066	0	0	0	0	0	0	0	0	5066	5066
670	6563	6563	0	0	0	0	0	0	0	0	6563	6563
680	8277	8277	0	0	0	0	0	0	0	0	8277	8277
690	9869	9869	0	0	0	0	0	0	0	0	9869	9869
700	11134	11134	0	0	0	0	0	0	0	0	11134	11134
710	11941	11941	0	0	0	0	0	0	0	0	11941	11941
720	12218	12218	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12218
$\Sigma R_{u.u.i}$	697970	664656	381432	40686	11393	0	0	0	15308	60015	282968	683985

4.6 Силы, действующие на колено вала

Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа

$$K_{Pk} = P_k + K_{Rk} = (P_k - 7099,6), H \quad (4.25)$$

Результирующая сила, действующая на колено вала

$$R_k = \sqrt{R_{u.u}^2 + K_{Rk}^2} \quad (4.26)$$

4.7 Силы, действующие на коренные шейки

Порядок работы двигателя 1-3-4-2. Следовательно:

-первый кривошип $\phi_1 = 0^\circ$,

-третий $\phi_3 = 540^\circ$;

-четвертый $\phi_4 = 360^\circ$;

-второй $\phi_2 = 180^\circ$.

Сила, действующая на первую коренную шейку

$$R_{к.ш.1} = -0,5 \cdot R_{k1} \quad (4.28)$$

Сила, действующая на вторую коренную шейку

$$R_{к.ш.2} = \sqrt{T_{k2}^2 + K_{k2}^2}, \quad (4.29)$$

где:

$$T_{k2} = -0,5 \cdot (T_1 + T_2 \cdot \cos \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} \cdot \sin \gamma_{k(1-2)}) = -0,5 \cdot (T_1 + T_2 \cdot \cos 180^\circ - K_{pk2} \cdot \sin 180^\circ) = -0,5 \cdot (T_1 - T_2); \quad (4.30)$$

$$K_{k2} = -0,5 \cdot (K_{pk1} + T_2 \cdot \sin \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} \cdot \cos \gamma_{k(1-2)}) = -0,5 \cdot (T_1 + T_2 \cdot \sin 180^\circ - K_{pk2} \cdot \cos 180^\circ) = -0,5 \cdot (K_{pk1} - K_{pk2}). \quad (4.31)$$

Расчет силы $R_{к.ш.2}$ приведен в таблице 26.

Сила, действующая на третью коренную шейку

$$R_{к.ш.3} = \sqrt{T_{к3}^2 + K_{к3}^2}, \quad (4.32)$$

где:

$$T_{к3} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \sin \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos 0^\circ - K_{pk3} * \sin 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (T_2 + T_3); \quad (4.33)$$

$$K_{к2} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \cos \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin 0^\circ - K_{pk3} * \cos 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (K_{pk2} - K_{pk3}). \quad (4.34)$$

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

Таблица 14 - 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		
	$R_{к.ш.1}$	ϕ_1	T_1, H	K'_{pk1}	ϕ_2	T_2, H	K'_{pk2}	$T_{к2}, H$	$K_{к2}, H$	$R_{к.ш.2}$	ϕ_3	T_3, H	K'_{pk3}	$T_{к3}$	$K_{к3}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
6109	0	0	-6109	180	0	-6109	0	1818	1818	540	0	-6109	0	-2638	2638
6219	10	-932	-6149	190	-932	-6149	-673	1856	1974	550	-932	-6149	3115	-9086	9605
5813	20	-1679	-5566	200	-1679	-5566	-1150	1279	1720	560	-1679	-5566	6488	-8935	11042
5177	30	-2096	-4734	210	-2096	-4734	-1286	480	1372	570	-2096	-4734	5304	-2263	5766
4372	40	-2118	-3824	220	-2118	-3824	-1025	-340	1080	580	-2118	-3824	3191	1759	3643
3492	50	-1767	-3012	230	-1767	-3012	-418	-979	1064	590	-1767	-3012	2261	3179	3901
2689	60	-1140	-2435	240	-1140	-2435	394	-1281	1340	600	-1140	-2435	2248	3716	4343
2198	70	-383	-2164	250	-383	-2164	1211	-1185	1694	610	-383	-2164	2790	4147	4998
2223	80	356	-2194	260	356	-2194	1836	-735	1977	620	356	-2194	3510	4778	5929
2637	90	954	-2458	270	954	-2458	2122	-70	2123	630	954	-2458	4113	5642	6982
3156	100	1343	-2856	280	1343	-2856	2022	617	2114	640	1343	-2856	4421	6632	7970
3616	110	1510	-3285	290	1510	-3285	1605	1146	1972	650	1510	-3285	4378	7597	8769
3956	120	1485	-3666	300	1485	-3666	1037	1407	1748	660	1485	-3666	4025	8414	9327
4170	130	1323	-3955	310	1323	-3955	545	1429	1529	670	1323	-3955	3452	9014	9653
4280	140	1080	-4141	320	1080	-4141	360	1425	1470	680	1080	-4141	2761	9393	9790
4316	150	805	-4241	330	805	-4241	634	1885	1989	690	805	-4241	2036	9589	9803
4313	160	527	-4281	340	527	-4281	1278	3666	3882	700	527	-4281	1298	9547	9635
4299	170	259	-4291	350	259	-4291	1523	7574	7726	710	259	-4291	615	9375	9395
4292	180	0	-4292	360	0	-4292	0	13039	13039	720	0	-4292	0	9170	9170
4300	190	-260	-4292	370	-260	-4292	-4307	19527	19996	10	-260	-4292	-564	8956	8974
4319	200	-529	-4287	380	-529	-4254	-8695	18754	20672	20	-529	-4254	-1116	8810	8880
4330	210	-810	-4254	390	-810	-4254	-8210	11251	13928	30	-810	-4254	-1705	8729	8894
4306	220	-1093	-4165	400	-1093	-4165	-6402	6230	8933	40	-1093	-4165	-2294	8529	8832

4213	230	-1349	-3991	410	-1349	-3991	-5377	3824	6598	50	-1349	-3991	-2823	8153	8627
4021	240	-1534	-3716	420	-1534	-3716	-4923	2436	5492	60	-1534	-3716	-3200	7568	8216
3709	250	-1594	-3349	430	-1594	-3349	-4766	1367	4959	70	-1594	-3349	-3311	6791	7555
3281	260	-1480	-2929	440	-1480	-2929	-4635	345	4647	80	-1480	-2929	-3054	5907	6650
2785	270	-1168	-2529	450	-1168	-2529	-4327	-655	4376	90	-1168	-2529	-2370	5069	5596
2340	280	-679	-2239	460	-679	-2239	-3757	-1536	4059	100	-679	-2239	-1294	4469	4653
2142	290	-95	-2140	470	-95	-2140	-2964	-2172	3674	110	-95	-2140	28	4291	4291
2303	300	448	-2259	480	448	-2259	-2092	-2488	3251	120	448	-2259	1338	4631	4820
2643	310	777	-2526	490	777	-2526	-1352	-2533	2871	130	777	-2526	2314	5426	5899
2810	320	721	-2716	500	721	-2716	-960	-2535	2711	140	721	-2716	2640	6383	6907
2362	330	171	-2356	510	171	-2356	-1060	-2993	3176	150	171	-2356	2108	6894	7209
970	340	-751	-615	520	-751	-615	-1521	-4651	4894	160	-751	-615	818	5956	6012
3518	350	-1264	3283	530	-1264	3283	-1619	-8367	8522	170	-1264	3283	-388	2623	2651
8747	360	0	8747	540	0	8747	0	-13625	13625	180	0	8747	0	-2638	2638
15763	370	4047	15234	550	4047	15234	4352	-19898	20369	190	4047	15234	3115	-9086	9605
16642	380	8166	14500	560	8166	14500	8754	-19024	20941	200	8166	14500	6488	-8935	11042
10184	390	7400	6997	570	7400	6997	8295	-11473	14157	210	7400	6997	5304	-2263	5766
5697	400	5309	2066	580	5309	2066	6510	-6430	9150	220	5309	2066	3191	1759	3643
4031	410	4028	-167	590	4028	-167	5502	-3995	6799	230	4028	-167	2261	3179	3901
3623	420	3389	-1281	600	3389	-1281	5054	-2571	5670	240	3389	-1281	2248	3716	4343
3741	430	3173	-1982	610	3173	-1982	4890	-1460	5103	250	3173	-1982	2790	4147	4998
4078	440	3155	-2583	620	3155	-2583	4728	-395	4745	260	3155	-2583	3510	4778	5929
4485	450	3159	-3184	630	3159	-3184	4362	644	4409	270	3159	-3184	4113	5642	6982
4871	460	3078	-3776	640	3078	-3776	3692	1545	4003	280	3078	-3776	4421	6632	7970
5179	470	2869	-4312	650	2869	-4312	2746	2161	3494	290	2869	-4312	4378	7597	8769
5384	480	2540	-4747	660	2540	-4747	1650	2376	2892	300	2540	-4747	4025	8414	9327
5489	490	2129	-5059	670	2129	-5059	592	2160	2239	310	2129	-5059	3452	9014	9653
5514	500	1681	-5252	680	1681	-5252	-238	1585	1603	320	1681	-5252	2761	9393	9790
5489	510	1231	-5349	690	1231	-5349	-707	810	1075	330	1231	-5349	2036	9589	9803
5322	520	771	-5266	700	771	-5266	-798	-75	801	340	771	-5266	1298	9547	9635
5096	530	355	-5084	710	355	-5084	-521	-822	973	350	355	-5084	615	9375	9395
4878	540	0	-4878	720	0	-4878	0	-1231	1231	360	0	-4878	0	9170	9170
4674	550	-304	-4664	730	-304	-4664	628	-1485	1612	370	-304	-4664	-564	8956	8974
4561	560	-587	-4523	740	-587	-4523	1091	-1042	1509	380	-587	-4523	-1116	8777	8848
4564	570	-895	-4475	750	-895	-4475	1200	-259	1228	390	-895	-4475	-1705	8729	8894
4527	580	-1201	-4364	760	-1201	-4364	917	540	1064	400	-1201	-4364	-2294	8529	8832
4415	590	-1474	-4162	770	-1474	-4162	293	1149	1186	410	-1474	-4162	-2823	8153	8627
4196	600	-1666	-3851	780	-1666	-3851	-525	1416	1510	420	-1666	-3851	-3200	7568	8216
3847	610	-1717	-3442	790	-1717	-3442	-1335	1278	1848	430	-1717	-3442	-3311	6791	7555
3369	620	-1574	-2979	800	-1574	-2979	-1929	784	2083	440	-1574	-2979	-3054	5907	6650
2810	630	-1202	-2540	810	-1202	-2540	-2156	82	2158	450	-1202	-2540	-2370	5069	5596
2313	640	-614	-2230	820	-614	-2230	-1957	-626	2055	460	-614	-2230	-1294	4469	4653
2154	650	123	-2151	830	123	-2151	-1387	-1134	1792	470	123	-2151	28	4291	4291
2533	660	890	-2372	840	890	-2372	-595	-1295	1425	480	890	-2372	1338	4631	4820
3282	670	1537	-2899	850	1537	-2899	214	-1055	1077	490	1537	-2899	2314	5426	5899
4139	680	1919	-3667	860	1919	-3667	839	-475	964	500	1919	-3667	2640	6383	6907
4935	690	1937	-4538	870	1937	-4538	1132	298	1171	510	1937	-4538	2108	6894	7209
5567	700	1568	-5341	880	1568	-5341	1041	1061	1486	520	1568	-5341	818	5956	6012
5971	710	876	-5906	890	876	-5906	617	1615	1729	530	876	-5906	-388	2623	2651
6109	720	0	-6109	900	0	-6109	0	1818	1818	540	0	-6109	0	-2638	2638

Диаграммы $R_{к.ш1}$, $R_{к.ш2}$, $R_{к.ш3}$, перестроенные в прямоугольные координаты.

По этим диаграммам определяем:

- для 1 (5)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш1ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш1i} + R_{к.ш1i+1}) / 2) \cdot 10^\circ / 720^\circ = 9325H, \quad (4.35)$$

$$R_{к.ш1max} = 12355H, \quad (4.36)$$

$$R_{к.ш1min} = 4134H. \quad (4.37)$$

- для 2 (4)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш2ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш2i} + R_{к.ш2i+1}) / 2) \cdot 10^\circ / 720^\circ = 3350H,$$

$$R_{к.ш2max} = 16359H,$$

$$R_{к.ш2min} = 1128H.$$

- для 3-й коренной шейки:

$$R_{к.ш3ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш3i} + R_{к.ш3i+1}) / 2) \cdot 10^\circ / 720^\circ = 18058H,$$

$$R_{к.ш3max} = 21090H,$$

$$R_{к.ш3min} = 7251H.$$

Из сравнения диаграмм $R_{к.ш1}$, $R_{к.ш2}$, $R_{к.ш3}$ видно, что максимально нагруженной является 3-я коренная шейка, а минимально нагруженными - 2-я и 4-я шейки.

Таблица 15 - Определение суммарных сил, действующих по каждому лучу диаграммы износа третьей коренной шейки без противовесов

$R_{к.шi}$	Значения $R_{к.шi}$, H , для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	9170	9170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9170
10	8974	8974	0	0	0	0	0	0	0	0	8974	8974
20	8880	8880	0	0	0	0	0	0	0	0	8880	8880
30	8894	8894	0	0	0	0	0	0	0	0	8894	8894

40	8832	8832	0	0	0	0	0	0	0	0	8832	8832
50	8627	8627	0	0	0	0	0	0	0	0	8627	8627
60	8216	8216	0	0	0	0	0	0	0	0	8216	8216
70	7555	7555	0	0	0	0	0	0	0	0	7555	7555
80	6650	6650	0	0	0	0	0	0	0	0	6650	6650
90	5596	5596	0	0	0	0	0	0	0	0	5596	5596
100	4653	4653	0	0	0	0	0	0	0	0	4653	4653
110	4291	4291	4291	0	0	0	0	0	0	0	0	4291
120	4820	4820	4820	0	0	0	0	0	0	0	0	4820
130	5899	5899	5899	0	0	0	0	0	0	0	0	5899
140	6907	6907	6907	0	0	0	0	0	0	0	0	6907
150	7209	7209	7209	0	0	0	0	0	0	0	0	7209
160	6012	6012	6012	0	0	0	0	0	0	0	0	6012
170	2651	2651	0	0	0	0	0	0	0	0	2651	2651
180	2638	2638	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2638
190	9605	9605	0	0	0	0	0	0	0	0	9605	9605
200	11042	0	0	0	0	0	0	0	0	1104	1104	11042
210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5766	5766	5766
220	0	3643	3643	3643	3643	0	0	0	0	0	0	0
230	3901	3901	3901	3901	0	0	0	0	0	0	0	0
240	4343	4343	4343	4343	0	0	0	0	0	0	0	0
250	4998	4998	4998	4998	0	0	0	0	0	0	0	0
260	5929	5929	5929	5929	0	0	0	0	0	0	0	0
270	6982	6982	6982	6982	0	0	0	0	0	0	0	0
280	7970	7970	7970	7970	0	0	0	0	0	0	0	0
290	8769	8769	8769	0	0	0	0	0	0	0	0	8769
300	9327	9327	9327	0	0	0	0	0	0	0	0	9327
310	9653	9653	9653	0	0	0	0	0	0	0	0	9653
320	9790	9790	9790	0	0	0	0	0	0	0	0	9790
330	9803	9803	9803	0	0	0	0	0	0	0	0	9803
340	9635	9635	9635	0	0	0	0	0	0	0	0	9635
350	9395	9395	9395	0	0	0	0	0	0	0	0	9395
360	9170	9170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9170
370	8974	8974	0	0	0	0	0	0	0	0	8974	8974
380	8848	8848	0	0	0	0	0	0	0	0	8848	8848
390	8894	8894	0	0	0	0	0	0	0	0	8894	8894
400	8832	8832	0	0	0	0	0	0	0	0	8832	8832
410	8627	8627	0	0	0	0	0	0	0	0	8627	8627
420	8216	8216	0	0	0	0	0	0	0	0	8216	8216
430	7555	7555	0	0	0	0	0	0	0	0	7555	7555
440	6650	6650	0	0	0	0	0	0	0	0	6650	6650
450	5596	5596	0	0	0	0	0	0	0	0	5596	5596
460	4653	4653	0	0	0	0	0	0	0	0	4653	4653
470	4291	4291	4291	0	0	0	0	0	0	0	0	4291
480	4820	4820	4820	0	0	0	0	0	0	0	0	4820
490	5899	5899	5899	0	0	0	0	0	0	0	0	5899
500	6907	6907	6907	0	0	0	0	0	0	0	0	6907
510	7209	7209	7209	0	0	0	0	0	0	0	0	7209
520	6012	6012	6012	0	0	0	0	0	0	0	0	6012
530	2651	2651	0	0	0	0	0	0	0	0	2651	2651
540	2638	2638	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2638
550	9605	9605	0	0	0	0	0	0	0	0	9605	9605
560	11042	0	0	0	0	0	0	0	0	1104	1104	11042
570	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5766	5766	5766
580	0	3643	3643	3643	3643	0	0	0	0	0	0	0
590	3901	3901	3901	3901	0	0	0	0	0	0	0	0

600	4343	4343	4343	4343	0	0	0	0	0	0	0	0
610	4998	4998	4998	4998	0	0	0	0	0	0	0	0
620	5929	5929	5929	5929	0	0	0	0	0	0	0	0
630	6982	6982	6982	6982	0	0	0	0	0	0	0	0
640	7970	7970	7970	7970	0	0	0	0	0	0	0	0
650	8769	8769	8769	0	0	0	0	0	0	0	0	8769
660	9327	9327	9327	0	0	0	0	0	0	0	0	9327
670	9653	9653	9653	0	0	0	0	0	0	0	0	9653
680	9790	9790	9790	0	0	0	0	0	0	0	0	9790
690	9803	9803	9803	0	0	0	0	0	0	0	0	9803
700	9635	9635	9635	0	0	0	0	0	0	0	0	9635
710	9395	9395	9395	0	0	0	0	0	0	0	0	9395
720	9170	9170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9170
$\sum R_{к.ш.}$	545366	530570	278551	75533	7287	0	0	0	11533	33616	252849	488653

4.8 Уравновешивание двигателя

Центробежные силы инерции рассчитываемого двигателя и их моменты полностью уравновешены

$$\sum K_R = 0; \sum M_R = 0. \quad (4.38)$$

Силы инерции первого порядка и их моменты также уравновешены

$$\sum P_{jI} = 0; \sum M_{jI} = 0. \quad (4.39)$$

Силы инерции второго порядка для всех цилиндров направлены в одну сторону

$$\sum P_{jII} = 4P_{jII} = 4 * m_j * R\omega^2 * \lambda * \cos 2\phi \quad (4.40)$$

Размеры кривошипа. Предварительно принимаем $l = 94$ мм и $l_1 = 70$ мм.

Тогда сила инерции одного противовеса

$$P_{ПП} = -0,5 * P_{ПП3} * l / l_1 = 0,5 * (-16000) * 0,094 / 0,070 = 10743H \quad (4.41)$$

- масса каждого противовеса

$$m_{\text{ПР}} = P_{\text{ПР}} / (p * \omega^2) = 10743 / (0,02 * 586^2) = 1,562 \text{ кг} \quad (4.42)$$

По развернутым диаграммам сил $R_{к.ш.3}^{np}$ и $R_{к.ш.1(5)}^{np}$ определены:

- для 1 (5)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш.1(5)ср}^{np} = F_{1(5)}^{np} / 720^\circ = 913848 / 720^\circ = 1269,2 \text{ Н} \quad (4.43)$$

$$R_{к.ш.1(5)max}^{np} = 4355 \text{ Н} \quad (4.44)$$

$$R_{к.ш.1(5)min}^{np} = -3866 \text{ Н} \quad (4.45)$$

- для 3-й коренной шейки:

$$R_{к.ш.3ср}^{np} = F_3^{np} / 720^\circ = 1402046 / 720^\circ = 1947 \text{ Н}$$

$$R_{к.ш.3max}^{np} = 5090 \text{ Н}$$

$$R_{к.ш.3min}^{np} = -8749 \text{ Н}$$

4.9 Равномерность крутящего момента и равномерность хода двигателя

Равномерность крутящего момента

$$\mu = (M_{кр.max} - M_{кр.min}) / M_{кр.ср.} = [499,87 - (201,57)] / 147,93 = 4,74 \quad (4.46)$$

Избыточная работа крутящего момента

$$L_{изб} = A * 4 * \pi / (4 * 90) = 16961 * 4 * \pi / 360 = 592,05 \text{ Дж} \quad (4.47)$$

Момент инерции движущихся масс двигателя, приведенных к оси коленчатого вала

$$I_0 = L_{изб} / (\delta * \omega^2) = 592,02 / (0,015 * 586^2) = 0,115_{кг} * м^2. \quad (4.48)$$

5 Специальная часть

В действительном цикле двигателя с внешним смесеобразованием основное количество теплоты выделяется на расширении, как и дизельного двигателя. В теоретическом цикле ДВС с увеличением степени сжатия термодинамические процессы газов переходят с одного вида к другому и завершаются подводом теплоты по изотерме. Чтобы обеспечить нормальное прохождение рабочего тела современного ДВС, часть тепла Q_2 необходимо ввести когда поршень движется к ВМТ. Это необходимо с целью доведения температуры до величины T_1 . Угол начала и необходимое количество теплоты Q_2 рассчитывается массой, участвующего в цикле рабочего тела. Остальная часть тепла в размере $Q-Q_2$ вводится на такте расширения.

В газопоршневом ДВС на такте сжатия при достижении в цилиндре необходимого давления подается искра, начинается формирование очага пламени, и затем пламя начинает распространяться по фронту. Рост давления и температуры топливно-воздушной смеси с момента начала формирования очага пламени происходит под воздействием 2-х факторов: ввода тепла и сжатия. В силу того, что такт сжатия в современном ДВС можно отнести к адиабатному лишь условно, так как рост давления и температуры рабочего тела совершается и путем сжатия и путем ввода тепла. А это приводит к нарушению следующих условий цикла Карно:

1. Условие равенства адиабатных циклов расширения и сжатия. Так как тепло в количестве Q_2 вводится на завершающем отрезке такта сжатия в рабочее тело, цикл становится больше ровно на количество отрицательной работы, эквивалентной теплу Q_2 .
2. Снижается протяженность и продолжительность цикла изотермического расширения по углам ПКВ. Вследствие того, что количество тепла Q , которое можно ввести в рабочее тело в ДВС является константой, то ввод части этого тепла в количестве Q_2 на такте сжатия уменьшает его количество на цикле

изотермического расширения до величины $Q-Q_2$. При этом для нейтрализации отрицательной работы, совершаемой теплом Q_2 на такте сжатия, из оставшегося количества тепла $Q-Q_2$ на такте расширения расходуется еще одно количество тепла Q_2 , что существенным образом снижает КПД двигателя.

Применительно к работе современного ДВС в диаграмме цикла Карно отрезок такта адиабатного сжатия, на котором тепло в количестве Q_2 вводится в рабочее тело, должен быть выделен в особый переходный сектор. Часть отрезка такта изотермического расширения по углам ПКВ должна быть уменьшена на величину Q_2 . Соответственно этому, либо величина T_1 должна быть уменьшена, либо величина T_2 должна быть увеличена на количество тепла $2Q_2$ и величину потерянной температуры. Признание массы m рабочего тела константой означает то, что в него невозможно ввести тепла больше, чем Q . А это в свою очередь, что в рабочем цикле современного ДВС без изменения массы рабочего тела невозможно увеличить протяженность цикла изотермического расширения.

В современном ДВС простое уменьшение угла тепловыделения приводит к снижению эффективных характеристик двигателя. В такте сжатия происходит спад давления и температуры топливно-воздушной смеси, что негативно сказывается на формировании и подготовку смеси к горению. При переходе к фазе активного горения на линии расширения объем камеры сгорания и, расстояние на которое пламя должно распространиться оказывается слишком большим, вследствие чего и топливо не успевает сгореть.

Суть равенства циклов адиабатного сжатия и расширения заключается в том, чтобы отрицательную, затраченную на сжатие рабочего тела работу, получить в виде положительной работы адиабатного расширения. Если убрать ввод тепла на такте сжатия и получить необходимую температуру и давление рабочего тела путем сжатия, то тепловая протяженность циклов адиабатного сжатия и расширения становится, примерно, равной и большого влияния на КПД двигателя не оказывают.

При указанном положении поршня давление $P_c = P_z$, но температура намного (примерно на 300°C) меньше, чем в D_1 . Начало распространения

пламени по фронту совпадает с началом движения поршня от ВМТ. Увеличение фронта пламени сопровождается ростом количества выделяемого тепла, температуры и объема газов.

Рассмотрим термодинамический цикл, предлагаемый Г.А. Ибадуллаевым. Это - цикл теплового двигателя с подводом теплоты сначала по изобаре, а затем по изохоре и отводом теплоты по изохоре и с адиабатными процессами сжатия и расширения.

Основу работы составляет смешанный цикл бензинового ДВС со сверхвысокой степенью сжатия, в котором на первом такте производится впуск свежего заряда воздуха (топливно-воздушной смеси), далее следует сжатие этого заряда до давления P_1 , на третьем такте происходит расширение продуктов горения, на четвертом такте производится удаление и выпуск из цилиндра продуктов сгорания. При работе на внешней скоростной характеристике, в зависимости от частоты вращения, на такте впуска производится ограничение наполнения цилиндра свежим зарядом для обеспечения постоянства давления P_1 на рабочем такте, на период распространения пламени по фронту путем синхронизации процесса увеличения объема камеры сгорания и давления рабочего тела. При этом точка начала ввода теплоты находится в ВМТ (верхней мертвой точке) на рабочем такте, часть теплоты вводится при постоянном давлении P_1 , а остальная часть теплоты вводится при увеличивающемся до значения P_z давлении.

На рабочем такте в период распространения пламени по фронту величина P_1 не должна расти, иначе на этом этапе возникнет детонация. Величина P_1 не должна снижаться, иначе двигатель потеряет эффективность. Таким образом, получается что все процессы роста давления рабочего тела и объема камеры сгорания на указанный период должны быть синхронизированы, чтобы давление в камере сгорания не изменялось до окончания процесса распространения пламени по фронту.

После начала процесса полного тепловыделения, давление P_1 должно вырасти до величины P_z , которая также будет переменной величиной для разных циклов.

В замкнутом сосуде неизменного объема при нагревании газа будет происходить повышение давления, при его охлаждении – снижения давления и температуры. Если стенки объема деформируются, то происходит повышение и давления и объема. Повышение давления в этом случае меньше, чем при отсутствии деформации стенок. С началом процесса сгорания интенсивность подвода теплоты такова, что скорость роста давления рабочего тела опережает скорость увеличения объема камеры. В виду этого следует заключение, что скорости увеличения давления рабочего тела и объема камеры сгорания выровнять практически невозможно. Поэтому в камере сгорания происходит досжатие зоны смеси, до которого фронт сгорания еще не дошел.

Очаг пламени развивается в виде огненного шара увеличивающегося в размерах вокруг места искрового разряда. При соприкосновении со стенкой камеры сгорания, шар принимает форму полусферы. Затем соприкоснувшись с днищем поршня, полусфера изменяется, приобретает по краям плоскую цилиндрическую форму.

При дальнейшем горении в точке, которая была очагом пламени, смесь выгорает. Там образуется зона продуктов сгорания. Выгоревшая зона и зона смеси разделяются фронтом пламени. Толщина этого слоя от нескольких долей миллиметра до нескольких сантиметров в зависимости от способа распространения пламени (ламинарный и турбулентный). Именно этом слое и происходит горение с выделением теплоты. За счет выделения теплоты слой нагревается и пытается расшириться.

