

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

_____ Институт машиностроения _____

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование кафедры)

_____ 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» _____

(код и наименование направления подготовки, специальности)

_____ Двигатели внутреннего сгорания _____

(направленность (профиль/специализация))

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Двигатель внутреннего сгорания адаптированный для
беспилотных летательных аппаратов

Студент

_____ А.В. Климанов _____

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Руководитель

_____ Д.А. Павлов _____

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Консультанты

_____ А.Г. Егоров _____

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

_____ М.И. Фесина _____

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

_____ С.А. Гудкова _____

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

_____ к.т.н., Д.А. Павлов _____

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

_____ (личная подпись)

« _____ » _____ 2018 г.

Тольятти 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Голыяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)
Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ЭМиСУ

_____ Д.А. Павлов
(подпись) (И.О. Фамилия)
« ____ » _____ 2018г

ЗАДАНИЕ
на выполнение бакалаврской работы

Студент Климанов Алексей Владимирович

1. Тема Двигатель внутреннего сгорания адаптированный для беспилотных летательных аппаратов

2. Срок сдачи студентом законченной бакалаврской работы _____

3. Исходные данные к бакалаврской работе Бензиновый двигатель РМЗ – 640, $iV_h=0,635$ л, частота вращения $n = 5000$ об/мин, степень сжатия $\varepsilon = 8,2$.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов) Тепловой расчет двигателя, расчет кинематики и динамики двигателя, прочностной расчет, описание мероприятий для адаптации двигателя.

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала _____
продольный и поперечный разрез двигателя, лист диаграмм теплового расчета
Лист диаграмм ВСХ, Лист диаграмм кинематического и динамического расчета

6. Консультанты по разделам _____
– д.т.н., профессор Егоров А.Г. ,
к.т.н., профессор Фесина М.И. , к.т.н. Гудкова С.А.

7. Дата выдачи задания « _____ » _____ 201__ г.

Руководитель бакалаврской работы _____

(подпись)

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению _____

(подпись)

А.В. Климанов

(И.О. Фамилия)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)
Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ЭМиСУ

_____ Д.А. Павлов
(подпись) (И.О. Фамилия)

« ____ » _____ 2018г

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
выполнения бакалаврской работы

Студента Климанова Алексея Владимировича
по теме Двигатель внутреннего сгорания адаптированный для беспилотных летательных аппаратов

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Отметка о выполнении	Подпись руководителя
Лит. обзор по теме работы	29 апреля 2018 г.			
Тепловой расчет двигателя	5 мая 2018 г.			
Расчет кинематики двигателя	11 мая 2018 г.			
Расчет динамики двигателя	15 мая 2018 г.			
Мероприятия по адаптации поршневого двигателя	20 мая 2018 г.			
Безопасность и экологичность	30 мая 2018 г.			
Предварительная защита и корректировка ВКР				
Защита перед ГИК				

Руководитель бакалаврской работы

_____ (подпись)

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

_____ (подпись)

А.В. Климанов

(И.О. Фамилия)

АННОТАЦИЯ

Беспилотные летательные аппараты на данный момент являются неотъемлемой частью многих отраслей. В качестве движущей силы в беспилотных летательных аппаратах применяют двигатели внутреннего сгорания или электродвигатели. Адаптация двигателя внутреннего сгорания на данный момент является актуальной и важной темой. Поэтому в бакалаврской работе представлен способ адаптации двухтактного двигателя внутреннего сгорания РМЗ – 640.

В бакалаврской работе проведена модернизация двухтактного бензинового двигателя РМЗ - 640. Бакалаврская работа состоит из графической части и пояснительной записки. Пояснительная записка разделена на несколько частей:

- сведения о беспилотных летательных аппаратах;
- тепловой расчет двигателя по методике И.И.Вибе и тепловой баланс;
- кинематический расчет двигателя, показывающий, как изменяются кинематические параметры цилиндра-поршневой группы;
- расчет динамический, в котором происходит определение сил и нагрузок, действующих в механизмах преобразования энергии рабочего тела в механическую работу двигателя.
- прочностной расчет основных деталей двигателя;
- расчет систем питания, смазки и охлаждения двигателя.

В графическую часть работы включены 7 листов формата А1, состоит из поперечных и продольных чертежей конструкции двигателя, графики иллюстрирующие эффективность адаптированного двигателя.

ABSTRACT

Over the last years, the demand for UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) has been increasing in many industries. Internal combustion engines and electric motors are commonly used as a driving force for UAVs. Adaptation of internal combustion engines for use on UAVs is currently an important topic, which needs to be looked into. Therefore, in this bachelor thesis, the way of adaptation of the two-stroke internal combustion engine RMZ – 640 is presented. In this bachelor thesis, modernization of the two-stroke gasoline engine RMZ - 640 is carried out. Bachelor thesis consists of a graphical part and the explanatory note. The explanatory note consists of several parts:

- research and data on unmanned aerial vehicles;
- thermal calculation and heat balance of the engine using I.I. Vibe's method;
- kinematic calculation, showing the change of kinematic parameters of piston group during engine operation;
- the dynamic calculation, in which the determination of forces and loads that are present in energy transformation mechanisms is carried out.
- calculation of main engine parts durability;
- calculation of fuel feed system, as well as lubrication and cooling systems of the engine.

Graphical part of bachelor thesis is comprised of sheets of the 7 A1 format that include cross and longitudinal profiles of engine structure and graphics illustrating efficiency of the adapted engine.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1 Сведения о беспилотных летательных аппаратах.....	10
1.1 Основные сведения.....	10
1.2 Причины сбоев в БПЛА.....	11
1.3 Классификация БПЛА.....	11
2 Тепловой расчет.....	15
3 Тепловой баланс двигателя.....	27
4 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма.....	29
5 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма.....	31
6 Расчет на прочность основных деталей КШМ.....	36
6.1 Расчет поршня.....	36
6.2 Расчет поршневых колец.....	38
6.3 Расчет поршневого пальца.....	39
6.4 Расчет шатуна.....	41
6.5 Расчет коленчатого вала.....	43
7 Расчет элементов систем питания.....	45
7.1 Расчет карбюратора.....	45
7.2 Расчет диффузора.....	45
7.3 Расчет главного жиклера.....	46
7.4 Расчет компенсационного жиклера.....	46
7.5 Расчет характеристики карбюратора.....	47
8 Расчет элементов систем питания.....	48
8.1 Расчет масляного насоса.....	48
8.2 Масляный радиатор с воздушным охлаждением.....	49

9	Расчет элементов системы охлаждения.....	50
9.1	Вентилятор.....	50
9.2	Расчет поверхности воздушного охлаждения.....	51
10	Модернизация двигателя для беспилотного летательного аппарата....	53
11	Экологичность и безопасность.....	57
11.1	Рассмотрение проблемы.....	57
11.2	Выводы по главе экологичность и безопасность проекта.....	60
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	61
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	62
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	65
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б	73
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	75
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	77

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотный летательный аппарат – это мобильный, автономный летательный аппарат без экипажа на борту, запрограммированный на выполнения поставленных задач. За последние годы беспилотные летательные аппараты находились в постоянном процессе модернизации. Миниатюризация вычислительных систем и развитие спутниковой навигации позволили уменьшить габариты, массу, стоимость БПЛА. В настоящее время сложно представить процесс деятельности человека без вспомогательного, важного и нужного беспилотного летательного аппарата. Беспилотные летательные аппараты используются в разных сферах деятельности человека: научных исследованиях, военной разведки, мониторинге погоды и экологической обстановки [12].

Актуальность темы состоит в том, что беспилотные летательные аппараты (БПЛА) на данный момент пользуются большим спросом, охватывают большую сферу услуг и продолжают стремительно развиваться. Беспилотные летательные аппараты используют либо двигатель внутреннего сгорания (ДВС), либо электродвигатель. Каждый имеет свои плюсы и минусы.

Невозможно представить ни один исправный и выдающий высокие показатели по мощности и качеству сборки двигатель внутреннего сгорания в беспилотных летательных аппаратах, без грамотной модернизации двигателя и рассмотрения мероприятий для адаптирования его к условиям работы в воздухе.

История выбранного двигателя для бакалаврской работы начинается в 1970 году, Рыбинским моторостроительным заводом был изготовлен первый снегоход «БУРАН» с двигателем от мотоцикла «ИЖ ЮПИТЕР – 3». Однако мощности данного двигателя не хватало, для того чтобы справляться с

поставленной задачей в эксплуатационных условиях, и в 1971 году был спроектирован двигатель РМЗ – 640 [5].

При адаптации двигателя внутреннего сгорания к эксплуатации в воздухе могут возникнуть проблемы и неисправности в системах смазки и охлаждения из-за переохлаждения. При переохлаждении двигателя происходит ухудшение смесеобразования, происходит увеличение расход топлива, так же снижается мощность двигателя, вследствие всего этого увеличивается износ компонентов двигателя. Но так как снегоходы эксплуатируются зимой и в районах, где преобладает снег, а, значит, и морозы воздушное охлаждение двигателя и температурный режим были заложены заведомо с запасом, учитывая температуру эксплуатации снегохода. Это означает, что система охлаждения и система смазки не нуждается в дополнительных мероприятиях связанных с проблемой переохлаждения, вследствие низкой температуры воздуха в небе.

Дальше речь пойдет о самом двигателе, он имеет повышенные тяговые возможности, большой запас литровой мощности, что позволяло снегоходу преодолевать суровые снежные условия. Двигатель имеет совместную систему смазки и топлива, что является особенностью двухтактных двигателей, при которой масло в определенных пропорциях смешивается с топливом при заполнении топливного бака и попадает в картер двигателя при его работе.

1 Сведения о беспилотных летательных аппаратах

1.1 Основные сведения

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА или БЛА) или дрон – это мобильный, автономный летательный аппарат без экипажа на борту, запрограммированный на выполнения поставленных задач. За последние годы беспилотные летательные аппараты находились в постоянном процессе модернизации. Миниатюризация вычислительных систем и развитие спутниковой навигации позволили уменьшить габариты, массу, стоимость [12].

В результате растущей популярности беспилотных летательных аппаратов, они стали использоваться все чаще и чаще. В настоящее время беспилотные летательные аппараты используются как для военных, так и для гражданских целей. Значительная группа используемых БПЛА используются в личных целях в качестве хобби. Сложно представить процесс деятельности человека без вспомогательного, важного и нужного беспилотного летательного аппарата. Беспилотные летательные аппараты используются в разных сферах деятельности человека: научных исследованиях, военной разведки, мониторинге погоды и экологической обстановки. Кроме того, беспилотные летательные аппараты используются для мониторинга стихийных бедствий, геодезических и метеорологических измерений, аэрофотосъемки, контроля давления линий трубопроводов, а также для обнаружения и контроля лесных пожаров [8].

Главная задача двигателя беспилотного летательного аппарата обеспечить толчок, необходимый для подъема данного агрегата и поддержание его в воздухе. В БПЛА небольших размеров, которые используют электродвигатели в основном применяют литий-полимерные аккумуляторы (LiPo), в то время как беспилотные летательных аппараты больших размеров полагаются на обычные самолетные двигатели. В БПЛА могут использоваться

турбореактивные двигатели, поршневые двигатели, газотурбинные двигатели, электрические и гибридные двигатели. Тип используемого двигателя зависит в основном от цели БПЛА [12].

1.2 Причины сбоев в БПЛА

Одной из основных задач при проектировании БПЛА является надежность. Исследование, проводимое американским отделом надежности, показало, что большая часть сбоев БПЛА было в двигателях (38%). Второй причиной были проблемы с управлением полетом (Рисунок 1). В остальных случаях проблемы с коммуникацией земля-воздух и разные другие причины [6].

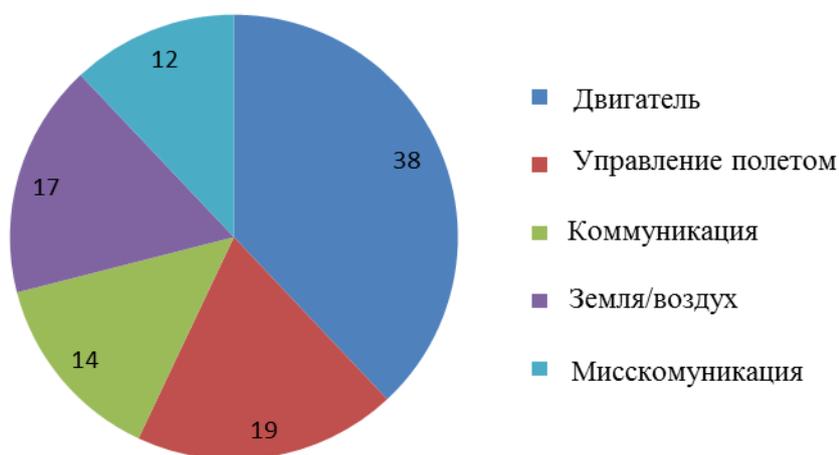


Рисунок 1 – Причины сбоев беспилотных летательных аппаратов

1.3 Классификация БПЛА [8]

По типу управления БПЛА классифицируются на:

- управляемые автоматически;

- управляемые оператором с пункта управления;
- гибридные.

Классификация дронов по размеру:

Крупногабаритные дроны

БПЛА такого типа применяются в нападении, бою и ролях разведки. Большого размера БПЛА могут находиться в воздухе большое время, без дозаправки. Способны нести ракеты, которые могут быть запущены удаленно после наблюдения и захвата в цели. Крупногабаритные дроны используются, для наблюдения и охраны территорий большого масштаба.

Дроны среднего размера

Этот диапазон дронов обычно используется в разведке или для сбора данных. Такие дроны применяются в военных, коммерческих, промышленных и сельскохозяйственных областях.

Малогобаритные дроны

Эти беспилотные летательные аппараты являются наиболее широко используемыми единицами. БПЛА такого размера используются коммерческими учреждениями, государственными ведомствами, профессиональными фотографами и любителями.

Миниатюрные БПЛА

Эти дроны используются для очень специфической цели. Миниатюрные дроны были разработаны для военного использования. Устройство достаточно маленькое, размером с ладонь. Военнослужащие используют его для шпионажа. Он может использоваться для просмотра внутренней части стоящего или поврежденного здания во время поисково-спасательных операций.

Классификация по дизайну:

БПЛА самолетного типа.

Этот тип БПЛА имеет пропеллер на хвосте или носу. В некоторых конструкциях крыла есть пропеллеры на крыльях. Реактивные двигатели также используются в крупных БПЛА. Есть небольшие единицы, которые можно запускать даже из руки, но для крупных беспилотников требуется небольшая взлетно-посадочная полоса, чтобы сойти с земли. Преимущество этой конструкции заключается в том, что этот тип БПЛА потребляет меньшее количество энергии по сравнению с многороторными БПЛА.

Многороторные БПЛА

Этот тип БПЛА также называется – квадрокоптер, из-за использования четырех роторов для подъема и передвижения. Он может подниматься и быстро менять вектор своего движения, как вертолет. Эти БПЛА являются наиболее широко используемыми из-за простоты запуска и посадки. Для запуска квадрокоптера не требуется взлетно-посадочная полоса или катапульта.

Ниже в таблице 1, классифицированы беспилотные летательные аппараты согласно их назначению, взлетной массе, дальности полета, высоте полета и продолжительности полета.

Таблица 1 – классификация беспилотных летательных аппаратов

Группа	Категория	Взлетная масса, кг	Дальность полета, км	Высота полёта, м	Продолжительность полёта, ч
Малые БПЛА Нано-БПЛА	Nano	< 0,025	1	100	1
	Микро-БПЛА	менее 5	менее 10	250	1
	Мини-БПЛА	5-150	менее 10	150-300	менее 2
Тактические	Легкие БПЛА для контроля переднего края обороны	25-150	10-30	3000	2-4
	Легкие БПЛА с малой дальностью полета	50-250	30-70	3000	3-6
	Средние БПЛА	150-500	70-200	5000	6-10
	Средние БПЛА с большой продолжительностью полета	500-1500	более 500	8000	10-18
	Маловысотные БПЛА для проникновения в глубину обороны противника	250-2500	более 250	50-9000	0,5-1
	Маловысотные БПЛА с большой продолжительностью полета	15-25	более 500	3000	более 24
	Средневысотные БПЛА с большой продолжительностью полета	1000-1500	более 500	5000-8000	24-48
Стратегические	Высотные БПЛА с большой продолжительностью полета	2500-5000	более 2000	20000	24-48
	Боевые (ударные) БПЛА	более 1000	1500	12000	2
Специального назначения	БПЛА, оснащенные боевой частью (летального действия)	-	300	4000	3-4
	БПЛА - ложные цели	150-500	0-500	50-5000	более 4
	Стратосферные БПЛА	>2500	более 2000	более 20000	более 48
	Экзостратосферные БПЛА	-	-	более 30500	-

2 Тепловой расчет

Исходные данные для теплового расчета:

- $V_L = 0,635$ л объем ДВС;
- $n_N = 5000$ мин⁻¹ – номинальная частота вращения;
- $i = 2$ – количество цилиндров;
- $\tau = 2$ – тактность двигателя;
- $\varepsilon = 8.2$ – степень сжатия двигателя.

Расчет производится на следующих скоростных режимах:

$n_{min}=1000$ мин⁻¹; $n = 2000$ мин⁻¹; $n_M=3000$ мин⁻¹; $n=4000$ мин⁻¹; $n_N=5000$ мин⁻¹.

