



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

Институт энергетики и электротехники  
(институт, факультет)  
Энергетические машины и системы управления  
(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ» \_\_\_\_\_ Д.А. Павлов  
(подпись) (И.О. Фамилия)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## ЗАДАНИЕ

### на выполнение бакалаврской работы

Студент Лазарев Николай Николаевич

1. Тема работы Автомобильный двигатель с двухтопливной системой питания

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

3. Исходные данные к работе Двигатель на базе ВАЗ 11186,  $iV_h=1,5$  л, Степень сжатия  $\varepsilon = 12$ . Скоростные режимы работы:  $n_{\min} = 1000 \text{ об/мин}$ ,  $n_M = 3200 \text{ об/мин}$ ,  $n_N = 5600 \text{ об/мин}$ ,  $n_{\max} = 6000 \text{ об/мин}$

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

Введение;

Перспективы использования природного газа в ДВС

Тепловой расчет двигателя работающего на сжатом природном газе;

Тепловой баланс

Расчет кинематики двигателя;

Расчет динамики двигателя;

Модернизация системы впрыска газа

Безопасность и экологичность объекта проектирования

Расчет основных деталей двигателя и систем двигателя;

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала

Продольный и поперечный разрез двигателя - 2 листа формата А1

ВСХ - 1 лист формата А1

Диаграммы теплового расчета - 1 лист формата А1

Диаграмма кинематического и динамического расчетов - 2 листа формата А1

Схема двухтопливного питания двигателя - 1 лист формата А1;

Сборочный чертеж газовой рампы в сборе - 1 лист формата А1;

6. Консультант по нормоконтролю – д.т.н., профессор Егоров А.Г.

По разделу "Безопасность и экологичность работы"

к.т.н., профессор Фесина М.И.

7. Дата выдачи задания « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Руководитель бакалаврской работы \_\_\_\_\_

(подпись)

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_

(подпись)

Н.Н. Лазарев

(И.О. Фамилия)

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
 высшего образования  
 «Тольяттинский государственный университет»  
Институт энергетики и электротехники  
Энергетические машины и системы управления

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ» \_\_\_\_\_ Д.А. Павлов  
 (подпись) (И.О. Фамилия)  
 « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН  
 выполнения бакалаврской работы**

Студента Лазарев Николай Николаевич  
 по теме Автомобильный двигатель с двухтопливной системой питания

№ этап-пов работы	Содержание этапов работы	Форма представления материала	Плановый срок выполнения этапа и представления его на контроль	Планируемый объем выполнения, %	Фактический объем выполнения, %	Отметка о выполнении
1	Тепловой расчет двигателя <i>Чертеж диаграмм теплового расчета; ВСХ</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	30 апреля 2016 г.	90%		
2	Расчет кинематики и динамики двигателя <i>Чертеж диаграмм кинематического и динамического расчетов</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	5 мая 2016 г.	90%		
3	Расчет основных деталей двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	11 мая 2016 г.	90%		
4	Расчет механизмов и систем двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	15 мая 2016 г.	90%		
5	Описание конструкции спроектированной установки	Раздел записки Графический лист	20 мая 2016 г.	80%		
6	Безопасность и экологичность работы	Раздел записки	10 июня 2016 г.	90%		
7	Оформление и доработка пояснительной записки и листов графической части с учетом замечаний, полученных во время предварительной защиты	Сброшюрованная записка и подписанные чертежи	10 июня 2016 г.	100%		

Студент \_\_\_\_\_ Н.Н. Лазарев  
 (подпись) (И.О. Фамилия)  
 Руководитель \_\_\_\_\_ В.В. Смоленский  
 (подпись) (И.О. Фамилия)  
 « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## АННОТАЦИЯ

Цель работы – произвести расчет 4-х тактного 4-х цилиндрического бензинового двигателя с эффективной мощностью  $N_e = 57$  кВт при номинальной частоте вращения коленчатого вала  $n = 5200$  об/мин, работающего на сжатом природном газе.

В процессе работы выполнены оценочные расчеты параметров работы ДВС, выходных характеристик. Приводятся кинематический и динамический расчеты, расчеты на прочность основных деталей.

В работе показана безопасность и экологичность проекта.

На основании расчетов построены графики и диаграммы, приведенные на 4-х палкатах диаграмм. Выполнены чертежи поперечного и продольного разрезов проектируемого двигателя, принятого за прототип, а также системы питания газом.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	8
1 Перспективы использования природного газа в ДВС.....	9
1.1 Анализ способов конвертации жидкотопливных двигателей в двигатели, питаемые природным газом	9
1.2 Системы впрыска газа	11
2 Тепловой расчет и тепловой баланс двигателя работающего на сжатом природном газе.....	15
2.1 Топливо.....	15
2.2 Параметры рабочего тела.....	16
2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы.....	17
2.4 Расчет впуска.....	18
2.5 Расчет процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси.....	18
2.6 Термодинамический расчёт процесса сгорания.....	21
2.7 Расчет процессов расширения и выпуска.....	24
2.8 Индикаторные показатели рабочего цикла.....	26
2.9 Расчет эффективных показатели двигателя.....	26
2.10 Основные параметры цилиндра двигателя.....	28
3 Тепловой баланс.....	30
4 Кинематический расчет.....	33
5 Динамический расчет двигателя работающего на газе.....	34
5.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма	34
5.2 Силы инерции .....	35
5.3 Суммарные силы .....	35
5.4 Крутящие моменты .....	36
5.5 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала..	37
5.6 Силы, действующие на колено вала .....	38

5.7 Силы, действующие на коренные шейки .....	39
5.8 Уравновешивание двигателя .....	41
6 Модернизация системы впрыска газа .....	42
6.1 Расчет электромагнитной форсунки.....	41
6.2 Обзор существующих конструкций систем питанием газом	47
7 Безопасность и экологичность проектирования.....	50
7.1 Анализ опасных и вредных факторов ...	50
7.2 Экологические характеристики газовых двигателей .....	52
7.3 Техника безопасности при работе с газовым топливом .....	53
7.4 Требования пожарной безопасности при эксплуатации, техническом обслуживании и хранения газобаллонных автомобилей	54
Заключение .....	58
Список использованных источников.....	59
Приложение А - Результаты теплового расчета.....	61
Приложение Б - Результаты кинематического расчета.....	70
Приложение В - Результаты динамического расчета.....	72
Приложение Г - Результаты расчетов сил действующих в КШМ.....	77
Приложение Д – Расчет основных деталей двигателя .....	88
Д.1 Расчет поршневой группы.....	88
Д.2 Расчет шатунной группы.....	94
Д.3 Расчет коленчатого вала.....	104
Д.4 Расчёт механизма газораспределения двигателя.....	111
Приложение Е – Спецификация сборочного чертежа.....	120

## ВВЕДЕНИЕ

Природный газ, как моторное топливо имеет огромное преимущество перед традиционным топливом с точки зрения сокращения выбросов вредных веществ в атмосферу (как показано в таблицах); в настоящее время это огромное преимущество все больше осознается мировым сообществом.

Целью сторонников роста использования природного газа для транспорта является высвобождение традиционно дорогих видов топлива, чтобы извлечь наибольшую выгоду как с точки зрения экономии нефтепродуктов, так и оздоровления окружающей среды.

Газовая промышленность играет ключевую роль в достижении такой цели. Ведь речь идет об использовании собственного продукта отрасли.

Использование газа на транспорте набрало темпы со времени МГК – 94 в Милане, хотя общая численность автотранспорта на природном газе в мировом масштабе составляет только 0,1% от общего количества.

Нельзя обойти вниманием создание дополнительного рынка природного газа, используемого в качестве моторного топлива – 13 млрд.м<sup>3</sup> в год. Проблема использования природного газа на автотранспорте приобрел мировой характер. Интенсивно развиваются международные перевозки грузов и людей.

Озабоченность проблемой энергоресурсов привела к появлению ряда демонстрационных программ по использованию новых источников энергии для транспорта. Хотя большая часть усилий была направлена на разработку электромобиля, прогресс с природным газом опередил в значительной мере интерес ко всем другим альтернативным топливам. Можно со всей ответственностью сказать, что природный газ теперь можно рассматривать не просто как альтернативное топливо, но имеет долгосрочную перспективу

# 1 Перспективы использования природного газа в ДВС

## 1.1 Анализ способов конвертации жидкотопливных двигателей в двигатели, питаемые природным газом

Анализ способов конвертации жидкотопливных двигателей в двигатель питаемые природным газом, выполнен с использованием расчетных оценок экспериментов.

До настоящего времени использование газовых двигателей невелик. При малых масштабах производства экономически оправдано не создание оригинальных конструкций, а конвертация жидкотопливных двигателей обеспечением их максимальной унификации с базовыми жидкотопливными двигателями.

В случае бензиновых двигателей для легковых автомобилей наиболее часто применяется концепция битопливного двигателя. Хотя эта концепция имеет ряд бесспорных преимуществ, при ее принятии не используются полной мере преимущества высокого октанового числа природного газа.

В случае внешнего смесеобразования применение битопливной концепции связано с неизбежным снижением мощности. В таблице 1.2 приведены некоторые результаты компьютерного моделирования параметров циклов стехиометрических бензиновых и газовых двигателей. Моделирование выполнено для случая центральной и распределенной подачи бензина. В последнем случае не учитывалось влияние на показатели цикла испарения топлива в цилиндре. Учтено, однако, что в случае центрального впрыска подогрев свежего заряда меньше, так как часть подводимой теплоты затрачивается на испарение бензина.

Как видно из таблицы 1.2, к.п.д. цикла бензинового и газового двигателя близки между собой, особенно в случае одинаковой температуры поступающей в цилиндры свежей смеси, несмотря на заметные отличия в составе рабочего тела. Снижение к.п.д. в газовой версии не более 1%. Снижение среднего

давления цикла много больше, особенно если сравнивать с центральной подачей бензина. В этом случае снижение  $P_{ц}$  составляет 13,78-14,52%. Если сравнивать с бензиновым двигателем, имеющим распределенную подачу топлива, снижение  $P_{ц}$  составит 9,53-9,9%. Снижение среднего эффективного давления неизбежно выше вследствие уменьшения механического к.п.д.

Таблица 1.2 - результаты компьютерного моделирования параметров циклов стехиометрических бензиновых и газовых двигателей

Параметры цикла	Применяемое топливо и способ его подачи					
	Бензин, центральная подача	Бензин, распределенный	Газ, центральная подача	Бензин, центральная подача	Бензин, распределенный впрыск	Газ, центральная подача
$n, \text{мин}^{-1}$	4500	4500	4500	5600	5600	5600
$\alpha$	1	1	1	1	1	1
$P_s, \text{МПа}$	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097
$T_s, \text{К}$	295	310	310	290	305	305
$Q_b, \text{Дж}$	1377	1316	1190	1370	1314	1196
$Q_w, \text{Дж}$	156	153	149	147	144	145
$P_i, \text{МПа}$	1,212	1,151	1,036	1,233	1,175	1,063
$\eta_i$	0,373	0,371	0,369	0,372	0,369	0,367
$T_{рез}, \text{К}$	1373	1383	1383	1407	1418	1439
$T_{ср.масс}, \text{К}$	1312	1319	1285	1357	1364	1321
$T_{т.ср}, \text{К}$	1124	1137	1122	1152	1166	1143
$\alpha_{т.ср}, \text{Вт/м}^2 \text{К}$	474	464	451	551	540	535
$T_{рез} \alpha_{т.ср}, \text{Вт/м}^2$	650802	641712	623733	775257	765720	762670
$\eta_v^*$	0,886	0,847	0,844	0,881	0,845	0,849
* - коэффициент наполнения определяется по смеси при условиях окружающей среды						

Снижение мощности газового двигателя связано с:

1. Уменьшением подачи в цилиндры воздуха вследствие заметного большего парциального объема природного газа по сравнению с парциальным объемом бензина, даже если в последнем случае предположить полное испарение бензина до поступления в цилиндр. Согласно компьютерному

моделированию поступление воздуха в цилиндр газового двигателя на номинальном режиме меньше на 11,2% по сравнению с поступлением воздуха в цилиндры двигателя с центральной подачей бензина.

2. Несколько меньшим значением теплотворной способности газозвушной смеси (примерно на 2% при содержании метана около 99%).

3. Несколько меньшими к.п.д. цикла вследствие большего содержания в продуктах сгорания водяного пара, обладающего высокой теплоемкостью.

4. Снижением механического к.п.д., в основном, вследствие меньшего значения среднего давления цикла.

Для того, чтобы избежать снижения мощности в случае газовой модификации можно использовать наддув в сочетании с реализацией концепции «двигателя, работающего на бедных смесях». Эти решения могут оказаться экономически оправданными только в случае резкого повышения спроса на легковые автомобили с газовыми двигателями.

Существенному снижению концентрации вредных выбросов с ОГ в газовом двигателе способствует возможность использования нейтрализаторов, не опасаясь за их надежную работу, так как в случае, если приняты меры, предотвращающие попадание масла в камеру сгорания, в выпускных газах газового двигателя удельное содержание твердых частиц  $< 0,05$  г/кВт.ч. Для удовлетворения нормам по выбросам необходимо использовать окислительный нейтрализатор.

## 1.2 Системы впрыска газа

Все конструкции газовых систем питания можно условно разбить на три поколения:

- первое - механические системы с вакуумным управлением;
- второе - механические системы с электронным управлением;
- третье - системы впрыска газа.

Лямбда-зонд - датчик содержания несгоревшего кислорода в

отработавших газах. Устанавливается в системе выпуска перед каталитическим нейтрализатором. По информации от лямбда-зонда электронный блок управления (ЭБУ) двигателем поддерживает стехиометрический состав горючей смеси.

Управление с обратной связью - принцип управления системой (от отработавших газов - к составу смеси), при котором кислородный датчик определяет состав отработавших газов и на основании полученных от него данных ЭБУ поддерживает нормальный стехиометрический состав горючей смеси, поступающей в двигатель.

Управление без обратной связи - принцип управления системой, осуществляемый механически без контроля конечного результата процесса сгорания по составу отработавших газов.

Электрический дозатор газа - устройство, работающее по принципу шагового электродвигателя. Изменение положения его поршня по сигналам от ЭБУ обеспечивает оптимальный состав газовой смеси, подаваемой в цилиндры двигателя.

Электронный блок управления (ЭБУ) - самонастраивающееся электронное устройство, управляющее подачей газа на автомобилях, оборудованных лямбда-зондом и каталитическим нейтрализатором. Обеспечивает стехиометрический состав смеси на всех режимах работы двигателя. Кроме того, ЭБУ автоматически закрывает запорные клапаны в случае аварийного повреждения газовой магистрали или при остановке двигателя.

Эмулятор - электронное устройство, имитирующее работу бензиновых форсунок при переводе двигателя на газовое топливо.

Эффект хлопка - воспламенение рабочей смеси во впускной трубе двигателя или в корпусе воздушного фильтра. Хлопок может возникнуть при неисправности системы зажигания или при чрезмерном обеднении горючей смеси на переходных режимах работы двигателя.

Предохранительный обратный клапан - устройство, сбрасывающее

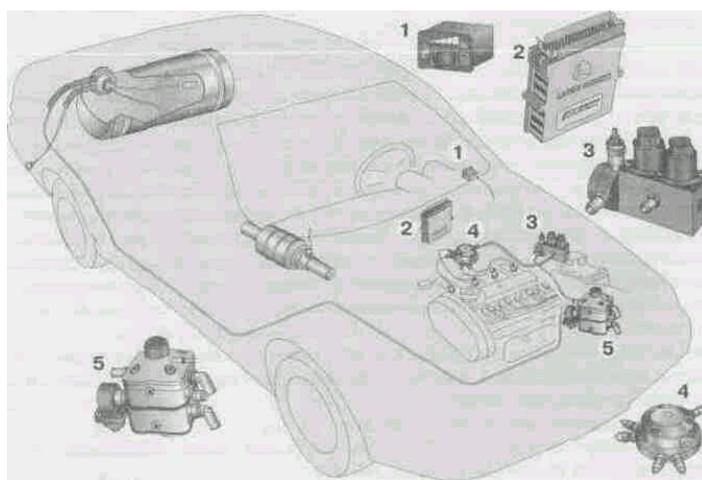
излишнее давление во впускной трубе в момент хлопка газовой смеси.

### Основные элементы и узлы

Система IGS с впрыском газа отличается пониженным расходом газа по сравнению с системами предыдущих поколений. Ее без особых затруднений можно смонтировать на автомобили с инжекторными двигателями. Кроме того, при использовании такой системы динамические характеристики автомобиля при работе на газе максимально приближаются к тем же параметрам автомобиля, работающего на бензине. По принципу подачи газа система IGS наиболее близка к современным бензиновым системам.

Система постоянного впрыска газа обеспечивает эффективную подачу топлива, контролирует смесеобразование и тем самым оптимизирует расход газа на всех режимах работы двигателя. Все ее элементы адаптированы для совместной работы с современными бензиновыми системами питания. Базой для определения блока управления точного количества газа, который через распределитель и специальные газовые форсунки подается непосредственно к впускному клапану каждого цилиндра, служат частота вращения коленчатого вала и абсолютное давление во впускной трубе.

Электронный блок управления (ЭБУ) 2 (рисунок 1.1) анализирует состав отработавших газов, получая от лямбда-зонда информацию о полноте сгорания газовой смеси, и в соответствии с полученными данными корректирует подачу газа в двигатель.



1 - переключатель вида топлива с указателем уровня газа в баллоне; 2 - электронный блок управления; 3 - дозирующий узел; 4 - распределитель; 5 - редуктор

Рисунок 1.1 - Расположение элементов системы IGS на автомобиле

ЭБУ использует также сигнал датчика положения дроссельной заслонки для обогащения смеси на переходных режимах и отключения подачи газа на режиме торможения двигателем. В сферу внимания ЭБУ входят сигналы датчиков абсолютного давления во впускной трубе и частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Получив всю необходимую информацию, ЭБУ определяет требуемую позицию открытия дозирующего узла и положение блокирующего клапана.

Дозирующий узел 3 по сигналам ЭБУ открывается на определенную величину, увеличивая количество газа при повышении частоты вращения коленчатого вала. И, наоборот, при уменьшении частоты блокирующий клапан устройства уменьшает подачу газа для усиления эффекта торможения двигателем и уменьшения количества вредных выбросов.

Распределитель 4 подает газ в каждый цилиндр двигателя через специальные форсунки, установленные во впускной трубе вблизи впускных клапанов.

Редуктор 5 оснащен датчиком температуры теплоносителя, определяющим момент переключения питания двигателя с бензина на газ. Двигатель всегда пускают и прогревают на бензине, и как только запрограммированная температура будет достигнута, ЭБУ переводит двигатель на питание газом.

Газ поступает из баллона в редуктор. Распределитель не только разделяет поток газа по цилиндрам, но и поддерживает на постоянном уровне его оптимальное давление в участке системы после дозирующего узла. При увеличении нагрузки на двигатель редуктор увеличивает давление газа на входе в дозирующий узел, чтобы гарантированно обеспечить подачу требуемого на этом режиме объема газа, в то время как на выходе из дозатора давление остается неизменным.

## 2 Тепловой расчет двигателя работающего на сжатом природном газе

Исходные данные: Двигатель ВАЗ 11186 четырехцилиндровый,  $i = 4$   
 $iV_h = 1,5$  л, частота вращения коленчатого вала  $n = 5600$  об/мин. Степень сжатия  
 $\varepsilon = 12$ . Скоростные режимы работы:  $n_{\min} = 1000$  об/мин,  $n_M = 3200$  об/мин,  
 $n_N = 5600$  об/мин,  $n_{\max} = 6000$  об/мин

### 2.1 Топливо

Таблица 5 - Средний элементарный состав сжатого природного газа

Содержание м3	
Метан CH <sub>4</sub>	90
Этан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,96
Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,17
Бутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,55
Тяж уг-ды C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	0,42
Водород H <sub>2</sub>	0,14
Окс.угл CO	0,14
Угл.газ CO <sub>2</sub>	0,47
Азот N <sub>2</sub>	5,15

Молекулярная масса газа  $m_T = 15,01$  кг/кмоль.

Низшая теплота сгорания топлива

$$\begin{aligned}
 H_u' = & 12,8CO + 10,8H_2 + 35,7CH_4 + 63,3C_2H_6 + 90,9C_3H_8 + 119,7C_4H_{10} + \\
 & + 146,2C_5H_{12} = 12,8 \cdot 0,0014 + 10,8 \cdot 0,0014 + 35,7 \cdot 0,9 + 63,6 \cdot 0,0296 + 90,9 \cdot 0,0017 + \\
 & + 119,7 \cdot 0,0055 + 146,7 \cdot 0,0042 = 35,46 \text{ МДж/м}^3 = 35\,460 \text{ кДж/м}^3. \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Коэффициент избытка воздуха принимаем  $\alpha = 1$

Числовой расчет будет проводиться для всех режимов, окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в табличной форме.

## 2.2 Параметры рабочего тела

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива:

а) в киломолях на 1 кг топлива

$$L'_0 = \frac{1}{0,21} * \sum \left( n + \frac{m}{4} - \frac{r}{2} \right) \cdot C_n H_m O_r = 9,373 \frac{\text{мольвоздуха}}{\text{мольгазообртопл}}, \text{ или } \frac{\text{м}^3 \text{возд}}{\text{м}^3 \text{топл}} \quad (2.2)$$

где 0,21- объёмное содержание  $O_2$  в 1 кмоль воздуха.

Количество горючей см./кмоль газообразного топлива

$$M_1' = \alpha L_0' + 1 = 1 \cdot 9,373 + 1 = 11,3 \text{ кмоль} \quad (2.3)$$

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

- углекислого газа

$$\begin{aligned} M'_{CO_2} &= \sum n(C_n H_m O_r) = 1 \cdot 0,9 + 2 \cdot 0,0296 + 3 \cdot 0,0017 + 4 \cdot 0,0055 + 5 \cdot 0,0042 + 0,0014 + 0,0047 = \\ &= 1,02 \text{ кмоль } CO_2 / \text{кмоль топл}; \end{aligned} \quad (2.4)$$

- водяного пара

$$\begin{aligned} M'_{H_2O} &= \sum \frac{m}{2} (C_n H_m O_r) = \frac{4}{2} \cdot 0,9 + \frac{6}{2} \cdot 0,0296 + \frac{8}{2} \cdot 0,0017 + \frac{10}{2} \cdot 0,0055 + \frac{12}{2} \cdot 0,0042 + \frac{2}{2} \cdot 0,0014 = \\ &= 1,9623 \text{ кмоль}; \end{aligned} \quad (2.5)$$

- кислорода

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

- азота

$$M'_{N_2} = 0,792\alpha L'_O + N_2 = 0,792 \cdot 1 \cdot 9,5 + 0,0515 = 7,42 \text{ кмоль}. \quad (2.7)$$

Общее число продуктов сгорания

$$M'_2 = 1,02 + 1,9623 + 0,02 + 7,42 = 10,43 \text{ кмоль}. \quad (2.8)$$

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 6

Таблица 6 - Параметры рабочего тела

Параметры	Рабочее тело			
	1000	3200	5600	6000
$n, \text{ мин}^{-1}$	1000	3200	5600	6000
$\alpha$	1	1	1	1
$M'_1, \text{ кмоль}$	11,3	11,3	11,3	11,3
$M'^{CO_2}, \text{ кмоль}$	1,02	1,02	1,02	1,02
$M'^{H_2O}, \text{ кмоль}$	1,9623	1,9623	1,9623	1,9623
$M'_{O_2}, \text{ кмоль}$	0	0	0	0
$M'_{N_2}, \text{ кмоль}$	7,9526	7,9526	7,9526	7,9526
$M'_2, \text{ кмоль}$	10,43	10,43	10,43	10,43

### 2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы

Давление и температура окружающей смеси при работе двигателя без наддува  $p_k = p_0 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $T_k = T_0 = 293 \text{ К}$ .

Температура остаточных газов, принимаем  $T_f = 950 \text{ К}$ .

Давление остаточных газов  $p_r$ , можно принять на номинальном скоростном режиме.  $P_r=0,118$  МПа.

Величины давлений остаточных газов на остальных режимах работы двигателя можно подсчитать по формуле

$$p_r = p_0 (1,035 + A_p \cdot 10^{-8} \cdot n^2), \quad (2.9)$$

где  $A_p = (p_r - p_0 \cdot 1,035) \cdot 10^8 / (n^2 n_N p_0)$ ,  $n_N$  - частоты вращения коленчатого вала на номинальном режиме,  $\text{мин}^{-1}$ .

## 2.4 Процесс впуска

Температура подогрева свежего заряда.

$$\Delta T = A_T (110 - 0,0125n), \quad (2.10)$$

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

Плотность заряда на впуске

$$p_0 = p_0 \cdot 10^6 / (R_B T_0) = 0,1 \cdot 10^6 / (287 \cdot 293) = 1,189 \text{ кг/м}^3, \quad (2.11)$$

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

Потери давления на впуске.

Принимаем снижение сопротивления  $\beta^2 + \xi_{ВП} = 2,8$  и  $\omega_{ВП} = 95$  м/с.

Тогда  $\Delta P_a$  на всех скоростных режимах двигателя рассчитываем по формуле

$$\Delta P_a = (\beta^2 + \xi_{ВП}) \cdot A_n^2 n^2 p_k \cdot 10^{-6} / 2, \quad (2.12)$$

где  $A_n = \omega_{ВП} / n_N$ .

Потери давления на впуске двигателя при  $n=5600$  мин<sup>-1</sup>,  
 $A_n=95/5600=0,016964286$  МПа, тогда

$$\Delta P_a = 2,8 \cdot 0,01696^2 \cdot 5600^2 \cdot 1,189 \cdot 10^{-6} / 2 = 0,0150 \text{ МПа.}$$

Давление в конце впуска

$$P_a = p_0 - \Delta p = 0,1 - 0,0150 = 0,0850 \text{ МПа} \quad (2.13)$$

Коэффициент остаточных газов

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{\varphi_{оч} P_r}{\varepsilon \varphi_{доз} P_a - \varphi_{оч} P_r} \quad (2.14)$$

На всех режимах  $\varphi_{доз}$  можно принять равной 1. Коэффициент очистки принимаем  $\varphi_{оч} = 1$ .

При  $n = 5600$  об/мин

$$\gamma_r = \frac{293 + 10}{950} \cdot \frac{0,1180}{12 \cdot 1 \cdot 0,0850 - 0,118} = 0,041 \text{ МПа.}$$

Температура в конце впуска при  $n=5600$  об/мин

$$T_a = (T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r) / (1 + \gamma_r) = (293 + 10 + 0,041 \cdot 950) / (1 + 0,041) = 329 \text{ К} \quad (2.15)$$

Коэффициент наполнения при  $n=5600$  об/мин:

$$\eta_v = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{p_0} (\varphi_{доз} \varepsilon P_a - \varphi_{оч} P_r) \quad (2.16)$$

$$\eta_v = \frac{293}{293 + 10} \cdot \frac{1}{12 - 1} \cdot \frac{1}{0,1} (1 \cdot 12 \cdot 0,085 - 0,118) = 0,792.$$

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 8.

Таблица 8 – Параметры процесса впуска и газообмена

Параметры	Процесс впуска и газообмена			
$n$ , мин <sup>-1</sup>	1000	3200	5600	6000
$\alpha$	1	1	1	1
$T_r$ , К	850	900	950	970
$P_r$ , МПа	0,1040	0,1082	0,1180	0,1200
$\Delta T$ , °С	24,3	18,1	10	8,7
$\Delta p_a$ , МПа	0,0005	0,004	0,015	0,017
$p_a$ , МПа	0,1	0,096	0,085	0,083
$\Phi_{\text{доз}}$	1	1	1	1
$\gamma_r$	0,036	0,036	0,042	0,043
$T_a$ , К	335	331	329	330
$\eta_v$	0,915	0,891	0,793	0,771

## 2.5 Расчет процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси

Коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси

$$\mu = (\mu_o + \gamma_r) / (1 + \gamma_r) \quad (2.20)$$

Значение показателя политропы сжатия находится методом последовательных приближений

$$n_1 = 1 + \frac{8.314}{20.16 + 1.738 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{n_1-1} + 1) \cdot T_a} \quad (2.21)$$

Давление, температура и удельный объём в конце сжатия:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1} \quad \text{МПа} \quad (2.22)$$

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} \quad \text{К} \quad (2.23)$$

Удельный объём, давление и температура рабочего тела в момент воспламенения, при угле опережения зажигания  $\Theta$ ,

$$V_y = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left[ 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left[ \left\{ 1 + \frac{1}{\lambda} \right\} - \left\langle \cos(\Theta) + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 (\sin(\Theta))^2} \right\rangle \right] \right]; \quad (2.24)$$

$$P_y = P_a \left( \frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1}; \text{ МПа}; \quad T_y = T_a \left( \frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1 - 1}; \text{ К}; \quad (2.25)$$

Результаты расчета процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси приведены в таблице 12.

Таблица 12 - Давление, температура и удельный объём в конце сжатия и воспламенения:

п, мин <sup>-1</sup>	μ	n <sub>1</sub>	P <sub>c</sub> , МПа	T <sub>c</sub> , К	Θ°ПКВ	V <sub>y</sub> , м <sup>3</sup> /кг	P <sub>y</sub> , МПа	T <sub>y</sub> , К
900	1,050601	1,3702	2,337381	828,9211	12	0,11026	1,967552	791,23
2000	1,03894	1,374725	2,273893	824,503	14	0,117763	1,80708	774,445
3500	1,039063	1,37283	2,194925	805,3634	16	0,124724	1,639063	743,95
5000	1,038972	1,37496	2,086875	806,2679	19	0,141498	1,405866	723,92
5600	1,050855	1,37538	2,045133	804,9556	24	0,164719	1,143217	686,809
Прототип								
900	1,060488	1,37058	2,364652	823,3493	15	0,115161	1,823871	767,52
2600	1,050596	1,372	2,259369	811,433	20	0,134725	1,469604	722,15
3700	1,050718	1,3728	2,180028	808,4022	23	0,150917	1,267603	697,78
5000	1,050909	1,37378	2,122703	795,8551	26	0,166039	1,098591	665,27
5600	1,050917	1,3753	2,044748	797,5824	28	0,182916	0,977444	652,08

## 2.6 Термодинамический расчёт процесса сгорания

Коэффициент выделения теплоты δ, учитывающий неполное сгорание топлива;

$$\delta = \frac{[H_u - 11995(1 - \alpha)L_o]}{H_u}, \quad (2.26)$$

Коэффициент эффективности сгорания топлива ξ:

$$\xi = \delta * \Psi; \quad (2.27)$$

Удельная теплота сгорания рабочей смеси

$$q_z = \frac{\xi * H_u}{(1 + \gamma_r)(\alpha * l_0 + 1)}; \text{ кДж/кг}. \quad (2.28)$$

$$E_2 = \left( 0.002 \frac{\varepsilon}{V_a} \right) q_z; \text{МПа} \quad (2.29)$$

Давление газов в процессе сгорания

$$P_2 = \frac{E_2 \Delta X_{1-2} + P_1 \cdot (K_{1-2} \psi(\varphi'_1) - \psi(\varphi'_2))}{K_{1-2} \psi(\varphi'_1) - \psi(\varphi'_2)}, \quad (2.30)$$

где 
$$\psi(\varphi') = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left[ \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left( \cos \varphi' + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi'} \right) \right]; \quad (2.31)$$

Доля топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке:

$$X_{1-2} = \exp \left[ -6.908 \left[ \frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[ -6.908 \left[ \frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right], \quad (2.32)$$

Среднее значение доли топлива сгоревшего на участке 1-2;

$$\Delta X_{1-2} = \frac{1}{2} \left[ \exp \left[ -6.908 \left[ \frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[ -6.908 \left[ \frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] \right] \quad (2.33)$$

Отношение средних теплоёмкостей рабочего тела на участке 1-2.

$$k_{1-2} = 1.259 + \left[ 76.7 - \left( 13.6 - \frac{14.2}{\alpha} \right) x_{1-2} \right] \frac{1}{T_{1-2}} - \left( 0.0665 - \frac{0.0245}{\alpha} \right) x_{1-2} \quad (2.34)$$

Фактор теплоёмкостей  $K_{1-2}$

$$K_{1-2} = \frac{k_{1-2} + 1}{k_{1-2} - 1} \quad (2.35)$$

Средняя температура  $T_{1-2}$  на участке 1-2. Здесь температура  $T_2$

определяется методом пробных подстановок.

$$T_{1-2} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2.36)$$

Определив  $k_{1-2}$  производят все вычисления для определения  $P_2$ , а затем вычисляют температуру  $T_2$  газов в процессе сгорания по следующей зависимости:

$$T_2 = \frac{T_y P_2 \psi(\varphi'_2)}{P_y \psi(\varphi'_2) \mu_{1-2}}, \quad (2.37)$$

где:

$$\Psi(\varphi') = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} * \sigma; \quad (2.38)$$

$$\sigma = \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) - \left[\cos(\varphi') + \frac{1}{\lambda} * \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot (\sin(\varphi'))^2}\right]; \quad (2.39)$$

средний на рассматриваемом участке коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси,

$$\mu_{1-2} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} - \mu_1 = 1 + \frac{(\mu_{0\max} - 1) \left[1 - \exp\left[-6.908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_z}\right]^{m+1}\right]\right]}{1 + \gamma_r}. \quad (2.40)$$

Доля выгоревшего топлива  $\chi$  рассчитывается по уравнению выгорания:

$$\chi = 1 - \exp\left[-6.908 \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}\right]. \quad (2.41)$$

Основные коэффициенты термодинамического расчета приведены в

таблице 13.