Чтобы улучшить процессы формирования очага пламени и его распространения по фронту, давление и температура смеси должны быть достаточно высокими. Чтобы не было детонации, они должны быть относительно низкими.

После возникновения очага пламени и начала процесса распространения пламени по фронту область смеси подвергается воздействию противоположных факторов:

- а) Снижение в объеме за счет вовлечения в зону пламени (нейтральный фактор).
- б) Снижение в объеме за счет сжатия давлением, идущим от области пламени (отрицательный).
- в) Снижение в объеме за счет сжатия (отрицательный).
- г) Снижение в объеме из-за теплоотвода в стенки камеры сгорания (положительный).

Если исключить положительные факторы, то окажется, что область пламени в период его увеличения на тактах сжатия и расширения содержит в себе одну общую причину, вызывающую детонацию.

Одним из способов борьбы с детонацией является снижение угла опережения зажигания. На рисунке 1,2,3,4 показаны фрагменты индикаторных диаграмм при различных углах опережения зажигания.

Для двигателя со сверхвысокой степенью сжатия уменьшение УОЗ является важным технологическим решением.

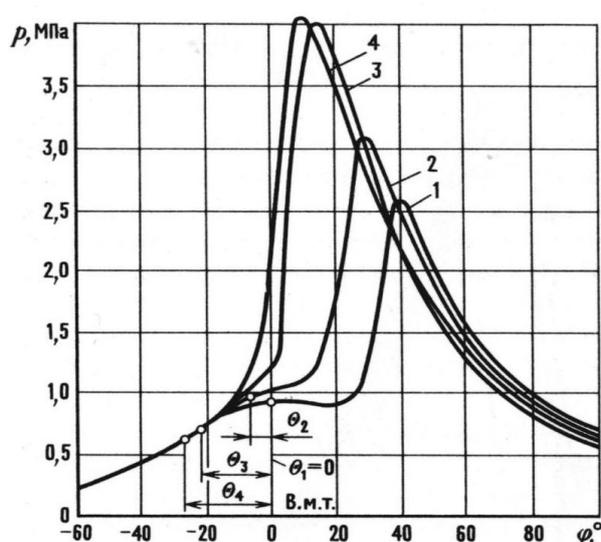


Рисунок 1 – Фрагменты диаграмм при различных УОЗ (Ибадуллаев)

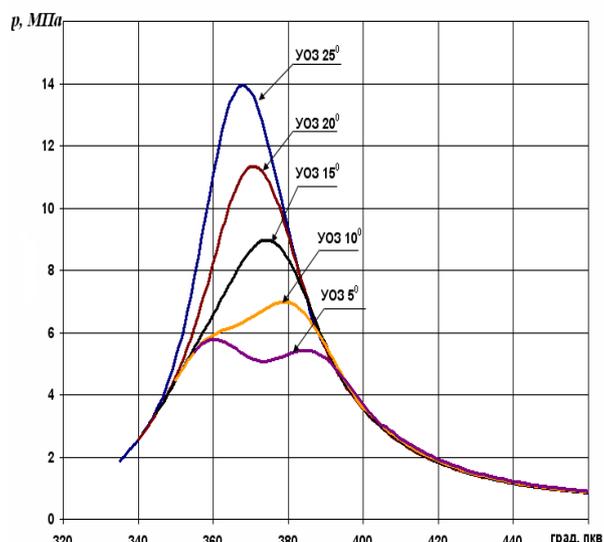


Рисунок 2 – Фрагменты диаграмм при различных УОЗ (проектируемый ДВС)

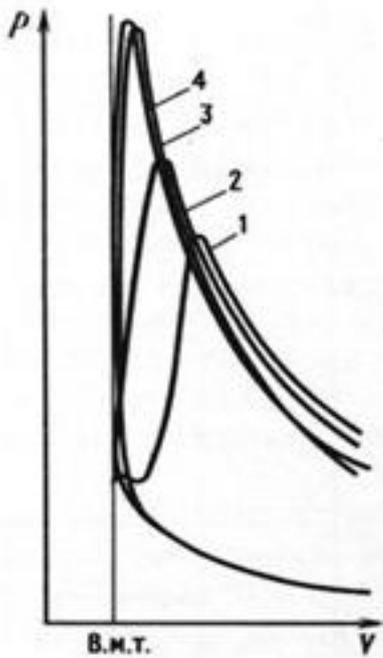


Рисунок 3– Фрагмент диаграмм при различных УОЗ (Ибадуллаев)

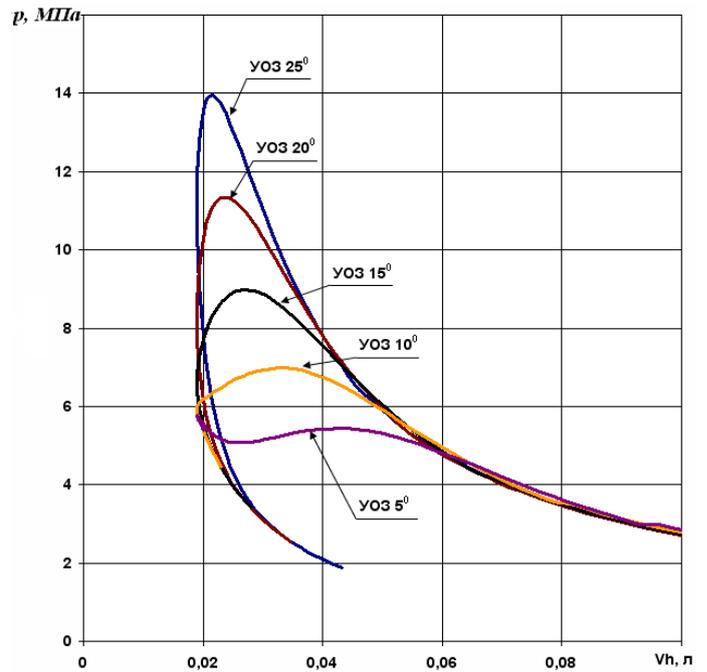


Рисунок 4– Фрагмент диаграмм при различных УОЗ (проектируемый ДВС)

На рисунке 5 представлена зависимость температуры от угла опережения зажигания.

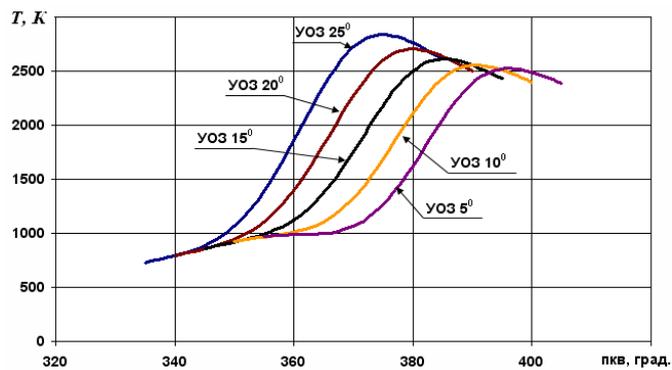


Рисунок 5 – График зависимости температуры от УОЗ.

Как видно из рисунков, при уменьшении УОЗ происходит спад давления, соответственно и температуры.

6 Безопасность и экологичность работы

В разделе «Безопасность и экология» бакалаврской работы рассмотрены вопросы соответствия конструкторской разработки требованиям действующего в РФ технического регламента «о безопасности АТС в эксплуатации» [Специальный технический регламент «о безопасности автотранспортных средств»].

Как известно, согласно статье 1 «Цели технического регламента» он предусматривает использование организационно-технических мероприятий по обеспечению защиты жизни и здоровья граждан, охраны окружающей среды, жизни и здоровья животных и растений при эксплуатации автотранспортных средств.

При создании и эксплуатации автотранспортного средства, двигатель которого работает на газовом топливе должны строго соблюдаться действующие нормы и стандарты установленные Комитетом по внутреннему транспорту ЕЭК ООН, техническими регламентами РФ.

В Таблице 1 приведены границы предельного допустимого содержания углеводородов в отработавших газах газобаллонных автомобилей согласно ГОСТ 17.2.02.06 Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерения содержания оксида углерода и углеводородов в отработавших газах газобаллонных автомобилей. []

Таблица 1- Предельное допустимое содержание углеводородов

Частота вращения коленчатого вала двигателя	Оксид углерода, объёмная доля, % по видам моторного топлива		Углеводороды, объёмная доля, млн ⁻¹ по видам моторного топлива и рабочему объёму для двигателей рабочим объёмом:			
			до 3 дм ³ включительно		свыше 3 дм ³	
	СНГ	СПГ	СНГ	СПГ	СНГ	СПГ
n _{min}	3,0	2,0	1000	700	2200	1800
n _{пов}	2,0	1,5	600	400	900	750

Согласно требованию регламента (п 7.5...7.10) автомобиль оснащенный газобаллонным оборудованием должен проходить следующие требования: Подтекания и каплепадение топлива в системе питания двигателей не допускаются. Запорные устройства топливных баков и устройства перекрытия топлива должны быть работоспособны. Крышки топливных баков должны фиксироваться в закрытом положении, повреждения уплотняющих элементов крышек не допускаются. Газовая система питания газобаллонных АТС должна быть герметична. В соединениях и элементах системы выпуска отработавших газов не должно быть утечек. Рассоединение трубок в системе вентиляции картера двигателя не допускается. Уровень шума выпуска двигателя АТС не должен превышать более, чем на 5 дБ (А) пределов, установленных изготовителем АТС в эксплуатационной документации, а при отсутствии этих пределов в эксплуатационной документации или при недоступности эксплуатационной документации – ограничений. Демонтирование и неработоспособность системы нейтрализации отработавших газов на АТС категорий N и M, оборудованных изготовителем этой системой, не допускаются. На наружной поверхности газовых баллонов АТС с газовой системой питания должны быть нанесены паспортные данные баллонов, в том числе даты действующего и последующего освидетельствования. За безопасность и экологичность АТС, ДВС которого работает на СПГ отвечают ряд элементов конструкции, а именно фильтры, трубопроводы, электромагнитные клапана, вентили. Их проверка на герметичность происходит при нормальном рабочем давлении. Важную роль при подключении трубопроводов к крестовине и переходникам оказывает беспрокладочное нипельное соединение. Спиральные витки в стальных трубопроводах предохраняют их от поломок при деформации рамы АТС. При эксплуатации автомобиля разгерметизация газопроводов может происходить в результате обрыва стальных трубок, что ведет к отказу работы автомобиля.) Для хранения газообразного топлива используют газовые баллоны. В качестве материала для создания баллонов применяют легированные и углеродистые стали.

При работе на газообразном топливе исключается возможность попадания жидкой пленки на зеркало цилиндров двигателя, вследствие чего не происходит смывания масляной пленки и, как следствие, снижается изнашивание цилиндропоршневой группы. При работе на газе срок службы моторного масла увеличивается в 1,5 – 2 раза, в результате чего расход масла в эксплуатации уменьшается на 15 – 20 % , возрастает моторесурс двигателя, срок службы свечей зажигания возрастает.

Так как в процессе сгорания газовое моторное топливо сгорает медленнее и мягче, двигатель не испытывает сильных ударных нагрузок на цилиндр и поршневую группу, как на бензиновом аналоге. Уровень вибрации будет ниже. Для двс работающего на степени сжатия 22 на газовом топливе необходимо изменить угол опережения зажигания во избежании детонации. Давление в цилиндре в процессе сгорания поднимается порядка до 8,5-9 МПа. (Данная информация приведена в приложении А, «Термодинамический расчет газопоршневого двс со степенью сжатия 22»)

Концентрацию нормируемых вредных газообразных компонентов отработавших газов измеряют газоанализаторами. Газоанализаторы должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 51249.

Газообразные углеводородные топлива относятся к наиболее чистым в экологическом отношении моторным топливам.

Помимо процесса сгорания за концентрацию вредных веществ отработавших газов отвечает каталитический нейтрализатор, установленный в выпускной системе. Основу трехкомпонентного нейтрализатора составляет конвертер — блок-носитель, с помещенными во внутрь пористыми стенками(сотаи) На внутренних поверхностях сот находится тонкий слой катализаторов — платины, палладия и родия. Такое пористое строение монолита увеличивает площадь поверхности катализатора в небольшом объеме и обеспечивает лучшее протекание реакций катализатора с токсичными газами.

Блок представляет из себя монолит из огнеупорной керамики, помещенный внутрь корпуса из легированной стали. Между стенками корпуса помещен термоизолирующий материал. Работа трехкомпонентного конвертера сводится к следующему. Выхлопные газы проходят сквозь каналы в керамическом блоке, нагревая его, и при температуре 270°C начинаются восстановительные и окислительные реакции на катализаторе. Но на оптимальный режим работы нейтрализатор выходит при температуре порядка 460-500°C. Термоизоляция в корпусе нейтрализатора необходима, чтобы его температура не слишком колебалась. Нужно отметить, что платина, палладий и родий — это катализаторы, то есть, они значительно ускоряют течение химических реакций

Важным условием работы нейтрализатора является то, что топливно-воздушная смесь при поступлении в цилиндры имела строго определенный состав, а в отработавших газах присутствовало определенное количество воздуха, необходимое для нормально сгорания углеводородов и окиси углерода. Поэтому перед входом в нейтрализатор установлен лямбда-зонд (кислородный датчик), определяющий количество кислорода в выхлопных газах. На основе этой информации электронный блок управления изменяет состав подаваемой в камеры сгорания топливно-воздушной смеси, постоянно поддерживая нормальную работу двигателя и нейтрализатора. Трехкомпонентный каталический нейтрализатор подходит и для использования в автомобиле, работающем на сжатом природном газе.

В соответствии с Техническим регламентом № 609 «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ» экологический класс Евро-5 вводится с 1 января 2016 года. С этого времени, все автомобили, попадающие на территорию России должны соответствовать данному экологическому стандарту.

Исходя из выше изложенного текста, следует, что ДВС, работающий на

сжатом природном газе менее токсичен по сравнению с бензиновыми и дизельными аналогами. Процесс сгорания в ДВС, использующего в качестве рабочего тела СПГ протекает более равномерно и является более мягким, вследствие чего моторесурс ДВС возрастает. Помимо этого ДВС характеризуется меньшей виброакустической возбудимостью. Уровень вибрации корпуса ДВС работающего на СПГ ниже уровня его дизельного аналога, примерно на 2..3 дБА.

В заключении, следует указать, что ДВС разрабатываемый в рамках выпускной работы, соответствует экологическим нормам Евро 4, Евро 5, при его оснащении эффективной системой снижения токсичности отработавших газов, включающей трехкомпонентный каталитический нейтрализатор, оборудованный кислородными датчиками и т.д. Это значит, что потенциально возможно его производство и установка на автомобили.

Необходимо отметить, что улучшение экологической безопасности автомобильного транспорта только путем технологического совершенствования компонентного и химического состава топлив (кстати, это очень сложный и энергоемкий путь) не позволит кардинальным образом защитить окружающую среду от вредного воздействия ОГ автомобильных двигателей. Для решения этой задачи необходимы конструктивные мероприятия по соответствующей модернизации конструкции автомобильных двигателей и транспортных средств: оснащение их комплексными электронными системами управления и катализатором, каталитическими нейтрализаторами ОГ, сажевыми фильтрами и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе произведена расчетная оценка возможностей и эффективности использования двигателя со сверхвысокой степенью сжатия на сжатом природном газе. По результатам работ были сделаны следующие основные выводы:

- предложено использовать СПГ в качестве моторного топлива;
- спроектирован двигатель со сверхвысокой степенью сжатия на базе двигателя ВАЗ 2110 на природном газе;
- проведены расчеты, выбран оптимальный угол опережения зажигания, показана работоспособность двигателя и его основные характеристики и показатели
- эффективный КПД двигателя по результатам расчета увеличивается в среднем на 20-25%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст]/ Колчин, А.И. Демидов В.П. // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа 1980. - с.496.
- 2 Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова//. –3-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1985. - с.456.
- 3 Ховаха, М.С. Автомобильные двигатели – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] /Под редакцией М.С. Ховаха// М.: Машиностроение, 1977. - с.636.
- 4 Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /В.П. Алексеев, Н.А. Иващенко и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова//. –3-е издание, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. - с.528.
- 5 Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /Д.Н. Вырубов, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова. –4-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1984. – с.384
- 6 Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] / В.И. Анурьев// В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. - с.296.
- 7 Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя [Текст] / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
- 8 Кузнецов Ю.М. «Охрана труда на предприятиях автомобильного транспорта». М.: Транспорт, 1986.

- 9 Луканин В.Н. «Промышленная транспортная экология». М.: Высшая школа, 2001.
- 10 Долин П.А. «Справочник по технике безопасности». М.: Энергоатомиздат, 1985.
- 11 Чумаков Л.Л. Курс лекций по дисциплине «Экономика предприятия», 2004
- 12 Кальней Е.Д. Методические указания по выполнению курсовых и дипломных проектов по дисциплине «Основы технического творчества и патентоведения»
- 13 Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982.
- 14 Кузнецов В.Р., Собольников В.А. «Турбулентность и горение». М. Наука, 1986.
- 15 Войнов В.В. «Процессы сгорания в двигателях внутреннего сгорания». М. Наука, 1984.
- 16 Lanni, T., Frank, B.P., Tang, S., Rosenblatt, D., Lowell, D., Performance and emissions evaluation of compressed natural gas and clean diesel buses at New York City's Metropolitan Transit Authority/Lanni, T., Frank, B.P., Tang, S., Rosenblatt, D., Lowell, SAE Paper 2013.
- 17 Alpesh K. Panchal:M.E. IC/Auto Student,Assistant professor, Mechanical Engineering Department L.C. Institute of Technology,Mechanical Engineering Dept. L.D.R.P, Ghandhinagar, 2014.
- 18 Khalighi B., et al, “ Computation and Measurement of Flow and Combustion in a Four-Valve Engine with Intake Variations”, SAE, SP 1101, №950287, стр. 147-179, 2001.
- 19 Wang, D. E., Watson, H. Direct injection compressed natural gas combustion and visualization / D. E Wang, H.Watson, SAE Technical Paper 2010-PP.218-220
- 20 Mbarawa, M., Milton, B.E., Casey, R.T. Experiments and modelling of natural gas combustion ignited by a pilot diesel fuel spray / M. Mbarawa, B.E. Milton, R.T. Casey: Int. J. Therm. Sci. 40, 2012- PP. 927–936.

- 21 Хашимото Н., и др, “Разработка низкотоксичной, высокоэффективной камеры сгорания для высокомоощного четырехклапанного двигателя”, SAE, SP 1098, №95068, стр. 347-365, 1998.
- 22 Аносов Ю.М. “Основы отраслевых технологий и организации производства”. С-П., Политехника, 2002.
- 23 Каргин, С.А. Теоретическое обоснование и экспериментальное исследование рабочего процесса судового ДВС с комбинированным смесеобразованием и принудительным воспламенением : канд. техн. наук : 05.08.05 / Каргин Сергей Александрович. – Астрахань, 2006. – 177 с.
- 24 Каменев, В.Ф. Научные основы и пути совершенствования токсических характеристик автомобильных двигателей с искровым зажиганием: Дисс. . докт.техн.наук: 05.04.02 ГНЦ НАМИ / Каменев Владимир Федорович. - Москва, 1996. - 454 с.
- 25 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.
- 26 Машиностроение. Энциклопедия : в 40 т. / гл. ред. К.В. Фролов (пред.) и др.— М.: Машиностроение, 2013.- Т. IV-14: Двигатели внутреннего сгорания.- 784с.
- 27 Семенов, Е.С. Исследование турбулентности в цилиндре поршневого двигателя / Е.С. Семенов, А.С. Соколик // Известия АН СССР. – 1958. - № 8. - С. 130-140.
- 28 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.
- 29 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.

30 Рахимов, Р.Р. Улучшение показателей двигателей с искровым зажиганием путем интенсификации сгорания бедных смесей : автореферат дис. ... кандидата технических наук / Р. Р. Рахимов. - Волгоград: ВолГТУ, 1999

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 900 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
Q	f	a	m	P _y	T _y	V _a	E2	l	m	fz							
15	50	1	1,052432	3,3935	868,22	1,10314	92,0787	0,312	3	50							
Расчёт процесса сгорания																	
φ2	φ1	φ"	V _{сг}	T1,К	T2,К	T1-2	X1-2*10-2	ΔX1-2*10-2	k1-2	K1-2	p1, МПа	p2,МПа	σ*10-2	ψ(φ)	μ	μ1-2	χ
1	0	-15	0,0736	868,2224	880,8426	874,5325	0,0000	0,0000	1,3467	6,7686	3,3936	3,5891	0,0446	1,4678	1,0000	1,0000	0,0000
2	1	-14	0,0706	880,8426	893,2869	887,0647	0,0000	0,0000	1,3455	6,7893	3,5891	3,7901	0,0389	1,4080	1,0000	1,0000	0,0000
3	2	-13	0,0678	893,2869	905,5800	899,4334	0,0000	0,0001	1,3443	6,8093	3,7901	3,9952	0,0335	1,3522	1,0000	1,0000	0,0000
4	3	-12	0,0652	905,5799	917,8106	911,6951	0,0001	0,0002	1,3431	6,8288	3,9952	4,2035	0,0286	1,3004	1,0000	1,0000	0,0001
5	4	-11	0,0628	917,8104	930,1311	923,9704	0,0002	0,0004	1,3420	6,8479	4,2035	4,4139	0,0241	1,2527	1,0000	1,0000	0,0003
6	5	-10	0,0606	930,1305	942,7576	936,4432	0,0004	0,0007	1,3409	6,8670	4,4139	4,6254	0,0199	1,2090	1,0000	1,0001	0,0007
7	6	-9	0,0586	942,7559	955,9685	949,3604	0,0006	0,0012	1,3398	6,8864	4,6254	4,8371	0,0161	1,1694	1,0001	1,0001	0,0014
8	7	-8	0,0569	955,9649	970,1030	963,0304	0,0009	0,0019	1,3386	6,9066	4,8371	5,0485	0,0128	1,1340	1,0001	1,0002	0,0027
9	8	-7	0,0553	970,0960	985,5574	977,8201	0,0014	0,0027	1,3374	6,9280	5,0485	5,2592	0,0098	1,1026	1,0002	1,0003	0,0045
10	9	-6	0,0539	985,5442	1002,7790	994,1499	0,0019	0,0038	1,3361	6,9511	5,2592	5,4691	0,0072	1,0754	1,0004	1,0005	0,0072
11	10	-5	0,0528	1002,7556	1022,2579	1012,4868	0,0025	0,0051	1,3346	6,9764	5,4691	5,6783	0,0050	1,0524	1,0006	1,0007	0,0110
12	11	-4	0,0518	1022,2180	1044,5152	1033,3337	0,0033	0,0066	1,3331	7,0044	5,6783	5,8873	0,0032	1,0336	1,0008	1,0010	0,0161
13	12	-3	0,0511	1044,4494	1070,0878	1057,2160	0,0042	0,0084	1,3314	7,0355	5,8873	6,0965	0,0018	1,0189	1,0012	1,0014	0,0227
14	13	-2	0,0506	1069,9826	1099,5103	1084,6648	0,0052	0,0105	1,3295	7,0699	6,0965	6,3066	0,0008	1,0084	1,0016	1,0019	0,0311
15	14	-1	0,0502	1099,3470	1133,2930	1116,1970	0,0064	0,0128	1,3274	7,1078	6,3066	6,5179	0,0002	1,0021	1,0021	1,0025	0,0416
16	15	0	0,0501	1133,0470	1171,8991	1152,2929	0,0077	0,0155	1,3252	7,1493	6,5179	6,7307	0,0000	1,0000	1,0028	1,0032	0,0544
17	16	1	0,0502	1171,5389	1215,7187	1193,3724	0,0092	0,0183	1,3229	7,1940	6,7307	6,9447	0,0002	1,0021	1,0036	1,0041	0,0699
18	17	2	0,0506	1215,2059	1265,0440	1239,7699	0,0107	0,0214	1,3204	7,2418	6,9447	7,1594	0,0008	1,0084	1,0045	1,0051	0,0882
19	18	3	0,0511	1264,3338	1320,0445	1291,7104	0,0123	0,0246	1,3179	7,2919	7,1594	7,3732	0,0018	1,0189	1,0056	1,0063	0,1095
20	19	4	0,0518	1319,0869	1380,7447	1349,2866	0,0140	0,0279	1,3153	7,3439	7,3732	7,5842	0,0032	1,0336	1,0069	1,0076	0,1341
21	20	5	0,0528	1379,4863	1447,0052	1412,4388	0,0157	0,0313	1,3127	7,3969	7,5842	7,7898	0,0050	1,0524	1,0083	1,0091	0,1621
22	21	6	0,0539	1445,3914	1518,5078	1480,9386	0,0173	0,0347	1,3101	7,4502	7,7898	7,9865	0,0072	1,0754	1,0099	1,0108	0,1934
23	22	7	0,0553	1516,4858	1594,7468	1554,3772	0,0190	0,0379	1,3076	7,5029	7,9865	8,1708	0,0098	1,1026	1,0117	1,0127	0,2281
24	23	8	0,0569	1592,2686	1675,0276	1632,1604	0,0205	0,0409	1,3051	7,5544	8,1708	8,3385	0,0128	1,1340	1,0137	1,0147	0,2660