Для двигателей с искровым зажиганием назначают бензин, средний элементарный состав в массовых долях и молекулярная масса составляют: $C=0.855$; $H=0.145$; $O = 0$; $H_u = 41.8565$; $\mu_m = 115$ кг/моль.

Низшая теплота сгорания топлива:

$$\begin{aligned} H_u &= 33,91 \cdot C + 125,6 \cdot H - 10,89 \cdot (O - S) - 2,51 \cdot (9 \cdot H + W) = \text{кДж/кг.} \\ &= 33,91 \cdot 0,855 + 125,6 \cdot 0,145 - 2,51 \cdot (9 \cdot 0,115 + 0) = 439295 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Параметры рабочего тела

Количество воздуха необходимое для полного сгорания 1 кг топлива:

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = \frac{1}{0,208} \left(\frac{0,855}{12} + \frac{0,145}{4} - \frac{0}{32} \right) = 0,516827 \quad \frac{\text{кмольвозд}}{\text{кмольтопл}}, \quad (2.2)$$

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right) = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} \cdot 0,855 + 8 \cdot 0,145 - 0 \right) = 14,95652 \quad \frac{\text{кгвозд}}{\text{кгтопл}}. \quad (2.3)$$

Принятые коэффициенты избытка воздуха в зависимости от оборотов коленчатого вала:

Количество оборотов коленчатого вала n , мин ⁻¹	Коэффициент избытка воздуха α
$n_{min}=1000$	0,96
$n=2000$	1
$n_M=3000$	1,15
$n=4000$	1,21
$n_N=5000$	1,24

Количество свежего заряда:

$$M_1 = \alpha \cdot L_0 \text{ кмоль гор.см/кг топл.} \quad (2.4)$$

Количество отдельных компонентов продуктов сгорания при $K = 0,5$:

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

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

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} = 2K \frac{1-\alpha}{1+K} 0,208 L_0; \text{ кмоль } H_2O / \text{кг.топл.} \quad (2.7)$$

$$M_{H_2} = 2K \frac{1-\alpha}{1+k} 0,208 L_0; \text{ кмоль } H_2 / \text{кг.топл.} \quad (2.8)$$

$$M_{N_2} = 0.792 \cdot \alpha \cdot L_0; \text{ кмоль } N_2 / \text{кг.топл} \quad (2.9)$$

Сумма всех продуктов сгорания:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{O_2} + M_{N_2} \text{ кмоль пр.сг/кг топл.} \quad (2.10)$$

Коэффициент молекулярного изменения свежей смеси, характеризующей относительное изменение объема при сгорании:

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1}. \quad (2.11)$$

Параметры рабочего тела приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры рабочего тела

Частота вращения n , мин ⁻¹	5000	4000	3000	2000	1000
Коэффициент избытка воздуха α	1,24	1,21	1,15	1	0,96
M_1 , кмольгор.см./кг топл.	0,6496	0,6341	0,6030	0,5255	0,5048
M_2 , кмольпр.сг./кг топл.	0,6513	0,6390	0,6144	0,5530	0,5367
M_{CO} , кмоль CO/кг топл.	0	0	0	0	0
M_{CO_2} , кмоль CO ₂ /кг топл.	0,0712	0,0712	0,0712	0,0712	0,0712
M_{N_2} , кмоль N ₂ /кг топл.	0,5075	0,4952	0,4707	0,4093	0,3929
M_{H_2O} , кмоль H ₂ O/кг топл.	0,0725	0,0725	0,0725	0,0725	0,0725
M_{H_2} , кмоль H ₂ /кг топл.	0	0	0	0	0
μ_0	1,0027	1,0079	1,0190	1,0524	1,0631

Параметры окружающей среды и остаточные газы

Давление остаточных газов:

$$p_r = p_0(1,035 + A_p \cdot 10^{-8} n^2), \quad (2.13)$$

где $p_{rN} = 1,18p_0 = 1,18 \cdot 0,1 = 0,118$ Мпа

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

Температура остаточных газов и параметры окружающей среды приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Параметры окружающей среды и остаточных газов

Частота вращения n , мин ⁻¹	T_0 , К	P_0 , МПа	Плотность воздуха, кг/м ³	Давление остаточных газов, МПа	Температура остаточных газов, К
5000					1050
4000					1025

Продолжение таблицы 3

Частота вращения n , мин ⁻¹	T_0 , К	P_0 , МПа	Плотность воздуха, кг/м ³	Давление остаточных газов, МПа	Температура остаточных газов, К
3000	293	0,1	1,189	0,12	1000
2000					965
1000					900

Процесс впуска

Температура подогрева свежего заряда приведена в таблице 4 и рассчитывается по ниже приведенным формулам:

$$\Delta T = A_T(110 - 0,0125n), \quad (2.14)$$

$$A_T = \Delta T_N / (110 - 0,0125n_N). \quad (2.15)$$

Плотность заряда на впуске:

$$\rho_0 = p_0 \cdot 10^6 / (R_B T_0); \text{ кг/м}^3. \quad (2.16)$$

Потери давления на впуске;

$$\Delta p_a = (\beta^2 + \xi_{ВП}) A_n^2 n^2 \rho_k \cdot 10^{-6} / 2 \text{ МПа}. \quad (2.17)$$

Давление в конце впуска:

$$p_a = p_k - \Delta p_a \text{ МПа}. \quad (2.18)$$

Коэффициент остаточных газов:

$$\gamma_r = \frac{T_k + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{\varphi_{оч} p_r}{\varepsilon \varphi_{доз} p_a - \varphi_{оч} p_r}, \quad (2.19)$$

где $\varphi_{оч}$ – коэффициент очистки;

$\varphi_{доз}$ – коэффициент дозарядки.

Температура в конце впуска:

$$T_a = (T_k + \Delta T + \gamma_r T_r) / (1 + \gamma_r), \text{ К}. \quad (2.20)$$

Коэффициент наполнения:

$$\eta_v = \frac{T_\kappa}{T_\kappa - \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{p_\kappa} (\varphi_{доз} \cdot \varepsilon \cdot p_a - \varphi_{оч} \cdot p_r) \quad (2.21)$$

Удельный объем рабочего тела в конце процесса наполнения:

$$V_a = 8.314 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\left(\alpha \cdot \frac{l_0}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_m} \right) T_a}{(1 + \alpha \cdot l_0) \cdot p_a} \right] \text{ м}^3, \quad (2.22)$$

где $\mu_B = 28,9$ молярная масса воздуха.

Таблица 4 - Расчет процесса впуска

Частота вращения n , мин ⁻¹	Температура подогрева, °C	Δp_a , Мпа	p_a , Мпа	$\varphi_{оч}$	$\varphi_{доз}$	γ_r	T_a , К	η_v	V_a , м ³
5000	8	0,0059	0,0941	1	1,1	0,0472	334,77	1,0403	0,98462
4000	10	0,0038	0,0962	1	1,05	0,0472	335,66	1,0275	0,96444
3000	12	0,0021	0,0979	1	1,01	0,0476	336,81	1,0161	0,94944
2000	14	0,0009	0,0991	1	0,97	0,0496	338,39	0,9955	0,93681
1000	16	0,0002	0,0998	1	0,95	0,0532	339,26	0,9902	0,93075

Процесс сжатия

Коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси:

$$\mu = (\mu_o + \gamma_r) / (1 + \gamma_r). \quad (2.23)$$

Показатель политропы сжатия:

$$n_1 = 1 + \frac{8.314}{20.16 + 1.738 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{n_1-1} + 1) \cdot T_a}. \quad (2.24)$$

Давление, температура и удельный объём в конце сжатия:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1} \text{ МПа.} \quad (2.25)$$

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} \text{ К.} \quad (2.26)$$

Удельный объём, давление и температура рабочего тела, при угле опережения впрыска топлива Θ :

$$V_y = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left[1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left[\left\{ 1 + \frac{1}{\lambda} \right\} - \left\langle \cos(\Theta) + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 (\sin(\Theta))^2} \right\rangle \right] \right]. \quad (2.27)$$

$$P_y = P_a \left(\frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1}; \text{ МПа} \quad (2.28)$$

$$T_y = T_a \left(\frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1-1}; \text{ К.} \quad (2.29)$$

Расчетные значения давления, температуры и удельного объема в конце сжатия приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Давление, температура и удельный объём в конце сжатия и воспламенения

$n, \text{ мин}^{-1}$	μ	n_1	$P_c, \text{ МПа}$	$T_c, \text{ К}$	Θ° ПКВ	$V_y, \text{ м}^3/\text{кг}$	$P_y, \text{ МПа}$	$T_y, \text{ К}$
5000	1,0026	1,378	1,798002	740,92	24	0,1932	0,8867	619,1430
4000	1,0075	1,377	1,769111	742,75	19	0,1760	1,0017	637,8747
3000	1,0181	1,377	1,714647	745,13	16	0,1615	1,1226	657,1803
2000	1,0500	1,377	1,638397	748,38	14	0,1428	1,3215	688,0340
1000	1,0599	1,377	1,540362	750,18	12	0,1313	1,4807	710,1588

Процесс сгорания

Коэффициент эффективности сгорания топлива:

$$\xi = \delta * \Psi, \quad (2.30)$$

где $\delta = 1$ при полном сгорании топлива.

Удельная теплота сгорания рабочей смеси:

$$q_z = \frac{\xi \cdot H_u}{(1 + \gamma_r)(\alpha^* l_0 + 1)}; \text{кДж/кг.} \quad (2.31)$$

$$E_2 = \left(0.002 \frac{\varepsilon}{V_a} \right) q_z; \text{МПа.} \quad (2.32)$$

Давление газов в процессе сгорания:

$$P_2 = \frac{E_2 \Delta X_{1-2} + P_1 \cdot (K_{1-2} \psi(\varphi'_1) - \psi(\varphi'_2))}{K_{1-2} \psi(\varphi'_1) - \psi(\varphi'_2)}, \quad (2.33)$$

$$\psi(\varphi') = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left[\left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left(\cos \varphi' + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi'} \right) \right]; \quad (2.34)$$

Доля топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке:

$$X_{1-2} = \exp \left[-6.908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6.908 \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right], \quad (2.35)$$

Среднее значение доли топлива сгоревшего на участке 1-2:

$$\Delta X_{1-2} = \frac{1}{2} \left[\exp \left[-6.908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6.908 \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] \right] \quad (2.36)$$

Отношение средних теплоёмкостей рабочего тела на участке 1-2:

$$k_{1-2} = 1.259 + \left[76.7 - \left(13.6 - \frac{14.2}{\alpha} \right) x_{1-2} \right] \frac{1}{T_{1-2}} - \left(0.0665 - \frac{0.0245}{\alpha} \right) x_{1-2}. \quad (2.37)$$

Фактор теплоёмкостей K_{1-2} :

$$K_{1-2} = \frac{k_{1-2} + 1}{k_{1-2} - 1}. \quad (2.38)$$

Средняя температура T_{1-2} на участке 1-2.

$$T_{1-2} = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (2.39)$$

Температура T_2 газов в процессе сгорания:

$$T_2 = \frac{T_y P_2 \Psi(\varphi'_2)}{P_y \Psi(\varphi'_2) \mu_{1-2}}. \quad (2.40)$$

$$\Psi(\varphi') = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} * \sigma. \quad (2.41)$$

$$\sigma = \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) - \left[\cos(\varphi') + \frac{1}{\lambda} * \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot (\sin(\varphi'))^2}\right]. \quad (2.42)$$

Средний на рассматриваемом участке коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси:

$$\mu_{1-2} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}, \quad (2.43)$$

$$\text{где } \mu_1 = 1 + \frac{(\mu_{0\max} - 1) \left[1 - \exp\left[-6.908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_z}\right]^{m+1}\right]\right]}{1 + \gamma_r}.$$

Коэффициенты термодинамического расчета приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Коэффициенты термодинамического расчета

Частота вращения n , мин ⁻¹	Ψ	ζ	q_z , Дж/кг	E_2 , МПа	Продолжительность процесса сгорания, град, ПКВ.
5000	0,93	0,93	1,9959	33,2445	54
4000	0,94	0,94	2,0648	35,1109	50
3000	0,925	0,925	2,1311	36,8122	42
2000	0,89	0,89	2,3345	40,8681	36
1000	0,83	0,83	2,2541	39,7180	32

Процесс расширения

Степень последующего расширения при V_z :

$$\delta = V_a / V_z \quad . \quad (2.44)$$

Средний показатель политропы расширения:

$$n_2 = 1 + \frac{8.314}{23.7 + 0.0046 \left(\frac{1}{\delta^{n_1-1}} + 1 \right) \cdot T_z} \quad . \quad (2.45)$$

Параметры в конце процесса расширения как политропного процесса:

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} = \text{МПа} \quad . \quad (2.46)$$

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} \text{ К} \quad . \quad (2.47)$$

Текущие значения удельного объёма, давления и температуры газов:

$$V_{PT} = \frac{V_a}{\varepsilon} \left[1 + \frac{\varepsilon - 1}{1} \cdot \left(\left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left[\cos(\varphi_{PT}) + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2(\varphi_{PT})} \right] \right) \right] \quad , \quad (2.48)$$

где φ_{PT} – текущее значение поворота коленчатого вала.

$$P_{PT} = P_b \cdot \left(\frac{V_a}{V_T} \right)^{n_2} \quad . \quad (2.49)$$

$$T_{PT} = T_b \left(\frac{V_a}{V_T} \right)^{n_2-1} \quad . \quad (2.50)$$

Уточненная температура отработавших газов:

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{P_b / P_r}} \quad . \quad (2.51)$$

Погрешность расчёта Δ %:

$$\Delta = \frac{100(T_r - T'_r)}{T_r} . \quad (2.52)$$

Расчетные значения процесса впуска и расширения приведены в таблице

7.

Таблица 7 - Расчет процесса расширения и впуска

Частота вращения n , мин ⁻¹	5000	4000	3000	2000	1000
V_Z , м ³	0,194	0,194	0,170	0,135	0,146
T_Z , К	2568	2591	2723	2906	2846
P_Z , МПа	3,581	3,615	4,396	5,330	5,524
δ	5,097	4,996	5,627	6,996	6,441
n_2	1,189	1,188	1,184	1,180	1,181
P_b , МПа	0,5166	0,5349	0,5682	0,5366	0,6117
T_b , К	1888	1915	1980	2046	2029
T_r , К	1160	1144	1143	1192	1125
Δ , %	-0,06	0,50	4,30	-2,37	0,43

Индикаторные параметры рабочего цикла

Теоретическое среднее индикаторное давление:

$$P'_i = \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \cdot \left[\frac{\lambda}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) \right] \quad (2.53)$$

Среднее индикаторное давление:

$$P_i = \phi_i \cdot P'_i , \quad (2.54)$$

где $\phi_i = 0,96$ – коэффициент полноты диаграммы

Индикаторный коэффициент полезного действия:

$$\eta_i = \frac{l_0 \cdot P_i \cdot \alpha}{P_0 \cdot \eta_v \cdot H_u} . \quad (2.55)$$

Удельный индикаторный расход топлива :

$$g_i = \frac{3600}{\eta_i \cdot H_u} \cdot 10^3, \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}. \quad (2.56)$$

В таблице 8 представлены индикаторные показатели рабочего цикла

Таблица 8 - Индикаторные показатели рабочего цикла

Частота вращения, мин-1	LiT	P_i, Mna	η_i	$g_i, \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$
5000	0,895524022	1,031408718	0,357117543	229,4748295
4000	0,926139589	1,088302076	0,372399083	220,0582415
3000	0,973576304	1,159179172	0,381495494	214,8111537
2000	0,906061244	1,092575632	0,31984134	256,2191841
1000	1,06242403	1,286637981	0,363757829	225,2858377

На основе полученных данных получаем индикаторную диаграмму, изображенную в приложении В, в P - V координатах, а так же в P - φ координатах.

Эффективные показатели двигателя

Среднее давление механических потерь :

$$P_M = 0.034 + 0.0113v \text{ МПа}, \quad (2.57)$$

где $v_n = \frac{Sn}{30}$, м/с - средняя скорость поршня при $S/D = 70/76 = 0.921$.

Среднее эффективное давление:

$$P_e = P_{iT} - P_M, \text{ МПа}. \quad (2.58)$$

Механический КПД:

$$\eta_M = \frac{P_e}{P_{iT}}. \quad (2.59)$$

Эффективный КПД:

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_M . \quad (2.60)$$

Удельный эффективный расход топлива :

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_M}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} . \quad (2.61)$$

Эффективная мощность:

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_{\text{л}} \cdot n}{30\tau}, \text{ кВт} . \quad (2.62)$$

Часовой расход топлива:

$$G_T = N_e \cdot g_e, \text{ кг/ч} . \quad (2.63)$$

Крутящий момент :

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot N_e}{\pi \cdot n}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.64)$$

В таблице 9 представлены эффективные показатели двигателя.

