

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

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

13.03.03 (141100.62) «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Автомобильный двигатель с двухтопливной системой питания

---

|               |  |                                 |
|---------------|--|---------------------------------|
| Студент(ка)   | <u>Лазарев Николай Николаевич</u><br><small>(И.О. Фамилия)</small> | <small>(личная подпись)</small> |
| Руководитель  | <u>В.В. Смоленский</u><br><small>(И.О. Фамилия)</small>            | <small>(личная подпись)</small> |
| Консультант   | <u>М.И. Фесина</u><br><small>(И.О. Фамилия)</small>                | <small>(личная подпись)</small> |
| Нормоконтроль | <u>А.Г. Егоров</u><br><small>(И.О. Фамилия)</small>                | <small>(личная подпись)</small> |

**Допустить к защите**

Зав. кафедрой «ЭМСУ» к.т.н., Д.А. Павлов  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Тольятти 2016

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

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

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ» \_\_\_\_\_ 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<br><i>Чертеж диаграмм теплового расчета; ВСХ</i>   | Таблицы, описания<br>Демонстрационный лист   | 30 апреля 2016 г.  | 90%                             |                                 |                      |
| 2                 | Расчет кинематики и динамики двигателя<br><i>Чертеж диаграмм кинематического и динамического расчетов</i>                              | Таблицы, описания<br>Демонстрационный лист   | 5 мая 2016 г.  | 90%                             |                                 |                      |
| 3                 | Расчет основных деталей двигателя  | Таблицы, описания<br>Демонстрационный лист   | 11 мая 2016 г.   | 90%                             |                                 |                      |
| 4                 | Расчет механизмов и систем двигателя   | Таблицы, описания<br>Демонстрационный лист   | 15 мая 2016 г.   | 90%                             |                                 |                      |
| 5                 | Описание конструкции спроектированной установки  | Раздел записки<br>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<br>двигатели, питаемые природным газом | 9  |
| 1.2 Системы впрыска газа   | 11 |
| 2 Тепловой расчет и тепловой баланс двигателя работающего на сжатом<br>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<br>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 питания 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,<br>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 газозвдушной 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

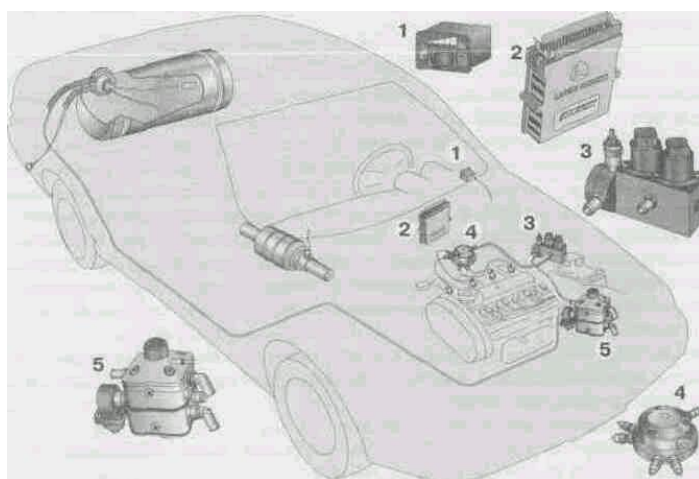
излишнее давление во впускной трубе в момент хлопка газовой смеси.

### 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  $n=5600 \text{ мин}^{-1}$ ,  
 $A_n=95/5600=0,016964286 \text{ МПа}$ , 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  $n = 5600 \text{ об/мин}$

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

Температура в конце впуска при  $n=5600 \text{ об/мин}$

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

Коэффициент наполнения при  $n=5600 \text{ об/мин}$ :

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

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

Окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 8.