25	24	9	0,0586	1672,0521	1758,4718	1713,5098	0,0218	0,0436	1,3029	7,6039	8,3385	8,4855	0,0161	1,1694	1,0158	1,0169	0,3070
26	25	10	0,0606	1754,9675	1844,0332	1797,4735	0,0230	0,0459	1,3007	7,6508	8,4855	8,6076	0,0199	1,2090	1,0180	1,0192	0,3506
27	26	11	0,0628	1839,9796	1930,5214	1882,9448	0,0238	0,0477	1,2987	7,6948	8,6076	8,7010	0,0241	1,2527	1,0204	1,0216	0,3965
28	27	12	0,0652	1925,9101	2016,6360	1968,6907	0,0244	0,0488	1,2969	7,7353	8,7010	8,7622	0,0286	1,3004	1,0228	1,0241	0,4442
29	28	13	0,0678	2011,4713	2101,0090	2053,3894	0,0247	0,0493	1,2953	7,7722	8,7622	8,7885	0,0335	1,3522	1,0253	1,0266	0,4931
30	29	14	0,0706	2095,3076	2182,2546	2135,6761	0,0246	0,0491	1,2939	7,8053	8,7885	8,7781	0,0389	1,4080	1,0279	1,0291	0,5424
31	30	15	0,0736	2176,0447	2259,0238	2214,1944	0,0241	0,0482	1,2926	7,8345	8,7781	8,7297	0,0446	1,4678	1,0304	1,0316	0,5915
32	31	16	0,0768	2252,3442	2330,0613	2287,6519	0,0233	0,0465	1,2916	7,8597	8,7297	8,6434	0,0506	1,5316	1,0329	1,0340	0,6397
33	32	17	0,0802	2322,9596	2394,2602	2354,8754	0,0221	0,0442	1,2906	7,8812	8,6434	8,5201	0,0571	1,5993	1,0352	1,0364	0,6862
34	33	18	0,0838	2386,7913	2450,7117	2414,8635	0,0206	0,0413	1,2899	7,8989	8,5201	8,3619	0,0639	1,6708	1,0375	1,0386	0,7304
35	34	19	0,0876	2442,9357	2498,7455	2466,8308	0,0190	0,0379	1,2893	7,9132	8,3619	8,1715	0,0711	1,7463	1,0396	1,0406	0,7717
36	35	20	0,0915	2490,7259	2537,9570	2510,2422	0,0171	0,0342	1,2888	7,9242	8,1715	7,9526	0,0786	1,8256	1,0416	1,0425	0,8096
37	36	21	0,0957	2529,7586	2568,2203	2544,8329	0,0151	0,0302	1,2885	7,9322	7,9526	7,7096	0,0865	1,9086	1,0433	1,0441	0,8438
38	37	22	0,1001	2559,9072	2589,6834	2570,6125	0,0131	0,0262	1,2883	7,9375	7,7096	7,4470	0,0948	1,9955	1,0449	1,0456	0,8740
39	38	23	0,1046	2581,3178	2602,7482	2587,8531	0,0111	0,0223	1,2882	7,9403	7,4470	7,1698	0,1034	2,0860	1,0462	1,0468	0,9002
40	39	24	0,1093	2594,3883	2608,0345	2597,0611	0,0092	0,0185	1,2881	7,9409	7,1698	6,8829	0,1124	2,1801	1,0474	1,0479	0,9225
41	40	25	0,1142	2599,7338	2606,3332	2598,9364	0,0075	0,0150	1,2882	7,9397	6,8829	6,5908	0,1217	2,2779	1,0483	1,0487	0,9410
42	41	26	0,1193	2598,1391	2598,5513	2594,3219	0,0060	0,0119	1,2883	7,9368	6,5908	6,2980	0,1314	2,3792	1,0491	1,0494	0,9560
43	42	27	0,1246	2590,5046	2585,6543	2584,1469	0,0046	0,0092	1,2885	7,9327	6,2980	6,0080	0,1413	2,4841	1,0497	1,0499	0,9679
44	43	28	0,1300	2577,7892	2568,6114	2569,3722	0,0035	0,0070	1,2887	7,9275	6,0080	5,7241	0,1517	2,5924	1,0502	1,0504	0,9771
45	44	29	0,1356	2560,9553	2548,3476	2550,9384	0,0026	0,0051	1,2890	7,9214	5,7241	5,4488	0,1623	2,7041	1,0505	1,0507	0,9841
46	45	30	0,1414	2540,9214	2525,7058	2529,7230	0,0018	0,0037	1,2892	7,9146	5,4488	5,1839	0,1733	2,8192	1,0508	1,0509	0,9892
47	46	31	0,1473	2518,5246	2501,4214	2506,5098	0,0013	0,0025	1,2895	7,9073	5,1839	4,9307	0,1845	2,9375	1,0510	1,0511	0,9929
48	47	32	0,1534	2494,4949	2476,1092	2481,9690	0,0009	0,0017	1,2899	7,8997	4,9307	4,6900	0,1961	3,0591	1,0511	1,0512	0,9955
49	48	33	0,1597	2469,4431	2450,2622	2456,6507	0,0006	0,0011	1,2902	7,8918	4,6900	4,4622	0,2080	3,1839	1,0512	1,0512	0,9972
50	49	34	0,1661	2443,8584	2424,2589	2430,9876	0,0004	0,0007	1,2905	7,8838	4,4622	4,2471	0,2202	3,3118	1,0513	1,0513	0,9983
51	50	35	0,1726	2418,1167	2398,3771	2405,3052	0,0002	0,0004	1,2909	7,8757	4,2471	4,0445	0,2326	3,4427	1,0513	1,0513	0,9990
52	51	36	0,1794	2392,4937	2372,8109	2379,8379	0,0001	0,0003	1,2912	7,8676	4,0445	3,8540	0,2454	3,5767	1,0513	1,0513	0,9994
53	52	37	0,1862	2367,1821	2347,6884	2354,7456	0,0001	0,0001	1,2916	7,8594	3,8540	3,6750	0,2584	3,7135	1,0513	1,0513	0,9997
54	53	38	0,1932	2342,3092	2323,0887	2330,1312	0,0000	0,0001	1,2919	7,8513	3,6750	3,5068	0,2717	3,8532	1,0513	1,0514	0,9998
55	54	39	0,2004	2317,9533	2299,0555	2306,0556	0,0000	0,0000	1,2923	7,8432	3,5068	3,3488	0,2853	3,9957	1,0514	1,0514	0,9999
56	55	40	0,2076	2294,1580	2275,6090	2282,5506	0,0000	0,0000	1,2926	7,8352	3,3488	3,2004	0,2991	4,1410	1,0514	1,0514	1,0000
57	56	41	0,2151	2270,9432	2252,7539	2259,6285	0,0000	0,0000	1,2929	7,8273	3,2004	3,0608	0,3132	4,2889	1,0514	1,0514	1,0000
58	57	42	0,2226	2248,3138	2230,4857	2237,2895	0,0000	0,0000	1,2933	7,8194	3,0608	2,9296	0,3276	4,4393	1,0514	1,0514	1,0000
59	58	43	0,2303	2226,2652	2208,7942	2215,5264	0,0000	0,0000	1,2936	7,8115	2,9296	2,8062	0,3421	4,5923	1,0514	1,0514	1,0000

60	59	44	0,2381	2204,7876	2187,6668	2194,3278	0,0000	0,0000	1,2940	7,8038	2,8062	2,6900	0,3569	4,7477	1,0514	1,0514	1,0000
61	60	45	0,2460	2183,8681	0,0000	1091,9340	0,0000	0,0000	1,3292	7,0746	2,6900	-19,0303	0,3719	4,9055	1,0514	0,5257	1,0000

Таблица А2 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 2700 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Q	f	a	m	P _y	T _y	V _a	E2	l	m	fz
15	50	1	1,052432	1,8735	732,179	1,0857	95,0956	0,312	3	50

Расчёт процесса сгорания

φ ₂	φ ₁	φ''	V _{ст}	T1, K	T2, K	T1-2	X1-2*10 ⁻²	ΔX1-2*10 ⁻²	k1-2	K1-2	p1, МПа	p2, МПа	σ*10 ⁻²	ψ(φ)	μ	μ1-2	χ
1	0	-15	0,0724	859,2054	871,7280	865,4667	0,0000	0,0000	1,3476	6,7534	3,4120	3,6088	0,0446	1,4678	1,0000	1,0000	0,0000
2	1	-14	0,0695	871,7280	884,0772	877,9024	0,0000	0,0000	1,3464	6,7742	3,6088	3,8109	0,0389	1,4080	1,0000	1,0000	0,0000
3	2	-13	0,0667	884,0767	896,2805	890,1775	0,0000	0,0001	1,3452	6,7944	3,8109	4,0174	0,0335	1,3522	1,0000	1,0000	0,0000
4	3	-12	0,0642	896,2783	908,4308	902,3512	0,0001	0,0002	1,3440	6,8140	4,0174	4,2271	0,0286	1,3004	1,0000	1,0000	0,0001
5	4	-11	0,0618	908,4241	920,6863	914,5470	0,0002	0,0004	1,3429	6,8333	4,2271	4,4389	0,0241	1,2527	1,0000	1,0000	0,0003
6	5	-10	0,0597	920,6699	933,2701	926,9529	0,0004	0,0007	1,3417	6,8526	4,4389	4,6520	0,0199	1,2090	1,0000	1,0001	0,0007
7	6	-9	0,0577	933,2360	946,4688	939,8209	0,0006	0,0012	1,3406	6,8722	4,6520	4,8656	0,0161	1,1694	1,0001	1,0001	0,0014
8	7	-8	0,0560	946,4058	960,6314	953,4649	0,0009	0,0019	1,3394	6,8927	4,8656	5,0791	0,0128	1,1340	1,0001	1,0002	0,0027
9	8	-7	0,0544	960,5241	976,1642	968,2585	0,0014	0,0027	1,3382	6,9144	5,0791	5,2923	0,0098	1,1026	1,0002	1,0003	0,0045
10	9	-6	0,0531	975,9930	993,5260	984,6297	0,0019	0,0038	1,3368	6,9379	5,2923	5,5052	0,0072	1,0754	1,0004	1,0005	0,0072
11	10	-5	0,0519	993,2663	1013,2181	1003,0533	0,0025	0,0051	1,3354	6,9637	5,5052	5,7181	0,0050	1,0524	1,0006	1,0007	0,0110
12	11	-4	0,0510	1012,8403	1035,7731	1024,0413	0,0033	0,0066	1,3338	6,9923	5,7181	5,9313	0,0032	1,0336	1,0008	1,0010	0,0161
13	12	-3	0,0503	1035,2423	1061,7386	1048,1286	0,0042	0,0084	1,3320	7,0240	5,9313	6,1456	0,0018	1,0189	1,0012	1,0014	0,0227
14	13	-2	0,0498	1061,0149	1091,6589	1075,8560	0,0052	0,0105	1,3301	7,0592	6,1456	6,3616	0,0008	1,0084	1,0016	1,0019	0,0311
15	14	-1	0,0495	1090,6972	1126,0529	1107,7504	0,0064	0,0128	1,3280	7,0981	6,3616	6,5797	0,0002	1,0021	1,0021	1,0025	0,0416
16	15	0	0,0494	1124,8037	1165,3898	1144,3017	0,0077	0,0155	1,3257	7,1405	6,5797	6,8003	0,0000	1,0000	1,0028	1,0032	0,0544
17	16	1	0,0495	1163,7996	1210,0637	1185,9380	0,0092	0,0183	1,3233	7,1863	6,8003	7,0229	0,0002	1,0021	1,0036	1,0041	0,0699
18	17	2	0,0498	1208,0763	1260,3683	1233,0008	0,0107	0,0214	1,3208	7,2351	7,0229	7,2469	0,0008	1,0084	1,0045	1,0051	0,0882
19	18	3	0,0503	1257,9253	1316,4717	1285,7197	0,0123	0,0246	1,3181	7,2865	7,2469	7,4708	0,0018	1,0189	1,0056	1,0063	0,1095
20	19	4	0,0510	1313,5141	1378,3943	1344,1889	0,0140	0,0279	1,3155	7,3395	7,4708	7,6924	0,0032	1,0336	1,0069	1,0076	0,1341

21	20	5	0,0519	1374,8637	1445,9896	1408,3466	0,0157	0,0313	1,3128	7,3937	7,6924	7,9088	0,0050	1,0524	1,0083	1,0091	0,1621
22	21	6	0,0531	1441,8296	1518,9297	1477,9585	0,0173	0,0347	1,3102	7,4480	7,9088	8,1165	0,0072	1,0754	1,0099	1,0108	0,1934
23	22	7	0,0544	1514,0875	1596,6965	1552,6062	0,0190	0,0379	1,3076	7,5017	8,1165	8,3116	0,0098	1,1026	1,0117	1,0127	0,2281
24	23	8	0,0560	1591,1248	1678,5801	1631,6815	0,0205	0,0409	1,3052	7,5541	8,3116	8,4898	0,0128	1,1340	1,0137	1,0147	0,2660
25	24	9	0,0577	1672,2383	1763,6849	1714,3895	0,0218	0,0436	1,3028	7,6044	8,4898	8,6468	0,0161	1,1694	1,0158	1,0169	0,3070
26	25	10	0,0597	1756,5408	1850,9448	1799,7584	0,0230	0,0459	1,3007	7,6520	8,6468	8,7781	0,0199	1,2090	1,0180	1,0192	0,3506
27	26	11	0,0618	1842,9761	1939,1483	1886,6598	0,0238	0,0477	1,2987	7,6966	8,7781	8,8797	0,0241	1,2527	1,0204	1,0216	0,3965
28	27	12	0,0642	1930,3435	2026,9722	1973,8376	0,0244	0,0488	1,2968	7,7376	8,8797	8,9480	0,0286	1,3004	1,0228	1,0241	0,4442
29	28	13	0,0667	2017,3317	2113,0250	2059,9467	0,0247	0,0493	1,2952	7,7749	8,9480	8,9802	0,0335	1,3522	1,0253	1,0266	0,4931
30	29	14	0,0695	2102,5618	2195,8976	2143,5994	0,0246	0,0491	1,2938	7,8084	8,9802	8,9743	0,0389	1,4080	1,0279	1,0291	0,5424
31	30	15	0,0724	2184,6371	2274,2182	2223,4176	0,0241	0,0482	1,2925	7,8378	8,9743	8,9291	0,0446	1,4678	1,0304	1,0316	0,5915
32	31	16	0,0756	2262,1982	2346,7107	2298,0892	0,0233	0,0465	1,2914	7,8633	8,9291	8,8445	0,0506	1,5316	1,0329	1,0341	0,6397
33	32	17	0,0789	2333,9801	2412,2496	2366,4239	0,0221	0,0442	1,2905	7,8849	8,8445	8,7216	0,0571	1,5993	1,0353	1,0364	0,6862
34	33	18	0,0825	2398,8677	2469,9112	2427,4064	0,0206	0,0413	1,2897	7,9028	8,7216	8,5623	0,0639	1,6708	1,0375	1,0386	0,7304
35	34	19	0,0862	2455,9452	2519,0139	2480,2412	0,0190	0,0379	1,2891	7,9172	8,5623	8,3697	0,0711	1,7463	1,0397	1,0406	0,7717
36	35	20	0,0901	2504,5373	2559,1463	2524,3868	0,0171	0,0342	1,2887	7,9283	8,3697	8,1474	0,0786	1,8256	1,0416	1,0425	0,8096
37	36	21	0,0942	2544,2364	2590,1801	2559,5760	0,0151	0,0302	1,2883	7,9364	8,1474	7,9000	0,0865	1,9086	1,0434	1,0441	0,8438
38	37	22	0,0985	2574,9156	2612,2657	2585,8199	0,0131	0,0262	1,2881	7,9417	7,9000	7,6323	0,0948	1,9955	1,0449	1,0456	0,8740
39	38	23	0,1030	2596,7241	2625,8113	2603,3955	0,0111	0,0223	1,2880	7,9445	7,6323	7,3492	0,1034	2,0860	1,0463	1,0468	0,9002
40	39	24	0,1076	2610,0669	2631,4466	2612,8176	0,0092	0,0185	1,2880	7,9452	7,3492	7,0559	0,1124	2,1801	1,0474	1,0479	0,9225
41	40	25	0,1124	2615,5684	2629,9752	2614,7969	0,0075	0,0150	1,2880	7,9440	7,0559	6,7571	0,1217	2,2779	1,0484	1,0488	0,9410
42	41	26	0,1174	2614,0255	2622,3187	2610,1887	0,0060	0,0119	1,2881	7,9412	6,7571	6,4574	0,1314	2,3792	1,0491	1,0494	0,9560
43	42	27	0,1226	2606,3519	2609,4584	2599,9363	0,0046	0,0092	1,2883	7,9370	6,4574	6,1604	0,1413	2,4841	1,0497	1,0500	0,9679
44	43	28	0,1280	2593,5206	2592,3790	2585,0144	0,0035	0,0070	1,2885	7,9318	6,1604	5,8696	0,1517	2,5924	1,0502	1,0504	0,9771
45	44	29	0,1335	2576,5082	2572,0206	2566,3773	0,0026	0,0051	1,2888	7,9257	5,8696	5,5875	0,1623	2,7041	1,0506	1,0507	0,9841
46	45	30	0,1391	2556,2465	2549,2398	2544,9156	0,0018	0,0037	1,2891	7,9189	5,5875	5,3160	0,1733	2,8192	1,0508	1,0509	0,9892
47	46	31	0,1450	2533,5848	2524,7838	2521,4244	0,0013	0,0025	1,2894	7,9117	5,3160	5,0565	0,1845	2,9375	1,0510	1,0511	0,9929
48	47	32	0,1510	2509,2641	2499,2776	2496,5841	0,0009	0,0017	1,2897	7,9040	5,0565	4,8097	0,1961	3,0591	1,0512	1,0512	0,9955
49	48	33	0,1571	2483,9040	2473,2223	2470,9527	0,0006	0,0011	1,2900	7,8961	4,8097	4,5761	0,2080	3,1839	1,0513	1,0513	0,9972
50	49	34	0,1635	2458,0013	2447,0026	2444,9693	0,0004	0,0007	1,2904	7,8881	4,5761	4,3556	0,2202	3,3118	1,0513	1,0513	0,9983
51	50	35	0,1699	2431,9373	2420,9007	2418,9646	0,0002	0,0004	1,2907	7,8800	4,3556	4,1479	0,2326	3,4427	1,0513	1,0514	0,9990
52	51	36	0,1765	2405,9920	2395,1142	2393,1765	0,0001	0,0003	1,2910	7,8718	4,1479	3,9525	0,2454	3,5767	1,0514	1,0514	0,9994
53	52	37	0,1833	2380,3610	2369,7734	2367,7673	0,0001	0,0001	1,2914	7,8636	3,9525	3,7690	0,2584	3,7135	1,0514	1,0514	0,9997
54	53	38	0,1902	2355,1736	2344,9586	2342,8415	0,0000	0,0001	1,2917	7,8555	3,7690	3,5965	0,2717	3,8532	1,0514	1,0514	0,9998
55	54	39	0,1972	2330,5094	2320,7145	2318,4610	0,0000	0,0000	1,2921	7,8474	3,5965	3,4345	0,2853	3,9957	1,0514	1,0514	0,9999

56	55	40	0,2044	2306,4127	2297,0617	2294,6582	0,0000	0,0000	1,2924	7,8394	3,4345	3,2823	0,2991	4,1410	1,0514	1,0514	1,0000
57	56	41	0,2117	2282,9037	2274,0051	2271,4456	0,0000	0,0000	1,2928	7,8314	3,2823	3,1392	0,3132	4,2889	1,0514	1,0514	1,0000
58	57	42	0,2191	2259,9875	2251,5403	2248,8235	0,0000	0,0000	1,2931	7,8235	3,1392	3,0047	0,3276	4,4393	1,0514	1,0514	1,0000
59	58	43	0,2267	2237,6594	2229,6571	2226,7845	0,0000	0,0000	1,2934	7,8156	3,0047	2,8781	0,3421	4,5923	1,0514	1,0514	1,0000
60	59	44	0,2343	2215,9096	2208,3427	2205,3172	0,0000	0,0000	1,2938	7,8078	2,8781	2,7589	0,3569	4,7477	1,0514	1,0514	1,0000
61	60	45	0,2421	2194,7249	0,0000	1097,3625	0,0000	0,0000	1,3289	7,0810	2,7589	-19,5356	0,3719	4,9055	1,0514	0,5257	1,0000

Таблица А3 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 5200 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Q	f	a	m	Py	Ty	Va	E2	l	m	fz
15	50	1	1,052432	3,4212	857,3606	1,0805	94,720	0,285	3	50

Расчёт процесса сгорания

φ2	φ1	φ"	Vст	T1,К	T2,К	T1-2	X1-2*10-2	ΔX1-2*10-2	k1-2	K1-2	p1, МПа	p2,МПа	σ*10-2	ψ(φ)	μ	μ1-2	χ
1	0	-15	0,0721	857,3607	869,8633	863,6120	0,0000	0,0000	1,3478	6,7502	3,4213	3,6186	0,0446	1,4678	1,0000	1,0000	0,0000
2	1	-14	0,0692	869,8633	882,1924	876,0278	0,0000	0,0000	1,3466	6,7711	3,6186	3,8213	0,0389	1,4080	1,0000	1,0000	0,0000
3	2	-13	0,0664	882,1924	894,3748	888,2836	0,0000	0,0001	1,3453	6,7913	3,8213	4,0284	0,0335	1,3522	1,0000	1,0000	0,0000
4	3	-12	0,0639	894,3749	906,5021	900,4385	0,0001	0,0002	1,3442	6,8110	4,0284	4,2386	0,0286	1,3004	1,0000	1,0000	0,0001
5	4	-11	0,0615	906,5022	918,7304	912,6163	0,0002	0,0004	1,3430	6,8303	4,2386	4,4510	0,0241	1,2527	1,0000	1,0000	0,0003
6	5	-10	0,0594	918,7304	931,2800	925,0052	0,0004	0,0007	1,3419	6,8496	4,4510	4,6647	0,0199	1,2090	1,0000	1,0001	0,0007
7	6	-9	0,0574	931,2801	944,4347	937,8574	0,0006	0,0012	1,3408	6,8693	4,6647	4,8787	0,0161	1,1694	1,0001	1,0001	0,0014
8	7	-8	0,0557	944,4348	958,5394	951,4872	0,0009	0,0019	1,3396	6,8898	4,8787	5,0927	0,0128	1,1340	1,0001	1,0002	0,0027
9	8	-7	0,0542	958,5396	973,9966	966,2682	0,0014	0,0027	1,3383	6,9115	5,0927	5,3063	0,0098	1,1026	1,0002	1,0003	0,0045
10	9	-6	0,0528	973,9968	991,2600	982,6285	0,0019	0,0038	1,3370	6,9351	5,3063	5,5194	0,0072	1,0754	1,0004	1,0005	0,0072
11	10	-5	0,0517	991,2603	1010,8263	1001,0435	0,0025	0,0051	1,3355	6,9610	5,5194	5,7323	0,0050	1,0524	1,0006	1,0007	0,0110
12	11	-4	0,0508	1010,8267	1033,2227	1022,0250	0,0033	0,0066	1,3339	6,9896	5,7323	5,9455	0,0032	1,0336	1,0008	1,0010	0,0161
13	12	-3	0,0500	1033,2232	1058,9917	1046,1078	0,0042	0,0084	1,3321	7,0215	5,9455	6,1596	0,0018	1,0189	1,0012	1,0014	0,0227
14	13	-2	0,0495	1058,9924	1088,6724	1073,8330	0,0052	0,0105	1,3302	7,0568	6,1596	6,3751	0,0008	1,0084	1,0016	1,0019	0,0311

15	14	-1	0,0492	1088,6735	1122,7788	1105,7269	0,0064	0,0128	1,3281	7,0957	6,3751	6,5925	0,0002	1,0021	1,0021	1,0025	0,0416
16	15	0	0,0491	1122,7804	1161,7760	1142,2793	0,0077	0,0155	1,3258	7,1382	6,5925	6,8122	0,0000	1,0000	1,0028	1,0032	0,0544
17	16	1	0,0492	1161,7782	1206,0548	1183,9179	0,0092	0,0183	1,3234	7,1842	6,8122	7,0337	0,0002	1,0021	1,0036	1,0041	0,0699
18	17	2	0,0495	1206,0577	1255,9061	1230,9839	0,0107	0,0214	1,3209	7,2332	7,0337	7,2564	0,0008	1,0084	1,0045	1,0051	0,0882
19	18	3	0,0500	1255,9100	1311,4970	1283,7061	0,0123	0,0246	1,3182	7,2846	7,2564	7,4788	0,0018	1,0189	1,0056	1,0063	0,1095
20	19	4	0,0508	1311,5022	1372,8479	1342,1784	0,0140	0,0279	1,3156	7,3378	7,4788	7,6987	0,0032	1,0336	1,0069	1,0076	0,1341
21	20	5	0,0517	1372,8546	1439,8141	1406,3386	0,0157	0,0313	1,3129	7,3921	7,6987	7,9133	0,0050	1,0524	1,0083	1,0091	0,1621
22	21	6	0,0528	1439,8226	1512,0712	1475,9520	0,0173	0,0347	1,3102	7,4465	7,9133	8,1191	0,0072	1,0754	1,0099	1,0108	0,1934
23	22	7	0,0542	1512,0815	1589,1061	1550,6001	0,0190	0,0379	1,3077	7,5004	8,1191	8,3123	0,0098	1,1026	1,0117	1,0127	0,2281
24	23	8	0,0557	1589,1186	1670,2159	1629,6746	0,0205	0,0409	1,3052	7,5528	8,3123	8,4886	0,0128	1,1340	1,0137	1,0147	0,2660
25	24	9	0,0574	1670,2307	1754,5136	1712,3807	0,0218	0,0436	1,3029	7,6032	8,4886	8,6436	0,0161	1,1694	1,0158	1,0169	0,3070
26	25	10	0,0594	1754,5307	1840,9432	1797,7467	0,0230	0,0459	1,3007	7,6510	8,6436	8,7731	0,0199	1,2090	1,0180	1,0192	0,3506
27	26	11	0,0615	1840,9627	1928,3044	1884,6445	0,0238	0,0477	1,2987	7,6956	8,7731	8,8729	0,0241	1,2527	1,0204	1,0216	0,3965
28	27	12	0,0639	1928,3262	2015,2864	1971,8183	0,0244	0,0488	1,2969	7,7367	8,8729	8,9397	0,0286	1,3004	1,0228	1,0241	0,4442
29	28	13	0,0664	2015,3105	2100,5107	2057,9236	0,0247	0,0493	1,2952	7,7741	8,9397	8,9704	0,0335	1,3522	1,0253	1,0266	0,4931
30	29	14	0,0692	2100,5368	2182,5810	2141,5729	0,0246	0,0491	1,2938	7,8076	8,9704	8,9632	0,0389	1,4080	1,0279	1,0291	0,5424
31	30	15	0,0721	2182,6090	2260,1383	2221,3885	0,0241	0,0482	1,2925	7,8371	8,9632	8,9169	0,0446	1,4678	1,0304	1,0316	0,5915
32	31	16	0,0752	2260,1679	2331,9181	2296,0585	0,0233	0,0465	1,2914	7,8626	8,9169	8,8314	0,0506	1,5316	1,0329	1,0341	0,6397
33	32	17	0,0785	2331,9491	2396,8054	2364,3933	0,0221	0,0442	1,2905	7,8843	8,8314	8,7078	0,0571	1,5993	1,0353	1,0364	0,6862
34	33	18	0,0821	2396,8375	2453,8847	2425,3777	0,0206	0,0413	1,2898	7,9022	8,7078	8,5480	0,0639	1,6708	1,0375	1,0386	0,7304
35	34	19	0,0858	2453,9178	2502,4809	2478,2162	0,0190	0,0379	1,2892	7,9166	8,5480	8,3551	0,0711	1,7463	1,0397	1,0406	0,7717
36	35	20	0,0897	2502,5146	2542,1865	2522,3676	0,0171	0,0342	1,2887	7,9277	8,3551	8,1327	0,0786	1,8256	1,0416	1,0425	0,8096
37	36	21	0,0937	2542,2206	2572,8744	2557,5647	0,0151	0,0302	1,2884	7,9358	8,1327	7,8853	0,0865	1,9086	1,0434	1,0441	0,8438
38	37	22	0,0980	2572,9088	2594,6940	2583,8186	0,0131	0,0262	1,2881	7,9411	7,8853	7,6177	0,0948	1,9955	1,0449	1,0456	0,8740
39	38	23	0,1025	2594,7284	2608,0497	2601,4062	0,0111	0,0223	1,2880	7,9440	7,6177	7,3349	0,1034	2,0860	1,0463	1,0468	0,9002
40	39	24	0,1071	2608,0840	2613,5662	2610,8421	0,0092	0,0185	1,2880	7,9447	7,3349	7,0420	0,1124	2,1801	1,0474	1,0479	0,9225
41	40	25	0,1119	2613,6001	2612,0398	2612,8367	0,0075	0,0150	1,2880	7,9435	7,0420	6,7436	0,1217	2,2779	1,0483	1,0487	0,9410
42	41	26	0,1169	2612,0733	2604,3842	2608,2453	0,0060	0,0119	1,2882	7,9406	6,7436	6,4443	0,1314	2,3792	1,0491	1,0494	0,9560
43	42	27	0,1220	2604,4172	2591,5719	2598,0107	0,0046	0,0092	1,2883	7,9365	6,4443	6,1479	0,1413	2,4841	1,0497	1,0500	0,9679
44	43	28	0,1273	2591,6042	2574,5792	2583,1075	0,0035	0,0070	1,2885	7,9313	6,1479	5,8576	0,1517	2,5924	1,0502	1,0504	0,9771
45	44	29	0,1328	2574,6108	2554,3377	2564,4897	0,0026	0,0051	1,2888	7,9252	5,8576	5,5760	0,1623	2,7041	1,0506	1,0507	0,9841
46	45	30	0,1385	2554,3686	2531,6966	2543,0477	0,0018	0,0037	1,2891	7,9184	5,5760	5,3050	0,1733	2,8192	1,0508	1,0509	0,9892
47	46	31	0,1443	2531,7267	2507,3965	2519,5763	0,0013	0,0025	1,2894	7,9111	5,3050	5,0460	0,1845	2,9375	1,0510	1,0511	0,9929
48	47	32	0,1503	2507,4259	2482,0570	2494,7557	0,0009	0,0017	1,2897	7,9035	5,0460	4,7998	0,1961	3,0591	1,0511	1,0512	0,9955
49	48	33	0,1564	2482,0855	2456,1746	2469,1439	0,0006	0,0011	1,2900	7,8956	4,7998	4,5666	0,2080	3,1839	1,0512	1,0513	0,9972