Таблица 13 - Коэффициенты термодинамического расчета

п, мин <sup>-1</sup>	$\delta$	$\Psi$	$\xi$	q <sub>z</sub> , Дж/кг	E <sub>2</sub> , МПа	$\varphi_z$ , град, пкв.	m
900	1	0,87	0,87	2311,506	47,544497	28	2
2000	1	0,9	0,9	2291,177	45,990604	36	2.2
3500	1	0,93	0,93	2375,011	47,11143	42	2.4
5000	1	0,95	0,95	2420,459	45,59819	50	2.6
5600	1	0,99	0,99	2643,545	48,99202	54	2.8
Прототип							
900	0.9435	0,81	0,764277	2095,696	43,98798	40	3.1
2600	1	0,86	0,86	2284,733	46,40438	48	3.2
3700	1	0,96	0,96	2556,549	50,28953	55	3.3
5000	1	0,97	0,97	2592,875	50,44589	58	3.4
5600	1	0,99	0,99	2646,799	49,49647	62	3.5

Расчёт текущих параметров процесса сгорания проводится с определённым шагом – 1<sup>0</sup> ПКВ и приведен в Приложении А и на плакате теплового расчета.

## 2.7 Расчет процессов расширения и выпуска

Степень последующего расширения при V<sub>z</sub>

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

Средний показатель политропы расширения находится методом последовательных приближений из уравнения:

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

Параметры в конце процесса расширения как политропного процесса

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

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

Текущие значения удельного объёма, давления и температуры в процессе расширения находят по следующим формулам:

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

$$P_{PT} = P_b \cdot \left( \frac{V_a}{V_T} \right)^{n_2}; \quad T_{PT} = T_b \left( \frac{V_a}{V_T} \right)^{n_2 - 1} \quad (2.49)$$

Для оценки правильности выбора значения температуры отработавших газов, произведём проверку

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

погрешность расчёта  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{100(T_r - T_r')}{T_r} \quad \% \quad (2.52)$$

Результаты расчета процесса расширения приведены в таблице 14.

Таблица 14 - Расчет процесса расширения и выпуска

n, мин <sup>-1</sup>	V <sub>z</sub> , м <sup>3</sup>	T <sub>z</sub> , К	P <sub>z</sub> , МПа	δ	n <sub>2</sub>	P <sub>b</sub> , МПа	T <sub>b</sub> , К	T <sub>r</sub> , К	Δ, %
900	0,120284	3019,243	7,230007	8,48804	1,177	0,58329	2067,555	1163,224	0,2779
2000	0,143871	2907,209	5,768566	7,27169	1,1796	0,55548	2035,725	1169,602	-0,034
3500	0,162852	2889,058	5,06501	6,50078	1,1795	0,55682	2064,706	1199,442	0,3717
5000	0,197929	2831,083	4,08341	5,63196	1,1804	0,53085	2072,834	1245,126	0,8199
5600	0,195495	3009,4	4,435073	5,79622	1,17476	0,56284	2213,654	1315,048	1,157
Прототип									
900	0,1494	2639,83	5,121	6,688	1,188	0,5354	1846,58	1086,178	0,572
2600	0,1684	2756,27	4,714	6,139	1,1835	0,5504	1975,7	1162,08	0,093
3700	0,1951	2913,76	4,303	5,474	1,1775	0,5815	2155,05	1244,545	-0,036
5000	0,1972	2929,05	4,279	5,474	1,1767	0,5789	2168,77	1265,439	0,0347
5600	0,2052	2976,31	4,179	5,474	1,175	0,5669	2209,79	1309,556	0,349

## 2.8 Индикаторные показатели рабочего цикла

Теоретическая индикаторная работа цикла определяется по методу трапеций:

$$L_{iT} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{1i} + P_{2i}}{2} |V_{2i} - V_{1i}| ; \quad (2.53)$$

Расчётное среднее индикаторное давление

$$P_{iT} = \frac{\varepsilon \cdot L_{iT}}{(\varepsilon - 1)V_a}, \quad \text{МПа} \quad (2.54)$$

Индикаторный коэффициент полезного действия

$$\eta_i = 8.314 \frac{M_1 \cdot P_{iT} \cdot T_0}{P_0 \cdot \eta_V \cdot H_u} \quad (2.55)$$

Удельный индикаторный расход топлива

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

Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла приведены в таблице 17.

## 2.9 Эффективные показатели двигателя

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

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

Для двигателя с впрыском топлива, приняв ход поршня равным 71 мм, получим значение средней скорости поршня при  $n_N = 5600 \text{ мин}^{-1}$

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

Расчётные значения заносим в таблицу 15

Таблица 15 – Расчётные значения

$n$ , об/мин	1000	3200	5600	6000
$v_{n.c.p}$ , м/с	2,37	7,57	13,25	14,2
$p_M$ , МПа	0,061	0,119	0,183	0,194

Среднее эффективное давление и механический КПД

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

Расчётное значение заносим в таблицу 16

Таблица 16- Расчётные значения

$n$ , об/мин	1000	3200	5600	6000
$p_e$	0,962	1,042	0,75	0,721
$\eta_M$	0,940	0,883	0,88	0,785

Эффективный КПД и эффективный удельный расход топлива:

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

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

При  $n = 5600$  об/мин:

$$\eta_e = 371,2 \cdot 10^{-6} p_e T_K M'_1(p_k \eta_v H'_u) = 371,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,75 \cdot 293 \cdot 11,3 / (0,1 \cdot 0,882 \cdot 35,46) = 0,263,$$

$$v_e = 3,6 / (\eta_e H'_u) = 3,6 / (0,263 \cdot 35,46) = 0,385 \text{ м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч}).$$

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 17

Таблица 17 – Индикаторные и эффективные параметры двигателя

Параметры	Индикаторные и эффективные параметры двигателя			
$n, \text{мин}^{-1}$	1000	3200	5600	6000
$p_b, \text{Мпа}$	1,065	1,064	1,210	0,943
$p_i, \text{Мпа}$	1,023	1,021	1,161	0,905
$\eta_i$	0,395	0,347	0,356	0,357
$v_i, \text{м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$	0,257	0,292	0,285	0,284
$v_{н.ср.}, \text{м/с}$	2,37	7,57	13,25	14,2
$p_M, \text{Мпа}$	0,061	0,119	0,183	0,194
$p_e, \text{Мпа}$	0,962	1,042	0,848	0,721
$\eta_{Mi}$	0,940	0,883	0,803	0,785
$\eta_e$	0,372	0,354	0,324	0,284
$v_e, \text{м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$	0,335	0,286	0,313	0,357

## 2.10 Основные параметры цилиндра двигателя

Основные параметры двигателя берем из теплового расчета двигателя, работающего на газе, кроме мощности, крутящего момента, часового расхода топлива.

Литраж двигателя при  $n=5600$  об/мин

$$V_n = 30\pi N_e / (p_e n) = V_n = 30 \cdot 4 \cdot 58 / (0,75 \cdot 5600) = 1,5 \text{ л.} \quad (2.46)$$

Рабочий объем одного цилиндра

$$V_h = V_n / i = 1,5 / 4 = 0,375 \text{ л.} \quad (2.47)$$

Диаметр цилиндра. Т. к. ход поршня предварительно был принят  $S=71$ мм,  
то

$$D = 2 \cdot 10^3 \sqrt{V_h / (\pi S)} = 2 \cdot 10^3 \sqrt{0,375 / (3,14 \cdot 71)} = 82 \text{ мм.} \quad (2.48)$$

Окончательно принимаем  $S = 71$ мм и  $D = 82$ мм.

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

- площадь поршня

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

- литраж двигателя

$$V_d = \pi D^2 S i / (4 \cdot 10^6) = 3,14 \cdot 82^2 \cdot 71 \cdot 4 / (4 \cdot 10^6) = 1,5 \text{ л.}; \quad (2.50)$$

- мощность двигателя при  $n=5600$ об/мин

$$N_e = p_e V_d n / 30 \tau = 0,75 \cdot 1,5 \cdot 5600 / 30 \cdot 4 = 58 \text{ кВт}; \quad (2.51)$$

- крутящий момент при  $n=5600$  об/мин

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \frac{N_e}{n} = \frac{3 \cdot 10^4}{3,14} \frac{58}{5600} = 90,5 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.52)$$

- часовой расход топлива при  $n=5600$  об/мин

$$V_T = N_e v_e = 58 \cdot 0,385 = 20,45 \text{ м}^3 / \text{ч}; \quad (2.53)$$

- литровая мощность двигателя

$$N_l = N_e / V_l = 58 / 1,5 = 35,3 \text{ кВт/л.} \quad (2.54)$$

Для остальных режимов окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 18

Таблица 18 - Основные параметры и показатели двигателя

Параметры	Основные параметры и показатели двигателя			
	1000	3200	5600	6000
$n, \text{мин}^{-1}$	1000	3200	5600	6000
$F_n, \text{см}^2$	52,78			
$V_l, \text{л}$	1,488			
$N_l, \text{кВт/л}$	38,9			
$N_e, \text{кВт}$	11,9	35,7	58	55
$M_e, \text{Н} \cdot \text{м}$	114	123	87	84
$V_T, \text{м}^3 / \text{ч}$	3,9	10,2	18,15	19,63

### 3 Тепловой баланс

Общее количество теплоты, введенной в двигатель при номинальном скоростном режиме

$$Q_0 = H_u G_T = 35460 \cdot 18,15 = 725249 \text{ кДж/ч.} \quad (3.1)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 секунду

$$Q_e = 1000 N_e = 1000 \cdot 58 \cdot 3600 / 1000 = 208800 \text{ кДж/ч.} \quad (3.2)$$

Теплота, передаваемая окружающей среде

$$\begin{aligned} Q_B &= c i D^{1+2m} n^m (H_u - \Delta H_u) / (\alpha H_u) = 0,5 \cdot 4 \cdot 8,2^{1+2 \cdot 0,7} 5600^{0,7} (35460 - 0) / (1,05 \cdot 35460) \\ &= 84827 \text{ Дж/с, } 84827 \cdot 3600 / 1000 = 305377 \text{ кДж/ч} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Приняли  $c = 0,5$  – коэффициент пропорциональности для четырехтактных двигателей;  $m$  – показатель степени для четырехтактных двигателей, принял  $m = 0,6$  при  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $m = 0,65$  при  $n = 3200 \text{ мин}^{-1}$ , при  $n = 5600 \text{ мин}^{-1}$ , при  $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$ .

Теплота, унесенная отработавшими газами

$$\begin{aligned} Q_r &= (V_T / 22,4) \{ M_2 [(mc_v)_{t_0}^{t_r}] \cdot t_r - [M_1 (mc_v)_{t_0}^{20}] t_0 \} = \\ &= \frac{18,15}{22,4} \cdot \{ 10,93 \cdot 24,955 \cdot 712 - 11 \cdot 20,775 \cdot 20 \} = 120324 \text{ кДж/ч} \end{aligned} \quad (3.4)$$

где  $(mc_v)_{t_0}^{t_r} = 24,955 \text{ кДж} / (\text{кмоль} \cdot \text{град})$  – теплоемкость отработавших газов (определена методом интерполяции при  $\alpha = 1,05$  и  $t_r = T_r - 273 = 985 - 273 = 712$  °C).

## Неучтенные потери теплоты

$$Q_{ост} = Q_0 - (Q_e + Q_r + Q_B + Q_{н.с.}) = 643599 - (208800 + 120324 + 305377 + 0) = 9128 \text{ кДж/ч} \quad (3.5)$$

Составляющие теплового баланса представлены в таблице 21. Тепловой баланс двигателя работающего на газе представлен на плакате 1 диаграмм.

Таблица 21 - Параметры теплового баланса

Составляющие тепл. баланса	Частота вращения коленчатого вала, об/мин							
	1000		3200		5600		6000	
	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч
Теплота, эквивалентная эффективной работе	42840	31	128520	36	208800	33	198000	28
Теплота, передаваемая окружающей среде	44312	32	181474	50	305377	47,4	281577	40
Теплота, унесенная отработавшими газами	28342	20,4	45348	12	120324	18,7	168864	24,2
Неучтенные потери теплоты	22800	16,4	3350	1	9128	1,4	47639	6,8
Общее количество теплоты, введенное в двигатель с топливом	138294	100	361692	100	643599	100	696080	100

Результаты теплового баланса двигателя работающего на газе представлены на плакате

## 4 Кинематический расчет

Перемещение поршня рассчитывается по формуле

$$S_x = r \left[ (1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right], \text{ мм.} \quad (4.2)$$

Скорость поршня рассчитывается по следующей формуле:

$$V_n = \omega R \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right), \text{ м/с,} \quad (4.3)$$

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

Средняя скорость поршня

$$v_{n, \text{cp.}} = S_n / 30 = 0,071 \cdot 5600 / 30 = 13,25 \text{ м/с.} \quad (4.4)$$

Ускорение поршня рассчитывается по следующей формуле

$$j = \omega^2 R (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi), \text{ м/с}^2. \quad (4.5)$$

Результаты кинематического расчета приведены в приложении и на плакатах.

## 5 Динамический расчет двигателя работающего на газе

### 5.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма

С учетом диаметра цилиндра, отношения  $S/D$ , рядного расположения цилиндров и достаточно высокого значения  $p_z$  устанавливаются:

- масса поршневой группы

$$m_n = m_n \cdot F_n = 100 \cdot 0,005282 = 0,528 \text{ кг}; \quad (5.3)$$

- масса шатуна

$$m_{ш} = m_{ш} \cdot F_n = 150 \cdot 0,0052783 = 0,792 \text{ кг}; \quad (5.4)$$

- масса неуравновешенных частей одного колена вала без противовесов

$$m_k = m_k \cdot F_n = 140 \cdot 0,0052783 = 0,739 \text{ кг}. \quad (5.5)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца

$$m_{ш.п.} = 0,275 \cdot m_{ш} = 0,275 \cdot 0,792 = 0,218 \text{ кг}. \quad (5.6)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа

$$m_{ш.к.} = 0,725 \cdot m_{ш} = 0,725 \cdot 0,792 = 0,574 \text{ кг}. \quad (5.7)$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение

$$m_j = m_n + m_{ш.п.} = 0,528 + 0,218 = 0,746 \text{ кг}. \quad (5.8)$$

Массы, совершающие вращательное движение

$$m_R = m_k + m_{ш.к} = 0,739 + 0,574 = 1,313 \text{ кг.} \quad (5.9)$$

## 5.2 Силы инерции

Определяем значения силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс

$$P_j = -m_j j = 0,746 * j \quad (5.10)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна одного цилиндра

$$K_{Ru} = -m_{ш.к.} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -0,574 \cdot 0,0355 \cdot 586^2 \cdot 10^{-3} = -6,9974 \text{ кН.} \quad (5.11)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа

$$K_{Rk} = -m_k \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -0,739 \cdot 0,0355 \cdot 586^2 \cdot 10^{-3} = -9,0088 \text{ кН.} \quad (5.12)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа:

$$K_R = -m_R \cdot R \cdot \omega^2 = -1,0313 \cdot 0,0355 \cdot 586^2 \cdot 10^{-3} = -16,0062 \text{ кН.} \quad (5.13)$$

## 5.3 Суммарные силы

Сила, сосредоточенная на оси поршневого пальца

$$P = \Delta P_r + P_j \quad (5.14)$$

Нормальная сила

$$N = P \operatorname{tg} \beta . \quad (5.15)$$

Сила (кН), действующая вдоль шатуна

$$S = P * (1 / \cos \beta) . \quad (5.16)$$

Сила (кН), действующая по радиусу кривошипа

$$K = P * \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta . \quad (5.17)$$

Полная тангенциальная сила (кН)

$$T = \frac{p \sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} . \quad (5.18)$$

Результаты динамического расчета графически представлены на плакатах.

#### 5.4 Крутящие моменты

Крутящий момент одного цилиндра

$$M_{кр.ц} = T \cdot R . \quad (5.19)$$

Период изменения крутящего момента четырехтактного двигателя с равными интервалами между вспышками

$$\theta = 720/i = 720/4=180^\circ. \quad (5.20)$$

Суммирование значений крутящих моментов всех четырех цилиндров двигателя осуществим табличным методом (таблица 23) через каждые  $10^\circ$  угла поворота коленчатого вала и по полученным данным построим кривую  $M_{кр.}$  (Н·м), которая приведена на рисунке 9.

Средний крутящий момент двигателя:

- по данным теплового расчета

$$M_{кр.ц.} = M_i = \frac{M_e}{\eta_M} = \frac{145}{0,86} = 168 \text{ Н} \cdot \text{м} ; \quad (5.21)$$

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

$$M_{кр.ср.} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{M_{кр.i} + M_{кр.i+1}}{2} \right) \cdot 10^\circ}{360^\circ} = 155 \text{ Н} \cdot \text{м} . \quad (5.22)$$

Ошибка

$$\Delta = (168-155) \cdot 100/168 = 7,8\%. \quad (5.23)$$

Максимальный и минимальный крутящие моменты:

$$M_{кр. \max} = 409,5 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (5.24)$$

$$M_{кр. \min} = - 57,0 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (5.25)$$

## 5.5 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала

Для проведения расчета результирующей силы, действующей на шатунную шейку рядного двигателя, в 24, из приложения Б переносим значения силы Т, К.

Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа

$$P_k = K + K_{R_{ш}} = (K - 5108) \text{ Н.} \quad (5.26)$$

Результирующая сила  $R_{ш.ш.}$ , действующая на шатунную шейку, подсчитывается графическим сложением векторов сил Т и  $P_k$  при построении полярной диаграммы, которая приведена на рисунке 11. Значения  $R_{ш.ш.}$  для различных  $\varphi$  занесены в таблицу 25. Диаграмма  $R_{ш.ш.}$  в прямоугольных координатах приведена на рисунке 10.

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

$$R_{ш.ш.ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{ш.ш.i} + R_{ш.ш.i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 9342 \text{ Н} \quad (5.27)$$

По полярной диаграмме строится диаграмма износа шатунной шейки. Сумма сил  $R_{ш.ш.}$ , действующих по каждому лучу диаграммы износа (от 1 до 12), определяется с помощью таблицы 25.

По диаграмме износа определяем расположение оси масляного отверстия –  $\varphi_M = 66^\circ$ .

## 5.6 Силы, действующие на колено вала

Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа

$$K_{Pk} = P_k + K_{Rk} = (P_k - 15324), H \quad (5.28)$$

Результирующая сила, действующая на колено вала

$$R_k = \sqrt{R_{u.u}^2 + K_{Rk}^2} \quad (5.29)$$

### 5.7 Силы, действующие на коренные шейки

Коленчатый вал рассчитываемого двигателя полноопорный с кривошипами, расположенными под углом  $\gamma_k = 180^\circ$ . Порядок работы двигателя 1-3-4-2. Следовательно, когда первый кривошип повернут на угол  $\varphi_1 = 0^\circ$ , третий кривошип будет находиться в положении  $\varphi_3 = 0^\circ (720^\circ) - 180^\circ = 540^\circ$ , четвертый —  $\varphi_4 = 0^\circ (720^\circ) - 360^\circ = 360^\circ$  и второй —  $\varphi_2 = 0^\circ (720^\circ) - 540^\circ = 180^\circ$ .

Сила, действующая на первую коренную шейку

$$R_{к.ш.1} = -0,5 * R_{k1} \quad (5.30)$$

Сила, действующая на вторую коренную шейку

$$R_{к.ш.2} = \sqrt{T_{k2}^2 + K_{k2}^2}, \quad (5.31)$$

где:

$$T_{k2} = -0.5 * (T_1 + T_2 * \cos \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} * \sin \gamma_{k(1-2)}) = -0.5 * (T_1 + T_2 * \cos 180^\circ - K_{pk2} * \sin 180^\circ) = -0.5 * (T_1 - T_2); \quad (5.32)$$

$$K_{k2} = -0.5 * (K_{pk1} + T_2 * \sin \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} * \cos \gamma_{k(1-2)}) = -0.5 * (T_1 + T_2 * \sin 180^\circ - K_{pk2} * \cos 180^\circ) = -0.5 * (K_{pk1} - K_{pk2}). \quad (5.33)$$

Расчет силы  $R_{к.ш.2}$  приведен в таблице 26 (гр. 6-10).

Сила, действующая на третью коренную шейку

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

где:

$$T_{к3} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \sin \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos 0^\circ - K_{pk3} * \sin 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (T_2 + T_3); \quad (5.34)$$

$$K_{к2} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \cos \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin 0^\circ - K_{pk3} * \cos 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (K_{pk2} - K_{pk3}). \quad (5.35)$$

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

- для 1 (5)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш1cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш1i} + R_{к.ш1i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 9325 H, \quad (5.36)$$

$$R_{к.ш1max} = 12355 H, \quad (5.37)$$

$$R_{к.ш1min} = 4134 H. \quad (5.38)$$

- для 2 (4)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш2cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш2i} + R_{к.ш2i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 3350 H,$$

$$R_{к.ш2max} = 16359 H,$$

$$R_{к.ш2\min} = 1128 \text{ Н}$$

- для 3-й коренной шейки:

$$R_{к.ш3\text{ср}} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш3i} + R_{к.ш3i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 18058 \text{ Н}$$

$$R_{к.ш3\max} = 21090 \text{ Н}$$

$$R_{к.ш3\min} = 7251 \text{ Н}$$

## 5.8 Уравновешивание двигателя

Центробежные силы инерции рассчитываемого двигателя и их моменты полностью уравновешены

$$\sum K_R = 0; \sum M_R = 0. \quad (5.39)$$

Силы инерции первого порядка и их моменты также уравновешены

$$\sum P_{j1} = 0; \sum M_{j1} = 0. \quad (5.40)$$

Силы инерции второго порядка для всех цилиндров направлены в одну сторону

$$\sum P_{jII} = 4P_{jII} = 4 * m_j * R\omega^2 * \lambda * \cos 2\varphi \quad (5.41)$$

Размеры кривошипа. Предварительно принимаем  $l = 94$  мм и  $l_1 = 70$  мм. Тогда сила инерции одного противовеса

$$P_{ПП} = -0,5 * P_{ПП3} * l / l_1 = 0,5 * (-16000) * 0,094 / 0,070 = 10743 \text{ Н}; \quad (5.43)$$

- масса каждого противовеса

$$m_{\text{ПП}} = P_{\text{ПП}} / (p * \omega^2) = 10743 / (0,02 * 586^2) = 1,562 \text{ кг} \quad (5.44)$$

Диаграмма износа 3-й коренной шейки после установления противовесов построена по данным таблицы 28. По этой диаграмме определено направление оси масляного отверстия ( $\varphi_M = 45^\circ$ ).

Центры полярных диаграмм в связи с установкой противовесов сместятся на величину, пропорциональную реакции от противовесов,  $P'_{\text{ПП1(5)}} = 0,5P'_{\text{ПП3}} 8000$  Н.

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

- для 1 (5)-й коренной шейки:

$$R_{\text{к.ш.1(5)ср}}^{np} = F_{1(5)}^{np} / 720^\circ = 913848 / 720^\circ = 1269.2 \text{ Н} , \quad (5.46)$$

$$R_{\text{к.ш.1(5)max}}^{np} = 4355 \text{ Н} , \quad (5.47)$$

$$R_{\text{к.ш.1(5)min}}^{np} = -3866 \text{ Н} . \quad (5.48)$$

- для 3-й коренной шейки:

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

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

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

## 6 Модернизация системы впрыска газа

### 6.1 Расчет электромагнитной форсунки

Расчет проходного сечения электромагнитной форсунки

1 Определяем максимальную цикловую подачу топлива по формуле:

$$Q_{\max} = \frac{g_e \cdot N_e \cdot \tau}{120 \cdot n_{\max} \cdot \rho_T} = \frac{289.15 \cdot 57.1 \cdot 4}{120 \cdot 5200 \cdot 0.73} = 1.368 \text{ см}^3/\text{цикл}. \quad (6.1)$$

2 Период следования подач при групповом впрыске определяется по формуле:

$$T_{\min} = \frac{60 \cdot \tau'}{j \cdot n_{\max}} \cdot 10^3 = \frac{60 \cdot 2}{2 \cdot 5200} \cdot 1000 = 9.524 \text{ мс}, \quad (6.2)$$

где  $\tau' = 2$  – коэффициент тактности для 4х тактного двигателя;

$j=2$  – кратность впрыска.

Для определения пределов продолжительности электрических импульсов учтем работу форсунок при максимальной цикловой подаче, чтобы форсунки не потеряли управляемости, между управляющими импульсами должна быть пауза не меньше величины отпуска, то есть  $t_{\text{отп}} = t_{\text{мс}}$

Следовательно, максимальная продолжительность управляющих импульсов определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &\leq T - t_{\text{отп}} = 9,524 - 1 = 8,524 \text{ мс}; \\ \tau_{\max} &\leq 8,524 \text{ мс} \end{aligned} \quad (6.3)$$

3 Требуемая статическая производительность форсунки определяется по формуле:

$$g_0 = \frac{Q_{\max}}{j \cdot \tau_{\max}} = \frac{1.368}{2 \cdot 8.524} = 0.00802 \text{ см}^3/\text{мс} = 8,022 \text{ мм}^3/\text{мс} \quad (6.4)$$

4 Диаметр дозирующего отверстия определяется на основе формул, зная, что перепад давления топлива на клеммах форсунки  $\Delta p = 400 \text{ кПа}$ , можно определить площадь эффективного сечения клапана по формуле:

$$\mu \cdot f \cdot \emptyset = g_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_T}} = 8.022 \sqrt{\frac{2 \cdot 400 \cdot 10^3}{790}} = 0.255 \text{ мм}^2, \quad (6.5)$$

где  $\mu \cdot f \cdot \emptyset$  – площадь эффективного сечения клапана форсунки;

$\mu$  – коэффициент расхода топлива,

$\mu \emptyset = 0,96$  (из справочного материала).

$f \emptyset = 0,144 / 0,96 = 0,15 \text{ мм}^2$ ; тогда  $f = 0.15 / 2 = 0,075 \text{ мм}^2$

Определяем диаметр дозирующего отверстия по формуле:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.075}{3.14}} = 0.309 \text{ мм}. \quad (6.6)$$

Электромагнитная форсунка является исполнительным элементом впрыска распределяющим топливо по цилиндрам ДВС. Оценку быстродействия форсунки проведем, используя конструктивную схему электромагнитной форсунки и эквивалентной электрической схемы:

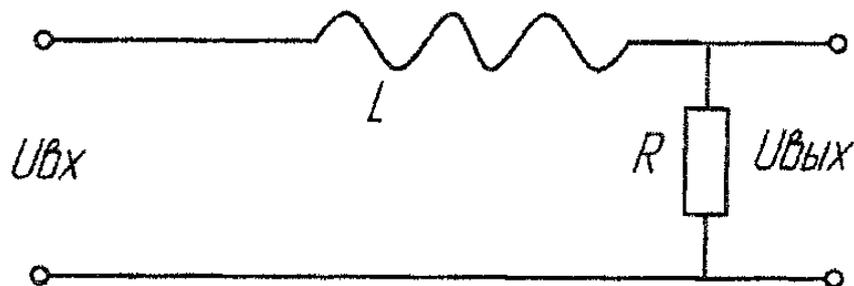


Рисунок 6.1 – Эквивалентная электрическая схема электромагнитной форсунки

Дифференциальное уравнение форсунки:

$$T \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}; T = L/R \quad (6.7)$$

Дифференциальное уравнение в операторной форме:

$$\begin{aligned} (TP + 1) \cdot U_{\text{вых}} &= U_{\text{вх}} \\ A(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot T^2}}; \varphi(\omega) = -\text{arctg}(\omega T); \\ T &\rightarrow L \rightarrow R \\ F &\geq F_{\text{пруж}} \end{aligned} \quad (6.8)$$

## 5 Конструирование электромагнита форсунки.

Такое усилие электромагнита  $F_{\text{э}} = 26H$  можно получить по формуле:

$$F_{\text{э}} = -\left(\frac{Jw^2}{2}\right) \cdot \mu_0 S \frac{1}{x^2}, H \quad (6.9)$$

где  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} B \cdot c/A \cdot m$  - магнитная постоянная воздушного зазора;

$x$  – величина радиального зазора;

$S$  – площадь поперечного сечения сердечника;

Приведенная формула показывает, что электромагнитная сила зависит от 4-х параметров:  $S$ ,  $x$ ,  $w$ ,  $J$ . Первые три параметра зависят от геометрии, а сила тока в цепи должна быть минимальной, но обеспечивать необходимую силу.

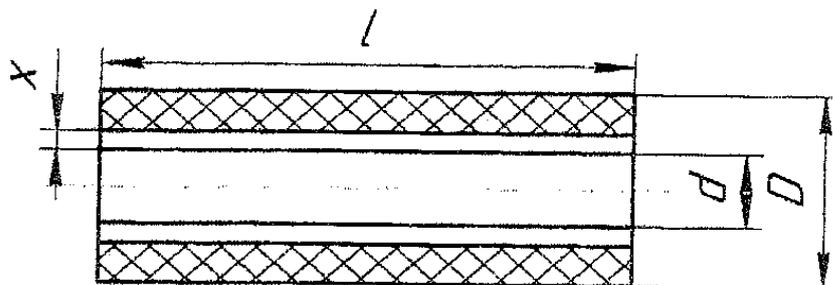


Рисунок 6.2 – Конструктивные размеры электромагнита

Допустим, что  $D = 15,0\text{мм} = 0,015\text{м}$ ;  $d = 8,0\text{мм} = 0,008\text{м}$ ;  $x = 1,2\text{мм} = 0,0012\text{м}$ .

Тогда, площадь катушки электромагнита определяется по формуле:

$$S = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{3.14}{4}(0.015^2 - 0.008^2) = 1.264 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 126,4 \text{ мм}^2 \quad (6.10)$$

Исходя из этого определяется:

$$(Jw)^2 = \frac{4 \cdot F \cdot x^2}{\mu_0 \cdot S} = \frac{4 \cdot 26 \cdot (0.0012)^2}{1.257 \cdot 10^{-6} \cdot 1.264 \cdot 10^{-4}} = 9422569,71 \text{ мм}^2/\text{мс} \quad (6.11)$$

$$Jw = \sqrt{9422569,71} = 970,672 \quad (6.12)$$

Принимаем  $J = 1,5$   $w = \frac{970,86}{1,5} = 647,24$  витков. Принимаем  $w=647$  витков.

Определяется индуктивность катушки по формуле:

$$L = \frac{0.2 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot S}{x} \cdot 10^{-8} = \frac{0.2 \cdot 3.14 \cdot 647^2 \cdot 1.264 \cdot 10^{-4}}{0.0012} = 2,772 \text{ Гн} \quad (6.13)$$

Длину  $l$  катушки электромагнита определяем из условия размещения в ней провода  $d = 0.4\text{мм}$ .

Площадь поперечного сечения провода с изоляцией вычисляется по формуле:

$$S_{np} = \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} = 0,126 \text{ мм}^2 \quad (6.14)$$

Длина катушки электромагнита вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{S_{np} \cdot w \cdot 2}{D - d} = \frac{0.1736 \cdot 647 \cdot 2}{15 - 8} = 23.2 \text{ мм} \quad (6.15)$$

Определяется сопротивление обмотки электромагнита:

Длина 1-го витка вычисляется по формуле:

$$d_{cp} = \frac{D+d}{2} = \frac{0.015+0.008}{2} = 0.0112 \text{ м} \rightarrow \lambda' = \pi \cdot d = 3.14 \cdot 0.0112 = 0.036 \text{ м} \quad (6.16)$$

Длина всей обмотки вычисляется по формуле:

$$\lambda_{обм} = \lambda' \cdot w = 0.036 \cdot 647 = 23.375 \text{ м} \quad (6.17)$$

Сопротивление 1м провода  $d = 0.4\text{мм}$ :  $R' = 3.89 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$

Сопротивление всей катушка вычисляется по формуле:

$$R = R' \cdot \lambda_{обм} = 3,89 \cdot 10^{-2} \cdot 23,375 = 0,909 \text{ Ом} \quad (6.18)$$

Постоянная времени электромагнита вычисляется по формуле:

$$T = L/R = 2.772 \cdot 10^{-4} / 0.909 = 3,07 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (6.19)$$

Это высокое быстродействие. Но фактически магнитный поток в магнитопроводе форсунки достигает своего максимального значения через промежуток времени практически равный  $(4-5)L/R$ . Время трогания якоря с места  $t_{тр}$  будет равно 1,19 мс. Это время удовлетворяет требованиям к исполнительным элементам систем впрыска.

$t_{тр}=1,19$  мс – это означает, что после появления в катушке электромагнита магнитного потока, через 1,19 мс якорь начинает трогаться.

## 6.2 Обзор существующих конструкций систем питанием газом

Все конструкции газовых систем питания можно условно разбить на три поколения:

- первое - механические системы с вакуумным управлением;
- второе - механические системы с электронным управлением;
- третье - системы впрыска газа.

Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт» (ФГУП НАМИ) 30 декабря 1999 года утвержден и введен в действие отраслевой стандарт ОСТ 37.001.653-99 на газобаллонное оборудование для транспортных средств, использующих газ в качестве моторного топлива. Однако в третий раздел этого документа включены не все термины, определения и сокращения по второму поколению автомобильного газобаллонного оборудования - механическим системам с электронным управлением, и полностью отсутствуют подобные сведения по третьему поколению - системам с впрыском газа.

Окисляющий каталитический нейтрализатор - устройство, предназначенное для конечного окисления продуктов неполного сгорания топлива. Обычно используется на автомобилях с двигателями, работающими на обедненной горючей смеси.