Таблица 9 - Эффективные показатели двигателя

Частота вращения n , мин^{-1}	5000	4000	3000	2000	1000
Средняя скорость поршня v_n , м/с	11,7	9,3	7,0	4,7	2,3
Среднее давление механических потерь p_M , Мпа	0,1658	0,1395	0,1131	0,0867	0,0604
Среднее эффективное давление p_e , Мпа	0,9619	0,9437	0,9394	1,0058	1,2263
Механический КПД η_M	0,8530	0,8712	0,8925	0,9206	0,9531
Эффективный КПД η_E	0,3331	0,3229	0,3092	0,2945	0,3467
Удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт.ч)	273,43	240,62	229,69	240,62	273,43
Эффективная мощность N_e , кВт	45,81	42,51	34,08	22,72	10,62
Крутящий момент M_e , Н.м	87,49	101,49	108,49	108,49	108,49
Часовой расход топлива G_m , кг/ч	6,26	12,52	10,23	7,82	5,4

3 Тепловой баланс двигателя

Общее количество теплоты, введенной в двигатель с топливом:

$$Q_o = \frac{H_u G_T}{3.6} = \frac{43930 G_T}{3.6} = 12203 G_T \quad . \quad (3.1)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 с:

$$Q_e = 1000 N_e \text{ и } q_e = Q_e * 100 / Q_o \quad . \quad (3.2)$$

Теплота, передаваемая охлаждающей среде:

$$Q_B = \frac{c i D^{1+2m} n^m (H_u - \Delta H_u)}{\alpha H_u} \quad , \quad (3.3)$$

$$q_B = Q_B * 100 / Q_o \quad , \quad (3.4)$$

где $c = 0,45 \dots 0,53$ – коэффициент пропорциональности;

i – число цилиндров;

D – диаметр цилиндра, см;

n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹;

$m = 0,6 \dots 0,7$ – показатель степени для двухтактных двигателей.

Теплота, унесенная с отработанными газами:

$$Q_r = \left(\frac{G_T}{3.6} \right) \left\{ M_2 \left[(mc_V'')_{t_o}^{t_r} + 8.315 \right]_{t_r} - M_1 \left[(mc_V'')_{t_o}^{20} + 8.315 \right]_{t_o} \right\} \quad , \quad (3.5)$$

$$q_r = Q_r * 100 / Q_o \quad (3.6)$$

где $(mc_V'')_{t_o}^{20} = 20.775$ кДж/(кмоль * град) – теплоемкость свежего заряда при 20°C.

$(mc_V'')_{t_o}^{t_r}$ - теплоемкость остаточных газов, при соответствующих α и

t_r . Теплота, потерянная из-за химической неполноты сгорания топлива

$$Q_{н.с} = \Delta H_U * G_T / 3,6 \quad (3.7)$$

$$q_{н.с.} = Q_{н.с.} * 100 / Q_0 \quad (3.8)$$

Неучтенные потери теплоты:

$$Q_{ост} = Q_0 - (Q_e + Q_b + Q_r + Q_{н.с}) , \quad (3.9)$$

$$q_{ост} = Q_{ост} * 100 / Q_0 . \quad (3.10)$$

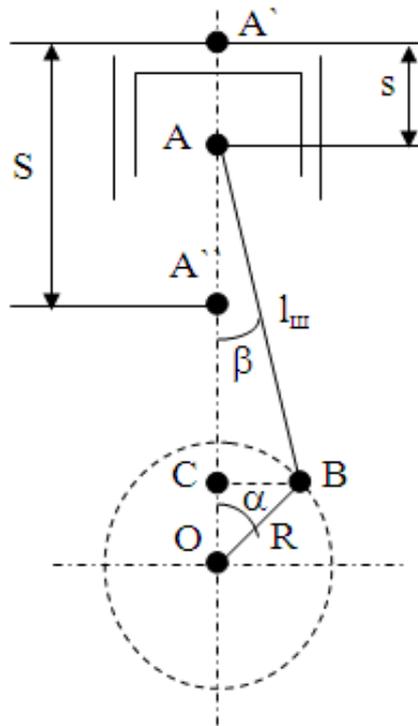
В таблице 10 представлены расчетные значения теплового баланса.

Таблица 10 - Тепловой баланс

Частота вращения, мин ⁻¹	Q_0 , Дж/с	Q_e , Дж/с	q_e , %	Q_b , Дж/с	q_b , %	Q_r , Дж/с	q_r , %	$Q_{н.с.}$, Дж/с	$q_{н.с.}$, %	$Q_{ост}$, Дж/с	$q_{ост}$, %
5000	152858,08	45810,89	30,0	23018,97	15,1	57162,1	37,4	0	0	26866,10	17,6
4000	123737,02	40173,97	32,5	20404,73	16,5	44881,4	36,3	0	0	18276,86	14,8
3000	96489,76	33218,47	34,4	17807,71	18,5	35428,6	36,7	0	0	10034,95	10,4
2000	72317,88	21293,83	29,4	15734,27	21,8	23122,0	32,0	0	0	12167,74	16,8
1000	37440,60	12980,17	34,7	10444,94	27,9	11153,2	29,8	0	0	2862,25	7,6

4 Кинематический расчет

Задача кинематического расчета - нахождение перемещений, скоростей и ускорений в зависимости от угла поворота коленчатого вала. На основе кинематического расчета проводятся динамический расчет. Ниже на рисунке приведена схема кривошипно-шатунного механизма.



S – ход поршня; s – путь поршня; R – радиус кривошипа; α - угол поворота коленчатого вала; β - угол отклонения оси шатуна от оси цилиндра; $l_{ш}$ – длина шатуна.

Рисунок 2 – Схема кривошипно-шатунного механизма.

Исходные данные:

$\lambda = \frac{R}{l_{ш}} = 0,28$ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 5000}{30} = 523.33 \frac{\text{рад}}{\text{с}} - \text{угловая скорость вращения коленчатого}$$

вала.

R – радиус кривошипа ($\frac{S}{2} = 35$ мм);

S – ход поршня (70 мм);

Перемещение поршня, при $0 \leq \alpha \leq 360^\circ$ шаг 10° .

$$S_x = R \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right] \text{ мм.} \quad (4.1)$$

Скорость поршня:

$$v_{\text{п}} = \omega \cdot R \cdot \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \text{ м/с.} \quad (4.2)$$

Ускорение поршня:

$$j = \omega^2 R (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) \text{ м/с}^2. \quad (4.3)$$

Полученные значения перемещения, скорости, ускорения находятся в приложении Б.

5 Динамический расчет

Приведение масс частей КШМ:

Конструктивная масса поршневой группы:

$$m_{nzo} = (1,3...1,4) \cdot D = 1,35 \cdot 76 = 102,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}; \quad (5.1)$$

Масса поршневой группы

$$m_{nz} = m_{nzo} \cdot F_n = 102,6 \cdot 0,0045 = 0,4617 \text{ кг} \quad (5.2)$$

Приведение масс деталей шатунной группы:

Конструктивная масса шатуна:

$$m_{uo} = (1,9...2,2) \cdot D = 2,0 \cdot 76 = 152 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \quad (5.3)$$

Масса шатуна:

$$m_{ui} = m_{uo} \cdot F_n = 152 \cdot 0,0045 = 0,684 \text{ кг} \quad (5.4)$$

Длина шатуна:

$$l_{ui} = \frac{R}{\lambda} = \frac{0,035}{0,28} = 0,125 \text{ м}, \quad (5.5)$$

где $l_{ui} = 125 \text{ мм}$.

Длина от оси нижней головки шатуна до центра тяжести из соотношения:

$$\frac{l_{шк}}{l_{ui}} = 0,26...0,28 = 0,27, \quad (5.6)$$

где $l_{шк} = 0,27 \cdot 0,125 = 0,0338 \text{ м}$, принимаем $l_{шк} = 34 \text{ мм}$.

Длина от оси верхней головки шатуна до центра тяжести:

$$l_{ш} = l_{шк} + l_{шн} \Rightarrow l_{шн} = l_{ш} - l_{шк} = 0,125 - 0,034 = 0,091 \text{ м.} \quad (5.7)$$

Массу шатуна заменяем на две эквивалентные массы, которые сосредоточены на концах шатуна.

Масса шатуна:

$$m_{ш} = m_{шн} + m_{шк}. \quad (5.8)$$

Из системы соотношения найдем эквивалентные массы:

$$\left. \begin{array}{l} m_{шн} \cdot l_{шн} = m_{шк} \cdot l_{шк} \\ m_{ш} = m_{шн} + m_{шк} \end{array} \right| \Rightarrow \begin{array}{l} m_{шн} = 0,12 \text{ кг} \\ m_{шк} = 0,336 \text{ кг} \end{array}. \quad (5.9)$$

Приведение масс кривошипа:

Масса кривошипа:

$$m_{к} = m_{шш} + 2 \cdot m_{шц} \frac{\rho}{R}. \quad (5.10)$$

Масса шатунной шейки:

$$m_{шш} = \frac{\pi \cdot d_{шш}^2 \cdot l_{шш} \cdot \rho_{к}}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,0494^2 \cdot 0,0247 \cdot 7800}{4} = 0,369 \text{ кг}, \quad (5.11)$$

где $\rho_{к} = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность материала коленчатого вала;

Диаметр шатунной шейки:

$$d_{шш} = (0,55 \dots 0,70) \cdot D = 0,65 \cdot 0,076 = 0,0494 \text{ м.} \quad (5.12)$$

Длина шатунной шейки:

$$l_{шш} = (0,45 \dots 0,70) \cdot d_{шш} = 0,5 \cdot 0,0494 = 0,0247 \text{ м} \quad (5.13)$$

Масса щеки:

$$m_{щ} = h \cdot b^2 \cdot \rho_k = 0,0175 \cdot 0,092^2 \cdot 7800 = 1.15 \text{ кг}, \quad (5.14)$$

$$h = (0,20 \dots 0,25) \cdot D = 0,23 \cdot 0,076 = 0,0175 \text{ м} - \text{толщина щеки}; \quad (5.15)$$

$$b = (1,0 \dots 1,25) \cdot D = 1,22 \cdot 0,076 = 0,092 \text{ м} - \text{высота и ширина щеки}. \quad (5.16)$$

Расстояние от оси кривошипа до центра масс:

$$\rho = \frac{b}{2} = \frac{0,092}{2} = 0,046 \text{ м} \quad (5.17)$$

$$m_k = m_{щщ} + 2 \cdot m_{щ} \frac{\rho}{R} = 0,369 + 2 \cdot 1,15 \cdot \frac{0,046}{0,035} = 3,39 \text{ кг}. \quad (5.18)$$

Поступательно и вращательно движущиеся массы:

Поступательно движущиеся массы:

$$m_j = m_{nz} + m_{щщ} = 0,3078 + 0,12 = 0,4278 \text{ кг}. \quad (5.19)$$

Вращательно движущиеся массы:

$$m_r = m_k + m_{щк} = 3,39 + 0,336 = 3,726 \text{ кг}. \quad (5.20)$$

Силы и моменты, действующие в КШМ:

Силы инерции:

1. Сила инерции поступательно движущихся масс:

$$P_j = -m_j \cdot R \cdot \omega^2 \cdot (\cos \alpha + \lambda \cdot \cos 2\alpha), \quad (5.21)$$

где $P_{j1} = -m_j \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha$ – сила инерции первого порядка;

2. Сила инерции вращающихся масс:

$$K_r = m_r \cdot R \cdot \omega^2 = 3,726 \cdot 0,035 \cdot 523,33^2 = 35716 \text{ Н} = 35,716 \text{ кН}. \quad (5.22)$$

Силы давления газов:

Сила давления газов на поршень действует по оси цилиндра:

$$P_z = (p_z - p_0) \cdot F_n, \quad (5.23)$$

где p_z – давление газов в цилиндре двигателя.

$$F_n = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 0,076^2}{4} = 0,0045 \text{ м}^2, \quad (5.24)$$

где P_0 – давление в картере;

F_n – площадь поршня.

Суммарная сила:

$$P = P_z + P_j \quad (5.25)$$

Сила, действующая вдоль шатуна:

$$S = \frac{P}{\cos \beta}, \quad (5.26)$$

где $\beta = \arcsin(\lambda \cdot \sin \alpha)$ – угол наклона шатуна относительно оси цилиндра.

Сила перпендикулярная оси цилиндра:

$$N = P \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (5.27)$$

Сила, действующая вдоль кривошипа:

$$K = S \cdot \cos(\alpha + \beta). \quad (5.28)$$

Сила, создающая крутящий момент:

$$T = S \cdot \sin(\alpha + \beta). \quad (5.29)$$

Крутящий момент одного цилиндра:

$$M_{кр} = T \cdot R. \quad (5.30)$$

Полученные значения сил и моментов, действующих в КШМ через каждые 10° поворота кривошипа, находятся в приложении В.

6 Расчет на прочность основных деталей КШМ

Самым напряженным элементом конструкции двигателя, является элемент поршневой группы – поршень. Именно на него приходятся самые высокие нагрузки:

- давление сил газа;
- силы инерции;
- тепловые нагрузки.

Основные функции поршня заключаются в создании плотной среды во внутрицилиндровом пространстве передаче сил газов с минимальными потерями КШМ.

6.1 Расчет поршня

Напряжение изгиба в днище поршня

$$\sigma_{\text{из}} = p_{zД} \frac{r_i^2}{\delta} = 3,6 \cdot \frac{28,46^2}{5,32} = 103 \text{ МПа}, \quad (6.1)$$

где $r_i = (D/2 - (s+t+\Delta t)) = 76/2 - (5.7+3.04+0,8) = 28.46 \text{ мм}$.

Напряжение сжатия в сечении наименьшей площади:

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{P_{z\text{max}}}{F_{x-x}} = \frac{0,0165}{0,00084} = 18,4 \quad (6.2)$$

где $P_{z\text{max}} = P_z F_{\Pi} = 3,67 \cdot 0,0045 = 0,0165, \text{ МН}$;

$$F_{x-x} = \frac{\pi}{4} (d_k^2 - d_i^2) - n'_M F' = (3,14/4)(4667-3518) - 5,4 \cdot 10 = 839 \text{ мм}^2;$$

$$F' = \frac{d_k - d_i}{2} d_M = \frac{68,32 - 59,32}{2} \cdot 1,2 = 5,4 \text{ мм};$$

$$d_k = D - 2 t + \Delta t = 76 - 2 \cdot 3,04 + 0,8 = 68,32 \text{ мм.}$$

Максимальная угловая скорость х.х двигателя внутреннего сгорания:

$$\omega_{x.xmax} = \frac{\pi n_{x.xmax}}{30} = \frac{3,14 \cdot 5600}{30} = 586 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (6.3)$$

Сила инерции возвратно-поступательно движущихся масс:

$$P_j = m_{x-x} R \omega_{x.xmax}^2 (1 + \lambda) = 0,23 \cdot 0,035 \cdot 586^2 \cdot (1 + 0,28) = 0,0035 \text{ МН; } (6.4)$$

Напряжение разрыва поршня:

$$\sigma_p = \frac{P_j}{F_{x-x}} = \frac{0,0035}{0,00084} = 4,2 \text{ МПа} \quad 6.5$$

Напряжение кольцевой перемычки в верхней части:

Напряжение среза:

$$\tau = \frac{0,0314 p_{zD} D}{h_{\pi}} = \frac{0,0314 \cdot 3,6 \cdot 76}{3,04} = 2,826 \text{ МПа} \quad (6.6)$$

Напряжение изгиба:

$$\sigma_{из} = 0,0045 p_{zD} \left(\frac{D}{h_p}\right)^2 = 0,0045 \cdot 3,6 \cdot \left(\frac{76}{3,04}\right)^2 = 10,125 \text{ МПа} \quad (6.7)$$

Расчет сложного напряжения для определения допуска по нагрузкам:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{из}^2 + 4\tau^2} = 11,59 \text{ МПа} \quad (6.8)$$

Максимальное удельное давление юбки поршня на стенку цилиндра:

Для последних разработок в сфере двигателестроения $q_1=0,5$, $q_2=0,6$.

Проверка правильности установления диаметра головки и юбки поршня:

$$D_{\Gamma} = D - \Delta_{\Gamma} = 76 - 0,304 = 75,696 \text{ мм} \quad (6.9)$$

$$D_{\text{ю}} = D - \Delta_{\text{ю}} = 76 - 0,076 = 75,924 \text{ мм,} \quad (6.10)$$

где $\Delta_r = 0,004D = 0,004 \cdot 76 = 0,304$ мм;

$\Delta_{ю} = 0,001D = 0,001 \cdot 76 = 0,076$ мм.

6.2 Расчет поршневых колец

Среднее давление кольца на стенку цилиндра

$$p_{cp} = 0,152E \frac{\frac{A_0}{t}}{\frac{D}{t} - 1} \frac{3}{\frac{D}{t}} = 0,152 \cdot 1 \cdot 10^5 \frac{3}{\frac{76}{3} - 1} \frac{3}{\frac{76}{3}} = 0,125 \quad (6.11)$$

В таблице 11 приведены зачётные значения поршневого кольца на цилиндр.