50	49	34	0,1627	2456,2023	2430,1306	2443,1799	0,0004	0,0007	1,2904	7,8876	4,5666	4,3466	0,2202	3,3118	1,0513	1,0513	0,9983
51	50	35	0,1691	2430,1575	2404,2049	2417,1943	0,0002	0,0004	1,2907	7,8794	4,3466	4,1393	0,2326	3,4427	1,0513	1,0513	0,9990
52	51	36	0,1757	2404,2311	2378,5931	2391,4248	0,0001	0,0003	1,2911	7,8713	4,1393	3,9443	0,2454	3,5767	1,0514	1,0514	0,9994
53	52	37	0,1824	2378,6185	2353,4244	2366,0338	0,0001	0,0001	1,2914	7,8631	3,9443	3,7611	0,2584	3,7135	1,0514	1,0514	0,9997
54	53	38	0,1893	2353,4491	2328,7784	2341,1258	0,0000	0,0001	1,2918	7,8549	3,7611	3,5890	0,2717	3,8532	1,0514	1,0514	0,9998
55	54	39	0,1963	2328,8024	2304,6995	2316,7626	0,0000	0,0000	1,2921	7,8468	3,5890	3,4274	0,2853	3,9957	1,0514	1,0514	0,9999
56	55	40	0,2034	2304,7228	2281,2079	2292,9767	0,0000	0,0000	1,2924	7,8388	3,4274	3,2755	0,2991	4,1410	1,0514	1,0514	1,0000
57	56	41	0,2107	2281,2305	2258,3085	2269,7805	0,0000	0,0000	1,2928	7,8308	3,2755	3,1327	0,3132	4,2889	1,0514	1,0514	1,0000
58	57	42	0,2180	2258,3305	2235,9968	2247,1743	0,0000	0,0000	1,2931	7,8229	3,1327	2,9984	0,3276	4,4393	1,0514	1,0514	1,0000
59	58	43	0,2256	2236,0182	2214,2628	2225,1509	0,0000	0,0000	1,2935	7,8150	2,9984	2,8721	0,3421	4,5923	1,0514	1,0514	1,0000
60	59	44	0,2332	2214,2836	2193,0937	2203,6988	0,0000	0,0000	1,2938	7,8072	2,8721	2,7531	0,3569	4,7477	1,0514	1,0514	1,0000
61	60	45	0,2409	2193,1140	0,0000	1096,5570	0,0000	0,0000	1,3289	7,0800	2,7531	-19,4922	0,3719	4,9055	1,0514	0,5257	1,0000

Таблица А4 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 5600 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
Q	f	a	m	Py	Ty	Va	E2	l	m	fz							
15	50	1	1,052432	1,8991689	739,8828	1,0823	94,5161	0,312	3	50							
Расчёт процесса сгорания																	
φ2	φ1	φ''	Vсг	T1,К	T2,К	T1-2	X1-2*10-2	ΔX1-2*10-2	k1-2	K1-2	p1, МПа	p2,МПа	σ*10-2	ψ(φ)	μ	μ1-2	χ
1	0	-15	0,0722	870,5373	883,1827	876,8600	0,0000	0,0000	1,3465	6,7725	3,4679	3,6677	0,0446	1,4678	1,0000	1,0000	0,0000
2	1	-14	0,0693	883,1827	895,6519	889,4176	0,0000	0,0000	1,3452	6,7931	3,6677	3,8730	0,0389	1,4080	1,0000	1,0000	0,0000
3	2	-13	0,0665	895,6525	907,9703	901,8128	0,0000	0,0001	1,3440	6,8131	3,8730	4,0826	0,0335	1,3522	1,0000	1,0000	0,0000
4	3	-12	0,0640	907,9732	920,2277	914,1050	0,0001	0,0002	1,3429	6,8325	4,0826	4,2954	0,0286	1,3004	1,0000	1,0000	0,0001
5	4	-11	0,0616	920,2367	932,5778	926,4183	0,0002	0,0004	1,3418	6,8517	4,2954	4,5104	0,0241	1,2527	1,0000	1,0000	0,0003
6	5	-10	0,0595	932,5999	945,2385	938,9421	0,0004	0,0007	1,3407	6,8707	4,5104	4,7265	0,0199	1,2090	1,0000	1,0001	0,0007
7	6	-9	0,0575	945,2842	958,4907	951,9297	0,0006	0,0012	1,3395	6,8902	4,7265	4,9429	0,0161	1,1694	1,0001	1,0001	0,0014
8	7	-8	0,0558	958,5752	972,6762	965,6975	0,0009	0,0019	1,3384	6,9104	4,9429	5,1590	0,0128	1,1340	1,0001	1,0002	0,0027
9	8	-7	0,0542	972,8199	988,1943	980,6217	0,0014	0,0027	1,3372	6,9319	5,1590	5,3744	0,0098	1,1026	1,0002	1,0003	0,0045

10	9	-6	0,0529	988,4235	1005,4956	997,1334	0,0019	0,0038	1,3358	6,9552	5,3744	5,5891	0,0072	1,0754	1,0004	1,0005	0,0072
11	10	-5	0,0518	1005,8432	1025,0736	1015,7113	0,0025	0,0051	1,3344	6,9807	5,5891	5,8032	0,0050	1,0524	1,0006	1,0007	0,0110
12	11	-4	0,0509	1025,5793	1047,4527	1036,8714	0,0033	0,0066	1,3328	7,0090	5,8032	6,0171	0,0032	1,0336	1,0008	1,0010	0,0161
13	12	-3	0,0501	1048,1635	1073,1732	1061,1532	0,0042	0,0084	1,3311	7,0404	6,0171	6,2313	0,0018	1,0189	1,0012	1,0014	0,0227
14	13	-2	0,0496	1074,1430	1102,7726	1089,1025	0,0052	0,0105	1,3292	7,0752	6,2313	6,4466	0,0008	1,0084	1,0016	1,0019	0,0311
15	14	-1	0,0493	1104,0621	1136,7639	1121,2512	0,0064	0,0128	1,3271	7,1136	6,4466	6,6632	0,0002	1,0021	1,0021	1,0025	0,0416
16	15	0	0,0492	1138,4402	1175,6120	1158,0940	0,0077	0,0155	1,3249	7,1556	6,6632	6,8815	0,0000	1,0000	1,0028	1,0032	0,0544
17	16	1	0,0493	1177,7479	1219,7086	1200,0644	0,0092	0,0183	1,3225	7,2009	6,8815	7,1011	0,0002	1,0021	1,0036	1,0041	0,0699
18	17	2	0,0496	1222,3808	1269,3462	1247,5078	0,0107	0,0214	1,3200	7,2492	7,1011	7,3215	0,0008	1,0084	1,0045	1,0051	0,0882
19	18	3	0,0501	1272,6348	1324,6944	1300,6576	0,0123	0,0246	1,3175	7,3000	7,3215	7,5411	0,0018	1,0189	1,0056	1,0063	0,1095
20	19	4	0,0509	1328,6804	1385,7767	1359,6105	0,0140	0,0279	1,3148	7,3526	7,5411	7,7579	0,0032	1,0336	1,0069	1,0076	0,1341
21	20	5	0,0518	1390,5405	1452,4520	1424,3058	0,0157	0,0313	1,3122	7,4062	7,7579	7,9690	0,0050	1,0524	1,0083	1,0091	0,1621
22	21	6	0,0529	1458,0711	1524,3997	1494,5088	0,0173	0,0347	1,3096	7,4600	7,9690	8,1713	0,0072	1,0754	1,0099	1,0108	0,1934
23	22	7	0,0542	1530,9466	1601,1110	1569,7987	0,0190	0,0379	1,3071	7,5132	8,1713	8,3607	0,0098	1,1026	1,0117	1,0127	0,2281
24	23	8	0,0558	1608,6508	1681,8874	1649,5631	0,0205	0,0409	1,3046	7,5650	8,3607	8,5332	0,0128	1,1340	1,0137	1,0147	0,2660
25	24	9	0,0575	1690,4755	1765,8459	1733,0007	0,0218	0,0436	1,3023	7,6149	8,5332	8,6845	0,0161	1,1694	1,0158	1,0169	0,3070
26	25	10	0,0595	1775,5260	1851,9348	1819,1314	0,0230	0,0459	1,3002	7,6621	8,6845	8,8102	0,0199	1,2090	1,0180	1,0192	0,3506
27	26	11	0,0616	1862,7368	1938,9575	1906,8165	0,0238	0,0477	1,2982	7,7062	8,8102	8,9066	0,0241	1,2527	1,0204	1,0216	0,3965
28	27	12	0,0640	1950,8962	2025,6070	1994,7884	0,0244	0,0488	1,2964	7,7469	8,9066	8,9700	0,0286	1,3004	1,0228	1,0241	0,4442
29	28	13	0,0665	2038,6806	2110,5078	2081,6892	0,0247	0,0493	1,2948	7,7839	8,9700	8,9976	0,0335	1,3522	1,0253	1,0266	0,4931
30	29	14	0,0693	2124,6977	2192,2667	2166,1174	0,0246	0,0491	1,2934	7,8170	8,9976	8,9874	0,0389	1,4080	1,0279	1,0291	0,5424
31	30	15	0,0722	2207,5370	2269,5273	2246,6813	0,0241	0,0482	1,2921	7,8462	8,9874	8,9385	0,0446	1,4678	1,0304	1,0316	0,5915
32	31	16	0,0754	2285,8255	2341,0268	2322,0554	0,0233	0,0465	1,2911	7,8714	8,9385	8,8506	0,0506	1,5316	1,0329	1,0340	0,6397
33	32	17	0,0787	2358,2853	2405,6519	2391,0374	0,0221	0,0442	1,2902	7,8929	8,8506	8,7248	0,0571	1,5993	1,0352	1,0364	0,6862
34	33	18	0,0822	2423,7896	2462,4885	2452,6013	0,0206	0,0413	1,2894	7,9106	8,7248	8,5632	0,0639	1,6708	1,0375	1,0386	0,7304
35	34	19	0,0859	2481,4130	2510,8617	2505,9430	0,0190	0,0379	1,2888	7,9248	8,5632	8,3686	0,0711	1,7463	1,0396	1,0406	0,7717
36	35	20	0,0898	2530,4729	2550,3644	2550,5150	0,0171	0,0342	1,2884	7,9358	8,3686	8,1448	0,0786	1,8256	1,0416	1,0425	0,8096
37	36	21	0,0939	2570,5571	2580,8693	2586,0468	0,0151	0,0302	1,2880	7,9438	8,1448	7,8961	0,0865	1,9086	1,0433	1,0441	0,8438
38	37	22	0,0982	2601,5365	2602,5249	2612,5490	0,0131	0,0262	1,2878	7,9490	7,8961	7,6275	0,0948	1,9955	1,0449	1,0456	0,8740
39	38	23	0,1026	2623,5614	2615,7348	2630,3007	0,0111	0,0223	1,2877	7,9518	7,6275	7,3438	0,1034	2,0860	1,0462	1,0468	0,9002
40	39	24	0,1073	2637,0400	2621,1222	2639,8212	0,0092	0,0185	1,2877	7,9524	7,3438	7,0501	0,1124	2,1801	1,0474	1,0479	0,9225
41	40	25	0,1121	2642,6025	2619,4819	2641,8279	0,0075	0,0150	1,2877	7,9512	7,0501	6,7511	0,1217	2,2779	1,0483	1,0487	0,9410
42	41	26	0,1171	2641,0533	2611,7259	2637,1839	0,0060	0,0119	1,2878	7,9484	6,7511	6,4513	0,1314	2,3792	1,0491	1,0494	0,9560
43	42	27	0,1222	2633,3146	2598,8249	2626,8417	0,0046	0,0092	1,2880	7,9443	6,4513	6,1544	0,1413	2,4841	1,0497	1,0499	0,9679
44	43	28	0,1275	2620,3687	2581,7535	2611,7851	0,0035	0,0070	1,2882	7,9391	6,1544	5,8637	0,1517	2,5924	1,0502	1,0504	0,9771

45	44	29	0,1330	2603,2015	2561,4418	2592,9776	0,0026	0,0051	1,2885	7,9331	5,8637	5,5818	0,1623	2,7041	1,0505	1,0507	0,9841
46	45	30	0,1387	2582,7537	2538,7373	2571,3183	0,0018	0,0037	1,2888	7,9263	5,5818	5,3105	0,1733	2,8192	1,0508	1,0509	0,9892
47	46	31	0,1445	2559,8829	2514,3794	2547,6100	0,0013	0,0025	1,2891	7,9191	5,3105	5,0513	0,1845	2,9375	1,0510	1,0511	0,9929
48	47	32	0,1505	2535,3371	2488,9865	2522,5395	0,0009	0,0017	1,2894	7,9116	5,0513	4,8048	0,1961	3,0591	1,0511	1,0512	0,9955
49	48	33	0,1567	2509,7418	2463,0542	2496,6702	0,0006	0,0011	1,2897	7,9038	4,8048	4,5715	0,2080	3,1839	1,0512	1,0512	0,9972
50	49	34	0,1629	2483,5986	2436,9631	2470,4455	0,0004	0,0007	1,2900	7,8958	4,5715	4,3512	0,2202	3,3118	1,0513	1,0513	0,9983
51	50	35	0,1694	2457,2924	2410,9925	2444,1991	0,0002	0,0004	1,2904	7,8877	4,3512	4,1438	0,2326	3,4427	1,0513	1,0513	0,9990
52	51	36	0,1760	2431,1058	2385,3376	2418,1712	0,0001	0,0003	1,2907	7,8796	4,1438	3,9486	0,2454	3,5767	1,0513	1,0513	0,9994
53	52	37	0,1827	2405,2365	2360,1274	2392,5257	0,0001	0,0001	1,2911	7,8716	3,9486	3,7653	0,2584	3,7135	1,0513	1,0513	0,9997
54	53	38	0,1896	2379,8149	2335,4413	2367,3681	0,0000	0,0001	1,2914	7,8635	3,7653	3,5930	0,2717	3,8532	1,0514	1,0514	0,9998
55	54	39	0,1966	2354,9213	2311,3234	2342,7609	0,0000	0,0000	1,2917	7,8555	3,5930	3,4312	0,2853	3,9957	1,0514	1,0514	0,9999
56	55	40	0,2037	2330,6004	2287,7938	2318,7366	0,0000	0,0000	1,2921	7,8475	3,4312	3,2792	0,2991	4,1410	1,0514	1,0514	1,0000
57	56	41	0,2110	2306,8728	2264,8576	2295,3082	0,0000	0,0000	1,2924	7,8396	3,2792	3,1363	0,3132	4,2889	1,0514	1,0514	1,0000
58	57	42	0,2184	2283,7435	2242,5100	2272,4756	0,0000	0,0000	1,2928	7,8317	3,1363	3,0019	0,3276	4,4393	1,0514	1,0514	1,0000
59	58	43	0,2259	2261,2077	2220,7411	2250,2316	0,0000	0,0000	1,2931	7,8240	3,0019	2,8755	0,3421	4,5923	1,0514	1,0514	1,0000
60	59	44	0,2336	2239,2555	2199,5380	2228,5647	0,0000	0,0000	1,2934	7,8162	2,8755	2,7564	0,3569	4,7477	1,0514	1,0514	1,0000
61	60	45	0,2414	2217,8739	0,0000	1108,9369	0,0000	0,0000	1,3282	7,0945	2,7564	-19,5554	0,3719	4,9055	1,0514	0,5257	1,0000

Таблица А5 - Результаты теплового расчета базового двигателя при $n = 900 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
Q	f	a	m	P _y	T _y	V _a	E2	l	m	fz							
25	50	1	1,052432	1,09500	701,534	1,19084	37,6995	0,312	3,2	50							
Расчёт процесса сгорания																	
φ ₂	φ ₁	φ"	V _{ст}	T ₁ ,K	T ₂ ,K	T ₁₋₂	X ₁₋₂ *10 ⁻²	ΔX ₁₋₂ *10 ⁻²	k ₁₋₂	K ₁₋₂	p ₁ , МПа	p ₂ , МПа	σ*10 ⁻²	ψ(φ)	μ	μ ₁₋₂	χ
1	0	-25	0,1843	701,5345	708,6573	705,0958	0,0000	0,0000	1,3678	6,4380	1,0950	1,1369	0,1217	1,5477	1,0000	1,0000	0,0000
2	1	-24	0,1793	708,6570	715,8012	712,2289	0,0000	0,0000	1,3667	6,4542	1,1369	1,1800	0,1124	1,5058	1,0000	1,0000	0,0000
3	2	-23	0,1745	715,8007	723,0626	719,4313	0,0000	0,0001	1,3656	6,4703	1,1800	1,2244	0,1034	1,4654	1,0000	1,0000	0,0000
4	3	-22	0,1699	723,0618	730,6105	726,8356	0,0001	0,0002	1,3645	6,4866	1,2244	1,2703	0,0948	1,4266	1,0000	1,0000	0,0001
5	4	-21	0,1655	730,6094	738,6863	734,6472	0,0002	0,0004	1,3634	6,5036	1,2703	1,3181	0,0865	1,3894	1,0000	1,0000	0,0003

6	5	-20	0,1612	738,6849	747,6016	743,1425	0,0004	0,0007	1,3622	6,5219	1,3181	1,3684	0,0786	1,3538	1,0000	1,0001	0,0007
7	6	-19	0,1572	747,6001	757,7362	752,6673	0,0006	0,0012	1,3609	6,5420	1,3684	1,4219	0,0711	1,3199	1,0001	1,0001	0,0014
8	7	-18	0,1533	757,7345	769,5329	763,6328	0,0009	0,0019	1,3594	6,5648	1,4219	1,4794	0,0639	1,2875	1,0001	1,0002	0,0027
9	8	-17	0,1497	769,5311	783,4913	776,5103	0,0014	0,0027	1,3577	6,5910	1,4794	1,5420	0,0571	1,2568	1,0002	1,0003	0,0045
10	9	-16	0,1462	783,4895	800,1582	791,8231	0,0019	0,0038	1,3558	6,6213	1,5420	1,6109	0,0506	1,2278	1,0004	1,0005	0,0072
11	10	-15	0,1430	800,1567	820,1152	810,1355	0,0025	0,0051	1,3536	6,6566	1,6109	1,6875	0,0446	1,2005	1,0005	1,0007	0,0110
12	11	-14	0,1399	820,1142	843,9629	832,0385	0,0033	0,0066	1,3510	6,6972	1,6875	1,7731	0,0389	1,1749	1,0008	1,0010	0,0161
13	12	-13	0,1371	843,9628	872,3021	858,1332	0,0042	0,0084	1,3482	6,7437	1,7731	1,8694	0,0335	1,1509	1,0011	1,0013	0,0227
14	13	-12	0,1344	872,3036	905,7132	889,0103	0,0052	0,0105	1,3451	6,7961	1,8694	1,9778	0,0286	1,1288	1,0016	1,0018	0,0311
15	14	-11	0,1320	905,7170	944,7326	925,2284	0,0064	0,0128	1,3416	6,8542	1,9778	2,0996	0,0241	1,1083	1,0021	1,0024	0,0416
16	15	-10	0,1298	944,7398	989,8299	967,2909	0,0077	0,0155	1,3380	6,9176	2,0996	2,2362	0,0199	1,0896	1,0027	1,0031	0,0544
17	16	-9	0,1277	989,8419	1041,3839	1015,6221	0,0092	0,0183	1,3341	6,9855	2,2362	2,3885	0,0161	1,0726	1,0035	1,0039	0,0699
18	17	-8	0,1259	1041,4022	1099,6592	1070,5440	0,0107	0,0214	1,3302	7,0569	2,3885	2,5572	0,0128	1,0574	1,0044	1,0049	0,0882
19	18	-7	0,1243	1099,6857	1164,7857	1132,2540	0,0123	0,0246	1,3262	7,1306	2,5572	2,7423	0,0098	1,0440	1,0055	1,0061	0,1095
20	19	-6	0,1229	1164,8222	1236,7379	1200,8043	0,0140	0,0279	1,3223	7,2055	2,7423	2,9436	0,0072	1,0323	1,0067	1,0074	0,1341
21	20	-5	0,1218	1236,7863	1315,3186	1276,0835	0,0157	0,0313	1,3185	7,2803	2,9436	3,1603	0,0050	1,0225	1,0081	1,0089	0,1621
22	21	-4	0,1208	1315,3807	1400,1454	1357,8017	0,0173	0,0347	1,3148	7,3539	3,1603	3,3906	0,0032	1,0144	1,0097	1,0105	0,1934
23	22	-3	0,1200	1400,2227	1490,6421	1445,4792	0,0190	0,0379	1,3113	7,4252	3,3906	3,6324	0,0018	1,0081	1,0114	1,0123	0,2281
24	23	-2	0,1195	1490,7357	1586,0365	1538,4415	0,0205	0,0409	1,3080	7,4934	3,6324	3,8828	0,0008	1,0036	1,0133	1,0143	0,2660
25	24	-1	0,1192	1586,1472	1685,3660	1635,8207	0,0218	0,0436	1,3050	7,5578	3,8828	4,1383	0,0002	1,0009	1,0153	1,0164	0,3070
26	25	0	0,1191	1685,4942	1753,4700	1719,4821	0,0230	0,0459	1,3027	7,6083	4,1383	4,3952	0,0000	1,0000	1,0175	1,0187	0,3506
27	26	1	0,1192	1753,4700	1821,5600	1787,5150	0,0238	0,0477	1,3009	7,6464	4,3952	4,6491	0,0002	1,0009	1,0198	1,0210	0,3965
28	27	2	0,1195	1821,5600	1885,8500	1853,7050	0,0244	0,0488	1,2994	7,6809	4,6491	4,8954	0,0008	1,0036	1,0222	1,0234	0,4442
29	28	3	0,1200	1885,8500	1948,9300	1917,3900	0,0247	0,0493	1,2980	7,7120	4,8954	5,1289	0,0018	1,0081	1,0246	1,0259	0,4931
30	29	4	0,1208	1948,9300	2018,8900	1983,9100	0,0246	0,0491	1,2966	7,7422	5,1289	5,3447	0,0032	1,0144	1,0271	1,0283	0,5424
31	30	5	0,1218	2018,8900	2065,1300	2042,0100	0,0241	0,0482	1,2956	7,7669	5,3447	5,5382	0,0050	1,0225	1,0295	1,0307	0,5915
32	31	6	0,1229	2065,1300	2117,0200	2091,0750	0,0233	0,0465	1,2947	7,7863	5,5382	5,7054	0,0072	1,0323	1,0319	1,0331	0,6397
33	32	7	0,1243	2117,0200	2165,0378	2141,0289	0,0221	0,0442	1,2939	7,8050	5,7054	5,8430	0,0098	1,0440	1,0343	1,0354	0,6862
34	33	8	0,1259	2165,0378	2205,7600	2185,3989	0,0206	0,0413	1,2932	7,8205	5,8430	5,9485	0,0128	1,0574	1,0365	1,0375	0,7304
35	34	9	0,1277	2205,7600	2241,9000	2223,8300	0,0190	0,0379	1,2927	7,8330	5,9485	6,0206	0,0161	1,0726	1,0385	1,0395	0,7717
36	35	10	0,1298	2241,9000	2273,2700	2257,5850	0,0171	0,0342	1,2923	7,8432	6,0206	6,0590	0,0199	1,0896	1,0404	1,0413	0,8096
37	36	11	0,1320	2273,2700	2296,8300	2285,0500	0,0151	0,0302	1,2919	7,8508	6,0590	6,0644	0,0241	1,1083	1,0421	1,0429	0,8438
38	37	12	0,1344	2296,8300	2316,6700	2306,7500	0,0131	0,0262	1,2917	7,8563	6,0644	6,0387	0,0286	1,1288	1,0436	1,0443	0,8740
39	38	13	0,1371	2316,6700	2328,8800	2322,7750	0,0111	0,0223	1,2916	7,8597	6,0387	5,9841	0,0335	1,1509	1,0450	1,0455	0,9002
40	39	14	0,1399	2328,8800	2336,7900	2332,8350	0,0092	0,0185	1,2915	7,8612	5,9841	5,9040	0,0389	1,1749	1,0461	1,0465	0,9225

41	40	15	0,1430	2336,7900	2339,5700	2338,1800	0,0075	0,0150	1,2915	7,8613	5,9040	5,8019	0,0446	1,2005	1,0470	1,0474	0,9410
42	41	16	0,1462	2339,5700	2339,2600	2339,4150	0,0060	0,0119	1,2915	7,8602	5,8019	5,6815	0,0506	1,2278	1,0477	1,0480	0,9560
43	42	17	0,1497	2339,2600	2324,3400	2331,8000	0,0046	0,0092	1,2917	7,8564	5,6815	5,5465	0,0571	1,2568	1,0483	1,0486	0,9679
44	43	18	0,1533	2324,3400	2326,0700	2325,2050	0,0035	0,0070	1,2918	7,8531	5,5465	5,4005	0,0639	1,2875	1,0488	1,0490	0,9771
45	44	19	0,1572	2326,0700	2312,9800	2319,5250	0,0026	0,0051	1,2920	7,8502	5,4005	5,2468	0,0711	1,3199	1,0491	1,0493	0,9841
46	45	20	0,1612	2312,9800	2301,5800	2307,2800	0,0018	0,0037	1,2922	7,8454	5,2468	5,0882	0,0786	1,3538	1,0494	1,0495	0,9892
47	46	21	0,1655	2301,5800	2287,1600	2294,3700	0,0013	0,0025	1,2924	7,8405	5,0882	4,9271	0,0865	1,3894	1,0496	1,0496	0,9929
48	47	22	0,1699	2287,1600	2269,7200	2278,4400	0,0009	0,0017	1,2926	7,8346	4,9271	4,7656	0,0948	1,4266	1,0497	1,0498	0,9955
49	48	23	0,1745	2269,7200	2251,9400	2260,8300	0,0006	0,0011	1,2929	7,8282	4,7656	4,6052	0,1034	1,4654	1,0498	1,0498	0,9972
50	49	24	0,1793	2251,9400	2234,2400	2243,0900	0,0004	0,0007	1,2932	7,8218	4,6052	4,4471	0,1124	1,5058	1,0499	1,0499	0,9983
51	50	25	0,1843	2234,2400	2215,7700	2225,0050	0,0002	0,0004	1,2935	7,8152	4,4471	4,2922	0,1217	1,5477	1,0499	1,0499	0,9990
52	51	26	0,1895	2215,7700	2195,6500	1107,8850	0,0001	0,0003	1,3282	7,0934	4,2922	-30,4525	0,1314	1,5911	1,0499	0,5250	0,9994