Таблица 8 – Параметры процесса впуска и газообмена

| Параметры                | Процесс впуска и газообмена |        |        |        |
|--------------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| $n, \text{мин}^{-1}$     | 1000                        | 3200   | 5600   | 6000   |
| $\alpha$                 | 1                           | 1      | 1      | 1      |
| $T_r, \text{K}$          | 850                         | 900    | 950    | 970    |
| $P_r, \text{МПа}$        | 0,1040                      | 0,1082 | 0,1180 | 0,1200 |
| $\Delta T, \text{°C}$    | 24,3                        | 18,1   | 10     | 8,7    |
| $\Delta p_a, \text{МПа}$ | 0,0005                      | 0,004  | 0,015  | 0,017  |
| $p_a, \text{МПа}$        | 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  |
| $T_a, \text{K}$          | 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:

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

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

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:

| н, 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

| $n, \text{мин}^{-1}$ | $V_z, \text{м}^3$ | $T_z, \text{К}$ | $P_z, \text{МПа}$ | $\delta$ | $n_2$   | $P_b, \text{МПа}$ | $T_b, \text{К}$ | $T_r, \text{К}$ | $\Delta, \%$ |
|----------------------|-------------------|-----------------|-------------------|----------|---------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| 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 |       |       |       |
|---------------------------------|--|-------|-------|-------|
| $n$ , мин <sup>-1</sup>         | 1000   | 3200  | 5600  | 6000  |
| $p_b$ , Мпа                     | 1,065  | 1,064 | 1,210 | 0,943 |
| $p_i$ , Мпа                     | 1,023  | 1,021 | 1,161 | 0,905 |
| $\eta_i$                        | 0,395  | 0,347 | 0,356 | 0,357 |
| $v_i$ , м <sup>3</sup> /(кВт ч) | 0,257  | 0,292 | 0,285 | 0,284 |
| $v_{н.ср.}$ , м/с               | 2,37   | 7,57  | 13,25 | 14,2  |
| $p_M$ , Мпа                     | 0,061  | 0,119 | 0,183 | 0,194 |
| $p_e$ , 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 |
| $v_e$ , м <sup>3</sup> /(кВт 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  $S=71\text{мм}$ ,  
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  $S = 71\text{мм}$  и  $D = 82\text{мм}$ .

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  $n=5600\text{об/мин}$

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

- крутящий момент при  $n=5600 \text{ об/мин}$

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

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

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

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

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

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:

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

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

$\mu$  – коэффициент расхода топлива,

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

$f \varnothing = 0,144/0,96 = 0,15 \text{ мм}^2$ ; 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:

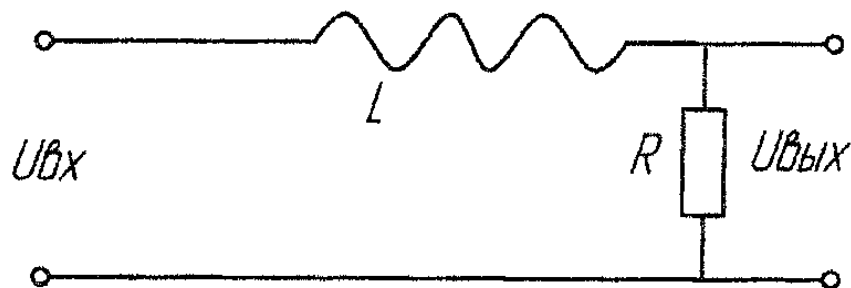


Рисунок 6.1 – Эквивалентная электрическая схема электромагнитной форсунки

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.