Таблица 11 – Результаты давления поршневого кольца на цилиндр

Угол определяющий положение текущего давления	0	30	60	90	120	150	180
Мк. Переменный коэффициент	1,06	1,04	1,02	1,01	1,03	1,28	1,45
P, Мпа (давление в точке)	0,1325	0,13	0,1275	0,1263	0,1288	0,16	0,1813

Напряжение изгиба кольца в состоянии работы:

$$\sigma_{изг1} = 2,61 p_{cp} \left(\frac{D}{t} - 1\right)^2 = 2,61 \cdot 0,125 \cdot \frac{76}{3} - 1^2 = 193 \text{ МПа} \quad (6.12)$$

Напряжение изгиба при надевании кольца на поршень:

$$\sigma_{из2} = \frac{4E(1 - \frac{0,114A_0}{t})}{m \frac{D}{t} - 1,4 \frac{D}{t}} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 10^5 (1 - 0,1143 \cdot 3)}{1,57 \frac{76}{3} - 1,4 \frac{76}{3}} = 276 \text{ МПа} \quad (6.13)$$

Монтажный зазор в замке поршневого кольца:

$$\Delta_K = \Delta'_K + \pi D (\alpha_K T_K - T_0 - \alpha_{ц} T_{ц} - T_0) = 0,07 + 3,14 \cdot 76 (11 \cdot 10^{-6} \cdot 685 - 293 - 11 \cdot 10^{-6} \cdot 460 - 293) = 0,66 \text{ мм} \quad (6.14)$$

где $\Delta'_K = 0,07$ мм;

$$T_K = 685 \text{ К};$$

$$T_{ц} = 460 \text{ К}$$

6.3 Расчет поршневого пальца

Расчетная сила, действующая на поршневой палец:

-газовая сила

$$P_{zmax} = p_{zmax} F_{п} = 3,6 \cdot 0,0045 = 0,0162 \text{ МН} \quad (6.16)$$

-инерционная сила

$$P_j = -m_{п} \omega_M^2 R (1 + \lambda) \cdot 10^6 = -0,46 \cdot 586^2 \cdot 0,035 \cdot (1 + 0,28) \cdot 10^{-6} = -0,0036 \quad (6.17)$$

расчетная сила

$$P = P_{zmax} + kP_j = 0,0162 - 0,76 \cdot 0,0036 = 0,0135 \text{ МН} \quad (6.18)$$

Давление на единицу площади втулки поршневой головки:

$$q_{ш} = \frac{P}{d_{п} l_{ш}} = \frac{0,0135}{0,019 \cdot 0,03} = 23,68 \text{ МПа} \quad (6.19)$$

Удельное давление пальца на бобышки:

$$q_{\delta} = \frac{P}{d_{\Pi}(l_{\Pi} - b)} = \frac{0,0135}{0,019 \cdot (0,063 - 0,030)} = 21,53 \text{ МПа} \quad 6.20$$

Допустимое удельное давление $q_{\delta} = 17 \dots 35$ МПа.

Напряжение при изгибе:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{из}} &= \frac{P (l_{\Pi} + 2b - 1,5l_{\text{ш}})}{1,2 (1 - \alpha^4) d_{\Pi}^3} = \frac{0,0135((0,063 + 2 \cdot 0,030 - 1,5 \cdot 0,03))}{1,2 (1 - 0,7^4) 0,019^3} = \\ &= 168,36 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (6.21)$$

Напряжения овализации на внешней поверхности пальца (горизонтальная плоскость):

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha 0^{\circ}} &= \frac{15P}{d_{\Pi} l_{\Pi}} 0,19 \frac{2+\alpha}{1-\alpha^2} \frac{1+\alpha}{1-\alpha} - \frac{1}{1-\alpha} (0,1 - \alpha - 0,4)^3 = \\ &= \frac{15 \cdot 0,0135}{0,019 \cdot 0,063} 0,19 \frac{2+0,7}{1-0,7^2} \frac{1+0,7}{1-0,7} - \frac{1}{1-0,7} (0,1 - 0,7 - 0,4)^3 = \\ &= 78 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (6.22)$$

Напряжения овализации на внешней поверхности пальца (вертикальная плоскость):

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha 90^{\circ}} &= -\frac{15P}{d_{\Pi} l_{\Pi}} 0,174 \frac{2+\alpha}{1-\alpha^2} \frac{1+\alpha}{1-\alpha} - \frac{1}{1-\alpha} (0,1 - \alpha - 0,4)^3 = \\ &= -\frac{15 \cdot 0,0135}{0,019 \cdot 0,063} 0,174 \frac{2+0,7}{1-0,7^2} \frac{1+0,7}{1-0,7} - \frac{1}{1-0,7} (0,1 - 0,7 - 0,4)^3 = \\ &= -68,425 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (6.23)$$

Напряжения овализации во внутренней поверхности пальца (горизонтальная плоскость):

$$\sigma_{i0^{\circ}} = -\frac{15P}{d_{\Pi} l_{\Pi}} 0,19 \frac{1+2\alpha}{1-\alpha^2} \frac{1+\alpha}{1-\alpha} - \frac{1}{1-\alpha} (0,1 - \alpha - 0,4)^3 =$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{15 \cdot 0,00762}{0,006 \cdot 0,017} \cdot 0,19 \frac{2 + 0,7}{1 - 0,7} \frac{1 + 0,7}{2} - \frac{1}{1 - 0,7} \cdot 0,1 - 0,7 - 0,4^3 = \\
&= -65,2 \text{ МПа} \tag{6.24}
\end{aligned}$$

Напряжения оваллизации во внутренней поверхности пальца (вертикальная плоскость):

$$\begin{aligned}
\sigma_{i90^\circ} &= \frac{15P}{d_{\text{п}} l_{\text{п}}} \cdot 0,174 \frac{1 + 2\alpha}{1 - \alpha} \frac{1 + \alpha}{2\alpha} - \frac{1}{1 - \alpha} \cdot 0,1 - \alpha - 0,4^3 = \\
&= \frac{15 \cdot 0,00762}{0,006 \cdot 0,017} \cdot 0,174 \frac{1 + 2 \cdot 0,7}{1 - 0,7} \frac{1 + 0,7}{2 \cdot 0,7} - \frac{1}{1 - 0,7} \cdot 0,1 - 0,7 - 0,4^3 = \\
&= 27,02 \text{ МПа} \tag{6.25}
\end{aligned}$$

6.4 Расчет шатуна

Напряжение цикла, в плоскости качания шатуна:

$$\sigma_{\max x} = K_x \frac{P_{zM}}{F_{cp}}, \tag{6.26}$$

где $F_{cp} = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{0,02 \cdot 0,01}{2} = 0,0001 \text{ м}^2$ – площадь среднего сечения стержня шатуна;

$b = 0,015 \text{ м}$ – ширина стержня шатуна при поперечном сечении;

$h = 0,01 \text{ м}$ – высота стержня шатуна при поперечном сечении;

$K_x = 1,1$ – коэффициент, эквивалентный работе шатуна на сжатие.

$$\sigma_{\max} = K_x \frac{P_{zM}}{F_{cp}} = 1,1 \cdot \frac{13500}{0,0001} = 135 \cdot 10^6 \text{ Па} .$$

Наименьшее напряжение цикла:

$$\sigma_{\min} = K_x \frac{P_j}{F_{cp}} = 1,1 \frac{5242,30}{0,0001} = 57,7 \cdot 10^6 \text{ Па}, \quad (6.27)$$

где $P_j = m_j \cdot R \cdot \omega^2 \cdot (1 + \lambda) = 0,4278 \cdot 0,035 \cdot 523,33^2 \cdot (1 + 0,28) = 5242,30 \text{ Н}$.

Среднее напряжение:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{135 \cdot 10^6 + 57,7 \cdot 10^6}{2} = 96,35 \cdot 10^6 \text{ Па}. \quad (6.28)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{135 \cdot 10^6 - 57,7 \cdot 10^6}{2} = 38,65 \cdot 10^6 \text{ Па}. \quad (6.29)$$

Запас прочности при асимметричном цикле:

$$k = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\sigma_a}{\varepsilon} + \varphi_\sigma \cdot \sigma_{cp}} = \frac{182 \cdot 10^6}{\frac{38,65 \cdot 10^6}{0,93} + 0,25 \cdot 96,35 \cdot 10^6} = 2,77, \quad (6.30)$$

где $\varepsilon = 0,93$ – масштабный коэффициент;

Коэффициент:

$$\varphi_\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{-1p} - \sigma_0}{\sigma_0} = \frac{2 \cdot 182 \cdot 10^6 - 291 \cdot 10^6}{291 \cdot 10^6} = 0,25, \quad (6.31)$$

где $\sigma_{-1p} = 182 \cdot 10^6 \text{ Па}$ – предел усталости от растяжения-сжатия при симметричном цикле;

$\sigma_0 = 1,6 \cdot \sigma_{-1p} = 1,6 \cdot 182 \cdot 10^6 = 291 \cdot 10^6 \text{ Па}$ – предел усталости при пульсирующем цикле.

Проверим запас прочности также по пределу текучести:

$$k = \frac{\sigma_m}{\sigma_a + \sigma_{cp}} = \frac{360 \cdot 10^6}{38,65 \cdot 10^6 + 96,35 \cdot 10^6} = 2,66. \quad (6.32)$$

Верхняя головка шатуна. При расчете шатуна можно ограничиться определением относительного уменьшения диаметра верхней головки по формуле:

$$\delta = \frac{0,017 \cdot P_{jn} \cdot d_{cp}^2}{E \cdot J} = \frac{0,017 \cdot -3776,57 \cdot 0,027^2}{2,2 \cdot 10^{11} \cdot 1,4 \cdot 10^{-9}} = 1,51 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,151 \text{ мм},$$

где $P_{jn} = -m_{nz} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot (1 + \lambda) = -0,3078 \cdot 0,035 \cdot 523,33^2 \cdot (1 + 0,28) = -3776,57 \text{ Н}$ – сила инерции от массы поршневой группы;

$E = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ – модуль упругости материала (сталь 40Г) шатуна;

$$d_{cp} = \frac{d_n + d_{en}}{2} = \frac{0,036 + 0,018}{2} = 0,027 \text{ м} – \text{средний диаметр};$$

$d_n = 0,036 \text{ м}$ – наружный диаметр поршневой головки,

$d_{en} = 0,018 \text{ м}$ – внутренний диаметр поршневой головки;

$J = 0,01 \cdot b \cdot (d_n - d_{en})^3 = 0,01 \cdot 0,024 \cdot (0,036 - 0,018)^3 = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$ – момент инерции сечения верхней головки.

Величина δ не должна превышать $5 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,5 \text{ мм}$.

6.5 Расчет коленчатого вала

$$W_{кр} = \frac{\pi \cdot d_{ку}^3}{16} = \frac{\pi \cdot 0,025^3}{16} = 3,07 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ л} – \text{момент сопротивления кручению}$$

шейки.

Максимальные и минимальные касательные напряжения подсчитываются по формулам:

$$\begin{cases} \tau_{\max} = \frac{M_{кр \max}}{W_{кр}} = \frac{101,49}{3,07 \cdot 10^{-6}} = 33,05 \cdot 10^6 \text{ Па}; \\ \tau_{\min} = \frac{M_{кр \min}}{W_{кр}} = \frac{75,73}{3,07 \cdot 10^{-6}} = 24,66 \cdot 10^6 \text{ Па}; \end{cases} \quad (6.33)$$

Определяем амплитудное и среднее значение в цикле:

$$\tau_{cp} = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} = \frac{33.05 \cdot 10^6 + (24.66 \cdot 10^6)}{2} = 28.85 \cdot 10^6 \text{ Па} . \quad (6.34)$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} = \frac{33.05 \cdot 10^6 - 24.66 \cdot 10^6}{2} = 4.195 \cdot 10^6 \text{ Па} . \quad (6.35)$$

Определяем запас прочности при асимметричном цикле нагружения:

$$k = \frac{\tau_{-1}}{2,5 \cdot \tau_a + \varphi_\tau \cdot \tau_{cp}} = \frac{220 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 4.195 \cdot 10^6 + 0,29 \cdot 28.85 \cdot 10^6} = 3.16 \quad (6.36)$$

Коэффициент:

$$\varphi_\tau = \frac{2 \cdot \tau_{-1} - \tau_0}{\tau_0} = \frac{2 \cdot 220 \cdot 10^6 - 341 \cdot 10^6}{341 \cdot 10^6} = 0,29 , \quad (6.37)$$

где $\tau_{-1} = 220 \cdot 10^6 \text{ Па}$ – предел выносливости материала (сталь) на кручение при симметричном цикле;

$\tau_0 = 1,55 \cdot \tau_{-1} = 1,55 \cdot 220 \cdot 10^6 = 341 \cdot 10^6 \text{ Па}$ – предел выносливости при пульсирующем цикле.

7 Расчет элементов систем питания

7.1 Расчет карбюратора

Исходные данные:

$$\rho_o = 1.189 \text{ кг/м}^3$$

$$\eta_V = 0.7911, \text{ при } n_N = 5000 \text{ мин}^{-1}$$

$$\rho_T = 740 \text{ кг/м}^3$$

$$\mu_{ж.г} = 0,798$$

7.2 Расчет диффузора

Разряжение в диффузоре при теоретической скорости воздуха $\omega_B = 140$ м/с:

$$\Delta P_D = \omega_B^2 \cdot \rho_o / 2 = 140^2 \cdot 1.189 / 2 = 11652 \text{ Па} = 11.65 \text{ кПа} . \quad (7.1)$$

Действительная скорость воздуха в диффузоре, при $\mu_D = 0.85$:

$$\omega_D = \mu_D \omega_B = 0.85 \cdot 140 = 119 \text{ м/с}. \quad (7.2)$$

Действительный секундный расход воздуха через диффузор:

$$G_B = \eta_V \frac{\pi \cdot D^2}{4} S \frac{ni}{120} \rho_o = 0.84 \frac{3.14 \cdot 0.076^2}{4} 0.07 \frac{5000 \cdot 2}{120} \cdot 1.189 = 0.053 \text{ кг/с}. \quad (7.3)$$

Диаметр диффузора:

$$d_D = D \sqrt{\frac{\eta_V S ni}{120 \mu_D \omega_B}} = 0.076 \sqrt{\frac{0.84 \cdot 0.07 \cdot 5000 \cdot 2}{120 \cdot 119}} = 0.0218 = 22 \text{ мм}. \quad (7.4)$$

7.3 Расчет главного жиклера

При истечении из главного жиклера, теоретическая скорость топлива равна:

$$\omega_{T.P} = \sqrt{2(\Delta p_{\text{Д}} / \rho_T - g\Delta h)} = \sqrt{2(11652 / 740 - 9.81 \cdot 0.004)} = 5.61 \text{ м/с.} \quad (7.5)$$

При истечении из главного жиклера, действительная скорость топлива равна:

$$\omega_{\text{ж.Г}} = \mu_{\text{ж.Г}} \omega_{T.K} = 0.798 \cdot 5.61 = 4.47 \text{ м/с.} \quad (7.6)$$

Принимаем расход топлива через главный жиклер $G_{T.G} = 0,003449$ кг/с , а через компенсационный – $G_{T.K} = G_T - G_{T.G} = 0.00369 - 0.003449 = 0.00025$ кг/с

7.4 Расчет компенсационного жиклера

Теоретическая скорость топлива при истечении из компенсационного жиклера, где уровень топлива в поплавковой камере $H=50$ мм :

$$\omega_{T.K} = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 0.05} = 0.9905 \text{ м/с.} \quad (7.7)$$

Разрежение жиклера:

$$\Delta P = \omega_{T.K}^2 \cdot \rho_T / 2 = 0.9905^2 \cdot 740 / 2 = 726 \text{ Па} = 0,7 \text{ кПа.} \quad (7.8)$$

При $\Delta p=0.7$ кПа выбираем компенсационный жиклер с отношением $l_{\text{жс}}/d_{\text{жс}}=5$, тогда $\mu_{\text{жс.к}}=0,65$

Диаметр компенсационного жиклера:

$$d_{\text{ж.Г}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{T.K}}{\pi \cdot \mu_{\text{ж.к}} \cdot \omega_{T.K} \rho_T}} = \frac{4 \cdot 0.00025}{3.14 \cdot 0.65 \cdot 0.9905 \cdot 740} = 0.0008175 = 0.82 \text{ мм.} \quad (7.9)$$

7.5 Расчет характеристики карбюратора

При $n_{min}=1000$ мин⁻¹

$$\Delta P_{\text{д}} = \left[\frac{\eta_{\text{в}}}{\mu_{\text{д}}} \left(\frac{D}{d_{\text{д}}} \right)^2 S \frac{ni}{120} \right]^2 \frac{\rho_0}{2} = \left[\frac{0.88}{0.75} \left(\frac{0.076}{0.021} \right)^2 0.07 \frac{1000 \cdot 2}{120} \right]^2 \frac{1.189}{2} = 687.52 \text{ Па.} \quad (7.10)$$

При $n_{min}=5000$ мин⁻¹

$$\Delta P_{\text{д}} = \left[\frac{\eta_{\text{в}}}{\mu_{\text{д}}} \left(\frac{D}{d_{\text{д}}} \right)^2 S \frac{ni}{120} \right]^2 \frac{\rho_0}{2} = \left[\frac{0.844}{0.841} \left(\frac{0.076}{0.0218} \right)^2 0.07 \frac{5000 \cdot 2}{120} \right]^2 \frac{1.189}{2} = 11818 \text{ Па.} \quad (7.11)$$

Секундный расход воздуха в зависимости от разрежения:

$$G_{\text{в}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{д}}^2}{4} \cdot \mu_{\text{д}} \sqrt{2 \rho_0 \Delta p_{\text{д}}} = \frac{3.14 \cdot 0.0218^2}{4} \mu_{\text{д}} \sqrt{2 \cdot 1.189 \cdot \Delta p_{\text{д}}} = 0.0002709 \mu_{\text{д}} \sqrt{\Delta p_{\text{д}}}. \quad (7.12)$$