Таблица А6 - Результаты теплового расчета базового двигателя при $n = 2700 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
Q	f	a	m	P _y	T _y	V _a	E2	l	m	fz							
25	50	1	1,052432	1,10320	695,275	1,17144	39,0155	0,312	3,2	50							
Расчёт процесса сгорания																	
φ2	φ1	φ"	V _{ст}	T ₁ ,K	T ₂ ,K	T ₁₋₂	X ₁₋₂ *10 ⁻²	ΔX ₁₋₂ *10 ⁻²	k ₁₋₂	K ₁₋₂	p ₁ , МПа	p ₂ , МПа	σ*10 ⁻²	ψ(φ)	μ	μ ₁₋₂	χ
1	0	-25	0,1813	695,2754	702,3533	698,8143	0,0000	0,0000	1,3688	6,4236	1,1032	1,1455	0,1217	1,5477	1,0000	1,0000	0,0000
2	1	-24	0,1764	702,3533	709,4535	705,9034	0,0000	0,0000	1,3677	6,4399	1,1455	1,1889	0,1124	1,5058	1,0000	1,0000	0,0000
3	2	-23	0,1717	709,4535	716,6745	713,0640	0,0000	0,0001	1,3666	6,4561	1,1889	1,2337	0,1034	1,4654	1,0000	1,0000	0,0000
4	3	-22	0,1671	716,6745	724,1897	720,4321	0,0001	0,0002	1,3655	6,4726	1,2337	1,2800	0,0948	1,4266	1,0000	1,0000	0,0001
5	4	-21	0,1628	724,1897	732,2459	728,2178	0,0002	0,0004	1,3643	6,4897	1,2800	1,3283	0,0865	1,3894	1,0000	1,0000	0,0003
6	5	-20	0,1586	732,2459	741,1619	736,7039	0,0004	0,0007	1,3631	6,5082	1,3283	1,3791	0,0786	1,3538	1,0000	1,0001	0,0007
7	6	-19	0,1546	741,1619	751,3256	746,2437	0,0006	0,0012	1,3618	6,5286	1,3791	1,4332	0,0711	1,3198	1,0001	1,0001	0,0014
8	7	-18	0,1508	751,3256	763,1896	757,2576	0,0009	0,0019	1,3602	6,5517	1,4332	1,4915	0,0639	1,2875	1,0001	1,0002	0,0027
9	8	-17	0,1472	763,1896	777,2641	770,2269	0,0014	0,0027	1,3585	6,5784	1,4915	1,5551	0,0571	1,2568	1,0002	1,0003	0,0045
10	9	-16	0,1438	777,2641	794,1071	785,6856	0,0019	0,0038	1,3565	6,6094	1,5551	1,6252	0,0506	1,2278	1,0004	1,0005	0,0072

11	10	-15	0,1406	794,1071	814,3118	804,2094	0,0025	0,0051	1,3543	6,6454	1,6252	1,7033	0,0446	1,2005	1,0006	1,0007	0,0110
12	11	-14	0,1376	814,3117	838,4898	826,4008	0,0033	0,0066	1,3517	6,6871	1,7033	1,7908	0,0389	1,1749	1,0008	1,0010	0,0161
13	12	-13	0,1348	838,4898	867,2530	852,8714	0,0042	0,0084	1,3488	6,7346	1,7908	1,8894	0,0335	1,1509	1,0011	1,0013	0,0227
14	13	-12	0,1322	867,2530	901,1910	884,2220	0,0052	0,0105	1,3455	6,7883	1,8894	2,0005	0,0286	1,1287	1,0016	1,0018	0,0311
15	14	-11	0,1298	901,1910	940,8488	921,0198	0,0064	0,0128	1,3420	6,8478	2,0005	2,1256	0,0241	1,1083	1,0021	1,0024	0,0416
16	15	-10	0,1276	940,8487	986,7022	963,7753	0,0077	0,0155	1,3383	6,9126	2,1256	2,2661	0,0199	1,0896	1,0027	1,0031	0,0544
17	16	-9	0,1257	986,7020	1039,1345	1012,9180	0,0092	0,0183	1,3343	6,9819	2,2661	2,4228	0,0161	1,0726	1,0035	1,0040	0,0699
18	17	-8	0,1239	1039,1341	1098,4131	1068,7732	0,0107	0,0214	1,3303	7,0547	2,4228	2,5965	0,0128	1,0574	1,0044	1,0049	0,0882
19	18	-7	0,1223	1098,4124	1164,6679	1131,5395	0,0123	0,0246	1,3263	7,1298	2,5965	2,7874	0,0098	1,0440	1,0055	1,0061	0,1095
20	19	-6	0,1209	1164,6667	1237,8716	1201,2682	0,0140	0,0279	1,3223	7,2060	2,7874	2,9951	0,0072	1,0323	1,0067	1,0074	0,1341
21	20	-5	0,1198	1237,8697	1317,8225	1277,8447	0,0157	0,0313	1,3184	7,2820	2,9951	3,2187	0,0050	1,0225	1,0081	1,0089	0,1621
22	21	-4	0,1188	1317,8197	1404,1309	1360,9733	0,0173	0,0347	1,3146	7,3566	3,2187	3,4566	0,0032	1,0144	1,0097	1,0105	0,1934
23	22	-3	0,1181	1404,1269	1496,2106	1450,1660	0,0190	0,0379	1,3111	7,4288	3,4566	3,7064	0,0018	1,0081	1,0114	1,0124	0,2281
24	23	-2	0,1176	1496,2052	1593,2766	1544,7373	0,0205	0,0409	1,3078	7,4977	3,7064	3,9652	0,0008	1,0036	1,0133	1,0143	0,2660
25	24	-1	0,1173	1593,2694	1694,3501	1643,8051	0,0218	0,0436	1,3048	7,5627	3,9652	4,2293	0,0002	1,0009	1,0154	1,0165	0,3070
26	25	0	0,1171	1694,3409	1754,4700	1724,4054	0,0230	0,0459	1,3025	7,6111	4,2293	4,4951	0,0000	1,0000	1,0175	1,0187	0,3506
27	26	1	0,1173	1754,4700	1821,5600	1788,0150	0,0238	0,0477	1,3009	7,6466	4,4951	4,7581	0,0002	1,0009	1,0198	1,0210	0,3965
28	27	2	0,1176	1821,5600	1884,9500	1853,2550	0,0244	0,0488	1,2994	7,6807	4,7581	5,0133	0,0008	1,0036	1,0222	1,0235	0,4442
29	28	3	0,1181	1884,9500	1947,9000	1916,4250	0,0247	0,0493	1,2980	7,7115	5,0133	5,2555	0,0018	1,0081	1,0247	1,0259	0,4931
30	29	4	0,1188	1947,9000	2009,0900	1978,4950	0,0246	0,0491	1,2967	7,7398	5,2555	5,4794	0,0032	1,0144	1,0271	1,0284	0,5424
31	30	5	0,1198	2009,0900	2064,1600	2036,6250	0,0241	0,0482	1,2957	7,7646	5,4794	5,6804	0,0050	1,0225	1,0296	1,0308	0,5915
32	31	6	0,1209	2064,1600	2116,9203	2090,5401	0,0233	0,0465	1,2947	7,7861	5,6804	5,8542	0,0072	1,0323	1,0320	1,0332	0,6397
33	32	7	0,1223	2116,9203	2164,0379	2140,4791	0,0221	0,0442	1,2939	7,8048	5,8542	5,9973	0,0098	1,0440	1,0343	1,0355	0,6862
34	33	8	0,1239	2164,0379	2206,7679	2185,4029	0,0206	0,0413	1,2932	7,8205	5,9973	6,1075	0,0128	1,0574	1,0366	1,0376	0,7304
35	34	9	0,1257	2206,7679	2242,0054	2224,3866	0,0190	0,0379	1,2927	7,8332	6,1075	6,1831	0,0161	1,0726	1,0386	1,0396	0,7717
36	35	10	0,1276	2242,0054	2272,2700	2257,1377	0,0171	0,0342	1,2923	7,8430	6,1831	6,2239	0,0199	1,0896	1,0405	1,0414	0,8096
37	36	11	0,1298	2272,2700	2295,9958	2284,1329	0,0151	0,0302	1,2919	7,8505	6,2239	6,2306	0,0241	1,1083	1,0422	1,0430	0,8438
38	37	12	0,1322	2295,9958	2316,1700	2306,0829	0,0131	0,0262	1,2917	7,8561	6,2306	6,2051	0,0286	1,1287	1,0437	1,0444	0,8740
39	38	13	0,1348	2316,1700	2328,9955	2322,5827	0,0111	0,0223	1,2916	7,8597	6,2051	6,1498	0,0335	1,1509	1,0451	1,0456	0,9002
40	39	14	0,1376	2328,9955	2337,0948	2333,0451	0,0092	0,0185	1,2915	7,8613	6,1498	6,0681	0,0389	1,1749	1,0462	1,0466	0,9225
41	40	15	0,1406	2337,0948	2341,3700	2339,2324	0,0075	0,0150	1,2915	7,8617	6,0681	5,9636	0,0446	1,2005	1,0471	1,0475	0,9410
42	41	16	0,1438	2341,3700	2338,7480	2340,0590	0,0060	0,0119	1,2915	7,8604	5,9636	5,8402	0,0506	1,2278	1,0478	1,0481	0,9560
43	42	17	0,1472	2338,7480	2333,6400	2336,1940	0,0046	0,0092	1,2916	7,8578	5,8402	5,7017	0,0571	1,2568	1,0484	1,0487	0,9679
44	43	18	0,1508	2333,6400	2327,8700	2330,7550	0,0035	0,0070	1,2918	7,8549	5,7017	5,5519	0,0639	1,2875	1,0489	1,0491	0,9771
45	44	19	0,1546	2327,8700	2315,4800	2321,6750	0,0026	0,0051	1,2919	7,8510	5,5519	5,3940	0,0711	1,3198	1,0493	1,0494	0,9841

46	45	20	0,1586	2315,4800	2302,8750	2309,1775	0,0018	0,0037	1,2921	7,8461	5,3940	5,2311	0,0786	1,3538	1,0495	1,0496	0,9892
47	46	21	0,1628	2302,8750	2287,3600	2295,1175	0,0013	0,0025	1,2924	7,8407	5,2311	5,0656	0,0865	1,3894	1,0497	1,0498	0,9929
48	47	22	0,1671	2287,3600	2295,7200	2291,5400	0,0009	0,0017	1,2924	7,8391	5,0656	4,8996	0,0948	1,4266	1,0498	1,0499	0,9955
49	48	23	0,1717	2295,7200	2292,0400	2293,8800	0,0006	0,0011	1,2924	7,8396	4,8996	4,7348	0,1034	1,4654	1,0499	1,0499	0,9972
50	49	24	0,1764	2292,0400	2285,6400	2288,8400	0,0004	0,0007	1,2925	7,8377	4,7348	4,5723	0,1124	1,5058	1,0500	1,0500	0,9983
51	50	25	0,1813	2285,6400	2204,7700	2245,2050	0,0002	0,0004	1,2932	7,8224	4,5723	4,4131	0,1217	1,5477	1,0500	1,0500	0,9990
52	51	26	0,1864	2204,7700	2195,6500	1102,3850	0,0001	0,0003	1,3286	7,0870	4,4131	-31,2820	0,1314	1,5911	1,0500	0,5250	0,9994

Таблица А7 - Результаты теплового расчета базового двигателя при $n = 5200 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
Q	f	a	m	P _y	T _y	V _a	E2	l	m	fz							
25	50	1	1,052432	1,10526	698,985	1,17550	38,5026	0,312	3,2	50							
Расчёт процесса сгорания																	
φ2	φ1	φ"	V _{ст}	T ₁ ,K	T ₂ ,K	T ₁₋₂	X ₁₋₂ *10 ⁻²	ΔX ₁₋₂ *10 ⁻²	k ₁₋₂	K ₁₋₂	p ₁ , МПа	p ₂ , МПа	σ*10 ⁻²	ψ(φ)	μ	μ ₁₋₂	χ
1	0	-25	0,1819	698,9859	706,0943	702,5401	0,0000	0,0000	1,3682	6,4322	1,1053	1,1476	0,1217	1,5477	1,0000	1,0000	0,0000
2	1	-24	0,1770	706,0943	713,2628	709,6786	0,0000	0,0000	1,3671	6,4485	1,1476	1,1912	0,1124	1,5058	1,0000	1,0000	0,0000
3	2	-23	0,1723	713,2628	720,6563	716,9596	0,0001	0,0001	1,3660	6,4648	1,1912	1,2362	0,1034	1,4654	1,0000	1,0000	0,0000
4	3	-22	0,1677	720,6563	728,5302	724,5933	0,0002	0,0003	1,3648	6,4818	1,2362	1,2832	0,0948	1,4266	1,0000	1,0000	0,0001
5	4	-21	0,1633	728,5302	737,2210	732,8756	0,0003	0,0006	1,3636	6,4999	1,2832	1,3327	0,0865	1,3894	1,0000	1,0000	0,0003
6	5	-20	0,1591	737,2210	747,1389	742,1800	0,0005	0,0011	1,3623	6,5200	1,3327	1,3855	0,0786	1,3538	1,0001	1,0001	0,0007
7	6	-19	0,1552	747,1389	758,7593	752,9491	0,0009	0,0017	1,3608	6,5428	1,3855	1,4425	0,0711	1,3199	1,0001	1,0002	0,0014
8	7	-18	0,1513	758,7593	772,6132	765,6862	0,0013	0,0026	1,3591	6,5692	1,4425	1,5048	0,0639	1,2875	1,0002	1,0003	0,0027
9	8	-17	0,1477	772,6132	789,2754	780,9443	0,0018	0,0037	1,3571	6,6001	1,5048	1,5738	0,0571	1,2568	1,0003	1,0004	0,0045
10	9	-16	0,1443	789,2754	809,3488	799,3121	0,0025	0,0050	1,3549	6,6361	1,5738	1,6510	0,0506	1,2278	1,0005	1,0006	0,0072
11	10	-15	0,1411	809,3488	833,4475	821,3982	0,0033	0,0065	1,3522	6,6779	1,6510	1,7377	0,0446	1,2005	1,0008	1,0009	0,0110
12	11	-14	0,1381	833,4475	862,1759	847,8118	0,0042	0,0084	1,3493	6,7258	1,7377	1,8356	0,0389	1,1749	1,0011	1,0013	0,0161
13	12	-13	0,1353	862,1760	896,1074	879,1419	0,0052	0,0105	1,3460	6,7799	1,8356	1,9463	0,0335	1,1509	1,0015	1,0018	0,0227

14	13	-12	0,1327	896,1077	935,7609	915,9346	0,0064	0,0128	1,3425	6,8398	1,9463	2,0712	0,0286	1,1288	1,0020	1,0023	0,0311
15	14	-11	0,1303	935,7615	981,5786	958,6707	0,0077	0,0154	1,3387	6,9051	2,0712	2,2115	0,0241	1,1083	1,0027	1,0030	0,0416
16	15	-10	0,1281	981,5799	1033,9038	1007,7431	0,0091	0,0182	1,3347	6,9749	2,2115	2,3682	0,0199	1,0896	1,0034	1,0039	0,0544
17	16	-9	0,1261	1033,9062	1092,9599	1063,4353	0,0106	0,0213	1,3307	7,0481	2,3682	2,5419	0,0161	1,0726	1,0043	1,0049	0,0699
18	17	-8	0,1243	1092,9643	1158,8329	1125,9023	0,0122	0,0244	1,3266	7,1234	2,5419	2,7329	0,0128	1,0574	1,0054	1,0060	0,0882
19	18	-7	0,1227	1158,8402	1231,4538	1195,1528	0,0139	0,0277	1,3226	7,1996	2,7329	2,9407	0,0098	1,0440	1,0066	1,0073	0,1095
20	19	-6	0,1214	1231,4655	1310,5866	1271,0349	0,0155	0,0310	1,3187	7,2755	2,9407	3,1645	0,0072	1,0323	1,0080	1,0088	0,1341
21	20	-5	0,1202	1310,6042	1395,8176	1353,2236	0,0171	0,0342	1,3150	7,3499	3,1645	3,4026	0,0050	1,0225	1,0096	1,0104	0,1621
22	21	-4	0,1192	1395,8430	1486,5508	1441,2144	0,0187	0,0374	1,3114	7,4217	3,4026	3,6529	0,0032	1,0144	1,0113	1,0122	0,1934
23	22	-3	0,1185	1486,5859	1582,0088	1534,3208	0,0201	0,0402	1,3082	7,4903	3,6529	3,9124	0,0018	1,0081	1,0131	1,0142	0,2281
24	23	-2	0,1180	1582,0556	1681,2403	1631,6781	0,0214	0,0428	1,3051	7,5549	3,9124	4,1775	0,0008	1,0036	1,0152	1,0162	0,2660
25	24	-1	0,1177	1681,3006	1783,1358	1732,2558	0,0225	0,0450	1,3023	7,6151	4,1775	4,4443	0,0002	1,0009	1,0173	1,0184	0,3070
26	25	0	0,1176	1783,2111	1820,7000	1801,9555	0,0233	0,0467	1,3006	7,6535	4,4443	4,7088	0,0000	1,0000	1,0195	1,0207	0,3506
27	26	1	0,1177	1820,7000	1859,7400	1840,2200	0,0239	0,0478	1,2997	7,6737	4,7088	4,9668	0,0002	1,0009	1,0219	1,0231	0,3965
28	27	2	0,1180	1859,7400	1907,1200	1883,4300	0,0241	0,0483	1,2987	7,6953	4,9668	5,2132	0,0008	1,0036	1,0243	1,0255	0,4442
29	28	3	0,1185	1907,1200	1982,6600	1944,8900	0,0240	0,0481	1,2974	7,7242	5,2132	5,4424	0,0018	1,0081	1,0267	1,0279	0,4931
30	29	4	0,1192	1982,6600	2045,7700	2014,2150	0,0236	0,0472	1,2961	7,7546	5,4424	5,6498	0,0032	1,0144	1,0291	1,0303	0,5424
31	30	5	0,1202	2045,7700	2095,9800	2070,8750	0,0229	0,0457	1,2951	7,7777	5,6498	5,8313	0,0050	1,0225	1,0314	1,0326	0,5915
32	31	6	0,1214	2095,9800	2122,8800	2109,4300	0,0218	0,0436	1,2945	7,7923	5,8313	5,9837	0,0072	1,0323	1,0337	1,0348	0,6397
33	32	7	0,1227	2122,8800	2167,2900	2145,0850	0,0205	0,0410	1,2939	7,8050	5,9837	6,1043	0,0098	1,0440	1,0359	1,0369	0,6862
34	33	8	0,1243	2167,2900	2205,2700	2186,2800	0,0189	0,0378	1,2933	7,8191	6,1043	6,1915	0,0128	1,0574	1,0380	1,0389	0,7304
35	34	9	0,1261	2205,2700	2241,0700	2223,1700	0,0172	0,0344	1,2928	7,8310	6,1915	6,2446	0,0161	1,0726	1,0398	1,0407	0,7717
36	35	10	0,1281	2241,0700	2270,5800	2255,8250	0,0154	0,0307	1,2924	7,8409	6,2446	6,2642	0,0199	1,0896	1,0416	1,0423	0,8096
37	36	11	0,1303	2270,5800	2297,3900	2283,9850	0,0135	0,0269	1,2920	7,8489	6,2642	6,2517	0,0241	1,1083	1,0431	1,0438	0,8438
38	37	12	0,1327	2297,3900	2316,5600	2306,9750	0,0116	0,0232	1,2918	7,8549	6,2517	6,2091	0,0286	1,1288	1,0444	1,0450	0,8740
39	38	13	0,1353	2316,5600	2333,9850	2325,2725	0,0098	0,0196	1,2916	7,8592	6,2091	6,1395	0,0335	1,1509	1,0456	1,0461	0,9002
40	39	14	0,1381	2333,9850	2345,8600	2339,9225	0,0081	0,0162	1,2914	7,8624	6,1395	6,0461	0,0389	1,1749	1,0466	1,0470	0,9225
41	40	15	0,1411	2345,8600	2353,8900	2349,8750	0,0066	0,0131	1,2914	7,8642	6,0461	5,9326	0,0446	1,2005	1,0474	1,0477	0,9410
42	41	16	0,1443	2353,8900	2356,8400	2355,3650	0,0052	0,0104	1,2913	7,8647	5,9326	5,8025	0,0506	1,2278	1,0480	1,0483	0,9560
43	42	17	0,1477	2356,8400	2356,3970	2356,6185	0,0040	0,0080	1,2914	7,8639	5,8025	5,6595	0,0571	1,2568	1,0486	1,0488	0,9679
44	43	18	0,1513	2356,3970	2354,4700	2355,4335	0,0030	0,0061	1,2914	7,8626	5,6595	5,5068	0,0639	1,2875	1,0490	1,0491	0,9771
45	44	19	0,1552	2354,4700	2347,1100	2350,7900	0,0022	0,0045	1,2915	7,8603	5,5068	5,3476	0,0711	1,3199	1,0493	1,0494	0,9841
46	45	20	0,1591	2347,1100	2337,6100	2342,3600	0,0016	0,0032	1,2917	7,8569	5,3476	5,1843	0,0786	1,3538	1,0495	1,0496	0,9892
47	46	21	0,1633	2337,6100	2326,2700	2331,9400	0,0011	0,0023	1,2918	7,8530	5,1843	5,0192	0,0865	1,3894	1,0497	1,0497	0,9929
48	47	22	0,1677	2326,2700	2315,3400	2320,8050	0,0008	0,0016	1,2920	7,8489	5,0192	4,8541	0,0948	1,4266	1,0498	1,0498	0,9955

49	48	23	0,1723	2315,3400	2295,8600	2305,6000	0,0005	0,0010	1,2922	7,8436	4,8541	4,6905	0,1034	1,4654	1,0499	1,0499	0,9972
50	49	24	0,1770	2295,8600	2355,3800	2325,6200	0,0003	0,0007	1,2920	7,8501	4,6905	4,5295	0,1124	1,5058	1,0499	1,0499	0,9983
51	50	25	0,1819	2355,3800	2233,8200	2294,6000	0,0002	0,0004	1,2924	7,8395	4,5295	4,3718	0,1217	1,5477	1,0499	1,0499	0,9990
52	51	26	0,1870	2233,8200	2228,5400	2231,1800	0,0001	0,0003	1,2934	7,8173	4,3718	4,2180	0,1314	1,5911	1,0500	1,0500	0,9994

Таблица А7 - Результаты теплового расчета базового двигателя при $n = 5600 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
Q	f	a	m	Py	Ty	Va	E2	l	m	fz							
25	50	1	1,052432	1,10836	702,963	1,17889	38,35497	0,312	3,2	50							
Расчёт процесса сгорания																	
φ2	φ1	φ"	Vст	T ₁ ,K	T ₂ ,K	T ₁₋₂	X ₁₋₂ *10 ⁻²	ΔX ₁₋₂ *10 ⁻²	k ₁₋₂	K ₁₋₂	p ₁ , МПа	p ₂ , МПа	σ*10 ⁻²	ψ(φ)	μ	μ ₁₋₂	χ
1	0	-25	0,1825	702,9638	710,0965	706,5302	0,0000	0,0000	1,3676	6,4413	1,1084	1,1508	0,1217	1,5477	1,0000	1,0000	0,0000
2	1	-24	0,1775	710,0965	717,2507	713,6736	0,0000	0,0000	1,3665	6,4574	1,1508	1,1944	0,1124	1,5058	1,0000	1,0000	0,0000
3	2	-23	0,1728	717,2507	724,5232	720,8870	0,0000	0,0001	1,3654	6,4735	1,1944	1,2393	0,1034	1,4654	1,0000	1,0000	0,0000
4	3	-22	0,1682	724,5232	732,0845	728,3039	0,0001	0,0002	1,3643	6,4898	1,2393	1,2858	0,0948	1,4266	1,0000	1,0000	0,0001
5	4	-21	0,1638	732,0845	740,1776	736,1311	0,0002	0,0004	1,3632	6,5068	1,2858	1,3342	0,0865	1,3894	1,0000	1,0000	0,0003
6	5	-20	0,1596	740,1776	749,1163	744,6470	0,0004	0,0007	1,3620	6,5251	1,3342	1,3851	0,0786	1,3538	1,0000	1,0001	0,0007
7	6	-19	0,1556	749,1164	759,2831	754,1998	0,0006	0,0012	1,3607	6,5452	1,3851	1,4392	0,0711	1,3198	1,0001	1,0001	0,0014
8	7	-18	0,1518	759,2832	771,1237	765,2036	0,0009	0,0019	1,3592	6,5680	1,4392	1,4975	0,0639	1,2875	1,0001	1,0002	0,0027
9	8	-17	0,1482	771,1240	785,1414	778,1330	0,0014	0,0027	1,3575	6,5942	1,4975	1,5609	0,0571	1,2568	1,0002	1,0003	0,0045
10	9	-16	0,1447	785,1419	801,8866	793,5147	0,0019	0,0038	1,3556	6,6246	1,5609	1,6307	0,0506	1,2278	1,0004	1,0005	0,0072
11	10	-15	0,1415	801,8875	821,9449	811,9170	0,0025	0,0051	1,3534	6,6599	1,6307	1,7084	0,0446	1,2005	1,0005	1,0007	0,0110
12	11	-14	0,1385	821,9464	845,9209	833,9349	0,0033	0,0066	1,3508	6,7006	1,7084	1,7953	0,0389	1,1749	1,0008	1,0010	0,0161
13	12	-13	0,1357	845,9234	874,4196	860,1735	0,0042	0,0084	1,3480	6,7472	1,7953	1,8929	0,0335	1,1509	1,0011	1,0013	0,0227
14	13	-12	0,1331	874,4236	908,0250	891,2275	0,0052	0,0105	1,3448	6,7997	1,8929	2,0029	0,0286	1,1287	1,0016	1,0018	0,0311
15	14	-11	0,1307	908,0313	947,2772	927,6591	0,0064	0,0128	1,3414	6,8580	2,0029	2,1266	0,0241	1,1083	1,0021	1,0024	0,0416
16	15	-10	0,1284	947,2869	992,6489	969,9751	0,0077	0,0155	1,3378	6,9215	2,1266	2,2653	0,0199	1,0896	1,0027	1,0031	0,0544
17	16	-9	0,1264	992,6632	1044,5213	1018,6026	0,0092	0,0183	1,3339	6,9895	2,2653	2,4200	0,0161	1,0726	1,0035	1,0039	0,0699
18	17	-8	0,1247	1044,5419	1103,1611	1073,8658	0,0107	0,0214	1,3300	7,0609	2,4200	2,5913	0,0128	1,0574	1,0044	1,0049	0,0882