Трехкомпонентный каталитический нейтрализатор представляет собой химический реактор с катализатором, содержащим благородные металлы (платина, палладий, родий). Нейтрализатор окисляет продукты неполнота сгорания топлива - углеводороды (СН) и окись углерода (СО) и восстанавливает чрезвычайно токсичные оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), разлагая их на безвредные исходные составляющие. Каталитические нейтрализаторы, в которых одновременно идут обе химические реакции, называют бифункциональными. Полноценная работа бифункционального каталитического нейтрализатора возможна только при строго стехиометрическом составе горючей смеси. Трехкомпонентный нейтрализатор обычно работает в системе с обратной связью, контролируемой лямбда-зондом (датчиком кислорода), но иногда используется и в системах без обратной связи.

Лямбда-зонд - датчик содержания несгоревшего кислорода в отработавших газах. Устанавливается в системе выпуска перед каталитическим

нейтрализатором. По информации от лямбда-зонда электронный блок управления (ЭБУ) двигателем поддерживает стехиометрический состав горючей смеси.

Управление с обратной связью - принцип управления системой (от отработавших газов - к составу смеси), при котором кислородный датчик определяет состав отработавших газов и на основании полученных от него данных ЭБУ поддерживает нормальный стехиометрический состав горючей смеси, поступающей в двигатель.

Управление без обратной связи - принцип управления системой, осуществляемый механически без контроля конечного результата процесса сгорания по составу отработавших газов.

Электрический дозатор газа - устройство, работающее по принципу шагового электродвигателя. Изменение положения его поршня по сигналам от ЭБУ обеспечивает оптимальный состав газовой смеси, подаваемой в цилиндры двигателя.

Электронный блок управления (ЭБУ) - самонастраивающееся электронное устройство, управляющее подачей газа на автомобилях, оборудованных лямбда-зондом и каталитическим нейтрализатором. Обеспечивает стехиометрический состав смеси на всех режимах работы двигателя. Кроме того, ЭБУ автоматически закрывает запорные клапаны в случае аварийного повреждения газовой магистрали или при остановке двигателя.

Эмулятор - электронное устройство, имитирующее работу бензиновых форсунок при переводе двигателя на газовое топливо.

Эффект хлопка - воспламенение рабочей смеси во впускной трубе двигателя или в корпусе воздушного фильтра. Хлопок может возникнуть при неисправности системы зажигания или при чрезмерном обеднении горючей смеси на переходных режимах работы двигателя.

Предохранительный обратный клапан - устройство, сбрасывающее излишнее давление во впускной трубе в момент хлопка газовой смеси.

## 7 Безопасность и экологичность объекта проектирования

Бакалаврские работы по проектированию автотранспортных средств (АТС) и двигателей внутреннего сгорания (ДВС) должны удовлетворять действующим и перспективным нормативным требованиям отечественных и международных стандартов в отношении безопасности их эксплуатации и защиты окружающей среды от производимых ими вредных экологических воздействий. Не соответствующее хотя бы одному нормативному требованию АТС не может быть утверждено к производству и находиться в эксплуатации. Именно поэтому, выбор конструктивных концепций и технологических реализаций тех или иных узлов, агрегатов и систем АТС (ДВС), должен предопределяться применением таких конструктивных (технологических) решений, которые позволяют им, в конечном итоге, полностью удовлетворять всем предъявляемым нормативным требованиям стандартов в отношении их безопасности и экологичности.

Целью данной работы является применение вышеперечисленных требований к двигателю работающем на сжатом природном газе и ознакомление с правилами ЕЭК ООН R110 "Автомобили работающие на сжатом природном газе; и ЕЭК ООН R115 "Системы для ДВС, работающих на сжиженном нефтяном газе (СНГ) и сжатом природном газе (СПГ)".

### 7.1 Анализ опасных и вредных факторов

Автомобильный транспорт, приводимый в движение двигателем внутреннего сгорания, является источником загрязнения атмосферы. Число автомобилей непрерывно возрастает, значит растет валовой выброс вредных продуктов в атмосферу. Автотранспорт относится к движущимся источникам загрязнения, широко встречающихся в жилых районах и местах отдыха.

Токсичными выбросами ДВС являются отработавшие и картерные газы, пары топлива. Основная доля токсичных примесей поступает в атмосферу с

отработавшими газами ДВС. С картерными газами и парами топлива в атмосферу поступает около 45 % углеводородов от их общего выброса.

Исследование состава отработавших газов ДВС показывает, что в них содержится несколько десятков компонентов, основные из которых приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Состав отработавших газов ДВС

Компонент	Объемная доля компонента, %		Примечание
	Бензиновый ДВС	Дизельный двигатель	
Азот	74...77	76...78	Не токсичны
Кислород	0,3...0,8	2...18	
Пары воды	3,0...5,5	0,5...4,0	
Диоксид углерода	5,0...12,0	1,0...10,0	
Водород	0...5,0	-	
Оксид углерода	0,5...12,0	0,01...0,5	Токсичны
Оксиды азота	До0,8	0,0002...0,5	
Углеводороды	0,2...3,0	0,009...0,5	
Альдегиды	До0,2мг/л	0,001...0,9мг/л	
Сажа	0...0,04г/м	0,01...1,1г/м	
Бензопирен	10...20 мкг/м	До10 мкг/м	

Состав отработавших газов ДВС зависит от режима работы двигателя. У двигателя, работающего на бензине, при неустановившихся режимах движения (разгон, торможение) нарушаются процессы смесеобразования, что способствует повышенному выделению токсичных продуктов.

Количество вредных веществ, поступающих в атмосферу в составе отработавших газов, зависит от общего технического состояния автомобилей и особенно от двигателя – источника наибольшего загрязнения.

Применение газообразного топлива позволяет снизить загрязнение окружающей среды и открывает возможность использования новых значительных топливных ресурсов, обеспечивая экономию природной нефти.

Состав газообразного топлива зависит от источника их получения и способа производства.

Главным преимуществом газообразного топлива является экологичность этого вида топлива. Отработавшие газы двигателей, работающих на природном газе, содержат низкие уровни вредных веществ. Природный газ на 90 – 98 % состоит из метана, который при сгорании дает диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) и воду.

Двигатель на природном газе производит примерно на 65% меньше выбросов оксида азота ( $\text{NO}$ ) и на 80 % выбросов твердых частиц, чем дизельный двигатель, оборудованный окисляющим каталитическим нейтрализатором.

Использование природного газа предполагает и ряд других преимуществ. Природный газ практически не содержит серы, которая влияет на здоровье людей, окисляет почву и воду, разрушает фасады зданий. Кроме того, автомобили, работающие на природном газе, являются наиболее бесшумными и меньше подвержены вибрации.

Природный газ является наиболее безопасным из газообразных моторных топлив. Риск несчастного случая при обращении с природным газом крайне незначителен. Газ легче воздуха. В случае утечки он поднимается вверх и быстро смешивается с атмосферным воздухом, превращаясь во взрывобезопасную смесь.

## 7.2 Экологические характеристики газовых двигателей

Экологические характеристики автомобильных двигателей в связи с существенным воздействием парка автомобилей на состояние атмосферы приобрели большое значение.

Основными токсичными веществами, определяющими загрязнение атмосферы, в отработавших газах двигателей с воспламенением от искры являются: окись углерода  $\text{CO}$ , окиси азота  $\text{NO}$  и углеводороды  $\text{C}_n\text{H}_m$ .

Причиной образования окиси углерода и углеводородов в отработавших газах является неполное сгорание топлива, которое особо велико при богатой рабочей смеси, поступающей в цилиндр двигателя. Окислы азота образуются в процессе сгорания топлива в зонах, где возникает высокая температура. Процесс окисления азота становится заметным лишь при нагреве до температуры 1700 С. Такая температура достигается при максимальном давлении. Кроме того, на количество образовавшихся окислов азота сказывается наличие свободного кислорода, который ускоряет окисление.

### 7.3 Техника безопасности при работе с газовым топливом

На основе анализа правил ЕЭК ООН R110 "Автомобили работающие на сжатом природном газе; и ЕЭК ООН R115 "Системы для ДВС, работающих на сжиженном нефтяном газе (СНГ) и сжатом природном газе (СПГ)".

Использование вместо жидкого топлива, являющегося легковоспламеняющейся жидкостью, газовых топлив (сжиженные углеводородные газы, сжатый и сжиженный природный газ), приводит к усложнению эксплуатации двигателей внутреннего сгорания. Это связано с тем, что газовое топливо – горючий газ, который в определенных условиях может образовывать взрыво – и пожароопасные смеси с воздухом.

Следует отметить такие особенности углеводородных газов, как относительно высокие температуры самовоспламенения, низкие нижние пределы и широкая область воспламеняемости смесей с воздухом, которые взрываются при импульсах относительно небольшой интенсивности, возможность образования кристаллогидратов при низких температурах

Эксплуатацию сжиженных углеводородных и природного газов также осложняет их повышенная способность электризоваться. Углеводороды предельного ряда имеют высокое объемное электрическое сопротивление ( $10^{-10}$  Ом\*см), что значительно выше предельного ( $10$  Ом\*см), при котором возможны искровые разряды, вследствие электризации.

Взрывозащита электрооборудования выполняется в соответствии со свойствами газа, создающего взрывоопасность. Природный газ и его основные компоненты – метан, этан, пропан – относятся по взрывоопасности к группе ПАТ –1, означающий, что безопасный экспериментальный максимальный зазор (БЭМЗ) для этих газов превышает 0,9 мм, а температура воспламенения смеси выше 450 С.

Минимальная энергия зажигания метана – воздушных смесей выше, чем у других углеводородов, т.е. они воспламеняются хуже. Температура воспламенения метана 540 С. Минимальное давление взрыва метана составляет 0,72 МПа. Это ниже, чем у других углеводородов, однако вполне достаточно, чтобы разрушить сооружение, в котором произошел взрыв.

Метан легче воздуха (относительная плотность по воздуху 0,544), поэтому при утечках газообразная фаза поднимается вверх.

7.4 Требования пожарной безопасности при эксплуатации, техническом обслуживании и хранения газобаллонных автомобилей изложены в пунктах 7.4.1 ... 7.4.5

7.4.1. Каждый баллон, установленный на автомобиле, должен иметь вентиль, снабженный предохранительным устройством.

7.4.2. Проверка герметичности газобаллонного оборудования осуществляют с помощью течеискателя. Допускается применение мыльных растворов.

7.4.3. Регулировочные работы по газовой системе питания непосредственно на ГБА при работе его на газе могут выполняться на открытых площадках или в отдельном, специально оборудованном помещении (боксе), а также на постах углубленной диагностики (Д-2) при их размещении в отдельном помещении.

Если при проведении регулировочных работ питание автомобиля газом происходит от внешнего источника, то этот источник (аккумуляторная батарея

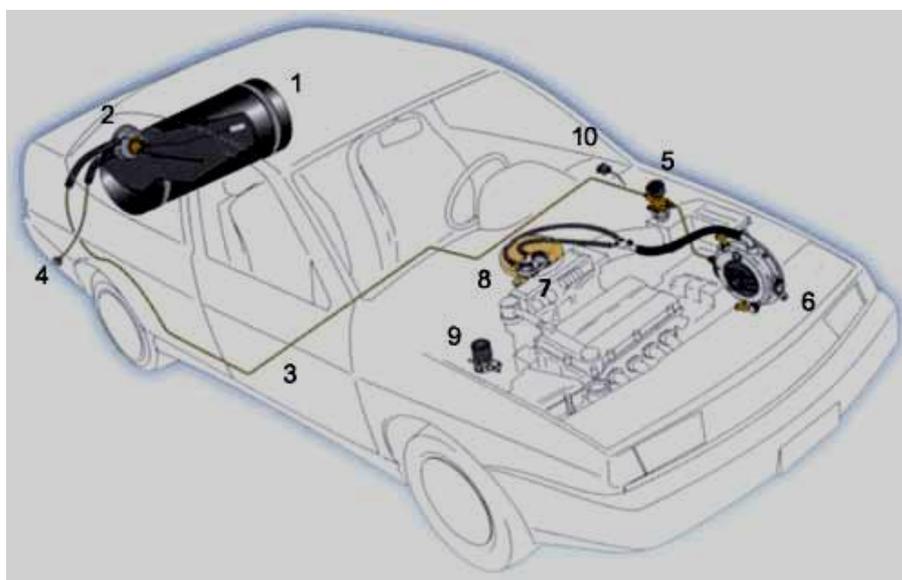
с СПГ или передвижное газозаправочное средство) должен быть расположен вне здания на открытой площадке.

7.4.4. Пуск двигателя на СПГ после длительной стоянки производить при открытом капоте.

7.4.5 Основные требования по использованию сжатого природного газа в двигателе изложены в Правилах ЕЭК ООН R110

Выбросы загрязняющих веществ в зависимости от используемого типа топлива ДВС транспортных средств изложены в правилах R83-05 ЕЭК ООН.

Типичная схема топливной системы ДВС, использующая газоболонное оборудование (ГБО) приведена на рисунке 7.1.



1 - баллон 2 - мультиклапан 3 - газовая магистраль высокого давления 4 - выносное заправочное устройство 5 - газовый клапан 6 – двухступенчатый редуктор 7 - дозатор 8 - смеситель воздуха и газа 9 - бензиновый клапан 10 - переключатель видов топлива

Рисунок 7.1 - Схема топливной системы ДВС использующая (ГБО)

7.5 Предоставление официального утверждения типа ЕЭК ООН для транспортного средства, работающего на природном газе, предусматривает в частности, что транспортное средство, оснащенное двухтопливной системой питания отвечает предписаниям по токсичности ОГ, если транспортное средство соответствует требованиям в отношении предельных значений токсичных выбросов при использовании обоих видов применяемого топлива, а также для двигателей оснащенных системой подачи СПГ токсичность оценивается по двум утвержденным видам СПГ приведенным ниже (см. таблицы 7.2 ... 7.4)

Таблица 7.2 - Требования по токсичности предъявляемые для автомобилей с двигателями с искровым зажиганием

Исходная масса (RM) (кг)	Масса одно-окисид углерода (CO) L <sub>1</sub> (г/км)	Масса всех гидро-углеродов (THC) L <sub>2</sub> (г/км)	Масса оксидов азота (NO <sub>x</sub> ) L <sub>3</sub> (г/км)
1305 < RM < 1760	5,80	0,50	0,70

Таблица 7.3 - Технические характеристики СПГ, утвержденного в качестве топлива для ДВС

Характеристики	Единицы	Основа	Пределы		Метод испытания
			Мин.	Макс.	
Топливо G20					
<i>Состав:</i> Метан	% моля	100	99	100	ISO 6974
Остаток	% моля	-	-	1	ISO 6974
N <sub>2</sub>	% моля	-	-	-	ISO 6974
Содержание серы	мг/м <sup>3</sup>	-	-	10	ISO 6326-5
Коэффициент Воббе (нетто)	МДж/м <sup>3</sup>	48,2	47,2	49,2	
Топливо G25					
<i>Состав:</i> Метан	% моля	86	84	88	ISO 6974
Остаток	% моля	-	-	1	ISO 6974
N <sub>2</sub>	% моля	14	12	16	ISO 6974

Содержание серы	мг/м <sup>3</sup>	-	-	10	ISO 6326-5
Коэффициент Воббе (нетто)	МДж/м <sup>3</sup>	39,4	38,2	40,6	

Таблица 7.4 - Предельнодопустимое содержание оксида углерода и углеводородов в отработавших газах транспортных средств оборудованных ДВС работающих на СПГ

Частота вращения коленчатого вала	СО, объемная доля, %	СН, объемная доля, млн <sup>-1</sup> для двигателей с рабочим объемом до 3 дм <sup>3</sup> .
Минимальная	2,0	700
Повышенная	1,5	400

С точки зрения экологической безопасности автотранспортных средств газовые виды топлива успешно конкурируют с традиционными жидкими видами даже в случае установки на базовых автомобилях систем нейтрализации выхлопных газов. Кроме того, газовое топливо практически не содержит веществ, являющихся каталитическими ядами для нейтрализаторов (сера, свинец и пр.).

## 7.5 Выводы по разделу безопасность и экологичность проекта

7.5.1 Применение в качестве основного топлива для питания ДВС СПГ позволило значительно снизить температуру в процессе сгорания, что значительно снижает выбросы по NO, а свойства газа позволяющие не образовывать топливную пленку в КС снижают выбросы по СН. Применение СПГ в качестве топлива для ДВС дает возможность повысить степень сжатия, тем самым увеличивать термический КПД двигателя, что соответственно сказывается на снижении выбросов СО и СО<sub>2</sub>.

Так переход на СПГ позволяет в среднем снизить токсичность по СО на 67%, по СН на 18% и по NO на 44%. При этом в ОГ не содержится сажи и твердых частиц, что соответствует нормам токсичности ОГ ЕЭК ООН № 83.

7.5.1 Двигатели работающие на СПГ пожаробезопасней двигателей работающих на жидком топливе, т.к. газ легче воздуха и при утечке уходит в атмосферу, но для этого необходимо соблюдать требования ЕЭК ООН R110 и ЕЭК ООН R115, соблюдение которых не позволяет газу накапливаться в замкнутых пространствах автомобиля. В РФ по данным статистике начиная с 2005 года не зафиксировано ни одного случая пожара или взрыва СПГ по причине неисправностей системы топливоподачи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе представлен спроектированный рядный, четырехтактный, четырехцилиндровый поршневой ДВС на базе двигателя ВАЗ, работающий на сжатом природном газе. Получены следующие основные параметры двигателя:

1. Диаметр цилиндра  $D = 82$  мм.
2. Ход поршня  $S = 71$  мм.
3. Рабочий объем двигателя  $V = 1.499$  л.
4. Эффективная мощность  $N_e = 57$  кВт

Прочностные расчеты основных деталей ДВС показали что, детали имеют запас прочности выше минимального допустимого значения, расчетные напряжения, действующие на детали, меньше допустимых.

Так переход на СПГ позволяет в среднем снизить токсичность по СО на 67%, по СН на 18% и по NO на 44%, при этом в ОГ не содержится сажи и твердых частиц, что соответствует нормам токсичности ОГ ЕЭК ООН № 83.

Двигатели на СПГ пожаробезопасней двигателей на жидком топливе, т.к. газ легче воздуха и при утечке уходит в атмосферу, но для этого необходимо соблюдать требования ЕЭК ООН 110 и ЕЭК ООН R115, соблюдение которых не позволяет газу накапливаться в замкнутых пространствах автомобиля.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

- 9 Луканин, В.Н. Промышленная транспортная экология [Текст] / М.: Высшая школа, 2001.
- 10 Долин, П.А. Справочник по технике безопасности [Текст] / М.: Энергоатомиздат, 1985.
- 11 Dake, A.R. Modeling and control of cold start hydrocarbon emissions [Текст] / A.R. Dake // Master thesis. – 2005. - 101 с.
- 12 El-Mahallawy, F. Fundamentals and technology of combustion [Текст] / F. El-Mahallawy, S. E-Din Habik. – London : Elsevier, 2002. – 862 с.
- 13 Eriksson, L. Spark Advance Modeling and Control / L. Eriksson [Текст] // Doctoral thesis. – 1999. - 207 с.
- 14 Кузнецов, В.Р. Турбулентность и горение [Текст] / Кузнецов, В.Р., Собольников В.А.// М. Наука, 1986. - 207 с.
- 15 Войнов, В.В. Процессы сгорания в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / М. Наука, 1984. - 211 с.
- 16 Звонов, В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / М. Машиностроение, 1981. - 210 с.
- 17 Nlootat, G. A Model for Converting SI Engine Flame Arrival Signals into Flame Contours [Текст] / SAE, SP 1099, №950109, стр. 99-110, 1999.
- 18 Khalighi, B. Computation and Measurement of Flow and Combustion in a Four-Valve Engine with Intake Variations [Текст] / SAE, SP 1101, №950287, 2001. - с. 147-179,
- 19 Jones, P. Full Cycle Computational Fluid Dynamics Calculations in a Motored Four Valve Pent Roof Combustion Chamber and Comparison with Experiment [Текст] / SAE, SP 1101, №950286, 2001. - с. 131-146
- 20 Наканиши, К. Разработка новой системы впуска для четырёхклапанного двигателя, работающего на бедных смесях [Текст] / SAE, SP 1097, №95050, 1997. - с. 25-43
- 21 Хашимото, Н. Разработка низкотоксичной, высокоэффективной камеры сгорания для высокомоощного четырехклапанного двигателя [Текст] / SAE, SP 1098, №95068, 1998. - с. 347-365

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
Q	f	a	e	m	P <sub>y</sub>	T <sub>y</sub>	V <sub>a</sub>	z	E2	g	l	m					
25	55	1	12	1,0524	1,418	707,494	0,989	0,8100	52,1781	0,0370	0,2930	3,2					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	V <sub>ст</sub>	s	y(f1)	X1-2	T <sub>пред</sub>	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m1-2	X
0	-25	0,13681	0,12	1,6598	1,7E-07	707,4939	707,4939	781,2473	707,4939	744,3706			3,4E-07	1,41793	1	1	0
1	-24	0,13264	0,1108	1,6093	2,9E-06	781,2473	781,2473	787,7863	715,4714	784,5168	1,362	6,5243	5,9E-06	1,47891	1	1	3,39E-07
2	-23	0,12864	0,1019	1,5606	1,4E-05	787,7863	787,7863	794,6313	723,4277	791,2088	1,3568	6,6059	2,8E-05	1,54196	1	1	6,23E-06
3	-22	0,12478	0,0934	1,5139	4E-05	794,6313	794,6313	802,2602	731,5266	798,4457	1,3559	6,6189	8E-05	1,60736	1	1	3,42E-05
4	-21	0,12109	0,0853	1,4691	8,9E-05	802,2602	802,2602	811,3233	739,8726	806,7917	1,3551	6,6329	0,00018	1,67531	1	1	0,000114
5	-20	0,11755	0,0775	1,4262	0,00017	811,3233	811,3233	822,6425	748,6104	816,9829	1,3541	6,6487	0,00034	1,74609	1	1	0,000292
6	-19	0,11418	0,07	1,3852	0,00029	822,6425	822,6425	837,2025	757,9249	829,9225	1,3529	6,6678	0,00057	1,82008	1	1	0,000628
7	-18	0,11097	0,063	1,3463	0,00045	837,2025	837,2025	856,1305	768,0412	846,6665	1,3514	6,6915	0,0009	1,89779	1,0001	1	0,001199
8	-17	0,10792	0,0562	1,3093	0,00067	856,1305	856,1305	880,6642	779,2219	868,3973	1,3496	6,7214	0,00134	1,97984	1,0001	1,0001	0,002101
9	-16	0,10504	0,0499	1,2744	0,00096	880,6642	880,6642	912,1048	791,764	896,3845	1,3473	6,759	0,00191	2,067	1,0002	1,0001	0,003443
10	-15	0,10233	0,0439	1,2415	0,00131	912,1048	912,1048	951,7581	805,994	931,9314	1,3445	6,8053	0,00263	2,16011	1,0003	1,0002	0,005354
11	-14	0,09978	0,0383	1,2106	0,00175	951,7581	951,7581	1000,864	822,2609	976,3112	1,3412	6,8612	0,0035	2,26016	1,0004	1,0003	0,007979
12	-13	0,09741	0,0331	1,1818	0,00227	1000,864	1000,864	1060,521	840,9297	1030,693	1,3375	6,9265	0,00455	2,36819	1,0006	1,0005	0,011479
13	-12	0,09521	0,0282	1,1551	0,00289	1060,521	1060,521	1131,605	862,3739	1096,063	1,3333	7,0007	0,00579	2,48529	1,0008	1,0007	0,016028
14	-11	0,09317	0,0237	1,1304	0,00361	1131,605	1131,605	1214,691	886,9684	1173,148	1,3288	7,0822	0,00723	2,61258	1,0011	1,001	0,021817
15	-10	0,09132	0,0196	1,1079	0,00443	1214,691	1214,691	1309,976	915,0826	1262,333	1,3242	7,1691	0,00887	2,75113	1,0015	1,0013	0,029042
16	-9	0,08963	0,0159	1,0874	0,00536	1309,976	1309,976	1417,207	947,073	1363,591	1,3195	7,259	0,01072	2,90197	1,0019	1,0017	0,037911
17	-8	0,08812	0,0126	1,0691	0,00639	1417,207	1417,207	1535,623	983,2752	1476,415	1,315	7,3496	0,01278	3,06599	1,0025	1,0022	0,048633
18	-7	0,08679	0,0096	1,053	0,00752	1535,623	1535,623	1663,907	1023,994	1599,765	1,3106	7,4384	0,01504	3,24392	1,0031	1,0028	0,061416
19	-6	0,08563	0,0071	1,0389	0,00875	1663,907	1663,907	1800,172	1069,493	1732,039	1,3066	7,5236	0,01749	3,43623	1,0039	1,0035	0,07646
20	-5	0,08465	0,0049	1,0271	0,01005	1800,172	1800,172	1941,979	1119,98	1871,075	1,3029	7,6036	0,0201	3,64306	1,0048	1,0043	0,093952
21	-4	0,08385	0,0031	1,0173	0,01143	1941,979	1941,979	2086,405	1175,59	2014,192	1,2995	7,6774	0,02285	3,86419	1,0058	1,0053	0,114056
22	-3	0,08323	0,0018	1,0097	0,01285	2086,405	2086,405	2230,159	1236,374	2158,282	1,2965	7,7444	0,02569	4,09889	1,0069	1,0063	0,136907
23	-2	0,08278	0,0008	1,0043	0,01429	2230,159	2230,159	2369,757	1302,276	2299,958	1,2939	7,8041	0,02859	4,34593	1,0082	1,0076	0,162601
24	-1	0,08251	0,0002	1,0011	0,01573	2369,757	2369,757	2501,728	1373,122	2435,742	1,2917	7,8566	0,03147	4,60349	1,0097	1,0089	0,191186
25	0	0,08243	0	1	0,01714	2501,728	2501,728	2622,858	1448,605	2562,293	1,2898	7,9019	0,03428	4,86913	1,0113	1,0105	0,222654

26	1	0,08251	0,0002	1,0011	0,01848	2622,858	2622,858	2730,424	1528,275	2676,641	1,2882	7,9405	0,03695	5,1398	1,013	1,0121	0,256936
27	2	0,08278	0,0008	1,0043	0,0197	2730,424	2730,424	2822,406	1611,535	2776,415	1,2868	7,9727	0,03941	5,4119	1,0149	1,0139	0,293888
28	3	0,08323	0,0018	1,0097	0,02078	2822,406	2822,406	2897,627	1697,643	2860,016	1,2858	7,999	0,04157	5,6813	1,0169	1,0159	0,333296
29	4	0,08385	0,0031	1,0173	0,02168	2897,627	2897,627	2955,825	1785,715	2926,726	1,2849	8,0197	0,04336	5,9435	1,019	1,0179	0,374864
30	5	0,08465	0,0049	1,0271	0,02236	2955,825	2955,825	2997,61	1874,747	2976,717	1,2843	8,0355	0,04472	6,19375	1,0211	1,02	0,418227
31	6	0,08563	0,0071	1,0389	0,02279	2997,61	2997,61	3024,341	1963,635	3010,976	1,2838	8,0469	0,04557	6,4272	1,0234	1,0223	0,462944
32	7	0,08679	0,0096	1,053	0,02294	3024,341	3024,341	3037,93	2051,208	3031,136	1,2835	8,0543	0,04588	6,63916	1,0257	1,0246	0,508517
33	8	0,08812	0,0126	1,0691	0,0228	3037,93	3037,93	3040,595	2136,262	3039,262	1,2834	8,0584	0,04561	6,82523	1,028	1,0269	0,554397
34	9	0,08963	0,0159	1,0874	0,02237	3040,595	3040,595	3034,626	2217,607	3037,61	1,2833	8,0596	0,04475	6,98156	1,0303	1,0292	0,600006
35	10	0,09132	0,0196	1,1079	0,02165	3034,626	3034,626	3022,176	2294,109	3028,401	1,2833	8,0585	0,0433	7,10498	1,0326	1,0315	0,644752
36	11	0,09317	0,0237	1,1304	0,02066	3022,176	3022,176	3005,117	2364,741	3013,647	1,2835	8,0556	0,04131	7,19318	1,0348	1,0337	0,688055
37	12	0,09521	0,0282	1,1551	0,01942	3005,117	3005,117	2984,963	2428,62	2995,04	1,2836	8,0512	0,03884	7,24485	1,0369	1,0358	0,72937
38	13	0,09741	0,0331	1,1818	0,01797	2984,963	2984,963	2962,857	2485,047	2973,91	1,2839	8,0458	0,03595	7,25967	1,0388	1,0379	0,768206
39	14	0,09978	0,0383	1,2106	0,01637	2962,857	2962,857	2939,61	2533,536	2951,233	1,2841	8,0396	0,03274	7,23836	1,0407	1,0397	0,804153
40	15	0,10233	0,0439	1,2415	0,01466	2939,61	2939,61	2915,765	2573,83	2927,688	1,2844	8,0329	0,02932	7,1826	1,0423	1,0415	0,836893
41	16	0,10504	0,0499	1,2744	0,0129	2915,765	2915,765	2891,664	2605,902	2903,714	1,2847	8,026	0,0258	7,09493	1,0438	1,0431	0,866213
42	17	0,10792	0,0562	1,3093	0,01115	2891,664	2891,664	2867,515	2629,952	2879,59	1,2849	8,0188	0,02229	6,9786	1,0451	1,0444	0,892013
43	18	0,11097	0,063	1,3463	0,00945	2867,515	2867,515	2843,444	2646,376	2855,48	1,2852	8,0116	0,01889	6,83733	1,0462	1,0457	0,914304
44	19	0,11418	0,07	1,3852	0,00785	2843,444	2843,444	2819,524	2655,742	2831,484	1,2855	8,0045	0,0157	6,6752	1,0472	1,0467	0,933198
45	20	0,11755	0,0775	1,4262	0,00639	2819,524	2819,524	2795,805	2658,745	2807,665	1,2858	7,9974	0,01277	6,49636	1,048	1,0476	0,948895
46	21	0,12109	0,0853	1,4691	0,00509	2795,805	2795,805	2772,319	2656,165	2784,062	1,2861	7,9904	0,01017	6,30489	1,0486	1,0483	0,961668
47	22	0,12478	0,0934	1,5139	0,00396	2772,319	2772,319	2749,092	2648,818	2760,706	1,2864	7,9836	0,00792	6,10466	1,0491	1,0489	0,971838
48	23	0,12864	0,1019	1,5606	0,00301	2749,092	2749,092	2726,145	2637,52	2737,619	1,2867	7,977	0,00602	5,89913	1,0495	1,0493	0,979754
49	24	0,13264	0,1108	1,6093	0,00223	2726,145	2726,145	2703,494	2623,047	2714,819	1,2869	7,9705	0,00446	5,69138	1,0498	1,0497	0,985773
50	25	0,13681	0,12	1,6598	0,00161	2703,494	2703,494	2681,154	2606,108	2692,324	1,2872	7,9642	0,00323	5,48397	1,0501	1,05	0,990237
51	26	0,14112	0,1295	1,7121	0,00114	2681,154	2681,154	2659,136	2587,327	2670,145	1,2874	7,958	0,00227	5,27898	1,0502	1,0501	0,993465
52	27	0,14559	0,1393	1,7663	0,00078	2659,136	2659,136	2637,45	2567,234	2648,293	1,2877	7,9519	0,00156	5,07804	1,0503	1,0503	0,995738
53	28	0,1502	0,1495	1,8222	0,00052	2637,45	2637,45	2616,105	2546,262	2626,777	1,2879	7,9459	0,00104	4,88237	1,0504	1,0504	0,997295
54	29	0,15495	0,16	1,8799	0,00033	2616,105	2616,105	2595,105	2524,755	2605,605	1,2882	7,94	0,00067	4,6928	1,0505	1,0505	0,998331
55	30	0,15985	0,1708	1,9394	0,00021	2595,105	2595,105	2574,456	2502,974	2584,781	1,2884	7,9341	0,00042	4,50989	1,0505	1,0505	0,999