Таблица 13 – Расчетные характеристики карбюратора

$\Delta p_{\text{д}}$	$\mu_{\text{д}}$	$G_{\text{в}}$	$\mu_{\text{жг}}$	$\omega_{\text{тг}}$	$G_{\text{тг}}$	$G_{\text{т}}$	$G_{\text{тг}} l_0$	$G_{\text{тк}} l_0$	$G_{\text{т}} l_0$
688	0,730	0,011	0,640	1,363	0,001	0,001	0,010	0,004	0,014
1000	0,770	0,014	0,680	1,644	0,001	0,001	0,013	0,004	0,017
2000	0,815	0,021	0,735	2,325	0,001	0,002	0,020	0,004	0,023
4000	0,840	0,031	0,770	3,288	0,002	0,002	0,029	0,004	0,033
6000	0,845	0,038	0,780	4,027	0,002	0,003	0,036	0,004	0,040
8000	0,845	0,044	0,792	4,650	0,003	0,003	0,042	0,004	0,046
10000	0,845	0,049	0,795	5,199	0,003	0,003	0,048	0,004	0,051
10800	0,845	0,051	0,796	5,403	0,003	0,004	0,050	0,004	0,053
11818	0,844	0,053	0,797	5,652	0,003	0,004	0,052	0,004	0,056

8 Расчет элементов смазочной системы

8.1 Масляный насос

Количество теплоты отводимой от двигателя маслом, при $Q_0 = 152.8 \text{ кДж/с}$:

$$Q_M = 0.021 \cdot Q_0 = 0.021 \cdot 152.8 = 3.20 \text{ кДж/с.} \quad (8.1)$$

Расход масла циркуляционный без учета стабилизации давления масла:

$$V_{\text{ц}} = Q_M / (\rho_M c_M \Delta T_M) = 3.20 / (900 \cdot 2.094 \cdot 13) = 0.00013 \text{ м}^3 / \text{с.} \quad (8.2)$$

Циркуляционный расчет с учетом стабилизации давления масла%

$$V' = 2V_{\text{ц}} = 2 \cdot 0.00013 = 0.00026 \text{ м}^3 / \text{с.} \quad (8.3)$$

Производительность насоса:

$$V_P = V' / \eta_H = 0.00026 / 0.6 = 0.00044 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (8.4)$$

Диаметр начальной окружности шестерни:

$$D_0 = zm = 7 \cdot 4.5 = 31.5 \text{ мм} = 0.0315 \text{ м.} \quad (8.5)$$

Диаметр внешней окружности шестерни:

$$D = m(z + 2) = 4.5(7 + 2) = 40.5 \text{ мм} = 0.0405 \text{ м} \quad (8.6)$$

Частота вращения шестерни, насоса:

$$n_H = u_H \cdot 60 / (\pi D) = 5.1 \cdot 60 / (3.14 \cdot 0.0405) = 3000 \text{ мин}^{-1}, \quad (8.7)$$

где окружная скорость на внешнем диаметре $u_H = 5.1 \text{ м/с}$

Длина зуба шестерни:

$$b = \frac{60 \cdot V_p}{2\pi m^2 z n_H} = \frac{60 \cdot 0.00044}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.004^2 \cdot 7 \cdot 3000} = 0.012 \text{ м}. \quad (8.8)$$

Мощность, используемая на привод масляного насоса:

$$N_H = V_p p / (\eta_{M.H} \cdot 10^3) = 0.00056 \cdot 40 \cdot 10^4 / (0.87 \cdot 10^3) = 0.2 \text{ кВт}. \quad (8.9)$$

8.2 Масляный радиатор с воздушным охлаждением

Коэффициент теплоотдачи от масла к воздуху:

$$K_M = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda_{\text{теп}} + 1/\alpha_2} = \frac{1}{1/250 + 0.0002/100 + 1/3200} = 232 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (8.10)$$

где коэффициент теплоотдачи от стенки радиатора к воздуху $\alpha_2 = 3200 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$;

коэффициент теплопроводности стенки $\lambda_{\text{теп}} = 100 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

толщина стенки радиатора $\delta = 0,2 \text{ мм} = 0,0002 \text{ м}$.

Средняя температура масла в радиаторе $T_{M,CP} = 358 \text{ К}$.

Средняя температура воздуха в радиаторе $T_{\text{возд},CP} = 348 \text{ К}$.

Поверхность охлаждения масляного радиатора:

$$F_M = \frac{Q_M}{K_M (T_{M,CP} - T_{\text{возд},CP})} = \frac{3821}{232(358 - 348)} = 1.64 \text{ м}^2 \quad (8.11)$$

9 Расчет элементов системы охлаждения

9.1 Вентилятор

Плотность воздуха:

$$\rho_{\text{возд}} = p_0 \cdot 10^6 / (R_B T_{\text{CP.ВОЗД}}) = 0.1 \cdot 10^6 / (287 \cdot 325) = 1.07 \text{ кг/м}^3 \quad (9.1)$$

Производительность вентилятора:

$$G_{\text{возд}} = G'_{\text{возд}} / \rho_{\text{возд}} = 2.0645 / 1.07 = 1.9257 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (9.2)$$

Фронтальная поверхность радиатора:

$$F_{\text{ФР.РАД}} = G_{\text{возд}} / \omega_{\text{возд}} = 1.9257 / 20 = 0.096 \text{ м}^2, \quad (9.3)$$

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

Диаметр вентилятора:

$$D_{\text{ВЕНТ}} = 2\sqrt{F_{\text{ФР.РАД}} / \pi} = 2\sqrt{0.096 / 3.14} = 0.35 \text{ м} \quad (9.4)$$

Окружная скорость вентилятора:

$$u = \psi_{\text{л}} \sqrt{\Delta p_{\text{ТР}} / \rho_{\text{возд}}} = 3.41 \sqrt{800 / 1.07} = 93.4 \text{ м/с}, \quad (9.5)$$

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

Частота вращения вентилятора:

$$n_{\text{ВЕНТ}} = 60u / (\pi D_{\text{ВЕНТ}}) = 5082 \text{ мин}^{-1} \quad (9.6)$$

Мощность, затрачиваемая на привод осевого вентилятора:

$$N_{\text{ВЕНТ}} = G_{\text{ВОЗД}} \Delta p_{\text{ТР}} / (1000 \eta_{\text{В}}) = 4.05 \text{ кВт} , \quad (9.7)$$

где $\eta_{\text{В}} = 0,38$ – КПД клепаного вентилятора.

9.2 Расчет поверхности воздушного охлаждения

Поверхность охлаждения ребер цилиндра:

$$F_{\text{ЦИЛ}} = \frac{Q_{\text{ЦИЛ}}}{K_{\text{В}} (T_{\text{ЦИЛ.О}} - T_{\text{ВОЗД.ВХ}})} = \frac{38063}{160 \cdot (358.2 - 325)} = 7.20 \text{ м}^2, \quad (9.8)$$

где $Q_{\text{цил}}$ – количество теплоты, отводимое воздухом от цилиндра двигателя, Дж/с;

$K_{\text{е}}$ – коэффициент теплоотдачи поверхности цилиндра, Вт/(м² · К);

$T_{\text{цил.о}}$ – средняя температура у основания ребер цилиндра, К;

$T_{\text{возд.вх}}$ – среднеарифметическая температура воздуха в межреберном пространстве, К.

Средняя температура у основания ребер цилиндров изготовленных из алюминиевых сплавов 415 К.

Коэффициент теплоотдачи для радиаторов легковых автомобилей $K=160$, Вт/(м²·К).

где $T_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое температур ребра и обдувающего воздуха;

K ; $w_{\text{е}}$ – скорость воздуха в межреберном пространстве, м/с.

Средняя скорость в межреберном пространстве цилиндра и его головке принимается равной 50 м/с при диаметре равном 76 мм.

Поверхность охлаждения ребер головки цилиндра

$$F_{\text{ГОЛ}} = \frac{Q_{\text{ГОЛ}}}{K_B (T_{\text{ЦИЛ.ГОЛ}} - T_{\text{ВОЗД.ВХ}})} = \frac{54578}{160 \cdot (330 - 325)} = 2.47 \text{ м}^2, \quad (9.10)$$

где $Q_{\text{ГОЛ}}$ – количество теплоты, отводимое воздухом от головки цилиндра, Дж/с;

$T_{\text{ЦИЛ.ГОЛ}}$ – средняя температура у основания ребер головки, К;

$T_{\text{ВОЗД.ВХ}}$ – средняя температура воздуха в межреберном пространстве головки, К.

Средняя температура у основании ребер головки цилиндра изготовленного из алюминиевых сплавов равно 330 К.

10 Модернизация двигателя для беспилотного летательного аппарата

Ориентируясь на таблицу 1 беспилотный летательный аппарат с данным двигателем, можно отнести к категории БПЛА средней дальности, при весе двигателя 50 кг и весе корпуса 445кг дальность полета составит – 200 км, высота полета 5 км, а продолжительность полета 10 часов [4].

При адаптации двигателя, не предназначенного для эксплуатации в воздухе, можно выделить 4 главные проблемы:

- Проблема переохладения двигателя при работе на высоте при низких температурах, как следствие потеря мощности ухудшение смесеобразования, увеличение расхода топлива, но так как выбранный двигатель разрабатывался для снегохода, температурные режимы были заведомо заложены с запасом.

- прекращение подачи топлива, при резком изменении положения двигателя. Для предотвращения подачи топлива при резком изменении положения двигателя, следует установить каучуковую ёмкость, применяемую для авиационных двигателей, которая способна увеличиваться в размерах (растягиваться) под давлением.

- нехватка тяговой мощности, если добавить к двигателю шестеренчатый редуктор с передаточным отношением 2.2..2.6 и двухлопастный винт 1.65..1.8м, можно получить достаточно устойчивую тягу, необходимую для движения летательного аппарата.

- надежность конструкции, для нормальной безаварийной работы поршневых двигателей имеет значение надежности, ниже приведены мероприятия по повышению надежности двигателя.

При адаптации поршневого двигателя для условий работы в воздушном пространстве, так же возникают проблемы с системой смазки. Известны

основные проблемы быстрого расхода масла, которые свидетельствуют о некоторых неисправностях, такие как:

- негерметичное крепление масляного фильтра к штуцеру;
- утечка охлаждающей жидкости через прокладку картера или масляного насоса;
- повреждение поддона картера, одной из причин деформации картера в процессе его работы может служить, нагрузка на подшипники, вследствие слабой жесткости картера и большой консольности коленчатого, из-за продольного смещения коленчатого вала в картере двигателя, стопорные кольца, установленные без зазора;
- присутствие мусора в системе вентиляции картера;
- неисправности в КШМ;

Понижение давления масла может иметь следующие причины:

- присутствие мусора в масляном фильтре;
- дефект масляного насоса;
- дефект редукционных клапанов;
- низкий уровень масла в системе;

Для избежания проблем связанных с системой смазки и для улучшения надежности, могут быть проведены следующие мероприятия, связанные с причинами указанных выше:

- замена деталей на более ударопрочные, износостойкие и коррозионностойкие для уменьшения риска его повреждения;
- для предотвращения появления инородных тел в масляном фильтре используются дополнительные присадки.

- для предотвращения деформации картера, необходимо обеспечить должную смазку подшипников, для того чтобы избежать значительного сопротивления трению и качению;

- балансировка вентилятора обдува, для избежания вибраций;

- установка зазора в стопорных кольцах, для предотвращения коксования (образования нагара и отложения смолистых веществ) масла в зазоре между прогретым кольцом и канавкой поршня .

- замена сальников (сальник от «Москвича-412»), а так же изменение корпуса сальников (материал Д16Т), для предотвращения прорыва воздуха через сальник и обеднения топливно-воздушной смеси;

- балансировка поршней, для предотвращения вибраций, вследствие несбалансированной шатунно-поршневой группы;

- сверление дополнительных вентиляционных каналов, для смазки сальников и подшипников;

- теплоизоляция выхлопного коллектора, без должной теплоизоляции выхлопного коллектора, процесс выхода отработавших газов может замедлиться, вследствие понижения температуры.

В рассматриваемом двигателе в качестве системы зажигания применяется магдино, представляет собой небольшой генератор переменного тока с постоянно вращающимся магнитом. Преимуществом данной системы является возможность подвода напряжения непосредственно от отдельной обмотки питания.

Для избежания вибраций двигателя, магдино следует тщательно сбалансировать.

Для своевременного вывода из камеры сгорания сгоревших газов, стабилизации потоков выхлопных газов, увеличения мощности, снижения

шума следует установить резонатор. При отсутствии резонатора в двухтактном двигателе в выхлопной коллектор будет выходить не только отработавшие газы, но и не полностью сгоревшее топливо, как следствие потеря мощности и увеличения расхода топлива.

Проведя все рекомендуемые мероприятия можно получить двигатель, который будет работать стабильно, ровно, тихо и экономично.

11 Экологичность и безопасность

11.1 Рассмотрение проблемы

Примерный состав отработавших газов бензиновых и дизельных двигателей приведен в таблице 14 [25].

Таблица 14 – Примерный состав отработавших газов

Компоненты отработавших газов	Содержание в дизельном двигателе, %	Содержание в бензиновом двигателе, %	Токсичность
Бензопирен	До 0,02	0,03-0,07	Да
Сажа	0,02-1,2	.2-0,06	Да
Оксид серы	0-0,04	0-0,005	Да
Оксид азота	0-0,5	0,0007-0,6	Да
Альдегиды	0,002-0,006	0-0,7	Да
Углеводороды неканцерогенные	0,0100-0,6	0,2-5	Да
Оксид углерода	0,02-6	0,1-11	Да
Диоксид углерода	1-9	5-14	Нет
Пары воды	0,5-5	3-5,6	Нет
Кислород	3-15	0,3-9	Нет
Азот	75-76	74-79	Нет

Мероприятия на уменьшения токсичных продуктов, содержащихся в отработавших газах в двигателях внутреннего сгорания можно условно разделить на четыре группы:

- применение альтернативного топлива – сжатого газа, метанола и других спиртов, топлив растительного происхождения и т.д.;

- применение систем очистки отработавших газов, их условно можно разбить на шесть основных групп: инерционные, механические, электрофильтры, скрубберы, адсорбционные и комбинированные очистители;

- улучшение конструкции двигателя внутреннего сгорания, включает в себя: усовершенствование конструкции цилиндра-поршневой группы,

топливной системы, оптимизацию смесеобразования и камеры сгорания, совершенствование характеристик систем охлаждения, систем воздушного снабжения и воздушного заряда;

- учет факторов эксплуатации, рассматривает решение задач оптимизации режимов работы двигателя, поддержания его технического состояния, учета параметров окружающей среды, улучшение качества горюче-смазочных материалов [26].

Если сравнивать характеристики двухтактных и четырехтактных двигателей схожей конструкции при равных оборотах коленчатого вала, то можно увидеть, что мощность двухтактных выше, так как за одно и то же число оборотов у двухтактного двигателя рабочих циклов в два раза больше, но вследствие того, что часть хода поршня теряется за счет выпускных и продувочных окон, а механические потери больше (наличие продувочного насоса), мощность двухтактных двигателей не в два, а примерно в 1,6—1,7 раза превышает мощность четырехтактных двигателей. Существенным недостатком двухтактных двигателей является худшая топливная экономичность (20-30%) и токсичность отработавших газов. Уровень шума в двухтактных двигателях, как правило слегка выше, чем в четырехтактных.

В представленной бакалаврской работе выдвинуты мероприятия по адаптации двухтактного двигателя внутреннего сгорания для беспилотных летательных аппаратов. Эти мероприятия так же направлены на повышение безопасности эксплуатации, снижение шума и на уменьшение токсичных веществ, выбрасываемых в атмосферу.

Влияние новой модернизированной конструкции ДВС на температурное состояние агрегатов и узлов силовой установки – это характеристика, показывающая способность системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания к снижению термонагрузок деталей, агрегатов, узлов и поддержания уровня тепла необходимого для корректной работы ДВС.

При взлете и наборе высоты дроном, существенно повышается количество оборотов коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания, так же увеличивается механическая работа потерь на трения, что приводит к увеличенному теплообразованию и как следствие повышенному износу деталей в сопрягаемых вращающихся элементах узлов ДВС.

Так же при взлете из-за того, что коленчатый вал развивает большие обороты и из-за работы газораспределительного механизма корпус ДВС генерирует высокие уровни шума. Это может происходить и по другим причинам, например из-за высокой скорости воздушного потока на впуске и выпуске. В связи с этим следует установить резонатор. Отработавшие газы, вырываясь из выпускных окон со сверхзвуковой скоростью, будут устремляться в резонатор, который сначала расширяется, образуя так называемый прямой конус, а затем сужаться, образуя обратный конус. При этом давление газов сначала снижается, а после возрастает. Возникает отраженная волна, устремляющаяся назад к цилиндру. Резонатор будет не только снижать шумы выхлопа, но и отвечать за удаление из камеры сгорания всех газов, которые были отработаны.

Представленные мероприятия в разделе 11 «Модернизация двигателя для беспилотного летательного аппарата» для систем смазки, охлаждения и питания двигателя направленные на повышение безопасности конструкции:

- замена материала картера, для предотвращения повреждения поддона картера, вследствие слабой жесткости картера и большой консольности коленчатого вала в процессе работы двигателя.