19	18	-7	0,1231	1103,1898	1168,6990	1135,9637	0,0123	0,0246	1,3260	7,1348	2,5913	2,7794	0,0098	1,0440	1,0055	1,0061	0,1095
20	19	-6	0,1217	1168,7377	1241,1098	1204,9490	0,0140	0,0279	1,3221	7,2097	2,7794	2,9840	0,0072	1,0323	1,0067	1,0074	0,1341
21	20	-5	0,1205	1241,1603	1320,1951	1280,7099	0,0157	0,0313	1,3182	7,2846	2,9840	3,2041	0,0050	1,0225	1,0081	1,0089	0,1621
22	21	-4	0,1196	1320,2594	1405,5706	1362,9547	0,0173	0,0347	1,3146	7,3582	3,2041	3,4382	0,0032	1,0144	1,0097	1,0105	0,1934
23	22	-3	0,1188	1405,6500	1496,6565	1451,2012	0,0190	0,0379	1,3111	7,4295	3,4382	3,6840	0,0018	1,0081	1,0114	1,0123	0,2281
24	23	-2	0,1183	1496,7524	1592,6762	1544,7707	0,0205	0,0409	1,3078	7,4977	3,6840	3,9386	0,0008	1,0036	1,0133	1,0143	0,2660
25	24	-1	0,1180	1592,7891	1692,6609	1642,7901	0,0218	0,0436	1,3048	7,5621	3,9386	4,1983	0,0002	1,0009	1,0153	1,0164	0,3070
26	25	0	0,1179	1692,7911	1737,8400	1715,3156	0,0230	0,0459	1,3028	7,6059	4,1983	4,4597	0,0000	1,0000	1,0175	1,0187	0,3506
27	26	1	0,1180	1737,8400	1774,9200	1756,3800	0,0238	0,0477	1,3017	7,6296	4,4597	4,7189	0,0002	1,0009	1,0198	1,0210	0,3965
28	27	2	0,1183	1774,9200	1831,9800	1803,4500	0,0244	0,0488	1,3005	7,6553	4,7189	4,9705	0,0008	1,0036	1,0222	1,0234	0,4442
29	28	3	0,1188	1831,9800	1882,9500	1857,4650	0,0247	0,0493	1,2993	7,6830	4,9705	5,2094	0,0018	1,0081	1,0246	1,0259	0,4931
30	29	4	0,1196	1882,9500	1937,0800	1910,0150	0,0246	0,0491	1,2981	7,7084	5,2094	5,4303	0,0032	1,0144	1,0271	1,0283	0,5424
31	30	5	0,1205	1937,0800	1985,0700	1961,0750	0,0241	0,0482	1,2971	7,7316	5,4303	5,6285	0,0050	1,0225	1,0295	1,0307	0,5915
32	31	6	0,1217	1985,0700	2033,7800	2009,4250	0,0233	0,0465	1,2962	7,7522	5,6285	5,7999	0,0072	1,0323	1,0319	1,0331	0,6397
33	32	7	0,1231	2033,7800	2078,9800	2056,3800	0,0221	0,0442	1,2954	7,7710	5,7999	5,9410	0,0098	1,0440	1,0343	1,0354	0,6862
34	33	8	0,1247	2078,9800	2119,7900	2099,3850	0,0206	0,0413	1,2947	7,7872	5,9410	6,0494	0,0128	1,0574	1,0365	1,0375	0,7304
35	34	9	0,1264	2119,7900	2156,9200	2138,3550	0,0190	0,0379	1,2941	7,8009	6,0494	6,1236	0,0161	1,0726	1,0385	1,0395	0,7717
36	35	10	0,1284	2156,9200	2191,6200	2174,2700	0,0171	0,0342	1,2936	7,8128	6,1236	6,1633	0,0199	1,0896	1,0404	1,0413	0,8096
37	36	11	0,1307	2191,6200	2220,3900	2206,0050	0,0151	0,0302	1,2931	7,8227	6,1633	6,1694	0,0241	1,1083	1,0421	1,0429	0,8438
38	37	12	0,1331	2220,3900	2246,4900	2233,4400	0,0131	0,0262	1,2928	7,8307	6,1694	6,1435	0,0286	1,1287	1,0436	1,0443	0,8740
39	38	13	0,1357	2246,4900	2268,3600	2257,4250	0,0111	0,0223	1,2925	7,8373	6,1435	6,0883	0,0335	1,1509	1,0450	1,0455	0,9002
40	39	14	0,1385	2268,3600	2284,4870	2276,4235	0,0092	0,0185	1,2923	7,8421	6,0883	6,0069	0,0389	1,1749	1,0461	1,0465	0,9225
41	40	15	0,1415	2284,4870	2297,4400	2290,9635	0,0075	0,0150	1,2922	7,8454	6,0069	5,9031	0,0446	1,2005	1,0470	1,0474	0,9410
42	41	16	0,1447	2297,4400	2316,3400	2306,8900	0,0060	0,0119	1,2920	7,8493	5,9031	5,7806	0,0506	1,2278	1,0477	1,0480	0,9560
43	42	17	0,1482	2316,3400	2311,3700	2313,8550	0,0046	0,0092	1,2920	7,8504	5,7806	5,6433	0,0571	1,2568	1,0483	1,0486	0,9679
44	43	18	0,1518	2311,3700	2312,4550	2311,9125	0,0035	0,0070	1,2920	7,8486	5,6433	5,4947	0,0639	1,2875	1,0488	1,0490	0,9771
45	44	19	0,1556	2312,4550	2310,7700	2311,6125	0,0026	0,0051	1,2921	7,8476	5,4947	5,3383	0,0711	1,3198	1,0491	1,0493	0,9841
46	45	20	0,1596	2310,7700	2305,7400	2308,2550	0,0018	0,0037	1,2922	7,8457	5,3383	5,1770	0,0786	1,3538	1,0494	1,0495	0,9892
47	46	21	0,1638	2305,7400	2298,0800	2301,9100	0,0013	0,0025	1,2923	7,8431	5,1770	5,0131	0,0865	1,3894	1,0496	1,0496	0,9929
48	47	22	0,1682	2298,0800	2292,8300	2295,4550	0,0009	0,0017	1,2924	7,8405	5,0131	4,8488	0,0948	1,4266	1,0497	1,0498	0,9955
49	48	23	0,1728	2292,8300	2287,6400	2290,2350	0,0006	0,0011	1,2925	7,8384	4,8488	4,6857	0,1034	1,4654	1,0498	1,0498	0,9972
50	49	24	0,1775	2287,6400	2283,7300	2285,6850	0,0004	0,0007	1,2925	7,8366	4,6857	4,5249	0,1124	1,5058	1,0499	1,0499	0,9983
51	50	25	0,1825	2283,7300	2247,4300	2265,5800	0,0002	0,0004	1,2928	7,8295	4,5249	4,3674	0,1217	1,5477	1,0499	1,0499	0,9990
52	51	26	0,1876	2247,4300	2230,0200	1123,7150	0,0001	0,0003	1,3273	7,1115	4,3674	-31,0650	0,1314	1,5911	1,0499	0,5250	0,9994

Приложение Б— Расчет деталей

Б.1 Расчет поршневой группы

Б.1.1 Расчет поршня

На основании данных расчетов (теплового, скоростной характеристики и динамического) получили: диаметр цилиндра $D = 82$ мм, ход поршня $S = 75,6$ мм, действительное максимальное давление сгорания, $P_{zo} = 8,9845$ МПа площадь поршня $F_{\Pi} - 52,81 \text{ см}^2$, наибольшую нормальную силу $N_{\max} = 0,0039619$ МН при $\phi = 380^\circ$, массу поршневой группы $m_{\Pi} = 0,422$ кг, частоту вращения $n_{x.x.\max} = 5600$ об/мин и $\lambda = 0,3125$.

Напряжение изгиба в днище поршня

$$\sigma_{из} = P_{zo} \cdot (r_i / \delta)^2 = 8,9845 \cdot (29,8 / 8)^2 = 124,66 \text{ МПа}, \quad (\text{Б.1})$$

где

$$r_i = D / 2 - (s + t + \Delta t) = 82 / 2 - (7 + 3,5 + 0,7) = 29,8 \text{ мм}. \quad (\text{Б.2})$$

Днище поршня должно быть усилено ребрами жесткости.

Напряжение сжатия в сечении $x - x$

$$\sigma_{сжс} = P_{zo} / F_{x-x} = 0,0474 / 0,001193 = 39,746 \text{ МПа}, \quad (\text{Б.3})$$

где:

$$P_{zo} = p_{zo} \cdot F_{\Pi} = 8,9845 \cdot 52,81 \cdot 10^{-4} = 0,0474 \text{ МН} \quad (\text{Б.4})$$

$$F_{x-x} = (\pi / 4) \cdot (d_k^2 - d_i^2) \cdot n_M' \cdot F' = [(3,14 / 4) \cdot (73,6^2 - 60^2) - 4 \cdot 17,85] \cdot 10^{-6} = 0,001193 \text{ м}^2; \quad (\text{Б.5})$$

$$d_k = D - 2 \cdot (t + \Delta t) = 82 - 2 \cdot (3,5 + 0,7) = 73,6 \text{ мм} \\ F' = (d_k - d_i) \cdot d_M / 2 = (73,6 - 60) \cdot 3 / 2 = 17,85 \text{ мм}^2; \quad (\text{Б.6})$$

Напряжение разрыва в сечении $x - x$:

- максимальная угловая скорость холостого хода

$$\omega_{x.x.max} = \pi * n_{x.x.max} / 30 = 3,14 * 5600 / 30 = 586 \text{ рад / сек}; \quad (\text{Б.7})$$

- масса головки поршня с кольцами, расположенными выше сечения x – x

$$m_{x.x} = 0,5 * m_{\Pi} = 0,5 * 0,422 = 0,211 \text{ кг} \quad (\text{Б.8})$$

- максимальная разрывающая сила

$$Pj = m_{x.x} * R * \omega_{x.x.max}^2 * (1 + \lambda) = 0,211 * 0,0375 * 586^2 * (1 + 0,3125) * 10^{-6} = 0,00360 \text{ МН}; \quad (\text{Б.9})$$

- напряжение разрыва

$$\sigma_p = Pj / F_{x-x} = 0,003602 / 0,001193 = 3,0189 \text{ МПа}. \quad (\text{Б.10})$$

Напряжения в верхней кольцевой перемычке:

- среза

$$\tau = 0,0314 p_{z0} D / h_{\Pi} = 0,0314 * 8,9846 * 82 / 3,5 = 6,6095 \text{ МПа}; \quad (\text{Б.11})$$

- изгиба

$$\sigma_{из} = 0,0045 p_{z0} (D / h_{\Pi})^2 = 0,0045 * 8,9846 * (82 / 3,5)^2 = 22,192 \text{ МПа}; \quad (\text{Б.12})$$

- сложное

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{из}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{22,192^2 + 4 * 6,609^2} = 25,830 \text{ МПа} \quad (\text{Б.13})$$

Удельное давление поршня на стенку цилиндра:

$$q_1 = N_{max} / (h_p * D) = 0,0039619 / (0,045 * 0,082) = 1,07369 \text{ МПа}; \quad (\text{Б.14})$$

$$q_2 = N_{max} / (H * D) = 0,0039619 / (0,064 * 0,082) = 0,7549 \text{ МПа}. \quad (\text{Б.15})$$

Диаметры головки и юбки поршня:

$$D_r = D - \Delta_r = 82 - 0,574 = 81,426 \text{ мм}; \quad (\text{Б.16})$$

$$D_{ю} = D - \Delta_{ю} = 82 - 0,164 = 81,836 \text{ мм}, \quad (\text{Б.17})$$

где :

$$\Delta_r = 0,007D = 0,007 \cdot 82 = 0,574 \text{ мм}; \quad (\text{Б.18})$$

$$\Delta_{ю} = 0,002D = 0,002 \cdot 82 = 0,164 \text{ мм}. \quad (\text{Б.19})$$

Диаметральные зазоры в горячем состоянии:

$$\Delta'_r = D * [1 + \alpha_{ц}(T_{ц} - T_0)] - D_r * [1 + \alpha_{п}(T_r - T_0)] = 82 [1 + 11 \cdot 10^{-6} (383 - 293)] - 81,43 [1 + 22 \cdot 10^{-6} (593 - 293)] = 0,1177 \text{ мм}; \quad (\text{Б.20})$$

$$\Delta'_{ю} = D * [1 + \alpha_{ц}(T_{ц} - T_0)] - D_{ю} * [1 + \alpha_{п}(T_{ю} - T_0)] = 82 [1 + 11 \cdot 10^{-6} (383 - 293)] - 81,84 [1 + 22 \cdot 10^{-6} (413 - 293)] = 0,0291 \text{ мм}; \quad (\text{Б.21})$$

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

Б.1.2 Расчет поршневого кольца

Среднее давление кольца на стенку цилиндра

$$P_{cp} = 0,152 * E * \frac{A_0 / t}{(D/t - 1)^3 * (D/t)} = 0,152 * 10^5 * \frac{10,5 / 3,5}{(82 / 2,5)^3 * (82 / 3,5)} = 0,172 \text{ МПа}, \quad (\text{Б.22})$$

где

$$A_0 = 3t = 3 * 3,5 = 10,5 \text{ мм}. \quad (\text{Б.23})$$

Давление кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности

$$p = p_{cp} * \mu_{\phi}. \quad (\text{Б.24})$$

Результаты расчета p , а также μ_{ϕ} для различных углов ϕ приведены в

таблице Б1.

Таблица Б1 – Результаты расчета

∠,град	0	30	60	90	120	150	180
μ_ϵ	1,05	1,04	1,02	1	1,02	1,27	1,5
p,МПа	0,18113	0,17941	0,17596	0,17251	0,175960	0,21908	0,25876

Напряжение изгиба кольца в рабочем состоянии

$$\sigma_{из1} = 2,61 * p_{cp} * (D/t - 1)^2 = 2,61 * 0,172(82/3,5 - 1)^2 = 226,49 \text{ МПа} \quad (\text{Б.25})$$

Напряжение изгиба при надевании кольца на поршень

$$\sigma_{из2} = \frac{4E * (1 - 0,114 * A_0/t)}{m * (D/t - 1,4) * (D/t)} = \frac{4 * 10^5 * (1 - 0,114 * 10,5/3,5)}{1,57 * (82/3,5 * 1,4) * (82/3,5)} = 324,828 \text{ МПа} \quad (\text{Б.26})$$

Монтажный зазор в замке поршневого кольца

$$\Delta_k = \Delta'_k + \pi D * [\alpha_k(T_k - T_0)] - \alpha_{ц} * (T_{ц} - T_0) = 0,08 + 3,14 * 82 * [11 * 10^{-6} * (493 - 293)] - 11 * 10^{-6} * (383 - 293) = 0,3917 \text{ мм}, \quad (\text{Б.27})$$

где $\Delta'_k = 0,08$ мм, $T_{ц} = 383$, $T_k = 493$ и $T_0 = 293$ К.

6.1.3 Расчет поршневого пальца

Расчетная сила, действующая на поршневой палец:

- газовая

$$P_{Z_{\max}} = p_{Z_{\max}} * F_{\bar{r}} = 8,9846 * 52,78 * 10^{-4} = 0,04742 \text{ МН}; \quad (\text{Б.28})$$

- инерционная

$$P_j = -m_i * R * \omega_i^2 * (1 + \lambda) * 10^{-6} = -0,422 * 293^2 * 0,0375 * (1 + 0,3125) * 10^{-6} = -0,00180 \text{ МН}, \quad (\text{Б.29})$$

где

$$\omega_M = \pi * n_M / 30 = 3,14 * 2700 / 30 = 293 \text{ рад / сж} ; \quad (\text{Б.30})$$

- расчетная

$$P = P_{Z_{\max}} + k * P_j = 0,04742 - 0,82 * 0,00180 = 0,04594 \text{ МН}. \quad (\text{Б.31})$$

Удельное давление пальца на втулку поршневой головки

$$q_u = P / (d_{II} * l_u) = 0,04594 / (22 * 26 * 10^{-6}) = 80,3262 \text{ МПа} \quad (\text{Б.32})$$

Удельное давление пальца на бобышки

$$q_b = P / (d_{II} * (l_{II} - b)) = 0,04594 / (0,022(0,06 - 0,03)) = 69,616 \text{ МПа} \quad (\text{Б.33})$$

Напряжение изгиба в среднем сечении пальца

$$\sigma_{из} = P(l_{II} + 2b - 1,5l_u) / (1,2(1 - \alpha^4) * d_{II}^3) = 0,0379 * (0,06 + 2 * 0,03 - 1,5 * 0,026) / (1,2 * (1 - 0,618^4) * 0,022^3) = 228,320 \text{ МПа}, \quad (\text{Б.34})$$

где

$$\alpha = d_B / d_{II} = 15 / 22 = 0,618 \quad (\text{Б.35})$$

Касательные напряжения среза в сечениях между бобышками и головкой шатуна

$$\tau = 0,85 * P * (1 + \alpha + \alpha^2) / ((1 - \alpha^4) * d_i^2) = 0,85 * 0,0379 * (1 + 0,682 + 0,682^2) / (1 - 0,682^4) * 0,022^2 = 220,974 \text{ МПа} \quad (\text{Б.36})$$

Наибольшее увеличение горизонтального диаметра пальца при овализации

$$\Delta d_{n\max} = \frac{1,35 * P}{E * l_n} * \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{1,35 * 0,04594}{2 * 10^5 * 0,6} * \left(\frac{1 + 0,618}{1 - 0,618} \right)^3 * [0,1 - (0,618 - 0,4)^3] * 1000 = 0,0112 \text{ мм} \quad (\text{Б.37})$$

Напряжения овализации на внешней поверхности пальца, (рисунок 14):

- в горизонтальной плоскости (точки 1, $\psi = 0^\circ$)

$$\sigma_{\alpha 0^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,19 * \frac{(2 + \alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} - \frac{1}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,04594}{0,06 * 0,022} * \left[0,19 * \frac{(2 + 0,618) * (1 + 0,618)}{(1 - 0,618)^2} - \frac{1}{1 - 0,618} \right] * [0,1 - (0,618 - 0,4)^3] = 215,6 \text{ МПа} \quad (\text{Б.38})$$

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

$$\sigma_{\alpha 90^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,174 * \frac{(2 + \alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} + \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,04594}{0,06 * 0,022} * \left[0,174 * \frac{(2 + 0,618) * (1 + 0,618)}{(1 - 0,618)^2} + \frac{0,636}{1 - 0,618} \right] * [0,1 - (0,618 - 0,4)^3] = -233,15 \text{ МПа} \quad (\text{Б.39})$$

Напряжения овализации на внутренней поверхности пальца (рисунок 14):

- в горизонтальной плоскости (точки 2, $\psi = 0^\circ$)

$$\sigma_{i 0^\circ} = - \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,19 * \frac{(1 + 2\alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2 * \alpha} + \frac{1}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = - \frac{15 * 0,04594}{0,06 * 0,022} * \left[0,19 * \frac{(1 + 2 * 0,618) * (1 + 0,618)}{(1 - 0,618)^2 * 0,618} + \frac{1}{1 - 0,618} \right] * [0,1 - (0,618 - 0,4)^3] = 316,07 \text{ МПа} \quad ;(\text{Б.40})$$

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

$$\sigma_{i 90^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,174 * \frac{(1 + 2\alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2 * \alpha} - \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,04594}{0,06 * 0,022} * \left[0,174 * \frac{(1 + 2 * 0,618) * (1 + 0,618)}{(1 - 0,618)^2 * 0,618} - \frac{0,636}{1 - 0,618} \right] * [0,1 - (0,618 - 0,4)^3] = 325,031 \text{ МПа} \quad (\text{Б.41})$$

Б.2 Расчет шатунной группы

Б.2.1 Расчет поршневой головки шатуна

По формулам определяем:

- при изгибе:

$$\beta_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\delta}} = 0,833, \quad (\text{Б.42})$$

$$\frac{(\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma})}{(1 - \beta_{\sigma})} = 3,98; \quad (\text{Б.43})$$

- при растяжении-сжатии:

$$\beta_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1\delta}}{\sigma_{\delta}} = 0,5, \quad (\text{Б.44})$$

$$\frac{(\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma})}{(1 - \beta_{\sigma})} = 0,76 \quad (\text{Б.45})$$

Расчет сечения I-I:

- максимальное напряжение пульсирующего цикла

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{(m_n + m_{\text{г.з.}}) * \omega_{\text{х.х.макс}}^2 * R * (1 + \lambda) * 10^{-6}}{2 * h_z * l_{\text{ш}}} = \\ &= \frac{(0,422 + 0,0429) * 586 * 0,0375 * (1 + 0,3125) * 10^{-6}}{2 * 0,004 * 0,027} = 38,158 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (\text{Б.46})$$

где $m_{\text{г.з.}} = 0,06 * m_{\text{ш}} = 0,06 * 0,422 = 0,0429$ кг - масса части головки выше сечения I-I;

$$\omega_{\text{х.х.макс}} = \pi * n_{\text{х.х.макс}} / 30 = 3,14 * 5600 / 30 = 586 \text{ рад / сж};$$

- среднее напряжение и амплитуда напряжений:

$$\sigma_{m0} = \sigma_{a0} = \frac{\sigma_{\max}}{2} = \frac{38,158}{2} = 19,079 \text{ МПа}, \quad (\text{Б.47})$$

$$\sigma_{ak0} = \frac{\sigma_{a0} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{20,4 * 1,272}{0,85 * 1} = 28,21 \text{ МПа}, \quad (\text{Б.48})$$

где $k_{\sigma} = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (\sigma_{\dot{A}} - 400) = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (800 - 400) = 1,272$ - эффективный коэффициент концентрации напряжений;

Так как $\frac{\sigma_{ak0}}{\sigma_{m0}} = \frac{28,219}{19,079} = 1,496 \geq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 0,76$, то запас прочности в

сечении I-I определяется по пределу усталости

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_{ak0} + \alpha_{\sigma} * \sigma_{m0}} = \frac{210}{28,129 + 0,12 * 19,078} = 6,88 \quad (\text{Б.49})$$

Напряжения от запрессованной втулки (суммарный натяг)

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta + \Delta_t = 0,04 + 0,0211 = 0,0611 \text{ мм},$$

где: $\Delta = 0,04 \text{ мм}$ - натяг посадки бронзовой втулки;

$$\Delta_t = d * (\alpha_B - \alpha_r) * \Delta T = 24 * (1,8 * 10^{-5} - 1 * 10^{-5}) * 110 = 0,0211 \text{ мм} - \text{ температурный}$$

натяг;

$\Delta T = 110 \text{ K}$ - средний подогрев головки и втулки.

Удельное давление на поверхности соприкосновения втулки с головкой

$$P = \frac{\Delta_{\Sigma}}{d * \left[\frac{\frac{(d^2 + d_a^2)}{(d^2 - d_a^2)} + \mu}{\dot{A}_{\phi}} + \frac{\frac{(d^2 + d_i^2)}{(d^2 - d_i^2)} - \mu}{\dot{A}_{\dot{A}}} \right]} =$$

$$= \frac{0,0611}{24 * \left[\frac{\frac{(32^2 + 24^2)}{(32^2 - 24^2)} + 0,3}{2,2 * 10^5} + \frac{\frac{(24^2 + 22^2)}{(24^2 - 22^2)} - 0,3}{1,15 * 10^5} \right]} = 22,11 \text{ МПа} \quad (\text{Б.50})$$

где $\mu = 0,3$ - коэффициент Пуассона.

Напряжение от суммарного натяга на внутренней поверхности головки

$$\sigma_i = \frac{P * (d_2^2 + d^2)}{d_2^2 - d^2} = \frac{22,11 * (32^2 + 24^2)}{32^2 - 24^2} = 78,968 \text{ МПа}. \quad (\text{Б.51})$$

Напряжение от суммарного натяга на внешней поверхности головки

$$\sigma_a = \frac{P * 2 * d^2}{d_2^2 - d^2} = \frac{22,1 * 2 * 24^2}{32^2 - 24^2} = 56,83 \text{ МПа} . \quad (\text{Б.52})$$

Расчет сечения А-А на изгиб:

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

$$P_{jn} = -m_n * R * \omega^2 * (1 + \lambda) = -0,422 * 0,0375 * 586^2 * (1 + 0,3125) = 7132 \text{ Н} , \quad (\text{Б.53})$$

где $\omega = \pi * n_N / 30 = 3,14 * 5600 / 30 = 586 \text{ рад} / \text{сж} .$

- нормальная сила и изгибающий момент в сечении 0-0:

$$N_{j0} = -P_{jn} * (0,572 - 0,0008 * \phi_{ш.з}) = -(-7132) * (0,572 - 0,0008 * 105) = 3480 \text{ Н}; \quad (\text{6.52})$$

$$\begin{aligned} M_{j0} &= -P_{jn} * r_{cp} * (0,00033 * \phi_{ш.з} - 0,0297) = 7139 * 0,014 * (0,00033 * 105 - 0,0297) = \\ &= 0,494 \text{ Н*м}, \end{aligned} \quad (\text{Б.54})$$

где $\phi_{ш.з} = 105^\circ$ — угол заделки; $r_{cp} = (d_r + d) / 4 = (32 + 24) / 4 = 14 \text{ мм}$ - средний радиус головки;

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

$$\begin{aligned} N_{j\phi_{ш.з}} &= N_{j0} * \cos \phi_{ш.з} - 0,5 * P_{jn} * (\sin \phi_{ш.з} - \cos \phi_{ш.з}) = 3480 * \cos 105^\circ - 0,5 * \\ &* (-7132) * (\sin 105^\circ - \cos 105^\circ) = 3469 \text{ Н}; \end{aligned} \quad (\text{Б.55})$$

$$\begin{aligned} M_{j\phi_{ш.з}} &= M_{j0} + N_{jn} * r_{cp} * (1 - \cos \phi_{ш.з}) + 0,5 * P_{jn} * r_{cp} * (\sin \phi_{ш.з} - \cos \phi_{ш.з}) = \\ &= 0,494 + 3480 * 0,014 * (1 - \cos 105^\circ) + 0,5 * (-7132) * 0,014 * (\sin 105^\circ - \\ &- \cos 105^\circ) = 0,6978 \text{ Н*м}. \end{aligned} \quad (\text{Б.56})$$

Напряжение на внешнем волокне от растягивающей силы

$$\sigma_{aj} = \left[2 * M_{j\phi_{u.3}} * \frac{6 * r_{cp} + h_z}{h_z * (2 * r_{cp} + h_z)} + K * N_{j\phi_{u.3}} \right] * \frac{10^{-6}}{l_u * h_z} = \quad , \quad (B.57)$$

$$\left[2 * 0,68 * \frac{6 * 0,014 + 0,004}{0,004 * (2 * 0,014 + 0,004)} + 0,884 * 3467 \right] * \frac{10^{-6}}{0,027 * 0,004} = 37,1 \text{ МПа}$$

где:

$$K = \frac{E_u * F_z}{E_u * F_z + E_B * F_B} = \frac{2,2 * 10^5 * 216}{2,2 * 10^5 * 216 + 1,15 * 10^5 * 54} = 0,884;$$

$$F_z = (d_z - d) / l_u = (32 - 24) / 27 = 218 \text{ мм}^2;$$

$$F_B = (d - d_n) / l_u = (24 - 22) / 27 = 55 \text{ мм}^2.$$

Суммарная сила, сжимающая головку

$$P_{сж} = (P_{Z0} - P_0) * F_n - m_n * R * \omega^2 (\cos \phi + \lambda * \cos 2\phi) = (8,9846 - 0,1) * \\ * 0,005281 * 10^6 - 0,422 * 0,0375 * 586^2 * (\cos 375^\circ + 0,3125 * \cos 750^\circ) = \\ = 46812,99 \text{ Н} \quad (B.58)$$

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

$$N_{сж\phi_{u.3}} = P_{сж} * \left[\frac{N_{сж0}}{P_{сж}} + \left(\frac{\sin \phi_{u.3}}{2} - \frac{\phi_{u.3}}{\pi} * \sin \phi_{u.3} - \frac{1}{\pi} * \cos \phi_{u.3} \right) \right] = \quad (B.59)$$

$$= 48812,99 * [0,0005 + 0,002] = 122,03 \text{ Н};$$

$$M_{сж\phi_{u.3}} = P_{сж} * r_{cp} * \left[\frac{M_{сж0}}{P_{сж} * r_{cp}} + \frac{N_{сж0}}{P_{сж}} * (1 - \cos \phi_{u.3}) - \left(\frac{\sin \phi_{u.3}}{2} - \frac{\phi_{u.3}}{\pi} * \sin \phi_{u.3} - \frac{1}{\pi} * \cos \phi_{u.3} \right) \right] = \quad (B.60)$$

$$= 48812,99 * 0,014 * [0,0001 + 0,0005 - 1,2588 - 0,002] = -0,8108 \text{ Н} * \text{м},$$

где:

$$\frac{N_{сж0}}{P_{сж}} = 0,0005;$$

$$\frac{M_{сж0}}{P_{сж} * r_{cp}} = 0,0001;$$

$$\left(\frac{\sin \phi_{u.3}}{2} - \frac{\phi_{u.3}}{\pi} * \sin \phi_{u.3} - \frac{1}{\pi} * \cos \phi_{u.3} \right) = 0,002;$$

$$f(\phi_{u.з.}) = 1 - \cos \phi_{u.з.} = 1,2588 ;$$

Напряжение на внешнем волокне от сжимающей силы

$$\sigma_{асж} = \left[2 * M_{сжфш.з.} * \frac{6 * r_{cp} + h_2}{h_2 * (2 * r_{cp} + h_2)} + K * N_{сжфш.з.} \right] * \frac{10^{-6}}{l_{ш} * h_2} = \quad (Б.61)$$

$$\left[2 * (-0,810) * \frac{6 * 0,014 + 0,004}{0,004 * (2 * 0,014 + 0,004)} + 0,884 * 70,56 \right] * \frac{10^{-6}}{0,027 * 0,004} = -6,8045 \text{ МПа.}$$

)

Максимальное и минимальное напряжения асимметричного цикла:

$$\sigma_{\max} = \sigma'_a + \sigma_{aj} = 56,83 + 37,144 = 93,974 \text{ МПа}; \quad (Б.63)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma'_a + \sigma_{асж} = 56,83 - 5,59 = 51,24 \text{ МПа}. \quad (Б.63)$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжения:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{93,9 + 51,04}{2} = 72,4784 \text{ МПа};$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{93,9 - 51,14}{2} = 21,53 \text{ МПа}; \quad (Б.64)$$

$$\sigma_{ak} = \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{21,63 * 1,272}{0,85 * 0,9} = 35,73 \text{ МПа.}$$

Так как $\sigma_{ak} / \sigma_m = 35,63 / 72,47 = 0,492 \leq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 3,97$, то запас прочности в сечении А-А определяется по пределу текучести

$$n_{\tau\sigma} = \frac{\sigma_T}{(\sigma_{ak} + \sigma_m)} = \frac{420}{(35,63 + 72,47)} = 3,88. \quad (Б.65)$$

6.2.2 Расчет кривошипной головки шатуна

Максимальная сила инерции

$$P_{jp} = -R * \omega_{x.x.\max}^2 * \left[(m_n + m_{u.n.}) * (1 + \lambda) + (m_{u.k.} - m_{kp}) \right] * 10^{-6} = -544^2 * 0,0375 * \quad (Б.66)$$

$$* \left[(0,422 + 0,132) * (1 + 0,3125) + (0,396 - 0,132) \right] * 10^{-6} = -0,01284 \text{ МН},$$

где $m_{kp} = 0,25 * m_u = 0,25 * 0,528 = 0,132$ кг.