Таблица А2 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 3200 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Q	f	a	e	m	Py	Ty	Va	z	E2	g	l	m					
30	60	1	12	1,0524	1,0548	658,1260	1,0585	0,8	48,5203	0,0292	0,2930	3,4					
Расчёт процесса сгорания																	
f	fl	Vcr	s	y(fl)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m1-2	X
0	-30	0,1711	0,1708	1,9394	5,2E-08	658,126	658,126	667,0646	658,126	662,5953			1,04E-07	1,05479	1	1	0
1	-29	0,1658	0,16	1,8799	1E-06	667,0646	667,0646	674,2125	665,8578	670,6386	1,37476	6,33679	2,08E-06	1,10093	1	1	1,04E-07
2	-28	0,1607	0,1495	1,8222	5,4E-06	674,2125	674,2125	681,4641	673,6889	677,8383	1,37337	6,35664	1,08E-05	1,14916	1	1	2,19E-06
3	-27	0,1558	0,1393	1,7663	1,7E-05	681,4641	681,4641	688,8796	681,6519	685,1719	1,37215	6,37413	3,32E-05	1,19957	1	1	1,3E-05
4	-26	0,151	0,1295	1,7121	3,9E-05	688,8796	688,8796	696,547	689,798	692,7133	1,37094	6,39169	7,71E-05	1,25231	1	1	4,62E-05
5	-25	0,1464	0,12	1,6598	7,6E-05	696,547	696,547	704,5849	698,2024	700,5659	1,36972	6,40949	0,000152	1,30755	1,00001	1	0,000123
6	-24	0,142	0,1108	1,6093	0,00013	704,5849	704,5849	713,1443	706,9666	708,8646	1,36848	6,42774	0,000267	1,36551	1,00001	1,00001	0,000275
7	-23	0,1377	0,1019	1,5606	0,00022	713,1443	713,1443	722,41	716,2198	717,7772	1,36719	6,44674	0,000433	1,42651	1,00003	1,00002	0,000542
8	-22	0,1335	0,0934	1,5139	0,00033	722,41	722,41	732,601	726,1201	727,5055	1,36584	6,46681	0,000661	1,49091	1,00005	1,00004	0,000975
9	-21	0,1296	0,0853	1,4691	0,00048	732,601	732,601	743,9706	736,8546	738,2858	1,36441	6,48834	0,000964	1,55916	1,00008	1,00007	0,001636
10	-20	0,1258	0,0775	1,4262	0,00068	743,9706	743,9706	756,8051	748,64	750,3879	1,36286	6,51175	0,001352	1,6318	1,00013	1,00011	0,0026
11	-19	0,1222	0,07	1,3852	0,00092	756,8051	756,8051	771,4224	761,7209	764,1138	1,36118	6,53747	0,001838	1,70948	1,0002	1,00017	0,003951
12	-18	0,1188	0,063	1,3463	0,00122	771,4224	771,4224	788,1677	776,3685	779,795	1,35933	6,56595	0,002434	1,79292	1,00029	1,00025	0,005789
13	-17	0,1155	0,0562	1,3093	0,00158	788,1677	788,1677	807,4102	792,8774	797,789	1,35729	6,59763	0,003152	1,88294	1,00042	1,00036	0,008223
14	-16	0,1124	0,0499	1,2744	0,002	807,4102	807,4102	829,5362	811,5615	818,4732	1,35506	6,63288	0,004004	1,98044	1,00058	1,0005	0,011375
15	-15	0,1095	0,0439	1,2415	0,0025	829,5362	829,5362	854,9423	832,7489	842,2392	1,35261	6,67202	0,004999	2,08641	1,00078	1,00068	0,015379
16	-14	0,1068	0,0383	1,2106	0,00307	854,9423	854,9423	884,0268	856,7754	869,4845	1,34994	6,71527	0,006146	2,20185	1,00104	1,00091	0,020378
17	-13	0,1042	0,0331	1,1818	0,00373	884,0268	884,0268	917,1806	883,9768	900,6037	1,34706	6,76271	0,007454	2,32779	1,00135	1,00119	0,026524
18	-12	0,1019	0,0282	1,1551	0,00446	917,1806	917,1806	954,7759	914,6807	935,9783	1,34398	6,81428	0,008927	2,46524	1,00173	1,00154	0,033978
19	-11	0,0997	0,0237	1,1304	0,00528	954,7759	954,7759	997,1559	949,197	975,9659	1,34073	6,86979	0,010568	2,61513	1,00219	1,00196	0,042906
20	-10	0,0977	0,0196	1,1079	0,00619	997,1559	997,1559	1044,623	987,8082	1020,889	1,33733	6,92886	0,012375	2,77825	1,00272	1,00246	0,053474
21	-9	0,0959	0,0159	1,0874	0,00717	1044,623	1044,623	1097,424	1030,759	1071,023	1,33383	6,99101	0,014342	2,95523	1,00335	1,00304	0,065848
22	-8	0,0943	0,0126	1,0691	0,00823	1097,424	1097,424	1155,745	1078,245	1126,585	1,33027	7,0556	0,01646	3,14643	1,00409	1,00372	0,08019
23	-7	0,0929	0,0096	1,053	0,00936	1155,745	1155,745	1219,69	1130,403	1187,717	1,32669	7,12194	0,018714	3,35192	1,00492	1,0045	0,096651
24	-6	0,0916	0,0071	1,0389	0,01054	1219,69	1219,69	1289,275	1187,3	1254,482	1,32314	7,18926	0,021081	3,57136	1,00588	1,0054	0,115364
25	-5	0,0906	0,0049	1,0271	0,01177	1289,275	1289,275	1364,415	1248,924	1326,845	1,31965	7,2568	0,023535	3,80403	1,00695	1,00641	0,136445
26	-4	0,0897	0,0031	1,0173	0,01302	1364,415	1364,415	1444,913	1315,173	1404,664	1,31627	7,3238	0,026041	4,0487	1,00815	1,00755	0,159979
27	-3	0,0891	0,0018	1,0097	0,01428	1444,913	1444,913	1530,452	1385,846	1487,682	1,31301	7,38957	0,028559	4,30365	1,00948	1,00881	0,18602
28	-2	0,0886	0,0008	1,0043	0,01552	1530,452	1530,452	1620,588	1460,638	1575,52	1,30991	7,45346	0,031043	4,56664	1,01093	1,0102	0,21458
29	-1	0,0883	0,0002	1,0011	0,01672	1620,588	1620,588	1714,748	1539,134	1667,668	1,30699	7,51495	0,033441	4,83493	1,01251	1,01172	0,245623

30	0	0,0882	0	1	0,01785	1714,748	1714,748	1812,229	1620,81	1763,489	1,30425	7,57356	0,035697	5,10529	1,01422	1,01337	0,279064
31	1	0,0883	0,0002	1,0011	0,01888	1812,229	1812,229	1912,204	1705,029	1862,216	1,30171	7,62895	0,037752	5,37408	1,01604	1,01513	0,314761
32	2	0,0886	0,0008	1,0043	0,01977	1912,204	1912,204	2013,732	1791,054	1962,968	1,29936	7,68084	0,039546	5,63734	1,01796	1,017	0,352513
33	3	0,0891	0,0018	1,0097	0,02051	2013,732	2013,732	2115,778	1878,053	2064,755	1,29722	7,72906	0,041021	5,89086	1,01997	1,01897	0,392059
34	4	0,0897	0,0031	1,0173	0,02106	2115,778	2115,778	2217,229	1965,118	2166,503	1,29527	7,77349	0,042122	6,13039	1,02206	1,02102	0,43308
35	5	0,0906	0,0049	1,0271	0,0214	2217,229	2217,229	2316,927	2051,283	2267,078	1,29351	7,81408	0,042804	6,3517	1,02421	1,02314	0,475202
36	6	0,0916	0,0071	1,0389	0,02151	2316,927	2316,927	2413,7	2135,551	2365,314	1,29193	7,85086	0,043027	6,55081	1,02639	1,0253	0,518006
37	7	0,0929	0,0096	1,053	0,02138	2413,7	2413,7	2506,394	2216,921	2460,047	1,29053	7,88387	0,042768	6,7241	1,02858	1,02749	0,561033
38	8	0,0943	0,0126	1,0691	0,02101	2506,394	2506,394	2593,918	2294,416	2550,156	1,2893	7,91321	0,042015	6,86846	1,03076	1,02967	0,6038
39	9	0,0959	0,0159	1,0874	0,02039	2593,918	2593,918	2675,274	2367,123	2634,596	1,28823	7,93902	0,040776	6,98145	1,0329	1,03183	0,645815
40	10	0,0977	0,0196	1,1079	0,01954	2675,274	2675,274	2749,598	2434,215	2712,436	1,2873	7,96145	0,039074	7,06136	1,03498	1,03394	0,686592
41	11	0,0997	0,0237	1,1304	0,01848	2749,598	2749,598	2816,191	2494,989	2782,895	1,28651	7,98067	0,036951	7,1073	1,03697	1,03597	0,725666
42	12	0,1019	0,0282	1,1551	0,01723	2816,191	2816,191	2874,539	2548,885	2845,365	1,28584	7,99689	0,034465	7,11921	1,03885	1,03791	0,762617
43	13	0,1042	0,0331	1,1818	0,01584	2874,539	2874,539	2924,337	2595,508	2899,438	1,28529	8,01031	0,031685	7,09787	1,04061	1,03973	0,797082
44	14	0,1068	0,0383	1,2106	0,01435	2924,337	2924,337	2965,488	2634,642	2944,913	1,28485	8,02115	0,028695	7,04483	1,04222	1,04141	0,828767
45	15	0,1095	0,0439	1,2415	0,01279	2965,488	2965,488	2998,106	2666,249	2981,797	1,28451	8,02962	0,025582	6,96234	1,04368	1,04295	0,857462
46	16	0,1124	0,0499	1,2744	0,01122	2998,106	2998,106	3022,497	2690,471	3010,301	1,28425	8,03596	0,022436	6,85319	1,04499	1,04434	0,883044
47	17	0,1155	0,0562	1,3093	0,00967	3022,497	3022,497	3039,138	2707,608	3030,818	1,28407	8,0404	0,019343	6,72061	1,04613	1,04556	0,90548
48	18	0,1188	0,063	1,3463	0,00819	3039,138	3039,138	3048,647	2718,106	3043,893	1,28396	8,04314	0,016381	6,56811	1,04712	1,04662	0,924823
49	19	0,1222	0,07	1,3852	0,00681	3048,647	3048,647	3051,744	2722,523	3050,195	1,28391	8,0444	0,013616	6,39933	1,04795	1,04753	0,941203
50	20	0,1258	0,0775	1,4262	0,00555	3051,744	3051,744	3049,212	2721,503	3050,478	1,28391	8,04439	0,011101	6,21785	1,04864	1,0483	0,95482
51	21	0,1296	0,0853	1,4691	0,00443	3049,212	3049,212	3041,862	2715,735	3045,537	1,28396	8,04329	0,008868	6,02714	1,04921	1,04893	0,96592
52	22	0,1335	0,0934	1,5139	0,00347	3041,862	3041,862	3030,49	2705,93	3036,176	1,28404	8,04128	0,006936	5,83038	1,04966	1,04943	0,974789
53	23	0,1377	0,1019	1,5606	0,00265	3030,49	3030,49	3015,853	2692,781	3023,172	1,28415	8,03851	0,005307	5,63044	1,05001	1,04984	0,981725
54	24	0,142	0,1108	1,6093	0,00198	3015,853	3015,853	2998,644	2676,944	3007,249	1,28429	8,03513	0,003969	5,42978	1,05028	1,05015	0,987032
55	25	0,1464	0,12	1,6598	0,00145	2998,644	2998,644	2979,471	2659,016	2989,057	1,28444	8,03125	0,002898	5,2305	1,05049	1,05039	0,991001
56	26	0,151	0,1295	1,7121	0,00103	2979,471	2979,471	2958,858	2639,524	2969,164	1,28462	8,02698	0,002064	5,03426	1,05063	1,05056	0,993899
57	27	0,1558	0,1393	1,7663	0,00072	2958,858	2958,858	2937,235	2618,913	2948,046	1,2848	8,02242	0,001433	4,84238	1,05074	1,05069	0,995963
58	28	0,1607	0,1495	1,8222	0,00048	2937,235	2937,235	2914,949	2597,555	2926,092	1,285	8,01762	0,000968	4,65581	1,05081	1,05078	0,997396
59	29	0,1658	0,16	1,8799	0,00032	2914,949	2914,949	2892,271	2575,744	2903,61	1,2852	8,01264	0,000636	4,47524	1,05086	1,05084	0,998364
60	30	0,1711	0,1708	1,9394	0,0002	2892,271	2892,271	2869,405	2553,711	2880,838	1,28541	8,00754	0,000406	4,30112	1,05089	1,05088	0,999

Таблица А3 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 5600 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Q	f	a	e	m	Py	Ty	Va	z	E2	g	l	m					
40	70	1	12	1,052	0,678	573,979	1,062	0,8	48,533	0,026	0,293	3,4					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vст	s	y (f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m1-2	X
0	-40	0,2321	0,295	2,6227	2,6E-08	573,979	573,9791	581,04	573,979	577,509			5,26E-08	0,6781	1	1	0
1	-39	0,2254	0,2814	2,5476	5,3E-07	581,04	581,0398	587,5	580,556	584,269	1,39181	6,104493	1,06E-06	0,70609	1	1	5,26E-08
2	-38	0,2189	0,268	2,4739	2,8E-06	587,497	587,4975	594,1	587,263	590,798	1,39028	6,12459	5,5E-06	0,73553	1	1	1,11E-06
3	-37	0,2125	0,2548	2,4016	8,4E-06	594,098	594,0978	600,88	594,123	597,487	1,38882	6,143714	1,68E-05	0,7665	1	1	6,61E-06
4	-36	0,2063	0,242	2,3309	2E-05	600,877	600,8767	607,89	601,166	604,381	1,38737	6,163021	3,91E-05	0,79913	1	1,000001	2,34E-05
5	-35	0,2001	0,2294	2,2616	3,8E-05	607,886	607,8856	615,19	608,437	611,539	1,38591	6,182621	7,7E-05	0,83356	1	1,000002	6,26E-05
6	-34	0,1941	0,2171	2,194	6,8E-05	615,192	615,1922	622,88	615,995	619,037	1,38442	6,202663	0,000135	0,86995	1,00001	1,000005	0,00014
7	-33	0,1883	0,2051	2,1279	0,00011	622,882	622,8819	631,06	623,914	626,97	1,3829	6,223329	0,00022	0,90851	1,00001	1,000011	0,000275
8	-32	0,1826	0,1933	2,0634	0,00017	631,058	631,0583	639,84	632,284	635,451	1,38133	6,244836	0,000336	0,94948	1,00003	1,00002	0,000495
9	-31	0,177	0,1819	2,0005	0,00024	639,844	639,8438	649,38	641,209	644,612	1,37969	6,267433	0,00049	0,99314	1,00004	1,000034	0,000831
10	-30	0,1716	0,1708	1,9394	0,00034	649,38	649,3801	659,83	650,813	654,604	1,37797	6,291394	0,000687	1,03982	1,00007	1,000055	0,00132
11	-29	0,1664	0,16	1,8799	0,00047	659,828	659,8276	671,37	661,232	665,597	1,37615	6,317015	0,000935	1,08991	1,0001	1,000085	0,002007
12	-28	0,1613	0,1495	1,8222	0,00062	671,366	671,3657	684,19	672,621	677,778	1,37421	6,3446	0,00124	1,14384	1,00015	1,000127	0,002942
13	-27	0,1563	0,1393	1,7663	0,0008	684,191	684,1913	698,52	685,148	691,354	1,37213	6,374455	0,001607	1,20212	1,00021	1,000182	0,004182
14	-26	0,1515	0,1295	1,7121	0,00102	698,517	698,5175	714,57	698,997	706,545	1,3699	6,406873	0,002045	1,26531	1,0003	1,000255	0,005789
15	-25	0,1469	0,12	1,6598	0,00128	714,572	714,5722	732,6	714,362	723,584	1,3675	6,442121	0,002559	1,33402	1,0004	1,000348	0,007835
16	-24	0,1424	0,1108	1,6093	0,00158	732,596	732,5956	752,84	731,447	742,716	1,36494	6,480425	0,003156	1,40896	1,00053	1,000466	0,010394
17	-23	0,1381	0,1019	1,5606	0,00192	752,837	752,8369	775,55	750,466	764,194	1,36219	6,521956	0,003841	1,49086	1,00069	1,000612	0,01355
18	-22	0,134	0,0934	1,5139	0,00231	775,551	775,5513	801	771,635	788,274	1,35927	6,566813	0,004619	1,58052	1,00089	1,000791	0,017391
19	-21	0,13	0,0853	1,4691	0,00275	800,996	800,9963	829,43	795,172	815,212	1,35619	6,615014	0,005495	1,67879	1,00113	1,001007	0,02201
20	-20	0,1262	0,0775	1,4262	0,00324	829,427	829,4269	861,09	821,293	845,259	1,35295	6,666486	0,006473	1,78655	1,00141	1,001266	0,027505
21	-19	0,1226	0,07	1,3852	0,00378	861,091	861,0914	896,23	850,206	878,659	1,34959	6,721062	0,007556	1,90468	1,00174	1,001572	0,033978
22	-18	0,1191	0,063	1,3463	0,00437	896,226	896,2265	935,05	882,111	915,639	1,34611	6,778485	0,008743	2,03407	1,00212	1,00193	0,041534
23	-17	0,1159	0,0562	1,3093	0,00502	935,052	935,0516	977,76	917,188	956,408	1,34256	6,838408	0,010036	2,17556	1,00257	1,002347	0,050277
24	-16	0,1128	0,0499	1,2744	0,00572	977,764	977,7641	1024,5	955,599	1001,15	1,33896	6,900411	0,011432	2,32995	1,00308	1,002827	0,060313
25	-15	0,1099	0,0439	1,2415	0,00646	1024,53	1024,533	1075,5	997,482	1050,01	1,33534	6,964017	0,012926	2,49792	1,00367	1,003375	0,071745
26	-14	0,1071	0,0383	1,2106	0,00726	1075,49	1075,494	1130,7	1042,94	1103,12	1,33175	7,028708	0,014512	2,68002	1,00433	1,003998	0,084671
27	-13	0,1046	0,0331	1,1818	0,00809	1130,74	1130,743	1190,3	1092,05	1160,54	1,32819	7,093943	0,016181	2,87663	1,00507	1,004699	0,099183
28	-12	0,1022	0,0282	1,1551	0,00896	1190,33	1190,33	1254,3	1144,83	1222,29	1,32472	7,159182	0,017921	3,08787	1,0059	1,005484	0,115364
29	-11	0,1	0,0237	1,1304	0,00986	1254,25	1254,253	1322,5	1201,28	1288,35	1,32134	7,223902	0,019716	3,31361	1,00681	1,006356	0,133285

30	-10	0,098	0,0196	1,1079	0,01078	1322,45	1322,453	1394,8	1261,31	1358,63	1,31809	7,287611	0,02155	3,55339	1,00782	1,007318	0,153001
31	-9	0,0962	0,0159	1,0874	0,0117	1394,81	1394,809	1471,1	1324,82	1432,97	1,31497	7,349859	0,023401	3,80639	1,00892	1,008372	0,174551
32	-8	0,0946	0,0126	1,0691	0,01262	1471,13	1471,13	1551,2	1391,61	1511,14	1,312	7,41025	0,025246	4,07137	1,01012	1,009521	0,197953
33	-7	0,0932	0,0096	1,053	0,01353	1551,16	1551,157	1634,6	1461,44	1592,86	1,30919	7,468443	0,027058	4,34669	1,01141	1,010765	0,223198
34	-6	0,0919	0,0071	1,0389	0,0144	1634,55	1634,554	1720,9	1534	1677,73	1,30655	7,524158	0,028808	4,63025	1,01279	1,012102	0,250256
35	-5	0,0909	0,0049	1,0271	0,01523	1720,91	1720,91	1809,7	1608,92	1765,33	1,30408	7,57717	0,030466	4,91953	1,01427	1,01353	0,279064
36	-4	0,09	0,0031	1,0173	0,016	1809,74	1809,741	1900,5	1685,77	1855,11	1,30178	7,627311	0,032001	5,21157	1,01582	1,015045	0,309531
37	-3	0,0894	0,0018	1,0097	0,01669	1900,49	1900,489	1992,5	1764,03	1946,51	1,29965	7,674463	0,033379	5,50307	1,01746	1,016641	0,341531
38	-2	0,0889	0,0008	1,0043	0,01728	1992,53	1992,533	2085,2	1843,16	2038,86	1,29768	7,718551	0,034569	5,79043	1,01917	1,018312	0,37491
39	-1	0,0886	0,0002	1,0011	0,01777	2085,19	2085,189	2177,7	1922,57	2131,46	1,29588	7,759545	0,035541	6,06982	1,02093	1,020049	0,409479
40	0	0,0885	0	1	0,01813	2177,73	2177,729	2269,4	2001,6	2223,56	1,29423	7,797444	0,036266	6,3373	1,02275	1,021841	0,44502
41	1	0,0886	0,0002	1,0011	0,01836	2269,39	2269,386	2359,4	2079,61	2314,38	1,29273	7,832279	0,03672	6,58896	1,0246	1,023677	0,481286
42	2	0,0889	0,0008	1,0043	0,01844	2359,37	2359,374	2446,9	2155,9	2403,14	1,29137	7,864105	0,036885	6,821	1,02648	1,025542	0,518006
43	3	0,0894	0,0018	1,0097	0,01837	2446,9	2446,901	2531,2	2229,81	2489,05	1,29015	7,892997	0,036746	7,02989	1,02837	1,027424	0,554891
44	4	0,09	0,0031	1,0173	0,01815	2531,19	2531,192	2611,5	2300,67	2571,35	1,28906	7,919047	0,036296	7,21249	1,03024	1,029306	0,591636
45	5	0,0909	0,0049	1,0271	0,01777	2611,5	2611,501	2687,1	2367,87	2649,32	1,28809	7,942357	0,035538	7,36614	1,0321	1,031173	0,627933
46	6	0,0919	0,0071	1,0389	0,01724	2687,14	2687,135	2757,5	2430,82	2722,3	1,28723	7,963044	0,034478	7,48878	1,03392	1,033009	0,66347
47	7	0,0932	0,0096	1,053	0,01657	2757,47	2757,472	2822	2489,02	2789,72	1,28648	7,98123	0,033135	7,57899	1,03568	1,034798	0,697949
48	8	0,0946	0,0126	1,0691	0,01577	2821,97	2821,973	2880,2	2542,02	2851,09	1,28583	7,997045	0,031534	7,63604	1,03737	1,036527	0,731084
49	9	0,0962	0,0159	1,0874	0,01485	2880,2	2880,202	2931,8	2589,49	2906,02	1,28528	8,010624	0,029705	7,65989	1,03899	1,038179	0,762617
50	10	0,098	0,0196	1,1079	0,01384	2931,83	2931,832	2976,7	2631,17	2954,24	1,28481	8,022104	0,027689	7,6512	1,0405	1,039745	0,792323
51	11	0,1	0,0237	1,1304	0,01276	2976,65	2976,654	3014,6	2666,91	2995,62	1,28443	8,031628	0,025529	7,61123	1,04192	1,041212	0,820012
52	12	0,1022	0,0282	1,1551	0,01164	3014,58	3014,583	3045,7	2696,68	3030,12	1,28412	8,039336	0,023271	7,54183	1,04322	1,042572	0,84554
53	13	0,1046	0,0331	1,1818	0,01048	3045,65	3045,655	3070	2720,52	3057,84	1,28387	8,04537	0,020964	7,44532	1,04441	1,043819	0,868811
54	14	0,1071	0,0383	1,2106	0,00933	3070,02	3070,02	3087,9	2738,61	3078,98	1,28369	8,049871	0,018656	7,32438	1,04549	1,04495	0,889775
55	15	0,1099	0,0439	1,2415	0,0082	3087,94	3087,935	3099,8	2751,17	3093,84	1,28357	8,052976	0,016392	7,18197	1,04644	1,045963	0,90843
56	16	0,1128	0,0499	1,2744	0,00711	3099,75	3099,753	3105,9	2758,53	3102,83	1,28349	8,054822	0,014215	7,02119	1,04728	1,046859	0,924823
57	17	0,1159	0,0562	1,3093	0,00608	3105,9	3105,902	3106,9	2761,08	3106,39	1,28347	8,05554	0,01216	6,8452	1,048	1,047641	0,939038
58	18	0,1191	0,063	1,3463	0,00513	3106,87	3106,87	3103,2	2759,25	3105,03	1,28348	8,055254	0,010256	6,65713	1,04863	1,048315	0,951198
59	19	0,1226	0,07	1,3852	0,00426	3103,19	3103,187	3095,4	2753,49	3099,3	1,28352	8,054084	0,008524	6,45994	1,04915	1,048888	0,961454
60	20	0,1262	0,0775	1,4262	0,00349	3095,4	3095,404	3084,1	2744,3	3089,74	1,2836	8,052143	0,006977	6,25644	1,04959	1,049368	0,969977
61	21	0,13	0,0853	1,4691	0,00281	3084,07	3084,073	3069,7	2732,14	3076,9	1,28371	8,049536	0,005622	6,04915	1,04994	1,049764	0,976954
62	22	0,134	0,0934	1,5139	0,00223	3069,74	3069,736	3052,9	2717,49	3061,32	1,28383	8,04636	0,004456	5,84034	1,05023	1,050086	0,982576
63	23	0,1381	0,1019	1,5606	0,00174	3052,9	3052,904	3034,1	2700,79	3043,48	1,28398	8,042701	0,003473	5,63198	1,05046	1,050344	0,987032
64	24	0,1424	0,1108	1,6093	0,00133	3034,05	3034,053	3013,6	2682,43	3023,83	1,28415	8,038639	0,00266	5,4257	1,05064	1,050546	0,990506

65	25	0,1469	0,12	1,6598	0,001	3013,61	3013,61	2992	2662,79	3002,78	1,28432	8,034245	0,002001	5,22288	1,05077	1,050703	0,993166
66	26	0,1515	0,1295	1,7121	0,00074	2991,95	2991,952	2969,4	2642,18	2980,68	1,28451	8,029578	0,001477	5,0246	1,05087	1,050822	0,995167
67	27	0,1563	0,1393	1,7663	0,00053	2969,41	2969,405	2946,2	2620,89	2957,82	1,28471	8,024691	0,001069	4,83169	1,05095	1,050911	0,996644
68	28	0,1613	0,1495	1,8222	0,00038	2946,24	2946,243	2922,7	2599,14	2934,47	1,28492	8,019629	0,000759	4,64477	1,051	1,050976	0,997714
69	29	0,1664	0,16	1,8799	0,00026	2922,69	2922,692	2898,9	2577,14	2910,81	1,28513	8,014428	0,000528	4,46425	1,05104	1,051023	0,998473
70	30	0,1716	0,1708	1,9394	0,00018	2898,93	2898,934	#ЗНАЧ!	2555,02	#ЗНАЧ!	1,28534	8,00912	0,000359	4,2904	1,05107	1,051056	0,999

Таблица А4 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
Q	f	a	e	m	Py	Ty	Va	z	E2	g	l	m					
45	80	1	12	1,0524	0,5376	545,5705	1,1060	0,8	37,2823	0,0255	0,2933884	3					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vст	s	y (f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DХ1-2	P	m	m1-2	X
0	-45	0,2782	0,36705	3,0188	8,43E-08	545,57	545,57	551,82	545,57	548,70			1,69E-07	0,537636	1	1	0
1	-44	0,2707	0,3522	2,9371	1,26E-06	551,82	551,82	557,67	551,58	554,75	1,399	6,02	2,53E-06	0,55867	1	1	1,69E-07
2	-43	0,2633	0,33757	2,8567	5,48E-06	557,67	557,67	563,70	557,72	560,69	1,397	6,03	1,1E-05	0,580801	1	1	2,7E-06
3	-42	0,256	0,32318	2,7775	1,48E-05	563,70	563,70	569,97	564,04	566,84	1,396	6,05	2,95E-05	0,604117	1,000001	1	1,37E-05
4	-41	0,2488	0,30903	2,6996	3,11E-05	569,97	569,97	576,55	570,55	573,26	1,394	6,07	6,22E-05	0,628718	1,000002	1,000001	4,32E-05
5	-40	0,2418	0,29511	2,6231	5,66E-05	576,55	576,55	583,54	577,31	580,05	1,393	6,09	0,000113	0,654723	1,000005	1,000004	0,000105
6	-39	0,2348	0,28146	2,548	9,32E-05	583,54	583,54	591,03	584,37	587,29	1,391	6,11	0,000186	0,682272	1,000011	1,000008	0,000219
7	-38	0,228	0,26805	2,4743	0,000143	591,03	591,03	599,16	591,79	595,10	1,390	6,13	0,000286	0,711525	1,000021	1,000016	0,000405
8	-37	0,2214	0,25492	2,402	0,000208	599,16	599,16	608,05	599,64	603,60	1,388	6,16	0,000415	0,742664	1,000035	1,000028	0,000691
9	-36	0,2149	0,24205	2,3313	0,00029	608,05	608,05	617,85	608,01	612,95	1,386	6,18	0,000579	0,775897	1,000057	1,000046	0,001106
10	-35	0,2085	0,22946	2,262	0,000391	617,85	617,85	628,72	616,97	623,29	1,384	6,21	0,000781	0,811458	1,000086	1,000071	0,001685
11	-34	0,2022	0,21715	2,1943	0,000512	628,72	628,72	640,83	626,62	634,78	1,382	6,24	0,001025	0,84961	1,000126	1,000106	0,002466
12	-33	0,1961	0,20512	2,1282	0,000657	640,83	640,83	654,36	637,06	647,60	1,380	6,27	0,001314	0,890644	1,000178	1,000152	0,003491
13	-32	0,1902	0,1934	2,0637	0,000826	654,36	654,36	669,49	648,40	661,93	1,377	6,30	0,001653	0,934881	1,000246	1,000212	0,004805
14	-31	0,1844	0,18197	2,0008	0,001022	669,49	669,49	686,41	660,74	677,95	1,375	6,34	0,002044	0,982675	1,00033	1,000288	0,006458
15	-30	0,1788	0,17085	1,9397	0,001245	686,41	686,41	705,30	674,20	695,85	1,372	6,38	0,00249	1,034407	1,000435	1,000382	0,008502
16	-29	0,1733	0,16004	1,8802	0,001498	705,30	705,30	726,34	688,88	715,82	1,369	6,42	0,002995	1,090491	1,000562	1,000498	0,010992
17	-28	0,168	0,14954	1,8225	0,001781	726,34	726,34	749,72	704,90	738,03	1,366	6,46	0,003561	1,151368	1,000715	1,000639	0,013987
18	-27	0,1628	0,13936	1,7665	0,002095	749,72	749,72	775,59	722,39	762,65	1,363	6,51	0,004191	1,217506	1,000897	1,000806	0,017549
19	-26	0,1578	0,12951	1,7123	0,002442	775,59	775,59	804,12	741,43	789,85	1,359	6,56	0,004884	1,289395	1,001111	1,001004	0,021739

20	-25	0,153	0,11999	1,66	0,002822	804,12	804,12	835,44	762,15	819,78	1,356	6,62	0,005644	1,367543	1,001361	1,001236	0,026624
21	-24	0,1483	0,11081	1,6095	0,003235	835,44	835,44	869,66	784,63	852,55	1,352	6,67	0,00647	1,452471	1,00165	1,001505	0,032268
22	-23	0,1439	0,10197	1,5608	0,003681	869,66	869,66	906,89	808,99	888,27	1,349	6,73	0,007362	1,544702	1,001981	1,001815	0,038738
23	-22	0,1395	0,09346	1,5141	0,004159	906,89	906,89	947,18	835,29	927,03	1,345	6,79	0,008319	1,644754	1,002357	1,002169	0,046099
24	-21	0,1354	0,08531	1,4692	0,004669	947,18	947,18	990,57	863,61	968,87	1,342	6,86	0,009339	1,753129	1,002782	1,00257	0,054418
25	-20	0,1315	0,07751	1,4263	0,005209	990,57	990,57	1037,06	894,02	1013,81	1,338	6,92	0,010418	1,870298	1,00326	1,003021	0,063757
26	-19	0,1277	0,07007	1,3854	0,005777	1037,06	1037,06	1086,61	926,57	1061,84	1,334	6,98	0,011554	1,996682	1,003792	1,003526	0,074175
27	-18	0,1241	0,06298	1,3464	0,006371	1086,61	1086,61	1139,15	961,28	1112,88	1,331	7,04	0,012742	2,132639	1,004383	1,004088	0,085729
28	-17	0,1207	0,05626	1,3094	0,006987	1139,15	1139,15	1194,55	998,18	1166,85	1,328	7,10	0,013974	2,278438	1,005035	1,004709	0,098471
29	-16	0,1175	0,0499	1,2745	0,007622	1194,55	1194,55	1252,65	1037,26	1223,60	1,324	7,16	0,015243	2,434237	1,005749	1,005392	0,112445
30	-15	0,1144	0,04392	1,2415	0,008271	1252,65	1252,65	1313,24	1078,50	1282,95	1,321	7,22	0,016542	2,600061	1,006528	1,006139	0,127688
31	-14	0,1116	0,0383	1,2107	0,00893	1313,24	1313,24	1376,05	1121,84	1344,65	1,318	7,28	0,01786	2,775773	1,007374	1,006951	0,14423
32	-13	0,1089	0,03306	1,1818	0,009593	1376,05	1376,05	1440,79	1167,21	1408,42	1,316	7,34	0,019186	2,96105	1,008287	1,007831	0,16209
33	-12	0,1065	0,0282	1,1551	0,010254	1440,79	1440,79	1507,09	1214,52	1473,94	1,313	7,39	0,020508	3,155358	1,009268	1,008778	0,181276
34	-11	0,1042	0,02372	1,1304	0,010907	1507,09	1507,09	1574,58	1263,64	1540,83	1,311	7,44	0,021813	3,357931	1,010317	1,009792	0,201784
35	-10	0,1021	0,01962	1,1079	0,011544	1574,58	1574,58	1642,80	1314,42	1608,69	1,308	7,49	0,023087	3,567754	1,011432	1,010874	0,223597
36	-9	0,1002	0,0159	1,0875	0,012158	1642,80	1642,80	1711,31	1366,66	1677,06	1,306	7,53	0,024316	3,783552	1,012612	1,012022	0,246685
37	-8	0,0985	0,01257	1,0692	0,012741	1711,31	1711,31	1779,61	1420,16	1745,46	1,304	7,57	0,025483	4,003787	1,013855	1,013234	0,271
38	-7	0,0971	0,00963	1,053	0,013287	1779,61	1779,61	1847,20	1474,68	1813,41	1,302	7,61	0,026573	4,226667	1,015158	1,014507	0,296483
39	-6	0,0958	0,00708	1,0389	0,013786	1847,20	1847,20	1913,55	1529,96	1880,38	1,301	7,65	0,027572	4,450162	1,016517	1,015838	0,323056
40	-5	0,0947	0,00492	1,0271	0,014231	1913,55	1913,55	1978,15	1585,70	1945,85	1,299	7,68	0,028463	4,672035	1,017927	1,017222	0,350628
41	-4	0,0938	0,00315	1,0173	0,014616	1978,15	1978,15	2040,51	1641,59	2009,33	1,298	7,72	0,029232	4,889883	1,019382	1,018654	0,379091
42	-3	0,0931	0,00177	1,0097	0,014933	2040,51	2040,51	2100,12	1697,32	2070,32	1,297	7,74	0,029865	5,101191	1,020876	1,020129	0,408323
43	-2	0,0926	0,00079	1,0043	0,015175	2100,12	2100,12	2156,56	1752,54	2128,34	1,295	7,77	0,03035	5,303392	1,022403	1,02164	0,438188
44	-1	0,0923	0,0002	1,0011	0,015338	2156,56	2156,56	2209,41	1806,91	2182,99	1,294	7,79	0,030677	5,493937	1,023955	1,023179	0,468539
45	0	0,0922	0	1	0,015418	2209,41	2209,41	2258,33	1860,08	2233,87	1,293	7,81	0,030836	5,670371	1,025523	1,024739	0,499216
46	1	0,0923	0,0002	1,0011	0,015411	2258,33	2258,33	2303,01	1911,72	2280,67	1,293	7,83	0,030822	5,8304	1,0271	1,026312	0,530052
47	2	0,0926	0,00079	1,0043	0,015316	2303,01	2303,01	2343,24	1961,48	2323,12	1,292	7,85	0,030631	5,971966	1,028676	1,027888	0,560874
48	3	0,0931	0,00177	1,0097	0,015131	2343,24	2343,24	2378,85	2009,05	2361,04	1,291	7,86	0,030262	6,093309	1,030242	1,029459	0,591505
49	4	0,0938	0,00315	1,0173	0,014859	2378,85	2378,85	2409,76	2054,14	2394,30	1,291	7,88	0,029718	6,193012	1,031789	1,031015	0,621768
50	5	0,0947	0,00492	1,0271	0,014502	2409,76	2409,76	2435,95	2096,48	2422,85	1,290	7,89	0,029004	6,270047	1,033308	1,032549	0,651486
51	6	0,0958	0,00708	1,0389	0,014064	2435,95	2435,95	2457,49	2135,82	2446,72	1,290	7,89	0,028128	6,323795	1,034791	1,03405	0,68049
52	7	0,0971	0,00963	1,053	0,013551	2457,49	2457,49	2474,49	2171,96	2465,99	1,290	7,90	0,027102	6,354052	1,036229	1,03551	0,708618
53	8	0,0985	0,01257	1,0692	0,01297	2474,49	2474,49	2487,13	2204,74	2480,81	1,290	7,91	0,02594	6,361023	1,037615	1,036922	0,735721
54	9	0,1002	0,0159	1,0875	0,012329	2487,13	2487,13	2495,63	2234,03	2491,38	1,289	7,91	0,024659	6,345299	1,038941	1,038278	0,761661