- установка каучуковой ёмкости, для предотвращения подачи топлива при резком изменении положения двигателя беспилотного летательного аппарата;

- замена сальников (сальник от «Москвича-412»), а так же изменение корпуса сальников (материал Д16Т), для предотвращения прорыва воздуха через сальник и обеднения топливно-воздушной смеси;
- балансировка поршней, для предотвращения вибраций, вследствие несбалансированной шатунно-поршневой группы;
- сверление дополнительных вентиляционных каналов, для смазки сальников и подшипников;
- установка зазора в стопорных кольцах, для предотвращения коксования (образования нагара и отложения смолистых веществ) масла в зазоре между прогретым кольцом и канавкой поршня .

11.2 Выводы по главе экологичность и безопасность проекта

1. Приведены мероприятия направленные на понижение шумности двигателя. Представленный двигатель удовлетворяет нормам шума по ГОСТ Р 52231-04 «Внешний шум автомобилей в эксплуатации. Допустимые уровни и методы измерения»
2. Приведены мероприятия направленные на повышение безопасности конструкции
3. Спроектированный двигатель удовлетворяет нормам по ограничению токсичности отработавших газов автотранспортных ДВС ОСТ 37.001.234 - 84

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе была рассмотрена возможность применения двухтактного бензинового двигателя внутреннего сгорания от снегохода Буран РМЗ 640 в актуальной на сегодняшний день теме, беспилотных летательных аппаратов. Произведены основные расчеты двигателя: тепловой расчет, тепловой баланс, кинематический расчет, динамический расчет, прочностной расчет, расчет систем смазки, охлаждения, питания двигателя.

В результате расчетов получено:

- максимальная мощность при номинальных оборотах $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$ составила 45.81 кВт;

- общее количество теплоты, введённых в двигатель с топливом при номинальных оборотах $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$ равно 152,85 Дж/с ;

Для адаптации двигателя к работе в воздухе были предложены мероприятия, позволяющие двигателю работать в полную мощность.

Приведены мероприятия направленные на понижение шума двигателя и увеличению безопасности. Проведена проверка на удовлетворение нормам шума, безопасности, токсичности, которая показала, что спроектированный двигатель соответствует нормам шума по ГОСТ Р 52231-04, нормам ограничения токсичности ОСТ 37.001.234-84.

Анализ проведённых расчетов и мероприятий показал, что спроектированный двигатель действительно может использоваться в беспилотных летательных аппаратах. Способен конкурировать с современными аналогами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя / И.И. Вибе // М. : Машиностроение, 2004. – 282 с.
2. Моисеев, В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В.С. Моисеев // Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. - 768 с.
3. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания. Конструкция и расчет поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. — 4-е изд. — М.: Машиностроение, 1984. — 382 с.
4. Классификация UVS International [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arsenal-info.ru>. – (Дата обращения: 05.04.18)
5. История снегодостоения в Рыбинске [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://go-rt.ru>. – (Дата обращения: 13.01.18)
6. Overview of solutions and analysis of the ability to evaluate the performance parameters of unmanned aerial vehicles propulsion systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.matec-conferences.org>. – (Дата обращения: 03.05.18)
7. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / Колчин, А.И. Демидов В.П. // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа, 2007. – 495 с.
8. The Benefits and Challenges of UAVs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://onlinemasters.ohio.edu>. – (Дата обращения: 22.04.18)
9. Hutton, F. R. The gas-engine. A treatise on the internal-combustion engine using gas, gasoline, kerosene, alcohol, or other hydrocarbon as source of energy/ F.R. Hutton // New York: Wiley, 1903. – 540 с.

10. Heywood, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals / J.B. Heywood / McGraw-Hill / New York, International Editions, 1988. – 325 с.
11. Future is assured for death-dealing, life-saving drones [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.theguardian.com/>. – (Дата обращения 27.03.18)
12. Unmanned Aerial Vehicles [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ingenia.org.uk/>. – (Дата обращения 25.04.18)
13. Hutton, F. R. The gas-engine. A treatise on the internal-combustion engine using gas, gasoline, kerosene, alcohol, or other hydrocarbon as source of energy. New York: Wiley. — 2015
14. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя / В.И. Анурьев // В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 296 с.
15. Singer, C.J A History of Technology: The Internal Combustion Engine / edited by Singer C.J. - New York, Clarendon Press. — 2016. – 335 с.
16. Кулапин, В.И. Автоматическая система управления прецизионной посадкой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на наземную платформу беспроводной зарядки / В.И. Кулапин, А.В. Князьков, А.С. Егорихин, П.В. Шевцов // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2015. – 285 с.
17. Архангельский, В.М. Автомобильные двигатели / В.М. Архангельский [и др.]; под ред. М. С. Ховаха. – М. : Машиностроение, 2016. - 358 с.
18. 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.
19. Матвеевко, А.М. Самолеты и вертолеты. Проектирование, конструкции и системы самолетов и вертолетов / А.М. Матвеевко, А.И. Акимов, М.Г. Акопов, Н.В. Алексеев // Учебное пособие. — М.: Машиностроение, 2015. — 753 с.

- 20.Замятин, С.В. Беспилотные летательные аппараты / С.В. Замятин, М.И. Пушкарев, Е.М. Яковлева // Томск : ТПУ, 2016. — 100 с.
- 21.Тимофеев, Н.П. Тактическая авиация ВВС США и НАТО в локальных конфликтах / Н.П. Тимофеев, Ю.Ф. Куприянов, Ю.П. Самохвалов, С.Г. Чурбанов // Учебное пособие. — Екатеринбург : УрФУ, 2015. — 176 с.
- 22.Илюхин, И.М. Оптические и оптико-электронные приборы навигационных комплексов самолетов и космических кораблей / И.М. Илюхин, Ш.М. Камалов. // Учебное пособие. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. — 48 с.
- 23.Берлин И.А. Конструкция и проектирование самолетов / И.А. Берлин, А.Л. Гиммельфарб, П.М. Крейсон // Учебное пособие. — М.: Машиностроение, 2016. — 266 с.
- 24.Житомирский, Г.И. Конструкция самолетов / Г.И. Житомирский // учебное пособие. — М.: Машиностроение, 2018. — 416 с.
- 25.Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты газоочистки / А.Г. Ветошкин // Учебное пособие. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2006. — 201с.
- 26.Оберемок В.А. Современные методы и средства снижения токсичности отработавших газов двигателей / В.А. Оберемок // Научная статья. — Зерноград: КубГАУ, 2016. — 247 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 - Исходные данные для теплового расчета

Угол опережения впрыска топлива	Продолжительность процесса сгорания	Коэффициент избытка воздуха	Степень сжатия	Коэффициент молекулярного изменения смеси	P_y	T_y	V_a	Полнота сгорания топлива	E_2	Коэффициент остаточных газов γ_r	λ	Частота вращения КВ
24	54	1,24	8,2	1,0027	1,0795	653,43	0,98462	1,0403	33,244	0,0472	0.28	5000
19	50	1,21	8,2	1,0079	1,2842	682,81	0,96444	1,0275	35,110	0,0472	0.28	4000
16	42	1,15	8,2	1,0190	1,4171	700,50	0,94944	1,0161	36,812	0,0476	0.28	3000
14	36	1	8,2	1,0524	1,5062	713,12	0,93681	0,9955	40,868	0,0496	0.28	2000
12	28	0,96	8,2	1,0631	1,5855	723,57	0,93075	0,9902	39,718	0,0532	0.28	1000

Таблица А.2 - Результаты теплового расчета при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$

$\varphi'1$	φ' рад	X1-2	$\Delta X1-2$	k1-2	σ	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
348	6,07	0,00000	0,00000	1,363	0,02791	1,10047	1,08450	734,47	730,60	734,50	1,584	6,516	1,616
349	6,09	0,00008	0,00004	1,362	0,02347	1,08450	1,06990	740,51	738,34	738,34	1,616	6,527	1,647
350	6,11	0,00034	0,00017	1,361	0,01942	1,06990	1,05666	745,60	742,68	742,68	1,647	6,542	1,677
351	6,13	0,00095	0,00047	1,359	0,01574	1,05666	1,04480	752,87	748,51	748,51	1,677	6,565	1,710
352	6,14	0,00205	0,00102	1,357	0,01244	1,04480	1,03432	763,94	757,23	757,23	1,710	6,599	1,747
353	6,16	0,00378	0,00189	1,354	0,00953	1,03432	1,02523	780,73	770,64	770,63	1,747	6,647	1,794
354	6,18	0,00630	0,00315	1,350	0,00701	1,02523	1,01753	805,45	790,82	790,80	1,794	6,712	1,856
355	6,20	0,00972	0,00486	1,345	0,00487	1,01753	1,01122	840,45	820,09	820,04	1,856	6,794	1,937
356	6,21	0,01414	0,00707	1,339	0,00312	1,01122	1,00631	888,03	860,81	860,70	1,937	6,892	2,045
357	6,23	0,01960	0,00980	1,333	0,00175	1,00631	1,00281	950,32	915,25	915,04	2,045	7,003	2,184
358	6,25	0,02608	0,01304	1,327	0,00078	1,00281	1,00070	1029,03	985,38	985,01	2,184	7,123	2,359
359	6,27	0,03345	0,01672	1,320	0,00019	1,00070	1,00000	1125,27	1072,67	1072,07	2,359	7,246	2,574
360	6,28	0,04150	0,02075	1,314	0,00000	1,00000	1,00070	1239,36	1177,88	1176,99	2,574	7,367	2,830
361	6,30	0,04987	0,02493	1,309	0,00019	1,00070	1,00281	1370,57	1300,84	1299,61	2,830	7,482	3,127
362	6,32	0,05810	0,02905	1,304	0,00078	1,00281	1,00631	1517,02	1440,29	1438,69	3,127	7,588	3,461

Продолжение таблицы А.2

363	6,34	0,06563	0,03281	1,299	0,00175	1,00631	1,01122	1675,61	1593,75	1591,75	3,461	7,682	3,825
364	6,35	0,07182	0,03591	1,296	0,00312	1,01122	1,01753	1842,03	1757,46	1755,08	3,825	7,764	4,208
365	6,37	0,07607	0,03804	1,293	0,00487	1,01753	1,02523	2011,03	1926,59	1923,84	4,208	7,833	4,598
366	6,39	0,07786	0,03893	1,290	0,00701	1,02523	1,03432	2176,77	2095,47	2092,38	4,598	7,890	4,979
367	6,41	0,07687	0,03843	1,288	0,00953	1,03432	1,04480	2333,33	2258,07	2254,69	4,979	7,934	5,336
368	6,42	0,07303	0,03652	1,287	0,01244	1,04480	1,05666	2475,31	2408,59	2404,96	5,336	7,968	5,652
369	6,44	0,06660	0,03330	1,286	0,01574	1,05666	1,06990	2598,37	2542,02	2538,19	5,652	7,992	5,915
370	6,46	0,05814	0,02907	1,285	0,01942	1,06990	1,08450	2699,72	2654,72	2650,73	5,915	8,007	6,117
371	6,48	0,04843	0,02422	1,285	0,02347	1,08450	1,10047	2778,31	2744,72	2740,62	6,117	8,016	6,251
372	6,49	0,03837	0,01918	1,285	0,02791	1,10047	1,11780	2834,88	2811,91	2807,74	6,251	8,019	6,321
373	6,51	0,02880	0,01440	1,285	0,03272	1,11780	1,13647	2871,60	2857,85	2853,63	6,321	8,019	6,331
374	6,53	0,02041	0,01021	1,285	0,03791	1,13647	1,15647	2891,67	2885,36	2881,13	6,331	8,016	6,290
375	6,54	0,01360	0,00680	1,285	0,04346	1,15647	1,17781	2898,70	2897,98	2893,76	6,290	8,012	6,209
376	6,56	0,00848	0,00424	1,285	0,04939	1,17781	1,20046	2896,22	2899,42	2895,21	6,209	8,008	6,099
377	6,58	0,00493	0,00247	1,286	0,05568	1,20046	1,22441	2887,25	2893,01	2888,84	6,099	8,003	5,969
378	6,60	0,00266	0,00133	1,286	0,06234	1,22441	1,24967	2874,17	2881,49	2877,36	5,969	7,998	5,826
379	6,61	0,00132	0,00066	1,286	0,06935	1,24967	1,27620	2858,62	2866,84	2862,76	5,826	7,994	5,677
380	6,63	0,00060	0,00030	1,286	0,07672	1,27620	1,30400	2841,66	2850,39	2846,35	5,677	7,989	5,524

Таблица А.3 - Результаты теплового расчета при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

$\varphi'1$	φ' рад	X1-2	$\Delta X1-2$	k1-2	σ	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
346	6,04	0,00000	0,00000	1,364	0,03791	1,13647	1,11780	722,89	718,58	722,94	1,505	6,492	1,540
347	6,06	0,00005	0,00002	1,363	0,03272	1,11780	1,10047	729,46	727,20	727,20	1,540	6,503	1,573
348	6,07	0,00021	0,00011	1,363	0,02791	1,10047	1,08450	734,41	731,71	731,72	1,573	6,517	1,606
349	6,09	0,00059	0,00029	1,361	0,02347	1,08450	1,06990	740,70	737,11	737,11	1,606	6,535	1,640
350	6,11	0,00126	0,00063	1,360	0,01942	1,06990	1,05666	749,35	744,29	744,29	1,640	6,561	1,677
351	6,13	0,00234	0,00117	1,357	0,01574	1,05666	1,04480	761,65	754,42	754,42	1,677	6,596	1,719
352	6,14	0,00390	0,00195	1,354	0,01244	1,04480	1,03432	779,08	768,88	768,89	1,719	6,643	1,770
353	6,16	0,00604	0,00302	1,351	0,00953	1,03432	1,02523	803,27	789,27	789,28	1,770	6,704	1,834
354	6,18	0,00883	0,00441	1,346	0,00701	1,02523	1,01753	835,94	817,27	817,28	1,834	6,779	1,914
355	6,20	0,01232	0,00616	1,341	0,00487	1,01753	1,01122	878,76	854,60	854,61	1,914	6,866	2,015
356	6,21	0,01654	0,00827	1,335	0,00312	1,01122	1,00631	933,31	902,92	902,92	2,015	6,965	2,141

Продолжение таблицы А.3

357	6,23	0,02149	0,01074	1,329	0,00175	1,00631	1,00281	1000,91	963,70	963,68	2,141	7,072	2,295
358	6,25	0,02709	0,01355	1,324	0,00078	1,00281	1,00070	1082,55	1038,12	1038,09	2,295	7,182	2,481
359	6,27	0,03325	0,01662	1,318	0,00019	1,00070	1,00000	1178,75	1126,98	1126,91	2,481	7,293	2,699
360	6,28	0,03976	0,01988	1,312	0,00000	1,00000	1,00070	1289,44	1230,52	1230,40	2,699	7,402	2,950
361	6,30	0,04640	0,02320	1,308	0,00019	1,00070	1,00281	1413,85	1348,35	1348,17	2,950	7,504	3,233
362	6,32	0,05283	0,02641	1,303	0,00078	1,00281	1,00631	1550,44	1479,34	1479,09	3,233	7,598	3,543
363	6,34	0,05869	0,02934	1,299	0,00175	1,00631	1,01122	1696,86	1621,53	1621,21	3,543	7,684	3,875
364	6,35	0,06359	0,03180	1,296	0,00312	1,01122	1,01753	1850,01	1772,19	1771,79	3,875	7,759	4,222
365	6,37	0,06715	0,03357	1,293	0,00487	1,01753	1,02523	2006,10	1927,82	1927,35	4,222	7,824	4,572
366	6,39	0,06903	0,03452	1,291	0,00701	1,02523	1,03432	2160,91	2084,37	2083,82	4,572	7,878	4,917
367	6,41	0,06900	0,03450	1,289	0,00953	1,03432	1,04480	2310,04	2237,44	2236,83	4,917	7,923	5,242
368	6,42	0,06695	0,03348	1,287	0,01244	1,04480	1,05666	2449,27	2382,64	2381,96	5,242	7,959	5,538
369	6,44	0,06297	0,03148	1,286	0,01574	1,05666	1,06990	2574,86	2515,90	2515,17	5,538	7,987	5,794
370	6,46	0,05728	0,02864	1,285	0,01942	1,06990	1,08450	2683,93	2633,83	2633,06	5,794	8,007	6,001
371	6,48	0,05031	0,02515	1,285	0,02347	1,08450	1,10047	2774,64	2734,03	2733,22	6,001	8,020	6,155
372	6,49	0,04256	0,02128	1,285	0,02791	1,10047	1,11780	2846,34	2815,24	2814,41	6,155	8,028	6,254
373	6,51	0,03459	0,01730	1,284	0,03272	1,11780	1,13647	2899,54	2877,43	2876,58	6,254	8,032	6,299
374	6,53	0,02695	0,01348	1,284	0,03791	1,13647	1,15647	2935,76	2921,65	2920,79	6,299	8,033	6,294
375	6,54	0,02007	0,01004	1,284	0,04346	1,15647	1,17781	2957,24	2949,87	2949,00	6,294	8,031	6,247
376	6,56	0,01425	0,00713	1,285	0,04939	1,17781	1,20046	2966,61	2964,61	2963,74	6,247	8,028	6,165
377	6,58	0,00962	0,00481	1,285	0,05568	1,20046	1,22441	2966,59	2968,62	2967,75	6,165	8,025	6,056
378	6,60	0,00615	0,00307	1,285	0,06234	1,22441	1,24967	2959,67	2964,56	2963,70	6,056	8,020	5,928
379	6,61	0,00371	0,00186	1,285	0,06935	1,24967	1,27620	2947,97	2954,78	2953,93	5,928	8,016	5,787
380	6,63	0,00211	0,00105	1,285	0,07672	1,27620	1,30400	2933,12	2941,16	2940,32	5,787	8,011	5,638
381	6,65	0,00112	0,00056	1,285	0,08444	1,30400	1,33306	2916,32	2925,09	2924,26	5,638	8,007	5,485
382	6,67	0,00056	0,00028	1,286	0,09252	1,33306	1,36336	2898,35	2907,55	2906,73	5,485	8,002	5,332