Момент сопротивления расчетного сечения

$$W_{ИЗ} = \frac{l_k * (0,5 * c_{\phi} - r_1)^2}{6} = \frac{0,022 * (0,5 * 0,06 - 0,026)^2}{6} = 0,58712 * 10^{-7} \text{ м}^3, \quad (\text{Б.67})$$

где $r_1 = 0,5 * (d_{\phi} + 2 * t_B) = 0,5 * (48 + 2 * 2) = 26 \text{ мм}$ - внутренний радиус кривошипной головки шатуна.

Моменты инерции вкладыша и крышки:

$$\begin{aligned} J_B &= l_k * t_B^3 = 22 * 2^3 * 10^{-12} = 176 * 10^{-12} \text{ м}^4; \\ J &= l_k * (0,5 * c_{\phi} - r_1)^3 * 10^{-12} = 22 * (0,5 * 60 - 26)^3 * 10^{-12} = 1428 * 10^{-12} \text{ м}^4; \end{aligned} \quad (\text{Б.68})$$

Напряжение изгиба крышки и вкладыша:

$$\sigma_{из} = P_{jp} * \left[\frac{0,023 * c_{\phi}}{(1 + J_B / J) * W_{ИЗ}} + \frac{0,4}{F_z} \right] = 0,0147 * \left[\frac{0,023 * 0,06}{\left(1 + \frac{176 * 10^{-12}}{1408 * 10^{-12}}\right) * 0,587 * 10^{-7}} + \frac{0,4}{0,000132} \right] = \quad (\text{Б.69})$$

$$= 372 \text{ МПа},$$

$$\text{где } F_z = l_k * 0,5 * (c_{\phi} - d_{ш.ш.}) = 22 * 0,5 * (60 - 48) * 10^{-6} = 0,000132 \text{ м}^2. \quad (\text{Б.70})$$

Б.2.3 Расчет стержня шатуна

Из динамического расчета имеем: $P_{сж} = P_{\Gamma} + P_j = 3212 \text{ Н} = 0,032812 \text{ МН}$ при $\phi = 375^\circ$;

Площадь и моменты инерции расчетного сечения В - В:

$$\begin{aligned} F_{ср} &= h_{ш} * b_{ш} - (b_{ш} - a_{ш}) * (h_{ш} - 2 * t_{ш}) = 24 * 15 - (15 - 5) * \\ &* (24 - 2 * 4,5) = 210 \text{ мм}^2 = 210 * 10^{-6} \text{ м}^2; \\ J_x &= \frac{h_{ш}^3 * b_{ш} - (b_{ш} - a_{ш}) * (h_{ш} - 2 * t_{ш})^3}{12} = \frac{24^3 * 15 - (15 - 5) * (24 - 2 * 4,5)^3}{12} = \\ &= 14468 \text{ мм}^2 = 144,9 * 10^{-10} \text{ м}^4; \\ J_y &= \frac{h_{ш} * b_{ш}^3 - (b_{ш} - a_{ш}) * (h_{ш} - 2 * t_{ш})^3}{12} = \frac{24 * 15^3 - (15 - 5) * (24 - 2 * 4,5)^3}{12} = \\ &= 6408 \text{ мм}^2 = 642 * 10^{-11} \text{ м}^4. \end{aligned} \quad (\text{Б.71})$$

Максимальное напряжение от сжимающей силы: в плоскости шатуна

$$\sigma_{\max.x} = K_x * P_{сж} / F_{cp} = 1,077 * 0,03212 / (210 * 10^{-6}) = 164,45 \text{ МПа}, \quad (\text{Б.72})$$

где

$$K_x = 1 + \left(\sigma_e / \pi^2 E_{uu} \right) * \left(L_{uu}^2 F_{cp} / J_x \right) = 1 + \left(\frac{800 / 3,14^2 *}{*2,2 * 10^5} \right) * \left(\frac{120^2 *}{*210 / 14468} \right) = 1,078. \quad (\text{Б.73})$$

Плоскости, перпендикулярной плоскости качения шатуна

$$\sigma_{\max.y} = K_y * P_{сж} / F_{cp} = 1,0206 * 0,03212 / (210 * 10^{-6}) = 156 \text{ МПа},$$

где:

$$K_y = 1 + \left(\sigma_e / \pi^2 E_{uu} \right) * \left(L_1^2 F_{cp} / 4 * J_y \right) = 1 + \left(800 / 3,14^2 * 2,2 * 10^5 \right) * \left(82,5^2 * 210 / 4 * 6408 \right) = 1,0206; \quad (\text{Б.74})$$

$$L_1 = L_{uu} - (d + d_1) / 2 = 120 - (24 + 51) / 2 = 82,5.$$

Минимальное напряжение от растягивающей силы

$$\sigma_{\min} = P_p / F_{cp} = -0,00939 / (210 * 10^{-6}) = -44,84 \text{ МПа}. \quad (\text{Б.75})$$

Средние напряжения и амплитуды цикла:

$$\begin{aligned} \sigma_{mx} &= (\sigma_{\max.x} + \sigma_{\min}) / 2 = (164 - 44,7) / 2 = 59,651 \text{ МПа}; \\ \sigma_{my} &= (\sigma_{\max.y} + \sigma_{\min}) / 2 = (156 - 44,7) / 2 = 55,8 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ax} &= (\sigma_{\max.x} - \sigma_{\min}) / 2 = (164 + 44,7) / 2 = 104,485 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ay} &= (\sigma_{\max.y} - \sigma_{\min}) / 2 = (156 + 44,7) / 2 = 99,412 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (\text{Б.76})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{akx} &= \frac{\sigma_{ax} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{104 * 1,272}{0,86 * 1,9} = 81,3 \text{ МПа}; \\ \sigma_{aky} &= \frac{\sigma_{ay} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{99,4 * 1,272}{0,86 * 1,9} = 77,374 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (\text{Б.77})$$

где:

$$k_{\sigma} = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (\sigma_{\hat{\lambda}} - 400) = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (800 - 400) = 1,272; \quad (\text{Б.78})$$

$$\varepsilon_M = 0,86;$$

$\varepsilon_{\gamma} = 1,3$ - определяется с учетом поверхностного упрочнения стержня шатуна обдувкой дробью.

Так как $\sigma_{akx} / \sigma_{mx} = 102,3 / 45,2 = 2,263 \geq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 0,76$ и $\sigma_{aky} / \sigma_{my} = 98,3 / 41,7 = 2,36 \geq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 0,76$, то запасы прочности в сечении В-В определяются по пределу усталости:

$$n_{\sigma_x} = \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{akx} + \alpha_{\sigma} * \sigma_{mx})} = \frac{210}{(102,3 + 0,12 * 45,2)} = 1,96$$

$$n_{\sigma_y} = \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{aky} + \alpha_{\sigma} * \sigma_{my})} = \frac{210}{(198,3 + 0,12 * 41,7)} = 2,035$$
(Б.79)

Б.2.4 Расчет шатунных болтов

$$\beta_{\sigma} = \sigma_{-1\delta} / \sigma_{\delta} = 300 / 800 = 0,375,$$
(Б.80)

$$\frac{(\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma})}{(1 - \beta_{\sigma})} = \frac{(0,375 - 0,17)}{1 - 0,375} = 0,328.$$
(Б.81)

Сила предварительной затяжки

$$P_{ПП} = 2 * P_{jp} / i_{\delta} = 2 * 0,0147 / 2 = 0,01484 \text{ МН.}$$
(Б.82)

Суммарная сила, растягивающая болт

$$P_{\delta} = P_{ПП} + \chi * P_{jp} / i_{\delta} = 0,0147 + 0,2 * 0,0147 / 2 = 0,0172 \text{ МН.}$$
(Б.83)

где $\chi = 0,2$.

Максимальные и минимальные напряжения, возникающие в болте:

$$\sigma_{\max} = 4 * P_{\delta} / (\pi * d_B^2) = 4 * 0,0162 / (3,14 * 0,0086^2) = 283,97 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\min} = 4 * P_{ПП} / (\pi * d_B^2) = 4 * 0,0147 / (3,14 * 0,0086^2) = 253,56 \text{ МПа};$$
(Б.84)

Среднее напряжение и амплитуды цикла:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{279 + 253}{2} = 270,25 \text{ МПа}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{279 - 253}{2} = 13,25 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{ak} = \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{13 * 3,43}{0,99 * 0,82} = 35,83 \text{ МПа}$$
(Б.85)

где $k_{\sigma} = 1 + q * (\alpha k_{\sigma} - 1) = 1 + 0,81 * (4 - 1) = 3,43$; $\alpha k_{\sigma} = 4,0$; $q = 0,81$ при $\sigma_B = 980$ МПа; $\varepsilon_M = 0,99$ при $d = 10$ мм; $\varepsilon_n = 0,82$ (грубое обтачивание).

Так как $\sigma_{ak} / \sigma_m = 54,9 / 266 = 0,206 \leq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 0,328$, то запас прочности в сечении А-А определяется по пределу текучести:

$$n_{\tau\sigma} = \frac{\sigma_T}{(\sigma_{ak} + \sigma_m)} = \frac{800}{(54,9 + 266)} = 2,49$$
(Б.86)

Б.3 Расчет коленчатого вала

Определяем:

- пределы прочности $\sigma_A = 400$ МПа и текучести (условные) $\sigma_\delta = 300$ МПа и $\tau_\delta = 160$ МПа;

- пределы усталости (выносливости) при изгибе $\sigma_{-1} = 150$ МПа, растяжении-сжатии $\sigma_{-1\delta} = 120$ МПа и кручении $\tau_{-1} = 115$ МПа;

- коэффициенты приведения цикла при изгибе $\alpha_\sigma = 0,4$ и кручении $\alpha_\tau = 0,6$.

Напряжения при изгибе:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_\delta} = \frac{150}{300} = 0,5;$$

$$\frac{(\beta_\sigma - \alpha_\sigma)}{(1 - \beta_\sigma)} = \frac{0,5 - 0,4}{1 - 0,5} = 0,2.$$

Напряжения при кручении:

$$\beta_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_\delta} = 0,719;$$

$$\frac{(\beta_\tau - \alpha_\tau)}{(1 - \beta_\tau)} = \frac{0,719 - 0,6}{1 - 0,719} = 0,42.$$

6.3.1 Удельное давление на поверхности шеек

Шатунных шеек:

$$\begin{aligned} k_{шшср} &= \frac{R_{шшср}}{d_{шш} * l'_{шш}} = \frac{9535 * 10^{-6}}{48 * 22 * 10^{-6}} = 9,029 \text{ МПа}; \\ k_{шш\max} &= \frac{R_{шш\max}}{d_{шш} * l'_{шш}} = \frac{35092 * 10^{-6}}{48 * 22 * 10^{-6}} = 33,231 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (\text{Б.87})$$

где $l'_{шш} \approx l_{шш} - 2 * r_{гал} = 28 - 2 * 3 = 22$ мм; - рабочая ширина шатунного вкладыша; $r_{гал}$ - радиус галтели принят равным 3 мм.

Коренных шеек:

$$k_{KШCP} = \frac{R_{KШCP}}{d_{KШ} * l'_{KШ}} = \frac{2542 * 10^{-6}}{50 * 22 * 10^{-6}} = 2,310 \text{ МПа};$$

$$k_{KШmax} = \frac{R_{KШmax}}{d_{KШ} * l'_{KШ}} = \frac{18485 * 10^{-6}}{50 * 22 * 10^{-6}} = 16,90 \text{ МПа},$$
(Б.88)

где $l'_{KШ} \approx l_{KШ} - 2 * r_{зал} = 28 - 2 * 3 = 22 \text{ мм}$; - рабочая ширина коренного вкладыша.

Б.3.2 Расчет коренной шейки

Момент сопротивления кручению коренной шейки

$$W_{\tau_{ки}} = \frac{\pi}{16} * d_{ки}^3 = \frac{3,14 * 50^3 * 10^{-9}}{16} = 24,5 * 10^{-6} \text{ м}^3$$
(Б.89)

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла для наиболее нагруженной 4-й коренной шейки, на которую воздействует крутящий момент, имеющий наибольший размах:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{KШmax}}{W_{\tau_{ки}}} = \frac{617 * 10^{-6}}{24,5 * 10^{-6}} = 25,187 \text{ МПа};$$

$$\tau_{\min} = \frac{M_{KШmin}}{W_{\tau_{ки}}} = \frac{-160,6 * 10^{-6}}{24,5 * 10^{-6}} = -6,5 \text{ МПа}.$$
(Б.90)

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{20,4 - 8,2}{2} = 7,1 \text{ МПа};$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{20,4 + 8,2}{2} = 15,3 \text{ МПа};$$

$$\tau_{ak} = \frac{\tau_a * k_{\tau}}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{nr}} = \frac{14,3 * 1,1}{0,72 * 1,2} = 18,947 \text{ МПа},$$
(Б.91)

где $k_{\sigma} = 0,6 * [1 + q * (\alpha_{\sigma\tau} - 1)] = 1,1$ - коэффициент концентрации напряжений;

$\alpha_{\sigma\tau} = 3,0$ - теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$q = 0,4$ - коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений;

$\varepsilon_{M\tau} = 0,72$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{i\tau} = 1,2$ - коэффициент поверхностной чувствительности.

Так как $\tau_{ak} / \tau_m = 18,2 / 6,1 = 2,98 \geq (\beta_{\tau} - \alpha_{\tau}) / (1 - \beta_{\tau}) = 0,42$, то запас прочности

коренной шейки определяется по пределу усталости

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ак} + \alpha_{\tau} * \tau_m} = \frac{115}{18,9 + 0,6 * 6,1} = 5,2 \quad (\text{Б.92})$$

Б.3.3 Расчёт шатунной шейки

Момент сопротивления кручению шатунной шейки

$$W_{\tau_{шш}} = \frac{\pi}{16} * d_{шш}^3 = \frac{3,14 * 48^3 * 10^{-9}}{16} = 21,7 * 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (\text{Б.93})$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла :

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{M_{шш\max}}{W_{\tau_{шш}}} = \frac{559 * 10^{-6}}{21,7 * 10^{-6}} = 25,768 \text{ МПа}; \\ \tau_{\min} &= \frac{M_{шш\min}}{W_{\tau_{шш}}} = \frac{-128 * 10^{-6}}{21,7 * 10^{-6}} = -5,89 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (\text{Б.94})$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned} \tau_m &= \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{25,4 - 6,8}{2} = 10,58 \text{ МПа}; \\ \tau_a &= \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{25,4 + 6,8}{2} = 19,1 \text{ МПа}; \\ \tau_{ак} &= \frac{\tau_a * k_{\tau}}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{16,1 * 1,1}{0,73 * 1,2} = 17,52 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (\text{Б.95})$$

Так как $\tau_{ак} / \tau_m = 16,1 / 9,3 = 1,73 \geq (\beta_{\tau} - \alpha_{\tau}) / (1 - \beta_{\tau}) = 0,42$, то запас прочности в шатунной шейки определяется по пределу усталости

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ак} + \alpha_{\tau} * \tau_m} = \frac{115}{16,1 + 0,6 * 9,3} = 5,3 \quad (\text{Б.96})$$

Максимальное и минимальное нормальные напряжения асимметричного цикла шатунной шейки:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{M_{\phi_M \max}}{W_{\sigma_{шш}}} = \frac{7,56 * 10^{-6}}{10,85 * 10^{-6}} = 0,695 \text{ МПа}, \\ \sigma_{\min} &= \frac{M_{\phi_M \min}}{W_{\sigma_{шш}}} = \frac{-258 * 10^{-6}}{10,85 * 10^{-6}} = 23,75 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (\text{Б.97})$$

где $W_{\sigma_{шш}} = 0,5 * W_{\tau_{шш}} = 0,5 * 21,7 * 10^{-6} = 10,85 * 10^{-6} \text{ м}^3$

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{0,695 - 23,75}{2} = -11,5 \text{ МПа} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{0,695 + 23,75}{2} = 12,22 \text{ МПа} \\ \sigma_{ak} &= \frac{\sigma_a * k_\sigma}{\varepsilon_{M\sigma} * \varepsilon_{n\sigma}} = \frac{11,6 * 1,8}{0,76 * 1,2} = 22,9 \text{ МПа}\end{aligned}\quad (6.98)$$

где $k_\sigma = 1 + q * (\alpha k_\sigma - 1) = 1 + 0,4 * (3 - 1) = 1,8$ - коэффициент концентрации напряжений

Запас прочности шатунной шейки от нормальных напряжений определяется по пределу усталости

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ak} + \alpha_\tau * \sigma_m} = \frac{150}{22,9 + 0,4 * (-10,9)} = 8,09 \quad (Б.99)$$

Общий запас прочности шатунной шейки

$$n_{\phi\phi} = \frac{n_\sigma * n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} = \frac{8,09 * 5,3}{\sqrt{8,09^2 + 5,3^2}} = 4,43. \quad (Б.100)$$

Б.3.4 Расчёт щеки

Максимальный и минимальный моменты, скручивающие щёку:

$$\begin{aligned}M_{к.щ. \max} &= T_{\max} * 0,5 * (l_{к.щ.} + h) = 2978 * 0,5 * (28 + 18) * 10^{-3} = 68,7 \text{ Н} * \text{м}; \\ M_{к.щ. \min} &= T_{\min} * 0,5 * (l_{к.щ.} + h) = -4236 * 0,5 * (28 + 18) * 10^{-3} = -97,423 \text{ Н} * \text{м};\end{aligned}\quad (Б.101)$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла щеки:

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{M_{к.щ. \max}}{W_{\tauщ}} = \frac{68,7 * 10^{-6}}{6,99 * 10^{-6}} = 9,825 \text{ МПа}; \\ \tau_{\min} &= \frac{M_{к.щ. \min}}{W_{\tauщ}} = \frac{-97,423 * 10^{-6}}{6,99 * 10^{-6}} = -13,508 \text{ МПа};\end{aligned}\quad (Б.102)$$

где $W_{\tauщ} = \mu * b * h^2 = 0,285 * 76 * 18^2 * 10^{-9} = 6,99 * 10^{-6} \text{ м}^3$ - момент сопротивления щеки.

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}\tau_m &= \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{9,825 - 13,5}{2} = -1,837 \text{ МПа} \\ \tau_a &= \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{9,825 + 13,5}{2} = 11,66 \text{ МПа} \\ \tau_{ak} &= \frac{\tau_a * k_\tau}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{10,6 * 0,7}{0,64 * 0,75} = 15,5 \text{ МПа}\end{aligned}\quad (Б.103)$$

где $k_\tau = 0,7$ - коэффициент концентрации напряжений;

$\varepsilon_{M\tau} = 0,64$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{f\tau} = 0,75$ - коэффициент поверхностной чувствительности

Запас прочности щеки от касательных напряжений определяем по пределу усталости

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{\dot{\alpha}\dot{\varepsilon}} + \alpha_\tau * \tau_\delta} = \frac{115}{15,5 + 0,6 * (-2,8)} = 8,32 \quad (\text{Б.104})$$

Максимальное и минимальное нормальные напряжения щеки:

$$P_{щ.\max} = \frac{K_{\max} + K_R}{2} = \frac{33290 - 11389}{2} = 10957H, \quad (\text{Б.105})$$

$$P_{щ.\min} = \frac{K_{\min} + K_R}{2} = \frac{-7929 - 11389}{2} = -9635H,$$

$$M_{щ.\max} = 0,25 * (K_{\max} + K_R + 2 * (-P'_{PP})) * l_{ку} = 0,25 * (33290 - 11389 + 2 * 8000) * 28 * 10^{-3} = 265,25Hм \quad (\text{Б.106})$$

$$M_{щ.\min} = 0,25 * (K_{\min} + K_R + 2 * (-P'_{PP})) * l_{ку} = 0,25 * (-7929 - 11389 + 2 * 8000) * 28 * 10^{-3} = -78,814Hм$$

$$\sigma_{\Sigma\max} = \frac{M_{щ.\max}}{W_{\sigmaщ}} + \frac{P_{щ.\max}}{F_{щ}} = \frac{265 * 10^{-6}}{4,21 * 10^{-6}} + \frac{5147 * 10^{-6}}{1368 * 10^{-6}} = 66,5МПа, \quad (\text{Б.107})$$

$$\sigma_{\Sigma\min} = \frac{M_{щ.\min}}{W_{\sigmaщ}} + \frac{P_{щ.\min}}{F_{щ}} = \frac{-71,8 * 10^{-6}}{4,21 * 10^{-6}} + \frac{-12355 * 10^{-6}}{1368 * 10^{-6}} = -26,084МПа,$$

где $W_{\sigmaщ} = \frac{b * h^2}{6} = \frac{76 * 18^2}{6} = 4,21 * 10^{-6} м^3,$

$$F_{щ} = b * h = 78 * 18 * 10^{-6} = 1368 * 10^{-6} м^2.$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{66,5 - 26,09}{2} = 20,2МПа$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{66,5 + 26,09}{2} = 46,29МПа \quad (\text{Б.108})$$

$$\sigma_{ak} = \frac{\sigma_a * k_\sigma}{\varepsilon_{M\sigma} * \varepsilon_{n\sigma}} = \frac{46,7 * 1,16}{0,7 * 0,75} = 94,182МПа.$$

где $k_\sigma = 1 + q * (\alpha k_\sigma - 1) = 1 + 0,4 * (1,4 - 1) = 1,16$ - коэффициент концентрации напряжений

$$\alpha k_\sigma = 1,4$$

$\varepsilon_{M\sigma} = 0,7$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{i\sigma} = 0,75$ - коэффициент поверхностной чувствительности, определен при расчете коренной шейки;

Так как $\sigma_{ak} / \sigma_m = 81,1 / 10,8 = 7,51 \geq (\beta_\sigma - \alpha_\sigma) / (1 - \beta_\sigma) = 0,2$, то запас прочности щеки от нормальных напряжений определяется по пределу усталости:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\dot{a}e} + \alpha_\tau * \sigma_\delta} = \frac{150}{94,1 + 0,4 * 10,8} = 1,52 \quad (\text{Б.109})$$

Общий запас прочности шатунной шейки

$$n_{\text{шт}} = \frac{n_\sigma * n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} = \frac{1,75 * 8,32}{\sqrt{1,75^2 + 8,32^2}} = 1,71. \quad (\text{Б.110})$$

Б.4 Расчёт газораспределения двигателя

Б.4.1 Основные размеры проходных сечений в горловине и в клапане

Площадь проходного сечения клапана при максимальном подъеме

$$F_{\text{кл}} = V_{n.\text{ср}} F_n / (i_{\text{кл}} \omega_{\text{вн}}) = 15,3 * 52,8 / (2 * 95) = 4,25 \text{ см}^2 \quad (\text{Б.111})$$

Диаметр горловины клапана

$$d_{\text{зоп}} = \sqrt{4F_{\text{зоп}} / \pi} = \sqrt{4 * 4,25 / 3,14} = 2,46 \text{ см}, \quad (\text{Б.112})$$

где $F_{\text{зоп}} = 1,12F_{\text{кл}} = 1,12 * 4,25 = 4,76 \text{ см}^2$.