55	10	0,1021	0,01962	1,1079	0,011638	2495,63	2495,63	2500,27	2259,75	2497,95	1,289	7,91	0,023277	6,307822	1,040202	1,039572	0,78632
56	11	0,1042	0,02372	1,1304	0,010907	2500,27	2500,27	2501,35	2281,85	2500,81	1,289	7,91	0,021815	6,249842	1,041392	1,040797	0,809597
57	12	0,1065	0,0282	1,1551	0,010147	2501,35	2501,35	2499,18	2300,34	2500,27	1,289	7,91	0,020294	6,172866	1,042507	1,04195	0,831411
58	13	0,1089	0,03306	1,1818	0,009368	2499,18	2499,18	2494,10	2315,26	2496,64	1,289	7,91	0,018736	6,0786	1,043545	1,043026	0,851705
59	14	0,1116	0,0383	1,2107	0,008582	2494,10	2494,10	2486,45	2326,69	2490,28	1,289	7,91	0,017164	5,968898	1,044503	1,044024	0,870441
60	15	0,1144	0,04392	1,2415	0,007799	2486,45	2486,45	2476,55	2334,73	2481,50	1,289	7,91	0,015598	5,8457	1,04538	1,044942	0,887605
61	16	0,1175	0,0499	1,2745	0,007029	2476,552	2476,552	2464,722	2339,55	2470,637	1,290	7,91	0,014059	5,710985	1,046178	1,045779	0,903202
62	17	0,1207	0,05626	1,3094	0,006282	2464,72	2464,72	2451,26	2341,30	2457,99	1,290	7,90	0,012565	5,566721	1,046897	1,046537	0,917261
63	18	0,1241	0,06298	1,3464	0,005566	2451,26	2451,26	2436,44	2340,20	2443,85	1,290	7,90	0,011133	5,414826	1,047539	1,047218	0,929826
64	19	0,1277	0,07007	1,3854	0,004888	2436,44	2436,44	2420,50	2336,46	2428,47	1,290	7,89	0,009777	5,257127	1,048108	1,047824	0,940959
65	20	0,1315	0,07751	1,4263	0,004254	2420,50	2420,50	2403,68	2330,30	2412,09	1,290	7,89	0,008508	5,09534	1,048608	1,048358	0,950735
66	21	0,1354	0,08531	1,4692	0,003667	2403,68	2403,68	2386,15	2321,96	2394,92	1,291	7,88	0,007335	4,931044	1,049043	1,048826	0,959243
67	22	0,1395	0,09346	1,5141	0,003131	2386,15	2386,15	2368,10	2311,68	2377,13	1,291	7,88	0,006262	4,765665	1,049418	1,049231	0,966578
68	23	0,1439	0,10197	1,5608	0,002647	2368,10	2368,10	2349,67	2299,70	2358,89	1,291	7,87	0,005295	4,600475	1,049738	1,049578	0,97284
69	24	0,1483	0,11081	1,6095	0,002216	2349,67	2349,67	2330,97	2286,25	2340,32	1,291	7,86	0,004431	4,436581	1,050009	1,049874	0,978135
70	25	0,153	0,11999	1,66	0,001835	2330,97	2330,97	2312,10	2271,56	2321,53	1,292	7,86	0,00367	4,274933	1,050235	1,050122	0,982566
71	26	0,1578	0,12951	1,7123	0,001504	2312,10	2312,10	2293,15	2255,82	2302,62	1,292	7,85	0,003008	4,116325	1,050423	1,050329	0,986237
72	27	0,1628	0,13936	1,7665	0,001219	2293,15	2293,15	2274,20	2239,24	2283,67	1,292	7,84	0,002438	3,961406	1,050577	1,0505	0,989245
73	28	0,168	0,14954	1,8225	0,000977	2274,20	2274,20	2255,30	2222,00	2264,75	1,293	7,84	0,001955	3,810693	1,050702	1,050639	0,991683
74	29	0,1733	0,16004	1,8802	0,000774	2255,30	2255,30	2236,50	2204,25	2245,90	1,293	7,83	0,001549	3,664579	1,050802	1,050752	0,993637
75	30	0,1788	0,17085	1,9397	0,000607	2236,50	2236,50	2217,82	2186,14	2227,16	1,293	7,82	0,001213	3,523349	1,050881	1,050841	0,995186
76	31	0,1844	0,18197	2,0008	0,000469	2217,82	2217,82	2199,29	2167,80	2208,55	1,293	7,82	0,000939	3,387195	1,050943	1,050912	0,996399
77	32	0,1902	0,1934	2,0637	0,000359	2199,29	2199,29	2180,93	2149,33	2190,11	1,294	7,81	0,000717	3,256223	1,050991	1,050967	0,997338
78	33	0,1961	0,20512	2,1282	0,000271	2180,93	2180,93	2162,78	2130,83	2171,86	1,294	7,80	0,000541	3,130476	1,051027	1,051009	0,998055
79	34	0,2022	0,21715	2,1943	0,000202	2162,78	2162,78	2144,84	2112,36	2153,81	1,294	7,80	0,000403	3,009934	1,051055	1,051041	0,998597
80	35	0,2085	0,22946	2,262	0,000148	2144,84	2144,84	#3HACH!	2094,00	#3HACH!	1,295	7,79	0,000297	2,894536	1,051076	1,051065	0,999

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Таблица Б1 - расчетные значения перемещения, скорости и ускорения поршня.

$\varphi_{кв}$ , град	$\varphi_{кв}$ , рад	$S_x$ , мм	$V_x$ , м/с	$W_{x1}$ , м/с <sup>2</sup>	$W_{x2}$ , м/с <sup>2</sup>	$W_x$ , м/с <sup>2</sup>
0	0	0	0	9732,527	2855,4107	12587,9
10	0,1745	0,6964	4,16	9584,668	2683,2084	12267,9
20	0,3491	2,7501	8,11	9145,583	2187,3715	11333
30	0,5236	6,058	11,66	8428,615	1427,7053	9856,32
40	0,6981	10,457	14,63	7455,548	495,83686	7951,38
50	0,8727	15,737	16,92	6255,947	-495,8369	5760,11
60	1,0472	21,656	18,46	4866,263	-1427,705	3438,56
70	1,2217	27,957	19,22	3328,72	-2187,371	1141,35
80	1,3963	34,386	19,24	1690,036	-2683,208	-993,173
90	1,5708	40,708	18,59	5,96E-13	-2855,411	-2855,41
100	1,7453	46,715	17,37	-1690,04	-2683,208	-4373,24
110	1,9199	52,24	15,71	-3328,72	-2187,371	-5516,09
120	2,0944	57,156	13,74	-4866,26	-1427,705	-6293,97
130	2,2689	61,375	11,55	-6255,95	-495,8369	-6751,78
140	2,4435	64,846	9,263	-7455,55	495,83686	-6959,71
150	2,618	67,546	6,932	-8428,62	1427,7053	-7000,91
160	2,7925	69,468	4,605	-9145,58	2187,3715	-6958,21
170	2,9671	70,618	2,295	-9584,67	2683,2084	-6901,46
180	3,1416	71	2E-15	-9732,53	2855,4107	-6877,12
190	3,3161	70,618	-2,295	-9584,67	2683,2084	-6901,46
200	3,4907	69,468	-4,605	-9145,58	2187,3715	-6958,21
210	3,6652	67,546	-6,932	-8428,62	1427,7053	-7000,91
220	3,8397	64,846	-9,263	-7455,55	495,83686	-6959,71
230	4,0143	61,375	-11,55	-6255,95	-495,8369	-6751,78
240	4,1888	57,156	-13,74	-4866,26	-1427,705	-6293,97
250	4,3633	52,24	-15,71	-3328,72	-2187,371	-5516,09
260	4,5379	46,715	-17,37	-1690,04	-2683,208	-4373,24
270	4,7124	40,708	-18,59	-1,8E-12	-2855,411	-2855,41
280	4,8869	34,386	-19,24	1690,036	-2683,208	-993,173
290	5,0615	27,957	-19,22	3328,72	-2187,371	1141,35
300	5,236	21,656	-18,46	4866,263	-1427,705	3438,56
310	5,4105	15,737	-16,92	6255,947	-495,8369	5760,11
320	5,5851	10,457	-14,63	7455,548	495,83686	7951,38
330	5,7596	6,058	-11,66	8428,615	1427,7053	9856,32
340	5,9341	2,7501	-8,11	9145,583	2187,3715	11333
350	6,1087	0,6964	-4,16	9584,668	2683,2084	12267,9
360	6,2832	3E-31	-6E-15	9732,527	2855,4107	12587,9
370	6,4577	0,6964	4,16	9584,668	2683,2084	12267,9
380	6,6323	2,7501	8,11	9145,583	2187,3715	11333
390	6,8068	6,058	11,66	8428,615	1427,7053	9856,32
400	6,9813	10,457	14,63	7455,548	495,83686	7951,38
410	7,1558	15,737	16,92	6255,947	-495,8369	5760,11
420	7,3304	21,656	18,46	4866,263	-1427,705	3438,56
430	7,5049	27,957	19,22	3328,72	-2187,371	1141,35
440	7,6794	34,386	19,24	1690,036	-2683,208	-993,173
450	7,854	40,708	18,59	2,98E-12	-2855,411	-2855,41
460	8,0285	46,715	17,37	-1690,04	-2683,208	-4373,24
470	8,203	52,24	15,71	-3328,72	-2187,371	-5516,09

480	8,3776	57,156	13,74	-4866,26	-1427,705	-6293,97
490	8,5521	61,375	11,55	-6255,95	-495,8369	-6751,78
500	8,7266	64,846	9,263	-7455,55	495,83686	-6959,71
510	8,9012	67,546	6,932	-8428,62	1427,7053	-7000,91
520	9,0757	69,468	4,605	-9145,58	2187,3715	-6958,21
530	9,2502	70,618	2,295	-9584,67	2683,2084	-6901,46
540	9,4248	71	5E-15	-9732,53	2855,4107	-6877,12
550	9,5993	70,618	-2,295	-9584,67	2683,2084	-6901,46
560	9,7738	69,468	-4,605	-9145,58	2187,3715	-6958,21
570	9,9484	67,546	-6,932	-8428,62	1427,7053	-7000,91
580	10,123	64,846	-9,263	-7455,55	495,83686	-6959,71
590	10,297	61,375	-11,55	-6255,95	-495,8369	-6751,78
600	10,472	57,156	-13,74	-4866,26	-1427,705	-6293,97
610	10,647	52,24	-15,71	-3328,72	-2187,371	-5516,09
620	10,821	46,715	-17,37	-1690,04	-2683,208	-4373,24
630	10,996	40,708	-18,59	-4,2E-12	-2855,411	-2855,41
640	11,17	34,386	-19,24	1690,036	-2683,208	-993,173
650	11,345	27,957	-19,22	3328,72	-2187,371	1141,35
660	11,519	21,656	-18,46	4866,263	-1427,705	3438,56
670	11,694	15,737	-16,92	6255,947	-495,8369	5760,11
680	11,868	10,457	-14,63	7455,548	495,83686	7951,38
690	12,043	6,058	-11,66	8428,615	1427,7053	9856,32
700	12,217	2,7501	-8,11	9145,583	2187,3715	11333
710	12,392	0,6964	-4,16	9584,668	2683,2084	12267,9
720	12,566	1E-30	-1E-14	9732,527	2855,4107	12587,9

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**(обязательное)**

Таблица В1 - Сводная таблица динамического расчета двигателя.

$\varphi^\circ$	$\Delta p_r$ , Мпа	$W$ , м/с <sup>2</sup>	$p_r$ , МПа	$p_s$ , Мпа	$\text{tg}\beta$	$p_N$ , МПа	$1/\cos\beta$	$p_s$ , Мпа	$\cos(\beta+\varphi)/\cos\beta$	$p_k$ , Мпа	$\sin(\beta+\varphi)/\cos\beta$	$p_T$ , Мпа	$T$ , кН	$M_{кв.ц}$ , Нм
0	0,0058	21539	-2,542	-2,5357	0	0	1	-2,536	1	-2,536	0	0	0	0
10	-0,0042	20988	-2,477	-2,4807	0,0521	-0,129	1,0014	-2,484	0,975767	-2,421	0,224914	-0,55795	-3,47111	-167,307
20	-0,0142	19379	-2,287	-2,3009	0,1029	-0,237	1,0053	-2,313	0,904474	-2,081	0,438741	-1,00949	-6,2802	-302,706
30	-0,0162	16838	-1,987	-2,0031	0,1514	-0,303	1,0113	-2,026	0,790277	-1,583	0,631072	-1,26409	-7,86407	-379,048
40	-0,0192	13562	-1,6	-1,6195	0,1961	-0,318	1,0189	-1,65	0,639878	-1,036	0,79287	-1,28405	-7,98823	-385,033
50	-0,0222	9796	-1,156	-1,1781	0,2355	-0,277	1,027	-1,21	0,462126	-0,544	0,917162	-1,08052	-6,72206	-324,003
60	-0,0252	5811	-0,686	-0,7108	0,2683	-0,191	1,0348	-0,736	0,267354	-0,19	0,999645	-0,71054	-4,42037	-213,062
70	-0,0282	1872	-0,221	-0,2491	0,2929	-0,073	1,0412	-0,259	0,066479	-0,017	1,039078	-0,25881	-1,61007	-77,6055
80	-0,0302	-1780	0,21	0,1799	0,3082	0,0554	1,0454	0,188	-0,13008	-0,023	1,037314	0,186579	1,160733	55,94731
90	-0,0302	-4957	0,5849	0,5548	0,3134	0,1739	1,0469	0,5808	-0,31342	-0,174	0,998899	0,554148	3,44743	166,1661
100	-0,0194	-7535	0,8892	0,8697	0,3082	0,2681	1,0454	0,9093	-0,47701	-0,415	0,930268	0,809097	5,033509	242,6151
110	-0,0194	-9464	1,1167	1,0973	0,2929	0,3214	1,0412	1,1425	-0,61698	-0,677	0,838712	0,920335	5,725531	275,9706
120	-0,0194	-10762	1,2699	1,2505	0,2683	0,3355	1,0348	1,294	-0,73204	-0,915	0,731358	0,914534	5,689444	274,2312
130	-0,0194	-11508	1,358	1,3386	0,2355	0,3153	1,027	1,3747	-0,82298	-1,102	0,614368	0,822375	5,116112	246,5966
140	-0,0184	-11827	1,3956	1,3772	0,1961	0,27	1,0189	1,4032	-0,89194	-1,228	0,492477	0,678246	4,219466	203,3783
150	-0,0174	-11865	1,4	1,3826	0,1514	0,2093	1,0113	1,3983	-0,94166	-1,302	0,368864	0,509991	3,172723	152,9252
160	-0,0164	-11765	1,3882	1,3718	0,1029	0,1412	1,0053	1,3791	-0,97488	-1,337	0,24529	0,336495	2,09338	100,9009
170	-0,0144	-11650	1,3747	1,3603	0,0521	0,0708	1,0014	1,3622	-0,99385	-1,352	0,122382	0,166477	1,035679	49,91974
180	-0,0124	-11602	1,3691	1,3566	4E-17	5E-17	1	1,3566	-1	-1,357	1,23E-16	1,66E-16	1,03E-15	4,98E-14
190	-0,0104	-11649	1,3746	1,3642	-0,052	-0,071	1,0014	1,366	-0,99385	-1,356	-0,12238	-0,16695	-1,03861	-50,0611
200	-0,0084	-11762	1,388	1,3795	-0,103	-0,142	1,0053	1,3868	-0,97488	-1,345	-0,24529	-0,33838	-2,10514	-101,468
210	-0,0064	-11861	1,3996	1,3932	-0,151	-0,211	1,0113	1,4089	-0,94166	-1,312	-0,36886	-0,51388	-3,19695	-154,093
220	-0,0044	-11822	1,395	1,3906	-0,196	-0,273	1,0189	1,4169	-0,89194	-1,24	-0,49248	-0,68485	-4,26055	-205,358
230	-0,0034	-11502	1,3573	1,3539	-0,236	-0,319	1,027	1,3905	-0,82298	-1,114	-0,61437	-0,83178	-5,17465	-249,418
240	0,0055	-10754	1,269	1,2745	-0,268	-0,342	1,0348	1,3188	-0,73204	-0,933	-0,73136	-0,93211	-5,79876	-279,5
250	0,0177	-9455	1,1157	1,1335	-0,293	-0,332	1,0412	1,1802	-0,61698	-0,699	-0,83871	-0,95064	-5,91406	-285,057
260	0,0348	-7525	0,888	0,9228	-0,308	-0,284	1,0454	0,9647	-0,47701	-0,44	-0,93027	-0,85843	-5,34044	-257,409
270	0,0589	-4946	0,5836	0,6424	-0,313	-0,201	1,0469	0,6726	-0,31342	-0,201	-0,9989	-0,64174	-3,99234	-192,431

280	0,0936	-1767	0,2085	0,3021	-0,308	-0,093	1,0454	0,3158	-0,13008	-0,039	-1,03731	-0,31339	-1,94967	-93,9742
290	0,1450	1886	-0,223	-0,0775	-0,293	0,0227	1,0412	-0,081	0,066479	-0,005	-1,03908	0,080555	0,501147	24,15527
300	0,2237	5826	-0,687	-0,4637	-0,268	0,1244	1,0348	-0,48	0,267354	-0,124	-0,99964	0,463509	2,883555	138,9874
310	0,3485	9813	-1,158	-0,8094	-0,236	0,1906	1,027	-0,831	0,462126	-0,374	-0,91716	0,742366	4,618362	222,605
320	0,5522	13580	-1,602	-1,0502	-0,196	0,2059	1,0189	-1,07	0,639878	-0,672	-0,79287	0,832665	5,180123	249,6819
330	0,9344	16857	-1,989	-1,0547	-0,151	0,1597	1,0113	-1,067	0,790277	-0,834	-0,63107	0,665616	4,140893	199,5911
331	0,9905	17148	-2,023	-1,033	-0,147	0,1515	1,0106	-1,044	0,803455	-0,83	-0,61308	0,633305	3,939879	189,9022
332	1,0514	17432	-2,057	-1,0056	-0,142	0,1427	1,01	-1,016	0,816261	-0,821	-0,59478	0,598088	3,720791	179,3421
333	1,1175	17707	-2,089	-0,9719	-0,137	0,1333	1,0093	-0,981	0,828688	-0,805	-0,5762	0,560027	3,484008	167,9292
334	1,1894	17975	-2,121	-0,9316	-0,132	0,1233	1,0087	-0,94	0,840729	-0,783	-0,55734	0,519217	3,23012	155,6918
335	1,2675	18234	-2,152	-0,884	-0,128	0,1128	1,0081	-0,891	0,852376	-0,754	-0,5382	0,475791	2,959965	142,6703
336	1,3525	18485	-2,181	-0,8287	-0,123	0,1017	1,0075	-0,835	0,863622	-0,716	-0,5188	0,429931	2,674659	128,9186
337	1,4447	18727	-2,21	-0,765	-0,118	0,0901	1,0069	-0,77	0,874462	-0,669	-0,49914	0,381865	2,375637	114,5057
338	1,5448	18960	-2,237	-0,6925	-0,113	0,0782	1,0063	-0,697	0,884888	-0,613	-0,47924	0,331882	2,064681	99,51764
339	1,6531	19184	-2,264	-0,6106	-0,108	0,0659	1,0058	-0,614	0,894894	-0,546	-0,4591	0,280328	1,743961	84,05892
340	1,7703	19399	-2,289	-0,5188	-0,103	0,0534	1,0053	-0,522	0,904474	-0,469	-0,43874	0,22762	1,416056	68,25389
341	1,8967	19605	-2,313	-0,4167	-0,098	0,0408	1,0048	-0,419	0,913624	-0,381	-0,41816	0,174242	1,083981	52,24788
342	2,0326	19801	-2,337	-0,3039	-0,093	0,0282	1,0043	-0,305	0,922337	-0,28	-0,39738	0,12075	0,751203	36,20799
343	2,1784	19987	-2,359	-0,1801	-0,088	0,0158	1,0038	-0,181	0,930608	-0,168	-0,3764	0,067776	0,421644	20,32322
344	2,3342	20164	-2,379	-0,0451	-0,083	0,0037	1,0034	-0,045	0,938433	-0,042	-0,35523	0,016021	0,09967	4,804098
345	2,5001	20330	-2,399	0,1011	-0,078	-0,008	1,003	0,1014	0,945806	0,096	-0,33389	-0,03374	-0,20993	-10,1186
346	2,6758	20487	-2,417	0,2583	-0,073	-0,019	1,0026	0,259	0,952725	0,246	-0,31238	-0,08069	-0,502	-24,1963
347	2,8611	20633	-2,435	0,4263	-0,067	-0,029	1,0023	0,4273	0,959184	0,409	-0,29072	-0,12394	-0,77107	-37,1656
348	3,0554	20769	-2,451	0,6046	-0,062	-0,038	1,0019	0,6058	0,965179	0,584	-0,26891	-0,16259	-1,01148	-48,7533
349	3,2579	20894	-2,466	0,7924	-0,057	-0,045	1,0016	0,7937	0,970708	0,769	-0,24698	-0,1957	-1,21747	-58,682
350	3,4678	21009	-2,479	0,9887	-0,052	-0,051	1,0014	0,99	0,975767	0,965	-0,22491	-0,22236	-1,38334	-66,6771
351	3,6836	21114	-2,491	1,1922	-0,047	-0,056	1,0011	1,1935	0,980353	1,169	-0,20274	-0,2417	-1,50364	-72,4757
352	3,9038	21207	-2,502	1,4014	-0,042	-0,058	1,0009	1,4026	0,984464	1,38	-0,18047	-0,2529	-1,57334	-75,8349
353	4,1267	21290	-2,512	1,6145	-0,037	-0,059	1,0007	1,6156	0,988097	1,595	-0,15811	-0,25526	-1,58801	-76,5423
354	4,3502	21361	-2,521	1,8295	-0,031	-0,057	1,0005	1,8304	0,991249	1,814	-0,13567	-0,2482	-1,5441	-74,4257
355	4,5720	21422	-2,528	2,0442	-0,026	-0,053	1,0003	2,0449	0,99392	2,032	-0,11316	-0,23132	-1,43906	-69,3628
356	4,7899	21472	-2,534	2,2562	-0,021	-0,047	1,0002	2,2567	0,996107	2,247	-0,09059	-0,20439	-1,27157	-61,2896

357	5,0012	21511	-2,538	2,4629	-0,016	-0,039	1,0001	2,4632	0,997809	2,458	-0,06798	-0,16744	-1,04166	-50,2081
358	5,2034	21539	-2,542	2,6618	-0,01	-0,028	1,0001	2,662	0,999026	2,659	-0,04534	-0,12069	-0,75084	-36,1905
359	5,3939	21555	-2,544	2,8504	-0,005	-0,015	1	2,8504	0,999757	2,85	-0,02268	-0,06464	-0,40212	-19,382
360	5,5704	21561	-2,544	3,0262	-7E-17	-2E-16	1	3,0262	1	3,026	-2,5E-16	-7,4E-16	-4,6E-15	-2,2E-13
361	5,7304	21556	-2,544	3,1868	0,0052	0,0167	1	3,1869	0,999757	3,186	0,022677	0,072267	0,449581	21,66979
362	5,8720	21539	-2,542	3,3304	0,0104	0,0348	1,0001	3,3305	0,999026	3,327	0,045342	0,151005	0,939423	45,28018
363	5,9933	21511	-2,538	3,455	0,0157	0,0541	1,0001	3,4554	0,997809	3,447	0,067985	0,234885	1,461252	70,43236
364	6,0930	21473	-2,534	3,5592	0,0209	0,0743	1,0002	3,56	0,996107	3,545	0,090594	0,322445	2,005975	96,68798
365	6,1700	21423	-2,528	3,6421	0,0261	0,0951	1,0003	3,6434	0,99392	3,62	0,113158	0,412137	2,563964	123,583
366	6,2238	21362	-2,521	3,7031	0,0313	0,1159	1,0005	3,7049	0,991249	3,671	0,135666	0,502378	3,125366	150,6426
367	6,2541	21291	-2,512	3,7418	0,0365	0,1366	1,0007	3,7443	0,988097	3,697	0,158107	0,591598	3,680415	177,396
368	6,2610	21208	-2,503	3,7585	0,0417	0,1567	1,0009	3,7617	0,984464	3,7	0,180469	0,678288	4,219727	203,3908
369	6,2453	21115	-2,492	3,7538	0,0469	0,176	1,0011	3,7579	0,980353	3,68	0,202742	0,761045	4,73457	228,2063
370	6,2078	21011	-2,479	3,7286	0,0521	0,1941	1,0014	3,7336	0,975767	3,638	0,224914	0,838609	5,217101	251,4643
371	6,1498	20896	-2,466	3,6841	0,0572	0,2108	1,0016	3,6902	0,970708	3,576	0,246975	0,909888	5,660543	272,8382
372	6,0729	20771	-2,451	3,6219	0,0624	0,2259	1,0019	3,629	0,965179	3,496	0,268914	0,973989	6,059322	292,0593
373	5,9786	20635	-2,435	3,5437	0,0675	0,2392	1,0023	3,5517	0,959184	3,399	0,290719	1,03022	6,40914	308,9206
374	5,8689	20489	-2,418	3,4512	0,0726	0,2506	1,0026	3,4603	0,952725	3,288	0,312381	1,078099	6,707003	323,2775
375	5,7457	20332	-2,399	3,3465	0,0777	0,2601	1,003	3,3566	0,945806	3,165	0,333888	1,117351	6,951194	335,0475
376	5,6110	20166	-2,38	3,2314	0,0828	0,2676	1,0034	3,2425	0,938433	3,032	0,35523	1,147894	7,141212	344,2064
377	5,4667	19989	-2,359	3,108	0,0879	0,2731	1,0038	3,1199	0,930608	2,892	0,376397	1,169829	7,27767	350,7837
378	5,3148	19803	-2,337	2,9781	0,0929	0,2767	1,0043	2,9909	0,922337	2,747	0,397378	1,183412	7,362171	354,8566
379	5,1571	19607	-2,314	2,8435	0,0979	0,2785	1,0048	2,8571	0,913624	2,598	0,418162	1,189037	7,397164	356,5433
380	4,9953	19402	-2,289	2,7059	0,1029	0,2785	1,0053	2,7202	0,904474	2,447	0,438741	1,187209	7,385794	355,9953
381	4,8310	19187	-2,264	2,567	0,1079	0,277	1,0058	2,5819	0,894894	2,297	0,459104	1,178521	7,331747	353,3902
382	4,6657	18963	-2,238	2,4281	0,1129	0,274	1,0063	2,4434	0,884888	2,149	0,47924	1,163629	7,239101	348,9247
383	4,5005	18730	-2,21	2,2904	0,1178	0,2698	1,0069	2,3062	0,874462	2,003	0,499141	1,143228	7,112184	342,8073
384	4,3366	18488	-2,182	2,1551	0,1227	0,2644	1,0075	2,1711	0,863622	1,861	0,518797	1,118034	6,955446	335,2525
385	4,1749	18237	-2,152	2,023	0,1275	0,258	1,0081	2,0393	0,852376	1,724	0,538198	1,088763	6,773349	326,4754
386	3,8904	17978	-2,121	1,769	0,1324	0,2342	1,0087	1,7844	0,840729	1,487	0,557336	0,985922	6,133556	295,6374
387	3,7455	17710	-2,09	1,6556	0,1372	0,2271	1,0093	1,6711	0,828688	1,372	0,576201	0,953973	5,934799	286,0573
388	3,6056	17435	-2,057	1,5483	0,142	0,2198	1,01	1,5637	0,816261	1,264	0,594784	0,920897	5,729028	276,1392
389	3,4709	17152	-2,024	1,447	0,1467	0,2123	1,0106	1,4624	0,803455	1,163	0,613077	0,88711	5,518835	266,0079

390	3,3413	16861	-1,99	1,3517	0,1514	0,2046	1,0113	1,367	0,790277	1,068	0,631072	0,852996	5,30661	255,7786
391	3,2167	16563	-1,954	1,2623	0,156	0,197	1,012	1,2775	0,776735	0,98	0,648759	0,818908	5,094539	245,5568
392	3,0970	16257	-1,918	1,1787	0,1607	0,1894	1,0127	1,1937	0,762838	0,899	0,666131	0,785163	4,884609	235,4382
393	2,9823	15945	-1,881	1,1008	0,1653	0,1819	1,0135	1,1156	0,748593	0,824	0,68318	0,752051	4,678614	225,5092
394	2,8723	15626	-1,844	1,0285	0,1698	0,1746	1,0142	1,0431	0,734009	0,755	0,699899	0,719829	4,478158	215,8472
395	2,7670	15300	-1,805	0,9615	0,1743	0,1676	1,015	0,9759	0,719094	0,691	0,716279	0,688728	4,28467	206,5211
396	2,6661	14969	-1,766	0,8998	0,1787	0,1608	1,0157	0,914	0,703857	0,633	0,732315	0,658948	4,099406	197,5914
397	2,5696	14631	-1,726	0,8431	0,1831	0,1544	1,0165	0,857	0,688308	0,58	0,747998	0,630666	3,923462	189,1109
398	2,4773	14288	-1,686	0,7913	0,1875	0,1484	1,0173	0,805	0,672456	0,532	0,763322	0,604034	3,757782	181,1251
399	2,3889	13939	-1,645	0,7442	0,1918	0,1427	1,0181	0,7576	0,656309	0,488	0,778282	0,579181	3,603168	173,6727
400	2,3045	13585	-1,603	0,7015	0,1961	0,1375	1,0189	0,7148	0,639878	0,449	0,79287	0,556215	3,460292	166,7861
410	1,6401	9819	-1,159	0,4814	0,2355	0,1134	1,027	0,4944	0,462126	0,222	0,917162	0,441556	2,746979	132,4044
420	1,2133	5833	-0,688	0,525	0,2683	0,1408	1,0348	0,5432	0,267354	0,14	0,999645	0,524767	3,264647	157,356
430	0,9324	1895	-0,224	0,7089	0,2929	0,2076	1,0412	0,7381	0,066479	0,047	1,039078	0,736569	4,582296	220,8667
440	0,7423	-1757	0,2074	0,9497	0,3082	0,2927	1,0454	0,9929	-0,13008	-0,124	1,037314	0,985149	6,128748	295,4056
450	0,6102	-4934	0,5823	1,1924	0,3134	0,3737	1,0469	1,2484	-0,31342	-0,374	0,998899	1,19113	7,410184	357,1708
460	0,5162	-7513	0,8865	1,4028	0,3082	0,4324	1,0454	1,4665	-0,47701	-0,669	0,930268	1,304937	8,118198	391,2971
470	0,4483	-9441	1,1141	1,5624	0,2929	0,4577	1,0412	1,6268	-0,61698	-0,964	0,838712	1,310404	8,152209	392,9365
480	0,3987	-10739	1,2672	1,6659	0,2683	0,4469	1,0348	1,7238	-0,73204	-1,22	0,731358	1,218373	7,579668	365,34
490	0,3623	-11486	1,3553	1,7176	0,2355	0,4046	1,027	1,764	-0,82298	-1,414	0,614368	1,055262	6,564935	316,4299
500	0,3358	-11805	1,393	1,7288	0,1961	0,339	1,0189	1,7615	-0,89194	-1,542	0,492477	0,851413	5,296758	255,3037
510	0,2358	-11842	1,3974	1,6332	0,1514	0,2472	1,0113	1,6517	-0,94166	-1,538	0,368864	0,602437	3,747843	180,646
520	0,1358	-11742	1,3856	1,5214	0,1029	0,1566	1,0053	1,5295	-0,97488	-1,483	0,24529	0,373196	2,321705	111,9062
530	0,1258	-11628	1,3721	1,4979	0,0521	0,078	1,0014	1,5	-0,99385	-1,489	0,122382	0,18332	1,140461	54,97023
540	0,0258	-11580	1,3664	1,3923	1E-16	2E-16	1	1,3923	-1	-1,392	3,68E-16	5,12E-16	3,18E-15	1,53E-13
550	0,0058	-11627	1,3719	1,3778	-0,052	-0,072	1,0014	1,3797	-0,99385	-1,369	-0,12238	-0,16862	-1,04899	-50,5612
560	0,0058	-11740	1,3853	1,3912	-0,103	-0,143	1,0053	1,3985	-0,97488	-1,356	-0,24529	-0,34124	-2,12288	-102,323
570	0,0058	-11838	1,3969	1,4028	-0,151	-0,212	1,0113	1,4187	-0,94166	-1,321	-0,36886	-0,51744	-3,21904	-155,158
580	0,0058	-11800	1,3924	1,3983	-0,196	-0,274	1,0189	1,4246	-0,89194	-1,247	-0,49248	-0,68861	-4,28392	-206,485
590	0,0058	-11480	1,3546	1,3605	-0,236	-0,32	1,027	1,3972	-0,82298	-1,12	-0,61437	-0,83583	-5,19979	-250,63
600	0,0058	-10732	1,2664	1,2722	-0,268	-0,341	1,0348	1,3165	-0,73204	-0,931	-0,73136	-0,93044	-5,78838	-279
610	0,0058	-9433	1,1131	1,1189	-0,293	-0,328	1,0412	1,165	-0,61698	-0,69	-0,83871	-0,93845	-5,83823	-281,403
620	0,0058	-7503	0,8854	0,8912	-0,308	-0,275	1,0454	0,9317	-0,47701	-0,425	-0,93027	-0,82905	-5,15766	-248,599

630	0,0058	-4923	0,5809	0,5868	-0,313	-0,184	1,0469	0,6143	-0,31342	-0,184	-0,9989	-0,58614	-3,64648	-175,761
640	0,0058	-1745	0,2059	0,2118	-0,308	-0,065	1,0454	0,2214	-0,13008	-0,028	-1,03731	-0,21965	-1,3665	-65,8651
650	0,0058	1908	-0,225	-0,2193	-0,293	0,0642	1,0412	-0,228	0,066479	-0,015	-1,03908	0,227906	1,417837	68,33974
660	0,0058	5848	-0,69	-0,6842	-0,268	0,1836	1,0348	-0,708	0,267354	-0,183	-0,99964	0,683958	4,254999	205,091
670	0,0058	9835	-1,161	-1,1547	-0,236	0,272	1,027	-1,186	0,462126	-0,534	-0,91716	1,059015	6,588282	317,5552
680	0,0058	13602	-1,605	-1,5992	-0,196	0,3135	1,0189	-1,629	0,639878	-1,023	-0,79287	1,267952	7,888106	380,2067
690	0,0058	16879	-1,992	-1,9859	-0,151	0,3006	1,0113	-2,008	0,790277	-1,569	-0,63107	1,253264	7,796729	375,8024
700	0,0058	19421	-2,292	-2,2859	-0,103	0,2353	1,0053	-2,298	0,904474	-2,068	-0,43874	1,00291	6,239245	300,7316
710	0,0058	21032	-2,482	-2,4759	-0,052	0,1289	1,0014	-2,479	0,975767	-2,416	-0,22491	0,556861	3,46431	166,9797
720	0,0058	21583	-2,547	-2,541	-1E-16	4E-16	1	-2,541	1	-2,541	-4,9E-16	1,25E-15	7,75E-15	3,73E-13

Таблица В2 – Суммирование значений крутящих моментов всех четырех цилиндров.