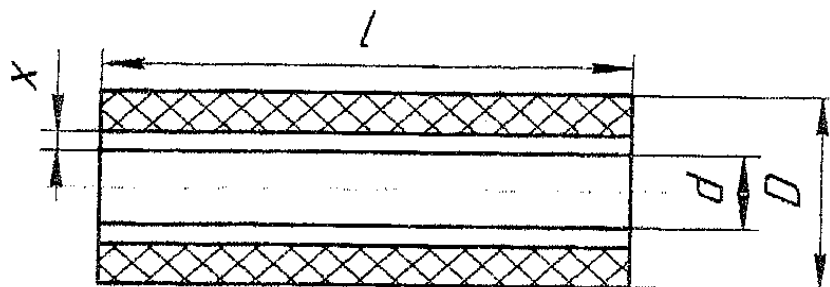


Рисунок 6.2 – Конструктивные размеры электромагнита

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

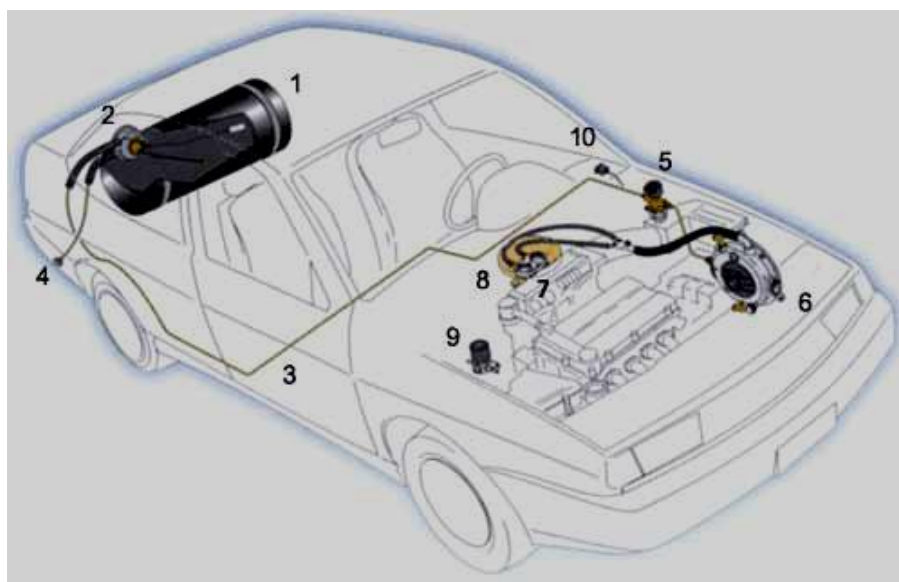
с СПГ или передвижное газозаправочное средство) должен быть расположен вне здания на открытой площадке.

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><br>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><br>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 | DX1-2    | 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  | #3HAC!   | 2094,00 | #3HAC!   | 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.

| $\varphi^\circ$ | $\Delta p_T$ , Мпа | $W$ , м/с <sup>2</sup> | $p_{i2}$ , МПа | $p_s$ , Мпа | $\text{tg}\beta$ | $p_N$ , МПа | $1/\cos\beta$ | $p_{s2}$ , Мпа | $\cos(\beta+\varphi)/\cos\beta$ | $p_{k2}$ , Мпа | $\sin(\beta+\varphi)/\cos\beta$ | $p_{T2}$ , 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                     |                   |                              |                   |                              |                   |                              |                   | $M_{кр},$<br>Нм |
|-----------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|-----------------|
|                 | 1-й                          |                   | 2-й                          |                   | 3-й                          |                   | 4-й                          |                   |                 |
|                 | $\varphi^\circ$<br>кливошипа | $M_{кр.ц},$<br>Нм | $\varphi^\circ$<br>кливошипа | $M_{кр.ц},$<br>Нм | $\varphi^\circ$<br>кливошипа | $M_{кр.ц},$<br>Нм | $\varphi^\circ$<br>кливошипа | $M_{кр.ц},$<br>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:

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

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

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,  $E = 1,0 \cdot 10^5$  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

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

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

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

где  $m_{\text{в.з.}} = 0,06 * m_{II} = 0,06 * 0,528 = 0,032 \text{ кг}$  - 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;  $\varepsilon_{II} = 1$  - 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

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

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:

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

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

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

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла :

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

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:

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

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

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

$\varepsilon_{\text{n}\tau} = 0,75$  - 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'            |                      | 23,5              | 3,124   | 96°30'            |                      | $\Phi_1=23^\circ30'$ | 23°30"  |
| 14°30'            | $\Phi_2=4^\circ$     | 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                    |                      | 0,387   |
| 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

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

Средняя скорость потока смеси в седле клапана

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

Полное время-сечение клапана

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

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

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

где  $K = 1,4$  - коэффициент запаса;

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

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

$$= \left[ 113 + \frac{3,14 \cdot 0,026^2}{4} (0,445 - 0,1) \cdot 10^6 \right] + 145 \cdot 293^2 (57,2 - 15) \cdot 10^{-6} = 821 \quad \text{Н, (Д.136)}$$

где:

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

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

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

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     |
| Н. контр. |      | Смоленский В.В. |                          |                                 |  | 1          |
| Утвердил  |      | Павлов Д.А.     |                          |                                 |  | 2          |
|           |      |                 |                          |                                 | Автомобильный двигатель с двухтопливной системой питания |            |
|           |      |                 |                          |                                 | ТГУ, ЭМСБ-1201   |            |