Из условия возможного размещения клапанов в головке при верхнем их расположении принимаем $d_{\text{гор}} = 25 \text{ мм}$;

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

$$h_{\text{клmax}} = \sqrt{4,93d_{\text{зоп}}^2 + 4,44F_{\text{кл}}} / 2,22 - d_{\text{зоп}} = \sqrt{4,93 * 25^2 + 4,44 * 4,25} / 2,22 - 25 = 6,756 \text{ мм}. \quad (\text{Б.113})$$

Б.4.2 Определение перемещения клапана

Зазор между клапаном и толкателем принимаем $\Delta s = 0,25 \text{ мм}$

Протяженность участка сбега

$$\Phi_0 = \frac{\pi^2 \Delta s}{2 \cdot 180 \cdot \omega'_{m0k}} = \frac{3,14159^2 \cdot 0,25}{2 \cdot 180 \cdot 0,02} = 0,342694 \text{ рад} \approx 19^{\circ} 38', \quad (\text{Б.114})$$

где $\omega'_{\delta 0\epsilon} = 0,02 \text{ в } /^{\circ}$ - скорость клапана в конце сбега, принята в пределах, рекомендованных для безударных кулачков

Протяженность других участков ускорения клапана

$$\Phi_1 = 23^{\circ} 30' = 0,410152 \text{ рад}; \quad \Phi_2 = 4^{\circ} = 0,069813 \text{ рад}; \quad \Phi_3 = 37^{\circ} = 0,645771 \text{ рад}$$

удовлетворяет рекомендуемым соотношениям:

$$1) \quad \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = \pi \phi_{p0} / 180 \Rightarrow \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \pi \phi_{p0} / 180 = 0;$$

$$\text{где } \phi_{p0} = (\phi_{np} + 180^{\circ} + \phi_{zn}) / 4 = 64,5^{\circ}$$

$$0,410152 + 0,069813 + 0,645771 - 3,14 \cdot 64,5 / 180 = 0$$

$$2) \quad \Phi_2 = (0,1 \dots 0,25) \Phi_3 \Rightarrow \Phi_2 / \Phi_3 = 0,1 \dots 0,25;$$

$$0,069813 / 0,645771 = 0,108;$$

$$3) \quad \Phi_2 + \Phi_3 = (1,5 \dots 3,0) \Phi_1 \Rightarrow (\Phi_2 + \Phi_3) / \Phi_1 = 1,5 \dots 3,0;$$

$$(0,069813 + 0,645771) / 0,410152 = 1,745.$$

Вспомогательные величины и коэффициенты закона движения клапана:

$$k_1 = 8Z \left(\frac{\Phi_2}{\pi} \right)^2 = 8 \cdot \frac{5}{8} \left(\frac{0,069813}{3,14159} \right)^2 = 0,002769; \quad (\text{Б.115})$$

$$k_2 = \frac{5+Z}{6} \Phi_3^2 = \frac{5+5/8}{6} \cdot 0,645771^2 = 0,395956;$$

$$k_3 = \frac{4+Z}{3} \Phi_3 = \frac{4+5/8}{3} \cdot 0,645771 = 1,134599;$$

$$K_1 = k_1 + k_2 + k_3 \Phi_2 = 0,002469 + 0,390956 + 1,221730 \cdot 0,120099 = 0,477421; \quad (\text{Б.116})$$

$$K_2 = k_3 + 4Z \frac{\Phi_2}{\pi} = 1,130099 + 4 \cdot \frac{5}{8} \cdot \frac{0,069813}{3,14159} = 1,185654,$$

где $Z = 5/8$ - принято по рекомендациям для кулачка Курца;

$$c_{11} = \frac{K_1 \omega''_{m0k} + K_2 h_{m\max}}{2K_1 + K_2 \Phi_1} = \frac{0,472422 \cdot 1,145917 + 1,185654 \cdot 6,75}{2 \cdot 0,472321 + 1,186654 \cdot 0,411152} = 7,004912, \quad (\text{Б.117})$$

где $\omega''_{m0k} = \omega'_{m0k} \cdot 180 / \pi = 0,02 \cdot 180 / 3,14159 = 1,145917;$

$$c_{12} = (c_{11} - \omega''_{m0k}) \frac{\Phi_1}{\pi} = (7,006912 - 1,145917) \frac{0,410152}{3,14159} = 0,745185 \quad (\text{Б.118})$$

$$c_{32} = (2c_{11} - \omega_{m0\kappa}'') / K_2 = (2 \cdot 7,006912 - 1,145917) / 1,185654 = 10,883003$$

$$c_{21} = c_{32}k_3 = 10,883003 \cdot 1,130099 = 12,2958968$$

$$c_{22} = c_{32}k_1 = 10,883003 \cdot 0,002469 = 0,029796$$

$$c_{31} = c_{32} \frac{1-Z}{6\Phi_3^2} = 10,883003 \frac{1-5/8}{6 \cdot 0,645771^2} = 1,626970$$

$$c_{33} = c_{32}k_2 = 10,883003 \cdot 0,390956 = 4,584047$$

Подъем (перемещение) клапана по углу поворота кулачка ϕ_{κ} (распределительного вала ϕ_p):

$$h_0 = \Delta s \left(1 - \cos \frac{\pi}{2\Phi_0} \phi_{\varepsilon 0} \right); \quad \phi_{\varepsilon 0} = 0^\circ - 19^\circ 38'; \quad (\text{Б.119})$$

$$h_0 = 0,25 \left(1 - \cos \frac{3,14159}{2 \cdot 0,342694} \phi_{\varepsilon 0} \right) = 0,25 (1 - \cos 4,583666 \phi_{\varepsilon 0});$$

$$h_1 = \Delta s + c_{11} \phi_{k1} - c_{12} \sin \frac{\pi}{\Phi_1} \phi_{k1}; \quad \phi_{k1} = 0^\circ - 25^\circ;$$

$$h_1 = 0,25 + 7,0069124 \phi_{k1} - 0,765185 \sin \frac{3,14159}{0,410152} \phi_{k1};$$

при $\phi_{k1} = \phi_{k1k} = 23^\circ 30' = 0,410152$ рад

$$h_{1k} = 3,1238972 \text{ мм};$$

$$h_2 = h_{1k} + c_{21} \phi_{k2} + c_{22} \sin \frac{\pi}{2\Phi_2} \phi_{k2}; \quad \phi_{\varepsilon 2} = 0^\circ - 8^\circ;$$

$$h_2 = 3,1238971 + 12,264968 \phi_{k2} + 0,026796 \sin \frac{3,14159}{2 \cdot 0,069813} \phi_{k2};$$

при $\phi_{k2} = \phi_{k2k} = 4^\circ = 0,069813$ рад

$$h_{2k} = 4,006948768 \text{ мм};$$

$$h_3 = h_{2k} + c_{31} (\Phi_3 - \phi_{k3})^4 - c_{32} (\Phi_3 - \phi_{k3})^2 + c_{33}; \quad \phi_{\varepsilon 3} = 0^\circ - 37^\circ;$$

$$h_3 = 4,0069487 + 1,626570 \cdot (0,645771 - \phi_{k3})^4 - 10,853003 \cdot (0,645771 - \phi_{k3})^2 + 4,243047;$$

при $\phi_{k3} = \phi_{k3k} = 37^\circ = 0,645771$ рад

$$h_{3k} = 8,24995 = 8,25 \text{ мм} = h_{\kappa \text{тmax}} + \Delta s.$$

Б.4.3 Определение время-сечения клапана газодинамическим методом

Диаграмма подъема толкателя является диаграммой подъема клапана. Один градус поворота распределительного вала равен

$$t_p^0 = 1 / (6 \cdot n_p) = 1 / (6 \cdot 2900) = 5,747136 \cdot 10^{-5} \text{ с.} \quad (\text{Б.120})$$

Значит время-сечение клапана

$$\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt = F_{\text{кл}}(t_2) - F_{\text{кл}}(t_1) = 1,5651 - 0,0215 = 1,5578 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}, \quad (\text{Б.121})$$

где $F_{\text{кл}}(t_1)$ - время-сечение в момент начала такта впуска, а $F_{\text{кл}}(t_2)$ - в конце.

Средняя площадь проходного сечения клапана

$$F_{\text{клср}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt}{(\phi_2 - \phi_1) \cdot t_p^0} = \frac{1,5436}{(90 - 0) \cdot 5,747126 \cdot 10^{-5}} = 298,4294 \text{ мм}^2 = 2,9868894 \text{ см}^2. \quad (\text{Б.122})$$

Средняя скорость потока смеси в седле клапана

$$\omega'_{\text{ен}} = V_{\text{нср}} F_n / (i_{\text{кл}} \cdot F_{\text{клср}}) = 15,3 \cdot 52,8 / (2 \cdot 2,984294) = 133,459 \text{ м/с}. \quad (\text{Б.123})$$

Полное время-сечение клапана

$$\begin{aligned} \int_{t_{\text{пр}}}^{t_x} F_{\text{кл}} dt &= \sum_{i=0}^x h_{\text{кли}} \cdot (\pi \cos \alpha \cdot d_{\text{зоп}}) \cdot 1 / (6 \cdot n_p) = \sum_{i=0}^x h_{\text{кли}} \cdot (3,14159 \cdot \cos 45^\circ \cdot 25) \cdot 1 / (6 \cdot 2900) = \\ &= 4,340744 \cdot 10^{-3} \sum_{i=0}^x h_{\text{кли}} \text{ мм}^2 \cdot \text{с}, \end{aligned} \quad (\text{Б.124})$$

где $t_{i\delta}$ - момент начала открытия впускного клапана, t_x - текущее значение времени подъема клапана.

Б.4.4 Расчет пружины клапана

Максимальная сила упругости пружин

$$P_{\text{прmax}} = KM_{\text{кл}} a \omega_{\text{кр}}^2 = 1,4 \cdot 145 \cdot 11,5 \cdot 293^2 \cdot 10^{-6} = 204,654 \text{ Н}, \quad (\text{Б.125})$$

где $K = 1,4$ - коэффициент запаса;

$$M_{\text{кл}} = m_{\text{кл}} + m_{\text{нр}} / 3 + m_{\text{г}} = 95 + 60 / 3 + 30 = 145 \text{ г} - \text{ суммарная масса клапанного}$$

механизма.

Минимальная сила упругости пружины

$$P_{np\min} = KM_{кл} (r_0 - r_2) \omega_k^2 = 1,4 * 145 * (15 - 8,5) * 298^2 * 10^{-6} = 116,47H \quad (\text{Б.126})$$

Жесткость пружины

$$c = KM_{кл} \omega_{kr}^2 = 1,4 * 145 * 293^2 * 10^{-6} = 17,43кН / м . \quad (\text{Б.127})$$

Деформация пружины:

-предварительная

$$f_{\min} = r_0 - r_2 = 15 - 8,5 = 6,5\text{мм} \quad (\text{Б.128})$$

- полная

$$f_{\max} = f_{\min} + h_{кл.\max} = 6,5 + 6,75 = 13,25\text{мм} \quad (\text{Б.129})$$

Размеры пружин (приняты по конструктивным соображениям):

- диаметр проволоки $\delta_{np} = 3$ мм;

- средний диаметр пружины $D_{np} = 22$ мм;

Число рабочих витков пружины

$$i_p = \frac{G \cdot \delta_{np}^4 \cdot f_{\max}}{8P_{np\max} \cdot D_{np}^3} = \frac{8,3 \cdot 0,3^4 \cdot 1,325}{8 \cdot 201 \cdot 10^{-6} \cdot 2,2^3} = 5,212, \quad (\text{Б.130})$$

где $G = 8,3$ - модуль упругости второго рода, МН/см².

Максимальные и минимальные напряжения в пружине:

$$\tau_{\max} = k' \frac{8P_{np\max} D_{np}}{\pi \delta_{np}^3} = 1,21 \frac{8 \cdot 201 \cdot 22 \cdot 10^{-9}}{3,14 \cdot 3^3 \cdot 10^{-9}} = 504,45 \text{ МПа}; \quad (\text{Б.131})$$

$$\tau_{\min} = k' \frac{8P_{np\min} D_{np}}{\pi \delta_{np}^3} = 1,21 \frac{8 \cdot 113 \cdot 22 \cdot 10^{-9}}{3,14 \cdot 3^3 \cdot 10^{-9}} = 285 \text{ МПа},$$

где $k' = 1,21$ определен при $D_{np} / \delta_{np} = 22/3 = 7,33$.

Средние напряжения и амплитуды напряжений:

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{504 + 284}{2} = 397 \text{ МПа}; \quad (\text{Б.132})$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{504 - 284}{2} = 110 \text{ МПа}.$$

Так как концентрация напряжений на витках пружины учитывается коэффициентом k' , а $k_\tau / \varepsilon_m \varepsilon_n \approx 1$, то

$$\tau_{ak} = \tau_a \frac{k_\tau}{\varepsilon_m \varepsilon_n} = 110 \cdot 1 = 110 \text{ МПа}. \quad (\text{Б.133})$$

Запас прочности пружины

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ak} + \alpha_{\tau} \tau_m} = \frac{350}{110 + 0,2 \cdot 394} = 1,85, \quad (6.134)$$

где $\alpha_{\tau} = 0,2$.

Расчет пружин на резонанс:

$$n_c = \frac{2,17 \cdot 10^7 \delta_{np}}{i_p D_{np}^2} = \frac{2,17 \cdot 10^7 \cdot 3}{5,202 \cdot 22^2} = 29575; \quad (Б.135)$$

$$\frac{n_c}{n_p} = \frac{29569}{2800} = 10,2 \neq 1, 2, 3 \dots$$

Б.4.5 Расчет распределительного вала

Максимальная сила от выпускного клапана, действующая на кулачек

$$P_{T \max} = \left[P_{np \min} + \frac{\pi d_6^2}{4} (p_z - p'_z) \right] + M_T \omega_k^2 (r_1 - r_0) =$$

$$= \left[113 + \frac{3,14 \cdot 0,026^2}{4} (0,445 - 0,1) \cdot 10^6 \right] + 145 \cdot 293^2 (57,2 - 15) \cdot 10^{-6} = 827,54 \text{ Н}, \quad (Б.136)$$

где:

$$d_6 = \left(\frac{1}{1,0 \div 1,2} \right) d_{en} = \frac{30}{1,15} = 26 \text{ мм} - \text{диаметр тарелки выпускного клапана};$$

$$d_{en} = (1,06 \div 1,12) d_{zop} = 1,12 \cdot 25 = 30 \text{ мм} - \text{диаметр тарелки впускного клапана};$$

$$M_T = m_{кл} + m_{np} / 3 + m_T = 95 + 60 / 3 + 30 = 145 \text{ г}$$

Стрела прогиба распределительного вала

$$y = 0,8 \frac{P_{T \max} a^2 b^2}{El(d_p^4)} = 0,8 \frac{821 \cdot 27^2 \cdot 62^2}{2,2 \cdot 10^5 \cdot 89 \cdot (22^4)} = 0,0004301 \text{ мм}, \quad (Б.137)$$

где $E = 2,2 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости стали;

$$l = a + b = 27 + 62 = 89 \text{ мм} - \text{длина пролета распределительного вала, принята}$$

по конструктивным соображениям;

$$d_p = 22 \text{ мм} - \text{наружный диаметр вала.}$$

Напряжение смятия

$$\sigma_{\bar{n}} = 0,418 \sqrt{\frac{P_{r\max} E}{b_e r_1}} = 0,418 \sqrt{\frac{0,000821 \cdot 2,2 \cdot 10^5}{0,014 \cdot 0,0572}} = 478,45 \text{ МПа}, \quad (\text{Б.138})$$

где $b_e = 14$ мм - ширина кулачка.

Допускаемые напряжения смятия $[\sigma_{\bar{n}}] = 400 \div 1200$ МПа.

Приложение В- Системы двигателя

В.1 Расчет элементов системы смазки

В.1.1 Масляный насос

Общее количество тепла, выделяемого топливом в течение 1 с:

$$Q_0 = 214,398 \text{ кДж/с.}$$

Количество тепла, отводимого маслом от двигателя:

$$Q_M = 0,021 Q_0 = 0,021 * 214,398 = 4,54 \text{ кДж/с.}$$

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

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

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

Циркуляционный расход масла:

$$V_{Ц} = Q_M / (c_m \rho_m \Delta T_M) = 4,54 / (900 * 2,094 * 10) = 0,000240 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Циркуляционный расход с учетом стабилизации давления масла в системе:

$$V' = 2V_{Ц} = 2 * 0,000240 = 0,00048179 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Объемный коэффициент подачи $\eta_i = 0,7$.

Расчетная производительность насоса:

$$V_p = V' / \eta_i = 0,00048179 / 0,7 = 0,000688 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Модуль зацепления зуба $m = 4,5 \text{ мм} = 0,00458 \text{ м}$.

Высота зуба $h = 2m = 2 * 4,5 = 9,0 \text{ мм} = 0,00968 \text{ м}$.

Число зубьев шестерен $z = 7$.

Диаметр начальной окружности шестерни:

$$D_0 = z * m = 7 * 4,5 = 31,5 \text{ мм} = 0,0316 \text{ м.}$$

Диаметр внешней окружности шестерни:

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

Окружная скорость на внешнем диаметре шестерни $u_i = 6,36 \text{ м/с}$.

Частота вращения шестерни (насоса):

$$n_i = u_i * 60 / (\pi D) = 6,36 * 60 / (3,14 * 0,0405) = 3000 \text{ об/мин.}$$

Длина зуба шестерни:

$$b = 60 * V_p / (2 * \pi * m^2 * z * n_i) = 60 * 0,000688 / (2 * 3,14 * 0,0045^2 * 7 * 3000) = 0,0154 \text{ м.}$$

Рабочее давление масла в системе $p = 40 * 10^4$ Па.

Механический к. п. д. масляного насоса: $\eta_{i.f} = 0,87$.

Мощность, затрачиваемая на привод масляного насоса:

$$N_i = V_p * p / (\eta_{i.f} * 10^3) = 0,000688 * 40 * 10^4 / (0,87 * 10^3) = 0,316 \text{ кВт.}$$

В.1.2 Подшипники

Диаметральный зазор

$$\Delta = 0,007 * (d_{\text{ш}})^{0,5} = 0,007 * (48)^{0,5} = 0,04875 \text{ мм} \quad (\text{В.1})$$

Относительный зазор

$$\chi = \Delta / d_{\text{ш}} = 0,0485 / 48 = 0,001 \quad (\text{В.2})$$

Коэффициент, учитывающий геометрию шатунной шейки

$$c = 1 + d_{\text{ш}} / l_{\text{ш}} = 1 + 48 / 22 = 3,18 \quad (\text{В.3})$$

Минимальная толщина масляного слоя

$$h_{\text{min}} = 55 * 10^{-9} * \mu * n * d_{\text{ш}} / (k_{\text{ш.ср.}} * \chi * c) = 55 * 10^{-9} * 0,0136 * 5600 * 48 / (8,8 * 0,001 * 3,18) = 0,007 \text{ мм}, \quad (\text{В.4})$$

где $\mu = 0,0136 \text{ Н*с/м}^2$ - определяется для масла АК - 15 при $T = 373 \text{ К}$ (подшипник залит свинцовой бронзой).

Величина критического слоя масла

$$h_{\text{кр}} = h_B + h_{\text{П}} = 0,0007 + 0,0013 = 0,00214 \text{ мм}, \quad (\text{В.5})$$

где $h_B = 0,0007$ - величина неровностей поверхности шейки после чистового шлифования, мм;

$h_{\text{П}} = 0,0013$ - величина неровностей поверхности вкладыша после алмазного растачивания, мм.

Коэффициент запаса надежности подшипника

$$K = h_{\text{min}} / h_{\text{кр}} = 0,007 / 0,002 = 3,5 \quad (\text{В.6})$$

В.2 Расчет элементов системы охлаждения

В.2.1 Водяной насос

Циркуляционный расход воды в системе охлаждения

$$G_{Ж} = Q_d / (c_{ж} * \rho_{ж} * \Delta T_{ж}) = 69044 / (4187 * 1000 * 9,6) = 0,00172 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (\text{В.7})$$

где $\Delta T_{ж} = 9,6 \text{ К}$ - температурный перепад воды при принудительной циркуляции.

Расчетная производительность насоса

$$G_{Ж.Р} = G_{Ж} / \eta = 0,00172 / 0,82 = 0,00219 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (\text{В.8})$$

где $\eta = 0,82$ - коэффициент подачи насоса.

Радиус входного отверстия крыльчатки

$$r_1 = (G_{Ж.Р} / (\pi c_1) + r_0^2)^{0,5} = (0,00209 / (3,14 * 1,8) + 0,01^2)^{0,5} = 0,0227 \text{ м}, \quad (\text{В.9})$$

где $c_1 = 1,8 \text{ м/с}$ - скорость воды на входе в насос;

$r_0 = 0,01 \text{ м}$ - радиус ступицы крыльчатки.

Окружная скорость потока воды на выходе из колеса

$$u_2 = (1 + \operatorname{tg} \alpha_2 \operatorname{ctg} \beta_2)^{0,5} * (p_{ж} / (\rho_{ж} * \eta_h))^{0,5} = (1 + \operatorname{tg} 10^\circ \operatorname{ctg} 45^\circ)^{0,5} * \\ * (120000 / (1000 * 0,65))^{0,5} = 14,7 \text{ м/с}, \quad (\text{В.10})$$

где угол $\alpha_2 = 10^\circ$, а угол $\beta_2 = 45^\circ$; $\eta_h = 0,65$ - гидравлический к. п. д. насоса.

Радиус крыльчатки колеса на выходе

$$r_2 = 30 * u_2 / (\pi n_{Б.Н.}) = 30 * 14,7 / (3,14 * 4600) = 0,0324 \text{ м}. \quad (\text{В.11})$$

Окружная скорость входа потока

$$u_1 = u_2 * r_1 / r_2 = 14,7 * 0,0217 / 0,0304 = 10,49 \text{ м/с}. \quad (\text{В.12})$$

Угол между скоростями c_1 и u_1 принимается $\alpha_1 = 90^\circ$, при этом $\operatorname{tg} \beta_1 = c_1 / u_1 = 1,8 / 10,48 = 0,1717$, откуда $\beta_1 = 9,75^\circ$.

Ширина лопатки на входе

$$b_1 = G_{Ж.Р} / ((2 * \pi * r_1 - z \delta_1 / \sin \beta_1) * c_1) = 0,00209 / ((2 * 3,14 * 0,0217 - \\ - 4 * 0,003 / \sin 9,75^\circ) * 1,8) = 0,0177 \text{ м}, \quad (\text{В.13})$$

где $z = 4$ - число лопаток на крыльчатке насоса; $\delta_1 = 0,003 \text{ м}$ - толщина лопаток у входа.

Радиальная скорость потока на выходе из колеса

$$c_r = p_{жс} * tg \alpha_2 / (\rho_{жс} * \eta_h * u_2) = 120000 * tg 10^\circ / (1000 * 0,65 * 14,7) = 2,2 \text{ м/с.} \quad (\text{В.14})$$

Ширина лопатки на выходе

$$b_2 = G_{ж.р.} / ((2 * \pi * r_2 - z \delta_2 / \sin \beta_2) * c_2) = 0,00209 / ((2 * 3,14 * 0,0304 * 4 * 0,003 / \sin 45^\circ) * 2,2) = 0,00587 \text{ м,} \quad (\text{В.15})$$

где $\delta_2 = 0,003$ м - толщина лопаток на выходе.

Мощность, потребляемая насосом

$$N_{Д.Н.} = G_{ж.р.} * p_{жс} / (1000 * \eta_m) = 0,00209 * 120\,000 / (1000 * 0,82) = 0,3066 \text{ кВт,} \quad (\text{В.16})$$

где $\eta_i = 0,82$ - механический к. п. д. водяного насоса.

В.2.2 Водяной радиатор

Количество воздуха, проходящего через радиатор

$$G'_{возд} = Q_{возд} / (c_{возд} * \Delta T_{возд}) = 69044 / (1000 * 24) = 2,88 \text{ кг/с,} \quad (\text{В.17})$$

где $\Delta \dot{O}_{\dot{a}\dot{a}} = 24$ К - температурный перепад воздуха в решетке радиатора.

Массовый расход воды, проходящей через радиатор

$$G'_{жс} = G_{жс} * \rho_{жс} = 0,00172 * 1000 = 1,72 \text{ кг/с.} \quad (\text{В.18})$$

Средняя температура охлаждающего воздуха, проходящего через радиатор

$$T_{ср.возд.} = T_{возд.вх.} + (T_{возд.вх.} - \Delta T_{возд}) / 2 = (313 + (313 + 24)) / 2 = 323,54 \text{ К,} \quad (\text{В.19})$$

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

Средняя температура воды в радиаторе

$$T_{ср.вод.} = T_{вод.вх.} + (T_{вод.вх.} - \Delta T_{вод}) / 2 = 363 + (363 - 9,6) / 2 = 360,274 \text{ К,} \quad (\text{В.20})$$

где $T_{вод.вх.} = 363$ К - температура воды перед радиатором; $\Delta \dot{O}_{\dot{a}\dot{a}} = 9,6$ - температурный перепад воды в радиаторе.

Поверхность охлаждения радиатора

$$F = Q_{вод} / (K(T_{ср.вод.} * T_{ср.возд.})) = 69044 / (160 * (358,2 - 325)) = 13,3278 \text{ м}^2, \quad (\text{В.21})$$

где $K = 160$ Вт/(м²-К) - коэффициент теплопередачи для радиатора

В.2.3 Вентилятор

Плотность воздуха при средней его температуре в радиаторе

$$\rho_{\text{возд}} = p_0 * 10^6 / (R_B * T_{\text{ср.возд.}}) = 0,1 * 10^6 / (287 * 325) = 1,070 \text{ кг/м}^3. \quad (\text{B.22})$$

Производительность вентилятора

$$G_{\text{возд}} = G'_{\text{возд}} / \rho_{\text{возд}} = 2,88 / 1,07 = 2,692 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{B.23})$$

Фронтальная поверхность радиатора

$$F_{\text{фр.рад.}} = G_{\text{возд}} / \omega_{\text{возд}} = 2,69 / 20 = 0,1359 \text{ м}^2, \quad (\text{B.24})$$

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

Диаметр вентилятора

$$D_{\text{вент}} = 2 * (F_{\text{фр.рад}} / \pi)^{0,5} = 2 * (0,135 / 3,14)^{0,5} = 0,414 \text{ м}. \quad (\text{B.25})$$

Окружная скорость вентилятора

$$u = \psi_{\text{л}} * (\Delta p_{\text{тр}} / \rho_{\text{возд}})^{0,5} = 3,41 * (800 / 1,07)^{0,5} = 93,478 \text{ м/с}, \quad (\text{B.26})$$

где $\psi_{\text{л}} = 3,41$ - безразмерный коэффициент для плоских лопастей.

Частота вращения вентилятора

$$n_{\text{вент}} = 60 * u / (\pi D_{\text{вент}}) = 60 * 93,4 / (3,14 * 0,414) = 4600 \text{ об/мин}. \quad (\text{B.26})$$

Мощность, затрачиваемая на привод осевого вентилятора

$$N_{\text{вент}} = G_{\text{возд}} * \Delta p_{\text{тр}} / (1000 * \eta_{\text{в}}) = 2,69 * 800 / (1000 * 0,4) = 5,38 \text{ кВт}, \quad (\text{B.27})$$

где $\eta_{\text{в}} = 0,4$ - к. п. д. вентилятора с плоскими лопастями.

Таблица Г1- Суммирование значений крутящих моментов всех 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	0,0000000	180	0,000000	360	0,000000	540	0,000000	0
10	10	-70,491809	190	305,975569	370	-70,491809	550	305,975569	117,3844
20	20	-126,894808	200	617,380049	380	-126,894808	560	617,380049	245,7844
30	30	-158,443700	210	559,402308	390	-158,443700	570	559,402308	200,1454
40	40	-160,127083	220	401,354509	400	-160,127083	580	401,354509	241,47475
50	50	-133,577774	230	304,510044	410	-133,577774	590	304,510044	85,4758
60	60	-86,212841	240	256,195881	420	-86,212841	600	256,195881	85,4127
70	70	-28,930513	250	239,841504	430	-28,930513	610	239,841504	105,4795
80	80	26,885650	260	238,493801	440	26,885650	620	238,493801	105,6789
90	90	72,104026	270	238,841657	450	72,104026	630	238,841657	155,4789
100	100	101,522752	280	232,687915	460	101,522752	640	232,687915	166,6478
110	110	114,147134	290	216,861430	470	114,147134	650	216,861430	465,4859
120	120	112,278709	300	192,027073	480	112,278709	660	192,027073	152,3568
130	130	99,998369	310	160,989439	490	99,998369	670	160,989439	85,4758
140	140	81,668624	320	127,086306	500	81,668624	680	127,086306	103,7854
150	150	60,865034	330	93,052733	510	60,865034	690	93,052733	76,500
160	160	39,863140	340	58,250425	520	39,863140	700	58,250425	47,5894

170	170	19,606037	350	26,852478	530	19,606037	710	26,852478	46,3578
180	180	0,0000000	360	0,000000	540	0,000000	720	0,000000	0