$\varphi^\circ$	Цилиндры								$M_{кр},$ Нм
	1-й		2-й		3-й		4-й		
	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	
0	0	0	180	1E-14	360	3,5E-14	540	-2E-13	0
10	10	-36,07	190	-10,93	370	-11,256	550	190,85	132,59
20	20	-65,74	200	-22,16	380	-22,734	560	291,26	180,63
30	30	-82,66	210	-33,63	390	-34,373	570	261,59	110,93
40	40	-84,6	220	-44,76	400	-45,587	580	214,87	39,918
50	50	-72,18	230	-54,21	410	-55,137	590	175,78	-5,736
60	60	-48,94	240	-61,13	420	-61,171	600	152,58	-18,66
70	70	-20,26	250	-63,15	430	-61,512	610	142,39	-2,519
80	80	8,3688	260	-58,62	440	-54,214	620	139,1	34,637
90	90	32,422	270	-46,95	450	-38,295	630	136,9	84,079
100	100	50,369	280	-29,31	460	-14,461	640	131,86	138,46
110	110	58,042	290	-9,066	470	14,4995	650	122,27	185,74
120	120	58,141	300	8,4398	480	43,8974	660	108,26	218,74
130	130	52,59	310	16,889	490	67,9991	670	91,066	228,54
140	140	43,624	320	10,967	500	81,3815	680	72,276	208,25
150	150	32,962	330	-14,81	510	80,4014	690	48,317	146,87
160	160	21,836	340	-61,43	520	64,3178	700	27,979	52,704
170	170	10,848	350	-90,75	530	35,7046	710	13,672	-30,53
180	180	1E-14	360	-2E-13	540	8E-14	720	3E-14	-6E-14

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г1- Силы, действующих на шатунную шейку коленчатого вала.

φ, град	K, Н	T, Н	R <sub>к</sub> , Н	R <sub>ш.ш.</sub> , Н	K <sub>рк</sub> , Н	R <sub>к</sub> , Н
0	0	-4,6102025	-12,0555	12,0555	-24,0365	24,03646
10	-1,016052	-4,4291126	-11,8744	11,9178	-23,8554	23,877
20	-1,851918	-3,8378777	-11,2832	11,4342	-23,2641	23,33773
30	-2,328369	-2,9339449	-10,3793	10,6372	-22,3602	22,4811
40	-2,383195	-1,9388223	-9,38413	9,6820	-21,3651	21,49759
50	-2,033126	-1,0364618	-8,48177	8,7220	-20,4627	20,56347
60	-1,37865	-0,3766598	-7,82197	7,9425	-19,8029	19,85085
70	-0,570606	-0,0398663	-7,48517	7,5069	-19,4661	19,47448
80	0,235741	-0,0280853	-7,47339	7,4771	-19,4543	19,45577
90	0,913285	-0,2802814	-7,72559	7,7794	-19,7065	19,72769
100	1,418847	-0,7165241	-8,16183	8,2842	-20,1428	20,19269
110	1,634981	-1,1880331	-8,63334	8,7868	-20,6143	20,67903
120	1,63778	-1,6218045	-9,06711	9,2138	-21,0481	21,11168
130	1,481395	-1,9650275	-9,41033	9,5262	-21,3913	21,44252
140	1,228847	-2,2051111	-9,65042	9,7283	-21,6314	21,66624
150	0,928506	-2,3493772	-9,79468	9,8386	-21,7756	21,79542
160	0,61509	-2,4235233	-9,86883	9,8880	-21,8498	21,85844
170	0,305568	-2,4603428	-9,90565	9,9104	-21,8866	21,88873
180	3,03E-16	-2,4762505	-9,92156	9,9216	-21,9025	21,90251
190	-0,307837	-2,4786104	-9,92392	9,9287	-21,9049	21,90703
200	-0,624181	-2,4593422	-9,90465	9,9243	-21,8856	21,8945
210	-0,947291	-2,3969087	-9,84221	9,8877	-21,8232	21,84372
220	-1,260741	-2,2623439	-9,70765	9,7892	-21,6886	21,72521
230	-1,526978	-2,025492	-9,4708	9,5931	-21,4517	21,50603
240	-1,721901	-1,7051046	-9,15041	9,3110	-21,1314	21,2014
250	-1,778739	-1,2924921	-8,7378	8,9170	-20,7187	20,79496
260	-1,651185	-0,8338558	-8,27916	8,4422	-20,2601	20,32729
270	-1,322406	-0,4058383	-7,85114	7,9617	-19,8321	19,87613
280	-0,825577	-0,0983562	-7,54366	7,5887	-19,5246	19,54206
290	-0,255374	0,01784209	-7,42746	7,4319	-19,4084	19,41009
300	0,237741	-0,064953	-7,51026	7,5140	-19,4912	19,49266
310	0,475748	-0,2425305	-7,68784	7,7025	-19,6688	19,67454
320	0,308924	-0,2513214	-7,69663	7,7028	-19,6776	19,68
330	-0,417096	0,52557708	-6,91973	6,9323	-18,9007	18,90528
340	-1,730356	3,58595558	-3,85935	4,2295	-15,8403	15,93453
350	-2,556466	11,1439951	3,69869	4,4962	-8,28226	8,667835
360	-5,14E-15	20,9643418	13,51904	13,5190	1,538086	1,538086
363	5,375939	23,4344723	15,98917	16,8687	4,008216	6,705708
370	8,204611	17,0030756	9,55777	12,5963	-2,42318	8,554966
380	7,368704	9,28519999	1,839895	7,5949	-10,1411	12,5355
390	6,052538	4,9239753	-2,52133	6,5567	-14,5023	15,71462
400	4,951686	2,52430606	-4,921	6,9811	-16,902	17,61236
410	4,298116	1,17428461	-6,27102	7,6026	-18,252	18,75122
420	4,011125	0,28024373	-7,16506	8,2114	-19,146	19,56167
430	3,918276	-0,4668086	-7,91211	8,8292	-19,8931	20,27528
440	3,856279	-1,1834683	-8,62877	9,4513	-20,6097	20,96739
450	3,714323	-1,8757495	-9,32105	10,0339	-21,302	21,6234
460	3,444171	-2,5026521	-9,94796	10,5273	-21,9289	22,19773
470	3,04951	-3,019763	-10,4651	10,9003	-22,446	22,65222
480	2,565226	-3,4026981	-10,848	11,1472	-22,829	22,97263

490	2,035938	-3,6534003	-11,0987	11,2839	-23,0797	23,16928
500	1,36103	-3,4437837	-10,8891	10,9738	-22,87	22,9105
510	0,788127	-3,1053078	-10,5506	10,5800	-22,5316	22,54534
520	0,38513	-3,1009572	-10,5463	10,5533	-22,5272	22,53051
530	9,75E-16	-2,6521564	-10,0975	10,0975	-22,0784	22,07841
540	-0,317067	-2,5529306	-9,99824	10,0033	-21,9792	21,98147
550	-0,640401	-2,5232507	-9,96856	9,9891	-21,9495	21,95885
560	-0,968251	-2,4499438	-9,89525	9,9425	-21,8762	21,89762
570	-1,284146	-2,3043433	-9,74965	9,8339	-21,7306	21,76851
580	-1,553155	-2,060216	-9,50552	9,6316	-21,4865	21,54253
590	-1,723118	-1,7063103	-9,15162	9,3124	-21,1326	21,2027
600	-1,73274	-1,2590676	-8,70437	8,8752	-20,6853	20,75777
610	-1,527153	-0,7712189	-8,21652	8,3572	-20,1975	20,25513
620	-1,078741	-0,3310589	-7,77636	7,8508	-19,7573	19,78674
630	-0,407355	-0,0485307	-7,49384	7,5049	-19,4748	19,47905
640	0,408437	-0,0285361	-7,47384	7,4850	-19,4548	19,45908
650	1,236548	-0,3378362	-7,78314	7,8808	-19,7641	19,80274
660	1,915466	-0,9764803	-8,42179	8,6369	-20,4027	20,49245
670	2,292437	-1,8649866	-9,31029	9,5884	-21,2912	21,4143
680	2,264827	-2,8538767	-10,2992	10,5453	-22,2801	22,39495
690	1,811768	-3,7546718	-11,2	11,3456	-23,1809	23,25162
700	1,005762	-4,3842579	-11,8296	11,8722	-23,8105	23,83175
710	2,26E-15	-4,6102025	-12,0555	12,0555	-24,0365	24,03646
720	0	0	-7,44531	7,4453	-19,4263	19,42626

Таблица Г2 - Определение суммарных сил, действующих по каждому лучу диаграммы износа шатунной шейки.

Rш.ш i	Значения Rш.ш i, кН, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rш.ш 0	8032,4	8032,4	8032,4	0	0	0	0	0	0	0	8032,4	8032,4
Rш.ш 10	7916,78	7916,78	7916,78	0	0	0	0	0	0	0	7916,78	7916,78
Rш.ш 20	7492,55	7492,55	7492,55	0	0	0	0	0	0	0	7492,55	7492,55
Rш.ш 30	6769,19	6769,19	6769,19	0	0	0	0	0	0	0	0	6769,19
Rш.ш 40	5866,87	5866,87	5866,87	0	0	0	0	0	0	0	0	5866,87
Rш.ш 50	4900,33	4900,33	4900,33	0	0	0	0	0	0	0	0	4900,33
Rш.ш 60	4041,29	4041,29	4041,29	0	0	0	0	0	0	0	0	4041,29
Rш.ш 70	3508,77	3508,77	3508,77	0	0	0	0	0	0	0	3508,77	3508,77
Rш.ш 80	3458,33	3458,33	3458,33	0	0	0	0	0	0	0	3458,33	3458,33
Rш.ш 90	3813,46	3813,46	0	0	0	0	0	0	0	0	3813,46	3813,46
Rш.ш 100	4375,18	4375,18	0	0	0	0	0	0	0	0	4375,18	4375,18
Rш.ш 110	4891,57	4891,57	0	0	0	0	0	0	0	0	4891,57	4891,57
Rш.ш 120	5303,24	5303,24	0	0	0	0	0	0	0	0	5303,24	5303,24
Rш.ш 130	5587,19	5587,19	0	0	0	0	0	0	0	0	5587,19	5587,19
Rш.ш 140	5759,92	5759,92	0	0	0	0	0	0	0	0	5759,92	5759,92
Rш.ш 150	5845,79	5845,79	0	0	0	0	0	0	0	0	5845,79	5845,79
Rш.ш 160	5877,99	5877,99	5877,99	0	0	0	0	0	0	0	5877,99	5877,99
Rш.ш 170	5890,47	5890,47	5890,47	0	0	0	0	0	0	0	5890,47	5890,47
Rш.ш 180	5898,45	5898,45	5898,45	0	0	0	0	0	0	0	5898,45	5898,45
Rш.ш 190	5908,83	5908,83	5908,83	0	0	0	0	0	0	0	5908,83	5908,83
Rш.ш 200	5914,57	5914,57	5914,57	0	0	0	0	0	0	0	5914,57	5914,57
Rш.ш 210	5895,71	5895,71	5895,71	0	0	0	0	0	0	0	0	5895,71
Rш.ш 220	5822,67	5822,67	5822,67	0	0	0	0	0	0	0	0	5822,67
Rш.ш 230	5657,65	5657,65	5657,65	0	0	0	0	0	0	0	0	5657,65
Rш.ш 240	5408,71	5408,71	5408,71	0	0	0	0	0	0	0	0	5408,71
Rш.ш 250	5039,07	5039,07	5039,07	0	0	0	0	0	0	0	0	5039,07
Rш.ш 260	4565,13	4565,13	4565,13	0	0	0	0	0	0	0	0	4565,13
Rш.ш 270	4050,02	4050,02	4050,02	0	0	0	0	0	0	0	0	4050,02
Rш.ш 280	3616,06	3616,06	3616,06	0	0	0	0	0	0	0	3616,06	3616,06
Rш.ш 290	3413,92	3413,92	3413,92	0	0	0	0	0	0	0	3413,92	3413,92
Rш.ш 300	3495,25	3495,25	0	0	0	0	0	0	0	0	3495,25	3495,25
Rш.ш 310	3695,48	3695,48	0	0	0	0	0	0	0	0	3695,48	3695,48
Rш.ш 320	3686,49	3686,49	0	0	0	0	0	0	0	0	3686,49	3686,49
Rш.ш 330	2926,5	2926,5	0	0	0	0	0	0	0	0	2926,5	2926,5
Rш.ш 340	1738,09	1738,09	1738,09	0	0	0	0	0	0	0	1738,09	1738,09
Rш.ш 350	8133,98	8133,98	8133,98	0	0	0	0	0	0	0	8133,98	8133,98
Rш.ш 360	17542,1	17542,1	17542,1	0	0	0	0	0	0	0	17542,1	17542,1
Rш.ш 370	20721,8	20721,8	20721,8	0	0	0	0	0	0	0	20721,8	20721,8
Rш.ш 380	15866,8	15866,8	15866,8	0	0	15866,82	15866,8	15866,8	0	0	15866,8	15866,8
Rш.ш 390	0	0	0	0	0	0	0	0	9416,61	9416,61	9416,61	9416,61
Rш.ш 400	6236,07	6236,07	0	0	0	0	0	0	0	0	6236,07	6236,07

Rш.ш 410	5032,44	5032,44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5032,44	5032,44
Rш.ш 420	4850,46	4850,46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4850,46	4850,46
Rш.ш 430	5095,2	5095,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5095,2	5095,2
Rш.ш 440	5520,62	5520,62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5520,62	5520,62
Rш.ш 450	6006,92	0	0	0	0	0	0	0	0	6006,92	0	6006,92	6006,92
Rш.ш 460	6470,27	6470,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6470,27	6470,27
Rш.ш 470	6853,19	6853,19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6853,19	6853,19
Rш.ш 480	7127,3	7127,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7127,3	7127,3
Rш.ш 490	7291,06	7291,06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7291,06	7291,06
Rш.ш 500	7362,69	7362,69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7362,69	7362,69
Rш.ш 510	6999,58	6999,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6999,58	6999,58
Rш.ш 520	6574,91	6574,91	6574,91	0	0	0	0	0	0	0	0	6574,91	6574,91
Rш.ш 530	6534,52	6534,52	6534,52	0	0	0	0	0	0	0	0	6534,52	6534,52
Rш.ш 540	6074,36	6074,36	6074,36	0	0	0	0	0	0	0	0	6074,36	6074,36
Rш.ш 550	5983,54	5983,54	5983,54	0	0	0	0	0	0	0	0	5983,54	5983,54
Rш.ш 560	5979,84	5979,84	5979,84	0	0	0	0	0	0	0	0	5979,84	5979,84
Rш.ш 570	5951,44	5951,44	5951,44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5951,44
Rш.ш 580	5868,76	5868,76	5868,76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5868,76
Rш.ш 590	5698,17	5698,17	5698,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5698,17
Rш.ш 600	5410,25	5410,25	5410,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5410,25
Rш.ш 610	4991,66	4991,66	4991,66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4991,66
Rш.ш 620	4462,84	4462,84	4462,84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4462,84
Rш.ш 630	3905,21	3905,21	3905,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3905,21
Rш.ш 640	3494,55	3494,55	3494,55	0	0	0	0	0	0	0	0	3494,55	3494,55
Rш.ш 650	3474,82	3474,82	3474,82	0	0	0	0	0	0	0	0	3474,82	3474,82
Rш.ш 660	3958,15	3958,15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3958,15	3958,15
Rш.ш 670	4797,64	4797,64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4797,64	4797,64
Rш.ш 680	5762,78	5762,78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5762,78	5762,78
Rш.ш 690	6672,22	6672,22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6672,22	6672,22
Rш.ш 700	7402,03	7402,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7402,03	7402,03
Rш.ш 710	7870,98	7870,98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7870,98	7870,98
ΣRш.ш i	8032,4	8032,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8032,4	8032,4

Таблица Г3 – Расчет сил, действующих на коренные шейки коленчатого вала.

1-я коренная шейка	1-й кривошип				2-я коренная шейка			2-й кривошип			3-я коренная шейка			3-й кривошип		
	Rк.ш1, Н	jkв, град	Rк1, Н	T1, Н	Kрк1, Н	Tк2, Н	Kк2, Н	Rк.ш2, Н	jkв, град	T2, Н	Kрк2, Н	Tк3, Н	Kк3, Н	Rк.ш3, Н	jkв, град	T3, Н
6811,87	0	13623,74	0	-13623,74	1,5E-13	1067	1066,98	180	3E-13	-11489,79	6,4E-13	-11577,74	11577,74	540	9,75E-13	-11665,69

6740,5	10	13480,99	-1016,05	-13442,65	354,108	975,25	1037,55	190	-307,84	-11492,15	-312,452	-11529,31	11533,54	550	-317,067	-11566,47
6492,08	20	12984,16	-1851,92	-12851,41	613,868	689,27	922,997	200	-624,18	-11472,88	-632,291	-11504,83	11522,19	560	-640,401	-11536,79
6086,12	30	12172,25	-2328,37	-11947,48	690,539	268,52	740,909	210	-947,29	-11410,44	-957,771	-11436,96	11477	570	-968,251	-11463,48
5604,32	40	11208,65	-2383,2	-10952,36	561,227	-161,76	584,074	220	-1260,7	-11275,88	-1272,44	-11296,88	11368,32	580	-1284,15	-11317,88
5126,79	50	10253,59	-2033,13	-10050	253,074	-494,52	555,51	230	-1527	-11039,03	-1540,07	-11056,39	11163,13	590	-1553,16	-11073,75
4745,43	60	9490,862	-1378,65	-9390,196	-171,625	-664,22	686,037	240	-1721,9	-10718,64	-1722,51	-10719,24	10856,76	600	-1723,12	-10719,85
4535,68	70	9071,366	-570,606	-9053,402	-604,066	-626,31	870,152	250	-1778,7	-10306,03	-1755,74	-10289,32	10438,04	610	-1732,74	-10272,6
4522,35	80	9044,694	235,7413	-9041,621	-943,463	-402,89	1025,88	260	-1651,2	-9847,392	-1589,17	-9816,074	9943,88	620	-1527,15	-9784,755
4669,29	90	9338,583	913,2848	-9293,818	-1117,85	-62,778	1119,61	270	-1322,4	-9419,374	-1200,57	-9381,985	9458,489	630	-1078,74	-9344,595
4916,48	100	9832,965	1418,847	-9730,06	-1122,21	309,08	1164	280	-825,58	-9111,892	-616,466	-9086,98	9107,866	640	-407,355	-9062,067
5165,88	110	10331,76	1634,981	-10201,57	-945,177	602,94	1121,11	290	-255,37	-8995,694	76,5318	-9018,883	9019,208	650	408,4373	-9042,072
5380,35	120	10760,71	1637,78	-10635,34	-700,02	778,43	1046,89	300	237,741	-9078,489	737,144	-9214,931	9244,368	660	1236,548	-9351,372
5539,03	130	11078,06	1481,395	-10978,56	-502,823	861,25	997,286	310	475,748	-9256,067	1195,61	-9623,042	9697,031	670	1915,466	-9990,016
5642,87	140	11285,75	1228,847	-11218,65	-459,961	976,89	1079,76	320	308,924	-9264,858	1300,68	-10071,69	10155,33	680	2292,437	-10878,52
5700,39	150	11400,79	928,5056	-11362,91	-672,801	1437,5	1587,14	330	-417,1	-8487,959	923,865	-10177,69	10219,53	690	2264,827	-11867,41
5726,79	160	11453,59	615,0902	-11437,06	-1172,72	3004,7	3225,48	340	-1730,4	-5427,581	40,7059	-9097,894	9097,985	700	1811,768	-12768,21
5738,97	170	11477,95	305,5678	-11473,88	-1431,02	6802,2	6951,07	350	-2556,5	2130,459	-775,352	-5633,668	5686,773	710	1005,762	-13397,79
5744,89	180	11489,79	3,03E-13	-11489,79	-2,7E-12	11720	11720,3	360	-5E-12	11950,81	-1,4E-12	-836,4665	836,4665	720	2,26E-12	-13623,74
5748,13	190	11496,27	-307,837	-11492,15	2841,89	12957	13264,6	370	5375,94	14420,94	2687,97	398,59872	2717,363	0	0	-13623,74
5744,92	200	11489,85	-624,181	-11472,88	4414,4	9731,2	10685,7	380	8204,61	7989,539	3594,28	-2726,555	4511,424	10	-1016,05	-13442,65
5724,85	210	11449,7	-947,291	-11410,44	4158	5841,1	7169,86	390	7368,7	271,6638	2758,39	-6289,875	6868,134	20	-1851,92	-12851,41
5673,07	220	11346,14	-1260,74	-11275,88	3656,64	3593,2	5126,58	400	6052,54	-4089,561	1862,08	-8018,521	8231,891	30	-2328,37	-11947,48
5572,07	230	11144,14	-1526,98	-11039,03	3239,33	2274,9	3958,34	410	4951,69	-6489,23	1284,25	-8720,794	8814,848	40	-2383,2	-10952,36
5428,03	240	10856,07	-1721,9	-10718,64	3010,01	1439,7	3336,6	420	4298,12	-7839,252	1132,49	-8944,625	9016,033	50	-2033,13	-10050
5229,2	250	10458,4	-1778,74	-10306,03	2894,93	786,37	2999,83	430	4011,13	-8733,292	1316,24	-9061,744	9156,838	60	-1378,65	-9390,196
4992,43	260	9984,866	-1651,18	-9847,392	2784,73	183,52	2790,77	440	3918,28	-9480,345	1673,84	-9266,874	9416,829	70	-570,606	-9053,402
4755,87	270	9511,749	-1322,41	-9419,374	2589,34	-388,81	2618,37	450	3856,28	-10197	2046,01	-9619,313	9834,497	80	235,7413	-9041,621
4574,61	280	9149,216	-825,577	-9111,892	2269,95	-888,7	2437,72	460	3714,32	-10889,29	2313,8	-10091,55	10353,41	90	913,2848	-9293,818
4499,66	290	8999,318	-255,374	-8995,694	1849,77	-1260,2	2238,28	470	3444,17	-11516,19	2431,51	-10623,12	10897,84	100	1418,847	-9730,06

4540,8	300	9081,602	237,7411	-9078,489	1405,88	-1477,4	2039,42	480	3049,51	-12033,3	2342,25	-11117,43	11361,49	110	1634,981	-10201,57
4634,14	310	9268,285	475,7485	-9256,067	1044,74	-1580,1	1894,24	490	2565,23	-12416,23	2101,5	-11525,79	11715,81	120	1637,78	-10635,34
4635	320	9270,006	308,9237	-9264,858	863,507	-1701	1907,66	500	2035,94	-12666,94	1758,67	-11822,75	11952,84	130	1481,395	-10978,56
4249,1	330	8498,201	-417,096	-8487,959	889,063	-1984,7	2174,72	510	1361,03	-12457,32	1294,94	-11837,98	11908,6	140	1228,847	-11218,65
2848,37	340	5696,733	-1730,36	-5427,581	1259,24	-3345,6	3574,76	520	788,127	-12118,84	858,316	-11740,88	11772,21	150	928,5056	-11362,91
1663,91	350	3327,818	-2556,47	2130,459	1470,8	-7122,5	7272,75	530	385,13	-12114,49	500,11	-11775,78	11786,39	160	615,0902	-11437,06
5975,4	360	11950,81	-5,1E-12	11950,81	3,1E-12	-11808	11808,2	540	9,7E-13	-11665,69	152,784	-11569,79	11570,79	170	305,5678	-11473,88
7695,2	370	15390,39	5375,939	14420,94	-2846,5	-12994	13301,8	550	-317,07	-11566,47	-158,533	-11528,13	11529,22	180	3,03E-13	-11489,79
5726	380	11452	8204,611	7989,539	-4422,51	-9763,2	10718,1	560	-640,4	-11536,79	-474,119	-11514,47	11524,22	190	-307,837	-11492,15
3686,86	390	7373,71	7368,704	271,6638	-4168,48	-5867,6	7197,54	570	-968,25	-11463,48	-796,216	-11468,18	11495,79	200	-624,181	-11472,88
3652,32	400	7304,637	6052,538	-4089,561	-3668,34	-3614,2	5149,65	580	-1284,1	-11317,88	-1115,72	-11364,16	11418,8	210	-947,291	-11410,44
4081,34	410	8162,677	4951,686	-6489,23	-3252,42	-2292,3	3979,03	590	-1553,2	-11073,75	-1406,95	-11174,82	11263,04	220	-1260,74	-11275,88
4470,11	420	8940,227	4298,116	-7839,252	-3010,62	-1440,3	3337,41	600	-1723,1	-10719,85	-1625,05	-10879,44	11000,13	230	-1526,98	-11039,03
4805,19	430	9610,386	4011,125	-8733,292	-2871,93	-769,66	2973,28	610	-1732,7	-10272,6	-1727,32	-10495,62	10636,81	240	-1721,9	-10718,64
5129,08	440	10258,16	3918,276	-9480,345	-2722,71	-152,21	2726,97	620	-1527,2	-9784,755	-1652,95	-10045,39	10180,48	250	-1778,74	-10306,03
5450,91	450	10901,83	3856,279	-10197	-2467,51	426,2	2504,05	630	-1078,7	-9344,595	-1364,96	-9595,993	9692,586	260	-1651,18	-9847,392
5752,67	460	11505,34	3714,323	-10889,29	-2060,84	913,61	2254,27	640	-407,35	-9062,067	-864,881	-9240,721	9281,106	270	-1322,41	-9419,374
6010,09	470	12020,19	3444,171	-11516,19	-1517,87	1237,1	1958,12	650	408,437	-9042,072	-208,57	-9076,982	9079,378	280	-825,577	-9111,892
6206,85	480	12413,69	3049,51	-12033,3	-906,481	1341	1618,61	660	1236,55	-9351,372	490,587	-9173,533	9186,642	290	-255,374	-8995,694
6339,23	490	12678,46	2565,226	-12416,23	-324,88	1213,1	1255,86	670	1915,47	-9990,016	1076,6	-9534,253	9594,845	300	237,7411	-9078,489
6414,75	500	12829,51	2035,938	-12666,94	128,25	894,21	903,357	680	2292,44	-10878,52	1384,09	-10067,29	10161,99	310	475,7485	-9256,067
6265,72	510	12531,45	1361,03	-12457,32	451,899	294,95	539,639	690	2264,83	-11867,41	1286,88	-10566,14	10644,21	320	308,9237	-9264,858
6072,22	520	12144,44	788,1271	-12118,84	511,82	-324,68	606,117	700	1811,77	-12768,21	697,336	-10628,08	10650,94	330	-417,096	-8487,959
6060,31	530	12120,61	385,1303	-12114,49	310,316	-641,65	712,749	710	1005,76	-13397,79	-362,297	-9412,687	9419,657	340	-1730,36	-5427,581
5832,85	540	11665,69	9,75E-13	-11665,69	6,4E-13	-979,02	979,023	720	2,3E-12	-13623,74	-1278,23	-5746,64	5887,083	350	-2556,47	2130,4589
5785,41	550	11570,81	-317,067	-11566,47	158,533	-1028,6	1040,78	0	0	-13623,74	-2,6E-12	-836,4665	836,4665	360	-5,1E-12	11950,806
5777,27	560	11554,55	-640,401	-11536,79	-187,825	-952,93	971,265	10	-1016,1	-13442,65	2179,94	489,1437	2234,148	370	5375,939	14420,936
5752,15	570	11504,3	-968,251	-11463,48	-441,833	-693,97	822,683	20	-1851,9	-12851,41	3176,35	-2430,937	3999,829	380	8204,611	7989,5395
5695,25	580	11390,5	-1284,15	-11317,88	-522,112	-314,8	609,672	30	-2328,4	-11947,48	2520,17	-5837,909	6358,649	390	7368,704	271,66383

5591,07	590	11182,14	-1553,16	-11073,75	-415,02	60,697	419,435	40	-2383,2	-10952,36	1834,67	-7520,96	7741,502	400	6052,538	-4089,561
5428,73	600	10857,45	-1723,12	-10719,85	-155,004	334,92	369,053	50	-2033,1	-10050	1459,28	-8269,614	8397,381	410	4951,686	-6489,23
5208,86	610	10417,71	-1732,74	-10272,6	177,045	441,2	475,401	60	-1378,7	-9390,196	1459,73	-8614,724	8737,522	420	4298,116	-7839,252
4951,61	620	9903,213	-1527,15	-9784,755	478,273	365,68	602,05	70	-570,61	-9053,402	1720,26	-8893,347	9058,196	430	4011,125	-8733,292
4703,33	630	9406,654	-1078,74	-9344,595	657,241	151,49	674,473	80	235,741	-9041,621	2077,01	-9260,983	9491,037	440	3918,276	-9480,345
4535,61	640	9071,218	-407,355	-9062,067	660,32	-115,88	670,41	90	913,285	-9293,818	2384,78	-9745,411	10032,96	450	3856,279	-10197
4525,65	650	9051,292	408,4373	-9042,072	505,205	-343,99	611,199	100	1418,85	-9730,06	2566,58	-10309,67	10624,35	460	3714,323	-10889,29
4716,39	660	9432,773	1236,548	-9351,372	199,217	-425,1	469,464	110	1634,98	-10201,57	2539,58	-10858,88	11151,89	470	3444,171	-11516,19
5086	670	10171,99	1915,466	-9990,016	-138,843	-322,66	351,267	120	1637,78	-10635,34	2343,64	-11334,32	11574,09	480	3049,51	-12033,3
5558,72	680	11117,44	2292,437	-10878,52	-405,521	-50,02	408,594	130	1481,39	-10978,56	2023,31	-11697,4	11871,1	490	2565,226	-12416,23
6040,8	690	12081,59	2264,827	-11867,41	-517,99	324,38	611,178	140	1228,85	-11218,65	1632,39	-11942,79	12053,84	500	2035,938	-12666,94
6448,05	700	12896,11	1811,768	-12768,21	-441,631	702,65	829,91	150	928,506	-11362,91	1144,77	-11910,12	11965,01	510	1361,03	-12457,32
6717,75	710	13435,49	1005,762	-13397,79	-195,336	980,37	999,638	160	615,09	-11437,06	701,609	-11777,95	11798,83	520	788,1271	-12118,84
6811,87	720	13623,74	2,26E-12	-13623,74	152,784	1074,9	1085,73	170	305,568	-11473,88	345,349	-11794,19	11799,24	530	385,1303	-12114,49

Таблица Г4 – силы, действующие на 3-ю коренную шейку.