Таблица А.4 - Результаты теплового расчета при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

$\varphi'1$	φ' рад	X1-2	$\Delta X1-2$	k1-2	σ	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
344	6,00	0,00000	0,00000	1,366	0,04939	1,17781	1,15647	708,98	705,41	710,15	1,416	6,460	1,452
345	6,02	0,00002	0,00001	1,366	0,04346	1,15647	1,13647	714,87	712,56	714,77	1,452	6,471	1,487
346	6,04	0,00011	0,00006	1,365	0,03791	1,13647	1,11780	719,67	717,19	719,42	1,487	6,483	1,522

Продолжение таблицы А.4

347	6,06	0,00031	0,00016	1,364	0,03272	1,11780	1,10047	725,02	722,16	724,40	1,522	6,497	1,557
348	6,07	0,00067	0,00034	1,363	0,02791	1,10047	1,08450	731,41	727,88	730,15	1,557	6,514	1,592
349	6,09	0,00124	0,00062	1,361	0,02347	1,08450	1,06990	739,48	734,94	737,23	1,592	6,536	1,630
350	6,11	0,00208	0,00104	1,359	0,01942	1,06990	1,05666	749,98	744,02	746,34	1,630	6,565	1,671
351	6,13	0,00323	0,00161	1,357	0,01574	1,05666	1,04480	763,78	755,94	758,31	1,671	6,602	1,717
352	6,14	0,00473	0,00237	1,354	0,01244	1,04480	1,03432	781,82	771,62	774,03	1,717	6,647	1,770
353	6,16	0,00664	0,00332	1,351	0,00953	1,03432	1,02523	805,08	792,01	794,50	1,770	6,702	1,833
354	6,18	0,00898	0,00449	1,347	0,00701	1,02523	1,01753	834,59	818,15	820,73	1,833	6,767	1,908
355	6,20	0,01177	0,00589	1,342	0,00487	1,01753	1,01122	871,31	851,02	853,71	1,908	6,840	1,998
356	6,21	0,01503	0,00751	1,338	0,00312	1,01122	1,00631	916,15	891,59	894,41	1,998	6,922	2,104
357	6,23	0,01874	0,00937	1,333	0,00175	1,00631	1,00281	969,89	940,71	943,67	2,104	7,010	2,228
358	6,25	0,02286	0,01143	1,328	0,00078	1,00281	1,00070	1033,14	999,08	1002,20	2,228	7,101	2,372
359	6,27	0,02733	0,01367	1,323	0,00019	1,00070	1,00000	1106,28	1067,20	1070,51	2,372	7,195	2,537
360	6,28	0,03206	0,01603	1,318	0,00000	1,00000	1,00070	1189,40	1145,35	1148,86	2,537	7,288	2,722
361	6,30	0,03693	0,01846	1,314	0,00019	1,00070	1,00281	1282,30	1233,46	1237,18	2,722	7,379	2,927
362	6,32	0,04177	0,02089	1,309	0,00078	1,00281	1,00631	1384,37	1331,14	1335,10	2,927	7,465	3,150
363	6,34	0,04641	0,02321	1,306	0,00175	1,00631	1,01122	1494,63	1437,60	1441,81	3,150	7,546	3,388
364	6,35	0,05065	0,02532	1,302	0,00312	1,01122	1,01753	1611,68	1551,66	1556,14	3,388	7,621	3,637
365	6,37	0,05425	0,02713	1,299	0,00487	1,01753	1,02523	1733,71	1671,70	1676,45	3,637	7,688	3,893
366	6,39	0,05703	0,02852	1,296	0,00701	1,02523	1,03432	1858,57	1795,72	1800,77	3,893	7,749	4,149
367	6,41	0,05879	0,02940	1,294	0,00953	1,03432	1,04480	1983,82	1921,42	1926,76	4,149	7,801	4,399
368	6,42	0,05939	0,02969	1,292	0,01244	1,04480	1,05666	2106,85	2046,23	2051,87	4,399	7,847	4,637
369	6,44	0,05873	0,02937	1,290	0,01574	1,05666	1,06990	2225,02	2167,48	2173,41	4,637	7,885	4,856
370	6,46	0,05681	0,02840	1,289	0,01942	1,06990	1,08450	2335,78	2282,55	2288,77	4,856	7,916	5,050
371	6,48	0,05368	0,02684	1,288	0,02347	1,08450	1,10047	2436,90	2389,01	2395,49	5,050	7,941	5,214
372	6,49	0,04950	0,02475	1,287	0,02791	1,10047	1,11780	2526,53	2484,78	2491,51	5,214	7,961	5,344
373	6,51	0,04448	0,02224	1,287	0,03272	1,11780	1,13647	2603,40	2568,28	2575,22	5,344	7,975	5,437
374	6,53	0,03890	0,01945	1,286	0,03791	1,13647	1,15647	2666,82	2638,51	2645,63	5,437	7,985	5,494
375	6,54	0,03306	0,01653	1,286	0,04346	1,15647	1,17781	2716,75	2695,12	2702,39	5,494	7,991	5,513
376	6,56	0,02725	0,01363	1,286	0,04939	1,17781	1,20046	2753,75	2738,38	2745,76	5,513	7,994	5,499
377	6,58	0,02177	0,01088	1,286	0,05568	1,20046	1,22441	2778,86	2769,12	2776,58	5,499	7,994	5,454
378	6,60	0,01681	0,00840	1,286	0,06234	1,22441	1,24967	2793,52	2788,61	2796,13	5,454	7,993	5,384
379	6,61	0,01253	0,00626	1,286	0,06935	1,24967	1,27620	2799,33	2798,42	2805,97	5,384	7,990	5,292
380	6,63	0,00900	0,00450	1,286	0,07672	1,27620	1,30400	2798,00	2800,24	2807,81	5,292	7,986	5,183

Продолжение таблицы А.4

381	6,65	0,00621	0,00311	1,286	0,08444	1,30400	1,33306	2791,12	2795,75	2803,32	5,183	7,982	5,063
382	6,67	0,00412	0,00206	1,287	0,09252	1,33306	1,36336	2780,15	2786,50	2794,04	5,063	7,978	4,934
383	6,68	0,00261	0,00131	1,287	0,10093	1,36336	1,39489	2766,26	2773,80	2781,32	4,934	7,973	4,801
384	6,70	0,00158	0,00079	1,287	0,10969	1,39489	1,42763	2750,41	2758,72	2766,22	4,801	7,968	4,666
385	6,72	0,00092	0,00046	1,287	0,11879	1,42763	1,46156	2733,29	2742,09	2749,55	4,666	7,963	4,530
386	6,74	0,00050	0,00025	1,287	0,12821	1,46156	1,49668	2715,41	2724,49	2731,92	4,530	7,958	4,396

Таблица А.5 - Результаты теплового расчета при $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$

$\varphi'1$	φ' рад	X1-2	$\Delta X1-2$	k1-2	σ	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
341	5,95	0,00000	0,00000	1,369	0,06935	1,24967	1,22441	691,12	685,98	691,17	1,284	6,424	1,320
342	5,97	0,00002	0,00001	1,368	0,06234	1,22441	1,20046	698,82	696,26	696,26	1,320	6,436	1,357
343	5,99	0,00008	0,00004	1,367	0,05568	1,20046	1,17781	704,05	701,38	701,38	1,357	6,448	1,393
344	6,00	0,00023	0,00012	1,366	0,04939	1,17781	1,15647	709,68	706,73	706,74	1,393	6,463	1,429
345	6,02	0,00051	0,00025	1,365	0,04346	1,15647	1,13647	716,07	712,64	712,64	1,429	6,480	1,467
346	6,04	0,00094	0,00047	1,364	0,03791	1,13647	1,11780	723,68	719,50	719,51	1,467	6,500	1,505
347	6,06	0,00157	0,00078	1,362	0,03272	1,11780	1,10047	733,06	727,85	727,86	1,505	6,526	1,547
348	6,07	0,00244	0,00122	1,360	0,02791	1,10047	1,08450	744,86	738,27	738,29	1,547	6,557	1,592
349	6,09	0,00358	0,00179	1,357	0,02347	1,08450	1,06990	759,80	751,45	751,47	1,592	6,596	1,643
350	6,11	0,00502	0,00251	1,354	0,01942	1,06990	1,05666	778,63	768,14	768,17	1,643	6,642	1,700
351	6,13	0,00681	0,00340	1,351	0,01574	1,05666	1,04480	802,15	789,12	789,16	1,700	6,696	1,767
352	6,14	0,00895	0,00447	1,347	0,01244	1,04480	1,03432	831,16	815,19	815,24	1,767	6,759	1,844
353	6,16	0,01146	0,00573	1,343	0,00953	1,03432	1,02523	866,43	847,14	847,21	1,844	6,829	1,933
354	6,18	0,01435	0,00718	1,339	0,00701	1,02523	1,01753	908,66	885,72	885,81	1,933	6,905	2,037
355	6,20	0,01761	0,00880	1,334	0,00487	1,01753	1,01122	958,47	931,60	931,72	2,037	6,987	2,156
356	6,21	0,02120	0,01060	1,329	0,00312	1,01122	1,00631	1016,35	985,34	985,48	2,156	7,073	2,292
357	6,23	0,02508	0,01254	1,325	0,00175	1,00631	1,00281	1082,63	1047,36	1047,53	2,292	7,160	2,445
358	6,25	0,02918	0,01459	1,320	0,00078	1,00281	1,00070	1157,42	1117,89	1118,08	2,445	7,248	2,616
359	6,27	0,03340	0,01670	1,316	0,00019	1,00070	1,00000	1240,62	1196,95	1197,15	2,616	7,333	2,803
360	6,28	0,03765	0,01882	1,312	0,00000	1,00000	1,00070	1331,85	1284,29	1284,51	2,803	7,416	3,007
361	6,30	0,04177	0,02088	1,308	0,00019	1,00070	1,00281	1430,45	1379,41	1379,64	3,007	7,494	3,224
362	6,32	0,04562	0,02281	1,305	0,00078	1,00281	1,00631	1535,44	1481,48	1481,72	3,224	7,567	3,451
363	6,34	0,04904	0,02452	1,301	0,00175	1,00631	1,01122	1645,54	1589,39	1589,63	3,451	7,635	3,686

Продолжение таблицы А.5

364	6,35	0,05187	0,02594	1,299	0,00312	1,01122	1,01753	1759,19	1701,69	1701,93	3,686	7,696	3,923
365	6,37	0,05395	0,02698	1,296	0,00487	1,01753	1,02523	1874,56	1816,68	1816,92	3,923	7,750	4,159
366	6,39	0,05516	0,02758	1,294	0,00701	1,02523	1,03432	1989,65	1932,44	1932,67	4,159	7,798	4,386
367	6,41	0,05540	0,02770	1,292	0,00953	1,03432	1,04480	2102,34	2046,87	2047,09	4,386	7,840	4,601
368	6,42	0,05461	0,02730	1,291	0,01244	1,04480	1,05666	2210,50	2157,82	2158,03	4,601	7,875	4,798
369	6,44	0,05279	0,02639	1,290	0,01574	1,05666	1,06990	2312,11	2263,19	2263,39	4,798	7,905	4,972
370	6,46	0,05000	0,02500	1,289	0,01942	1,06990	1,08450	2405,34	2361,03	2361,22	4,972	7,929	5,119
371	6,48	0,04635	0,02318	1,288	0,02347	1,08450	1,10047	2488,70	2449,65	2449,83	5,119	7,948	5,236
372	6,49	0,04202	0,02101	1,287	0,02791	1,10047	1,11780	2561,09	2527,74	2527,91	5,236	7,962	5,321
373	6,51	0,03720	0,01860	1,287	0,03272	1,11780	1,13647	2621,88	2594,43	2594,59	5,321	7,972	5,373
374	6,53	0,03213	0,01607	1,287	0,03791	1,13647	1,15647	2670,91	2649,32	2649,47	5,373	7,979	5,393
375	6,54	0,02704	0,01352	1,286	0,04346	1,15647	1,17781	2708,50	2692,50	2692,65	5,393	7,983	5,383
376	6,56	0,02214	0,01107	1,286	0,04939	1,17781	1,20046	2735,36	2724,50	2724,64	5,383	7,985	5,345
377	6,58	0,01762	0,00881	1,286	0,05568	1,20046	1,22441	2752,53	2746,22	2746,36	5,345	7,984	5,283
378	6,60	0,01360	0,00680	1,286	0,06234	1,22441	1,24967	2761,26	2758,84	2758,97	5,283	7,982	5,201
379	6,61	0,01017	0,00509	1,287	0,06935	1,24967	1,27620	2762,92	2763,69	2763,83	5,201	7,979	5,102
380	6,63	0,00736	0,00368	1,287	0,07672	1,27620	1,30400	2758,87	2762,16	2762,29	5,102	7,976	4,991
381	6,65	0,00514	0,00257	1,287	0,08444	1,30400	1,33306	2750,36	2755,58	2755,71	4,991	7,971	4,871
382	6,67	0,00347	0,00173	1,287	0,09252	1,33306	1,36336	2738,53	2745,15	2745,29	4,871	7,967	4,745
383	6,68	0,00225	0,00112	1,287	0,10093	1,36336	1,39489	2724,31	2731,91	2732,05	4,745	7,962	4,615
384	6,70	0,00140	0,00070	1,287	0,10969	1,39489	1,42763	2708,43	2716,70	2716,84	4,615	7,957	4,484
385	6,72	0,00084	0,00042	1,288	0,11879	1,42763	1,46156	2691,47	2700,17	2700,30	4,484	7,953	4,354
386	6,74	0,00048	0,00024	1,288	0,12821	1,46156	1,49668	2673,83	2682,78	2682,92	4,354	7,948	4,224
387	6,75	0,00026	0,00013	1,288	0,13797	1,49668	1,53296	2655,79	2664,88	2665,02	4,224	7,943	4,097
388	6,77	0,00014	0,00007	1,288	0,14804	1,53296	1,57038	2637,54	2646,70	2646,84	4,097	7,938	3,972
389	6,79	0,00007	0,00003	1,288	0,15844	1,57038	1,60893	2619,21	2628,38	2628,53	3,972	7,933	3,850
390	6,81	0,00003	0,00002	1,289	0,16915	1,60893	1,64859	2600,87	2610,03	2610,18	3,850	7,928	3,731
391	6,82	0,00001	0,00001	1,289	0,18016	1,64859	1,68934	2582,59	2591,71	2591,85	3,731	7,923	3,615

Таблица А.6 - Результаты теплового расчета при $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$

$\varphi'1$	φ' рад	X1-2	$\Delta X1-2$	k1-2	σ	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
336	5,86	0,00000	0,00000	1,373	0,10969	1,39489	1,36336	661,90	656,08	661,70	1,079	6,356	1,114
337	5,88	0,00001	0,00000	1,372	0,10093	1,36336	1,33306	670,53	667,73	667,29	1,114	6,370	1,149
338	5,90	0,00004	0,00002	1,371	0,09252	1,33306	1,30400	676,17	673,32	672,88	1,149	6,384	1,184
339	5,92	0,00011	0,00006	1,370	0,08444	1,30400	1,27620	681,99	679,02	678,58	1,184	6,399	1,220
340	5,93	0,00024	0,00012	1,369	0,07672	1,27620	1,24967	688,13	684,95	684,51	1,220	6,414	1,257
341	5,95	0,00044	0,00022	1,368	0,06935	1,24967	1,22441	694,82	691,31	690,86	1,257	6,432	1,295
342	5,97	0,00074	0,00037	1,367	0,06234	1,22441	1,20046	702,30	698,32	697,88	1,295	6,451	1,334
343	5,99	0,00116	0,00058	1,365	0,05568	1,20046	1,17781	710,87	706,27	705,82	1,334	6,474	1,375
344	6,00	0,00170	0,00085	1,364	0,04939	1,17781	1,15647	720,88	715,47	715,02	1,375	6,500	1,419
345	6,02	0,00239	0,00120	1,362	0,04346	1,15647	1,13647	732,70	726,29	725,84	1,419	6,530	1,465
346	6,04	0,00325	0,00163	1,359	0,03791	1,13647	1,11780	746,74	739,11	738,66	1,465	6,565	1,516
347	6,06	0,00430	0,00215	1,357	0,03272	1,11780	1,10047	763,43	754,37	753,92	1,516	6,605	1,572
348	6,07	0,00553	0,00277	1,354	0,02791	1,10047	1,08450	783,22	772,50	772,04	1,572	6,650	1,633
349	6,09	0,00698	0,00349	1,351	0,02347	1,08450	1,06990	806,54	793,94	793,49	1,633	6,701	1,702
350	6,11	0,00864	0,00432	1,347	0,01942	1,06990	1,05666	833,84	819,14	818,69	1,702	6,757	1,778
351	6,13	0,01051	0,00526	1,344	0,01574	1,05666	1,04480	865,53	848,53	848,09	1,778	6,818	1,863
352	6,14	0,01261	0,00630	1,340	0,01244	1,04480	1,03432	901,99	882,52	882,07	1,863	6,883	1,957
353	6,16	0,01491	0,00745	1,336	0,00953	1,03432	1,02523	943,55	921,45	921,00	1,957	6,951	2,062
354	6,18	0,01740	0,00870	1,332	0,00701	1,02523	1,01753	990,48	965,64	965,19	2,062	7,022	2,177
355	6,20	0,02007	0,01003	1,328	0,00487	1,01753	1,01122	1042,98	1015,32	1014,86	2,177	7,094	2,303
356	6,21	0,02287	0,01144	1,324	0,00312	1,01122	1,00631	1101,14	1070,64	1070,15	2,303	7,167	2,441
357	6,23	0,02577	0,01289	1,321	0,00175	1,00631	1,00281	1164,97	1131,65	1131,14	2,441	7,240	2,589
358	6,25	0,02872	0,01436	1,317	0,00078	1,00281	1,00070	1234,33	1198,29	1197,75	2,589	7,311	2,748
359	6,27	0,03166	0,01583	1,313	0,00019	1,00070	1,00000	1308,99	1270,38	1269,79	2,748	7,380	2,915
360	6,28	0,03453	0,01726	1,310	0,00000	1,00000	1,00070	1388,55	1347,61	1346,96	2,915	7,446	3,090
361	6,30	0,03725	0,01862	1,307	0,00019	1,00070	1,00281	1472,48	1429,50	1428,79	3,090	7,509	3,271
362	6,32	0,03974	0,01987	1,305	0,00078	1,00281	1,00631	1560,10	1515,46	1514,68	3,271	7,568	3,456
363	6,34	0,04192	0,02096	1,302	0,00175	1,00631	1,01122	1650,58	1604,74	1603,87	3,456	7,623	3,643
364	6,35	0,04373	0,02187	1,300	0,00312	1,01122	1,01753	1742,99	1696,43	1695,47	3,643	7,673	3,827
365	6,37	0,04508	0,02254	1,298	0,00487	1,01753	1,02523	1836,24	1789,54	1788,48	3,827	7,719	4,007
366	6,39	0,04593	0,02296	1,296	0,00701	1,02523	1,03432	1929,21	1882,94	1881,79	4,007	7,760	4,180
367	6,41	0,04621	0,02310	1,294	0,00953	1,03432	1,04480	2020,67	1975,47	1974,21	4,180	7,797	4,342
368	6,42	0,04590	0,02295	1,293	0,01244	1,04480	1,05666	2109,43	2065,88	2064,53	4,342	7,829	4,490