Рк.ш i	Значения Рк.ш i, Н, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Рк.ш 0	11577,74	11577,74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11577,7
Рк.ш 10	11533,54	11533,54	11533,5	0	0	0	0	0	0	0	0	11533,5
Рк.ш 20	11522,19	11522,19	11522,2	0	0	0	0	0	0	0	0	11522,2
Рк.ш 30	11477	11477	11477	0	0	0	0	0	0	0	0	11477
Рк.ш 40	11368,32	11368,32	11368,3	0	0	0	0	0	0	0	0	11368,3
Рк.ш 50	11163,13	11163,13	11163,1	0	0	0	0	0	0	0	0	11163,1
Рк.ш 60	10856,76	10856,76	10856,8	0	0	0	0	0	0	0	0	10856,8
Рк.ш 70	10438,04	10438,04	10438	0	0	0	0	0	0	0	0	10438
Рк.ш 80	9943,88	9943,88	0	0	0	0	0	0	0	0	9943,88	9943,88
Рк.ш 90	9458,489	9458,489	0	0	0	0	0	0	0	0	9458,49	9458,49
Рк.ш 100	9107,866	9107,866	0	0	0	0	0	0	0	0	9107,87	9107,87
Рк.ш 110	9019,208	9019,208	0	0	0	0	0	0	0	0	9019,21	9019,21
Рк.ш 120	9244,368	9244,368	0	0	0	0	0	0	0	0	9244,37	9244,37
Рк.ш 130	9697,031	9697,031	0	0	0	0	0	0	0	0	9697,03	9697,03
Рк.ш 140	10155,33	10155,33	0	0	0	0	0	0	0	0	10155,3	10155,3
Рк.ш 150	10219,53	10219,53	0	0	0	0	0	0	0	0	10219,5	10219,5
Рк.ш 160	9097,985	9097,985	0	0	0	0	0	0	0	0	9097,99	9097,99
Рк.ш 170	5686,773	5686,773	0	0	0	0	0	0	0	0	5686,77	5686,77
Рк.ш 180	836,4665	836,4665	0	0	0	0	0	0	0	0	0	836,467
Рк.ш 190	2717,363	2717,363	2717,36	0	0	0	0	0	0	0	0	2717,36
Рк.ш 200	4511,424	4511,424	4511,42	0	0	0	0	0	0	0	0	4511,42
Рк.ш 210	6868,134	6868,134	6868,13	0	0	0	0	0	0	0	0	6868,13
Рк.ш 220	8231,891	8231,891	8231,89	0	0	0	0	0	0	0	0	8231,89
Рк.ш 230	8814,848	8814,848	8814,85	0	0	0	0	0	0	0	0	8814,85
Рк.ш 240	9016,033	9016,033	9016,03	0	0	0	0	0	0	0	0	9016,03
Рк.ш 250	9156,838	9156,838	9156,84	0	0	0	0	0	0	0	0	9156,84
Рк.ш 260	9416,829	9416,829	9416,83	0	0	0	0	0	0	0	0	9416,83
Рк.ш 270	9834,497	9834,497	9834,5	0	0	0	0	0	0	0	0	9834,5
Рк.ш 280	10353,41	10353,41	10353,4	0	0	0	0	0	0	0	0	10353,4
Рк.ш 290	10897,84	10897,84	10897,8	0	0	0	0	0	0	0	0	10897,8
Рк.ш 300	11361,49	11361,49	0	0	0	0	0	0	0	0	11361,5	11361,5
Рк.ш 310	11715,81	11715,81	0	0	0	0	0	0	0	0	11715,8	11715,8
Рк.ш 320	11952,84	11952,84	0	0	0	0	0	0	0	0	11952,8	11952,8
Рк.ш 330	11908,6	11908,6	11908,6	0	0	0	0	0	0	0	0	11908,6
Рк.ш 340	0	0	0	0	0	0	0	0	11772,21043	11772,21043	11772,2	11772,2
Рк.ш 350	11786,39	11786,39	0	0	0	0	0	0	0	0	11786,4	11786,4
Рк.ш 360	11570,79	11570,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11570,8
Рк.ш 370	11529,22	11529,22	11529,2	0	0	0	0	0	0	0	0	11529,2
Рк.ш 380	11524,22	11524,22	11524,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 390	11495,79	11495,79	11495,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 400	0	11418,8	11418,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11263	11263
Рк.ш 420	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11000,1	11000,1
Рк.ш 430	10636,81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10636,8	10636,8
Рк.ш 440	10180,48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10180,5	10180,5
Рк.ш 450	9692,586	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9692,59	9692,59
Рк.ш 460	9281,106	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9281,11	9281,11
Рк.ш 470	9079,378	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9079,38	9079,38
Рк.ш 480	9186,642	9186,642	0	0	0	0	0	0	0	0	9186,64	9186,64
Рк.ш 490	9594,845	9594,845	0	0	0	0	0	0	0	0	9594,85	9594,85
Рк.ш 500	10161,99	10161,99	0	0	0	0	0	0	0	0	10162	10162
Рк.ш 510	10644,21	10644,21	0	0	0	0	0	0	0	0	10644,2	10644,2
Рк.ш 520	10650,94	10650,94	0	0	0	0	0	0	0	0	10650,9	10650,9
Рк.ш 530	9419,657	9419,657	0	0	0	0	0	0	0	0	9419,66	9419,66
Рк.ш 540	5887,083	5887,083	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5887,08
Рк.ш 550	836,4665	836,4665	836,467	0	0	0	0	0	0	0	0	836,467
Рк.ш 560	2234,148	2234,148	2234,15	0	0	0	0	0	0	0	0	2234,15
Рк.ш 570	3999,829	3999,829	3999,83	0	0	0	0	0	0	0	0	3999,83
Рк.ш 580	6358,649	6358,649	6358,65	0	0	0	0	0	0	0	0	6358,65
Рк.ш 590	7741,502	7741,502	7741,5	0	0	0	0	0	0	0	0	7741,5

Рк.ш 600	8397,381	8397,381	8397,38	0	0	0	0	0	0	0	0	8397,38
Рк.ш 610	8737,522	8737,522	8737,52	0	0	0	0	0	0	0	0	8737,52
Рк.ш 620	9058,196	9058,196	9058,2	0	0	0	0	0	0	0	0	9058,2
Рк.ш 630	9491,037	9491,037	9491,04	0	0	0	0	0	0	0	0	9491,04
Рк.ш 640	10032,96	10032,96	10033	0	0	0	0	0	0	0	0	10033
Рк.ш 650	10624,35	10624,35	0	0	0	0	0	0	0	0	10624,3	10624,3
Рк.ш 660	11151,89	11151,89	0	0	0	0	0	0	0	0	11151,9	11151,9
Рк.ш 670	11574,09	11574,09	0	0	0	0	0	0	0	0	11574,1	11574,1
Рк.ш 680	11871,1	11871,1	0	0	0	0	0	0	0	0	11871,1	11871,1
Рк.ш 690	12053,84	12053,84	0	0	0	0	0	0	0	0	12053,8	12053,8
Рк.ш 700	11965,01	11965,01	0	0	0	0	0	0	0	0	11965	11965
Рк.ш 710	11798,83	11798,83	0	0	0	0	0	0	0	0	11798,8	11798,8
ΣРк.ш i	11799,24	11799,24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11799,2

Таблица Г5 - Суммарные силы действующие на 1-ю коренную шейку

Рк.ш i	Значения Рк.ш i, Н, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Рк.ш 0	6811,869347	6811,869347	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6811,869347
Рк.ш 10	6740,496389	6740,496389	6740,496389	0	0	0	0	0	0	0	0	6740,496389
Рк.ш 20	6492,080474	6492,080474	6492,080474	0	0	0	0	0	0	0	0	6492,080474
Рк.ш 30	6086,123653	6086,123653	6086,123653	0	0	0	0	0	0	0	0	6086,123653
Рк.ш 40	5604,323688	5604,323688	5604,323688	0	0	0	0	0	0	0	0	5604,323688
Рк.ш 50	5126,793873	5126,793873	5126,793873	0	0	0	0	0	0	0	0	5126,793873
Рк.ш 60	4745,430876	4745,430876	4745,430876	0	0	0	0	0	0	0	0	4745,430876
Рк.ш 70	4535,683185	4535,683185	4535,683185	0	0	0	0	0	0	0	0	4535,683185
Рк.ш 80	4522,347098	4522,347098	0	0	0	0	0	0	0	0	4522,347098	4522,347098
Рк.ш 90	4669,291559	4669,291559	0	0	0	0	0	0	0	0	4669,291559	4669,291559
Рк.ш 100	4916,482458	4916,482458	0	0	0	0	0	0	0	0	4916,482458	4916,482458
Рк.ш 110	5165,87796	5165,87796	0	0	0	0	0	0	0	0	5165,87796	5165,87796
Рк.ш 120	5380,353064	5380,353064	0	0	0	0	0	0	0	0	5380,353064	5380,353064
Рк.ш 130	5539,029465	5539,029465	0	0	0	0	0	0	0	0	5539,029465	5539,029465
Рк.ш 140	5642,874068	5642,874068	0	0	0	0	0	0	0	0	5642,874068	5642,874068
Рк.ш 150	5700,393027	5700,393027	0	0	0	0	0	0	0	0	5700,393027	5700,393027
Рк.ш 160	5726,793733	5726,793733	0	0	0	0	0	0	0	0	5726,793733	5726,793733
Рк.ш 170	5738,973581	5738,973581	0	0	0	0	0	0	0	0	5738,973581	5738,973581
Рк.ш 180	5744,893328	5744,893328	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5744,893328
Рк.ш 190	5748,13439	5748,13439	5748,13439	0	0	0	0	0	0	0	0	5748,13439
Рк.ш 200	5744,922552	5744,922552	5744,922552	0	0	0	0	0	0	0	0	5744,922552
Рк.ш 210	5724,84958	5724,84958	5724,84958	0	0	0	0	0	0	0	0	5724,84958
Рк.ш 220	5673,07098	5673,07098	5673,07098	0	0	0	0	0	0	0	0	5673,07098
Рк.ш 230	5572,068836	5572,068836	5572,068836	0	0	0	0	0	0	0	0	5572,068836
Рк.ш 240	5428,033763	5428,033763	5428,033763	0	0	0	0	0	0	0	0	5428,033763
Рк.ш 250	5229,199995	5229,199995	5229,199995	0	0	0	0	0	0	0	0	5229,199995
Рк.ш 260	4992,432768	4992,432768	4992,432768	0	0	0	0	0	0	0	0	4992,432768
Рк.ш 270	4755,874613	4755,874613	4755,874613	0	0	0	0	0	0	0	0	4755,874613
Рк.ш 280	4574,608173	4574,608173	4574,608173	0	0	0	0	0	0	0	0	4574,608173
Рк.ш 290	4499,659086	4499,659086	4499,659086	0	0	0	0	0	0	0	0	4499,659086
Рк.ш 300	4540,80078	4540,80078	0	0	0	0	0	0	0	0	4540,80078	4540,80078
Рк.ш 310	4634,142497	4634,142497	0	0	0	0	0	0	0	0	4634,142497	4634,142497
Рк.ш 320	4635,003242	4635,003242	0	0	0	0	0	0	0	0	4635,003242	4635,003242
Рк.ш 330	4249,100452	4249,100452	4249,100452	0	0	0	0	0	0	0	0	4249,100452
Рк.ш 340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2848,366295	2848,366295	2848,366295
Рк.ш 350	1663,909239	1663,909239	0	0	0	0	0	0	0	0	1663,909239	1663,909239
Рк.ш 360	5975,402821	5975,402821	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5975,402821
Рк.ш 370	7695,19531	7695,19531	7695,19531	0	0	0	0	0	0	0	0	7695,19531
Рк.ш 380	5726,001729	5726,001729	5726,001729	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 390	3686,855043	3686,855043	3686,855043	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 400	0	3652,318493	3652,318493	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4081,338557	4081,338557
Рк.ш 420	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4470,113693	4470,113693
Рк.ш 430	4805,193087	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4805,193087	4805,193087
Рк.ш 440	5129,079511	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5129,079511	5129,079511
Рк.ш 450	5450,912541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5450,912541	5450,912541
Рк.ш 460	5752,667518	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5752,667518	5752,667518
Рк.ш 470	6010,093735	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6010,093735	6010,093735

Рк.ш 480	6206,846982	6206,846982	0	0	0	0	0	0	0	0	6206,846982	6206,846982
Рк.ш 490	6339,228213	6339,228213	0	0	0	0	0	0	0	0	6339,228213	6339,228213
Рк.ш 500	6414,754882	6414,754882	0	0	0	0	0	0	0	0	6414,754882	6414,754882
Рк.ш 510	6265,724614	6265,724614	0	0	0	0	0	0	0	0	6265,724614	6265,724614
Рк.ш 520	6072,222056	6072,222056	0	0	0	0	0	0	0	0	6072,222056	6072,222056
Рк.ш 530	6060,306836	6060,306836	0	0	0	0	0	0	0	0	6060,306836	6060,306836
Рк.ш 540	5832,846287	5832,846287	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5832,846287
Рк.ш 550	5785,405865	5785,405865	5785,405865	0	0	0	0	0	0	0	0	5785,405865
Рк.ш 560	5777,273697	5777,273697	5777,273697	0	0	0	0	0	0	0	0	5777,273697
Рк.ш 570	5752,149243	5752,149243	5752,149243	0	0	0	0	0	0	0	0	5752,149243
Рк.ш 580	5695,248574	5695,248574	5695,248574	0	0	0	0	0	0	0	0	5695,248574
Рк.ш 590	5591,070535	5591,070535	5591,070535	0	0	0	0	0	0	0	0	5591,070535
Рк.ш 600	5428,725579	5428,725579	5428,725579	0	0	0	0	0	0	0	0	5428,725579
Рк.ш 610	5208,857238	5208,857238	5208,857238	0	0	0	0	0	0	0	0	5208,857238
Рк.ш 620	4951,606488	4951,606488	4951,606488	0	0	0	0	0	0	0	0	4951,606488
Рк.ш 630	4703,326954	4703,326954	4703,326954	0	0	0	0	0	0	0	0	4703,326954
Рк.ш 640	4535,608941	4535,608941	4535,608941	0	0	0	0	0	0	0	0	4535,608941
Рк.ш 650	4525,646152	4525,646152	0	0	0	0	0	0	0	0	4525,646152	4525,646152
Рк.ш 660	4716,386734	4716,386734	0	0	0	0	0	0	0	0	4716,386734	4716,386734
Рк.ш 670	5085,996494	5085,996494	0	0	0	0	0	0	0	0	5085,996494	5085,996494
Рк.ш 680	5558,721142	5558,721142	0	0	0	0	0	0	0	0	5558,721142	5558,721142
Рк.ш 690	6040,797322	6040,797322	0	0	0	0	0	0	0	0	6040,797322	6040,797322
Рк.ш 700	6448,054677	6448,054677	0	0	0	0	0	0	0	0	6448,054677	6448,054677
Рк.ш 710	6717,745974	6717,745974	0	0	0	0	0	0	0	0	6717,745974	6717,745974
ΣРк.ш i	6811,869347	6811,869347	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6811,869347

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д Расчет основных деталей двигателя

### Д.1 Расчет поршневой группы

#### Д.1.1 Расчет поршня

Напряжение изгиба в днище поршня

$$\sigma_{из} = P_{z\delta} * (r_i / \delta)^2 = 7,539 * (29,8/8)^2 = 104,6 \text{ МПа} , \quad (\text{Д.1})$$

где

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

Днище поршня должно быть усилено ребрами жесткости.

Напряжение сжатия в сечении x – x

$$\sigma_{сж} = P_{z\delta} / F_{x-x} = 0,0398 / 0,001366 = 29,1 \text{ МПа} ,$$

где:

$$P_{z\delta} = p_{z\delta} * F_{\Pi} = 7,539 * 52,81 * 10^{-4} = 0,0398 \text{ МН} ; \quad (\text{Д.3})$$

$$F_{x-x} = (\pi/4) * (d_k^2 * d_i^2) * -n'_M F' = [(3,14/4) * (73,6^2 - 60^2) - 4 * 15] * 10^{-6} = 0,001366 \text{ м}^2 ; \quad (\text{Д.4})$$

$$d_k = D - 2 * (t + \Delta t) = 82 - 2 * (3,5 + 0,7) = 73,6 \text{ мм} \\ F' = (d_k - d_i) * d_M / 2 = (73,6 - 60) * 3 / 2 = 15 \text{ мм}^2 ; \quad (\text{Д.5})$$

Напряжение разрыва в сечении x - x:

- максимальная угловая скорость холостого хода

$$\omega_{x-x, \max} = \pi * n_{x-x, \max} / 30 = 3,14 * 6000 / 30 = 628 \text{ рад/сж} ; \quad (\text{Д.Д})$$

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

$$m_{x.x.} = 0,5 * m_{\Pi} = 0,5 * 0,422 = 0,211 \text{ кг} ; \quad (\text{Д.7})$$

- максимальная разрывающая сила

$$Pj = m_{x.x.} * R * \omega_{x.x.\text{max}}^2 * (1 + \lambda) = 0,211 * 0,0375 * 628^2 * (1 + 0,3125) * 10^{-6} = 0,00606 \text{ МН}; \quad (\text{Д.8})$$

- напряжение разрыва

$$\sigma_p = Pj / F_{x-x} = 0,00606 / 0,001366 = 4,44 \text{ МПа}. \quad (\text{Д.10})$$

Напряжения в верхней кольцевой перемычке:

- среза

$$\tau = 0,0314 p_{z0} D / h_{\Pi} = 0,0314 * 7,539 * 82 / 3,5 = 5,54 \text{ МПа} ; \quad (\text{Д.11})$$

- изгиба

$$\sigma_{из} = 0,0045 p_{z0} (D / h_{\Pi})^2 = 0,0045 * 7,539 * (82 / 3,5)^2 = 18,62 \text{ МПа} ; \quad (\text{Д.12})$$

- сложное

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{из}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{18,62^2 + 4 * 5,54^2} = 21,67 \text{ МПа} . \quad (\text{Д.13})$$

Удельное давление поршня на стенку цилиндра:

$$q_1 = N_{\text{max}} / (h_o * D) = 0,001980 \text{ Д} / (0,045 * 0,082) = 0,54 \text{ МПа}; \quad (\text{Д.14})$$

$$q_2 = N_{\text{max}} / (H * D) = 0,0019806 / (0,064 * 0,082) = 0,38 \text{ МПа}. \quad (\text{Д.15})$$

Диаметры головки и юбки поршня:

$$D_{\Gamma} = D - \Delta_{\Gamma} = 82 - 0,57 = 81,43 \text{ мм}; \quad (\text{Д.16})$$

$$D_{\text{ю}} = D - \Delta_{\text{ю}} = 82 - 0,16 = 81,84 \text{ мм}, \quad (\text{Д.17})$$

где :

$$\Delta_{\Gamma} = 0,007D = 0,007 \cdot 82 = 0,57 \text{ мм}; \quad (\text{Д.18})$$

$$\Delta_{\text{ю}} = 0,002D = 0,002 \cdot 82 = 0,16 \text{ мм}. \quad (\text{Д.19})$$

Диаметральные зазоры в горячем состоянии:

$$\Delta'_{\Gamma} = D * [1 + \alpha_{\text{ц}}(T_{\text{ц}} - T_0)] - D_{\Gamma} * [1 + \alpha_{\text{п}}(T_{\Gamma} - T_0)] = 82 [1 + 11 \cdot 10^{-6} (383 - 293)] - 81,43 [1 + 22 \cdot 10^{-6} (593 - 293)] = 0,114 \text{ мм}; \quad (\text{Д.20})$$

$$\Delta'_{\text{ю}} = D * [1 + \alpha_{\text{ц}}(T_{\text{ц}} - T_0)] - D_{\text{ю}} * [1 + \alpha_{\text{п}}(T_{\text{ю}} - T_0)] = 82 [1 + 11 \cdot 10^{-6} (383 - 293)] - 81,84 [1 + 22 \cdot 10^{-6} (413 - 293)] = 0,025 \text{ мм}; \quad (\text{Д.21})$$

#### Д.1.2 Расчет поршневого кольца

Материал кольца - серый чугун,  $E = 1,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ .

Среднее давление кольца на стенку цилиндра

$$P_{cp} = 0,152 * E * \frac{A_0 / t}{(D/t - 1)^3 * (D/t)} = 0,152 * 10^5 * \frac{10,5 / 3,5}{(82 / 2,5)^3 * (82 / 3,5)} = 0,173 \text{ МПа} \quad (\text{Д.22})$$

где

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

Давление кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности

$$p = p_{cp} * \mu_k \quad (Д.24)$$

Результаты расчета  $p$ , а также  $\mu_k$  для различных углов  $\varphi$  приведены в таблице 29

Таблица 29 – Результаты расчета

$\varphi$ , град	0	30	60	90	120	150	180
$\mu_k$	1,05	1,05	1Д4	0,90	0,45	0,67	2,85
$p$ , МПа	0,182	0,182	0,197	0,156	0,078	0,116	0,493

Напряжение изгиба кольца в рабочем состоянии

$$\sigma_{из1} = 2,61 * p_{cp} * (D/t - 1)^2 = 2,61 * 0,173 (82/3,5 - 1)^2 = 227 \text{ МПа}. \quad (Д.25)$$

Напряжение изгиба при надевании кольца на поршень

$$\sigma_{из2} = \frac{4E * (1 - 0,114 * A_0 / t)}{m * (D/t - 1,4) * (D/t)} = \frac{4 * 10^5 * (1 - 0,114 * 10,5 / 3,5)}{1,57 * (82 / 3,5 * 1,4) * (82 / 3,5)} = 325 \text{ МПа}. \quad (Д.26)$$

Монтажный зазор в замке поршневого кольца

$$\Delta_k = \Delta'_k + \pi D * [\alpha_k (T_k - T_0)] - \alpha_{ц} * (T_{ц} - T_0) = 0,08 + 3,14 * 82 [11 * 10^{-6} (493 - 293) - 11 * 10^{-6} (383 - 293)] = 0,392 \text{ мм}, \quad (Д.27)$$

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

### Д.1.3 Расчет поршневого пальца

Расчетная сила, действующая на поршневой палец:

- газовая

$$P_{Z_{\max}} = p_{Z_{\max}} * F_{\Pi} = 7,539 * 52,81 * 10^{-4} = 0,0398 \text{ МН}; \quad (\text{Д.28})$$

- инерционная

$$P_j = -m_{\Pi} * R * \omega_M^2 * (1 + \lambda) * 10^{-6} = -0,422 * 335^2 * 0,0375 * (1 + 0,3125) * 10^{-6} = \\ = -0,00233 \text{ МН}, \quad (\text{Д.29})$$

где

$$\omega_M = \pi * n_M / 30 = 3,14 * 3200 / 30 = 335 \text{ рад/сж}; \quad (\text{Д.30})$$

- расчетная

$$P = P_{Z_{\max}} + k * P_j = 0,0398 - 0,82 * 0,00233 = 0,0379 \text{ МН}. \quad (\text{Д.31})$$

Удельное давление пальца на втулку поршневой головки

$$q_{\text{ш}} = P / (d_{\Pi} * l_{\text{ш}}) = 0,0379 / (22 * 26 * 10^{-6}) = 66,3 \text{ МПа}. \quad (\text{Д.32})$$

Удельное давление пальца на бобышки

$$q_{\sigma} = P / (d_{\Pi} * (l_{\Pi} - b)) = 0,0379 / (0,022 * (0,06 - 0,03)) = 57,4 \text{ МПа}. \quad (\text{Д.33})$$

Напряжение изгиба в среднем сечении пальца

$$\sigma_{\text{из}} = P(l_{\Pi} + 2b - 1,5l_{\text{ш}}) / (1,2(1 - \alpha^4) * d_{\Pi}^3) = 0,0379 * (0,06 + 2 * 0,03 - 1,5 * \\ * 0,026) / (1,2 * (1 - 0,682^4) * 0,022^3) = 351 \text{ МПа}, \quad (\text{Д.34})$$

где

$$\alpha = d_B / d_{II} = 15/22 = 0,682. \quad (\text{Д.35})$$

Касательные напряжения среза в сечениях между бобышками и головкой шатуна

$$\tau = 0,85 * P * (1 + \alpha + \alpha^2) / ((1 - \alpha^4)) * d_{II}^2 = 0,85 * 0,0379 * (1 + 0,682 + 0,682^2) / (1 - 0,682^4) * 0,022^2 = 182 \text{ МПа}. \quad (\text{Д.36})$$

Наибольшее увеличение горизонтального диаметра пальца при овализации

$$\Delta d_{n\max} = \frac{1,35 * P}{E * l_{II}} * \left( \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{1,35 * 0,0379}{2 * 10^5 * 0,6} * \left( \frac{1 + 0,682}{1 - 0,682} \right)^3 * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] * 1000 = 0,049 \text{ мм} \quad (\text{Д.37})$$

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

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

$$\sigma_{\alpha 0^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[ 0,19 * \frac{(2 + \alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} - \frac{1}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \left[ 0,19 * \frac{(2 + 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2} - \frac{1}{1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = 178 \text{ МПа} \quad ;(\text{Д.38})$$

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

$$\sigma_{\alpha 90^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[ 0,174 * \frac{(2 + \alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} + \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \left[ 0,174 * \frac{(2 + 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2} + \frac{0,636}{1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = -286 \text{ МПа} \quad (\text{Д.39})$$

Напряжения овализации на внутренней поверхности пальца:

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

$$\begin{aligned} \sigma_{i0^\circ} = & -\frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[ 0,19 * \frac{(1 + 2\alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2 * \alpha} + \frac{1}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = -\frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \\ & * \left[ 0,19 * \frac{(1 + 2 * 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2 * 0,682} + \frac{1}{1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = -341 \text{ МПа} \end{aligned} \quad ;(Д.40)$$

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

$$\begin{aligned} \sigma_{i90^\circ} = & \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[ 0,174 * \frac{(1 + 2\alpha) * (1 + \alpha) * 0,636}{(1 - \alpha)^2 * \alpha * 1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \\ & * \left[ 0,174 * \frac{(1 + 2 * 0,682) * (1 + 0,682) * 0,636}{(1 - 0,682)^2 * 0,682 * 1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = 268 \text{ МПа} \end{aligned} \quad .(Д.41)$$

Напряжение овализации не должно превышать 300...350 МПа

## Д.2 Расчет шатунной группы

### Д.2.1 Расчет поршневой головки шатуна

По формулам определяем:

- при изгибе:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_m} = 0,833 \quad , \quad (Д.42)$$

$$\frac{(\beta_\sigma - \alpha_\sigma)}{(1 - \beta_\sigma)} = 3,97 \quad ; \quad (Д.43)$$

- при растяжении-сжатии:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_m} = 0,5 \quad ,$$

$$\frac{(\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma})}{(1 - \beta_{\sigma})} = 0,76$$

Расчет сечения I-I:

- максимальное напряжение пульсирующего цикла

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{(m_n + m_{\text{г.з.}}) * \omega_{\text{х.х.макс}}^2 * R * (1 + \lambda) * 10^{-6}}{2 * h_z * l_{uu}} = \\ &= \frac{(0,422 + 0,032) * 628 * 0,0375 * (1 + 0,3125) * 10^{-6}}{2 * 0,004 * 0,027} = 40,8 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (Д.44)$$

где  $m_{\text{г.з.}} = 0,06 * m_{\Pi} = 0,06 * 0,528 = 0,032 \text{ кг}$  - масса части головки выше сечения I-I;

$$\omega_{\text{х.х.макс}} = \pi * n_{\text{х.х.макс}} / 30 = 3,14 * 6000 / 30 = 628 \text{ рад/сж};$$

- среднее напряжение и амплитуда напряжений:

$$\sigma_{m0} = \sigma_{a0} = \frac{\sigma_{\max}}{2} = \frac{40,8}{2} = 20,4 \text{ МПа} \quad (Д.45)$$

$$\sigma_{ak0} = \frac{\sigma_{a0} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{20,4 * 1,272}{0,85 * 1} = 30,53 \text{ МПа} \quad (Д.46)$$

где  $k_{\sigma} = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (\sigma_B - 400) = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (800 - 400) = 1,272$  - эффективный коэффициент концентрации напряжений;  $\varepsilon_M = 0,85$  - масштабный коэффициент;  $\varepsilon_{\Pi} = 1$  - коэффициент поверхностной чувствительности.

Так как  $\frac{\sigma_{ak0}}{\sigma_{m0}} = \frac{30,53}{20,4} = 1,496 \geq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 0,76$ , то запас прочности в сечении I-I определяется по пределу усталости

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_{ak0} + \alpha_{\sigma} * \sigma_{m0}} = \frac{210}{30,53 + 0,12 * 20,4} = 6,3 \quad (Д.47)$$

Напряжения от запрессованной втулки (суммарный натяг)

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

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

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

натяг;

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

Удельное давление на поверхности соприкосновения втулки с головкой

$$P = \frac{\Delta_{\Sigma}}{d * \left[ \frac{(d^2 + d_z^2) / (d^2 - d_z^2)^{+\mu}}{E_{III}} + \frac{(d^2 + d_n^2) / (d^2 - d_n^2)^{-\mu}}{E_B} \right]} =$$

$$= \frac{0,0611}{24 * \left[ \frac{(32^2 + 24^2) / (32^2 - 24^2)^{+0,3}}{2,2 * 10^5} + \frac{(24^2 + 22^2) / (24^2 - 22^2)^{-0,3}}{1,15 * 10^5} \right]} = 22,1 \text{ МПа} \quad (\text{Д.48})$$

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

Напряжение от суммарного натяга на внутренней поверхности головки

$$\sigma_i = \frac{P * (d_z^2 + d^2)}{d_z^2 - d^2} = \frac{22,1 * (32^2 + 24^2)}{32^2 - 24^2} = 78,93 \text{ МПа} \quad (\text{Д.49})$$

Напряжение от суммарного натяга на внешней поверхности головки

$$\sigma_a = \frac{P * 2 * d^2}{d_z^2 - d^2} = \frac{22,1 * 2 * 24^2}{32^2 - 24^2} = 56,83 \text{ МПа} \quad (\text{Д.50})$$

Расчет сечения А-А на изгиб:

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

$$P_{jn} = -m_n * R * \omega^2 * (1 + \lambda) = -0,422 * 0,0375 * 586^2 * (1 + 0,3125) = 7132 \text{ H}, \quad (\text{Д.51})$$

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

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

$$N_{j0} = -P_{jn} * (0,572 - 0,0008 * \varphi_{u.z}) = -(-7132) * (0,572 - 0,0008 * 105) = 3480 \text{ H}; \quad (\text{Д.52})$$

$$\begin{aligned} M_{j0} &= -P_{jn} * r_{cp} * (0,00033 * \varphi_{u.z} - 0,0297) = 7139 * 0,014 * (0,00033 * 105 - 0,0297) = \\ &= 0,494 \text{ Н*м}, \end{aligned} \quad (\text{Д.53})$$

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

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

$$\begin{aligned} N_{j\varphi_{u.z}} &= N_{j0} * \cos \varphi_{u.z} - 0,5 * P_{jn} * (\sin \varphi_{u.z} - \cos \varphi_{u.z}) = 3480 * \cos 105^\circ - 0,5 * \\ &* (-7132) * (\sin 105^\circ - \cos 105^\circ) = 3467 \text{ H}; \end{aligned} \quad (\text{Д.54})$$

$$\begin{aligned} M_{j\varphi_{u.z}} &= M_{j0} + N_{jn} * r_{cp} * (1 - \cos \varphi_{u.z.}) + 0,5 * P_{jn} * r_{cp} * (\sin \varphi_{u.z.} - \cos \varphi_{u.z.}) = \\ &= 0,494 + 3480 * 0,014 * (1 - \cos 105^\circ) + 0,5 * (-7132) * 0,014 * (\sin 105^\circ - \\ &- \cos 105^\circ) = 0,68 \text{ Н*м}. \end{aligned} \quad (\text{Д.55})$$

Напряжение на внешнем волокне от растягивающей силы

$$\sigma_{aj} = \left[ 2 * M_{j\varphi_{u.3.}} * \frac{6 * r_{cp} + h_2}{h_2 * (2 * r_{cp} + h_2)} + K * N_{j\varphi_{u.3.}} \right] * \frac{10^{-6}}{l_{uu} * h_2} =$$

$$\left[ 2 * 0,68 * \frac{6 * 0,014 + 0,004}{0,004 * (2 * 0,014 + 0,004)} + 0,884 * 3467 \right] * \frac{10^{-6}}{0,027 * 0,004} = 37,1 \text{ МПа} \quad ,(\text{Д.56})$$

ГДЕ:

$$K = \frac{E_{uu} * F_2}{E_{uu} * F_2 + E_B * F_B} = \frac{2,2 * 10^5 * 216}{2,2 * 10^5 * 216 + 1,15 * 10^5 * 54} = 0,884;$$

$$F_2 = (d_2 - d) / l_{uu} = (32 - 24) / 27 = 216 \text{ мм}^2;$$

$$F_B = (d - d_n) / l_{uu} = (24 - 22) / 27 = 54 \text{ мм}^2. \quad (\text{Д.57})$$

Суммарная сила, сжимающая головку

$$P_{сж} = (P_{Z0} - P_0) * F_n - m_n * R * \omega^2 (\cos \varphi + \lambda * \cos 2\varphi) = (6,7596 - 0,1) *$$

$$* 0,005281 * 10^6 - 0,422 * 0,0375 * 586^2 * (\cos 370^\circ + 0,3125 * \cos 740^\circ) =$$

$$= 28222 \text{ Н.} \quad (\text{Д.58})$$

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

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

$$= 28222 * [0,0005 + 0,002] = 70,56 \text{ Н}; \quad (\text{Д.59})$$

$$M_{сж\varphi_{u.3.}} = P_{сж} * r_{cp} * \left[ \frac{M_{сж0}}{P_{сж} * r_{cp}} + \frac{N_{сж0}}{P_{сж}} * (1 - \cos \varphi_{u.3.}) - \right.$$

$$\left. - \left( \frac{\sin \varphi_{u.3.}}{2} - \frac{\varphi_{u.3.}}{\pi} * \sin \varphi_{u.3.} - \frac{1}{\pi} * \cos \varphi_{u.3.} \right) \right] =$$

$$= 28222 * 0,014 * [0,0001 + 0,0005 - 1,2588 - 0,002] = -0,5 \text{ Н} * \text{м}, \quad (\text{Д.60})$$

где:

$$\frac{N_{сж0}}{P_{сж}} = 0,0005 ;$$

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

$$\left( \frac{\sin \varphi_{ш.з}}{2} - \frac{\varphi_{ш.з}}{\pi} * \sin \varphi_{ш.з} - \frac{1}{\pi} * \cos \varphi_{ш.з} \right) = 0,002 ;$$

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

Напряжение на внешнем волокне от сжимающей силы

$$\sigma_{acc} = \left[ 2 * M_{сжфи.з.} * \frac{6 * r_{cp} + h_z}{h_z * (2 * r_{cp} + h_z)} + K * N_{сжфи.з.} \right] * \frac{10^{-6}}{l_{ш} * h_z} =$$

$$\left[ 2 * (-0,5) * \frac{6 * 0,014 + 0,004}{0,004 * (2 * 0,014 + 0,004)} + 0,884 * 70,56 \right] * \frac{10^{-6}}{0,027 * 0,004} = -5,79 \text{ МПа.} \quad (\text{Д.61})$$

Максимальное и минимальное напряжения асимметричного цикла:

$$\sigma_{\max} = \sigma'_a + \sigma_{aj} = 56,83 + 37,1 = 93,9 \text{ МПа} ; \quad (\text{Д.62})$$

$$\sigma_{\min} = \sigma'_a + \sigma_{acc} = 56,83 - 5,79 = 51,04 \text{ МПа} . \quad (\text{Д.63})$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжения:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{93,9 + 51,04}{2} = 72,47 \text{ МПа};$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{93,9 - 51,04}{2} = 21,43 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{ak} = \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{21,43 * 1,272}{0,85 * 0,9} = 35,63 \text{ МПа.} \quad (\text{Д.64})$$

Так как  $\sigma_{ak} / \sigma_m = 35,63 / 72,47 = 0,492 \leq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 3,97$  , то запас

прочности в сечении А-А определяется по пределу текучести

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

## Д.2.2 Расчет кривошипной головки шатуна

Максимальная сила инерции

$$P_{jp} = -R * \omega_{x.x.\max}^2 * [(m_n + m_{u.n.}) * (1 + \lambda) + (m_{u.k.} - m_{kp})] * 10^{-6} = -628^2 * 0,0375 * \\ * [(0,422 + 0,132) * (1 + 0,3125) + (0,396 - 0,132)] * 10^{-6} = -0,0147 \text{ МН}, \quad (Д.66)$$

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

Момент сопротивления расчетного сечения

$$W_{ИЗ} = \frac{l_k * (0,5 * c_{\bar{\sigma}} - r_1)^2}{6} = \frac{0,022 * (0,5 * 0,06 - 0,026)^2}{6} = 0,587 * 10^{-7} \text{ м}^3, \quad (Д.67)$$

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

Моменты инерции вкладыша и крышки:

$$J_B = l_k * t_B^3 = 22 * 2^3 * 10^{-12} = 176 * 10^{-12} \text{ м}^4; \\ J = l_k * (0,5 * c_{\bar{\sigma}} - r_1)^3 * 10^{-12} = 22 * (0,5 * 60 - 26)^3 * 10^{-12} = 1408 * 10^{-12} \text{ м}^4; \quad (Д.68)$$

Напряжение изгиба крышки и вкладыша:

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

$$= 352 \text{ МПа}, \quad (\text{Д.69})$$

где  $F_z = l_k * 0,5 * (c_{\bar{\sigma}} - d_{u.u.}) = 22 * 0,5 * (60 - 48) * 10^{-6} = 0,000132 \text{ м}^2$ . (Д.70)

### Д.2.3 Расчет стержня шатуна

Из динамического расчета имеем:  $P_{сж} = P_{\Gamma} + P_j = 26264 \text{ Н} = 0,02626 \text{ МН}$   
при  $\varphi = 370^\circ$ ;

$P_{сж} = P_{\Gamma} + P_j = -9386 \text{ Н} = -0,00939 \text{ МН}$  при  $\varphi = 0^\circ$ ;  $L_u = 120 \text{ мм}$ . Принимаем:  
 $h_u = 24 \text{ мм}$ ;  $b_u = 15 \text{ мм}$ ;  $a_u = 5 \text{ мм}$ ;  $t_u = 4,5 \text{ мм}$ . Из расчетов поршневой и  
кривошипной головок шатуна:  $d = 24 \text{ мм}$ ,  $d_1 = 51 \text{ мм}$ .

Площадь и моменты инерции расчетного сечения В - В:

$$F_{cp} = h_u * b_u - (b_u - a_u) * (h_u - 2 * t_u) = 24 * 15 - (15 - 5) *$$

$$* (24 - 2 * 4,5) = 210 \text{ мм}^2 = 210 * 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$J_x = \frac{h_u^3 * b_u - (b_u - a_u) * (h_u - 2 * t_u)^3}{12} = \frac{24^3 * 15 - (15 - 5) * (24 - 2 * 4,5)^3}{12} =$$

$$= 14468 \text{ мм}^2 = 144,7 * 10^{-10} \text{ м}^4;$$

$$J_y = \frac{h_u * b_u^3 - (b_u - a_u) * (h_u - 2 * t_u)^3}{12} = \frac{24 * 15^3 - (15 - 5) * (24 - 2 * 4,5)^3}{12} =$$

$$= 6408 \text{ мм}^2 = 641 * 10^{-11} \text{ м}^4. \quad (\text{Д.71})$$

Максимальное напряжение от сжимающей силы: в плоскости шатуна

$$\sigma_{\max .x} = K_x * P_{сж} / F_{cp} = 1,077 * 0,02626 / (210 * 10^{-6}) = 135 \text{ МПа}, \quad (\text{Д.72})$$

где

$$K_x = 1 + \left( \sigma_e / \pi^2 E_{uu} \right) * \left( L_{uu}^2 F_{cp} / J_x \right) = 1 + \left( \frac{800 / 3,14^2 *}{* 2,2 * 10^5} \right) * \left( \frac{120^2 *}{* 210 / 14468} \right) = 1,077. \quad (Д.73)$$

Плоскости, перпендикулярной плоскости качения шатуна

$$\sigma_{\max .y} = K_y * P_{сж} / F_{cp} = 1,0206 * 0,02626 / (210 * 10^{-6}) = 128 \text{ МПа},$$

где:

$$\begin{aligned} K_y &= 1 + \left( \sigma_e / \pi^2 E_{uu} \right) * \left( L_1^2 F_{cp} / 4 * J_y \right) = 1 + \left( 800 / 3,14^2 * 2,2 * 10^5 \right) * \\ &* \left( 82,5^2 * 210 / 4 * 6408 \right) = 1,0206; \\ L_1 &= L_{uu} - (d + d_1) / 2 = 120 - (24 + 51) / 2 = 82,5. \end{aligned} \quad (Д.74)$$

Минимальное напряжение от растягивающей силы

$$\sigma_{\min} = P_p / F_{cp} = -0,00939 / (210 * 10^{-6}) = -44,7 \text{ МПа}. \quad (Д.75)$$

Средние напряжения и амплитуды цикла:

$$\begin{aligned} \sigma_{mx} &= (\sigma_{\max .x} + \sigma_{\min}) / 2 = (135 - 44,7) / 2 = 45,2 \text{ МПа}; \\ \sigma_{my} &= (\sigma_{\max .y} + \sigma_{\min}) / 2 = (128 - 44,7) / 2 = 41,7 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ax} &= (\sigma_{\max .x} - \sigma_{\min}) / 2 = (135 + 44,7) / 2 = 89,9 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ay} &= (\sigma_{\max .y} - \sigma_{\min}) / 2 = (128 + 44,7) / 2 = 86,4 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (Д.76)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{akx} &= \frac{\sigma_{ax} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{89,9 * 1,272}{0,86 * 1,9} = 102,3 \text{ МПа}; \\ \sigma_{aky} &= \frac{\sigma_{ay} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{86,4 * 1,272}{0,86 * 1,9} = 98,3 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (Д.77)$$

где:

$$k_{\sigma} = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (\sigma_B - 400) = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (800 - 400) = 1,272; \quad (Д.78)$$

$$\varepsilon_M = 0,86;$$

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

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

$$n_{\alpha x} = \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{akx} + \alpha_\sigma * \sigma_{mx})} = \frac{210}{(102,3 + 0,12 * 45,2)} = 1,95$$

$$n_{\alpha y} = \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{aky} + \alpha_\sigma * \sigma_{my})} = \frac{210}{(198,3 + 0,12 * 41,7)} = 2,03 \quad (\text{Д.79})$$

#### Д.2.4 Расчет шатунных болтов

Сила предварительной затяжки

$$P_{IP} = 2 * P_{jp} / i_\sigma = 2 * 0,0147 / 2 = 0,0147 \text{ МН.} \quad (\text{Д.82})$$

Суммарная сила, растягивающая болт

$$P_\sigma = P_{IP} + \chi * P_{jp} / i_\sigma = 0,0147 + 0,2 * 0,0147 / 2 = 0,0162 \text{ МН.} \quad (\text{Д.83})$$

где  $\chi = 0,2$ .

Максимальные и минимальные напряжения, возникающие в болте:

$$\sigma_{\max} = 4 * P_\sigma / (\pi * d_B^2) = 4 * 0,0162 / (3,14 * 0,0086^2) = 279 \text{ МПа};$$

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

Среднее напряжение и амплитуды цикла:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{279 + 253}{2} = 266 \text{ МПа} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{279 - 253}{2} = 13 \text{ МПа} \\ \sigma_{ak} &= \frac{\sigma_a * k_\sigma}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{13 * 3,43}{0,99 * 0,82} = 35,63 \text{ МПа}\end{aligned}\tag{Д.85}$$

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

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

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

### Д.3 Расчет коленчатого вала

Напряжения при изгибе:

$$\begin{aligned}\beta_\sigma &= \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_m} = \frac{150}{300} = 0,5 ; \\ \frac{(\beta_\sigma - \alpha_\sigma)}{(1 - \beta_\sigma)} &= \frac{0,5 - 0,4}{1 - 0,5} = 0,2.\end{aligned}$$

Напряжения при кручении:

$$\begin{aligned}\beta_\tau &= \frac{\tau_{-1}}{\tau_m} = 0,719 ; \\ \frac{(\beta_\tau - \alpha_\tau)}{(1 - \beta_\tau)} &= \frac{0,719 - 0,6}{1 - 0,719} = 0,42.\end{aligned}$$

### Д.3.1 Удельное давление на поверхности шеек

Шатунных шеек:

$$\begin{aligned}k_{\text{ШШСР}} &= \frac{R_{\text{ШШСР}}}{d_{\text{ШШ}} * l'_{\text{ШШ}}} = \frac{9342 * 10^{-6}}{48 * 22 * 10^{-6}} = 8,8 \text{ МПа}; \\k_{\text{ШШ макс}} &= \frac{R_{\text{ШШ макс}}}{d_{\text{ШШ}} * l'_{\text{ШШ}}} = \frac{21360 * 10^{-6}}{48 * 22 * 10^{-6}} = 20,2 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.87}$$

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

Коренных шеек:

$$\begin{aligned}k_{\text{КШСР}} &= \frac{R_{\text{КШСР}}}{d_{\text{КШ}} * l'_{\text{КШ}}} = \frac{1947 * 10^{-6}}{50 * 22 * 10^{-6}} = 1,77 \text{ МПа}; \\k_{\text{КШ макс}} &= \frac{R_{\text{КШ макс}}}{d_{\text{КШ}} * l'_{\text{КШ}}} = \frac{16459 * 10^{-6}}{50 * 22 * 10^{-6}} = 14,9 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.88}$$

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

### Д.3.2 Расчет коренной шейки

Момент сопротивления кручению коренной шейки

$$W_{\text{кш}} = \frac{\pi}{16} * d_{\text{кш}}^3 = \frac{3,14 * 50^3 * 10^{-9}}{16} = 24,5 * 10^{-6} \text{ м}^3\tag{Д.89}$$

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

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{M_{KШ\max}}{W_{\tau\kappa\mu}} = \frac{500 * 10^{-6}}{24,5 * 10^{-6}} = 20,4 \text{ МПа}; \\ \tau_{\min} &= \frac{M_{KШ\min}}{W_{\tau\kappa\mu}} = \frac{-201,6 * 10^{-6}}{24,5 * 10^{-6}} = -8,2 \text{ МПа}.\end{aligned}\tag{Д.90}$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}\tau_m &= \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{20,4 - 8,2}{2} = 6,1 \text{ МПа}; \\ \tau_a &= \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{20,4 + 8,2}{2} = 14,3 \text{ МПа}; \\ \tau_{ak} &= \frac{\tau_a * k_\tau}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{14,3 * 1,1}{0,72 * 1,2} = 18,2 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.91}$$

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

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

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

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

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

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

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ak} + \alpha_\tau * \tau_m} = \frac{115}{18,2 + 0,6 * 6,1} = 5,2\tag{Д.92}$$

### Д.3.3 Расчёт шатунной шейки

Момент сопротивления кручению шатунной шейки

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

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла :

$$\begin{aligned} \tau_{\text{max}} &= \frac{M_{\text{шши max}}}{W_{\text{шши}}} = \frac{552 * 10^{-6}}{21,7 * 10^{-6}} = 25,4 \text{ МПа}; \\ \tau_{\text{min}} &= \frac{M_{\text{шши min}}}{W_{\text{шши}}} = \frac{-148 * 10^{-6}}{21,7 * 10^{-6}} = -6,8 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (\text{Д.94})$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned} \tau_m &= \frac{\tau_{\text{max}} + \tau_{\text{min}}}{2} = \frac{25,4 - 6,8}{2} = 9,3 \text{ МПа}; \\ \tau_a &= \frac{\tau_{\text{max}} - \tau_{\text{min}}}{2} = \frac{25,4 + 6,8}{2} = 16,1 \text{ МПа}; \\ \tau_{\text{ак}} &= \frac{\tau_a * k_\tau}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{16,1 * 1,1}{0,73 * 1,2} = 18,2 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (\text{Д.95})$$

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

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

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

$\varepsilon_{M\tau} = 0,73$  - масштабный коэффициент;

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

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

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

Максимальное и минимальное нормальные напряжения асимметричного цикла шатунной шейки:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{M_{\varphi_M \max}}{W_{\sigma_{III}}} = \frac{6,76 * 10^{-6}}{10,85 * 10^{-6}} = 0,62 \text{ МПа}, \\ \sigma_{\min} &= \frac{M_{\varphi_M \min}}{W_{\sigma_{III}}} = \frac{-244 * 10^{-6}}{10,85 * 10^{-6}} = -22,5 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.97}$$

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

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{0,62 - 22,5}{2} = -10,9 \text{ МПа} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{0,62 + 22,5}{2} = 11,6 \text{ МПа} \\ \sigma_{ak} &= \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_{M\sigma} * \varepsilon_{n\sigma}} = \frac{11,6 * 1,8}{0,76 * 1,2} = 22,9 \text{ МПа}\end{aligned}\tag{Д.98}$$

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

$\alpha k_{\sigma} = 3,0$ ;

$\varepsilon_{M\sigma} = 0,76$  - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{n\sigma} = 1,2$  - коэффициент поверхностной чувствительности, определен при расчете коренной шейки.

Запас прочности шатунной шейки от нормальных напряжений определяется по пределу усталости

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

## Общий запас прочности шатунной шейки

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

### Д.3.4 Расчёт щеки

Максимальный и минимальный моменты, скручивающие щёку:

$$\begin{aligned} M_{\text{к.щ. max}} &= T_{\text{max}} * 0,5 * (l_{\text{к.щ.}} + h) = 2378 * 0,5 * (28 + 18) * 10^{-3} = 54,7 \text{ Н} * \text{м}; \\ M_{\text{к.щ. min}} &= T_{\text{min}} * 0,5 * (l_{\text{к.щ.}} + h) = -4081 * 0,5 * (28 + 18) * 10^{-3} = -93,9 \text{ Н} * \text{м}; \end{aligned} \quad (\text{Д.101})$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла щеки:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{max}} &= \frac{M_{\text{к.щ. max}}}{W_{\text{щ}}} = \frac{54,7 * 10^{-6}}{6,99 * 10^{-6}} = 7,8 \text{ МПа}; \\ \tau_{\text{min}} &= \frac{M_{\text{к.щ. min}}}{W_{\text{щ}}} = \frac{-93,9 * 10^{-6}}{6,99 * 10^{-6}} = -13,4 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (\text{Д.102})$$

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

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{m}} &= \frac{\tau_{\text{max}} + \tau_{\text{min}}}{2} = \frac{7,8 - 13,4}{2} = -2,8 \text{ МПа} \\ \tau_{\text{a}} &= \frac{\tau_{\text{max}} - \tau_{\text{min}}}{2} = \frac{7,8 + 13,4}{2} = 10,6 \text{ МПа} \\ \tau_{\text{ак}} &= \frac{\tau_{\text{a}} * k_{\tau}}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{10,6 * 0,7}{0,64 * 0,75} = 15,5 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (\text{Д.103})$$

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

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

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

Запас прочности щеки от касательных напряжений определяем по пределу усталости

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ак} + \alpha_{\tau} * \tau_m} = \frac{115}{15,5 + 0,6 * (-2,8)} = 8,32 \quad (\text{Д.104})$$

Максимальное и минимальное нормальные напряжения щеки:

$$P_{\text{щ. max}} = \frac{K_{\text{max}} + K_R}{2} = \frac{25617 - 15324}{2} = 5147 \text{ Н},$$

$$P_{\text{щ. min}} = \frac{K_{\text{min}} + K_R}{2} = \frac{-9386 - 15324}{2} = -12355 \text{ Н}, \quad (\text{Д.105})$$

$$M_{\text{щ. max}} = 0,25 * (K_{\text{max}} + K_R + 2 * (-P'_{\text{ПП}})) * l_{\text{ку}} = 0,25 * (25617 - 15324 + 2 * * 8000) * 28 * 10^{-3} = 184 \text{ Нм}$$

$$M_{\text{щ. min}} = 0,25 * (K_{\text{min}} + K_R + 2 * (-P'_{\text{ПП}})) * l_{\text{ку}} = 0,25 * (-12355 - 15324 + 2 * * 8000) * 28 * 10^{-3} = -81,8 \text{ Нм} \quad (\text{Д.106})$$

$$\sigma_{\Sigma \text{ max}} = \frac{M_{\text{щ. max}}}{W_{\text{щ}}} + \frac{P_{\text{щ. max}}}{F_{\text{щ}}} = \frac{184 * 10^{-6}}{4,21 * 10^{-6}} + \frac{5147 * 10^{-6}}{1368 * 10^{-6}} = 47,5 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\Sigma \text{ min}} = \frac{M_{\text{щ. min}}}{W_{\text{щ}}} + \frac{P_{\text{щ. min}}}{F_{\text{щ}}} = \frac{-81,8 * 10^{-6}}{4,21 * 10^{-6}} + \frac{-12355 * 10^{-6}}{1368 * 10^{-6}} = -25,9 \text{ МПа}, \quad (\text{Д.107})$$

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

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

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2} = \frac{47,5 - 25,9}{2} = 10,8 \text{ МПа}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}}{2} = \frac{47,5 + 25,9}{2} = 36,7 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{ак}} = \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_{M\sigma} * \varepsilon_{n\sigma}} = \frac{36,7 * 1,16}{0,7 * 0,75} = 81,1 \text{ МПа}. \quad (\text{Д.108})$$

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

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

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

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

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

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ак} + \alpha_\tau * \sigma_m} = \frac{150}{81,1 + 0,4 * 10,8} = 1,75 \quad (\text{Д.109})$$

Общий запас прочности шатунной шейки

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

#### Д.4 Расчёт газораспределения двигателя

##### Д.4.1 Основные размеры проходных сечений в горловине и в клапане

Площадь проходного сечения клапана при максимальном подъеме

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

Диаметр горловины клапана

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

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

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

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

$$h_{кл\max} = \sqrt{4,93d_{гор}^2 + 4,44F_{кл}} / 2,22 - d_{гор} = \sqrt{4,93 \cdot 25^2 + 4,44 \cdot 425} / 2,22 - 25 = 6,75 \text{ мм.} \quad (\text{Д.113})$$

#### Д.4.2 Определение перемещения клапана

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

Протяженность участка сбег

$$\Phi_0 = \frac{\pi^2 \Delta s}{2 \cdot 180 \cdot \omega'_{m0к}} = \frac{3,14159^2 \cdot 0,25}{2 \cdot 180 \cdot 0,02} = 0,342694 \text{ рад} \approx 19^\circ 38' \quad (\text{Д.114})$$

где  $\omega'_{m0к} = 0,02 \text{ мм/}^0$  - скорость клапана в конце сбег, принята в пределах, рекомендованных для безударных кулачков

Протяженность других участков ускорения клапана  $\Phi_1 = 23^\circ 30' = 0,410152 \text{ рад}$ ;  $\Phi_2 = 4^\circ = 0,069813 \text{ рад}$ ;  $\Phi_3 = 37^\circ = 0,645771 \text{ рад}$  удовлетворяет рекомендуемым соотношениям:

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

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

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

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

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

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

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

Вспомогательные величины и коэффициенты закона движения клапана:

$$k_1 = 8Z \left( \frac{\Phi_2}{\pi} \right)^2 = 8 \cdot \frac{5}{8} \left( \frac{0,069813}{3,14159} \right)^2 = 0,002469 ; \quad (\text{Д.115})$$

$$k_2 = \frac{5+Z}{6} \Phi_3^2 = \frac{5+5/8}{6} \cdot 0,645771^2 = 0,390956 ;$$

$$k_3 = \frac{4+Z}{3} \Phi_3 = \frac{4+5/8}{3} \cdot 0,645771 = 1,130099 ;$$

$$K_1 = k_1 + k_2 + k_3 \Phi_2 = 0,002469 + 0,390956 + 1,221730 \cdot 0,120099 = 0,472321 ; \quad (\text{Д.116})$$

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

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

$$c_{11} = \frac{K_1 \omega''_{m0\kappa} + K_2 h_{m\max}}{2K_1 + K_2 \Phi_1} = \frac{0,472321 \cdot 1,145917 + 1,185654 \cdot 6,75}{2 \cdot 0,472321 + 1,185654 \cdot 0,410152} = 7,006912 , \quad (\text{Д.117})$$

где  $\omega''_{m0\kappa} = \omega'_{m0\kappa} \cdot 180 / \pi = 0,02 \cdot 180 / 3,14159 = 1,145917 ;$

$$c_{12} = (c_{11} - \omega''_{m0\kappa}) \frac{\Phi_1}{\pi} = (7,006912 - 1,145917) \frac{0,410152}{3,14159} = 0,765185 \quad (\text{Д.118})$$

$$c_{32} = (2c_{11} - \omega''_{m0\kappa}) / K_2 = (2 \cdot 7,006912 - 1,145917) / 1,185654 = 10,853003$$

$$c_{21} = c_{32} k_3 = 10,853003 \cdot 1,130099 = 12,264968$$

$$c_{22} = c_{32} k_1 = 10,853003 \cdot 0,002469 = 0,026796$$

$$c_{31} = c_{32} \frac{1-Z}{6\Phi_3^2} = 10,853003 \frac{1-5/8}{6 \cdot 0,645771^2} = 1,626570$$

$$c_{33} = c_{32} k_2 = 10,853003 \cdot 0,390956 = 4,243047$$

Подъем (перемещение) клапана по углу поворота кулачка  $\Phi_\kappa$   
(распределительного вала  $\Phi_p$ ):

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

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

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

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

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

$$h_{1k} = 3,1238972 \text{ мм};$$

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

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

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

$$h_{2k} = 4,006948768 \text{ мм};$$

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

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

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

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

Величины перемещений толкателя по участкам  $\Phi_0$ ,  $\Phi_1$  и  $\Phi_3$  в таблицу Д.1

Таблица Д.1- Перемещение клапана

$\varphi_p^\circ$	$\Phi_i^\circ$	$\varphi_k^\circ$	$h, мм$	$\varphi_p^\circ$	$\Phi_i^\circ$	$\varphi_k^\circ$	$h, мм$
331°22'	$\Phi_0=19^\circ38'$	0	0	62°30'	$\Phi_2=37^\circ$	30	8,088
336°22'		5	0,02	72°30'		20	7,307
34Г22'		10	0,076	82°30'		10	5,920
346°22'		15	0,193	87°30'		5	5,023
351		19°38'	0,25	90		2°30'	4,529
351	$\Phi_1=23^\circ30'$	0	0,25	90	$\Phi_2=4^\circ$	2°30'	4,529
356		5	0,387	92°30'		4	4,007
360		9	0,637	92°30'		2	4,007
6		15	1,390	94°30'		0	3,571
11		20	2,351	96°30'		23,5	3.124
14°30'	$\Phi_2=4^\circ$	23,5	3,124	96°30'	$\Phi_1=23^\circ30'$	23°30"	3.124
14°30'		0	3,124	100		20	2,351
16°30'		2	3,571	105		15	1,390
18°30'		4	4,007	111		9	0,637
18°30'		$\Phi_2=37^\circ$	0	4,007		115	5
23°30'	5		5,023	120	0	0,25	
28°30'	10		5,920	120	$\Phi_0=19^\circ38'$	19°38'	0,25
38°30'	20		7,307	124°38'		15	0,193
48°30'	30		8,088	129°38'		10	0,076
55°30'	37	8,250	134°38'	5		0,02	
0	37	8,250	139°38'	0		0	

#### Д.4.3 Определение время-сечения клапана газодинамическим методом

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

$$1_p^0 = 1/(6 \cdot n_p) = 1/(6 \cdot 2900) = 5,747126 \cdot 10^{-5} \text{ с} \quad (\text{Д.120})$$

Значит время-сечение клапана

$$\int_{t_1}^{t_2} F_{кл} dt = F_{кл}(t_2) - F_{кл}(t_1) = 1,5651 - 0,0215 = 1,5436 \text{ мм}^2 \cdot \text{с} \quad (\text{Д.121})$$

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

Средняя площадь проходного сечения клапана

$$F_{\text{кл ср}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt}{(\varphi_2 - \varphi_1) \cdot 1_p^0} = \frac{1,5436}{(90 - 0) \cdot 5,747126 \cdot 10^{-5}} = 298,4294 \text{ мм}^2 = 2,984294 \text{ см}^2 \quad .(\text{Д.122})$$

Средняя скорость потока смеси в седле клапана

$$\omega'_{\text{вн}} = V_{\text{н ср}} F_n / (i_{\text{кл}} \cdot F_{\text{кл ср}}) = 15,3 \cdot 52,8 / (2 \cdot 2,984294) = 133,359 \text{ м/с} \quad .(\text{Д.123})$$

Полное время-сечение клапана

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

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

#### Д.4.4 Расчет пружины клапана

Максимальная сила упругости пружин

$$P_{\text{нр max}} = KM_{\text{кл}} a \omega_{\text{кр}}^2 = 1,4 \cdot 145 \cdot 11,5 \cdot 293^2 \cdot 10^{-6} = 201 \text{ Н} \quad , \quad .(\text{Д.125})$$

где  $K = 1,4$  - коэффициент запаса;

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

механизма.

Минимальная сила упругости пружины

$$P_{np\min} = KM_{кл} (r_0 - r_2) \omega_k^2 = 1,4 * 145 * (15 - 8,5) * 298^2 * 10^{-6} = 113 H \quad (Д.126)$$

Жесткость пружины

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

Деформация пружины:

-предварительная

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

- полная

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

Размеры пружин (приняты по конструктивным соображениям):

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

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

Число рабочих витков пружины

$$i_p = \frac{G \cdot \delta_{np}^4 \cdot f_{\max}}{8P_{np\max} \cdot D_{np}^3} = \frac{8,3 \cdot 0,3^4 \cdot 1,325}{8 \cdot 201 \cdot 10^{-6} \cdot 2,2^3} = 5,202 \quad (Д.130)$$

где  $G = 8,3$  - модуль упругости второго рода, МН/см<sup>2</sup>.

Максимальные и минимальные напряжения в пружине:

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

$$\tau_{\min} = k' \frac{8P_{np\min} D_{np}}{\pi \delta_{np}^3} = 1,21 \frac{8 \cdot 113 \cdot 22 \cdot 10^{-9}}{3,14 \cdot 3^3 \cdot 10^{-9}} = 284 \text{ МПа},$$

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

Средние напряжения и амплитуды напряжений:

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{504 + 284}{2} = 394 \text{ МПа}; \quad (\text{Д.132})$$

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

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

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

Запас прочности пружины

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ak} + \alpha_\tau \tau_m} = \frac{350}{110 + 0,2 \cdot 394} = 1,85, \quad (\text{Д.134})$$

где  $\alpha_\tau = 0,2$ .

Расчет пружин на резонанс:

$$n_c = \frac{2,17 \cdot 10^7 \delta_{np}}{i_p D_{np}^2} = \frac{2,17 \cdot 10^7 \cdot 3}{5,202 \cdot 22^2} = 29569; \quad (\text{Д.135})$$

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

#### Д.4.5 Расчет распределительного вала

Максимальная сила от выпускного клапана, действующая на кулачек

$$\begin{aligned} P_{T \max} &= \left[ P_{np \min} + \frac{\pi d_s^2}{4} (p_z - p'_z) \right] + M_T \omega_k^2 (r_1 - r_0) = \\ &= \left[ 113 + \frac{3,14 \cdot 0,026^2}{4} (0,445 - 0,1) \cdot 10^6 \right] + 145 \cdot 293^2 (57,2 - 15) \cdot 10^{-6} = 821 \quad \text{Н, (Д.136)} \end{aligned}$$

где:

$$\begin{aligned} d_s &= \left( \frac{1}{1,0 \div 1,2} \right) d_{en} = \frac{30}{1,15} = 26 \quad \text{мм – диаметр тарелки выпускного клапана;} \\ d_{en} &= (1,06 \div 1,12) d_{zop} = 1,12 \cdot 25 = 30 \quad \text{мм – диаметр тарелки впускного клапана;} \\ M_T &= m_{кл} + m_{np} / 3 + m_T = 95 + 60 / 3 + 30 = 145 \text{ г} \end{aligned}$$

Стрела прогиба распределительного вала

$$y = 0,8 \frac{P_{T \max} a^2 b^2}{El(d_p^4)} = 0,8 \frac{821 \cdot 27^2 \cdot 62^2}{2,2 \cdot 10^5 \cdot 89 \cdot (22^4)} = 0,000401 \quad \text{мм, (Д.137)}$$

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

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

по конструктивным соображениям;

$d_p = 22$  мм - наружный диаметр вала.

Напряжение смятия

$$\sigma_{см} = 0,418 \sqrt{\frac{P_{T \max} E}{b_k r_1}} = 0,418 \sqrt{\frac{0,000821 \cdot 2,2 \cdot 10^5}{0,014 \cdot 0,0572}} = 475 \quad \text{МПа, (Д.138)}$$

где  $b_k = 14$  мм - ширина кулачка.

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

Форм.	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<u>Документация</u>		
A4			15.БР.ЭМСУ.003.00.000.ПЗ	Пояснительная записка	1%	
A1			15.БР.ЭМСУ.003.00.000.СВ	Сборочный чертеж	2	
				<u>Сборочные единицы</u>		
		5	16.БР.ЭМСУ.006.00.005	Насос водяной	1	
		9	16.БР.ЭМСУ.006.00.009	Форсунка	4	
		18	16.БР.ЭМСУ.006.00.018	Масляный насос	1	
		11	16.БР.ЭМСУ.006.00.011	Фильтр масляный	1	
		6	16.БР.ЭМСУ.006.00.006	Поршень в сборе	4	
				<u>Детали</u>		
		3	16.БР.ЭМСУ.006.00.003	Шкив привода генератора	1	
		8	16.БР.ЭМСУ.006.00.008	Коленчатый вал	1	
		4	16.БР.ЭМСУ.006.00.004	Маховик	1	
		7	16.БР.ЭМСУ.006.00.007	Шатун	4	
		1	16.БР.ЭМСУ.006.00.001	Блок цилиндров	1	
		10	16.БР.ЭМСУ.006.00.010	Поддон	1	
		15	16.БР.ЭМСУ.006.00.015	Головка блока	1	
		17	16.БР.ЭМСУ.006.00.017	Кожух ГРМ	1	
		14	16.БР.ЭМСУ.006.00.014	Коллектор впускной	1	
				<b>16.БР.ЭМСУ.006.00.000.СП</b>		
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		
Разраб.		Лазарев Н.Н.			Литера	Лист
Проверил		Смоленский В.В.				Листов
						1
						2
Н. контр.		Смоленский В.В.			ТГУ, ЭМСБ-1201	
Утвердил		Павлов Д.А.				
				Автомобильный двигатель с двухтопливной системой питания		