Продолжение таблицы А.6

369	6,44	0,04499	0,02249	1,292	0,01574	1,05666	1,06990	2194,28	2152,98	2151,53	4,490	7,857	4,622
370	6,46	0,04349	0,02174	1,291	0,01942	1,06990	1,08450	2274,12	2235,59	2234,05	4,622	7,882	4,735
371	6,48	0,04144	0,02072	1,290	0,02347	1,08450	1,10047	2347,93	2312,64	2311,02	4,735	7,902	4,827
372	6,49	0,03891	0,01946	1,289	0,02791	1,10047	1,11780	2414,88	2383,21	2381,52	4,827	7,919	4,898
373	6,51	0,03597	0,01798	1,289	0,03272	1,11780	1,13647	2474,32	2446,54	2444,78	4,898	7,932	4,946
374	6,53	0,03271	0,01636	1,288	0,03791	1,13647	1,15647	2525,80	2502,09	2500,26	4,946	7,943	4,971
375	6,54	0,02926	0,01463	1,288	0,04346	1,15647	1,17781	2569,14	2549,52	2547,64	4,971	7,950	4,974
376	6,56	0,02571	0,01286	1,288	0,04939	1,17781	1,20046	2604,34	2588,75	2586,84	4,974	7,956	4,956
377	6,58	0,02218	0,01109	1,287	0,05568	1,20046	1,22441	2631,65	2619,93	2617,98	4,956	7,959	4,917
378	6,60	0,01878	0,00939	1,287	0,06234	1,22441	1,24967	2651,51	2643,38	2641,41	4,917	7,960	4,861
379	6,61	0,01558	0,00779	1,287	0,06935	1,24967	1,27620	2664,51	2659,65	2657,65	4,861	7,960	4,790
380	6,63	0,01267	0,00633	1,287	0,07672	1,27620	1,30400	2671,34	2669,37	2667,37	4,790	7,959	4,705
381	6,65	0,01008	0,00504	1,287	0,08444	1,30400	1,33306	2672,79	2673,32	2671,31	4,705	7,957	4,609
382	6,67	0,00784	0,00392	1,288	0,09252	1,33306	1,36336	2669,66	2672,27	2670,27	4,609	7,954	4,505
383	6,68	0,00596	0,00298	1,288	0,10093	1,36336	1,39489	2662,74	2667,05	2665,06	4,505	7,950	4,395
384	6,70	0,00442	0,00221	1,288	0,10969	1,39489	1,42763	2652,75	2658,42	2656,43	4,395	7,946	4,280
385	6,72	0,00319	0,00160	1,288	0,11879	1,42763	1,46156	2640,38	2647,08	2645,11	4,280	7,941	4,163
386	6,74	0,00225	0,00112	1,288	0,12821	1,46156	1,49668	2626,20	2633,67	2631,72	4,163	7,937	4,045
387	6,75	0,00154	0,00077	1,289	0,13797	1,49668	1,53296	2610,69	2618,72	2616,78	4,045	7,932	3,927
388	6,77	0,00103	0,00051	1,289	0,14804	1,53296	1,57038	2594,26	2602,67	2600,74	3,927	7,927	3,810
389	6,79	0,00066	0,00033	1,289	0,15844	1,57038	1,60893	2577,22	2585,86	2583,96	3,810	7,922	3,695
390	6,81	0,00042	0,00021	1,289	0,16915	1,60893	1,64859	2559,79	2568,57	2566,69	3,695	7,917	3,582

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 – расчетные значения перемещения, скорости, ускорения поршня

φ ° кв	φ кв (рад)	S , м	v_n , м/с	J , м/с ²	J_1 , м/с ²	J_2 , м/с ²
0	0,0000	0,0000	0,0000	12269,568	9585,7222	2684,0022
10	0,1745	0,0007	4,0577	11962,078	9440,0936	2522,1371
20	0,3491	0,0027	7,9129	11063,556	9007,6324	2056,065
30	0,5236	0,0059	11,3790	9643,3572	8301,479	1342,0011
40	0,6981	0,0102	14,2990	7809,0619	7343,0892	466,07209
50	0,8727	0,0154	16,5567	5695,4388	6161,5835	-466,0721
60	1,0472	0,0212	18,0834	3450,816	4792,8611	-1342,001
70	1,2217	0,0274	18,8602	1222,4295	3278,5101	-2056,065
80	1,3963	0,0337	18,9153	-857,583	1664,5432	-2522,137
90	1,5708	0,0399	18,3166	-2683,968	5,872E-13	-2684,002
100	1,7453	0,0458	17,1612	-4186,627	-1664,543	-2522,137
110	1,9199	0,0513	15,5636	-5334,507	-3278,51	-2056,065
120	2,0944	0,0562	13,6418	-6134,784	-4792,861	-1342,001
130	2,2689	0,0604	11,5059	-6627,571	-6161,583	-466,0721
140	2,4435	0,0638	9,2483	-6876,93	-7343,089	466,07209
150	2,6180	0,0665	6,9375	-6959,389	-8301,479	1342,0011
160	2,7925	0,0685	4,6163	-6951,479	-9007,632	2056,065
170	2,9671	0,0696	2,3036	-6917,868	-9440,094	2522,1371
180	3,1416	0,0700	0,0000	-6901,632	-9585,722	2684,0022
190	3,3161	0,0696	-2,3036	-6917,868	-9440,094	2522,1371
200	3,4907	0,0685	-4,6163	-6951,479	-9007,632	2056,065
210	3,6652	0,0665	-6,9375	-6959,389	-8301,479	1342,0011
220	3,8397	0,0638	-9,2483	-6876,93	-7343,089	466,07209
230	4,0143	0,0604	-11,5059	-6627,571	-6161,583	-466,0721
240	4,1888	0,0562	-13,6418	-6134,784	-4792,861	-1342,001

Продолжение таблицы Б

250	4,3633	0,0513	-15,5636	-5334,507	-3278,51	-2056,065
260	4,5379	0,0458	-17,1612	-4186,627	-1664,543	-2522,137
270	4,7124	0,0399	-18,3166	-2683,968	-1,76E-12	-2684,002
280	4,8869	0,0337	-18,9153	-857,583	1664,5432	-2522,137
290	5,0615	0,0274	-18,8602	1222,4295	3278,5101	-2056,065
300	5,2360	0,0212	-18,0834	3450,816	4792,8611	-1342,001
310	5,4105	0,0154	-16,5567	5695,4388	6161,5835	-466,0721
320	5,5851	0,0102	-14,2990	7809,0619	7343,0892	466,07209
330	5,7596	0,0059	-11,3790	9643,3572	8301,479	1342,0011
340	5,9341	0,0027	-7,9129	11063,556	9007,6324	2056,065
350	6,1087	0,0007	-4,0577	11962,078	9440,0936	2522,1371
360	6,2832	0,0000	0,0000	12269,568	9585,7222	2684,0022

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 – значения действующих сил на шатунную шейку коленчатого вала

φ	β	V_{pm}	P_{pm}	P	P_j	pS	pN	pK	pT	$M_{кр}$	T	K	P_k	$R_{шш}$
0	0,0000	0,3415	0,0941	-1,0724	-1,1664	-1,0724	0,0000	-1,0724	0,0000	0,0000	0,0000	-4,8623	-8,0831	8,0831
10	0,0486	0,3278	0,1077	-1,0295	-1,1372	-1,0307	-0,0501	-1,0052	-0,2281	-35,9297	-1,0266	-4,5576	-7,7784	7,8458
20	0,0959	0,3108	0,1159	-0,9359	-1,0518	-0,9402	-0,0900	-0,8486	-0,4047	-63,7381	-1,8211	-3,8478	-7,0686	7,2994
30	0,1405	0,2904	0,1273	-0,7895	-0,9168	-0,7974	-0,1116	-0,6279	-0,4914	-77,4011	-2,2115	-2,8471	-6,0679	6,4584
40	0,1810	0,2672	0,1428	-0,5996	-0,7424	-0,6096	-0,1097	-0,3888	-0,4695	-73,9435	-2,1127	-1,7630	-4,9838	5,4131
50	0,2162	0,2415	0,1641	-0,3773	-0,5415	-0,3863	-0,0829	-0,1791	-0,3423	-53,9153	-1,5404	-0,8119	-4,0327	4,3169
60	0,2449	0,2139	0,1939	-0,1342	-0,3281	-0,1383	-0,0335	-0,0380	-0,1329	-20,9389	-0,5983	-0,1725	-3,3933	3,4456
70	0,2662	0,1854	0,2362	0,1200	-0,1162	0,1243	0,0327	0,0103	0,1239	19,5159	0,5576	0,0466	-3,1742	3,2228
80	0,2794	0,1569	0,2973	0,3789	0,0815	0,3941	0,1087	-0,0412	0,3920	61,7371	1,7639	-0,1870	-3,4078	3,8373
90	0,2838	0,1294	0,3877	0,6428	0,2552	0,6696	0,1875	-0,1875	0,6428	101,2474	2,8928	-0,8501	-4,0709	4,9941
100	0,2794	0,1041	0,5231	0,9211	0,3980	0,9582	0,2642	-0,4202	0,8612	135,6416	3,8755	-1,9051	-5,1259	6,4260
110	0,2662	0,0821	0,7252	1,2324	0,5071	1,2774	0,3361	-0,7373	1,0431	164,2867	4,6939	-3,3431	-6,5639	8,0696
120	0,2449	0,0644	1,0125	1,5957	0,5832	1,6448	0,3988	-1,1432	1,1825	186,2402	5,3211	-5,1836	-8,4044	9,9473
130	0,2162	0,0519	1,4212	2,0513	0,6301	2,1002	0,4505	-1,6636	1,2818	201,8852	5,7681	-7,5431	-10,7639	12,2120
140	0,1810	0,0452	2,1899	2,8436	0,6538	2,8909	0,5203	-2,5128	1,4293	225,1132	6,4318	-11,3934	-14,6142	15,9670
150	0,1405	0,0444	3,6688	4,3304	0,6616	4,3735	0,6123	-4,0564	1,6350	257,5063	7,3573	-18,3925	-21,6133	22,8312
160	0,0959	0,0493	5,0268	5,6877	0,6609	5,7139	0,5472	-5,5318	1,4311	225,3984	6,4400	-25,0822	-28,3030	29,0264
170	0,0486	0,0601	4,4977	5,1554	0,6577	5,1615	0,2510	-5,1206	0,6481	102,0722	2,9163	-23,2178	-26,4386	26,5990
180	0,0000	0,0763	3,3701	4,0262	0,6561	4,0262	0,0000	-4,0262	0,0000	0,0000	0,0000	-18,2555	-21,4763	21,4763
190	-0,0486	0,0971	2,5313	3,1889	0,6577	3,1927	-0,1552	-3,1675	-0,4009	-63,1383	-1,8040	-14,3617	-17,5825	17,6748
200	-0,0959	0,1215	1,9392	2,6001	0,6609	2,6121	-0,2501	-2,5288	-0,6542	-103,0392	-2,9440	-11,4661	-14,6869	14,9791
210	-0,1405	0,1484	1,5286	2,1902	0,6616	2,2120	-0,3097	-2,0516	-0,8269	-130,2368	-3,7211	-9,3022	-12,5230	13,0641
220	-0,1810	0,1768	1,2420	1,8957	0,6538	1,9272	-0,3469	-1,6752	-0,9528	-150,0737	-4,2878	-7,5955	-10,8163	11,6352
230	-0,2162	0,2054	1,0390	1,6691	0,6301	1,7089	-0,3665	-1,3537	-1,0430	-164,2710	-4,6935	-6,1377	-9,3585	10,4695
240	-0,2449	0,2334	0,8930	1,4762	0,5832	1,5216	-0,3690	-1,0576	-1,0939	-172,2959	-4,9227	-4,7955	-8,0163	9,4072
250	-0,2662	0,2597	0,8120	1,3191	0,5071	1,3673	-0,3598	-0,7892	-1,1165	-175,8523	-5,0244	-3,5785	-6,7993	8,4542
260	-0,2794	0,2838	0,7470	1,1450	0,3980	1,1912	-0,3285	-0,5223	-1,0706	-168,6132	-4,8175	-2,3682	-5,5890	7,3787
270	-0,2838	0,3050	0,6820	0,9371	0,2552	0,9762	-0,2733	-0,2733	-0,9371	-147,5991	-4,2171	-1,2393	-4,4601	6,1381
280	-0,2794	0,3231	0,6170	0,6985	0,0815	0,7267	-0,2004	-0,0760	-0,7227	-113,8237	-3,2521	-0,3448	-3,5656	4,8259
290	-0,2662	0,3377	0,5520	0,4358	-0,1162	0,4517	-0,1188	0,0374	-0,4501	-70,8957	-2,0256	0,1694	-3,0514	3,6625
300	-0,2449	0,3489	0,4870	0,1589	-0,3281	0,1638	-0,0397	0,0451	-0,1575	-24,8041	-0,7087	0,2043	-3,0165	3,0986

Продолжение таблицы В

310	-0,2162	0,3566	0,4220	-0,1195	-0,5415	-0,1223	0,0262	-0,0567	0,1084	17,0711	0,4877	-0,2571	-3,4779	3,5119
320	-0,1810	0,3608	0,3570	-0,3854	-0,7424	-0,3918	0,0705	-0,2499	0,3018	47,5270	1,3579	-1,1332	-4,3540	4,5608
330	-0,1405	0,3615	0,2920	-0,6248	-0,9168	-0,6310	0,0883	-0,4969	0,3889	61,2523	1,7501	-2,2531	-5,4739	5,7469
340	-0,0959	0,3587	0,2270	-0,8248	-1,0518	-0,8286	0,0794	-0,7479	0,3567	56,1754	1,6050	-3,3912	-6,6120	6,8040
350	-0,0486	0,3524	0,1620	-0,9752	-1,1372	-0,9764	0,0475	-0,9522	0,2161	34,0356	0,9724	-4,3173	-7,5381	7,6006
360	0,0000	0,3426	0,0980	-1,0684	-1,1664	-1,0684	0,0000	-1,0684	0,0000	0,0000	0,0000	-4,8445	-8,0653	8,0653

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 – Определение суммарных сил, действующих по каждому лучу диаграммы износа шатунной шейки

φ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0							8,083	8,083	8,083	8,083	8,083	8,083
30	6,458	6,458	6,458						6,458	6,458	6,458	6,458
60	3,446									3,446		3,446
90	4,994	4,994	4,994							4,994		4,994
120	9,947	9,947									9,947	9,947
150	22,831	22,831	22,831								22,831	22,831
180	21,476	21,476	21,476								21,476	21,476
210	11,635	11,635										11,635
240	9,407	9,407									9,407	9,407
270	6,138	6,138									6,138	6,138
300	3,099	3,099	3,099									3,099
330	5,747	5,747	5,747			5,747	5,747	5,747	5,747		5,747	5,747
Σ	105,179	101,733	64,605	0,000	0,000	5,747	13,830	13,830	20,288	22,981	90,088	113,262